Ausmaß der Lichtverschmutzung und Optionen zur Minderung der negativen Auswirkungen

Helga Kuechly, Luftbild Umwelt Planung GmbH (LUP) und
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Dr. Josiane Meier, Technische Universität Berlin (TUB)
Dr. Christopher Kyba, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Dr. Andreas Hänel, Museum am Schölerberg (MaS)

LUFTBILD UMWELT PLANUNG

GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam

Technische Universität Berlin

MUSEUM am Schölerberg

Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages vorgelegt dem Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Eingereicht am 13.12.2017.

Zitierempfehlung:

Kuechly, H.; Meier, J.; Kyba, C.; Hänel, A. (2018): Ausmaß der Lichtverschmutzung und Optionen zur Minderung der negativen Auswirkungen, LUP – Luftbild Umwelt Planung GmbH und Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. DOI: https://doi.org/10.48440/GFZ.1.4.2020.002

Impressum

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
D- 14473 Potsdam

Veröffentlicht in Potsdam, Deutschland
April 2021

DOI: https://doi.org/10.48440/GFZ.1.4.2020.002

Cover-Foto: Christopher Kyba
Creative Commons Attribution 3.0 Unported License

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis 4

Abbildungsverzeichnis 7

Tabellenverzeichnis 11

1. Zusammenfassung 13

2. Einführung 34

3. Analyse der Ausgangssituation in Deutschland, sowie Ursachen und Trends von technologischen und lichtplanerischen Entwicklungen 39

3.1. Messmethoden zur Erfassung der künstlichen nächtlichen Beleuchtung 39

3.1.1. Einführung in photometrische und radiometrische Messgrößen 40

3.1.2. Leuchtenkataster 42

3.1.3. Horizontale Luft- und Satellitenbildaufnahmen 43

3.1.4. Vertikale Fotografien 47

3.1.5. Messungen der Himmelshelligkeit 50

3.1.6. Simulation der Himmelshelligkeit und des künstlichen Himmelsleuchtens 53

3.1.7. Zusammenfassende kritische Beurteilung der Methodenansätze 55

3.2. Räumliche und zeitliche Variabilität künstlicher Beleuchtung 58

3.2.1. Räumliche Verteilung des nach oben emittierten Lichtes aus Fernerkundungsdaten 59

3.2.2. Räumliche Verteilung der Himmelshelligkeit 62

3.2.3. Zeitliche Veränderungen der Beleuchtung (stündlich bis saisonal) 65

3.3. Ausmaße und Trends der künstlichen nächtlichen Beleuchtung in Deutschland und Europa 70

3.3.1. Ausmaß und Trend von beleuchteten Flächen und Beleuchtungsintensität anhand von Satellitendaten 71

3.3.2. Ausmaß und Trend der Himmelshelligkeit 75

3.3.3. Gegenwärtige Veränderungen der Beleuchtungstechnologien und Trends bei der Nutzung und Lichtplanung 79

3.4. Nicht intendierte visuelle Auswirkungen von Außenbeleuchtung auf den Menschen & Auswirkungen auf das Sicherheitsempfinden 89

3.5. Beeinträchtigtes Erleben natürlich dunkler Nächte durch Lichtverschmutzung 92

3.6. Beeinträchtigungen der erdgebundenen Weltraumforschung durch Lichtverschmutzung 94

4. Identifikation von technischen und regulatorischen Handlungsoptionen 95

4.1. Zusammenfassung und Diskussion bestehender Regulationen in Deutschland und der EU 95

4.1.1. Rechtliche Regelungen und Rahmensetzungen in Deutschland 96

4.1.2. Weitere Instrumente und Ansätze zur Minimierung der Lichtverschmutzung in Deutschland 100

4.1.3. Industrienormen 110

4.1.4. Verbraucherinformation 113

4.1.5. Förderpolitik 114

4.1.6. Regelungen in der EU und der Schweiz 115

4.2. Handlungsoptionen 129

4.2.1. Darstellung möglicher Parameter für Verwendung in Regulierungen der Lichtverschmutzung 129

4.2.2. Handlungsinstrumente 140

4.3. Positive technologische Entwicklungen zur Reduzierung der Lichtverschmutzung 144

4.4. Vorschläge für ein erhöhtes Bewusstsein für das Thema Lichtverschmutzung bei der Beleuchtungsplanung, Beratung und Öffentlichkeitsarbeit 148

5. Fazit & Einschätzung der Gutachter*innen 153

6. Literaturverzeichnis 156

Abkürzungsverzeichnis

AECI	annual energy consumption indicator,
ANPCEN	Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environment Nocturnes
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
ASR	Arbeits- und Gesundheitsschutz
BAFU	Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BauGB	Baugesetzbuch
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
cd	Candela
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CIE	Commission international de l'eclairage
DENA	Deutsche Energie-Agentur
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMSP-OLS	Defense Meteorological Satellite Program Operational Linescan System
DStGB	Deutscher Städte- und Gemeindebund
EU	Europäische Union
F+E-Vorhaben	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
FNL	Normenausschuss Lichttechnik
GOBO	Graphical Optical Blackout
GPP	Green Public Procurement
IDA	International Dark-Sky Association
IEA	Internationalen Energieagentur
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization

ISS	Internationalen Raumstation
ITU	International Telecommunication Union
K	Kelvin
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
km	Kilometer
LAI	Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz
LED	Leuchtdiode (engl. light-emitting diode)
LiTG	Lichttechnische Gesellschaft
lm	Lumen
LoNNe	Loss of the Night Network
LUCI	Lighting Urban Community International
lx	Lux
m	Meter
mag/arcsec^2	Magnitude/Quadratbogensekunden
mdr	Mitteldeutscher Rundfunk
NKI	Nationalen Klimaschutzinitiative
NOAA	US National Oceanic and Atmospheric Administration
OLED	organische Leuchtdiode (engl. organic light emitting diode)
PACE	Council of Europe Parliamentary Assembly
PDI	power density indicator
PwC	PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfungsgesellschaft
RASC	Royal Astronomical Society of Canada
RAW	Rohdatenformat
sek.	Sekunden
SMS	Kurznachrichtendienst (engl. Short Message Service)
SQM	Sky Quality Meter
sr	Steradiant
SSK	Strahlenschutzkommission
StVO	Straßenverkehrszulassungsverordnung
TA	Technische Anordnung
UBA	Umweltbundesamt
UFR	Abstrahlung und Reflexion in horizontaler Richtung (engl. Upward Flux Ratio)

ULR	Abstrahlung in horizontaler Richtung (engl. Upward Light Ratio)
UNESCO	The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
VDN	Verbands Deutscher Naturparke
VIIRS DNB	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day/Night Band
W	Watt
ZVEI Licht	Fachverband Licht im Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektrizitätsindustrie

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auswahl einiger Arten von Lichtverschmutzung und gut ausgerichtete Außenbeleuchtung. (Bildquelle: "Umgebungsaufhellung" von Andrej Mohar, unter CC BY-NC 4.0, alle anderen Fotos von den Autoren). 35

Abbildung 2: Darstellung der intendierten und nicht intendierten Lichtemissionen, ULOR = prozentualer Anteil des in den oberen Halbraum abgegebenen Lichts, DLOR = prozentualer Anteil des in den unteren Halbraum abgegebenen Lichts (adaptiert nach LiTG 2011; Lang 2013, Bearbeiter: Sascha Gey) 36

Abbildung 3: Illustration lichttechnischer Größen in Anlehnung an BAFU (2017, S. 121 Bearbeiter: Sascha Gey) 41

Abbildung 4: Nächtliches Berlin, fotografiert von der Internationalen Raumstation am 31. März 2016, 00:03 Uhr, CEST. (Bildquelle: Image ISS047-E-29989 Earth Science and Remote Sensing Unit, Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von NASA Johnson Space Center) 43

Abbildung 5: Der Berliner Flughafen Tegel, Berlin am 15. März 2012, 21:37 Uhr (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Christopher Kyba, aufgenommen für die Freie Universität Berlin) 44

Abbildung 6: Ein Ausschnitt der Stadt Calgary/Alberta, aufgenommen von einem Astronauten der Internationalen Raumstation um 00:07 Uhr MST am 28. November 2015. (Bildquelle: ISS045-E-155029, Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center) 45

Abbildung 7: Panoramen vom Kreuzberg (Rhön, oben) nach Süden mit zahlreiche Orten, die stark in die Horizontale abstrahlen. Darunter die Panorama von Fulda (Mitte) Flagstaff (unten) zeigen zum Beispiel den höheren Weißanteil in Fulda, auch wenn durch die unterschiedlichen Beleuchtungseinstellungen die Bilder nicht unmittelbar vergleichbar sind (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel). 47

Abbildung 8: Potsdamer Platz in der Nacht von Dienstag, 1. Juli 2014 um 23:00 und 03:00 Uhr (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Philipp Elgert and Franziska Ottrembka – FilouBerlin, Fachgebiet Stadt- und Regionalökonomie – TU Berlin) 48

Abbildung 9: Unterschiedliche Himmelsansichten in Deutschland. Die Aufnahmen wurden mit einer Fischaugenoptik gemacht und mit gleichen Einstellungen (bei Belichtungszeiten von 30 und 180 Sekunden) aufgenommen. Parallel wurde die Himmelshelligkeit (in Größenklassen/Quadratbogensekunden (mag/arcsec^2)) mit einem SQM-L gemessen und näherungsweise in photometrische Leuchtdichten (in Candela/m^2, cd/m^2) umgewandelt (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel). 51

Abbildung 10: Zwei mit der "Verlust der Nacht-App" erzielte Beobachtungen mit sehr unterschiedlichen Genauigkeiten. Die Farbe der Sterne zeigt an, ob sie gesehen werden konnten oder nicht, und lichtschwächere Sterne werden weiter oben angezeigt. Die Beobachtung auf der linken Seite war sehr konstant und widerspruchsfrei, da die Sichtbarkeit der Sterne mit ihrer Helligkeit zunahm ("magnitude"). Die Beobachtung auf der rechten Seite zeigte diese

Eigenschaften nicht (schwächer leuchtende Sterne wurden im Vergleich zu helleren Sternen erkannt) und wurde deshalb nicht für weitere wissenschaftliche Auswertungen herangezogen. (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von „My Sky at Night“). 52

Abbildung 11: Berechnete künstliche Himmelshelligkeit über Europa nach dem neuen Weltatlas mit der gegenwärtige Beleuchtungstechnologie (A) und eine Vorhersage für eine flächendeckende Umstellung auf 4000 K LED Technologie bei gleicher Beleuchtungsstärke (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Falchi et al. 2016). Die Farben geben die Erhöhung der Himmelshelligkeit im Vergleich zu einem natürlichen Nachthimmel an (grün: 0,32–0,64, gelb: 1,28–2,56, rot: 5,12–10,2, rosa: 20,5–41 mal so hell wie unter natürlichen Bedingungen,genauere Angaben siehe Tabelle 1, Falchi et al. 2016 S. 9). 55

Abbildung 12: Einschätzung des Pro-Kopf-Energieverbrauch für künstliche Beleuchtung in kWh aus nächtlichen Satellitendaten (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Sánchez de Miguel 2015). Da der Energieverbrauch indirekt über die Lichtemissionen der Satelliten bestimmt wird, Daten des DMSP-OLS nicht kalibriert sind und keine stabilen VIIRS Daten vorliegen sollten die Ergebnisse mehr als Orientierung und weniger als Richtwerte angesehen werden. 59

Abbildung 13: Vergleich der gesamten Lichtemission im Verhältnis zur Einwohnerzahl für deutsche (rot) und amerikanische (schwarz) Gemeinden (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Kyba et al. (2015b), Lizenz-Nr. CC BY 4.0)..... 60

Abbildung 14: Sechs europäische Hauptstädte, aufgenommen mit derselben Kamera-Konfiguration von der Internationalen Raumstation (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center: die einzelnen Bild-Identifikations-Nummern sind erhältlich über Kyba et al. (2015b)). 61

Abbildung 15: Himmelshelligkeit unter klaren und bewölkten Bedingungen in unterschiedlichen Entfernungen von der Stadt Balaguer/Spanien. (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Jechow et al. 2017). 63

Abbildung 16: Lichtquellen die auch am Tag leuchten zeigen auf, dass Energieeffizienz mehr bedeutet als die reine Lichtausbeute (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von C. Kyba). 65

Abbildung 17: Die Skyline von Manhattan, New York. (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung Gregory Dobler) 67

Abbildung 18: Temporaler Verlauf unterschiedlicher Beleuchtungsarten an den drei Berliner Untersuchungsstandorten: Die Prozentwerte geben den Anteil der jeweils in Betrieb befindlichen Beleuchtungseinheiten (z.B. Straßenbeleuchtung = eine Einheit) an. (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von J. Meier 2017) 68

Abbildung 19: Der Nachthimmel in Preußisch-Oldendorf vor (links) und nach dem Abschalten der Straßenbeleuchtung. Die Himmelsansichten oben sind auf einem Sportplatz im Ortszentrum gemacht, die Panoramen vom Ortsrand aus Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel)..... 70

Abbildung 20: Jahresrate der Veränderung der Beleuchtung auf globaler Ebene nach Ländern: (A) beleuchtete Flächen und (B) Leuchtdichte beleuchteter Flächen. (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Kyba et al. 2017a). 72

Abbildung 21: Jährliche Veränderungsraten an beleuchteter Fläche (A) und an Strahldichte (B) von 2012 bis 2016 für die deutschen Bundesländer (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung Kyba et al. 2017b). 73

Abbildung 22: Veränderungen beleuchteter Fläche in Deutschland aufgeteilt in Pixel von ca. 100 km^2. Die beleuchtete Fläche nimmt in den roten Flächenelementen zu (bis zu 19,5 km^2) und in den blauen Flächenelementen ab (bis zu -5,7 km^2). Zu beachten ist, dass zur besseren Erkennbarkeit die Farbabstufung für Zunahmen doppelt so steil ist wie für Abnahmen Bundesländer (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung Kyba et al. 2017b). 74

Abbildung 23: Beispiel von beobachteten Änderungen der nach oben abgegebenen gemessenen Strahlung in Sünching und Umgebung in Bayern. Links die vom Satelliten für 2012 gemessene Strahlung, rechts für 2016. Fast alles Licht hat in der Gegend über den betrachteten Zeitraum zugenommen (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung Kyba et al. 2017b). 75

Abbildung 24: Fotos des Himmels über Szekszárd/Ungarn vor (oben) und nach (unten) einer Umrüstung von Hochdruck-Natrium-Lampen mit starkem Aufwärts-Strahlungsanteil zu abgeschirmten 4500 K-LED-Lampen. Die Fotos wurden unter identischen Bedingungen aufgenommen (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Zoltán Kolláth). 78

Abbildung 25: (links): Im Vordergrund Leuchtstoffröhren mit einer Farbtemperatur von 4000 K, im Hintergrund LED-Leuchten mit der gleichen Farbtemperatur, deshalb sind Farbunterschiede kaum festzustellen (Foto: A. Hänel). (rechts): Relative spektrale Verläufe von Quecksilberdampflampe und LED mit Farbtemperaturen von 3000 K und 4200 K (Daten von DMSP) 80

Abbildung 26: Ein Eine Straße mit Natriumdampfbeleuchtung vor (links) und nach der Umrüstung auf 4000K-LED bei normalem Betrieb (mitte) und nach 50% Reduzierung (rechts) um 22:30 Uhr. Besonders der untere Grün-Auszug, der der menschlichen Augenempfindlichkeit entspricht, zeigt, dass die Straße selbst nach der Reduzierung deutlich heller erscheint als mit Natriumdampfbeleuchtung (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel). 81

Abbildung 27: voll abgeschirmte Altstadtleuchten durch entsprechendes LED-Modul im Dach, Mitte: ineffiziente Kugelleuchte, Rechts: “Maiskolben”Lampen als Retrofit-Lampen (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel). 82

Abbildung 28: Der Parkplatz links wurde auf eine warmweiße (3000 K) LED-Beleuchtung umgerüstet mit Helligkeiten, die etwa der vorherigen Beleuchtung entsprachen. Der Parkplatz rechts wurde mit einer neutralweißen (4000 K) Beleuchtung und wesentlich (etwa 3-4-mal) höheren Beleuchtungswerten umgerüstet, entsprechend mehr Energie wird verbraucht (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel). 83

Abbildung 29: Einsatz von Skybeamern bei der Luminale während der Light+Building in Frankfurt (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel und C. Kyba) 86

Abbildung 30: Leuchtpylon mit gemessenen Leuchtdichten (in cd/m²). Durch LED werden hohe Leuchtdichten erreicht, eine Begrenzung auf 100 cd/m² erscheint sinnvoll. (Bildquelle und Messungen: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel)..... 87

Abbildung 31: Karte beleuchtungsbezogener Strategien deutscher Städte und Gemeinden im Jahr 2015 (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von D. Köhler).....105

Abbildung 32: Verteilung von Nachtschutzgebieten (unterschiedliche Zertifizierung), Stand: Frühjahr 2014 (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Meier 2014) 106

Abbildung 33: Astronomische Beobachtungen im Sternenpark Westhavelland (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).....109

Abbildung 34: Straßen mit voll abgeschirmter Beleuchtung in Sta. Cruz de La Palma (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).....127

Abbildung 35: Beispiel schräg (links) und horizontal (nur dann ist ULR = 0) montierte voll abgeschirmte Leuchte mit ULOR = 0 (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel) 131

Abbildung 36: Links: voll abgeschirmte (Mitte) und zwei teilweise abgeschirmte Leuchten (oben und unten), Mitte: eine nicht abgeschirmte Leuchte, rechts: “Maiskolben”-LED-Lampen als Retrofit-Leuchtmittel (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Hänel) 132

Abbildung 37: Adaptive Tankstellenbeleuchtung in Möderbrugg, Österreich: Bei Annäherung eines Fahrzeuges wird die Helligkeit langsam erhöht, die dann bei der Betankung den höchsten Helligkeitswert erreicht (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel) 144

Abbildung 38: Umrüstung der Beleuchtung einer Tankstelle mit eingelassenen Leuchten, die damit nicht mehr zu den Seiten abstrahlen und sehr geringe Blendung verursachen, zeigen, wie Lichtverschmutzung ohne Beleuchtungsnachteile reduziert werden kann (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Michael Weasner).....145

Abbildung 39: Strahler mit GOBO-Technik (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Andrej Mohar).....146

Abbildung 40: Spektren unterschiedlicher Leuchtmittel mit geringen Blauanteilen basierend auf Messungen von Harald Bardenhagen (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).....146

Abbildung 41: Straße mit pc amber LED-Beleuchtung, Rasdorf, Rhön (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel) 147

Abbildung 42: Musterstraße der RhönEnergie in Fulda mit warmweißen, gelben und Hybrid-LED-Leuchten (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).....150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: typische Werte von Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung nach Hänel et al. 2017): 42

Tabelle 2: Bevölkerung (und Landfläche), die durch erhöhte Himmelshelligkeit im Zenit betroffen ist, in vier gestaffelte Ebenen für Deutschland, USA, die EU und die Welt. Die Schwelle für „von Kunstlicht beeinflusst“ beruht auf Angaben der Kommission 50 zum „Schutz der existierenden und möglichen Beobachtungsstandorte“ der International Astronomical Union. “Milchstrasse nicht sichtbar” bedeutet, dass die Milchstraße kaum je 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 Sehen erreicht (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Falchi et al. 2016)..... 64

Tabelle 3: Beobachtungen der Grenzhelligkeit (siehe Kapitel 3.1.5), die zwischen dem 1.1.2017 und dem 6.12.2017 an Globe at Night übermittelt wurden. Es gab 466 Beobachtungen aus Deutschland und 3958 aus den USA. Für jede Klasse der Grenzhelligkeit ist auch die ungefähre Anzahl von sichtbaren Sternen angegeben..... 64

Tabelle 4: Grenzwerte für die Beleuchtungsstärke für weißes Licht; Gebietsart nach § BauNVO (Tabelle 1 LAI 2012, S.5)..... 101

Tabelle 5: Grenzwerte für die vertikale Beleuchtungsstärke (Tabelle 2 CIE 2017, S.8) 102

Tabelle 6: Maximalwerte für die Abstrahlung oberhalb der Horizontalen für eine Minimierung der Himmelshelligkeit 103

Tabelle 7: Maximalwerte der Leuchtdichte für Fassaden und Schilder, die nicht der Verkehrssicherheit dienen 103

Tabelle 8: Typische Werte für den Indikator der Leistungsdichte D_P in $mW \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$ bei Straßenprofil E..... 111

Tabelle 9: Typische Werte für den Indikator des jährlichen Stromverbrauchs DE in $kWh \cdot m^{-2}$ bei Straßenprofil E..... 111

Tabelle 10: Mindestanforderungen nach DIN EN 12193. E_{mit}: mittlere horizontale Beleuchtungsstärke und Gleichmäßigkeit..... 113

Tabelle 11: Betriebszeiten für „nicht sicherheitstechnischen Zwecken dienender Beleuchtung (NNB) aus der ÖNORM O 1052 (Wiener Umweltanwaltschaft 2014) 122

Tabelle 12: Detektionsrate und Reaktionsgeschwindigkeit von 40-70 jährigen in Abhängigkeit von der Beleuchtungsintensität (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Fotios et al. 2017) 133

Tabelle 13: Detektionsrate und Reaktionsgeschwindigkeit von 18-30 jährigen in Abhängigkeit von der Beleuchtungsintensität (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Fotios et al. 2017) 133

Tabelle 14: Blauanteile unter 500 und 540 nm, Farbwiedergabewert CRI und S/P (skotopisch/photopisch)-Verhältnis für verschiedene Leuchtmittel aus verschiedenen Literaturquellen und Spektralmessungen von Harald Bardenhagen. Zudem sind Grenzwerte für die Blauanteile angegeben, wie sie in verschiedenen Publikationen oder Regelungen gefordert werden. 139

1. Zusammenfassung

Einführung

Künstliches Licht kann als eine der größten technischen Errungenschaften der Menschheit angesehen werden, die uns erlaubt Tagaktivitäten in die Nacht auszuweiten. Ohne Licht wäre eine 24-Stunden-Gesellschaft nicht möglich (Jakle 2001, Doll et al. 2006 in Hölker et al. 2010; Meier 2016; Henckel et al. 2013). Wir haben mit der künstlichen Beleuchtung aber auch den natürlichen Rhythmus von Tag und Nacht verändert und damit das Gesamtgefüge des Naturhaushaltes und der Nachtlandschaft transformiert (Hofmeister 2013). Ein dunkler natürlicher 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 verschwinden. Neben dieser erhöhten Himmelshelligkeit (engl. skyglow)(Cinzano et al. 2001; Falchi et al. 2016; Hänel 2001; Kyba et al. 2015a) kann Licht auch die direkte Umgebung ungewollt aufhellen (engl. light trespass) oder durch Blendung das Sehen einschränken (LAI 2012; Strahlenschutzkommission 2006). 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. Die permanent und periodisch veränderten Lichtverhältnisse können negative Auswirkungen auf unsere Gesundheit haben (siehe Themenfeld 3: Humanmedizinische Wirkungen der Lichtverschmutzung) und ebenso zu ökologischen Beeinträchtigungen führen (siehe Themenfeld 2: Auswirkungen der Lichtverschmutzung auf Fauna und Flora).

All diese nicht intendierten Wirkungen der künstlichen Beleuchtung werden unter dem Sammelbegriff Lichtverschmutzung (eng. light pollution) verstanden. Der Begriff ist nicht eindeutig definiert. Er ist noch jung, denn er entstand höchstwahrscheinlich erst in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts, als die zunehmende Beleuchtung die kritische Auseinandersetzung mit der künstlichem Licht begann (Degenring 2015; Hasenöhrl 2015). **Lichtverschmutzung** ist für diesen Bericht als die **„nicht intendierte Wirkung" von künstlicher Beleuchtung im Außenbereich** definiert, 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.

Themenblock 1: Ausgangssituation in Deutschland, sowie Ursachen und Trends von technologischen und lichtplanerischen Entwicklungen

Messmethoden zur Erfassung der künstlichen nächtlichen Beleuchtung

Die verschiedenen Ausprägungen der Lichtverschmutzung können mit unterschiedlichen Methoden gemessen werden, wobei die Auswahl der Methode davon abhängt, was genau beobachtet werden soll. Neben dem räumlichen und zeitlichen Maßstab ist auch die Fragestellung für die Methodenwahl von Bedeutung.

Die direkten Lichtemissionen lassen sich am besten durch die Eigenschaften der Lichtquellen an sich bestimmen. Mit sog. **Leuchtenkatastern** kann theoretisch die Gesamtbeleuchtung eines Standortes analysiert und auch modelliert werden. Leider fehlen häufig Informationen oder sind nur für Teile der Beleuchtung im Außenbereich, meist der öffentlichen (Straßen-)beleuchtung bekannt.

Die gesamten nach oben abgestrahlten Lichtemissionen können flächendeckend gut mit horizontalen **Luft- und Satellitenbildaufnahmen** bestimmt werden, wobei die Aussagekraft von der Qualität der räumlichen, zeitlichen und radiometrischen Auflösung der Daten abhängt. Alle Fernerkundungsdaten werden von klimatischen und saisonalen Umweltfaktoren, wie zum Beispiel Belaubung, Wolkenbedeckung und Bodenfeuchte beeinflusst (Levin 2017; Levin/Zhang 2017). Luftbilder von Drohnen und Flugzeugen haben die höchste räumliche Auflösung (je nach verwendetem Sensorsystem bis in den Zentimeterbereich), sind aber sehr kosten- und zeitintensiv und generell nur für kleinere Untersuchungsräume geeignet. Die Fotografien der Astronauten (von der ISS) liefern multispektrale Informationen bei mittlerer Auflösung zu unterschiedlichen Nachtzeiten. Die Bilder sind aber von sehr stark variierender Qualität (viele Aufnahmen haben eine Bewegungsunschärfe) und sindnicht flächendeckend für Deutschland verfügbar. Nächtliche Satellitendaten (DMSP-OLS & VIIRS DNB) werden global aufgenommen, haben jedoch eine geringe räumliche Auflösung (5km und 750m).

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 gleichbleibender Kameraeinstellung auch den räumlichen Vergleich von verschiedenen Untersuchungsstandorten zu.

Die **Himmelshelligkeit** lässt sich indirekt mit Hilfe der schwächsten, gerade sichtbaren Sterne bestimmen, oder durch direkte Messungen mit Messgeräten und Digitalkameras. Nach Hänel et al. (2017) ist eine optimale und kostengünstige Messmethode die Verwendung von Spiegelreflex- und Systemkameras mit Fischaugenlinsen. Für eine automatische Auswertung dieser Aufnahme fehlt jedoch noch eine benutzerfreundliche Software, was die weite Verbreitung dieser Methode aktuell einschränkt.

Daten von Simulationen der Himmelshelligkeit basieren auf Modellen, die meist auf Beleuchtungskataster und Fernerkundungsdaten aufbauen. Der “Weltatlas” für die künstliche Himmelshelligkeit (Falchi et al. 2016) ist ein sehr gutes Werkzeug, um die Himmelshelligkeit in klaren Nächten zu verstehen.

Räumliche und zeitliche Variabilität künstlicher Beleuchtung

Künstliches Licht unterliegt erheblichen Variationen, nicht nur in Intensität, Lichtspektren und Umfang sondern auch zeitlich, im Laufe der Nacht, Saison etc. und räumlich, zum Beispiel zwischen zwei Straßenbeleuchtungen, Zudem können Lichtquellen statisch oder bewegt sein.

Räumliche Verteilung des nach oben emittierten Lichtes

Im Europäischen Vergleich herrscht in Deutschland eine eher konservative Beleuchtungspraxis. Die Kombination von nächtlichen Satellitendaten (Lichtemissionen) und Informationen über Straßenbeleuchtung ergab in einer Studie von Sánchez de Miguel (2015; et al. 2014), dass der Pro-Kopf-Verbrauch künstlicher Beleuchtung in Ländern wie Spanien, Portugal und den

Niederlanden mehr als doppelt so hoch ist wie in Deutschland. Die Lichtemissionen pro Kopf sind im Vergleich zu Deutschland auch in den USA deutlich heller (3fach bis 5fach) (Kyba et al. 2015b). Zu gleichen Ergebnissen kam ein Vergleich von 22 europäischen Städten mit Fotografien der Astronauten (Kyba et al. 2016). Innerhalb Deutschlands ist der Osten im Durschnitt heller als Westen (Lichtemissionen pro Kopf) (Kyba et al. 2015b).

Bisher existieren nur wenige detaillierte Studien zu den einzelnen künstlichen Lichtquellen. Die Variabilität von Lichtmenge von Städten sind teilweise durch die Parameter Bruttoinlandprodukt, Stadtfläche, Straßendichte, geographische Breite, Schneebedeckung und Vegetation (und damit indirekt auch Bodenversiegelung) erklärbar (bis zu 50% in einer Studie (Levin/Zhang 2017). Bei Untersuchungen von einzelnen Städten mit Luftbilddaten hatten Straßen den größten Anteil der Lichtemissionen (Berlin 32%, kleine Gemeinden Oberösterreich zum Vergleich 16-39%, weitere Flächennutzungstypen siehe Kuechly et al. (2012) und Kyba et al. (2015b, 2016). Weitere mögliche Erklärungen, die für den Unterschied vorgeschlagen wurden, sind Höhe und Dichte der Bebauung, Straßenbreite, Energiekosten, Vegetationsunterschiede (z.B. Baumbedeckung) und insgesamt Unterschiede in der Beleuchtungsintensität und den Beleuchtungsstandorten. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die Gründe für die Unterschiede zwischen den Ländern zu verstehen.

Räumliche Verteilung Himmelshelligkeit

Ohne künstliche Beleuchtung sind bewölkte Nächte am dunkelsten. Durch die Streuung von nach oben abstrahlenden und reflektierten Lichtemissionen an Wolken und Aerosolen sind heute diese Nächte in urbanen Gebieten die hellsten. Der Weltatlas der Himmelshelligkeit (Falchi et al. 2016) zeigt, dass kein Gebiet in Deutschland von künstlicher Beleuchtung unbeeinflusst ist. Die Milchstrasse ist für 42% der Bevölkerung (5% der Landfläche) nicht mehr sichtbar (EU 60% und 6%). 3% der deutschen Bevölkerung leben in Gebieten, in denen keine Dunkeladaption des menschlichen Auges mehr möglich ist.

Zeitliche Veränderung Beleuchtung

Lichtquellen sind nicht immer statisch und stark von der Funktion und Nutzung abhängig. Sie können nur temporär existieren und werden auch innerhalb einer Nacht an- und ausgeschalten oder gedimmt. Durchschnittlich nimmt die Himmelshelligkeit circa 5% pro Stunde in der Nacht ab (vor und nach Mitternacht) (weitere SQM Messungen in Kyba et al. 2015a; Falchi et al. 2016). Die zugrundeliegenden Beleuchtungsmuster sind dabei noch relativ unerforscht und hängen stark von der Beleuchtungskultur ab. In Spanien ergab eine Studie von Bará et al. (2017), dass Privathaushalte und Fahrzeugbeleuchtung eine Stunde vor Mitternacht ein Maximum zeigen (22% und 1%), wobei beide Beleuchtungsformen bis 4 Uhr auf nahezu 0% absinken. Meier (2017) stellte fest, dass an drei betrachteten Orten in der Berliner Innenstadt, zeitlich begrenzte Phasen identifiziert werden konnten, zwischen denen der Zustand weitestgehend ruht: einschalten bis ca. 22:15 Uhr, Vollbeleuchtung bis 0 Uhr, teilweises Ausschalten bis ca. 2 Uhr, Teilbeleuchtung bis ca. 4:15 Uhr, danach sukzessives Ausschalten. Eine weitere Studie zeigte, dass die Außenbeleuchtung selten dem Bedarf, wie zum Beispiel an Ladenöffnungszeiten und dem öffentlichen Nahverkehr, angepasst wird (Meier/Henckel 2017a).

Dagegen wird in vornehmlich kleinen Städten und Gemeinden teilweise die öffentliche Beleuchtung in der Nacht abgeschaltet. Nachtabschaltung z.B. zwischen 23-4 Uhr bei geringem Bedarf, war historisch Ende des 19. bis Anfang des 20. Jh. noch weit verbreitet und an das Mondlicht angepasst. Es sind keine Studien mit einer differenzierten Übersicht zu unterschiedlichen Praktiken von Nachtabschaltungen, der räumliche Verteilung, Akzeptanz und Wirkung bekannt. Eine Umfrage ergab, dass in Deutschland 25% der Kommunen die öffentliche Beleuchtung zeitweise komplett abschalten, 55% schalten zweilampige Leuchten auf einlampigen Betrieb um (PwC 2015). Ein häufiger Beweggrund hierfür ist die Kosteneinsparung. Im Vergleich dazu schalten ein Drittel der Gemeinden in Frankreich die Beleuchtung teilweise oder ganz ab (ANPCEN 2017a).

Ausmaße und Trends der künstlichen nächtlichen Beleuchtung in Deutschland und Europa

Beleuchtete Flächen und Beleuchtungsintensität

Eine erste Analyse von Satellitendaten der Jahre 2012 und 2016 zeigt, dass die beleuchtete Fläche global zunimmt und bereits beleuchtete Flächen noch heller wurden (Kyba 2017a). In Deutschland ist dieser Trend ebenfalls zu verzeichnen, wobei unterschiedliche Trends in den einzelnen Bundesländern beobachtet wurden (Kyba 2017b). In dem Vergleich der Jahre 2012 und 2016 erfolgte die größte Zunahme der beleuchteten Fläche in Bayern und in Schleswig Holstein. In Thüringen kam es zu einer Abnahme der beleuchteten Fläche und der Strahldichte beleuchteter Flächen.

Himmelshelligkeit

Die Analyse von Ausmaß und Trends der Himmelshelligkeit ist kompliziert, da natürlich große Schwankungen, Änderung der Beleuchtungssituation und Limitationen der Messgeräte schwer zu differenzieren sind. In einer Studie in Bremen (Tong 2017) wurde zum Beispiel eine jährliche Zunahme von 0-2% am frühen Abend und eine Abnahme von 5-10% nach Mitternacht festgestellt. Hänel und Quester konnten zwischen 2006-2014 bzw. 2008-2014 an ihren Beobachtungsorten (Osnabrück bzw. Esslingen) keine signifikante Änderung der Himmelshelligkeit nachweisen (Quester 2015; Hänel 2015). Eine Reduktion der Himmelshelligkeit, besonders im roten Spektralbereich wurde in Ungarn von Kolláth et al. 2016 bei der Umrüstung von Natriumhochdrucklampen, mit beträchtlichem Aufwärts-Lichtanteil, auf LED-Lampen, die gar nicht mehr aufwärts strahlen, beobachtet. Jechow fanden heraus, dass die Abschaltung der Gebäudeanstrahlung an einer einzigen Kirchen in Spanien einen Anteil von etwa 20% am künstlichen Himmelsleuchten (im Zenit) hatte (Jechow et al. 2017).

Gegenwärtige Veränderungen der Beleuchtungstechnologien und Trends bei der Nutzung und Lichtplanung

Trends in der Lichtnutzung und -planung ergeben sich sowohl durch technische Neuerungen, als auch durch politische und gesellschaftliche Veränderungen.

Bei der Beleuchtungstechnologie brach mit der Einführung der LED/OLED eine Phase des grundlegenden technologischen Wandels an, der neue vielfältige lichtgestalterische Möglichkeiten und auch ganz neue Herausforderungen bei der Planung hervorbrachte. Bei Umrüstungen von Natriumdampflampen auf LED findet eine starke Farbveränderung statt. Die spektrale

Empfindlichkeit des menschlichen Auges für skotopisches Sehen hat ihr Maximum bei etwa 507 nm (z.B. Bullough 2015). Durch die hohen Blauanteile der LED mit einem höheren Blauanteil erscheint das weiße Licht deutlich heller als das gelbe Natriumlicht, auch wenn die fotometrische Wirkung (etwa der gemessene Lux-Wert) gleich ist, weshalb die Lichtmenge reduziert werden könnte (skotopische/fotopische Helligkeit) (Pacific Northwest National Laboratory 2017). Die neue Lichttechnik bietet die Möglichkeit, "Licht nach Bedarf" herzustellen. So können mittels Sensoren und Software Helligkeit und Farbe der Beleuchtung etwa je nach Wetterlage, Nutzungsstärke aber auch nach Eigenschaften des Leuchtenstandortes, individuell angepasst werden.

Es finden aktuell umfangreiche Erneuerungen der öffentlichen Straßenbeleuchtung (und Ordnungslicht im Allgemeinen) statt, die in einer vermehrten Anwendung von LED Technologie im Außenraum münden. Zentrale Treiber dieser Entwicklung sind der Kostendruck auf Kommunalhaushalten, das Alter der Bestandsleuchten, die Bestimmungen der EU-Ökodesign-Richtlinie (2005/32/EG), durch die bestimmte Leuchtmittel nicht mehr auf dem Markt verfügbar sind, sowie förderpolitische Maßnahmen. Bis 2014 ist der Anteil der Quecksilberdampflampen bei der Straßenbeleuchtung auf 18% gesunken, während der Anteil von LED auf ca. 10% gestiegen ist. (PwC 2015). Autoscheinwerfer und werden seit einigen Jahren mit neuen Technologien ausgestattet, etwa 30% der deutschen Kraftfahrzeuge verfügen über neue Xenon-Leuchtmittel (Pauen-Höppner/Höppner 2013, S. 106). Auch bei der Fahrradbeleuchtung werden neue Technologien eingesetzt und so sind heute Lampen mit über 150 lx im Handel erhältlich ((Pardey 2017). Mit der vom 18. Mai 2017 erlassenen Änderungen der Straßenverkehrsordnung ist nun auch Fernlicht an Fahrrädern erlaubt. Die lichttechnischen Anforderungen von Industrienormen zur Straßenbeleuchtung sind durch die neuen Technologien kostengünstiger erreichbar. Dadurch kann es bei Umrüstungen zu einer Zunahme der Beleuchtungsstärke und Energiekostensteigerung kommen. Ein demgegenüber weit verbreiteter, bereits länger anhaltender Trend sind Maßnahmen zur Reduktion der Betriebsdauer der öffentlichen Straßenbeleuchtung, wie sie von vielen Kommunen in unterschiedlicher Ausprägung praktiziert werden. Aus Medienberichten und persönlichen Kommunikationen lässt sich schließen, dass die (teilweise) Abschaltung der Straßenbeleuchtung unterschiedlich konfliktbehaftet sein kann.

Digitalisierte, vernetzte und schnurlos steuerbare Lichtanlagen sind der Grundpfeiler für eine Entwicklung hin zur "Smart City", eine Vorreiterrolle hat hier die Stadt Kopenhagen, aber auch in Deutschland wird die Technik zum Beispiel in Göttingen, Leipzig oder Berlin angewendet. Dazu ist ein Trend in der Reduktion der Betriebsdauer der öffentlichen Straßenbeleuchtung zu beobachten, wobei dieser durch die Installation energieeffizienteren Leuchten an Bedeutung verlieren kann.

Die Gestaltung, Inszenierung und Marketing mit Licht erfährt immer höhere Bedeutung in der Stadtplanung. Licht wird zur Stadterneuerung und Standortmarketing verwendet, um einem Standort ein bestimmtes Image zu geben und die Attraktivität zu steigern (Wiemken/Froessler 2011; Schulte-Römer 2011; Schulte-Römer 2015, EURAC 2013, S.6; Praxisbeispiele in Ebbensgaard 2015). Dies erfolgt durch Einzelmaßnahmen (z.B. auch durch Lichtkunstprojekte), Konzepte für Stadtteile oder wird für gesamte Städte entwickelt. Ein weiterer Trend im Bereich Gestaltung ist die Veranstaltung von Lichtevents und Lichtfestivals (Schmidt 2007). Neben den stadtökonomischen Vorteilen bieten diese auch die Möglichkeit mit neuen Beleuchtungsformen zu experimentieren und neue Gestaltungsansätze zu entwickeln (Schulte-Römer 2012). Dazu werden großflächige dynamische Bildschirme, sog. „media screens" in Städten verbreiteter, diese

können ebenso Lichtkunst wie Werbung sein (Neumann 2007; McQuire et al. 2009; Struppek 2011). Diese Installation haben hohe Lichtintensitäten um am Tag sichtbar zu sein, eine Reduktion dieser findet in der Nacht oft nicht statt (CIE 2017, S. 10). Bei der Beleuchtung von Werbeschildern werden bei der Verwendung von LED ebenso häufig wesentlich hellere Leuchtdichten eingesetzt. Auch außerhalb von Städten kommt künstliche Beleuchtung vermehrt zum Einsatz, insbesondere zur Ermöglichung klassischer Tagsportarten bei Nacht, so z.B. bei der Beleuchtung von Skipisten und Golfanlagen.

Ansätze für einen zurückhaltenden Umgang mit künstlicher Beleuchtung legen einen Fokus auf minimal notwendiges, aber ästhetisches Licht (z.B. Langsames Licht von Appelt 2017). Auch die Koordination von Außenbeleuchtung findet immer größeres Interesse, so wurde 2002 ein internationales Städtenetzwerk zum Thema Beleuchtung gegründet (Lighting Urban Community International (LUCI Association). Bei kommunalen Lichtkonzepten wird gegenwärtig vermehrt erkannt, dass der meist gestalterische Fokus auf das nächtliche Stadtbild in diesen Lichtkonzepten zu einseitig ist und Themen wie Lichtverschmutzung und die Regulierung der privaten Beleuchtung stärkere Berücksichtigung finden sollten.

Ein weiteres Konzept ist die Ausweisung von sog. „Sternenparks“ (der IDA, der RASC und der Starlight Foundation), bei denen Tourismus, Naturschutz und Schutz der nächtlichen Dunkelheit zentrale Motivation für die Ausweisung darstellen (Meier 2015). Daneben gibt es auch Bürgerbewegungen die sich neben Lichtdesign auch mit Dunkelheit und Lichtverschmutzung beschäftigen und eine stärkere Einbindung der Bevölkerung in einer partizipativen Lichtplanung fordern.

Nichtintendierte visuelle Auswirkungen von Außenbeleuchtung auf den Menschen und Sicherheitsempfinden

Zu den **nichtintendierten visuellen Auswirkungen** gehört die physiologische und psychologische Blendung, die als Herabsetzen der Sehleistung und störende subjektive Wahrnehmung von Beleuchtung zusammengefasst werden kann. Diese kann direkt durch den Lichtkörper oder indirekt durch Reflexion, z.B. 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), verschärft (OÖ Energiesparverband 2015). Flimmern, das durch Schwankung der Leuchtdichten oder der spektralen Verteilung hervorgerufen wird, kann auch zu negativen Auswirkungen auf die visuelle Wahrnehmung führen. Blendung und Flimmern werden in der aktuellen E DIN EN 12665:2016-09 näher erläutert.

Durch die neuen LED/OLED Technologien werden bewegte, blinkende Lichtquellen und Farbveränderungen von Leuchtmitteln immer verbreiteter, ihre nichtintendierten visuellen Auswirkungen auf den Menschen sind dabei generell noch relativ wenig erforscht. Nach Schierz (Schierz 2009 in BAFU 2017) wird blaues Licht sowie blinkendes Licht mit geringer und mit hoher Blinkfrequenz als besonders störend wahrgenommen.

Die Erheblichkeit ist dabei von der individuellen Empfindlichkeit und den Adaptionseigenschaften des menschlichen Auges abhängig. So sind zum Beispiel viele ältere Menschen durch eine häufig altersbedingte Trübung der Augenteile schneller von künstlichem Licht geblendet (Strahlenschutzkommission 2006). Aber auch der Zeitpunkt, die Zeitdauer, die Nutzung des

Gebietes sowie das Bestehen eines Bewusstseins über das Thema Lichtverschmutzung (Rehmann 2013) beeinflussen die Auswirkungen. Das individuell tolerierte Beleuchtungsniveau wird weiter von der Umgebungsbeleuchtung beeinflusst, das durch die Art und Dichte der Bebauung in der Umgebung und ihrer Beleuchtung bestimmt wird. Zudem wird Licht anders während den frühen Abendstunden wahrgenommen im Vergleich zu den Zeiten, in denen die Bewohner*innen schlafen möchten (CIE 2017, S. 4).

Außenbeleuchtung kann uns das Sehen in der Nacht ermöglichen, bei falschen Beleuchtungsverhältnissen aber auch unsere Sicht einschränken und ablenken (Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr 2003). Ob Außenbeleuchtung nicht nur das individuelle **Sicherheitsgefühl** stärkt (Knight 2010; Marchant 2010; Steinbach et al. 2015, Boomsma 2014), sondern auch zu einer Verringerung der Kriminalität führt (z.B. Jackett/Frith 2013; Lorenc et al. 2013; Schmidt 2007) ist sehr umstritten und statistisch meist nicht nachweisbar (Welsh/Farrington 2008; Beyer/Ker 2009; Marchant 2010; Marchant 2017, Steinbach et al. 2015). Auch bei der **Verkehrssicherheit** sollte differenziert betrachtet werden, ob Licht allein diese per se verbessert. Bislang nicht berücksichtigt wurde zum Beispiel die Gefährdung der Verkehrsteilnehmer durch Kollisionen mit Masten, Blendung und ungleichmäßige Beleuchtung.

Beeinträchtigtes Erleben natürlich dunkler Nächte durch Lichtverschmutzung

In unserer Welt überwiegen bis heute bei weitem negative Assoziationen mit Dunkelheit und damit auch der Nacht (Gwiazdzinski 2015; Edensor 2013). Die Nacht hat aber auch positive Werte durch das Erleben der Dunkelheit: Freude, das Naturerleben, die Sicht auf den Sternenhimmel, Kultur, Spiritualität und Tradition, Schönheit des Nachthimmels und Ästhetik (Stone et al. 2009; Steidle/Werth 2013a; Steidle et al. 2013). In der Dunkelheit treten statt dem Sehen andere menschliche Sinneswahrnehmungen in den Vordergrund, die einen Raum anders wahrnehmen lassen (Edensor 2013). Untersuchungen, die eine Bewertung und Funktion von Dunkelheit und das Erleben natürlicher Nächte sozialwissenschaftlich gerade in Bezug auf das Minimieren negativer Assoziation mit diesen untersucht, sind nicht bekannt (siehe auch Krause 2013).

Das Erleben von Dunkelheit hat sich über ganze Generationen verändert, was den Referenzzustand einer „normalen Nacht“ verschiebt (engl. shifting baseline) (Luginbuhl 2008, S. 202). Auf der anderen Seite kann natürliche Dunkelheit auch gewissermaßen zu einem Luxusgut avancieren und an Bedeutung für den Tourismus und Lebensqualität gewinnen (z.B. Entwistle et al. 2015; Hasenöhrl 2015, Handelsblatt 2016).

Beeinträchtigungen der erdgebundenen Weltraumforschung durch Lichtverschmutzung

Die zunehmende Aufhellung des Nachthimmels wirkt sich schon sehr lange auf die Astronomie aus und es gibt nur noch wenige Standorte weltweit, die für eine professionelle Weltraumforschung geeignet sind.

Themenblock 2: Identifikation von technischen und regulatorischen Handlungsoptionen

Zusammenfassung und Diskussion bestehender Regulationen in Deutschland und der EU

Unter den bestehenden Regulierungen in Deutschland und in der EU, die sich auf die Lichtverschmutzung beziehen, finden sich sowohl sog. "harte", bindende Instrumente wie Gesetze und Verordnungen, als auch "weiche", orientierungsgebende Instrumente wie Lichtkonzepte oder Richtlinien zum Schutz der Nacht in Schutzgebieten.

Daneben haben Industrienormen einen hohen Einfluss insbesondere auf die Gestaltung der Straßenbeleuchtung. Weiterhin bestehen Empfehlungen und andere orientierungsgebende Werke, die sich auf Lichtverschmutzung beziehen.

Rechtliche Regelungen und Rahmensetzungen in Deutschland

Auf Bundesebene stehen nur grob bindende Instrumente für die Steuerung der Außenbeleuchtung zur Verfügung (Krause et al. 2014a; Walkling/Stockmar 2013). Umfassende Rechtsgutachten zum Thema künstliche Beleuchtung und Lichtverschmutzung bestehen bislang nicht. In diesem Abschnitt werden daher die aus der Literatur bekannten rechtlichen Regelungen vorgestellt, ohne jedoch die Existenz weiterer, weniger bekannter, Ansatzpunkte auszuschließen.

Die Beleuchtung von Kraftfahrzeugen (mobiles Verkehrslicht) ist in § 17 Beleuchtung der Straßenverkehrsordnung StVO und §52 Zusätzliche Scheinwerfer und Leuchten und § 67 Lichttechnische Einrichtungen an Fahrrädern der Straßenverkehrszulassungsverordnung StVO geregelt. Die letzte Änderung erfolgte am 18. Mai 2017 und erlaubt nun zum Beispiel auch Fernlicht an Fahrrädern.

Im deutschen **Bundes-Immissionsschutzgesetz** wird künstliches Licht nach § 3 Abs. 2 und 3 „[...] zu den schädlichen Umwelteinwirkungen" gezählt, „die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder für die Nachbarschaft herbeizuführen" (BImSchG 2011). Grundlagen für einheitliche Messungen und Beurteilungen von immissionsschutzrechtlichen Erheblichkeitsgrenzen, wie sie zum Beispiel für die Lärmbelästigung existieren, fehlen. Aus diesem Mangel hat der Länderausschuss für Immissionsschutz als Empfehlung die "Hinweise zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen" für den Vollzug des BImSchG" erstellt (LAI 2012). Dieser Beschluss ist nicht rechtsbindend und wurde nur in wenigen Bundesländern als Verordnung umgesetzt – bekannt sind Brandenburg (Land Brandenburg 2014) und Nordrhein-Westfalen (Land Nordrhein-Westfalen 2014). Im Bezug auf die Lichtverschmutzung sind besonders die nicht genehmigungspflichtigen Anlagen von Bedeutung, da diese meist die gewerblichen Lichtquellen im Außenbereich beinhaltet. Nicht gewerbliche Lichtquellen, wie zum Beispiel auch die öffentliche Straßenbeleuchtung, sind vom Immisionsschutzrecht ausgeschlossen.

Weitere gesetzliche Handlungsmöglichkeiten bietet in Deutschland die **Naturschutzgesetzgebung**, z.B. durch die Eingriffsregelung. § 23 Abs. 2 BNatSchG verbietet „Handlungen, die zu einer Zerstörung, Beschädigung oder Veränderung des Naturschutzgebiets oder seiner Bestandteile oder zu einer nachhaltigen Störung führen können", wobei in der

aktuellen Praxis Licht als temporärer Eingriff bewertet durch Ungewissheiten über Art und Umfang der Beeinträchtigungen es zu keinen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen kommt (Krause et al. 2014b; Maaß 1999; Böttcher 2001; Herrmann et al. 2006; Haupt/Schillemeit 2011).

Das **Baugesetzbuch** 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, S. 15). Das Bauordnungsrecht wird in Form der Landesbauordnungen umgesetzt und regelt die Genehmigungspflicht von Lichtanlagen ("Verunstaltungsgebots"). Im Rahmen von Bauleitplanung können Lichtquellen indirekt über den Ausschluss von Nutzungen gem. §1 Abs. 5 BauNVO reguliert werden, z.B. durch das "Rücksichtnahmegebot". Für die Steuerung von Lichtanlagen kann auch der im Baugesetzbuch formulierte Erhaltungssatzung (§172 BauGB) angewendet werden. Gemeinden haben auch die Möglichkeit, auf Grundlage des Baugesetzbuches bzw. der Landesbauordnungen Satzungen zu erlassen, im Rahmen derer künstliche Beleuchtung reguliert werden kann.

Die Beleuchtung für den Arbeitsschutz im Außenbereich ist durch eine Bundesrechtsverordnung, der Arbeitsstättenverordnung ArbStättV seit 1975 geregelt (BGBl 1975).

Weitere Instrumente und Ansätze zur Minimierung der Lichtverschmutzung in Deutschland

Vollzugshilfe, Stellungnahme und Empfehlungen existieren von der Strahlenschutzkommission zum Thema Blendung (Strahlenschutzkommission 2006, 2010), der Lichttechnische Gesellschaft LiTG zum Thema Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen (LiTG 2011), dem Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) mit der bereits erwähnten „Hinweisen zur Messung und Beurteilung von Lichtemissionen" (LAI 2012) und der Commission international de l'eclairage (CIE) mit. Strategien zur Vermeidung der Himmelhelligkeit im Guide on the limitation of obtrusive light from outdoor lighting installations (CIE 2017).

Neben der Strahlenschutzkommission (s.o.) hat sich z. B. auch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (z.B. Reidenbach et al. 2008) mit dem Thema befasst. Auch der Fachverband für Strahlenschutz hat Empfehlungen zur Reduzierung der Lichteinwirkung auf die Nachbarschaft veröffentlicht (Borgmann/Kurz 2014).

Daneben gibt es eine Vielzahl von Empfehlungen und weiteren Ansätzen, die zu großen Teilen auch in Deutschland Anwendung finden können, wie die „Vollzugshilfe Lichtemissionen" des Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU 2017a), der „Leitfaden besseres Licht" des Amtes der Oberösterreichischen Landesregierung (Amt der Oberösterreichischen Landesregierung 2013), die „Guidelines for Outdoor Lighting for Low-Impact Lighting" (Dick 2016) und die Empfehlungen des europäischen Forschungsverbundes Loss of the Night Network (LoNNe) (LoNNe 2015). Zudem wurden Beleuchtungsempfehlungen für die Sternenparks entwickelt, z.B. die „Handreichung für Kommunen" des Sternenpark im Biosphärenreservat Rhön (Hänel/Frank 2013).

Viele Kommunen und Städte nutzen das Instrument der städtebaulich orientierten **Lichtkonzepte** (unterschiedliche gängige Bezeichnungen siehe Köhler/Sieber 2012, S. 40 und Schulte-Römer 2010), um die Außenbeleuchtung dezidiert zu thematisieren (Schmidt 2007; Köhler 2015; Küster 2017). Sie sind informelle Planungsinstrumente, können aber durch politische Beschlüsse behördenintern Verbindlichkeit erlangen oder die Vorbereitung für

bindende Verordnungen bilden (z.B. Berlin) (Krause 2015). In Lichtkonzepten werden meist Energieeffizienz, finanzielle Einsparung, ökologische, demographische und kulturelle Aspekte, der Architektur, Stadtdesign und Attraktivitätssteigerung des Standortes behandelt. Nur wenige beziehen sich auf die Lichtverschmutzung (unter 10%) (Köhler 2015; Köhler/Sieber 2012; Schulte-Römer 2012). Kritisch wird von Köhler (2015) angemerkt, dass Empfehlungen für zu verwendende Methoden und Verfahren sowie Kriterien für die Evaluierung, Integration und Koordination von Lichtquellen von offizieller Seite , wie zum Beispiel in Südtirol, Italien mit dem "Leitfaden für die Erstellung von kommunalen Lichtplänen in Südtirol" (EURAC/Landesagentur für Umwelt 2013) fehlen.

In Anlehnung an Naturschutzgebiete können Gebiete mit verhältnismäßig geringer Lichtverschmutzung als **Nachtschutzgebiete bzw. Sternenparks** in Deutschland von zwei Organisationen (International Dark-Sky Association (IDA) und Starlight Foundation) ausgezeichnet werden. Ziele sind den Bekanntheitsgrad der Region und Tourismus zu fördern, aber auch die nächtlichen Natur und Nachtlandschaft zu schützen. In Deutschland ist vor allem die Einrichtung von Dark Sky Reserves möglich, der Naturpark Westhavelland und das Biosphärenreservat Rhön sind bereits als solche ausgezeichnet. Da über die Grenzen der Schutzgebiete hinaus weitere Kommunen die Beleuchtungsrichtlinien beschlossen haben können Sternenpark-Kommunen als Best Practice für eine umweltfreundliche Beleuchtung gelten. Weiterhin wurden einige der Kriterien in die Qualitätsoffensive Naturparke des Verbands Deutscher Naturparke (VDN) übernommen.

Industrienormen

Technische Normen werden in der EU von der Organisation "Lighting Europe", dem Verband der Beleuchtungsindustrie in Europa, entwickelt, die auch das Thema Lichtverschmutzung teilweise beinhalten (Meier/Pottharst 2013). In Deutschland ist der Fachverband Licht im Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektrizitätsindustrie (ZVEI Licht) angesiedelt. Der Normenausschuss Lichttechnik (FNL) des deutschen Institutes für Normung e.V. bearbeitet in meist enger Zusammenarbeit mit der LiTG Industrienormen (DIN und EN Normen) für die Beleuchtung (z.B. DIN EN 13201 für die Straßenbeleuchtung), wobei auch hier Lichtverschmutzung aktuell eine sehr geringe Bedeutung hat. Die Normen insbesondere für Straßenbeleuchtung (DIN EN 13201) haben als definierter "Stand der Technik" eine zentrale Orientierungsfunktion für die aktuelle Praxis in der Außenbeleuchtung. Zudem fehlt häufig das Wissen, dass Industrienormen nicht rechtsverbindlich sind. Da anderweitige Orientierungsrahmen mit offiziellem Charakter fehlen haben eigene Industrienorm aktuell einen "quasi-rechtlichen" Status, der ihren umfangreichen Einfluss erklärt.

Verbraucherinformationen

Als Form der Verbraucherinformation existiert das „Fixture Seal of Approval" der IDA, das weltweit circa 100 Leuchtenhersteller beinhaltet[1]. Daneben gibt es das Logo „sternenfreudlichen" Leuchten der Firma OSRAM-Siteco[2].

[1] http://www.darksky.org/fsa/ (30.10.2017)
[2] http://www.siteco.de/de/de_de/produkte/katalog-aussenleuchten/chapter/1550/category/13236/family/16143/variant/16148.html (31.10.2027)

Die französische Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturne (ANPCEN) schlägt ein Produktlabel für Straßenbeleuchtung (lumen pro km) vor durch die Begrenzung der Lichtmenge auch die Lichtintensität regulieren kann (ANPCEN 2017b).

Auf öffentliche Stellen in ihrer Rolle als Verbraucher zielt das EU-Projekt GPP2020 (Green Public Procurement)[3] ab, unter anderem bei der Beschaffung von Straßenbeleuchtung. Kritisch anzumerken ist aus Lichtverschmutzungsgesichtspunkten, dass die Einhaltung der DIN EN 13201 in der aktuellen "EU Green Public Procurement Criteria" unter anderem empfohlen wird (Europäische Kommission 2012 GPP S. 12), was wegen der höheren Lichtmengen und insbesondere der hohen Anforderungen an die Gleichmäßigkeit mehr Leuchten und damit mehr Licht erfordert (Rebound Effekt) (Leuser et al. 2016; Saunders/Tsao 2012). Die Kriterien werden aktuell überarbeitet (Entwurf des vorläufigen Berichtes: Traverso et al. 2017) und in der aktuellen Version wird darauf verwiesen, dass nach den lokalen, regionalen und nationalen Verfahren entschieden werden soll ob eine Straße beleuchtet werden soll oder nicht (E-Mail Rocío Rodríguez und Shane Donatello 07.12.2017 S.64 Technical report and criteria proposal (2nd draft) August 2017).

Förderpolitik

Zentrales Mittel auf EU Ebene ist die digitale Agenda "Lighting the Future" zur Förderung des Marktes von LED basierenden Festkörperlichtquellen (engl. Solid State Lighting (SSL)) (Europäische Kommission 2013a; b) und das Programm „Horizon 2020 Energy Efficiency" zur Förderung von Energieeffizienz und Nachhaltigkeit, ohne jedoch Aspekte der Lichtverschmutzung weitergehend zu thematisieren. Durch das interreg Förderprogramm der EU werden aktuell verschiedene europäische Projekte gefördert, im Projekt „Dynamic Light" beteiligt sich die u.a. mit der Weiterentwicklung von Beleuchtungsnorme (LiGT 2017).Weitere bereits abgeschlossene Förderungen der EU sind in Meier/Pottharst 2013, S.20-25 aufgelistet.

Auf Bundesebene werden Projekte im Bereich der öffentlichen Beleuchtung durch die Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) gefördert. Seit Anfang 2012 gibt es durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) die LED-Leitmarktinitiative (BMUB 2017, 2016), die zum Beispiel durch bessere Lichtlenkung die Minimierung der Lichtverschmutzung fördern kann. Bei allen genannten Förderprogrammen stellen Energie- und CO2-Einsparung zentrale Ziele dar; die Minderung der Lichtverschmutzung spielt jedoch keine wesentliche Rolle (Meier/Pottharst 2013).

Regelungen in der EU und der Schweiz

Erste Bestrebungen zur Regulierung von Lichtverschmutzung entstanden auf kommunaler Ebene und hatten als primäres Ziel, die Dunkelheit des Nachthimmels für astronomische Beobachtungen zu schützen. Als Vorreiter gilt Flagstaff (Arizona) in den USA, wo bereits 1958 zum Schutz zweier astronomischer Observatorien "Outdoor Lighting Restrictions" in Kraft traten (IDA 2017a). Auch auf überörtlicher Ebene stand zunächst der Schutz des Nachthimmels im Mittelpunkt: So diente die weltweit erste nationale Regulierung der Lichtverschmutzung dem Schutz der Observatorien auf den Kanarischen Inseln (Königreich Spanien 1988; Marín et al. 2009). Mit den wachsenden Erkenntnissen über die vielfältigen Auswirkungen der künstlichen Beleuchtung verbreiterten sich auch die Zielstellungen und die Anzahl überörtlicher Regelungen ab der Jahrtausendwende. Als

[3] www.gpp2020.eu (30.10.2017)

Vorreiter ist die italienische Provinz Lombardei mit ihrem 2000 verabschiedetem Lichtverschmutzungsgesetz zu nennen, welches beispielgebend für entsprechende Gesetzgebungen in weiteren italienischen Regionen sowie als Grundlage für die nationale Lichtverschmutzungs-Verordnung Sloweniens von 2007 diente.

Bislang bestehen kaum international vergleichende Studien zu existierenden Regelungsansätzen für Lichtverschmutzung. Zu den Ausnahmen gehören Morgan-Taylor (2015) für den Vergleich England-Frankreich-Italien, Youyuenyong (2015) für England und mehrere, u.a. europäische, Länder) und Wagner et al. (2015) für Österreich und Nachbarländer. Noch weniger als die existierenden Regelungsansätze sind ihre Genese, ihre Handhabung in der Praxis und ihre Wirksamkeit systematisch untersucht.

Es werden bestehende Regelungen auf europäischer Ebene und in einzelnen Mitgliedstaaten sowie der Schweiz in alphabetischer Reihenfolge näher betrachtet, wobei keine Vollständigkeit gewährleistet werden kann (sprachliche und institutionelle Barrieren). Der Fokus liegt auf Ländern mit dezidierten Lichtverschmutzungsregelwerken.

Bei der Regelungen und Beschlüsse Europäischer Institutionen hat die **Europäische Union** keine dezidierten Lichtverschmutzungsregelungen, jedoch wirken sich insbesondere Regelungen zum Handel mit Beleuchtungsprodukten auf die Entwicklung der Außenbeleuchtung – und damit auf die Lichtverschmutzung – aus. 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). Geprägt werden die Aktivitäten der EU im Beleuchtungsbereich durch die „20-20-20-Ziele“ von 2008. Ein zentrales Instrument ist die EU-Ökodesign-Richtlinie, die 2011 durch das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) in deutsches Recht umgesetzt. Eine weitere Regelung der EU mit Relevanz für Lichtverschmutzung ist die UVP-Richtlinie (RL 2011/92/EU – Europäische Union 2011; eine überarbeitete Fassung trat 2014 in Kraft: RL 2014/52/EU – Europäische Union 2014).

Die parlamentarische Versammlung des Europarates verabschiedete am 12. November 2010 die Resolution 1776 zum Thema Lärm- und Lichtverschmutzung (Parlamentarische Versammlung des Europarates 2011a). Die Mitgliedstaaten werden 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 Standardisierung entsprechender Indikatoren, zur Festlegung hoher Umweltstandards im Beleuchtungsbereich sowie zur Integration des Themas in die Lehre an Schulen” (Meier/Pottharst 2013, S. 16).

Zentrale Grundlage für die Regelung von Lichtverschmutzung in **Frankreich** bilden die neuen Umweltschutzgesetzgebungen “Grenelle I” von 2009 und “Grenelle II” von 2010. Diese haben ihren Hintergrund im Umweltforum von Grenelle (“Grenelle de l’environnement”) und formulieren Grundsätze und langfristige Ziele (Grenelle I) sowie Maßnahmen zu deren Erreichung (Grenelle II) (Französische Botschaft 2010). Das Thema Lichtverschmutzung wurde von der französischen Nachtschutz-Organisation ANPCEN (Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes) in den Grenelle-Prozess eingebracht und wird in Artikel 41 des ersten Gesetzes thematisiert (ANPCEN o.J.). Infolge der Grenelle-Gesetze wurde 2013 die international viel beachtete Verordnung “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" beschlossen und trat am 1. Juli 2013 in Kraft (République Francaise 2013; Morgan-Taylor 2015, S. 168 f). Weitere Gesetze und Verordnungen, in denen das Thema Lichtverschmutzung bzw. Außenbeleuchtung berücksichtigung gefunden hat, listet die ANPCEN auf ihrer entsprechenden Themenseite (ANPCEN o.J.). Morgan-Taylor (2015, S. 168f, 173f) schätzt das Regelwerk insofern als Positivbeispiel ein, 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.

In **Italien** besteht keine nationale Regelung für Lichtverschmutzung, zahlreiche Regionen haben jedoch entsprechende Gesetze eingeführt. Übersichten der bestehenden regionalen Gesetze finden sich auf LoNNe (o.J.), Cinzano (2007) und in italienischer Sprache in CieloBuio (2004).Vorreiter war die Lombardei mit der bereits im Jahr 2000 beschlossenen "Legge della Regione Lombardia n. 17/00 del 27/03/2000" (Youyuenyong 2015). Der Region kommen koordinierende und beratende Funktionen zu, inkl. der Definition anzuwendender technischer Standards und der Förderung von Informationsinitiativen (Regione Lombardia 2015, Art. 4). Von der Region ist ein Geoinformationssystem mit Daten zu öffentlichen Außenbeleuchtungsanlagen (Leuchtenkataster) zu führen, die von den Gemeinden zur Verfügung zu stellen sind (Art. 5). Die Gemeinden sind zuständig für die Überwachung der Bestimmungen und können Verstöße mittels Geldbußen sanktionieren (Art. 6, 10). Zur Wirksamkeit des lombardischen Gesetzes liegen unterschiedliche Informationen vor. Falchi (2011) konnte nachweisen, dass die Himmelsaufhellung trotz Zunahme der Leuchten konstant geblieben ist, was er auf den Erfolg des Gesetzes in der Lombardei zurückführt. Mohar und Hänel stellten in Beobachtungen vor Ort (jeweils 2017) zahlreiche Verstöße fest. Letzteres weist auf Schwierigkeiten in der Durchsetzung der beschlossenen Regelungen hin, was von Youyuenyong (2015, S. 266f) als grundsätzliche Schwierigkeit der regionalen – statt nationalen – Regelung eingeschätzt wird.

In der Republik **Österreich** besteht kein übergreifendes Regelwerk zu Lichtverschmutzung. Rechtliche Regelungen existieren bisher nur vereinzelt und in Bezug auf Lichtimmissionen und -emissionen, während beleuchtungstechnische Fragen bislang gänzlich ungeregelt sind (Wagner 2015, S. 13). Es bestehen jedoch mehrere (außerrechtliche) Industrienormen, die ergänzend zur europäischen Straßenbeleuchtungsnorm EN 13201 in Österreich für die Planung der öffentlichen Beleuchtung von Bedeutung sind und die z.T. Aspekte der Lichtverschmutzung thematisieren (Wagner 2015; Amt der Oberösterreichischen Landesregierung 2013). Besonders hervorzuheben ist die seit 2012 gültige ÖNORM O 1052 "Lichtimmissionen – Messung und Beurteilung", in der maximal zulässige Grenzwerte für Lichteinwirkungen auf Mensch und Umwelt ebenso festgelegt sind wie Mess- und Berechnungsverfahren zur Kontrolle der Einhaltung der Grenzwerte (Wagner 2015, S. 13). Die Norm verfolgt den Ansatz, bei der Beurteilung von Lichtimmissionen grundsätzlich zwischen "notwendiger, sicherheitstechnisch begründeter Beleuchtung (SB)" und "nicht notwendiger, da nicht sicherheitstechnischen Zwecken dienender Beleuchtung (NNB)" zu unterscheiden.

In der **Schweiz** hat das Thema Lichtverschmutzung seit der Publikation der „Empfehlungen zur Vermeidung von Lichtemissionen" (Klaus et al. 2005) durch das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) eine breitere Resonanz gefunden. Es gibt kein direktes Gesetz gegen Lichtverschmutzung, doch wird in dem oben genannten Dokument auf die Anwendbarkeit unterschiedlicher Gesetze zur Vermeidung von Lichtverschmutzung hingewiesen.

In der Republik **Slowenien** wurde 2007 auf Grundlage insbesondere des dortigen Umweltschutzgesetztes die landesweit gültige "Verordnung über die Grenzwerte der Lichtverschmutzung der Umwelt" (Verordnung Nr. 4162) erlassen (Republik Slowenien 2007; Schlager 2015a). Ziele sind 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 Stromverbrauches der die Lichtverschmutzung verursachenden Lichtquellen" (Republik Slowenien 2007, I. Art. 1). Der Ansatz der Verordnung ist vergleichbar mit den Regelungen in der Italienischen Provinz Lombardei (Mohar 2015b) und adressiert sowohl öffentliche als auch privat betriebene Beleuchtungsquellen im Außenraum. Mohar (2015b) schätzt das Gesetz in zahlreichen Punkten als erfolgreich ein. Insbesondere zeige es Wirksamkeit hinsichtlich einer Reduktion der Abstrahlungen über der Horizontalen sowie Energieeinsparungen (40-60%, Mohar 2011), beträchtliche Verbesserungen seien bei der Beleuchtung von Straßen, Gewerbegebieten und historischen Bauten (v.a. Kirchen) zu konstatieren. Eine Schwierigkeit besteht gemäß Bizjak (zitiert in Marchand 2011) für Kommunen jenseits der Hauptstadt Ljubljana in der Umsetzung der geforderten Umrüstungen der Strßenbeleuchtung zu den geforderten Fristen: Die notwendigen Finanzmittel fehlen und zugesagte Förderungen seien ausgeblieben. Darüber hinaus besteht nach Einschätzung der Gutachter eine Problematik in der Nutzung von E-Anschlusswerten als Bemessungsgröße, da Beleuchtung immer energieeffizienter wird, mit einer geringeren Wattzahl also zunehmend hell beleuchtet werden kann.

Ähnlich wie in Italien besteht auch in **Spanien** kein dezidiertes Lichtverschmutzungs-Gesetz für das gesamte Land, sehr wohl gelten jedoch in mehreren Regionen 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, S. 267f). Eine Übersicht findet sich auf der Website des Forschungsnetzwerks LoNNe (LoNNe 2017). Zum Schutz des Observatoriums Roque de los Muchachos auf der Kanaren-Insel La Palma, das mit dem Gran Telescopio Canarias eines der größten Teleskope beherbergt, wurde im Jahre 1988 ein „Ley del Cielo" (Himmelsgesetz; Königreich Spanien, 1988) erlassen, das auf der Insel La Palma und für den nordwestlichen Teil Teneriffas gilt (Marín et al. 2009; Youyuenyong 2015, S. 267 f). Es wurde im Jahr 1992 durch ein königliches Dekret konkretisiert (Real Decreto 243/1992). In mehreren Regionen Spaniens wurden seit der Jahrtausendwende ebenfalls Gesetze gegen Lichtverschmutzung erlassen, wobei jenes in Katalonien auch den Schutz der nächtlichen Natur beinhaltet (Generalitat de Catalunya 2012).

Als Teil eines Gesetzes zur Reinhaltung der Luft führte die **Tschechische Republik** 2002 als erstes Land ein nationales Gesetz gegen Lichtverschmutzung ein (Lorenzen 2017; Hollan 2002; Dark Sky Czech Republik 2013). Kritisiert wurde bzw. wird seitens der tschechischen Dark-Sky-Bewegung, dass diese Konkretisierung bislang ausgeblieben sei und die Wirksamkeit des Gesetzes damit erheblich geschmälert (Challéat/Poméon 2017). Ebenso hält Hollan (2004, S. 11–12) fest, dass der Bereich Lichtverschmutzung in einer Überarbeitung des Gesetzes 2003/04 auf ein Minimum reduziert wurde. 2012 wurde das Thema Lichtverschmutzung laut tschechischem Wikipedia-Eintrag zu Světelné znečištění (Wikipedia 2017) vollständig aus dem Gesetz gestrichen, weitere Informationen und eine Quellenangabe hierzu fehlen jedoch.

Im **Vereinigten Königreich** besteht keine eigenständige Lichtverschmutzungs-Regelung, jedoch finden unerwünschte Auswirkungen künstlicher Beleuchtung Berücksichtigung in national gültigen Regelwerken zu übergeordneten Zielstellungen (Morgan-Taylor 2015, S. 167ff). Das zentrale Instrument ist der in England und Wales gültige "Clean Neighbourhoods and Environment Act 2005" (Youyuenyong 2015, S. 11; Vereinigtes Königreich 2005). Das 2005 parlamentarisch beschlossene 'Gesetz für saubere Nachbarschaften und Umwelt' berücksichtigt in Abschnitt 102 'von Grundstücken ausgehende Lichtemissionen, die gesundheitsschädlich oder störend sind', als eine mögliche Form der Belästigung ("statutory nuisance"). Daneben gibt es weitere Regelungen, die jeweils in bestimmter Hinsicht auf künstliche Beleuchtung bzw. Lichtverschmutzung Anwendung finden können, z.B. im Bauplanungsrecht. Orientierungshilfe bietet z.B. die Website "When Is Light Pollution Relevant to Planning" des Department for Communities and Local Government (2014). Grundsätzlich sehen Morgan-Taylor (2015) und Youyuenyong (2015) im Hinblick auf eine ganzheitliche Regulierung der Lichtverschmutzung die aktuelle Situation kritisch, da sie fragmentiert ist und insgesamt nur Teilaspekte der Lichtverschmutzung regelt, sodass sie der Bandbreite der Problematik nicht gerecht werden kann.

Handlungsoptionen

Angemessene Beleuchtung, die nicht intendierte Auswirkungen von künstlichem Licht im Außenbereich reduziert, sollte die verschiedenen Nutzen, Funktionen und Auswirkungen der künstlichen Beleuchtung gesamtheitlich räumlich und zeitlich differenziert betrachten.

Darstellung möglicher Parameter für Verwendung in Regulierungen der Lichtverschmutzung

Bei der Vermeidung von Lichtverschmutzung steht nicht der totale Verzicht auf künstliche Beleuchtung im Außenbereichen im Vordergrund, sondern der Einsatz einer bedarfsgerechten Beleuchtung, wie in den Empfehlungen „*das richtige Licht - in der richtigen Menge, am richtigen Ort und zur richtigen Zeit*" der International Dark-Sky Association (IDA).

Wichtig hierfür ist die Kenntnis der Gesamtbeleuchtung (öffentlich und privat) und die vorherrschende Umgebungshelligkeit an einem Ort. Die Definition von Gebieten mit unterschiedlichen Charakteristiken und Beleuchtungsbedarfen (z.B. ländliche und urbane Gebiete) als Umgebungszonen (CIE 2017; BAFU 2017a; LAI 2012) kann helfen, eine bedarfsgerechte nachhaltige Beleuchtung zu etablieren. Auch die verschiedenen Funktionen der künstlichen Beleuchtung, wie Verkehrssicherheit und Ästhetik, sowie ihre Auswirkungen, z.B. auf die Natur und den Energieverbrauch, sollten vollständig berücksichtigt werden. Bei der Wahl von Parametern für die Verwendung in Regulierungen der Lichtverschmutzung hat sich aus Erfahrungen in anderen Ländern gezeigt, dass es sinnvoll ist diese möglichst direkt zu definieren.

Grundsätzlich sollte zunächst die **Notwendigkeit** einer Außenbeleuchtung überprüft werden, gerade auch auf die Funktion (Ordnungslich, Festlicht, Werbelicht etc.) die sie erfüllen soll.

Licht sollte nur dorthin strahlen wo es erwünscht ist, was durch die **Abstrahlung / Abschirmung** definiert werden kann. Für die Eindämmung der Himmelshelligkeit und Blendung sollten **Abstrahlung in horizontaler Richtung** vermieden werden, angegeben als **ULOR** (upward light output ratio) (CIE 2017). Eine weitere Möglichkeit, die Abstrahlcharakteristika einer Leuchte genauer zu definieren ist das sog. "Backlight-Uplight-Glare" (BUG) System (IESNATM-15-11) das durch die International Dark Sky Association (IDA) und Illuminating Engineering Society (IES) in

den USA entwickelt wurde (Illuminating Engineering Society 2011). In der nationalen Gesetzgebungen von Slowenien und in regionalen Gesetzgebungen von Italien dürfen nur Leuchten verwendet werden, die im montierten Zustand kein Licht oberhalb der Horizontalen abstrahlen (ULR =0). Skybeamer und permanente Bodenleuchten sind sowohl in Slowenien als auch in mehreren Regionen Italiens verboten.

Die **Helligkeit** an einem Ort ist einerseits von der **Intensität** der künstlichen Lichtquelle und Reflexionsgrad der Oberflächen abhängig und andererseits von dem Kontrast mit Hintergrund- und Umgebungshelligkeit. Die Festlegung von minimalen Beleuchtungsstärkewerten, wie sie in der DIN EN 13201 festgehalten werden ist zu überdenken. Diese minimal empfohlenen Beleuchtungswerte werden aus Kostengründen auf den meisten Verkehrswegen in Deutschland unterschritten, eine flächendeckende Einhaltung der Norm würde so zu einer starken Zunahme der Lichtverschmutzung, und (im Falle der Installation von LED) nicht die maximal mögliche Einsparung von CO_2-Emissionen und Energiekosten ausschöpfen. Durch die fortschreitenden technologischen Entwicklungen sind heutzutage schon extrem hohen Leuchtdichten möglich (bis zu über 10.000.000 cd/m^2) (OÖ Energiesparverband 2015), eine Einführung von Maximalwerten kann sinnvoll erscheinen um künstliche Beleuchtung auf ein nötiges Maß für ihre Funktionen zu reduzieren. Um die Zunahme von künstlicher Beleuchtung in einem Gebiet, z.B. Gemeindegebiet zu regulieren schlägt Falchi et al. (2011) vor einen maximalen Lichtstrom für ein Verwaltungsgebiet festzulegen.

Für beleuchtete Flächen wie zum Beispiel Werbetafeln ist zu beachten, dass helle Leuchttafel Blendung verursachen können und ein Sicherheitsrisiko darstellen. Von der Strahlenschutzkommission (2006) wird hierfür ein Grenzwert von 730 cd/m2 angegeben, im Lichtmasterplan der Stadt Luzern ist Dachreklame auf maximal 110 cd/m^2 begrenzt (Stadt Luzern 2006, S. 109). Im „Werbekonzept Stadtbild Berlin“ werden maximal tolerable Leuchtdichten zur Blendungsbegrenzung zwischen 14-500 cd/m^2 empfohlen, die nach Gebietsart, Hintergrundhelligkeit, Uhrzeit und farbigen und bewegten Lichtquellen unterschieden werden (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2014, S. 75f).

Bei der Maximalen Beleuchtung von Gebäuden und Denkmälern sind in Regionen Italiens bis zu 2 cd/m^2 und Fassaden von Geschäftsgebäuden, Instituten, Produktionsgebäuden und Baudenkmälern auf eine Leuchtdichten in Slowenien bis 1 cd/m^2 zulässig.

Die **Gleichmäßigkeit** und **Ausrichtung** wird besonders unter Lichtplanern als wichtiges Maß für eine gute Beleuchtung gesehen, da eine gleichförmige Ausleuchtung gutes Sehen fördert (Richter 2005; EURAC/Landesagentur für Umwelt 2013, S. 7). Wenn man diese jedoch unter verschiedenen Perspektiven wie z.B. Verkehrssicherheit (z.B. Jackett/Frith 2013b), Lichtdesign und Gestaltung bewertet, können keine allgemeinen Aussagen gemacht werden.

Um eine gute **Auswahl und Platzierung** von Leuchte gewährleisten zu können, sind Informationen zur Gesamtbeleuchtungssituation, Umgebungshelligkeit/ Hintergrundbeleuchtung und weiteren Faktoren wie der Topographie nötig. Daneben ermöglichen die Kenntnis von Position, Masthöhe, Leuchtentyp, Leuchtmittel, Aussagen über die Verteilung der Lichtemissionen. In Regionen Italiens ist daher die Führung eines aktuellen Leuchtenkatasters Pflicht. Die Platzierung von Leuchten in ökologisch sensiblen Räumen sollte gesondert betrachtet werden. Die dahingehenden Empfehlungen der CIE:150 Version von 2003 (CIE 2003) wurde bereits in Großbritannien und in der Zonierung von Sternenparks umgesetzt (Hänel/Frank 2013).

Ein **Zeitmanagement** und **Steuerung** durch Anpassung an Nutzung und Funktion, z.B. an die Verkehrsdichte und den natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus ist empfehlenswert. Dies kann durch Abschaltung in den späten Nachtstunden (Matt 2015a), einer Leistungsreduzierung oder bedarfsorientierten Beleuchtung erreicht werden (Hänel 2011). In vielen europäischen Ländern wurde dies in nationalen und regionalen Gesetzen bereits eingebettet. So ist in Frankreich und Regionen Italiens die Gebäudeanstrahlungen spätestens um 1 Uhr abzuschalten. In Regionen Italiens müssen Straßenleuchten mit Vorrichtungen ausgestattet werden, die mind. eine 30%ige Leistungsreduzierung erlauben. Auch die meiste kommerzielle Beleuchtung (Werbeobjekte und -schilder) muss in Italien und Slowenien nach 24 Uhr abgeschaltet werden.

Die Wirkung von stationären Lichtquellen sollten von **mobilen** Lichtquellen unterschieden werden, wobei auch stationäre Lichtquellen mit **bewegten** Leuchten ausgestattet sein können. Häufige Lichtquellen mit bewegtem Licht sind Scheinwerfer von Kraftfahrzeugen, Sicherheits-Warnlichter, Skybeamer, Werbetafeln und auch die bedarfsgerechte Beleuchtung mit Dimmung. In den aktuellen existierenden Regulierungen findet bewegtes Licht noch kaum Berücksichtigung (Krause 2015, S. 137).

Auch das **Lichtspektrum** oder **Lichtfarbe** einer Lichtquelle beeinflusst ihre nichtintendierte Wirkungen. Für den Menschen nimmt die Störwirkung zum Beispiel in folgender Reihenfolge zu: gelbe oder weiße, grüne, rote oder blaue Lichtfarbe sowie bewegtes Licht mit geringer und mit hoher Blinkfrequenz (Schierz 2009 in BAFU 2017a, S.108). In der Publikation 12.3 der Lichttechnische Gesellschaft (LiTG 2011) werden für farbiges und flimmerndes Licht Korrekturfaktoren angegeben. Für langsam veränderliche Quellen (z.B. LED-Großmonitore) gibt es noch keine Grenzwerte. Um ökologische (z.B. Anziehung von Insekten) und humanmedizinische Auswirkungen (z.B. Melatoninhaushalt) des blauen Lichtspektrums zu vermeiden (Falchi et al. 2011) ergibt sich, dass Farbtemperaturen von unter 3000 K verwendet werden sollten (Matt 2015b; Frank/Sternenpark im Biosphärenreservat Rhön 2017; LoNNe 2015).

Der **Energieverbrauch** ist ein indirekter Parameter für die Lichtverschmutzung und ist durch die steigende Energieeffizienz nur bedingt geeignet die nichtintendierten Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung zu minimieren.

Handlungsinstrumente

Für die Umsetzung der dargestellten möglichen Parameter stehen verschiedene Handlungsinstrumente zur Verfügung, wobei eine Reduzierung der Lichtverschmutzung ganz allgemein durch Information, angemessene förderpolitische Anreize, eine gesteigerte **Verbindlichkeit** der Instrumente und einer **Kontrolle** dieser erreicht werden kann. Um die nichtintendierte Wirkungen von Außenbeleuchtung zu minimieren, ist die Regulierung der **Gesamtbeleuchtungssituation** (privat und öffentlich) und eine räumlich differenzierte Betrachtung nach **Flächennutzungskategorien** wichtig.

In der aktuellen Planungs-, Bauordnungs- und Naturschutzrecht könnten **klare Kriterien** für die Eingrenzung der Lichtverschmutzung enthalten sein. **Richt- und Grenzwerte** sind für eine Festlegung der Erheblichkeit mit einem klaren Raum- und Zeitbezug und für eine Umsetzung von nachhaltiger Beleuchtung notwendig. Eine direkte gesetzliche Regelung der Lichtverschmutzung

mit bindenden Grenzwerten, wie sie in anderen europäischen Ländern bereits seit den 80er Jahren existiert, ist aus bestehenden Erfahrungen in ein zielführendes Instrument negative Auswirkungen künstlicher Beleuchtung zu vermeiden.

Bei der Straßenbeleuchtung wird sich aktuell in Deutschland meist an **Industrienormen** orientiert (z.B. Richter 2005). Da die Norm in großem Maße auf die Verkehrssicherheit des motorisierten Individualverkehrs gerichtet kann es empfehlenswert sein, die bis jetzt unbeachteten Belange von Außenbeleuchtung, wie die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Ökologie, Klimaschutz, Stadtbild etc. stärker zu berücksichtigen. Zudem befürchten viele Kommunen bei Nichteinhaltung der Vorgaben der DIN EN Norm 13201 rechtlich dafür belangt zu werden (Riedel et al. 2013, S. 83–85), offizielle Orientierungswerte können ein Gegengewicht schaffen und Rechtssicherheit geben. Durch einen offiziellen **bundesweiten Leitfaden** mit einer integrierten Perspektive auf Außenbeleuchtung können Planungsprozesse zielgerichtet verbessert werden, wie dies zum Beispiel im Land Oberösterreich bereits geschehen ist. Dies schließt eine Quantifizierung der Lichtemissionen in Raumordnungs- und Landschaftsplanung und die Integration von Lichtminderung in LED Förderprogramme mit ein.

Die Schaffung eines unabhängigen **Kompetenzzentrums** für künstliche Beleuchtung, welches eine breite, interdisziplinäre Perspektive in den Blick nimmt, kann ein Gegengewicht zu den aktuell dominierenden technischen und vornehmlich auf Energieeffizienz orientierten Perspektiven darstellen und fragmentiertes Wissen aus unterschiedlichen Disziplinen bündeln.

Eine integrierte & räumlich differenzierte Betrachtung der Beleuchtung für **Lichtkonzepte** ist zu empfehlen, dass durch eine weit gefächerte Expertengruppe und bürgerschaftliche Partizipation bei der Erstellung der Pläne erreicht werden kann. Empfehlungen für zu verwendende Methoden und Verfahren sowie Kriterien für die Evaluierung, Integration und Koordination von Lichtquellen sollten den Gemeinden hierfür bereitgestellt werden (Köhler 2015).

Die **Evaluierung** von aktuellen und geplanten Beleuchtungssituationen kann mit Hilfe von lichttechnischen **Modellierungen** in Beleuchtungssoftware erleichtert werden. Lichtemissionen können in das **Umweltmonitoring** mit aufgenommen werden, wie dies zum Beispiel kürzlich in der Schweiz im Bericht zum Landschaftswandel passiert ist (BAFU/WSL 2017) um den tiefgreifenden Landschaftswandel zu überwachen (BBSR, (Bundesinstitut für Bau- 2014). Fernerkundungsdaten können weitere Quellen für ein Monitoring darstellen (Ruhtz et al. 2015).

Förderung bei der energetischen Sanierung bestehen bereits, Aspekte der Lichtverschmutzung können in den Katalog der Förderkriterien mit aufgenommen werden.

Allgemeinen Erfahrungen von dem Thema Lärm könnte bei Gesetzte, Normen, Empfehlungen auf das Thema Licht übertragen werden (Schroer/Hölker 2014), siehe auch “soundscape approach”(Radicchi et al. 2016). In erste Schritte in diese Richtung wurden mit der Resolution 1776 über Lärm- und Lichtverschmutzung geschaffen (Parlamentarische Versammlung des Europarates 2011b). Lichtaktionspläne ähnlich zu Lärmaktionsplänen (Schormüller/Langel 2015), ein Lichtverschmutzungsnetzwerk durch Observatorien mit einer Onlineinformationsplattform, vergleichbar zu NOISE: Noise Observation and Information Service for Europe europaweit existiert (EEA/ETC-ACM 2017), wäre auch für das Thema Lichtverschmutzung zielführend.

Zusammenfassend werden im Folgenden die aus Sicht der Gutachter zentralen Regelungs- und Einflussmöglichkeiten auf Bundesebene aufgeführt. Grundsätzlich ist eine Förderung interministerielle Zusammenarbeit als wichtiger Bestandteil anzusehen, um Lücken in der querschnittsorientierte Kompetenz und Organisationsstruktur zu beseitigen. Grundsätzliches Ziel sollte die Etablierung eines nachhaltigen Umgangs mit Beleuchtung sein. Hierfür ist ein ganzheitlicher Ansatz erforderlich, der die vielfältigen Auswirkungen der künstlichen Beleuchtung in den Blick nimmt:

- Verstärkte Integration (Mainstreaming) von Lichtemissionen als dezidiert zu berücksichtigendem Faktor in bereits existierende formelle Planungs- und Steuerungsinstrumente, wie das Imissionsschutz-, Planungs-, Bauordnungs- und Naturschutzrecht, mit Bemessungsgrundlagen nach neuestem Wissensstand und Prüfung von Verwaltungsvorschriften, z.B. Einführung einer technischen Verwaltungsvorschrift zu Licht (TA Licht) innerhalb des Bundes-Imissionsschutzgesetzes.
- Prüfung der Möglichkeit eigenständiger Regelungen zur Begrenzung der Lichtverschmutzung, bspw. eines Lichtverschmutzungsgesetzes, einschließlich der Verpflichtung für Länder und Kommunen zur querschnittsorientierten Licht-Rahmenplanung;
- Etablierung von Mess- und Monitoringsystemen zur Überwachung der Entwicklung der Lichtverschmutzung;
- Bereitstellung von Orientierungshilfen zum Thema für Länder und Kommunen, zwecks Beseitigung planerischer und rechtlicher Unsicherheiten (u.a. hinsichtlich des Umgangs mit Industrienormen) bei der Konzipierung öffentlicher Beleuchtungsanlagen sowie Informationen zu Möglichkeiten der nachhaltigen Beleuchtungsplanung (u.a. mittels Best-Practice-Beispielen), etwa in Form eines Informationsportals und Leitfadens;
- Entwicklung und Umsetzung von Beleuchtungsrichtlinien zur Minimierung der Lichtverschmutzung für bundeseigene Gebäude und Anlagen;
- Förderung der Wissensgenerierung, -bündelung und -vermittlung, um bestehende Forschungslücken zu schließen, Synergien zwischen unterschiedlichen Wissensbereichen zu schaffen und ein breiteres Problembewusstsein zum Thema Lichtverschmutzung zu erreichen, bspw. mittels eines bundesweiten Kompetenzzentrums für nachhaltige Beleuchtung; Schaffung von Anreizen für eine Minimierung der Lichtverschmutzung mittels einer entsprechenden Anpassung der Förderkriterien in bestehenden Programmen (s. mögliche Parameter in Kapitel 4.2.1) sowie der Einrichtung von Förderprogrammen, Auszeichnungen und Wettbewerben für nachhaltige Beleuchtung, bspw. für die Entwicklung integrierter lokaler und regionaler Lichtkonzepte.

Positive technologische Entwicklungen zur Reduzierung der Lichtverschmutzung

Durch Lichtmanagementsysteme kann künstliches Licht bedarfsgerecht bereitgestellt werden, der Nutzungsstärke, Standorteigenschaften aber auch der Wetterlage und Nutzergruppen wie Radfahrern angepasst werden (Bowden 2017; Weirauch 2011).

Wie schon mehrfach betont, ist der einfachste und effiziente Weg, Lichtverschmutzung zu vermeiden, voll abgeschirmte Leuchten zu verwenden, bei Anstrahlung von Objekten kann mit Reflektoren, Abblendklappen, Gitterblenden und Projektionstechniken (z.B. GOBO (Graphical Optical Blackout)-Technik) ungewolltes Beleuchten der Umgebung des Objektes unterbunden werden (Fachhochschule Nordwestschweiz/Kobler 2009; Mohar et al. 2014; Offenberger 2015; Cieslik 2010 in BAFU/WSL 2017).

Für die unter Handlungsoptionen empfohlene Farbtemperatur unter 3000 K (Matt 2015b; Frank/Sternenpark im Biosphärenreservat Rhön 2017) sind LEDs mit gelb-orangenen Farbtönen,

wie die Philips LED pc amber, “GoldenOrange” LED und „Batlamp „ der niederländische Firma Innolumnis auf den Markt gekommen.

Vorschläge für ein erhöhtes Bewusstsein für das Thema Lichtverschmutzung bei der Beleuchtungsplanung, Beratung und Öffentlichkeitsarbeit

Es ist wichtig, das bestehende Wissen zu dem Thema einerseits an die Zivilgesellschaft und Unternehmen und andererseits an die Mitarbeiter von Behörden und Ämter weiter zu vermitteln und Multiplikatoren in Politik und Gesellschaft für das Thema zu finden. Denn Bewusstseinsbildung hat keinen Selbstzweck, sondern verändert die Sichtweise und Wahrnehmung (Brinkmeier 2013).

Der staatliche Umgang mit dem Thema Beleuchtung und Lichtverschmutzung kann ein Wegweiser sein, durch Befugnisse in Regierung, Parlamenten, Räten und Verwaltungen. Weitere Handlungsmöglichkeiten zu einer Bewusstseinsbildung sind Fort- und Weiterbildungen, die Förderung des Ausbaus von Studiengängen zu Beleuchtungsgestaltung, die Erstellung von Best-Practice-Beispielen und Leitfäden, die Etablierung der industrieunhabhängigen Lichtberatung und Gründung von Lichtplanungseinrichtungen, die Schaffung interdisziplinärer Kooperationen und integrierten Beleuchtungsplanungen, gut organisierte Medienkampagnen und Aktionen in den sozialen Netzwerken sowie die Förderung von nachhaltigem Tourismus für ein Erleben der natürlichen Dunkelheit.

Fazit & Einschätzung der Gutachter*innen

Nach dem Vorsorgeprinzip sollten wir mit Ressourcen schonend umgehen, frühzeitig und vorausschauend und im Interesse künftiger Generationen handeln, auch wenn Ursache-Wirkungs-Beziehungen noch nicht vollständig definiert sind. Einem Rebound-Effekt durch energieeffiziente Beleuchtung ist entgegenzuwirken, die Beleuchtungsanwendung im Außenbereich zu prüfen, gesellschaftlich zu diskutieren und Regelungsformen zu entwickeln - nur so kann sich ein nachhaltiger Umgang mit künstlichem Licht im Außenbereich etablieren.

Es gilt zu klären, was *angemessene* Beleuchtung ist - und entsprechende Grenzwerte im Konsens zu definieren. Wissen und Positionen aus unterschiedlichen Disziplinen und Zugängen sind einzubeziehen. Um dies zu erreichen ist nicht nur weitere Grundlagenforschung notwendig (z.B. Hölker et al. 2010; Henckel/Moss 2015) sondern auch die kritische Überprüfung der Belastbarkeit der Evidenz der heute gängigen Beleuchtungspraxis (z.B. siehe Diskussion zur DIN EN 13201 in Fotios/Goodman 2012).

Um die Lichtverschmutzung zu reduzieren und zu begrenzen, sind Kenntnisse der räumlichen und zeitlichen Nutzung der Beleuchtung und die Verteilung der Lichtemissionen unerlässlich. Zentral ist angesichts der immer breiter gefächerten Anwendung künstlicher Beleuchtung die Betrachtung der Gesamtbeleuchtungssituation, mit Hilfe von Leuchtenkataster, Fernerkundungsdaten, vertikale und Fischaugenfotografien sowie SQM-Messungen der Himmelshelligkeit. Der Vergleich mit Luft- und Lärmmessnetzen legt nahe auch für die Lichtverschmutzung ein weitreichendes Monitoringdaten-Netz aufzubauen.

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. Durch geringe

Energiekosten und drastisch fallende Anschaffungskosten wird sich die Verbreitung der LED rasant durchsetzen. Das Problem ist dabei nicht mehr nur die öffentliche Beleuchtung, sondern zunehmend auch Formen der privaten Beleuchtung, etwa im Gewerbe- und Handelsbereich, aber auch im Umfeld von Wohnhäusern.

Der politische Rahmen kann durch die Weiterentwicklung einer Beleuchtungs-Governance erreicht werden, die auf einer breiten Kombination von Ansätzen stützt. Bedeutend sind sowohl die (Weiter)-Entwicklung von Regelungen, um bestehende Lücken in der Regelungslandschaft zu schließen, als auch die Gestaltung von Prozessen. Dabei kann von den Erfahrungen anderer europäischer Länder profitiert werden. Besonders bedeutend auf Bundesebene wäre es, für die öffentliche Beleuchtung Orientierungsrahmen zu bieten, die ein Gegengewicht zu den bestehenden Industrienormen (z.B. DIN EN 13201) bilden, indem sie den Gebietskörperschaften eine rechtssichere Grundlage für ihre Beleuchtungsplanung bieten, welche die große Bandbreite der Aspekte bezogen auf Licht zu berücksichtigen und Grenzen und Maßstäbe setzen. Ein ganz zentraler Aspekt ist es auch, Lichtverschmutzung zu verhindern, bevor sie entsteht, statt im Nachhinein einzugreifen.

2. Einführung

Künstliches Licht ist in unserem Alltag allgegenwärtig und eine der größten technischen Errungenschaften der Menschheit. Erst mit der künstlichen Beleuchtung wurde es möglich, Aktivitäten des Tages in die Nacht auszuweiten, ohne die die heutige 24-Stunden-Gesellschaft nicht möglich wäre (Jakle 2001, Doll et al. 2006 in Hölker et al. 2010; Meier 2016; Henckel et al. 2013). Die künstliche Beleuchtung unserer Umgebung hat aber auch zu einer Transformation der Nachtlandschaft geführt, das Gesamtgefüge des Naturhaushaltes verändert und uns von dem natürlichen Rhythmus von Tag und Nacht entkoppelt (Hofmeister 2013).

Mit der Einführung einer mehr und mehr flächendeckenden Beleuchtung in den 50er Jahren in den Industrieländern nahm auch die kritische Auseinandersetzung mit der künstlichen Beleuchtung zu (Hasenöhrl 2015). Astronomen gehörten zu den Ersten, denen die negativen Folgen der künstlichen Beleuchtung durch die Aufhellung des Nachthimmels und des damit verbundenen „Verschwindens" der Sterne aufgefallen sind (Riegel 1973), aber auch der ökologische Einfluss von künstlichem Licht, so zum Beispiel auf Meeresschildkröten (Hendrickson 1958) und Insekten (Hsiao 1973), wurde erstaunlicherweise bereits ab den 50er Jahren in wissenschaftlichen Publikationen kritisiert. Die negativen Auswirkungen, die unter dem Begriff „Lichtverschmutzung" zusammengefasst werden, rücken jedoch nur langsam in das Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit. Das hat nicht zuletzt damit zu tun, dass Licht vor allem mit positiven Assoziationen wie Sicherheit, Modernität, Ästhetik und Wohlstand verbunden wird. Im Vergleich zu anderen Umweltverschmutzungen, wie Lärm, Luft- oder Wasserverschmutzung befindet sie sich gesellschaftlich, wissenschaftlich als auch rechtlich noch ziemlich im Dunklen. Aktuell gewinnen die unerwünschten Auswirkungen der Erhellung der Nacht an Aufmerksamkeit, was auch darauf zurückzuführen ist, dass sich in den vergangenen 15 Jahren Hinweise zu deren Ausmaß und Tragweite aus verschiedensten Disziplinen deutlich gemehrt haben. Im Verlauf dessen erfährt auch die Debatte um einen besseren Umgang mit künstlicher Beleuchtung eine zunehmende Auffächerung der Perspektiven, weg von einer stark technisch dominierten Betrachtungsweise, wobei die Belange der Energieeffizienz und des Klimaschutzes noch immer vorrangig behandelt werden (Hölker et al. 2010).

Der Begriff "Lichtverschmutzung" bzw. englisch "light pollution" ist nicht eindeutig definiert. Er ist noch jung, denn er entstand höchstwahrscheinlich erst in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts (Degenring 2015). Zudem berührt er unterschiedlichste Bereiche: Künstliches Licht kann unerwünschte Auswirkungen auf den Menschen, Flora und Fauna, die ästhetische Qualität von Stadt- und Naturlandschaften sowie die Sichtbarkeit des Sternenhimmels haben, und so befassen sich neben Astronomen etwa auch Chronobiologen und Humanmediziner, Ökologen und Lichttechniker, Planer und Juristen, Sozial- und Kulturwissenschaftler mit dem Thema (Meier et al. 2015). Es ist daher wenig überraschend, dass verschiedene parallele Begriffsverständnisse bestehen, die aus den unterschiedlichen disziplinären Zugängen resultieren und für diese auch erforderlich sein können. Dies schlägt sich in einigen Fällen in begrifflichen Konkretisierungen nieder. So unterscheiden etwa Rich und Longcore (2006, S. 3f) zwischen "astronomischer Lichtverschmutzung", bei der die Überblendung des Nachthimmels im Mittelpunkt steht, und "ökologischer Lichtverschmutzung", bei der es um Störungen in Ökosystemen geht. Für eine Diskussion der (englischsprachigen) Begriffsgenese und unterschiedlicher fachlicher Definitionsansätze sei hierzu auf Degenring 2015 verwiesen.

Quer zu den fachlichen Begriffsverständnissen ist zudem grundsätzlich zwischen absoluten und relativen Definitionsansätze zu unterscheiden. In den absoluten Definitionen gilt jedwedes künstliches Licht im Außenraum als Verschmutzung, analog z.B. der Gewässer- oder Luftverschmutzung. Beispiele hierfür finden sich etwa bei Cinzano et al. (2001, S. 689): "*the alteration of the ambient light levels in the night environment produced by man-made light*", der Starlight Initiative (Starlight Initiative 2009, S. 9): "*is the introduction by humans, directly or indirectly, of artificial light into the environment*" oder in der Slowenischen Lichtverschmutzungsverordnung: "*Die Lichtverschmutzung der Umwelt ist die Lichtemission aus den Lichtquellen, durch welche die natürliche Beleuchtungsstärke der Umwelt erhöht wird*." (I. Art.3 Republik Slowenien 2007). In den relativen Definitionen wird nur jene Beleuchtung mit "störenden" oder "nicht beabsichtigten" Wirkungen als Verschmutzung gesehen. Dadurch wird der für den Menschen bestehenden Nutzenseite der künstlichen Beleuchtung Rechnung getragen, jedoch bleibt damit zwangsläufig zu einem gewissen Teil offen, in welchen Fällen künstliche Beleuchtung als Lichtverschmutzung bezeichnet wird. Ein Beispiel ist die Definition von Gallaway et al. (2010, S. 658): "Light pollution is a broad term referring to excessive or obtrusive artificial light caused by bad lighting design".

Für diesen Bericht wurde eine fachlich übergreifende, relative Definition von Lichtverschmutzung gewählt. Damit wird einem Definitionsansatz gefolgt, wie er etwa vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt verwendet wird (BAFU 2017a): **Lichtverschmutzung** ist für diesen Bericht als die **„nicht intendierte Wirkung" von künstlicher Beleuchtung im Außenbereich** definiert, 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.

Abbildung 1: Auswahl einiger Arten von Lichtverschmutzung und gut ausgerichtete Außenbeleuchtung. (Bildquelle: "Umgebungsaufhellung" von Andrej Mohar, unter CC BY-NC 4.0, alle anderen Fotos von den Autoren).

Genauer erfassen lassen sich die verschiedenen Ausprägungen von Lichtverschmutzung wie in der folgenden Abbildung 2 neben dem Beispiel von einem gut ausgeleuchteten Außenbereich illustriert wird. Diese beinhalten die Himmelshelligkeit (engl. skyglow): 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; Hänel 2001; Kyba et al. 2015a); die physiologische und psychologische Blendung (engl. glare), die das direkte und messbare Herabsetzen des Erkennungsschwellenwerts und ein subjektive Störempfinden darstellt (LAI 2012; Strahlenschutzkommission 2006); sowie die unbeabsichtigte Aufhellung der Umgebung (engl. light trespass). Zusätzlich werden unter dem Begriff Lichtverschmutzung auch die ökologische Beeinträchtigung (siehe Themenfeld 2: Auswirkungen der Lichtverschmutzung auf Fauna und Flora) und humanmedizinische Wirkungen (siehe Themenfeld 3: Humanmedizinische Wirkungen der Lichtverschmutzung) von künstlicher Beleuchtung in der Umwelt, sowie begleitende Energie-/Immissionseffekte von künstlichem Licht, auch auf den Klimaschutz und Nebeneffekte durch Luftverschmutzung (Stark et al. 2011) verstanden.

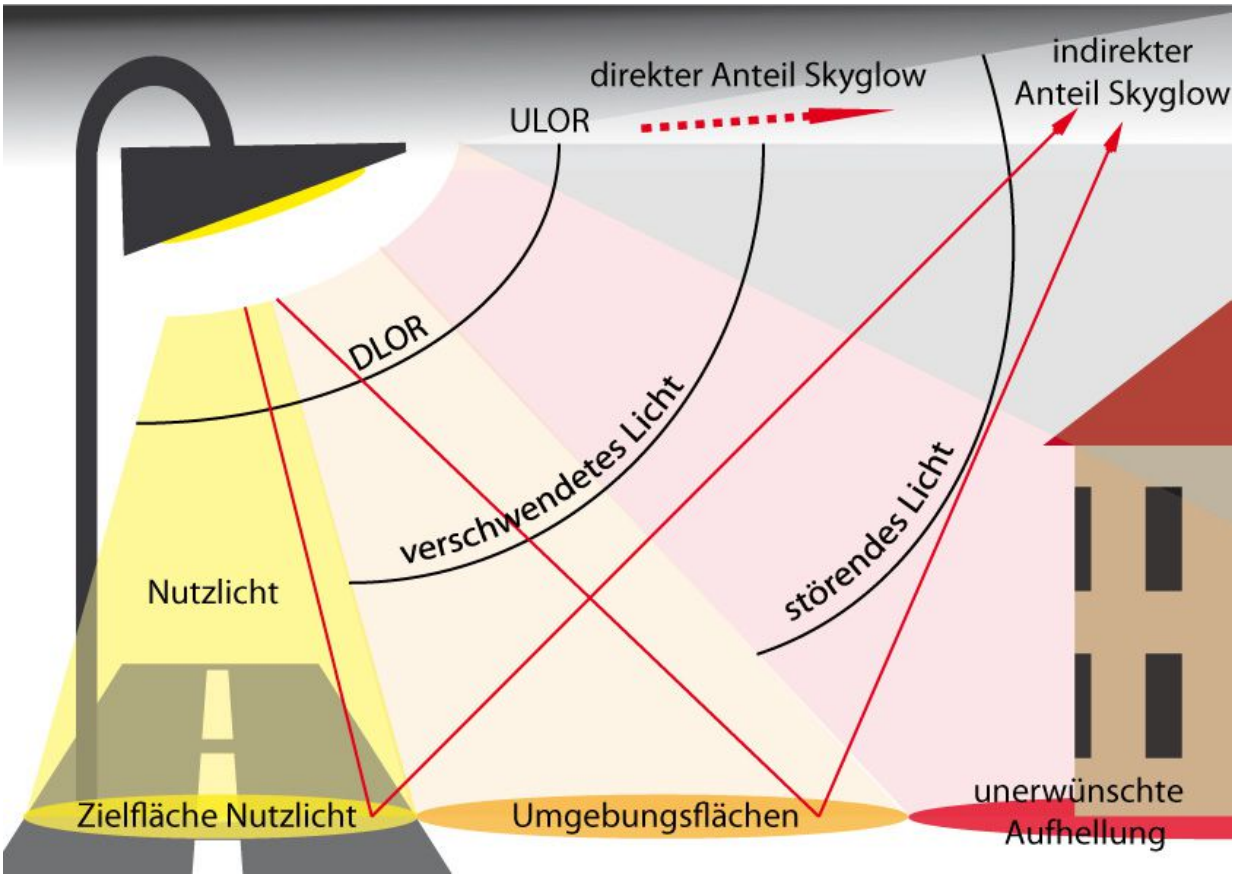

Abbildung 2: Darstellung der intendierten und nicht intendierten Lichtemissionen, ULOR = prozentualer Anteil des in den oberen Halbraum abgegebenen Lichts, DLOR = prozentualer Anteil des in den unteren Halbraum abgegebenen Lichts (adaptiert nach LiTG 2011; Lang 2013, Bearbeiter: Sascha Gey)

Lichtverschmutzung entsteht durch Emissionen durch direkt nach oben gerichtetes Licht (z.B. ein Teil des Lichtes von nicht voll-abgeschirmten Leuchten) oder durch Licht, das neben die zu beleuchtende Fläche emittiert wird. Weiterhin entsteht Lichtverschmutzung durch Immissionen, also das Licht, das an einem Ort ankommt. Auch wenn in diesem Bericht nur der Begriff „Lichtemissionen“ verwendet wird, ist es wichtig zu berücksichtigen, dass die künstliche Beleuchtung nicht nur die direkte Umgebung beeinflusst, sondern auch überregionalen Einfluss hat, indem es zum Beispiel ungehindert in den Nachthimmel strahlt und damit die

Nachtlandschaft hunderte Kilometer weit entfernt von der Lichtquelle beeinflusst und sogar vom Weltall aus zu sehen ist (BAFU 2017a; Gallaway 2010).

Quellen von künstlichem Licht im Außenbereich in der Nacht sind ebenso vielfältig wie die Nutzung von Beleuchtung. Es existieren unterschiedliche Kategorisierungen von Lichtquellen nach genutzter Technik (z.B. Natriumdampf oder LED) und damit einhergehenden Eigenschaften oder auch nach den unterschiedlichen Zwecken, für die sie eingesetzt werden. In Anlehnung an die Einteilung von BAFU (2017), Auer (1997) und Kuechly et al. (2012) wird folgende Einteilung vorgenommen:

Ordnungslicht ist Licht zur Orientierung, z.B. die Beleuchtung für die Verkehrssicherheit (Straßen, Plätze, Bahnhöfe, Flugplätze etc.) oder für Sportinfrastruktur (Trainingsplätze, Stadien, Skipisten etc.), wobei Licht für die Arbeitssicherheit und Wohnen eine gesonderte Kategorie bilden.

Werbelicht ist Licht von Leuchtreklamen (Werbetafeln, Schaufenster) und beleuchtete Werbung im Allgemeinen, aber auch Teilbereiche der Gestaltungs- und Zierbeleuchtung („Skybeamer", Medienfassaden, Lichtinstallationen), wenn sie für Werbezwecke verwendet werden.

Festlicht ist Licht für ästhetische und kulturelle Zwecke wie Beleuchtung von öffentlichen Gebäuden und Anlagen (Denkmäler, Kirchen etc.), Gestaltungs- und Zierbeleuchtung („Skybeamer", Medienfassaden, Kunstinstallationen, Lichtfestivals, Weihnachtsbeleuchtung) und auch Teile der Beleuchtung im Naturraum (Bäume, Ufer, Wasserflächen etc.).

Wohnlicht ist die Beleuchtung von privaten Gebäude und Anlagen (funktionale Außenbeleuchtung, Gestaltungs- und Zierbeleuchtung, Weihnachtsbeleuchtung, Licht, das vom Gebäudeinneren nach außen strahlt etc.).

Arbeitslicht ist die Beleuchtung für Industrie und Gewerbe (inklusive Gewächshäuser, Nachtbaustellen, Tankstellen, Geschäften und Licht, das vom Gebäudeinneren nach außen strahlt).

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

öffentliches Licht ist ist die Beleuchtung aus öffentlicher Hand, insbesondere die kommunale Straßenbeleuchtung, aber auch Anstrahlungen von Gebäuden u.ä..

privates Licht ist alles nicht-öffentliche Licht im Gewerbe- und Handelsbereich, sowie von Privatpersonen, z.B. im Umfeld von Wohnhäusern.

Ziel der Behandlung des vorliegenden Themenfeldes „Ausmaß der Lichtverschmutzung und Optionen zur Minderung der negativen Auswirkungen" ist es, den aktuellen Stand über Ausmaß und Zunahme der künstlichen Beleuchtung im Außenbereich in Deutschland (Kapitel 3) sowie aktuelle Entwicklungstrends in technologischer und lichtplanerischer Hinsicht wiederzugeben. Ausgehend von der derzeitigen Praxis in Deutschland und in europäischen Nachbarländern werden Handlungsoptionen zur Verringerung der Lichtverschmutzung identifiziert und beschrieben und Wissenslücken in den einzelnen Bereichen aufgezeigt (Kapitel 4).

Im ersten Teil des Berichtes werden der aktuelle Wissensstand zur Ausgangssituation in Deutschland sowie Ursachen und Trends von technologischen und lichtplanerischen

Entwicklungen (Kapitel 3) erläutert. Dies beinhaltet die Darstellung möglicher Messmethoden zur Erfassung der künstlichen Beleuchtung (3.1), die räumliche und zeitliche Variabilität (3.2) sowie Nachweis und Beobachtungen der Ausmaße und Trends der künstlichen nächtlichen Beleuchtung in Deutschland und Europa (3.3). Dazu werden weiterhin gegenwärtige Veränderungen der Beleuchtungstechnologien und Trends bei der Nutzung und Lichtplanung (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) aufgezeigt. Weiterhin wird auf die nichtintendierten visuellen Auswirkungen von Außenbeleuchtung auf den Menschen (3.4), und die Beeinträchtigungen des Erlebens natürlich dunkler Nächte (3.5) und der erdgebundenen Weltraumforschung (3.6) durch Lichtverschmutzung behandelt.

Im zweiten Teil werden dann technische und regulatorische Handlungsoptionen identifiziert (Kapitel 4). Zuerst wird dazu eine Zusammenfassung und Diskussion bestehender Regelungen in Deutschland und der EU gegeben (4.1), die auf Regelungen und Rahmensetzungen in Deutschland auf Bundesebene (4.1.1) und weitere Instrumente und Ansätze zur Minimierung der Lichtverschmutzung in Deutschland (4.1.2) sowie Industrienormen (4.1.3), Verbraucherinformationen (0), Förderpolitik (4.1.5) eingeht und auch bestehende Regelungen in der EU und der Schweiz (4.1.6) betrachtet. Darauf aufbauend werden Handlungsoptionen (4.2) vorgestellt, die eine Darstellung möglicher Parameter für Verwendung in Regulierungen der Lichtverschmutzung (4.2.1) und Handlungsinstrumente (4.2.2) beinhaltet. Weiter werden positive technologische Entwicklungen zur Reduzierung der Lichtverschmutzung (4.3) und Vorschläge für ein erhöhtes Bewusstsein für das Thema Lichtverschmutzung bei der Beleuchtungsplanung, Beratung und Öffentlichkeitsarbeit (4.4) gemacht.

3. Analyse der Ausgangssituation in Deutschland, sowie Ursachen und Trends von technologischen und lichtplanerischen Entwicklungen

Die verschiedenen Arten der Lichtverschmutzung können mit unterschiedlichen Methoden gemessen werden, die jeweils bestimmte Einschränkungen haben. Zum Beispiel kann das nach oben abgestrahlte Licht von Städten aus dem Weltall beobachtet werden, aber kann nicht das direkte Ausmaß von künstlichem Licht auf die Himmelshelligkeit bestimmt werden. In ähnlicher Weise können Satellitenbildaufnahmen nicht dazu herangezogen werden, wenn es um die Frage geht, ob eine Lampe benachbarte Häuser und Bäume ungewollt beleuchtet. Die folgenden Kapitel von 3.1 geben einen Einblick in bestehende Messmethoden und deren Anwendungsmöglichkeiten. In Kapitel 3.1. werden nach einer kurzen Einführung in photometrische Begriffe (3.1.1), Leuchtenkatastern (3.1.2), horizontalen Luft- und Satellitenbildaufnahmen (3.1.3), vertikalen Fotografien (3.1.4), Messmethoden und Simulationen der Himmelshelligkeit (3.1.5 & 3.1.6) dargestellt sowie eine kritische Beurteilung dieser vorgestellt (3.1.7). Darauf folgt die Betrachtung der räumlichen und zeitlichen Variabilität künstlicher Beleuchtung in Kapitel 3.2 mit der räumlichen Verteilung des nach oben emittierten Lichtes aus Fernerkundungsdaten (3.2.1) und Himmelshelligkeit (3.2.2) sowie eine differenzierte Analyse der zeitlichen Veränderung von Beleuchtung (3.2.3). In Kapitel 3.3 werden dann bestehende Informationen über Ausmaß und Trends der künstlichen Außenbeleuchtung in Deutschland und Europa durch Satellitendaten (3.3.1), bzw. Bodenbeobachtungen (3.3.2) gegeben und gegenwärtige Veränderungen in der Beleuchtungstechnologie und Trends bei der Nutzung und Lichtplanung (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) identifiziert. Abschließend wird in Kapitel 3.4 auf die nichtintendierten visuelle Auswirkungen von Außenbeleuchtung auf den Menschen eingegangen, die Beeinträchtigung des Erlebens natürlich dunkler Nächte in Kapitel 3.5 und der Weltraumforschung in Kapitel 3.6 durch Lichtverschmutzung zusammengefasst.

3.1. Messmethoden zur Erfassung der künstlichen nächtlichen Beleuchtung

In diesem Abschnitt werden verschiedene Methoden zum Messen und Simulieren des künstlichen Lichts im Außenbereich besprochen, wobei die Auswahl der Methode davon abhängt, was genau beobachtet werden soll. Sowohl für Beobachtungen am Boden für einzelne Lampen als auch für beleuchtete Flächen werden meist photometrische Methoden verwendet (3.1.1). Informationen über einzelne Lampen können durch Erhebungen gewonnen werden oder sind in manchen Fällen den für die Beleuchtung verantwortlichen Stellen bereits bekannt (3.1.2). Mit Fernerkundungsmethoden durch Luftbilder oder Satellitendaten (3.1.3) kann Licht untersucht werden, das entweder durch Lampen nach oben abgestrahlt oder durch Oberflächen aufwärts reflektiert wird. Die Bestimmung der Himmelshelligkeit vom Boden aus (3.1.4) erfasst Streulicht aus der Atmosphäre (künstliches Himmelsleuchten - engl. skyglow). Aus den Fernerkundungsdaten von Satelliten kann mit Modellen das künstliche Himmelsleuchten (3.1.5) berechnet werden, um abzuschätzen, wie hell der Himmel an einem bestimmten Ort zu erwarten ist. Die Limitierungen der einzelnen Methoden und Empfehlungen werden am Ende des Teilbereichs (3.1.6) besprochen.

3.1.1. Einführung in photometrische und radiometrische Messgrößen

Zur Messung der auf die menschliche spektrale Augenempfindlichkeit abgestimmten Lichtmenge werden photometrische Messmethoden eingesetzt. Die fotometrischen Größen sind für die Planung und Messung von Beleuchtungsanlagen wichtig und werden zur Festlegung von Grenzwerten, beispielsweise in den Normen, verwendet. Allerdings werden für nächtliche Messungen Empfindlichkeiten benötigt, die nur von wenigen, oft teuren Geräten erreicht werden.

Lichtstrom

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

Lichtstärke

Die Lichtstärke ist der in einen bestimmten Raumwinkelbereich abgestrahlte Lichtstrom mit der Einheit Candela (cd). Der Name ist von „Kerze“ abgeleitet und hat üblicherweise eine Lichtstärke von 1 cd, das einem 1 Lumen pro Quadratmeter entspricht. Die radiometrische Größe hierfür ist die **Strahlungsstärke** (Strahlstärke, Strahlungsintensität), angegeben in Watt pro Steradiant (W/sr).

Beleuchtungsstärke

Zur Messung der **Beleuchtungsstärke**, das ist der gesamte auf eine bestimmte Fläche einfallende Lichtstrom, werden Beleuchtungsstärkemesser (Luxmeter) eingesetzt. Die Maßeinheit ist das Lux (lx), anzustreben ist eine Genauigkeit von 0.01 lx bis zu Helligkeiten von 0.01 lx. In der Radiometrie entspricht dies der **Bestrahlungsstärke** (Strahlungsstromdichte), angegeben in Watt pro Quadratmeter (W/m^2)

Leuchtdichte

Die **Leuchtdichte** beschreibt die Helligkeit, wie sie dem Auge auf einer Fläche erscheint. Gemessen wird sie mit Leuchtdichtemessgeräten, die meist ein kleines Messfeld haben und daher besonders empfindlich sein müssen. Gemessen wird die Leuchtdichte in Candela/Quadratmeter (cd/m^2). Auch hier sind Genauigkeiten von 0.1 cd/m^2 bis hinab zu 0.01 cd/m^2 anzustreben. In der Radiometrie entspricht dies der **Strahldichte**, die in $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ angegeben wird.

Die Leuchtdichte einer angestrahlten Fläche (z.B. Straße) wird von der Beleuchtungsstärke und der Reflexionscharakteristik der Fläche bestimmt. Bei hellen Flächen mit hoher Reflektivität wird mit geringerer Beleuchtungsstärke die gleiche Leuchtdichte wie bei einer dunkleren Fläche mit höherer Beleuchtungsstärke erreicht. Helle Straßenoberflächen können daher mit geringerer Lichtmenge beleuchtet werden, um den gleichen Helligkeitseindruck zu erhalten. Andererseits hängt die Reflektivität und damit (bei konstanter Beleuchtungsstärke) die Leuchtdichte einer

Fläche von vielen Faktoren ab, wie z.B. dem Blickwinkel, der Rauigkeit oder ob die Fläche trocken oder nass ist.

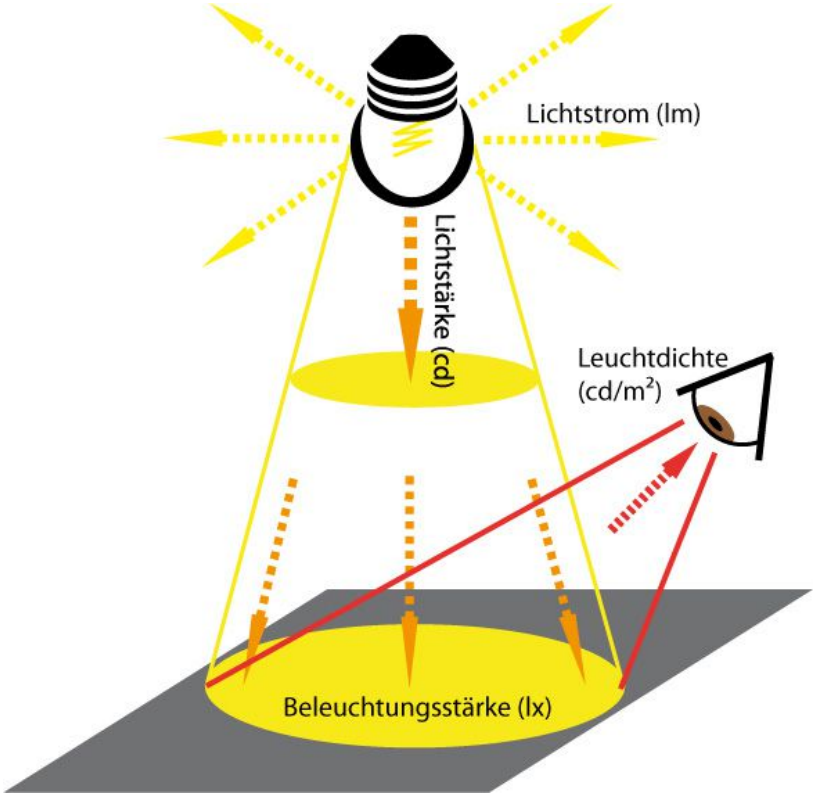

Abbildung 3: Illustration lichttechnischer Größen in Anlehnung an BAFU (2017, S. 121 Bearbeiter: Sascha Gey)

Die **Himmelshelligkeit im Zenit**, eine der Auswirkungen von Lichtverschmutzung (siehe Definition Lichtverschmutzung im Kapitel 0) entspricht einer Leuchtdichte, wird aber häufig (da traditionell aus der Astronomie kommend) in Anlehnung an die Größenklassenskala für die Helligkeiten der Sterne in den astronomischen Einheiten Magnitude/Quadratbogensekunden [mag/arcsec^2] gemessen. Diese Skala ist umgekehrt logarithmisch, das heißt, hohe Werte [mag/arcsec^2] entsprechen einer geringeren Himmelshelligkeit und je höher der Wert, desto dunkler ist der Nachthimmel (desto dunkler ist der Nachthimmel). Dabei ist zu beachten, dass die astronomische Einheit nicht exakt der Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges entspricht. Die nächtliche Himmelshelligkeit ist sehr dynamisch und hängt von diversen Faktoren ab, wie zum Beispiel dem Vorhandensein des Mondes, heller Sterne und der Milchstraße, aber auch von Witterungsbedingungen (Wolken, Nebel) und dem Grad der Luftverschmutzung,. Um die Lichtverschmutzung bewerten zu können, werden Einzelmessungen deshalb bei mondlosem und wolkenlosem Himmel durchgeführt. Zur besseren Veranschaulichung: Im Innenstadtbereich von Berlin (vor dem Reichstag) wurden 18.5 mag/arcsec^2 (10.8 mcd/m^2) gemessen, während in ländlichen Gebieten, wie dem Sternenpark Westhavelland Werte bis 21.75 mag/arcsec^2 (0.2 mcd/m^2) gemessen wurden. Als natürlich dunkelster Himmel wird 22 mag/arcsec^2 angesehen.

Um die spektrale Energieverteilung künstlicher Beleuchtung über einen breiteren (etwa den gesamten sichtbaren) Spektralbereich messen zu können, werden **Spektrometer** eingesetzt, die es beispielsweise ermöglichen, den Typ des Leuchtmittels oder den Anteil blauer Lichtanteile zu bestimmen.

Tabelle 1: typische Werte von Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung nach Hänel et al. 2017):

	Leuchtdichte cd/m^2	Himmelshelligkeit $mag/arcsec^2$	Beleuchtungsstärke lx
Taghimmel	3 000	3.9	100 000
Straßenbeleuchtung	0,1 - 2	-	1 - 30
Vollmondhimmel	0,1	15	0,25
Vororthimmel	0,001	17.6	0,01
Natürlich dunkler Himmel	0,0002	>21.8	< 0,001

3.1.2. Leuchtenkataster

Ein auf Geodaten basiertes Leuchtenkataster unterstützt Betreiber öffentlicher Beleuchtungsanlagen bei einer effektiven Betriebsführung. Die Kenntnis von Position, Masthöhe, Leuchtentyp, Leuchtmittel, Anschlusswert und Installationszeit ermöglicht die Planung von Reparaturen, Austausch von Leuchtmitteln oder Leuchtenköpfen. Zudem ist dadurch eine Überwachung und Lenkung des Energieverbrauchs möglich. Allerdings haben nur 52% der deutschen Kommunen ein Leuchtenkataster (DENA 2013).

Um die Effektivität der Lichtnutzung zu erfassen, wäre eine Kenntnis der Verteilung der Lichtemission (die Lichtverteilungskurve) hilfreich, die aber oft nur für neuere Leuchten bekannt ist. Solche Kataster wurden zum Beispiel in den Sternenparks erstellt, um den Anteil des in den oberen Halbraum (ungenutzt) abgestrahlten Lichts zu bestimmen.

Aktuell gibt es zwei Gruppen außerhalb Deutschland, die bei einem internationalen Treffen angemerkt haben, dass sie App-basierte Systeme entwickeln wollen, die Bürger*innen ermöglichten, Lichtquellen aufzunehmen und zu klassifizieren. Die Projekte wollen über OpenStreetMap die Daten veröffentlichen. Leider gibt es zu diesem Zeitpunkt keine schriftlichen Materialien über die Projekte.

Leuchtenkataster im Sinne vollständiger Bestandsaufnahmen fest installierter Lichtquellen im Außenraum, die neben öffentlicher (Straßen-)Beleuchtung auch private Lichtquellen dokumentieren, sind aus Deutschland nicht bekannt.

3.1.3. Horizontale Luft- und Satellitenbildaufnahmen

Da die Atmosphäre relativ transparent ist, kann künstliches Licht von seinem Ursprung aus oft große Entfernungen zurücklegen, ohne seine Richtung zu ändern. Deshalb kann nächtliche Beleuchtung (z.B. Städte) von oben, d.h. aus der Luft oder vom Weltall aus, mit Kameras abgebildet werden (Abbildung 4). In Abhängigkeit von der räumlichen und radiometrischen Auflösung des abbildenden Sensorsystems können Informationen über die Strahldichte (Helligkeit) und deren spektrale Zusammensetzung (Farbe) für beleuchtete und leuchtende Flächen gewonnen werden. Mit den heutigen Messsystemen können jedoch nur begrenzt spektrale Informationen bestimmt werden, und es ist daher nicht möglich, Lampentypen eindeutig mit Hilfe von Luftbildern zu identifizieren (Sánchez de Miguel et al. 2017). Allerdings ist eine fundierte Abschätzung dann möglich, wenn Zusatzinformationen vorliegen. Beispielsweise werden die größten Straßen in ganz Berlin zumeist noch mit orangefarbenen Hochdruck-Natriumdampflampen erleuchtet (Abbildung 4), kleinere Straßen dagegen haben unterschiedliche Farben, je nachdem, ob sie im früheren Ostberlin (orange: Natriumdampflampen) oder Westberlin (weiß: z.B. Quecksilberdampflampen, Gaslampen, Leuchtstoffröhren oder LED) gelegen sind.

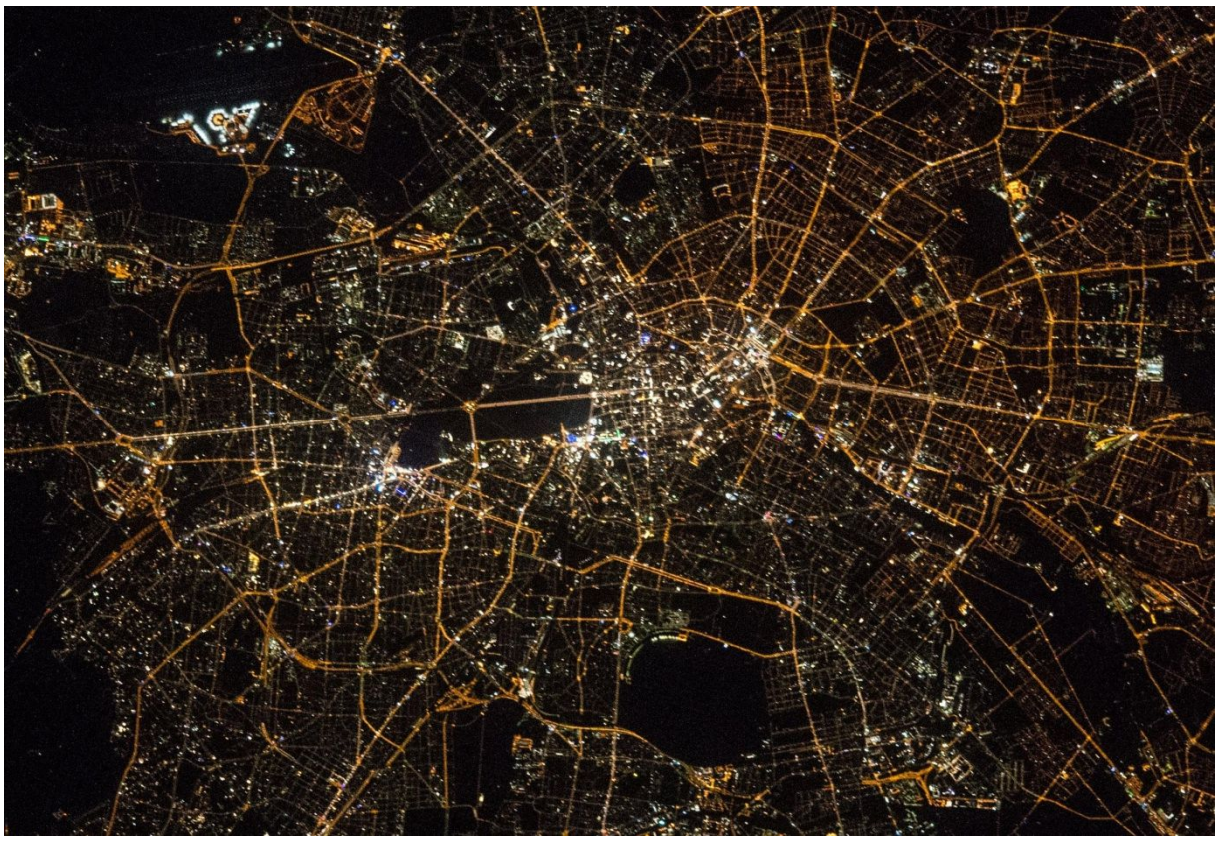

Abbildung 4: Nächtliches Berlin, fotografiert von der Internationalen Raumstation am 31. März 2016, 00:03 Uhr, CEST. (Bildquelle: Image ISS047-E-29989 Earth Science and Remote Sensing Unit, Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von NASA Johnson Space Center)

Es gibt drei Hauptquellen für Nachtaufnahmen von der Erdoberfläche: erstens Luftbilder von Flugzeugen, Ballonen, oder Drohnen, zweitens Fotografien von Astronauten auf der Internationalen Raumstation (ISS) und drittens nächtliche Satellitenbeobachtungen durch das Defense Meteorological Satellite Program Operational Linescan System (DMSP-OLS, 1992 - 2013) und Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day/Night Band (VIIRS DNB, April 2012 - heute).

Eine detaillierte Diskussion der Methoden einschließlich ihrer Vorzüge und Nachteile ist in Kyba et al. (2015b) zu finden. In den nächsten Jahren kann erwartet werden, dass durch NITESat (Night Imaging and Tracking Experiment Satellite) von 2-U Satelliten multispektrale Aufnahmen mit einer mittleren Auflösung im Vergleich zu den Fotografien der Astronauten und bestehenden Satellitendaten bereitgestellt werden (Walczak et al. 2017; Pack et al. 2017).

Luftbilder und Aufnahmen von Drohnen liefern Bilder höchster räumlicher Auflösung (Abbildung 5). Die Aufnahme von solch hochauflösendem Bildmaterial für die Analyse der Beleuchtungssituation erfordert einen gesonderten Bildüberflug und oft auch spezielle Ausrüstung, z. B. für Präzisionsnavigation und Stabilisierung (Inertialsysteme). Diese Gegebenheit in Verbindung mit begrenzten Finanzmitteln für derartige Studien haben den Einsatz dieser Methode auf sehr wenige Städte und Regionen weltweit eingeschränkt (z.B. Kuechly et al. 2012; Hale et al. 2013; Ruhtz et al. 2015). Bildflüge für große Flächen erstrecken sich über mehrere Stunden, und die Muster der darzustellenden Aktivitäten können sich in dieser Zeit ändern. Die Terminplanung für derartige Aufnahmen ist (sowohl tageszeitlich als auch jahreszeitlich) oft beeinträchtigt durch Einschränkungen für Starts und Landungen auf Flughäfen.

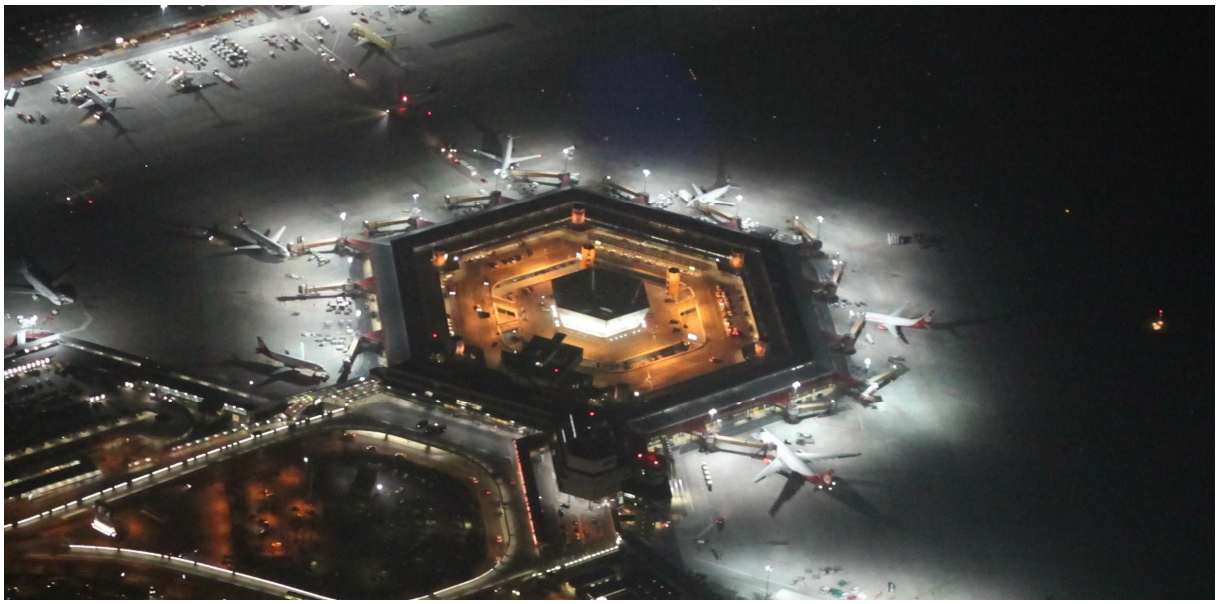

Abbildung 5: Der Berliner Flughafen Tegel, Berlin am 15. März 2012, 21:37 Uhr (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Christopher Kyba, aufgenommen für die Freie Universität Berlin)

Astronauten auf der Internationalen Raumstation fotografieren gelegentlich die Erde bei Nacht mit kommerziellen Kameras. Diese Fotos umfassen meist ganze Städte oder größere Regionen (Abbildung 4), wodurch der räumlichen Auflösung Grenzen gesetzt sind. Auch die schnelle Bewegung der Raumstation gegenüber der Erdoberfläche stellt eine Herausforderung für die Erzielung hochauflösender Bilder dar. Die meisten Fotos haben daher eine Auflösung im Bereich von 20 bis 50 Meter, und viele sind auch verwackelt. Trotzdem wurden in einigen Fällen Auflösungen von weniger als 10 m erreicht, wodurch es möglich wurde, die Positionen bzw. die Anordnung einzelner Straßenlampen zu unterscheiden (Abbildung 6). Die Überflugzeit der ISS ist variabel, es können deshalb zu jeder Nachtzeit Aufnahmen gemacht werden, was es ermöglicht, zeitliche Veränderungen über den Verlauf der Nacht zu dokumentieren, auch wenn Aufnahmen von verschiedenen Tagen verwendet werden (Kyba et al. 2015b).

Fotografien der Astronauten werden gegenwärtig im Rahmen eines "Citizen-Science" Projektes kategorisiert; das Projekt läuft unter der Bezeichnung „Städte in der Nacht" ("Cities at night")[4]. Im ersten Arbeitsschritt registrieren die Bürgerwissenschaftler, ob Fotos aufgenommen wurden, während die ISS die Nachtseite der Erde überflog; weiterhin wird festgehalten, ob Orte auf der Erdoberfläche abgebildet wurden oder etwas anderes (z.B. das Innere der Raumstation); schließlich werden die Aufnahmen bezüglich ihrer Bildschärfe und Klarheit sowie der Bewölkungsdichte beurteilt. Im zweiten Arbeitsschritt bestimmen Bürgerwissenschaftler mit Hilfe ihrer geographischen Kenntnisse, welche Orte jeweils auf den einzelnen Fotos abgebildet sind. Im dritten Arbeitsschritt werden ausgewählte Bilder georeferenziert, um sie in Verbindung mit geographischen Informationssystemen (GIS) für Analyse-Zwecke nutzen zu können.

Abbildung 6: Ein Ausschnitt der Stadt Calgary/Alberta, aufgenommen von einem Astronauten der Internationalen Raumstation um 00:07 Uhr MST am 28. November 2015. (Bildquelle: ISS045-E-155029, Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center)

Nachtaufnahmen der Erde von der Internationalen Raumstation aus werden von den Astronauten meistens nur zu ihrer Unterhaltung gemacht und nur sehr selten im Zuge von Aufträgen der Raumfahrtbehörden. Deshalb sind die verfügbaren Bilder als nicht repräsentativ zu charakterisieren: Die größten, hellen und bestens bekannten Städte Europas und Nordamerikas werden weitaus häufiger fotografiert als ländliche Regionen und Orte in Entwicklungsländern im Allgemeinen. Soweit bekannt, hatten die deutschen Astronauten keinen Auftrag, deutsche, andere europäische oder außereuropäische Städte aufzunehmen. Eine derartige Aufgabe, z.B. Antrag von Dr. A. Hänel und Dr. A. Gerst auf Aufnahme der Regionen der Sternenparks in die "Blue Dot Mission" (DLR 2015) wurde nicht durchgeführt, könnte wertvolle Informationen über Trends zur künstlichen Beleuchtung erbringen, besonders im Hinblick auf die spektrale Zusammensetzung der Strahlung aus diesen Lichtquellen.

[4] www.citiesatnight.org (30.10.2017)

Die nächtliche Beobachtung mit Satelliten liefert eine Möglichkeit, die Lichtemission von der Erdoberfläche in den Weltraum auf globaler Skala zu bewerten, wobei bisher auf Datensätze des (älteren) Messinstruments DMSP-OLS und des (modernen) VIIRS DNB Sensors zurückgegriffen wurde. Das wissenschaftliche Potential der DMSP-OLS-Daten ist wegen der geringen räumlichen Auflösung (5 km) und wegen des Fehlens von Kalibrierungsmöglichkeiten an Bord des Satelliten stark eingeschränkt (Miller et al. 2013). Mehrere Forschergruppen haben versucht, die Daten über gegenseitige Vergleichsmessungen zu kalibrieren, aber die verwendeten Methoden beruhen oft auf unrealistischen Annahmen über eine unveränderte Beleuchtungssituation (-stabilität) bestimmter Regionen oder Städte, und am Ende ergaben sich erhebliche Abweichungen bezüglich des Trends bei der Außenbeleuchtung nach Beobachtungen zwischen 1992 und 2013 (Kyba 2017a; Li/Zhou 2017).

Im Gegensatz dazu liefert das moderne VIIRS DNB global kalibrierte nächtliche Daten mit einer räumlichen Auflösung von ungefähr 750 m, und das bei höherer Messempfindlichkeit und radiometrischer Genauigkeit als beim DMSP (Miller et al., 2013). Diese nächtlich aufgezeichneten Daten (Onlinekarte täglicher Rohdaten seit 2016[5]) werden von der „US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)“ zu monatlichen und jährlichen Mosaik-Datensätzen zusammengefügt. Dies sind daher die ersten globalen und dabei kalibrierten Daten zur nächtlichen Außenbeleuchtung. Leider fehlt dem VIIRS DNB Sensor die Empfindlichkeit im blauen Spektralbereich (Licht mit Wellenlängen unterhalb von 500 nm). Der Sensor nimmt daher keine echten photometrischen Daten auf. Diese Tatsache verursacht ein Problem für Trendanalysen, weil gegenwärtig die bisher weltweit gebräuchlichen orangefarbenen Natriumdampflampen durch weiße LED-Lampen ersetzt werden. Wegen der fehlenden Empfindlichkeit des VIIRS DNB für blaues Licht ist die Umstellung der Beleuchtung zwischen Natriumdampflampen und LED problematisch für Vergleichsmessungen; bei eigentlich gleichbleibender Leuchtdichte bzw. Beleuchtungsstärke (echte photometrische Daten) an einem Zielobjekt erscheint diese für den Satellitensensor mit einer reduzierten Helligkeit, typischerweise in der Größenordnung von 30 % (Sánchez de Miguel/et al. 2017).

Die Verwendung von Spezialkameras, sogenannten abbildenden Spektrometern oder Hyperspektral-Kameras, bei denen jedes Pixel eine (hyper-) spektrale Information enthält, würde eine erfolgreiche Identifikation der Beleuchtungsart (d.h. Lampentypen) von Flugzeugen oder von der Internationalen Raumstation aus erlauben. Bisher ist diese Methode jedoch kaum zum Einsatz gekommen (Metcalf 2012), hauptsächlich wegen der hohen Kosten für diese Spezialkameras. Dennoch, der vergleichbare Erfolg für am Boden eingesetzte Hyperspektral-Kameras lässt vermuten, dass derartige Systeme auch von oben sehr erfolgreich sein könnten, wenn sie finanziert würden (Dobler et al. 2016; Bará et al. 2017). Hyperspektral-Kameras könnten dauerhaft außen an der ISS angebracht werden, aber auch vorübergehend für Aufnahmen vom Fenster der ISS aus eingesetzt werden. Zusätzlich wäre ein Einsatz vom Flugzeug aus denkbar, wie dem „High Altitude and Long Range Research Aircraft" (HALO), das vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betrieben wird.

Die saisonale Variabilität der Dauer der Nächte, Schneebedeckung, Wolkenbedeckung, Vegetation (Belaubung von Bäumen o.ä.) und Bodenfeuchte beeinflusst die nächtliche Fernerkundung

[5]https://worldview.earthdata.nasa.gov/?p=geographic&l=VIIRS_SNPP_DayNightBand_ENCC(opacity=0.73),Reference_Labels,Reference_Features,Coastlines&t=2017-07-28&z=1&v=-4.574934405349406,42.28983583336209,26.942643719650594,58.49686708336209&ab=off&as=2016-12-10&ae=2016-12-17&av=3&al=true (30.10.2017)

(Levin/Zhang 2017; Levin 2017). In Deutschland sind die ersten drei Faktoren am bedeutendsten, wobei auch die Belaubung die Menge des nach oben abgestrahlten und reflektierten Licht beeinflusst. Zwischen April und September herrscht Dämmerung, wenn der VIIRS DNB Sensor über Deutschland Daten aufnimmt. Auch Schneebedeckung, die zu einer bis zu 10 fach erhöhten Bodenreflektion führen kann, muss beachtet werden. Aus diesen Gründen ist für Deutschland im Oktober und November die höchste Wahrscheinlichkeit für fehlerfreie Daten. Vergleichbar ähnliche Voraussetzungen sind in den USA gegeben (Kleinsteuber 2016).

3.1.4. 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 mit Drohnen oder Kameras auf Fahrzeugen. Durch die vertikale Perspektive können jene Lichtanteile erfasst werden, die unter flachen Winkeln in der Horizontalen abgestrahlt werden und in besonderem Maße zur Himmelsaufhellung beitragen. Ebenso können Lichtquellen erfasst werden, die in horizontalen Aufnahmen verdeckt sind, etwa von laubbedeckten Bäumen. Je nach Erkenntnisinteresse werden die Aufnahmen aus größerer Entfernung (Dokumentation größerer Gebiete bzw. gesamter Städte, um eine Gesamtsituation zu beurteilen – siehe Abbildung 7) oder aus der Nähe gemacht (z.B. Dokumentation kleinerer Bereiche in einer Stadt, um die Zusammensetzung aus einzelnen Lichtquellen möglichst detailliert aufzunehmen – siehe Abbildung 8).

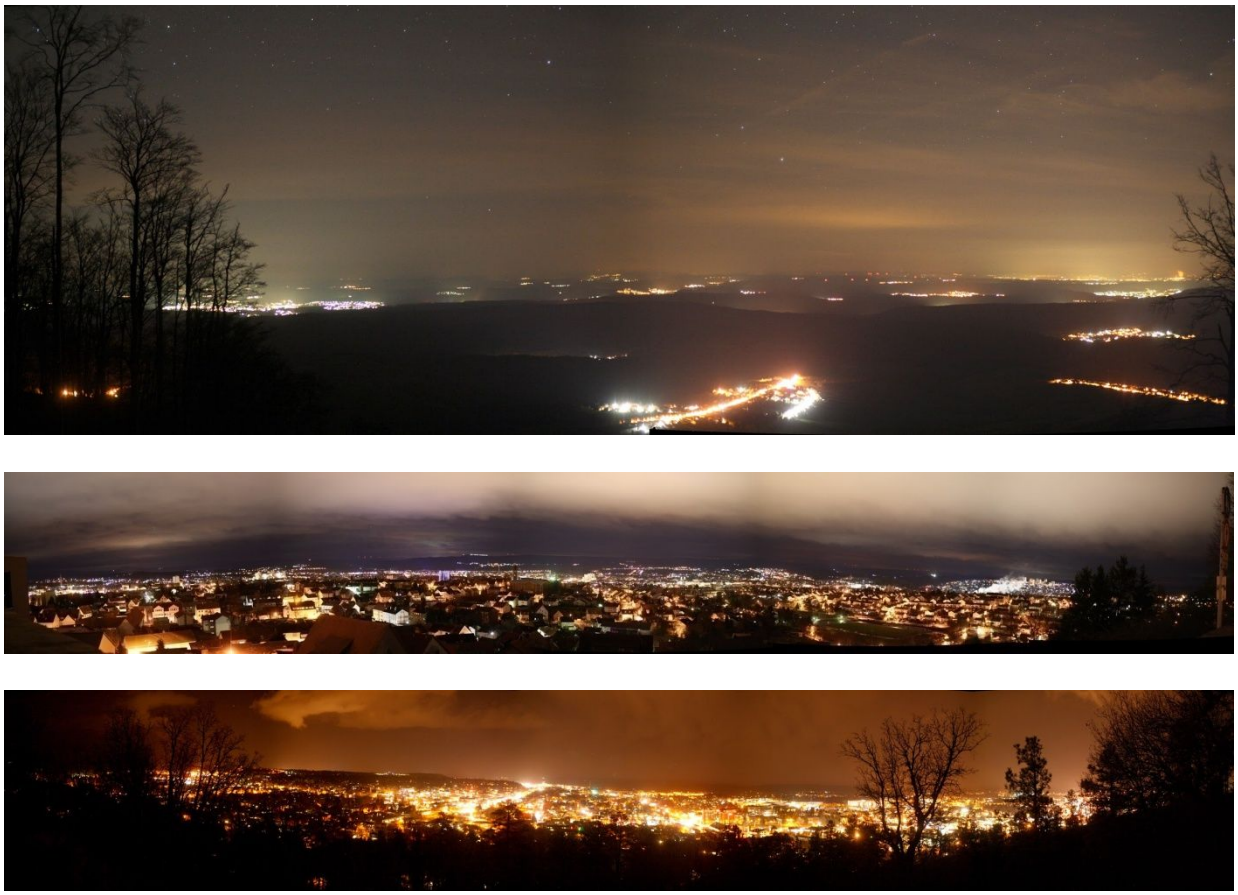

Abbildung 7: Panoramen vom Kreuzberg (Rhön, oben) nach Süden mit zahlreiche Orten, die stark in die Horizontale abstrahlen. Darunter die Panorama von Fulda (Mitte) Flagstaff (unten) zeigen zum Beispiel den

höheren Weißanteil in Fulda, auch wenn durch die unterschiedlichen Beleuchtungseinstellungen die Bilder nicht unmittelbar vergleichbar sind (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).

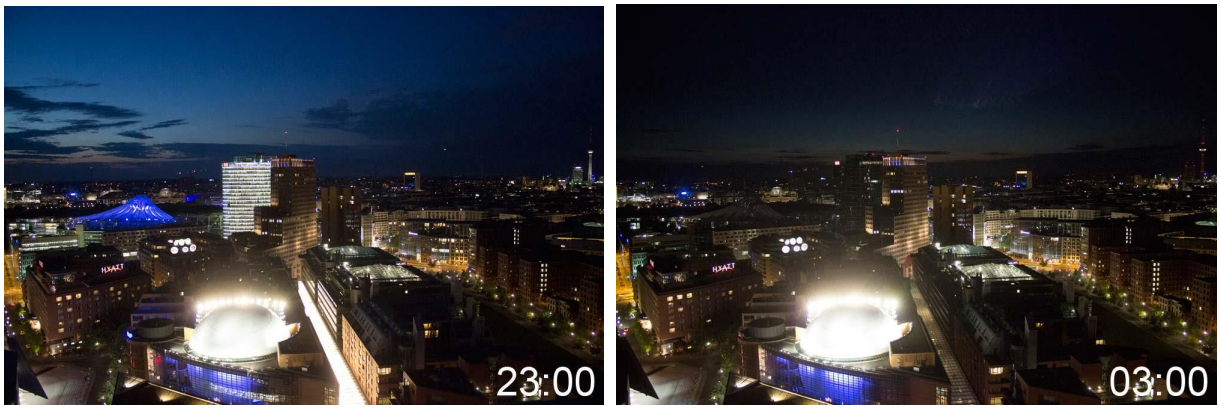

Abbildung 8: Potsdamer Platz in der Nacht von Dienstag, 1. Juli 2014 um 23:00 und 03:00 Uhr (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Philipp Elgert and Franziska Ottrembka – FilouBerlin, Fachgebiet Stadt- und Regionalökonomie – TU Berlin)

Die Auswertungsmöglichkeiten des Materials bezüglich der Eigenschaften (Helligkeit, spektrale Zusammensetzung) der sichtbaren Beleuchtung sind mit jenen der horizontalen Fotografie vergleichbar und erfuhren ebenso jüngst deutliche Erweiterungen. So können mittels hyperspektraler Auswertungen die im Innenraum (durch Fenster) wie auch im Außenraum genutzten Leuchtmittel empirisch festgestellt werden, wie von Dobler et al. (2016) für die Lichter der Skyline von New York City gezeigt.

Vertikale Fotografien können darüber hinaus für Vergleiche genutzt werden: zwischen unterschiedlichen Nachtlandschaften und Städten (s. Bsp. Fulda-Flagstaff, Abbildung 7) sowie an gleichbleibenden Orten im Zeitverlauf, etwa bei Veränderungen in der Beleuchtungsinfrastruktur oder auch im Laufe der Nacht (s. hierzu auch 3.2.3), worauf im Folgenden genauer eingegangen wird. Für solche Vergleiche bedeutend sind grundsätzlich die gleichbleibende Perspektive sowie möglichst identische Kameraeinstellungen.

Die Auswirkungen von Veränderungen in der Beleuchtung, wie sie beispielsweise im Rahmen der Modernisierung von Straßenbeleuchtungsanlagen vorkommen, können mittels differentieller Photometrie erfasst werden. In der differentialen Photometrie wird bei klarem Himmel ein kalibriertes Bild vor der Änderung aufgenommen und dann mit einer Aufnahme nach der Änderung verglichen. Um diesen Vergleich so störungsfrei wie möglich durchführen zu können, sollten die Aufnahmen so kurz wie möglich vor bzw. nach dem Beleuchtungswechsel erfolgen, und, wenn möglich, zur gleichen Nachtzeit, am gleichen Wochentag (oder zumindest entweder in der Woche oder am Wochenende) aufgenommen werden; wichtig ist es, dass die Vergleichsaufnahmen aus derselben Jahreszeit stammen und unter gleichen atmosphärischen Bedingungen aufgenommen wurden. Für große Städte, in denen ein Übergang mehrere Monate oder sogar Jahre erfordert, heißt das: Die Aufnahmen müssten fast im Abstand von einem Jahr erfolgen. Beispielsweise führten Kolláth et al. (2016) Untersuchungen mit Differential-Photometrie in mehreren ungarischen Städten durch, die sich im Übergang befinden zwischen Lampen mit beträchtlicher Aufwärts-Strahlung zu vollständig abgeschirmter LED-Beleuchtung (Abbildung 24). Damit konnte eine signifikante Reduktion der Himmelshelligkeit nachgewiesen werden, besonders im roten Spektralbereich. Wegen der starken atmosphärischen Streuung des blauen Spektralbereichs war die Reduktion im Blau-Bereich deutlich weniger signifikant.

Auch Veränderungen des Einsatzes von Beleuchtung im Laufe der Nacht lassen sich mittels vertikaler Aufnahmen nachvollziehen. Bei vorab bekannten Veränderungen, wie etwa der Nachtabschaltung von Straßenbeleuchtung, können Einzelaufnahmen vor und nach den Veränderungszeitpunkten Aufschluss über das Ausmaß und die Gesamtwirkung der Maßnahmen geben und wertvolles Anschauungsmaterial darstellen (Abschnitt 3.2.3). Die Aufnahmen werden jeweils von festen Standpunkten aus mit gleichbleibenden Kameraeinstellungen gefertigt. Viele Aufnahmen von A. Hänel wurden mit gleichen Aufnahmedaten (30mm F1:1.4, 1/20 sek., ISO 800) aufgenommen, was an die typische Leuchtdichte der Straßenbeleuchtung von 1 cd/m^2 angepasst ist. Sie wurden zudem als RAW-Bilder aufgenommen, die jederzeit eine Kalibrierung ermöglichen.

Zeitrafferaufnahmen bieten demgegenüber eine Möglichkeit, nicht absehbare, komplexere Veränderungsmuster zu erschließen. Diese bestehen aus zahlreichen Einzelbildern, die in kurzen Intervallen (von i.d.R. einigen Sekunden) aufgenommen werden. Werden Aufnahmen über mehrere Nächte hinweg aufgezeichnet, so können neben Veränderungen innerhalb einzelner Nächte auch Unterschiede zwischen Nächten - etwa an verschiedenen Wochentagen oder zu unterschiedlichen Jahreszeiten - festgestellt werden. Von entfernten Standorten aus lassen sich mittels Zeitraffer die Veränderungsmuster gesamter Stadt- oder Gebietsansichten dokumentieren und auswerten. So zeichneten Dobler et al. (2015) mit einer fest installierten Kamera über einen Zeitraum von 3 Wochen mit einer Aufnahme pro 10 Sekunden (insgesamt: 70,560 Aufnahmen) die Skyline von Manhattan auf. Die Vielzahl sichtbarer Lichtquellen wurde grob eingeteilt in kommerzielles Licht (oberer Bildbereich) und privates Wohnlicht (unterer Bildbereich). Mittels computergestützter Auswertungen der Ein- und Ausschaltzeiten ließen sich Dynamiken der Lichtnutzung identifizieren und Unterschiede zwischen den beiden Typengruppen wie auch zwischen Wochentagen feststellen (s. weiteres Abschnitt3.2.3).

Räumlich engere Perspektiven erlauben es, unterschiedliche Lichtquellen und -nutzungen genauer zu unterscheiden und somit die einzelnen zeitlichen Rhythmen nachzuvollziehen, aus denen sich die Gesamtdynamik ergibt. Dieser Ansatz eignet sich besonders für Orte mit komplexen Lichtsituationen, wie z.B. städtische Zentren. Diese werden von einem oder mehreren Standorten aus fotografiert, die einen möglichst vollständigen Überblick der Beleuchtungssituation erlauben. So wurden am Institut für Stadt- und Regionalplanung der TU Berlin mehrere einzelne Nächte in unterschiedlichen Berliner Zentren dokumentiert. Die Aufnahmen erfolgten in 30-Sekunden-Intervallen jeweils wochentags im Frühsommer mit einer mittels Stativ aufgestellten Kamera von Standpunkten auf höheren Gebäuden aus[6]. In der Auswertung wurden zunächst einzelne Lichtquellen identifiziert und nach Standorten sowie Nutzungsarten (Infrastrukturbeleuchtung, Architekturbeleuchtung, kommerzielle Beleuchtung, Innenraumbeleuchtung) unterschieden. In der Analyse der Ein- und Ausschaltzeiten zeigten sich Unterschiede sowohl zwischen den zeitlichen Profilen der Orte als auch der Typengruppen (s. weiter Abbildungen in Abschnitt 3.2.3).

[6] http://vimeo.com/citynightlapse (30.10.2017)

3.1.5. Messungen der Himmelshelligkeit

In klaren Nächten entweicht ein großer Teil des künstlichen Lichts, das nahe der Erdoberfläche entsteht, in den Weltraum; dies ermöglicht seine Erfassung mit Fernerkundungsmethoden (vgl. vorangehenden Abschnitt 3.1.3). Jedoch wird auch in klaren Nächten ein Teil dieses Lichts durch die Atmosphäre gestreut und gelangt diffus zurück auf die Erde; in bewölkten und bedeckten Nächten dagegen wird der allergrößte Teil des künstlichen Lichts an Wolken gestreut und gelangt nahezu vollständig zurück auf die Erde. Dieses Streulicht nennt man künstliches Himmelsleuchten (engl. Skyglow), und es resultiert in einer erhöhten Himmelshelligkeit. Ein weiterer Effekt der Lichtstreuung ist die potentielle Wahrnehmung des künstlichen Lichts bis zu großen Entfernungen, auch auf der Erdoberfläche weit weg von seinem Entstehungsort in unbeleuchteten Gebieten. In diesem Abschnitt werden Methoden zur Messung der „Himmelshelligkeit" beschrieben. Diese setzt sich zusammen aus dem natürlichen extraterrestrischen (Mond, Sterne usw.), atmosphärischen Lichtquellen (z.B. Polarlichter und Airglow, dem natürlichen Nachthimmelsleuchten) und eben dem künstlichen Himmelsleuchten. Bei der Messung wird zwischen Himmelshelligkeit (ugs. beschreibbar als "Alles Licht inklusive den Sternen") und Himmelshintergrundhelligkeit (ugs. "nur das Licht des Hintergrundes d.h. zwischen den Sternen") unterschieden. Der Abschnitt beginnt mit professionellen Erhebungsmethoden und endet mit "Citizen Science" (Bürgerwissenschaften); er stellt zugleich eine Zusammenfassung einer kürzlich veröffentlichten Literaturübersicht dar (Hänel et al. 2017).

Die Himmelsqualität kann mit Hilfe der schwächsten gerade sichtbaren Sterne bestimmt werden (ähnlich der zugrundeliegenden Methode des "Globe at Night" Projektes das im Folgenden noch ausführlich vorgestellt wird). Je heller der Himmelshintergrund ist, desto weniger schwache Sterne sind zu sehen, die Grenzhelligkeit für die schwächsten 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. 2017).

Daneben kann die Himmelshelligkeit auch direkt gemessen werden. Moderne Digitalkameras sind inzwischen so empfindlich, dass sie besonders das grüne Nachthimmelsleuchten (Airglow) zeigen. Diese haben sich als optimale und relativ günstige Messgeräte erwiesen (Hänel et al. 2017). Es gibt verschiedene Ansätze zu einer automatischen Auswertung von Fischaugenaufnahmen (Kolláth 2010; Nievas 2013; Mohar 2015a), eine allgemein verfügbare, benutzerfreundliche Auswertesoftware wäre jedoch wünschenswert.

Seit 2006 steht ein einfach zu bedienendes Gerät zur Bestimmung der Himmelshelligkeit von der kanadischen Firma Unihedron zur Verfügung, das Sky Quality Meter (SQM). Insbesondere die Version mit einer Linse (SQM-L), die den Messwinkel auf ca. 20° einschränkt, hat bei Amateurastronomen eine breite Verwendung gefunden (Hänel et al. 2017). Die Messgenauigkeit liegt bei etwa 10%, woraus sich ergibt, welche Änderungen der Himmelshelligkeit nachweisbar sind bzw. ob Langzeitmessreihen notwendig sind. Bedenkt man allerdings, dass das Langzeitverhalten des Gerätes unbekannt ist (s.u.), zeigt sich, dass eine Änderung der Himmelshelligkeit schwer nachweisbar ist. Bis auf einige Ansätze werden allerdings keine Daten flächenhaft und kontinuierlich erfasst. Einige Modelle sind für eine kontinuierliche Datenerfassung mit einer Schnittstelle versehen. Kontinuierlich betriebene Messstationen wurden in den Anfangsjahren ausgewertet (Kyba et al. 2011). Längerfristige Messungen sind allerdings nur vereinzelt bekannt (s.u.). Eine modifizierte Version des SQM-L wurde in Spanien im Rahmen

des Stars4All-Projektes unter der Bezeichnung TESS entwickelt und überträgt die Daten über Mobilfunk.

In den letzten Jahren sind verschiedene Geräte, Software-Anwendungen und Methoden entwickelt worden, die es erlauben, die Himmelshelligkeit auch mit Hilfe der Beteiligung durch Laien zu erfassen, selbst wenn einige der Teilnehmer keine Erfahrung als Amateurastronomen vorweisen können. Das größte dieser Experimente ist „Globe at Night“[7]; die Teilnehmer bestimmen darin, wie viele Sterne für sie sichtbar sind, wobei als Grundlage die Sternhelligkeiten (“Größenklassen”) benutzt werden. . Kyba et al. (2013) analysierten die Daten dieses Projekts und stellten dabei fest, dass die Unsicherheit von Einzelbeobachtungen zwar sehr groß ist (Standardabweichung von 1.2 Größenklassen), dass aber der Mittelwert vieler Beobachtungen doch eine enge Korrelation mit der geschätzten Himmelshelligkeit ergibt. Das bedeutet: Obwohl sich die Methode nicht dafür eignet, Veränderungen an einem bestimmten Ort genau nachzuweisen, kann sie grundsätzlich doch verwendet werden, um Trends auf regionaler oder nationaler Ebene zu analysieren. In einem typischen Jahr erhält man mit Globe at Night ungefähr 6000 Beobachtungen, die für wissenschaftliche Auswertungen geeignet sind; 85 % dieser Beobachtungen stammen aus Europa oder Nordamerika.

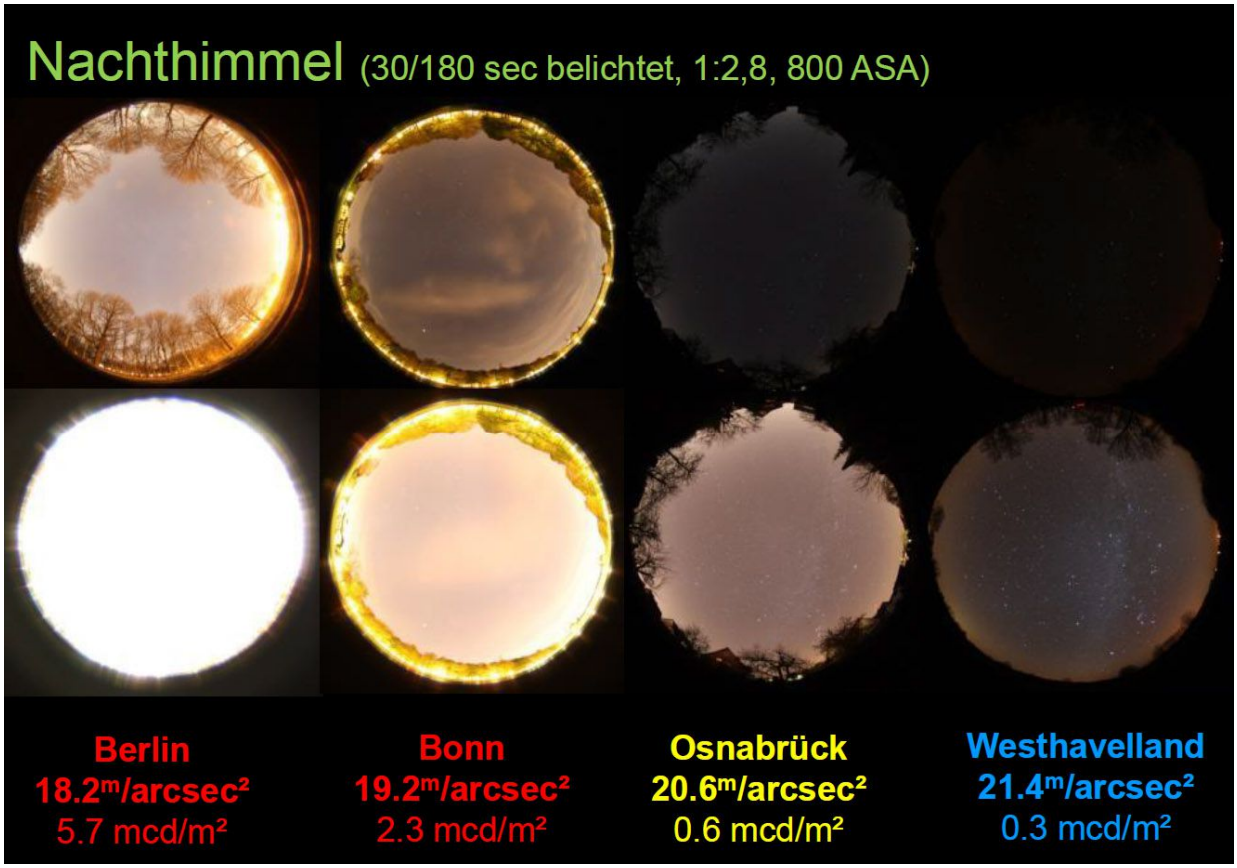

Abbildung 9: Unterschiedliche Himmelsansichten in Deutschland. Die Aufnahmen wurden mit einer Fischaugenoptik gemacht und mit gleichen Einstellungen (bei Belichtungszeiten von 30 und 180 Sekunden) aufgenommen. Parallel wurde die Himmelshelligkeit (in Größenklassen/Quadratbogensekunden (mag/arcsec^2)) mit einem SQM-L gemessen und näherungsweise in photometrische Leuchtdichten (in Candela/m^2, cd/m^2) umgewandelt (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).

[7] www.globeatnight.org (30.10.2017)

2013 wurde eine neue, IT-basierte Schätzmethode für die Beobachtungen mit bloßem Auge entwickelt. An Stelle der Auswertung von Beobachtungen anhand von Sternenkarten werden die beteiligten Amateurastronomen mit Hilfe der „Verlust der Nacht-App“ direkt gefragt, ob sie bestimmte Sterne sehen können. Diese Methode besitzt insofern Vorzüge gegenüber Globe at Night, als sehr viel genauere Beobachtungen möglich sind und Informationen über die individuelle Fähigkeiten der Beobachter allein anhand der gewonnenen Daten für Korrekturen genutzt werden können. (Abbildung 10). Ein Nachteil dieser Methode besteht darin, dass sie gegenwärtig nur mit Sternen bis zur Größenklasse 5 verwendbar ist und damit nur für stadtnahe, nicht für ländliche Himmelsbedingungen einsetzbar ist. Eine weitere Einschränkung dieser als App realisierten Methode betrifft ältere Beobachter mit Altersweitsichtigkeit, denn sie verlangt häufigen schnellen Wechsel der Augenadaption zwischen einem Telefonbild ganz in der Nähe und den weit entfernten Sternen. Die „Verlust der Nacht-App“[8] erzielt typischerweise ungefähr 1000 für wissenschaftliche Auswertungen verwendbare Beobachtungen pro Jahr.

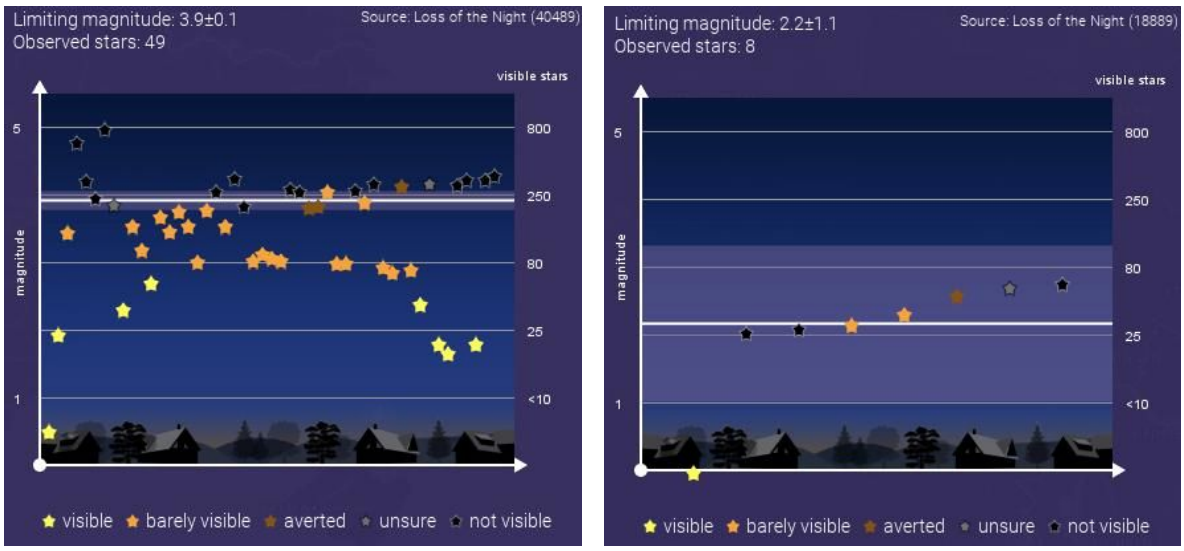

Abbildung 10: Zwei mit der “Verlust der Nacht-App” erzielte Beobachtungen mit sehr unterschiedlichen Genauigkeiten. Die Farbe der Sterne zeigt an, ob sie gesehen werden konnten oder nicht, und lichtschwächere Sterne werden weiter oben angezeigt. Die Beobachtung auf der linken Seite war sehr konstant und widerspruchsfrei, da die Sichtbarkeit der Sterne mit ihrer Helligkeit zunahm (“magnitude”). Die Beobachtung auf der rechten Seite zeigte diese Eigenschaften nicht (schwächer leuchtende Sterne wurden im Vergleich zu helleren Sternen erkannt) und wurde deshalb nicht für weitere wissenschaftliche Auswertungen herangezogen. (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von „My Sky at Night“[9]).

Das oben vorgestellte Sky Quality Meter (Himmelsqualitäts-Messgerät) gibt es auch als Gerät für Handmessungen, (SQM-L). Amateur-Astronomen und andere Bürgerwissenschaftler stellen jährlich etwa 1000 Beobachtungen zur Verfügung, die mit diesen Geräten aufgenommen sind und über das Globe at Night Projekt und die Verlust-der-Nacht-App sowie einige andere Online-Portale eingereicht werden. Insgesamt betrachtet sind die Beobachtungen, die über diese Portale eingereicht werden, weniger genau im Vergleich zu denen, die von professionellen Wissenschaftlern aufgezeichnet werden, aber sie sind dennoch sehr wertvoll, weil sie häufiger aus den am meisten von Lichtverschmutzung betroffenen Gebieten stammen (Falchi et al. 2016).

[8] https://play.google.com/store/apps/details?id=com.cosalux.welovestars&hl=en (30.10.2017)
[9] www.myskyatnight.com (30.10.2017)

Die “Dark-Sky-Meter-App”[10] (App für Messung des dunklen Himmels) war eine App für iPhone-Geräte und wurde aufgrund fehlender Finanzierungsmöglichkeiten zum 1. September 2017 eingestellt. Sie benutzte die Kamera des iPhones, um die Himmelshelligkeit in drei Spektralbereichen aufzuzeichnen (rot, grün und blau). Teilnehmer*innen nahmen zuerst ein völlig dunkles Kalibrierungsbild (z. B. im Inneren seiner Tasche) auf, dann hielten sie die Kamera über sich und lösten sie über einen Schalter aus, um die Daten aufzuzeichnen. Die App lieferte die Daten in Form von berechneter Leuchtdichte in der Größenklassen/Quadratbogensekunden (mag/arcsec^2) für die Vergleichbarkeit mit SQM-Daten. Der Projektmanager Norbert Schmidt wäre aber bereit, Forschern auch die dreifarbigen (multispektralen) Daten zur Verfügung zu stellen und kann den Code der App für eine Weiterführung, z.B. durch das BMBF, der Allgemeinheit zur Verfügung stellen. Die erzielbare Genauigkeit wird mit ±20 % angegeben (Vergleich SQM 10% siehe oben).

Nach Abwägung aller gegenwärtig verfügbaren Messmethoden kommen Hänel et al. 2017 zu dem Schluss, dass kalibrierte digitale Kameras mit einem Fischaugen-Objektiv am besten geeignet sind, wenn man ein Optimum zwischen einfacher Handhabung und einem Maximum an Informationen über den Nachthimmel in allen möglichen Situationen anstrebt. Ein Hindernis für eine weitere Verbreitung dieser Methode ist das Fehlen einer preisgünstigen (oder kostenfrei verfügbaren) und dabei benutzerfreundlichen Software für die Bildanalyse. Ein Projekt, das eine derartige Software entwickeln würde, sowie eine Online-Plattform für Bildbetrachtung und Bildaustausch könnte es Amateurastronomen ermöglichen, Veränderungen der Himmelshelligkeit an ihren Beobachtungsorten nachzuweisen Wünschenswert wäre darüber hinaus eine Ergänzung durch Bilder aus Entwicklungsländern, die von dortigen Amateurwissenschaftlern aufzuzeichnen wären, obwohl Kameras und Trainingsmaterialien dafür in Sonderaktionen zu beschaffen wären. Ein derartiges Projekt könnte die Einrichtung eines globalen meteorologischen Dienstes zur Registrierung von Veränderungen der Himmelshelligkeit ermöglichen.

3.1.6. Simulation der Himmelshelligkeit und des künstlichen Himmelsleuchtens

Wenn Lichtquellen bekannt sind, sei es aus Beleuchtungsinventaren oder aus Fernerkundungsdaten, dann kann die Himmelshelligkeit mit Strahlungstransport-Modellen simuliert werden (Aubé/Kocifaj 2012), um zum Beispiel die Auswirkungen von Handlungsoptionen zu vergleichen. Die dafür entwickelten Computerprogramme modellieren die Reflektion und Absorption von Licht an Bodenflächen (und bodennahen Objekten) sowie von Streuung und Absorption des Lichts in der Atmosphäre. Es gibt bei diesen Programmen erhebliche Unterschiede bezüglich ihrer Fähigkeit, die Realität abzubilden (z. B. unter Einbeziehung von Schatteneffekten an Bergen und Hügeln) und bezüglich ihrer Rechengeschwindigkeit. Allgemein gilt: Je komplexer ein Modell ist, desto länger dauert die Simulation. Obwohl es mehrere Methoden gibt, sollen hier nur zwei der am weitesten entwickelten vorgestellt werden. Um eine gute Karte der Himmelshelligkeit zu erhalten, empfiehlt Bará et al. (2017), dass pro Kilometer eine Messung als Datengrundlage aufgenommen werden sollte.

[10] https://itunes.apple.com/us/app/dark-sky-meter-se/id602989060?mt=8 (30.10.2017)

Das ILLUMINA-Modell erlaubt gegenwärtig die detaillierteste Simulation der Himmelshelligkeit in physikalischer Hinsicht (Aubé 2015). Es verwendet die aus der geometrischen Optik stammende "Strahlenverfolgung" (engl. "ray tracing", auch bei 3D Computergrafik verwendet), und benötigt Zugang zu einem Super-Computer: Jede vollständige Simulation der Himmelshelligkeit benötigt das Äquivalent von fast einem Jahr Rechenzeit auf einem typischen Laptop. ILLUMINA berechnet die Himmelshelligkeit an einem bestimmten Ort für mehrere Blickrichtungen und interpoliert dann für den gesamten Himmel. ILLUMINA eignet sich am besten für detaillierte lokale Simulationen. Kürzlich wurde ILLUMINA in einer App eingesetzt, um darzustellen, welchen Effekt Veränderungen der Beleuchtungstechnologie (vor allem Lichtfarbe und Anteil aufwärts gerichteten Strahlung) auf die Himmelshelligkeit haben. Die App "My Simulated Sky at Night" („Simulation meines Nachthimmels") erlaubt es Nutzern zu simulieren, welchen Effekt eine Umrüstung von Natriumdampflampen zu LED-Beleuchtung haben würde. Dies wurde durch eine große Serie von Helligkeitssimulationen erreicht, die alle möglichen Betrachtungs- und Beleuchtungsrichtungen für drei Wellenlängen beinhalteten. Wenn ein*e Benutzer*in eine bestimmte Einstellung auswählt (z. B. 100% LED mit 3000 K und 0% Uplight), kann in der Webanwendung direkt das resultierende Lichtemissionsmuster betrachtet werden. Dadurch können unterschiedliche Beleuchtungsszenarien miteinander verglichen werden. Da der Rechenaufwand für die Simulation sehr hoch ist, sind aktuell nur 41 Standorte weltweit simuliert worden.

Der "neue Weltatlas der künstlichen Himmelshelligkeit" ("The new world atlas of artificial night sky brightness") (Falchi et al. 2016), hier kurz "Weltatlas" (Abbildung 11), verwendet ein physikalisch weniger detailliertes (aber wesentlich schnelleres) Modell. Mit dem "Weltatlas" kann deshalb die Himmelshelligkeit weltweit berechnet (bzw. abgeschätzt) werden, wohingegen mit dem detaillierten Modell ILLUMINA nur lokale Rechnungen möglich sind. Das Modell des "Weltatlas" wurde mit SQM-Daten sowohl aus wissenschaftlichen als auch Amateurquellen kalibriert und unabhängig mit Himmelsbilder-Mosaiken der US-Nationalparkverwaltung validiert, die von einem Robotik-Kamerasystem aufgenommen wurden. Die Standardabweichung zwischen den gemessenen Himmelshelligkeiten und dem Modell betrug $\pm$ 17 %.

Ein Nachteil des "Weltatlas" 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 und kann dort teilweise noch aus Entfernungen von mehreren hundert Kilometern beobachtet werden (Jáuregui/Zamorano 2017). Deshalb kann ein Ort, bei dem die Himmelshelligkeit im Zenit scheinbar frei von Lichtverschmutzung ist, trotzdem erhöhte Helligkeit am Horizont (bzw. generell außerhalb des Zenits) aufweisen, die zu einer überproportionalen Erhöhung der Beleuchtungsstärke führt (Jechow et al. 2017).

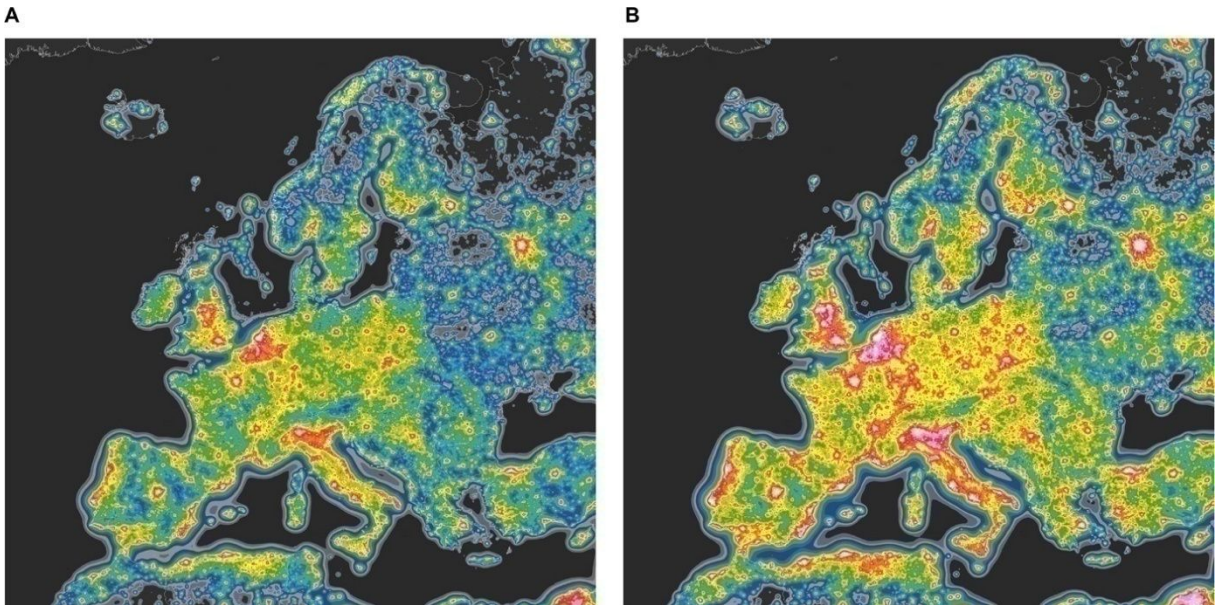

Abbildung 11: Berechnete künstliche Himmelshelligkeit über Europa nach dem neuen Weltatlas mit der gegenwärtige Beleuchtungstechnologie (A) und eine Vorhersage für eine flächendeckende Umstellung auf 4000 K LED Technologie bei gleicher Beleuchtungsstärke (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Falchi et al. 2016). Die Farben geben die Erhöhung der Himmelshelligkeit im Vergleich zu einem natürlichen Nachthimmel an (grün: 0,32–0,64, gelb: 1,28–2,56, rot: 5,12–10,2, rosa: 20,5–41 mal so hell wie unter natürlichen Bedingungen,genauere Angaben siehe Tabelle 1, Falchi et al. 2016 S. 9).

3.1.7. Zusammenfassende kritische Beurteilung der Methodenansätze

Die Auswahl der Methoden zur Untersuchung von Lichtverschmutzung hängt davon ab, ob direkt abgestrahltes Licht oder diffus reflektiertes Licht vom Himmel bestimmt werden soll. Mit den vorgestellten Methoden können Lichtemissionen gemessen werden (z.B. für Grenzwerte), verschiedene Standorte und Zeitpunkte miteinander verglichen werden und zum Beispiel auch die Auswirkungen von Handlungsoptionen simuliert, analysiert und kontrolliert werden.

Direkte Lichtemissionen

Die direkten Lichtemissionen lassen sich am besten mit detaillierten photometrischen, räumlichen und zeitlichen Informationen zu den Leuchten aus sog. Leuchtenkataster bestimmen. Der limitierender Faktor für diese Methode ist, dass diese Informationen häufig fehlen und oder nur für Teile der Beleuchtung im Außenbereich, meist der öffentlichen (Straßen-)beleuchtung bekannt sind.

Gesamte nach oben abgestrahlte Lichtemissionen

Die gesamten nach oben abgestrahlten Lichtemissionen (direkt und reflektiert) können durch Luft- und Satellitenbildaufnahmen bestimmt werden. Die Qualität der Daten hängt von der räumlichen, zeitlichen und radiometrischen Auflösung der Daten ab. Alle Methoden werden von klimatischen und saisonalen Umweltfaktoren, wie zum Beispiel Belaubung, Wolkenbedeckung und Bodenfeuchte beeinflusst (Levin/Zhang 2017; Levin 2017).

Luftbilder von Drohnen und Flugzeugen haben die höchste räumliche Auflösung (je nach verwendetem Sensorsystem bis in den Zentimeterbereich), sind jedoch sehr kosten- und zeitintensiv und generell nur für kleinere Untersuchungsräume geeignet. Messungen von größeren Gebieten erstrecken sich bei dieser Methode über mehrere Stunden wodurch sich die dargestellten Beleuchtungsmuster in diesem Zeitraum ändern können.

Die Fotografien der Astronauten (von der ISS) liefern spektrale Informationen bei einer räumlicher Auflösung von 20-50 Metern, sind aber von sehr stark variierender Qualität (viele Aufnahmen haben eine Bewegungsunschärfe). Die Überflugzeit der ISS ist variable, somit können zu unterschiedlichen Nachtzeiten Aufnahmen eines Gebietes entstehen. Da die Bildaufnahmen nicht systematisch im Rahmen einer geplanten Messkampagne durchgeführt werden, sind sie nicht flächendeckend für Deutschland verfügbar und hauptsächlich nur für große Städte vorhanden. Zudem sind die Originaldaten nicht georeferenziert, was die räumliche Analyse in Softwareprogrammen erschwert. Im Rahmen des "Cities at night" Projektes[11] werden georeferenzierte Daten bereitgestellt.

Nächtliche Satellitendaten (DMSP-OLS & VIIRS DNB) werden global aufgenommen, haben jedoch eine geringe räumliche Auflösung (5km und 750m) und keine On-Board-Kalibrierung. Dazu werden die VIIRS DNB Daten vor allem in den späten Nachtstunden (1 - 2 Uhr) über Deutschland aufgenommen, wenn bereits viele Lichtquellen ausgeschaltet oder reduziert sind. Hinzu kommt das Problem, dass der VIIRS DNB Detektor ein einkanaliger Detektor ist, da er nur ein einzelnes breites Spektralband erfasst, wodurch Änderungen der spektralen Verteilung (etwa bei der Umrüstung von gelben Natriumdampflampen zu weißen LED-Lampen) schlecht zu detektieren sind. Verstärkt wird dies dadurch, dass der VIIRS DNB Wellenlängenbereiche unterhalb von 500 nm nicht detektiert und somit Messungen im blauen Spektralbereich nicht abgedeckt werden. Aufgrund verschiedener Umweltparameter, wie Dauer der Nächte, Schneebedeckung etc. sind Aufnahmen von Oktober bis November am besten für Untersuchungen geeignet.

Vertikale abgestrahlte Lichtemissionen

Vertikale Fotografien erlauben die Erfassung einer seitlichen Perspektive der Beleuchtungssituation. Je nach Stand der Kamera können groß- oder kleinräumige Betrachtungen gemacht werden. Sie sind besonders für die Untersuchung der zeitlichen Variabilität der Lichtemissionen geeignet und lassen bei gleichbleibender Kameraeinstellung auch den räumlichen Vergleich von verschiedenen Untersuchungsstandorten zu. Für die Untersuchung von Beleuchtungsumrüstungen, z.B. auf LED Technologie, an einem Ort sollten die Messungen vor und nach dem Wechsel möglichst nahe zu dessen Termin erfolgen, außerdem, wenn möglich, zur selben Nachtzeit, am selben Wochentag (oder wenigstens unter Beachtung des Unterschieds Werktag/Wochenende) und insbesondere während derselben Jahreszeit und bei gleichartigen atmosphärischen Bedingungen. Für große Städte, in denen der Wechsel bis zu seiner Fertigstellung Monate oder sogar Jahre dauern kann, bedeutet dies, dass der Abstand der Fotos bis zu einer Zeitspanne von ungefähr einem Jahr betragen kann.

[11] www.citiesatnight.org (30.10.2017)

Himmelshelligkeit

Die Himmelshelligkeit lässt sich indirekt über die Sichtbarkeit der schwächsten Sterne bestimmen, oder durch direkte Messungen mit Messgeräten und Digitalkameras.

Die Sichtbarkeit von Sternen ist stark von der Sehfähigkeit des menschlichen Auges abhängig, was jedoch an sich ein relatives konstantes Messgerät darstellt wenn man es mit der rasanten Entwicklung und -veränderung von technischen Geräten vergleicht. Daten mit dieser Methode sind über das Projekt "Globe at Night" und der "Verlust der Nacht-App" öffentlich verfügbar.

Mit iPhones konnte man bis 1.September 2017 über das "Dark-Sky-Meter-App" direkt über die Kamera des Gerätes eine Messung der Himmelshelligkeit in drei Spektralbereichen durchführen. Daneben sind besonders unter Astronomen sog. "Sky Quality Meter" (SQM) und mobile SQM-L Geräte weit verbreitet. Messdatenreihen sind jedoch nur vereinzelt vorhanden und diese Geräte sind, ähnlich zu den Satellitensensoren, ebenfalls nur eindimensionale Detektoren, die nur ein breites Spektralband erfassen. Bei den SQM-L ist nicht bekannt, wie die langzeitige Konstanz ist, Messungen aus den Niederlanden deuten auf eine mögliche Empfindlichkeitsabnahme um 0.1 mag/arcsec^2 pro Jahr hin (Wim Schmidt, priv. Mitteilung). Nach Hänel et al. (2017) ist eine optimale und kostengünstige Messmethode die Verwendung von Spiegelreflex- und Systemkameras mit Fischaugenlinsen. Für eine automatische Auswertung dieser Aufnahme fehlt jedoch noch eine benutzerfreundliche Software, was die weite Verbreitung dieser Methode aktuell einschränkt.

Daten von Simulationen der Himmelshelligkeit basieren auf Modellen, die meist auf Beleuchtungskataster und Fernerkundungsdaten aufbauen. Um eine gute Karte der Himmelshelligkeit zu erhalten, empfiehlt Bará et al. (2017), dass pro Kilometer eine Messung als Datengrundlage aufgenommen werden sollte. Der "Weltatlas" für die künstliche Himmelshelligkeit (Falchi et al. 2016) ist ein sehr gutes Werkzeug, um die Himmelshelligkeit an klaren Nächten zu verstehen, besitzt aber noch größere Begrenzungen. Das Modell berechnet die Himmelshelligkeit nur im Zenit, berücksichtigt nicht die seitliche Abschattung durch Berge (in den Alpen von erheblicher Bedeutung) und – besonders gravierend – es berücksichtigt ausschließlich sehr klare Nächte. Häufig ist jedoch das Himmelsleuchten am Horizont am hellsten, was aktuell nur durch die rechenintensiven Modelle nach Aubé (2015) für kleinräumige Betrachtungen möglich ist.

Es ist weitestgehend unklar, wie das mitteleuropäische Klima die Himmelsaufhellung beeinflusst. Dadurch variieren Messungen an einem Ort um einen so großen Betrag, dass kurzfristige Änderungen in den Beleuchtungssituationen nur schwer erfassbar sind. Wissen über räumliche Muster der Himmelshelligkeit bei wolken- und nebelbedeckten Bedingungen zum Beispiel ist sowohl theoretisch als auch experimentell noch sehr begrenzt. Insgesamt sollte das Messnetz weiter ausgebaut werden und beispielsweise in Luftmessstationen integriert werden, die nicht durch direktes Licht beeinflusst sind.

3.2. Räumliche und zeitliche Variabilität künstlicher Beleuchtung

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 künstliches Licht nicht statisch, sondern verändert sich im Verlauf der Nacht. In diesem Abschnitt werden einige der räumlichen und zeitlichen Variationen diskutiert, von denen man weiß, dass sie existieren. Forschung auf diesem Gebiet findet jedoch nur begrenzt statt und beschränkt damit die Rückschlüsse, die in einigen Fällen möglich wäre.

Sofern Daten über öffentliche Beleuchtung existieren, werden sie von den Betreibern oft nicht freigegeben, oder nur nach Freigabe der beauftragenden Kommune. Doch in vielen Fällen wissen nicht einmal die Städte selbst und die von ihnen beauftragten Stellen, wie viele Leuchten welcher Art sie betreiben (Kundracik 2017; Barentine 2017). Die Bedeutung dieses Problems wird im folgenden Absatz von Arnold et al. (2012) verdeutlicht:

> "*Viele der Straßenlampen in Vermont und an anderen Stellen der USA wurden vor 20, 30 oder sogar 50 Jahren aufgestellt. Sie könnten für einen Zweck errichtet worden sein, der heute gegenstandslos ist, oder sie könnten, gemessen am heutigen Bedarf, erheblich über- oder unterdimensioniert sein. Ja, es konnte sogar festgestellt werden, dass Kunden für manche Straßenlampen Rechnungen erhielten, obwohl diese Lampen überhaupt nicht mehr existierten*."

Vergleichbare Unkenntnis ist weltweit verbreitet, auch in Deutschland. 2015 gab es eine kleine Anfrage der Bundestagsfraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN(Deutscher Bundestag 2015a):

> "*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 war (Deutscher Bundestag 2015b):

> "*Eine gebäudebezogene Aufstellung aller nächtlich angestrahlten Liegenschaften der über 3000 zivilen Dienstliegenschaften inklusive Nennung der verwendeten Lampen ist nicht möglich … Eine Aussage über den Gesamtenergieverbrauch und die Gesamtkosten kann durch die baulichen Gegebenheiten, bei denen in der Regel keine separate Messeinrichtung für den Energieverbrauch der Beleuchtung vorgesehen sind, nicht getroffen werden.*"

Es gibt Fortschritte bei der Einstellung von Straßenlampen in geographische Informationssysteme (Arnold et al. 2012), aber bisher wurden diese Informationen kaum öffentlich zugänglich gemacht. Weitergehende Daten über private Beleuchtung[1] sind so gut wie nicht existent. Wegen bisher fehlender Daten ist eine Berichterstattung über die vollständige Lichtemission oder den Energieverbrauch für Städte oder Länder schlicht nicht möglich.

3.2.1. Räumliche Verteilung des nach oben emittierten Lichtes aus Fernerkundungsdaten

Fernerkundung (vgl. 3.1.1) bietet eine der besten Möglichkeiten, um großflächig Informationen über vorhandene Lichtquellen zu sammeln, aber diese Methoden haben auch ihre Schwächen. Insbesondere kann mittels Fernerkundung, speziell von Satelliten aus, nicht zwischen direkt aufwärts gerichteter und vom Boden reflektierter Lichtstrahlung unterschieden werden. Direkt aufwärts gerichtete Lichtstrahlung erzeugt aus diesem Grund typischerweise ein 10fach helleres Signal als die gleiche Lichtmenge, die jedoch gegen den Boden gerichtet ist. Aus ähnlichem Grund sind horizontal abgestrahltes Licht und schmale Lichtbündel mit Fernerkundung nicht gut erkennbar (Kyba et al. 2015b).

Sánchez de Miguel (2015) verglich die Lichtemission von 19 europäischen Ländern anhand der Daten von den Satellitensensoren DMSP und VIIRS DNB. Diese Daten wurden in Kombination mit Stromverbrauchswerte der Straßenbeleuchtung in Spanien verwendet (Sánchez de Miguel et al. 2014), um den Pro-Kopf-Energieverbrauch für künstliche Beleuchtung abzuschätzen. Die in Abbildung 12 wiedergegebenen Resultate zeigen dramatische Unterschiede im Verbrauch (und Lichtemissionen), die von über 100 kWh/Einwohner in Spanien, Portugal und den Niederlanden bis zu einem Minimum knapp unter 40 kWh/Einwohner in Deutschland reichen.

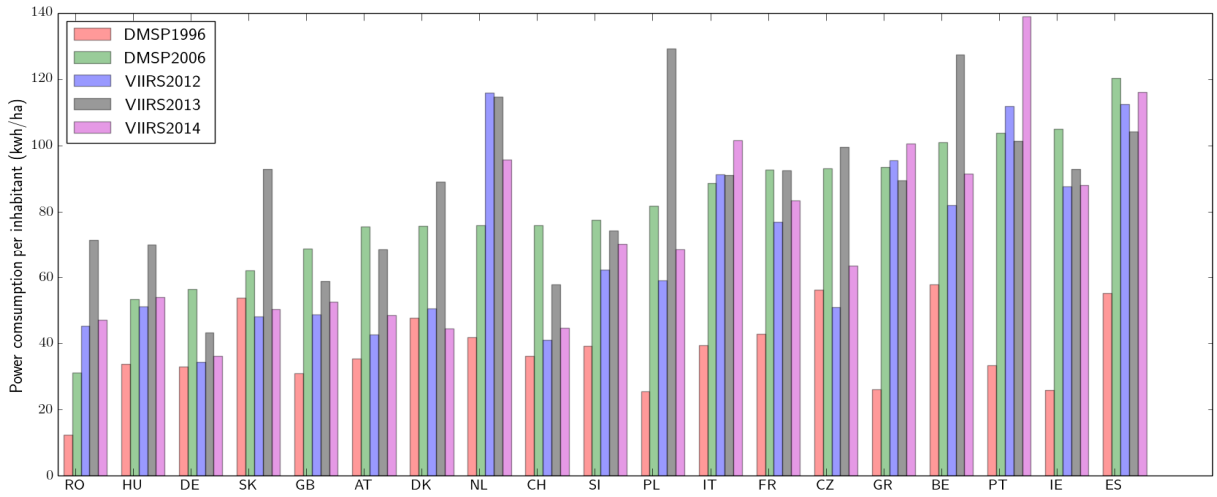

Abbildung 12: Einschätzung des Pro-Kopf-Energieverbrauch für künstliche Beleuchtung in kWh aus nächtlichen Satellitendaten (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Sánchez de Miguel 2015). Da der Energieverbrauch indirekt über die Lichtemissionen der Satelliten bestimmt wird, Daten des DMSP-OLS nicht kalibriert sind und keine stabilen VIIRS Daten vorliegen sollten die Ergebnisse mehr als Orientierung und weniger als Richtwerte angesehen werden.

Zusätzlich zu der größeren Sparsamkeit gegenüber anderen Europäischen Ländern, ist Deutschland auch deutlich weniger hell beleuchtet als die USA. Kyba et al. (2015b) verglichen die Lichtemission pro Kopf, aufgenommen mit dem VIIRS DNB Sensor, für deutsche Städte mit denen amerikanischer Städte (Abbildung 13). Sie fanden heraus, dass amerikanische Städte mit 10.000 Einwohnern durchschnittlich 3 fach heller waren als vergleichbar große Städte in Deutschland. Dieser Unterschied nahm mit der Größe der Städte zu, so dass eine amerikanische Stadt von 100.000 Einwohnern typischerweise 5fach heller ist als eine vergleichbare deutsche Stadt.

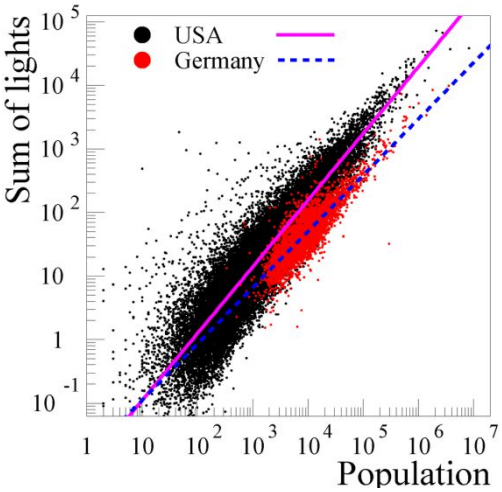

Abbildung 13: Vergleich der gesamten Lichtemission im Verhältnis zur Einwohnerzahl für deutsche (rot) und amerikanische (schwarz) Gemeinden (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Kyba et al. (2015b), Lizenz-Nr. CC BY 4.0).

Der Unterschied bezüglich der Beleuchtung zwischen deutschen Gemeinden und denen anderer Länder von vergleichbarem Entwicklungsstand hat wahrscheinlich mehrere Gründe. Kyba et al. (2015b) vermuten beispielsweise, dass die lockere niedrigere Bebauung amerikanischer Städte zur Folge hat, dass mehr Licht benötigt wird, um die vielen Straßen zu erleuchten. Nach der Publikation kontaktierte Jeffrey Tsao von den Sandia National Labs in den USA die Autoren, um vorzuschlagen, dass die geringeren Energiekosten in den USA ein möglicher zusätzlicher Faktor sein könnte. Zwar spielen diese zwei Faktoren wahrscheinlich eine Rolle, aber sie erklären nicht den Unterschied zwischen Deutschland und anderen europäischen Ländern, wie von Sanchez de Miguel (2015) festgestellt. Weitere mögliche Erklärungen, die für den Unterschied vorgeschlagen wurden, sind Straßenbreite, Vegetationsunterschiede (z.B. Baumbedeckung) und insgesamt Unterschiede in der Beleuchtungsintensität und den Beleuchtungsstandorten. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die Gründe für die Unterschiede zwischen den Ländern zu verstehen.

Die Hauptursache für den Unterschied bei der Lichtemission zwischen Deutschland und Vergleichsländern scheint die konservative Beleuchtungskultur zu sein. Das wird beispielsweise auf einer Serie von Astronautenfotos sichtbar, die sechs europäische Hauptstädte darstellen (Abbildung 14), aufgenommen in der Nacht vom 11. zum 12. Februar 2012. Kyba et al. (2016) verglichen kalibrierte Astronautenfotos für 22 europäische Städte und fanden heraus, dass die Strahlung von Straßenflächen in Berlin, München und Frankfurt am Main auf dem 22., dem 19. und dem 12. Platz rangierte. Die Unsicherheit bei der Rang-Zuordnung für jede Stadt ist aus methodischen Gründen ziemlich groß (beispielsweise könnten die Astronauten das Bild schräg aufgenommen haben, so dass Straßen von Gebäuden verdeckt wurden). Trotzdem weisen diese Resultate insgesamt in Verbindung mit denen aus dem nächsten Abschnitt auf einen systematischen Unterschied in der Beleuchtungspraxis zwischen Deutschland und Vergleichsländern hin.

Der Einfluss, den die historische Entwicklung auf die Beleuchtung haben kann, wird durch den Farbunterschied zwischen den Flächen vom früheren Ost- und West-Berlin verdeutlicht (Abbildung 4). Zusätzlich zur Prüfung des Unterschieds zwischen Deutschland und den USA verglichen Kyba et al. (2015b) das Licht von Gemeinden aus dem früheren Ostdeutschland mit solchen aus Westdeutschland. Sie fanden heraus, dass der frühere Osten im Durchschnitt heller

war, wobei 77 % der Gemeinden heller waren, gemessen am Durchschnittswert pro Kopf für ganz Deutschland, während nur 40 % der westlichen Gemeinden heller waren als es dieser Durchschnittswert vorgab. Die Ursache für diesen Helligkeitsunterschied ist nicht direkt bekannt, aber er ist deutlich zu groß, um durch Veränderungen der Einwohnerdichte erklärbar zu sein. Mögliche Unterschiede können auch an dem Durchschnittsalter und Art der Beleuchtung liegen (Ringwald/Bauer 2009).

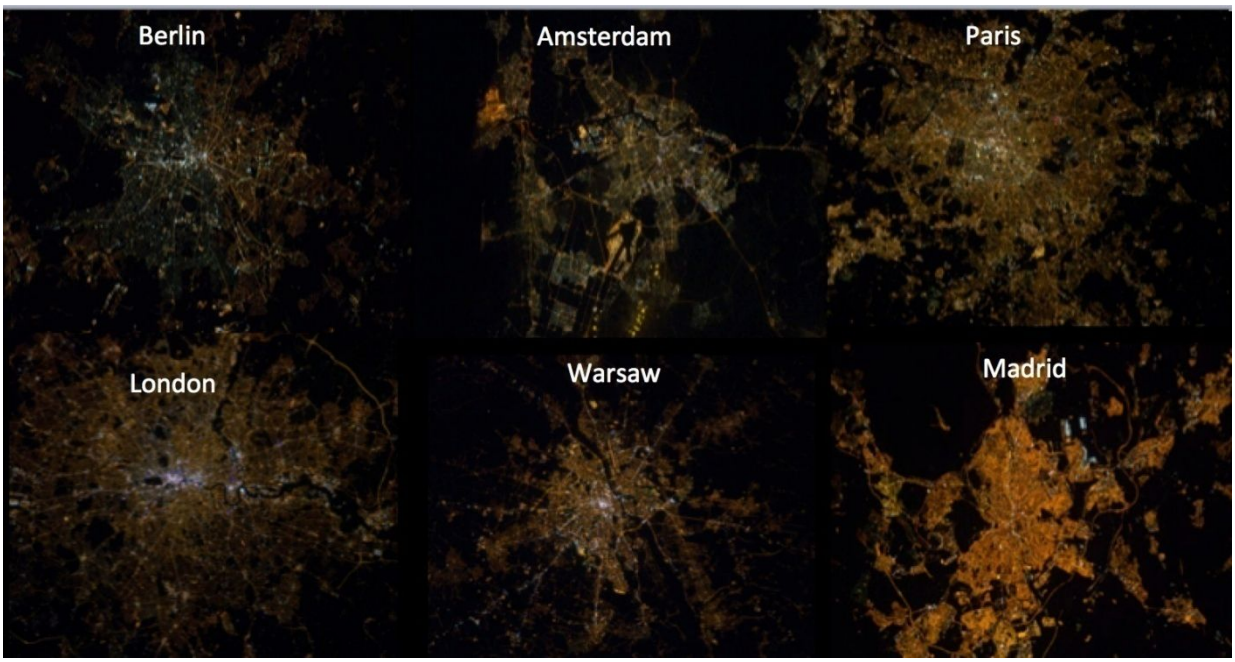

Abbildung 14: Sechs europäische Hauptstädte, aufgenommen mit derselben Kamera-Konfiguration von der Internationalen Raumstation (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center: die einzelnen Bild-Identifikations-Nummern sind erhältlich über Kyba et al. (2015b)).

Bisher existieren nur wenige detaillierte Studien zu den einzelnen künstlichen Lichtquellen. Auf der Ebene von Städten versuchten Levin/Zhang (2017) Zusammenhänge zu erklären zwischen der Lichtmenge einer Stadt und dem jeweiligen Bruttoinlandsprodukt, der Stadtfläche, der Straßendichte, der geographischen Breite, der Vegetation und der Schneebedeckung. Mit Hilfe dieser Parameter waren sie in der Lage, in ihrem Modell, knapp die Hälfte der Variabilität zwischen den Städten zu erklären.

Eine direktere Messung der Lichtquellen wurde von Kuechly et al. (2012) und Kyba et al. (2016) mit Luftbilddaten durchgeführt. Ihre Analysen verglichen große (ca. 400 km^2) Mosaikbilder mit Landnutzungskarten für Berlin und eine Anzahl von Gemeinden in Oberösterreich einschließlich der Städte Linz und Wels. Die Analysen zeigten, dass Straßen zwar einen wichtigen Anteil des aufwärts gerichteten Lichts ausmachen, sie aber bei weitem nicht die einzigen Lichtquellen sind. In Berlin waren Straßen zu 31,6 % ursächlich für aufwärts gerichtetes Licht; in den kleineren Gemeinden von Oberösterreich waren es 16 % bis 39 %. Andere bedeutende Lichtquellen umfassen industriell, kommerziell oder durch öffentliche Einrichtungen genutzte Flächen (in Berlin 25 %), und auch zentrale Innenstadtbereiche (in Berlin 6,3 %).

Eine Analyse einiger Städte (Bonn und Umgebung, Straßburg) ergab, dass die hellsten Lichtquellen auf Aufnahmen von der ISS Anstrahlungen sind, die offenbar viel Licht ungenutzt an den Himmel lenken (Hänel 2015).

Flughäfen sind gewöhnlich eine sehr wichtige Lichtquelle in Städten, wegen der Beleuchtung von Flächen, auf denen Flugzeuge be- oder entladen werden. Der Flughafen Tegel (Abbildung 5) verursachte beispielsweise 3,7 % der gesamten Lichtemission der Untersuchungsfläche Berlin nach den Untersuchungen von Kuechly et al. (2012). Ein Vergleich der 10 verkehrsreichsten Flughäfen weltweit mit Hilfe des gering auflösenden Sensors VIIRS DNB legt nahe, dass es große Unterschiede bezüglich der Beleuchtungspraxis gibt (Kyba et al. 2015b). Die Strahlung der hellsten Fläche des O'Hare-Flughafens von Chicago war 4,5-mal so hell wie der Haneda-Flughafen von Tokio, obwohl beide ungefähr die gleiche Passagierzahl abfertigen. Erste Ergebnisse von Kyba et al. (2016) mit höher auflösenden Astronautenfotos bestätigen extrem große Unterschiede bei der Beleuchtung von Abfertigungsflächen der Flugzeuge. Beispielsweise war die Beleuchtung am Frankfurter Flughafen 4-7fach heller als die vom Flughafen Heathrow, und deshalb verursachte in Frankfurt die Flughafenbeleuchtung über 20 % der gesamten aufwärts gerichteten Lichtemission der Stadt. Diese Befunde sind noch nicht in einem wissenschaftlichen Journal veröffentlicht, aber sie zeigen bzw. bestätigen die außerordentlich großen Unterschiede in der Beleuchtungspraxis internationaler Flughäfen.

3.2.2. Räumliche Verteilung der Himmelshelligkeit

Der Anteil von Licht, das als künstliches Himmelsleuchten zur Erdoberfläche zurückgeworfen wird, variiert dramatisch in Abhängigkeit von der lokalen Position, und für einen gegebenen Ort hängt er sehr stark von den Wetterbedingungen ab (Abbildung 15). Je kleiner die Entfernung zu den Lichtquellen oder urbanen Zentren, ist desto stärker ändert sich hierbei die Himmelshelligkeit (DoE 2017). Vor der Erfindung künstlicher Beleuchtung, waren bewölkte Nächte die dunkelsten. In der Nähe von Städten sind heute jedoch bewölkte Nächte am hellsten. In einer Studie der Himmelshelligkeit für 44 Standorte stellten Kyba et al. (2015a) fest, dass die Himmelshelligkeit für bewölkte Nächte zwischen dem 0,22 fachen (Kitt Peak, USA) und dem 2200 fachen Wert (Schipluiden/Niederlande) gegenüber einem sternenklaren Himmel unter natürlichen Bedingungen variiert. Die Himmelshelligkeit ist für bewölkte Nächte schwieriger zu messen oder gar zu modellieren, und nur wenige Studien wurden veröffentlicht, die sich mit bewölkten Nachthimmel befassten (Jechow et al. 2017, 2016; Ribas et al. 2016). Es ist nicht einmal bekannt, für welche Gebiete der Erde Wolken den Himmel heller machen, und wo sie ihn immer noch dunkler machen. Kompliziert wird der Umstand dadurch, dass an einigen Stellen Wolken den Himmel sowohl dunkler als auch heller machen können, je nach den Eigenschaften der Bewölkung (Ribas et al. 2016).

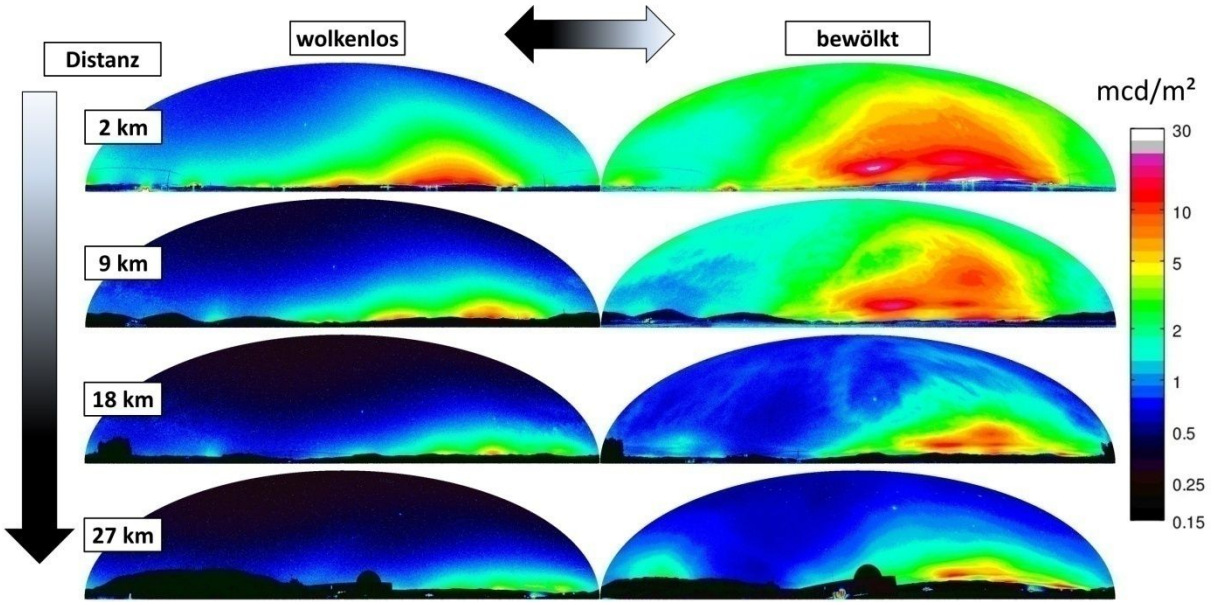

Abbildung 15: Himmelshelligkeit unter klaren und bewölkten Bedingungen in unterschiedlichen Entfernungen von der Stadt Balaguer/Spanien. (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Jechow et al. 2017).

Die Himmelshelligkeit klarer Nächte ist abhängig von atmosphärischen Parametern, wie z.B. dem Anteil von Aerosolen. Kyba et al. (2015a) untersuchten 12 Beobachtungsorte, für die Wetterdaten verfügbar waren und die genügend Unterschied zwischen klaren und bedeckten mondlosen Nächten zeigten. Für klare Nächte ermittelten sie eine Variabilität der Himmelshelligkeit zwischen +17% und -14% gegenüber dem Medianwert, für bedeckte Nächte von +72% bis -42%. Bereiche mit geringer Himmelshelligkeit zeigten eine gleichmäßigere Werteverteilung, während die Variation (Standardabweichung) der Himmelshelligkeit verschiedener Witterungsbedingungen für urbane Gebiete größer war, in denen die Himmelsaufhellung ganz allgemein auch größer ist.

Die räumlichen Verteilungsmuster der Himmelshelligkeit sind gegenwärtig nur bei klaren Nächten und für den Zenit hinreichend bekannt. Trotz der Veränderungen, die aufgrund von atmosphärischen Bedingungen auftreten können, gelingt es dem aktuellen „Weltatlas“ der nächtlichen Himmelshelligkeit (Falchi et al. 2016, siehe 3.1.5) im Allgemeinen recht gut, die Beobachtungen in klaren Nächten zu erklären (Ges et al. 2017). Zusätzlich zur Karte der nächtlichen Himmelshelligkeit erarbeiteten Falchi et al. (2016) eine Übersicht für Landflächen und Einwohner, und in welchem Ausmaß diese von der Himmelshelligkeit betroffen sind (Tabelle 2).

Tabelle 2: Bevölkerung (und Landfläche), die durch erhöhte Himmelshelligkeit im Zenit betroffen ist, in vier gestaffelte Ebenen für Deutschland, USA, die EU und die Welt. Die Schwelle für „von Kunstlicht beeinflusst" beruht auf Angaben der Kommission 50 zum „Schutz der existierenden und möglichen Beobachtungsstandorte" der International Astronomical Union. "Milchstrasse nicht sichtbar" bedeutet, dass die Milchstraße kaum je 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 Sehen erreicht (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Falchi et al. 2016).

	Deutschland	USA	EU	Welt
Keinen Einfluss	0% (0%)	0% (30,4%)	0% (1,3%)	8% (60,3%)
Beeinflusst	100% (100%)	99,7% (46,9%)	99,8% (88,4%)	83.2% (22,5%)
Milchstrasse nicht sichtbar	41,6% (4,8%)	77,6% (3,6%)	59,5% (6,0%)	35,9% (6%)
Keine Dunkeladaption möglich	2,7% (0.1%)	36,9% (0.6%)	20,5% (0.6%)	13,9% (0.2%)

Der Vergleich zwischen Deutschland und den USA ist in mehrerer Hinsicht bezeichnend. Kein Gebiet in Deutschland ist unbeeinflusst von erhöhter Himmelshelligkeit, wohingegen die USA noch beträchtliche Landflächen aufweisen, in denen die Himmelshelligkeit im Zenit natürlich ist[1]. Diese Gebiete in den USA sind jedoch nahezu gänzlich unbewohnt, sodass nur wenige US Bürger diesen natürlichen Himmel von zu Hause aus erleben können. Im Gegensatz dazu können weit mehr Deutsche zu Hause noch die Milchstraße sehen, weil deutsche Städte wesentlich dunkler sind als US-amerikanische (vgl. 3.1.5). Schließlich lebt ein Drittel der US-Bevölkerung in Gebieten, die so hell sind, dass ihre Augen sich nicht an nächtliche Sehweise anpassen können, wenn sie nachts draußen sind; das ist nur für 3 % der Deutschen der Fall.

Diese modellierten Ergebnisse des "Weltatlas" spiegeln sich in Beobachtungen des „Globe at Night"-Bürgerwissenschafts-Projektes wieder (vgl. 3.1.5). Die Tabelle 3 fasst Beobachtungen zusammen, die 2017 an Globe at Night übermittelt wurden. Obwohl diese Daten in keiner Weise bezüglich der Beobachtungsorte (Beobachtungen in ländlichen gegenüber urbanen Gebieten) korrigiert wurden, berichten mehr Deutsche (53 %) als Amerikaner (34 %), dass sie die Milchstraße sehen können (Größenklasse 5-7), während weit mehr Amerikaner (28 %) als Deutsche (7 %) berichten, dass sie in Gebieten leben, wo nur sehr wenige Sterne zu sehen sind (Größenordnung 1-2).

Tabelle 3: Beobachtungen der Grenzhelligkeit (siehe Kapitel 3.1.5), die zwischen dem 1.1.2017 und dem 6.12.2017 an Globe at Night übermittelt wurden. Es gab 466 Beobachtungen aus Deutschland und 3958 aus den USA. Für jede Klasse der Grenzhelligkeit ist auch die ungefähre Anzahl von sichtbaren Sternen angegeben.

Grenzhelligkeit	1	2	3	4	5	6	7
Anzahl sichtbarer Sterne	8	25	85	250	800	2500	5000
Deutschland	1%	4%	10%	23%	28%	32%	1%
USA	10%	17%	22%	17%	17%	16%	2%

Die „Globe at Night" Daten, zusammen mit den Simulationen des "Weltatlas" können für eine Etablierung von "Sternenparks" in Deutschland herangezogen werden. Zusätzlich zu den Sternenpark-Regionen Westhavelland und Rhön, liegen die dunkelsten Gebiete von Deutschland in Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt (speziell im Harz), Thüringen und Hessen. Auch ein großes Gebiet südlich und westlich von Nürnberg das Potential, einen Sternenpark einzurichten.

In einer Studie für das U.S.-amerikanische Energieministerium wurde mit dem Modell von Kocifaj (2007) der Einfluss von Lichtquellen mit unterschiedlicher spektraler Verteilung, Leuchten, Abstrahlcharakteristiken und Lichtstrom auf die Himmelsaufhellung untersucht. Als Basis wird die übliche Natriumdampfbeleuchtung genommen. Wesentlichen Einfluss haben die Abstrahlcharakteristik ohne Lichtanteile oberhalb der Horizontalen und die Reduzierung des Lichtstroms (in den USA wird oft eine Halbierung des Lichtstroms bei der Umrüstung von Natriumdampflampen auf 4000 K LED vorgenommen), da sie die geringste Himmelsaufhellung verursachen. Der Einfluss auf die Himmelshelligkeit von LEDs ohne Blauanteile (PC amber) ist geringer als von Natriumdampflampen. LEDs mit hohen Blauanteilen von 4000 K erhöhen die Himmelshelligkeit allerdings um bis zu 60% gegenüber Natriumdampflampen (Pacific Northwest National Laboratory 2017).

Zusammenfassend ist das Verständnis der räumlichen Muster der Himmelshelligkeit für klare Nächte für viele Gebiete der Erde und Deutschlands relativ hoch. Jedoch fehlt dieses Verständnis für wolkige oder ganz bewölkte Nächte fast vollständig, sowohl theoretisch als auch experimentell. Wegen dieser Kenntnislücke ist es gegenwärtig nicht möglich, die Auswirkungen erhöhter Himmelshelligkeit auf Wildtiere und Pflanzen einzuschätzen(Kyba/Hölker 2013).

3.2.3. Zeitliche Veränderungen der Beleuchtung (stündlich bis saisonal)

Die Vielzahl der Quellen und Nutzungsformen von künstlicher Beleuchtung spiegeln sich auch in der zeitlichen Variabilität wieder. Einige Lichtquellen sind sehr temporär (z.B. Lichtfestivals) oder saisonal (z.B. Urlaubsbeleuchtung, siehe Román/Stokes 2015). Einige Lichtquellen sind die ganze Nacht eingeschaltet, während andere Lichtquellen gedimmt werden oder zu einer bestimmten Zeit an- und abgeschaltet werden. Manchmal scheinen Lichtquellen auch noch am Tage (siehe Abbildung 16). In diesem Kapitel werden zeitliche Veränderungen der künstlichen Beleuchtung und gängige Beleuchtungspraktiken diskutiert.

Abbildung 16: Lichtquellen die auch am Tag leuchten zeigen auf, dass Energieeffizienz mehr bedeutet als die reine Lichtausbeute (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von C. Kyba).

Erfassungen/Beobachtungen der zeitlichen Variabilität

Während für Beleuchtungsquellen der öffentlichen Hand Informationen zu Einsatzzeiten oft verfügbar sind oder leicht erfragt werden können, ist die Situation bei privat betriebenen Lichtquellen sehr unübersichtlich. Da diese gerade in Städten einen erheblichen Anteil der künstlichen Beleuchtung ausmachen, beschäftigt sich jüngst ein Forschungsstrang damit, Erkenntnisse über die Anwendungszeiten der Beleuchtung in ihrer Gesamtheit zu gewinnen und die dafür nötigen Methoden zu entwickeln. Schwerpunkt der Studien ist bislang die zeitliche Veränderung im Laufe der Nacht.

Eine Vielzahl von Studien zur Himmelshelligkeit ergab eine Abnahme der künstlichen Himmelshelligkeit im Verlauf der Nacht. Kyba et al. (2015a) untersuchten 17 hell beleuchtete Orte weltweit mit dem Ergebnis, dass die meisten dunkler wurden mit einer durchschnittlichen Abnahme von 5% pro Stunde in einer Nacht (vor und nach Mitternacht). In einem größeren Datensatz fanden Falchi et al (2016) eine mittlere Abnahme der künstlichen Himmelshelligkeit von 4,5% pro Stunde. Kyba et al. (2012) beobachteten eine Abnahme der Himmelshelligkeit über Berlin von 16% pro Stunde zwischen 23:00-00:30 Uhr und 8% pro Stunde von 00:30-03:00 Uhr. In Berlin wurde dabei eine stärkere Abnahme für längere (rote) als für kürzere (blaue) Wellenlängen beobachtet, wohingegen Sanchez de Miguel (2015) einen gegensätzlichen Effekt in Madrid beobachtet (stärkere Abnahme im blauen als im roten Spektralbereich). Kyba et al. (2012) vermuten, dass die Abnahme in Berlin hauptsächlich von Haushalts- und Fahrzeugbeleuchtung herrührt, während Sanchez de Miguel (2015) die Abnahme der Himmelshelligkeit in Madrid mit dem Abschalten der Beleuchtung für historische Gebäude begründet, welches auf den Aufnahmen der Astronauten beobachtet wurde (Kyba et al. 2015b).

Dobler et al. (2015) untersuchten die zeitliche Veränderung der Beleuchtung anhand von Fotografien der Skyline von Manhattan (Abbildung 17) mit einer Auflösung von 10 Sekunden über einen Zeitraum von 3 Wochen. Dabei wurden 4174 individuelle Lichtquellen identifiziert und entweder als "Privathaushalt" oder "Gewerbe" klassifiziert, je nachdem, ob diese sich in der oberen oder unteren Hälfte des Bildes befinden. Im Zuge dieser Studie wurden Gruppenmuster für das typische zeitliche Abschaltverhalten von den beiden Klassen "Privathaushalt" oder "Gewerbe" an Wochentagen gefunden, obwohl ein solches Muster für die einzelnen Lichtquellen nicht korreliert war und von Nacht zu Nacht um eine Stunde variieren konnte. Anders ausgedrückt, wurde die Hälfte der Lichtquellen innerhalb einer Stunde ihrer typischen Abschaltzeit abgeschaltet. während der anderen Hälfte viel zufälliger verteilte Abschaltzeiten hatte. Das Ein- bzw. Abschaltverhalten erschien an Wochenenden noch zufälliger als an den anderen Wochentagen.

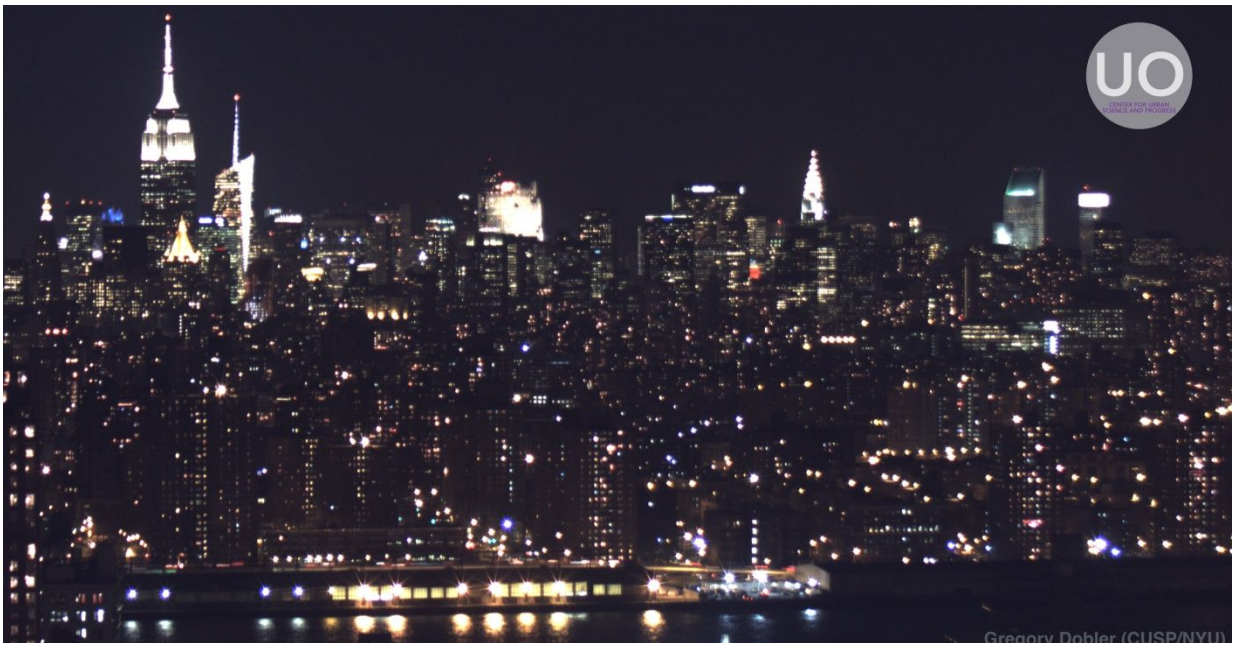

Abbildung 17: Die Skyline von Manhattan, New York. (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung Gregory Dobler)

Eine neue Studie von Bará et al. (2017), aufbauend auf der Analyse von Dobler et al. (2015), kombiniert Himmelshelligkeitsmessungen mit dem SQM und Veränderungen der Beleuchtungssituation, beobachtet mit Fotokameras. Ziel der Studie war es, mit beiden Datensätzen den relativen Anteil der Beleuchtung von Straßen, Privathaushalten und Fahrzeugbeleuchtung an der Himmelshelligkeit zu verschiedenen Zeitpunkten in den Städten Coruña und Arteixo in Spanien abzuleiten. Die Studie ergab, dass Privathaushalte und Fahrzeugbeleuchtung eine Stunde vor Mitternacht ein Maximum zeigen (22% und 1%), wobei beide Beleuchtungsformen bis 4 Uhr auf nahezu 0% absinken. Dabei ist zu beachten, dass durch die großen Unterschiede in der Beleuchtungskultur verschiedener Länder und Regionen diese Studie als vorläufig und regional begrenzt anzusehen ist.

In einer detaillierten Auswertung von Zeitrafferaufnahmen untersuchte Meier (2017) die zeitlichen Profile verschiedener Lichtnutzungen in drei Berliner Zentren (Alexanderplatz, Potsdamer Platz, Hackescher Markt) (s. zur Methodik auch 3.1.4). Es handelt sich um eine experimentelle Untersuchung (Hauptzweck war die Entwicklung des Forschungsdesigns), die auf Aufnahmen aus drei einzelnen, vergleichbaren Nächten beruht. Somit bietet sie einen ersten detaillierten Eindruck der Lichtnutzung in Zentren Berlins an Werktagsnächten: inwiefern die Befunde auch auf andere Zentren Berlins oder andere Städte bzw. an anderen Tagen zutreffen, bleibt noch zu erforschen. Für die drei Orte zeigte sich, dass 0 Uhr ein zeitlicher Scheitelpunkt darstellt, bis zu dem Beleuchtung eingeschaltet ist oder bleibt und nach dem sie in Teilen im Verlauf der 2. Hälfte der Nacht ausgeschaltet wird. Das Ein- und Ausschalten der Beleuchtung findet in zeitlich begrenzten Phasen statt, zwischen denen der Zustand weitestgehend ruht.

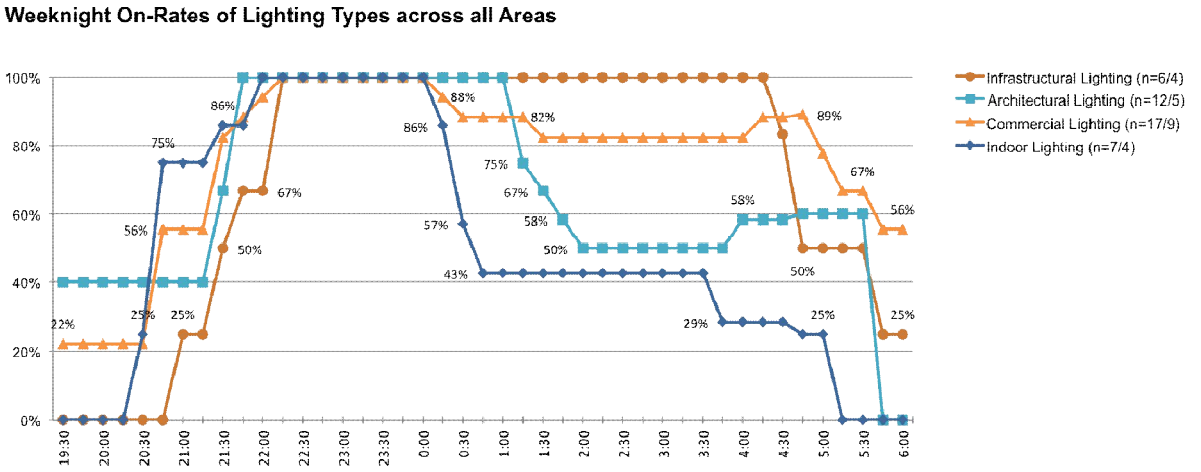

Abbildung 18: Temporaler Verlauf unterschiedlicher Beleuchtungsarten an den drei Berliner Untersuchungsstandorten: Die Prozentwerte geben den Anteil der jeweils in Betrieb befindlichen Beleuchtungseinheiten (z.B. Straßenbeleuchtung = eine Einheit) an. (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von J. Meier 2017)

Über alle drei Orte hinweg sind dies: Einschalten bis ca. 22:15 Uhr, Vollbeleuchtung bis 0 Uhr, teilweises Ausschalten bis ca. 2 Uhr, Teilbeleuchtung bis ca. 4:15 Uhr, danach sukzessives Ausschalten. Es zeigten sich Unterschiede zwischen den zeitlichen Profilen der Orte (so ist die Beleuchtung am Alexanderplatz deutlich dynamischer als in den beiden anderen Zentren), besonders aber zwischen jenen der vier untersuchten Lichtkategorien: Infrastrukturbeleuchtung und große Teile der kommerziellen Beleuchtung bleiben die ganze Nacht hindurch an, während Architekturbeleuchtung erst ab 1 Uhr ausgeschaltet wird, jedoch etwa zur Hälfte. Innenraumbeleuchtung (wobei privates Wohn- und Bürolicht nicht berücksichtigt wurde) wird bereits ab Mitternacht und zu fast 60% ausgeschaltet. Grundsätzlich ließen sich 3 “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.

Daten zum zeitlichen Einsatz künstlicher Beleuchtung können mit Informationen verglichen werden, die Aufschluss über den zeitlichen Verlauf von Aktivitäten im Außenraum geben. Somit lassen sich Hinweise auf das Verhältnis zwischen Beleuchtungsangebot und -nutzung im Laufe der Nacht gewinnen, sowie auf entsprechende Anpassungsmöglichkeiten (s. zur zeitlichen Dimension der Lichtplanung: (Köhler/Sieber 2011)). So verglichen Meier und Henckel (Meier/Henckel 2017b) die Ein- und Ausschaltzeiten der Beleuchtung am Alexanderplatz während einer Nacht (s. oben) mit den Öffnungszeiten von Büros, Gastronomie, Einzelhandel und Freizeitangeboten sowie den ÖPNV-Verbindungen. Es zeigte sich, dass die Angebots- und Verbindungsdichte in den ersten Stunden nach Mitternacht insgesamt deutlich reduziert ist, während nur wenige Lichtquellen ausgeschaltet werden.

Nachtabschaltung öffentlicher Beleuchtung

Im Betrieb des öffentlichen Teils der Lichtquellen (insbesondere: kommunale Straßenbeleuchtung, aber auch Anstrahlungen von Gebäuden u.ä.) wird unterschiedlichen zeitlichen Mustern gefolgt. Diese reichen von durchgehender Beleuchtung über selektive Reduktionen bis hin zu vollständigen Abschaltungen für einen Teil der Nacht. Nächtliche Reduktionen der Beleuchtung fußen auf dem Gedanken, dass zu bestimmten Zeiten der Nacht -

beispielsweise zwischen 23:00-04:00 Uhr - der Bedarf an öffentlicher Beleuchtung so gering ist, dass der durchgängige bzw. vollständige Betrieb nicht notwendig oder angemessen ist. Historisch war die Abschaltung bzw. Reduzierung der Beleuchtung für Teile der Nacht weit verbreitet. So hält Schivelbusch in seinem 1983 erstmals erschienenen Buch zur Geschichte der künstlichen Helligkeit fest: “Die Straßenlaterne, die die ganze Nacht hindurch und das ganze Jahr über gleichmäßig leuchtet, ist eine noch keine hundert Jahre alte Errungenschaft” (Schivelbusch 2004, S. 91). Ausschlaggebend war bis Ende 19./Anfang 20. Jh. insbesondere das Mondlicht: Anhand von Schalt- bzw. Mondscheintabellen wurden die Zeiten bestimmt, in denen künstliches Licht notwendig ist (Schivelbusch 2004, S. 91 f).

Während die Zeiten und Vorgehensweisen für einzelne Kommunen i.d.R. problemlos zu ermitteln sind, sind keine Studien bekannt, die eine differenzierte Übersicht zu unterschiedlichen Praktiken der Reduktion, deren räumlicher Verteilung, Akzeptanz und Wirkung bieten. Laut einer Umfrage von PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (PwC) (2015) bei deutschen Kommunen stellen 25% die Straßenbeleuchtung zeitweise komplett ab, 30% schalten nur jede zweite Leuchte ein, 55% schalten zweilampige Leuchten auf einlampigen Betrieb um. Systeme wie Bewegungsmelder oder "Dial for light" (Einschalten per Anruf) finden nur selten Anwendung. Als Hauptbeweggrund werden Kosteneinsparungen genannt. Aus dieser Motivation erklären sich Ansätze wie die “Straßenlampenpatenschaften” in Zwiesel, bei denen Bewohner*innen für den Weiterbetrieb von Straßenlampen bezahlen können (Bayrischer Rundfunk 2015). Nach Einschätzung der Gutachter sind es in Deutschland vornehmlich kleinere Städte und Gemeinden, in denen die Beleuchtung ganz oder teilweise ausgeschaltet wird, während sie in größeren Städten weitgehend eingeschaltet bleibt. Im Vergleich dazu schalten in Frankreich inzwischen 12.000 (das ist ein Drittel aller) Kommunen die öffentliche Beleuchtung teilweise oder ganz ab, um Kosten einzusparen (ANPCEN 2017c). Auch in Wien wurden schon Halbnachtabschaltungen durchgeführt, bei denen die Beleuchtungsstärke auf 50% reduzierte, die der Bevölkerung nicht weiter aufgefallen sind (Posch 2013).

Ein dokumentiertes Beispiel zur Nachtabschaltung ist die Stadt Preußisch-Oldendorf (Landkreis Minden-Lübbecke) mit ca. 16.000 Einwohnern. Hier wurden zwischen 0 und 6 Uhr 1390 von 1662 Lichtpunkten ausgeschaltet, wodurch sich eine Energieeinsparung von 40% ergibt. Die Himmelshelligkeit in der Stadt nimmt dadurch um 40% ab (Hänel, eigene Untersuchungen 2010). Da es keine Sicherheitsprobleme gab, wurde die Abschaltung auf 23 Uhr vorgezogen und auch nach der Umrüstung auf energiesparende LED-Beleuchtung beibehalten.

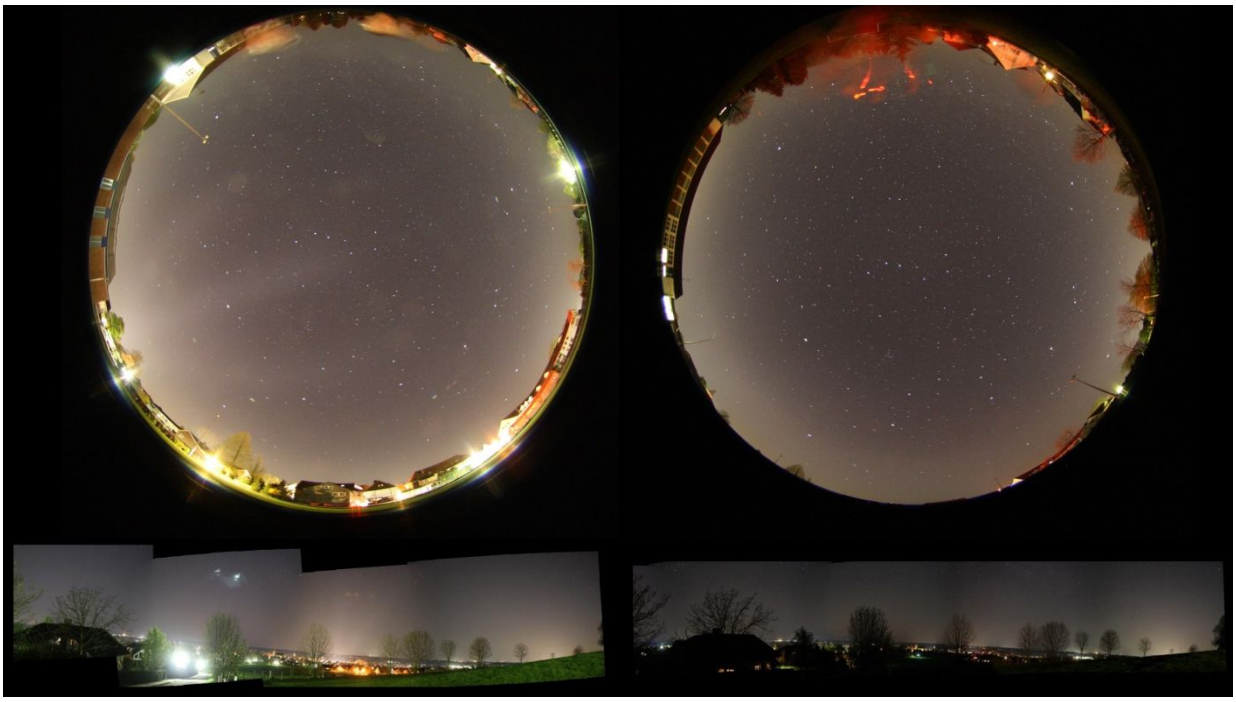

Abbildung 19: Der Nachthimmel in Preußisch-Oldendorf vor (links) und nach dem Abschalten der Straßenbeleuchtung. Die Himmelsansichten oben sind auf einem Sportplatz im Ortszentrum gemacht, die Panoramen vom Ortsrand aus Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).

3.3. Ausmaße und Trends der künstlichen nächtlichen Beleuchtung in Deutschland und Europa

Die Außenbeleuchtung in Deutschland hat sich in den letzten zehn Jahren durch die Einführung der LED/OLED Technologie grundlegend verändert. Dadurch sind einerseits neue vielfältige lichtgestalterische Möglichkeiten entstanden und andererseits wurde eine höhere Lichtausbeute und energieeffizientere Beleuchtung ermöglicht. Die Installation und Umrüstung auf diese neuen Technologien wurde durch die Ökodesign-Richtlinie, die die Verwendung ineffizienter Leuchtmittel verbietet vorangetrieben und durch das hohe Alter der bestehenden Außenbeleuchtung begünstigt (PwC 2015). So waren zum Beispiel circa 30% der Beleuchtungstechnik der deutschen Straßenbeleuchtung 2009 aus den 60er Jahren, und auch heute liegt das Durchschnittsalter noch bei 20 Jahren - ein Großteil der öffentliche Beleuchtung steht damit am Ende ihres technischen Lebenszyklus (DStGB et al. 2009; PwC 2015). Zudem findet eine massive staatliche Förderung der LED-Technik statt (siehe Kapitel 4.1.5 Förderpolitik). Die höhere Lichtausbeute der LED Technologie erlaubt, dass nun verstärkt die Anforderungen der Normen erfüllt werden können. Dies kann zu direkten und indirekten Rebound-Effekten durch höhere Beleuchtungsstärken und Energieeinsparungen führen (Leuser et al. 2016; Saunders/Tsao 2012). Eine Minimierung der Lichtverschmutzung wird in nur wenigen Ausschreibungen als Kriterium gefordert. Dabei wird aber meist lediglich die gezielte Abstrahlcharakteristik von LED-Leuchten berücksichtigt, andere Aspekte werden selten berücksichtigt.

Mit den folgenden Abschnitten werden erste Informationen über Ausmaß und Trends der Beleuchtung in Deutschland und Europa zusammengefasst. Eine erste Abschätzung über Änderungen der künstlichen Beleuchtung versuchte Hänel (2001) in einer Quantifizierung anhand der Zunahme des Stromverbrauchs in Deutschland und der Stadt Osnabrück, unter Berücksichtigung der steigenden Lampeneffizienzen (wesentlich der Übergang von Quecksilber- auf Natriumlampen) in Anlehnung an die Arbeit von Riegel (1973). Daraus ließ sich bis 1990 eine Zunahme von jährlich ca. 1% der Lichtmenge modellieren.

In den ersten Abschnitten wird eine Quantifizierung der nächtlichen künstlichen Beleuchtung dargestellt. Anhand von Satellitendaten werden der Anteil der beleuchtete Fläche und die Lichtemissionen zwischen 2012 und 2016 untersucht (3.3.1) und gemeinsam mit Langzeitbeobachtungen von Messungen am Boden bezüglich Ausmaß und Veränderungen der Himmelshelligkeit diskutiert (3.3.2). Darauf folgt eine Betrachtung der gegenwärtigen Veränderungen der Beleuchtungstechnologien und Trends bei der Nutzung und Lichtplanung (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) näher beleuchtet.

3.3.1. Ausmaß und Trend von beleuchteten Flächen und Beleuchtungsintensität anhand von Satellitendaten

Die Veränderungen bei der künstlichen Beleuchtung auf globaler Skala zwischen 2012 und 2016 wurde kürzlich von Kyba (Kyba et al. 2017a) in einer vorläufigen Analyse untersucht. Die Studie basiert auf Daten des VIIRS DNB Sensors vom Suomi NPP-Satelliten (siehe Kap. 3.1.3). Diese Analyse und auch die anderen hier wiedergegebenen Ergebnisse beziehen sich daher auf direkt vertikal nach oben abgestrahltes Licht und teilweise solches, das als Streulicht von der Erdoberfläche aufwärts gelangt. Das bedeutet, dass der Satellitensensor kaum Licht, das horizontal von der Erde abgestrahlt wird, erfasst, wie zum Beispiel an vertikalen Flächen reflektiertes Licht, Licht von Leuchttafeln, Autoscheinwerfern oder aus den Fenstern von Häusern abgestrahltes Licht.

Kyba et al. (2017a) untersuchten zwei unterschiedliche Aspekte der Beleuchtung. Erstens prüften sie, wie die „beleuchtete Fläche“ sich von 2012 nach 2016 veränderte, wobei die „beleuchtete Fläche“ definiert war durch Flächen, die mehr als 5 nW/cm²sr abstrahlen, und zwar gemessen an einzelnen Pixeln des VIIRS-DNB Sensors. Zur Veranschaulichung der Größenordnung: Das hellste Pixel im Monat Oktober 2012 der Stadt Potsdam hatte einen Wert von 36 nW/cm²sr, und das hellste Pixel des Frankfurter Flughafens erreichte 290 nW/cm²sr. Im Rahmen dieser Analyse wurde festgestellt, dass die erleuchtete Fläche global um 2,2 % jährlich zunimmt. Die zweite Analyse in Kyba et al. (2017a) untersuchte, wie Flächen, die 2014 eine Helligkeit von mehr als 5 nW/cm²sr aufwiesen, sich über die Periode von 2012 bis 2016 veränderten. Dabei stellten sie fest, dass bereits beleuchtete Flächen im globalen Mittel noch heller wurden, und zwar ebenfalls mit einer jährlichen Rate von 2,2 %. In der Studie wurde darüber hinaus die Veränderung der Beleuchtung mit Veränderungen des Bruttoinlandsproduktes (BIP) verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass für die Gruppe der Länder, für die Daten zum BIP verfügbar waren, die durchschnittlichen Veränderungen der Beleuchtung sehr ähnlich waren wie die Veränderungen des globalen BIP und das, obwohl die Korrelation zwischen Veränderungen des BIP und solchen der Beleuchtung auf der Ebene einzelner Länder nur schwach war. Sollte dieser Rebound-Effekt weiter zunehmen, ist auch anzunehmen, dass die Korrelation stärker wird. Wird die Korrelation dagegen schwächer kann dies auch ein Indiz für erfolgreiche Maßnahmen zur Reduzierung der Lichtverschmutzung bewertet werden.

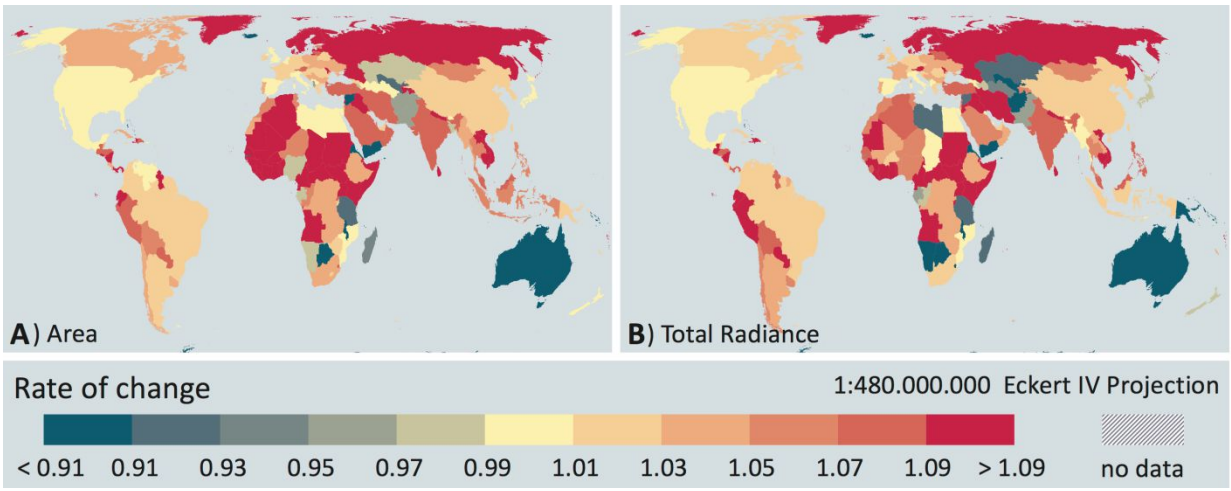

Abbildung 20: Jahresrate der Veränderung der Beleuchtung auf globaler Ebene nach Ländern: (A) beleuchtete Flächen und (B) Leuchtdichte beleuchteter Flächen. (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Kyba et al. 2017a).

Auf der Ebene der einzelnen Länder gab es beträchtliche Unterschiede bezüglich der Veränderungsrate (Abbildung 20). 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 von beleuchteter Fläche und Strahldichten in bereits hell erleuchteten Ländern, wie Deutschland, oft nur moderat oder in einigen Fällen sogar leicht negativ. Bei der Bewertung dieser Daten muss jedoch die Tatsache berücksichtigt werden, dass der VIIRS-DNB Sensor für blaues Licht im Spektralbereich zwischen 400 und 500 nm nicht empfindlich ist. Deshalb ist anzunehmen, dass die Veränderungen im sichtbaren Spektralbereich durch diese Analysen unterschätzt werden.

Eine weitere, ähnliche Analyse, diesmal jedoch beschränkt auf Deutschland, wurde von Kyba et al. (2017b) durchgeführt. Da Deutschland nicht von Polarlicht beeinflusst ist und in Deutschland extrem hell beleuchtete Flächen kaum wurden die Schwellenwerte für das Entfernen von Rauschwerten, die durch das Aufnahmeinstrument allein entstanden sind, in den Untersuchungsbereich auf Werte zwischen 3 und 150 nW/cm2sr herabgesetzt. Die Jahresrate von Veränderungen der Lichtemissionen auf der Ebene der Bundesländer ist in Abbildung 21 dargestellt. Die meisten der Länder weisen 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 2012 bis 2016 um 45 % zunahm (also 9,7 % jährlich), gefolgt von Schleswig-Holstein mit 40 % (jährlich 8,8%). Bei der Strahldichte der beleuchteten Flächen zeigte Schleswig-Holstein die schnellste Zunahme mit 41 % (8,9 % jährlich), gefolgt von Bayern mit 35 % (7,9 % jährlich). Die Ausnahme unter den Bundesländern ist Thüringen mit einer Abnahme von 18 % an beleuchteter Fläche (jährlich 4,9 %) und einer Abnahme an Strahldichte der beleuchteten Flächen von 17 % (jährlich 4,5 %). Diese Ergebnisse sind vorläufig und basieren auf dem Verhältnis zwischen den Jahren 2016/2012, also nicht für jedes Jahr. Die Zunahme in den einzelnen Bundesländern sind durch die geringen Werte im Jahr 2012 gegeben. Auf der Grundlage der Daten aus den Zwischenjahren dürfte der Schluss zutreffen, dass sich die Entwicklung in Thüringen und Bayern tatsächlich unterscheidet, die hier angegebenen exakten Werte für Wachstum oder Rückgang sollten aber als unsicher angesehen werden.

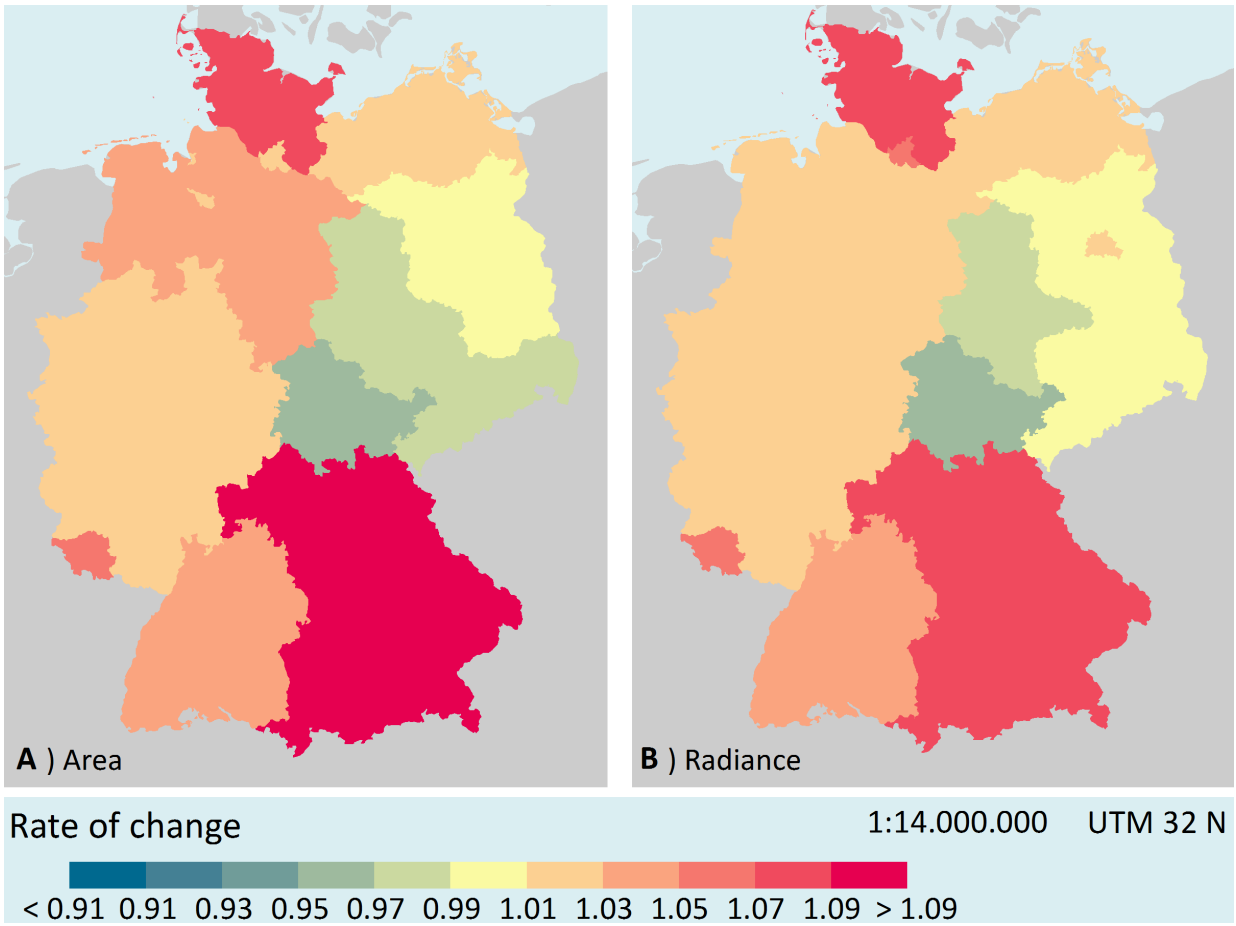

Abbildung 21: Jährliche Veränderungsraten an beleuchteter Fläche (A) und an Strahldichte (B) von 2012 bis 2016 für die deutschen Bundesländer (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung Kyba et al. 2017b).

Es ist wichtig festzustellen, dass der Einfluss des Wetters erheblich größer ist, wenn kleinere Flächen untersucht werden. Kyba et al. (2017b) fanden beispielsweise signifikante systematische Abweichungen bei den Ergebnissen für Bremen in den Monatskompositdaten des VIIRS-DNB Sensors für Oktober 2016. In den meisten Monaten sind helle Lichtquellen im Hafengebiet nahe 53.13°N, 8.68°E erkennbar. Im Oktober 2016 jedoch war das festgestellte Licht über eine große Fläche ausgedehnt und erreichte sogar normalerweise unbeleuchtete Flächen bis zu 4,5 km vom Hafen entfernt. Der Grund dafür war wahrscheinlich in diesem Monat häufig auftretender Nebel, der nicht als solcher vom Infrarotdetektor des Satelliten erkannt wurde. Der Infrarotdetektor dient zum Filtern von Daten, die Wolkeneinfluss aufweisen. Dieses Beispiel zeigt, dass Daten, die nur während eines Monats aufgezeichnet wurden, mit Vorsicht interpretiert werden müssen. Dieser Hinweis muss bei den hier folgenden präsentierten Ergebnissen berücksichtigt werden. Die US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) entwickelt gerade Kompositdaten auf der Basis ganzer Jahre; diese sollten weniger durch derartige Störeinflüsse betroffen sein.

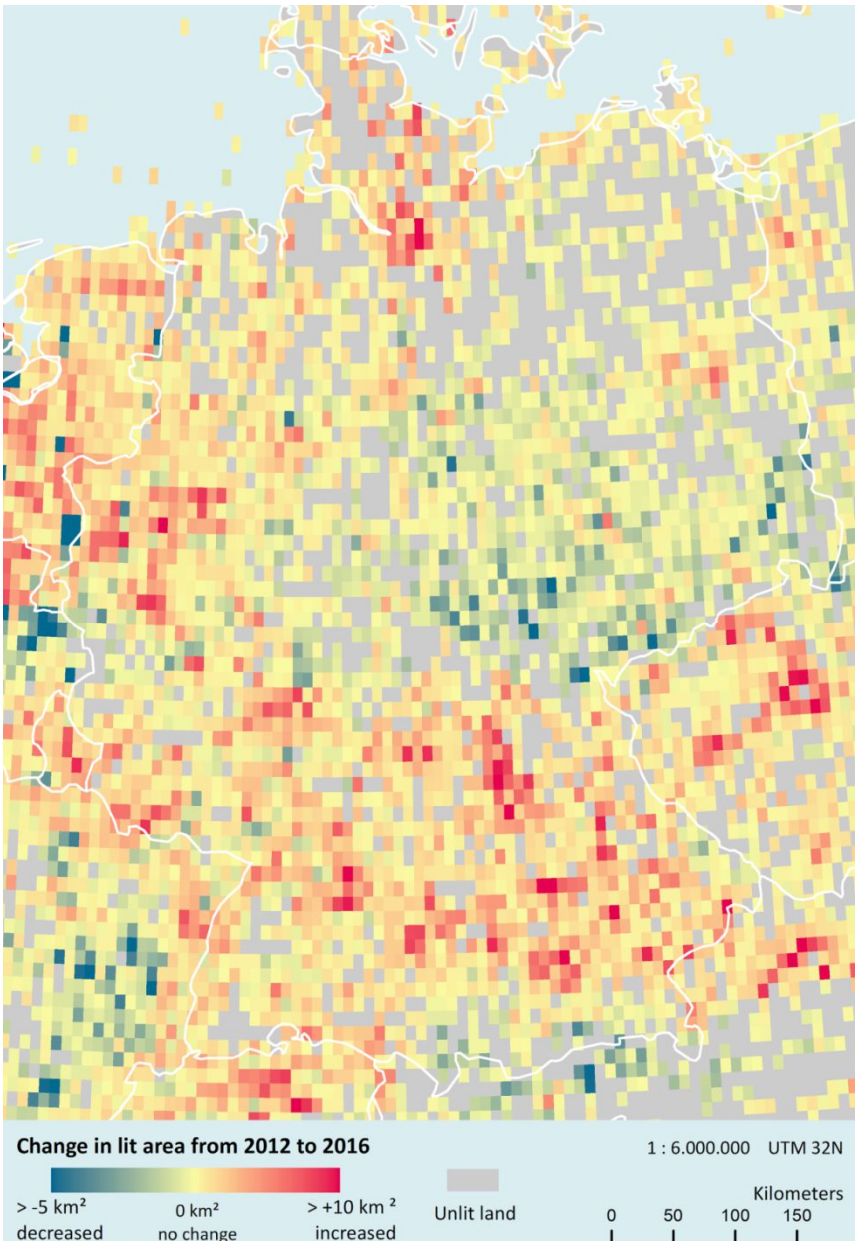

Abbildung 22: Veränderungen beleuchteter Fläche in Deutschland aufgeteilt in Pixel von ca. 100 km². Die beleuchtete Fläche nimmt in den roten Flächenelementen zu (bis zu 19,5 km²) und in den blauen Flächenelementen ab (bis zu -5,7 km²). Zu beachten ist, dass zur besseren Erkennbarkeit die Farbabstufung für Zunahmen doppelt so steil ist wie für Abnahmen Bundesländer (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung Kyba et al. 2017b).

Abbildung 22 zeigt eine detaillierte Ansicht der Veränderung beleuchteter oder unbeleuchteter Flächen (wieder oberhalb der Schwelle von 3 nW/cm2sr) in Deutschland, wobei die Daten in ungefähr gleich große Regionen von näherungsweise 100 km2 unterteilt wurden. Ein Anstieg nach oben gerichteter Strahlung kann für viele Dörfer in Bayern festgestellt werden (z. B. Abbildung 23). Dafür gibt es mehrere mögliche Interpretationen. Die Zunahme der Strahlung kann auf Änderungen der Beleuchtung zurückgeführt werden, auf regionaler Ebene haben mit größerer Wahrscheinlichkeit Wetterphänomene die Beobachtungen beeinflusst. Die Zunahme der Strahlung könnte möglicherweise durch eine Zunahme der gesamten Beleuchtungsstärke begründet sein. So erfolgte zum Beispiel in Sünching eine komplette Umrüstung der Straßenbeleuchtung auf LED Technologie in den Jahren 2015/16 (persönliche Kommunikation mit Georg Schmalhofer, Geschäftsleiter der VG Sünching) und die Werte waren 2016 heller in der

Zeitreihe. Aber auch ein allgemeiner Zuwachs an Siedlungsfläche in dem betrachteten Zeitraum kann Grund für eine Zunahme der Lichtemissionen sein. Eine detaillierte Analyse von Ursache und Wirkungsbeziehungen wäre hierzu notwendig.

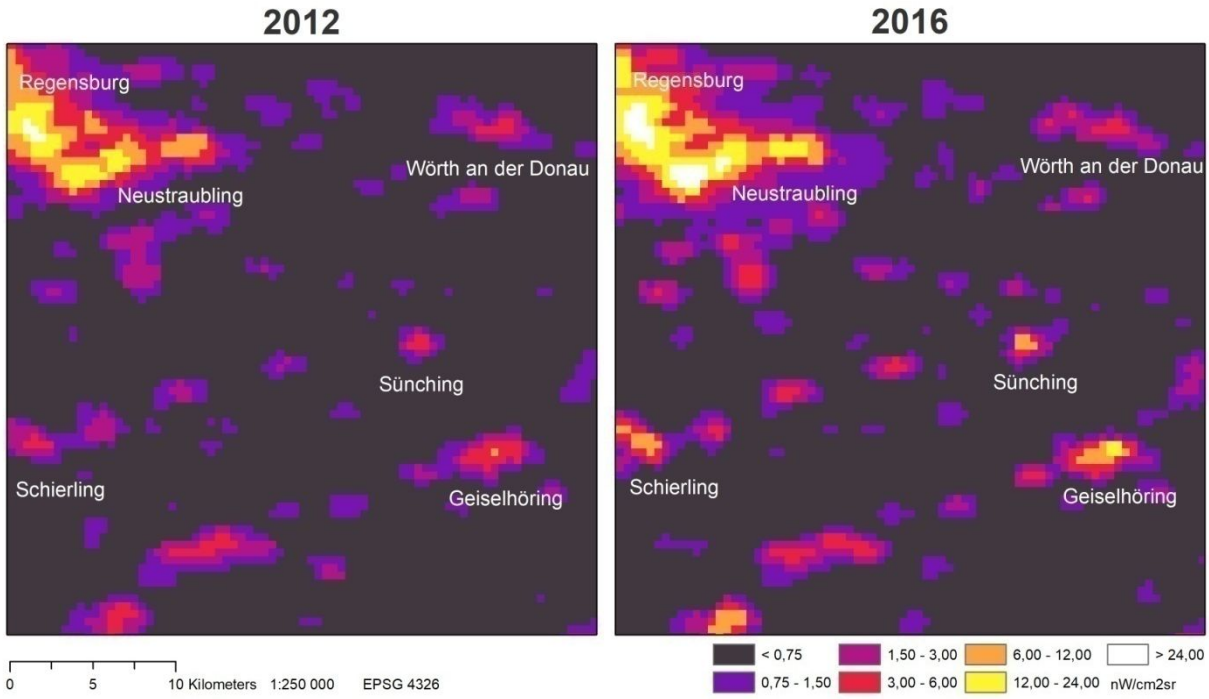

Abbildung 23: Beispiel von beobachteten Änderungen der nach oben abgegebenen gemessenen Strahlung in Sünching und Umgebung in Bayern. Links die vom Satelliten für 2012 gemessene Strahlung, rechts für 2016. Fast alles Licht hat in der Gegend über den betrachteten Zeitraum zugenommen (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung Kyba et al. 2017b).

Abschließend kann festgehalten werden, dass Messungen vom Satelliten aus für Deutschland darauf hindeuten, dass in einigen Gebieten die Helligkeit rapide zunimmt, während in wenigen Gebieten die Helligkeit auch zurückgeht. Die aus dem Weltall beobachtete Aufhellung ist im Einklang mit der These, dass bei der Umrüstung auf LED-Leuchten die Beleuchtung in Anzahl und Helligkeit nicht konstant gehalten wird, sondern wegen der größeren Zahl installierter Leuchtkörper(um eine höhere Gleichförmigkeit zu erhalten) insgesamt deutlich zunimmt (PwC 2015, S. 20). Da Monatsdaten für die Analyse herangezogen wurden, sind die konkreten Ergebniswerte als Hinweis zu sehen und weniger als wissenschaftlich fundierte Messwerte.

3.3.2. Ausmaß und Trend der Himmelshelligkeit

Bisher gibt es nur wenige Studien zur Langzeitentwicklung der künstlichen Himmelshelligkeit über mehrere Jahre. Ein Grund dafür ist, dass es aufgrund der Dynamik schwierig ist, das künstliche Himmelsleuchten für einen bestimmten Ort mit einem Einzelwert zu definieren (vgl. 3.2.2). 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 sind Faktoren, die insgesamt derartige Analysen kompliziert machen. Zusätzlich stellt die Umrüstung von orangefarbigen Natriumdampflampen zu weißen LEDs eine weitere Herausforderung dar. Die meisten Lichtmessgeräte messen die Himmelshelligkeit innerhalb eines einzelnen instrumentenspezifischen Spektralbereichs, der manchmal von der photometrischen Empfindlichkeitskurve abweicht. Wenn sich das Spektrum der Beleuchtung von

einem Spektralbereich, wo das benutzte Instrument volle Empfindlichkeit aufweist, zu einem anderen Spektralbereich verschiebt, in dem das Instrument unempfindlich ist, wird das Instrument nicht in der Lage sein, das vorhandene Licht vollständig zu messen. Dies ist zum Beispiel ein Problem beim Sky Quality Meter (SQM) wie (Sánchez de Miguel et al. (2017) berichteten. Trendanalysen mit Instrumenten wie dem SQM mit nur einem Kanal liefern beim Wechsel der Beleuchtung einen erheblichen Fehler. Allerdings sind solche Trendanalysen dann wieder brauchbar, sobald sich später das Farbspektrum der neuen (z.B. LED) Beleuchtung stabilisiert hat.

Trotz der Einschränkungen des Geräts, wurden in einer aktuellen Langzeitmessreihe mit SQMs einige interessante Resultate erzielt, die sowohl unterschiedliche Trends für die frühe und die späte Nachtphase und für klare gegenüber bewölkten Nächten nachweisen konnten. In einer Dissertation wurde die Himmelshelligkeit an zwei suburbanen und ländlichen Standorten bei Bremen für die Zeit von 2012 bis 2016 untersucht (Tong 2017). Die Daten weisen auf eine leichte jährliche Zunahme (0-2 %) der künstlichen Himmelshelligkeit am frühen Abend für den Standort der Universität Bremen hin (53.1038°N, 8.8950°E), zeigen jedoch eine Abnahme der Himmelshelligkeit von 5-10 % nach Mitternacht; in bewölkten Nächten wird es noch dunkler, der Grund hierfür ist nicht bekannt und kann mit dem Einfluss von lokalen gegenüber regionalen Lichtquellen zusammenhängen (Entfernung zu den Lichtquellen). Am ländlichen Standort Seebergen (53.1363°N, 8.9851°E) dagegen verdunkeln sich bewölkte Nächte wesentlich stärker, nämlich 10-30 % jährlich, wobei sich der Verdunkelungseffekt in den späten Nachtstunden auch hier verstärkt. Bei klarem Himmel war der Grad der Abdunkelung relativ gering, nämlich nur 0-8%, wobei auch hier die Abdunkelung in den späten Nachtstunden stärker war. Die unterschiedliche Natur der Ergebnisse in verschiedenen Nachtphasen bestärkt die Annahme, dass es sich bei diesen Ergebnissen um wirkliche Befunde, (z. B. nicht nur um Instrumenteneffekte) handelt. Wesentliche Rückschlüsse können aus diesen Ergebnissen, die nur auf Untersuchungen an zwei Standorten beruhen, nicht gezogen werden, doch zeigen die Ergebnisse 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. Um sicherzustellen, dass festgestellte Veränderungen der Himmelshelligkeit nicht etwa nur auf instrumentelle Einflüsse zurückzuführen sind wie zum Beispiel Alterungseffekte von Fenstern, Objektiven oder Elektronik, sind regelmäßige Kalibrierungen oder übergreifend vergleichende Messkampagnen zu empfehlen (den Outer et al. 2011, LoNNe Intercomparisons 2014, 2015, 2016).

Eine der ältesten Beobachtungsreihen in Deutschland liegt von dem erfahrenen Amateurastronomen Harald Marx in Stuttgart vor: Danach ging die Grenzhelligkeit (siehe Kapitel 3.1.5) der schwächsten gerade sichtbaren Sterne von 1958 bis 1997 von 5.6 auf 5.0 Größenklassen zurück, das heißt die Zahl der sichtbaren Sterne hat sich etwa halbiert (Marx 1972 und private Mitteilung).

Auf regionaler oder globaler Ebene stellen Methoden der Bürgerwissenschaften die beste Möglichkeit dar, um festzustellen, wie die Änderungen der Himmelshelligkeit weltweit fortschreiten. Daten aus der Bürgerforschung sind allerdings eine Herausforderung bei ihrer Auswertung, was auf die sporadische Natur dieser Beobachtungen bezüglich Zeit und Raum zurückzuführen ist. Birriel et al. (2014) untersuchten Globe at Night-Daten von 2006-2012 unter der unbestätigten Annahme, dass die Verteilung der Teilnehmer nach Ort, Zeit, Alter, Übungsstand usw. konstant geblieben sei. Die auf die Sehfähigkeit des bloßen Auges bezogene,

limitierende Größenordnung (ein Parameter, der sich auf die Anzahl sichtbarer Sterne bezieht, vgl. 3.1.5) verringerte sich von 3,74 auf 3,36. Ihre Daten, die am zuverlässigsten bei zunehmend klarem Himmel sind, können die Null-Hypothese nicht widerlegen, nach der sich die Beleuchtung nicht verändert hat. Aber ihre Annahme, dass die Teilnehmerschaft konstant geblieben sei, ist ein wichtiger Grund für die Limitierung der Interpretierbarkeit dieser Befunde. In den Jahren der Laufzeit der Untersuchung wuchs der Datenbestand erheblich. Eine sorgfältige Nachuntersuchung (und Justierung) der Daten, die besonders die wechselnden Orte der Beobachter berücksichtigen müsste, würde eine ausgezeichnete Chance bieten, Veränderungen der Himmelshelligkeit für Nordamerika und Europa genauer zu messen, weil ein Großteil der Daten von daher stammt.

Wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert ist die differentielle Photometrie die Methode der Wahl, um den kurzfristigen Einfluss der Umrüstungen der Beleuchtung auf die Himmelshelligkeit zu bewerten. Abbildung 24 zeigt zwei Aufnahmen aus einer Studie von Kolláth et al. (2016), die in mehreren ungarischen Städten die Auswirkung der Umrüstung von Natriumhochdrucklampen mit beträchtlichem Aufwärts-Lichtanteil auf LED-Lampen, die gar nicht mehr aufwärts strahlen, untersuchten. Die Analyse ergab eine signifikante Reduktion der künstlichen Himmelshelligkeit, besonders im roten Spektralbereich. Die Reduktion des blauen Spektralbereichs war geringer, was auf die stärkere Streuung des blauen Lichts in der Atmosphäre zurückzuführen ist.

Abbildung 24: Fotos des Himmels über Szekszárd/Ungarn vor (oben) und nach (unten) einer Umrüstung von Hochdruck-Natrium-Lampen mit starkem Aufwärts-Strahlungsanteil zu abgeschirmten 4500 K-LED-Lampen. Die Fotos wurden unter identischen Bedingungen aufgenommen (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Zoltán Kolláth).

Differentielle Photometrie kann auch eingesetzt werden, um den Effekt zu untersuchen, den einzelne Lampen oder Lichtinstallationen auf die Himmelshelligkeit haben können. Jechow et al. (2017) überprüften den Effekt der Abschaltung der Gebäudeanstrahlung an Kirchen der Stadt Balaguer/Spanien. Die Studie ergab, dass die Gebäudeanstrahlung einen Anteil von etwa 20% am künstlichen Himmelsleuchten (im Zenit) für die Zeit der Abschaltung am Beobachtungsort hatte. Diese beiden Beispiele zeigen, dass die differentielle Photometrie sicherlich dazu beitragen kann, die Umweltverträglichkeitsprüfung für Lichtinstallationen mit Messwerten zu unterstützen.

Hänel und Quester (Quester 2015; Hänel 2015) konnten mit dem SQM-L über 8 (seit 2006) bzw. 6 Jahre (seit 2008) an ihren Beobachtungsorten (Osnabrück bzw. Esslingen) keine signifikante Änderung der Himmelshelligkeit nachweisen.

3.3.3. Gegenwärtige Veränderungen der Beleuchtungstechnologien und Trends bei der Nutzung und Lichtplanung

Trends in der Lichtnutzung und -planung ergeben sich sowohl durch technische Neuerungen als auch durch politische und gesellschaftliche Veränderungen. Mit der Einführung der LED/OLED brach eine Phase des grundlegenden technologischen Wandels an, der neue vielfältige lichtgestalterische Möglichkeiten und auch ganz neue Herausforderungen bei der Planung hervorbringt (für eine detaillierte Betrachtung inkl. Umgang von Städten mit den Möglichkeiten und Herausforderungen siehe Schulte-Römer 2015). Im Folgenden wird im Detail auf die Veränderung von Lichtspektren und Umfang bei der Beleuchtungstechnologie eingegangen. Im Anschluss folgt eine Betrachtung dieser Aspekte sowie Veränderung der Beleuchtungsintensität, Energieeffizienz und Nutzung der Straßenbeleuchtung (und Ordnungslicht im Allgemeinen) und bei der Gestaltung, Inszenierung und Marketing mit Licht (Werbelicht, Festlicht und Wohnlicht). Abschließend wird der Trend zu einem zurückhaltenden Umgang mit künstlicher Beleuchtung vorgestellt.

Beleuchtungstechnologie

Bedingt durch die Ökodesign-Richtlinie, die die Verwendung ineffizienter Leuchtmittel verbietet, durch die staatliche Förderung der LED und den neuen Gestaltungsmöglichkeiten wird aktuell häufig auf LED-Leuchten umgerüstet.

Die neue Lichttechnik bietet die Möglichkeit, “Licht nach Bedarf” herzustellen. Die Möglichkeit, Lichtmengen zu reduzieren, wird bei einigen LED-Leuchten bereits standardmäßig installiert, ansonsten sind sie für geringe Mehrkosten optional erhältlich. So können mittels Sensoren und Software Helligkeit (und Farbe) der Beleuchtung etwa je nach Wetterlage, Nutzungsstärke aber auch Eigenschaften des Leuchtenstandortes individuell angepasst werden. Möglich ist z.B. 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 Halbierung der Lichtmenge fällt dem menschlichen Auge kaum auf, da es die Lichtmenge logarithmisch empfängt, erst eine Reduzierung auf ein Drittel ist auffällig (Weber-Fechner-Gesetz nach Weber 1834 und Fechner 1860, Erklärungen hierzu in Wittlich 2010). Dies wird beispielsweise in Oberelsbach/Rhön bei der öffentlichen Straßenbeleuchtung praktiziert, wodurch erhebliche Energieeinsparungen von 80% gegenüber der vorherigen Beleuchtung möglich wurden. Zudem verhalten sich die Beleuchtungsintensität und die Himmelshelligkeit linear, d.h. reduziert man die Beleuchtungsstärke um 50%, wird auch die Himmelshelligkeit halbiert (DoE 2017, S.20). Dennoch ist zu beobachten, dass in vielen Anwendungen höhere Beleuchtungsintensitäten eingesetzt werden, teilweise auch bedingt durch die höhere Energieeffizienz der Leuchten.

Betrachtet man die Lichtspektren, so zeigen Quecksilberdampflampen und Leuchtstoffröhren einem Emissionslinienspektrum, dass bei Leuchtstoffröhren durch Phosphorstoffe an der Glaswand mit einem Kontinuum überlagert wird. Dadurch ist eine Änderung der Farbe möglich, es gibt warmweiße und kaltweiße Leuchtstoffröhren, wobei in der Straßenbeleuchtung in

Deutschland traditionell 4000 K-Röhren eingesetzt werden (etwa im Gegensatz zu den Niederlanden oder Dänemark, wo wärmere 3000 K bevorzugt werden). Eine Umrüstung auf LED mit 4000 K Farbtemperatur fällt daher dem unerfahrenen Betrachter kaum auf (Abbildung 25).

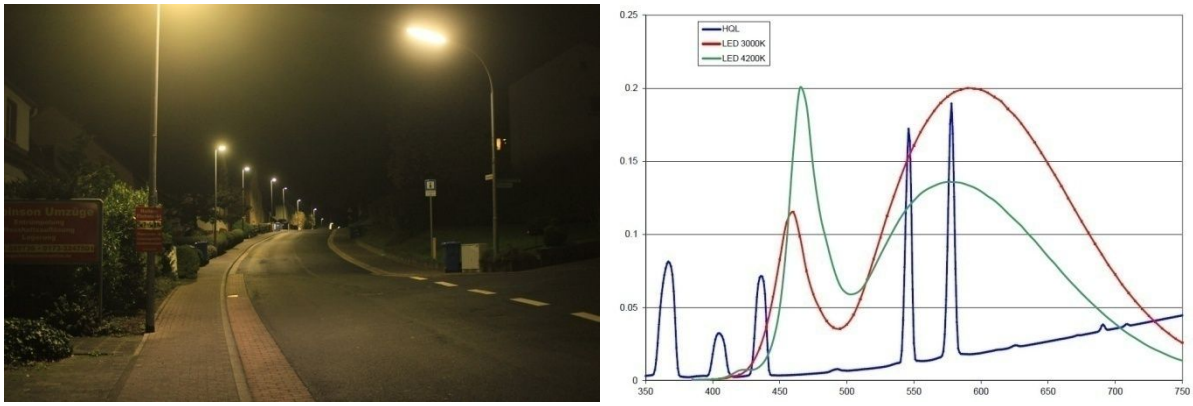

Abbildung 25: (links): Im Vordergrund Leuchtstoffröhren mit einer Farbtemperatur von 4000 K, im Hintergrund LED-Leuchten mit der gleichen Farbtemperatur, deshalb sind Farbunterschiede kaum festzustellen (Foto: A. Hänel). (rechts): Relative spektrale Verläufe von Quecksilberdampflampe und LED mit Farbtemperaturen von 3000 K und 4200 K (Daten von DMSP)

Im Detail ist allerdings die spektrale Energieverteilung unterschiedlich: Eine LED emittiert mehr Licht bei Wellenlängen von 470 nm, während z.B. eine Quecksilberlampe mehr ultraviolette Blauanteile hat (Abbildung 25). Eine Studie in den USA zeigt, dass bei der Umrüstung von Natriumdampf-Hochdrucklampen auf LED, die meist einen höheren Blauanteil haben und mehr in der Atmosphäre gestreut werden, die Himmelshelligkeit um bis zu 50% erhöhen werden (bei einer PC Amber LED mit geringer kurzwelliger Strahlung wird die Himmelshelligkeit dagegen nicht erhöht) (DoE 2017, S.22).

Bei Umrüstungen von Natriumdampflampen auf LED findet eine starke Farbveränderung statt. Die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges für skotopisches Sehen hat ihr Maximum bei etwa 507 nm (z.B.Bullough 2015). Durch die hohen Blauanteile der LED mit einem höheren Blauanteil erscheint das weiße Licht deutlich heller als das gelbe Natriumlicht, weshalb die Lichtmenge reduziert werden könnte (Pacific Northwest National Laboratory 2017). Bei den üblichen Leuchtdichten im Straßenverkehr werden vor allem die blaugrün-empfindlichen (skotopisches Sehen) Stäbchen angesprochen. Eine Beleuchtung mit höheren Blauanteilen (etwa neutralweisses Licht mit einer Farbtemperatur von 4000 K) erscheint daher heller als eine mit weniger Blauanteilen (etwa gelbes Natriumdampflicht), auch wenn die fotometrische Wirkung (etwa der gemessene Lux-Wert) gleich ist. Beschrieben wird das durch das Verhältnis **skotopische/fotopische Helligkeit S/P**. Natriumlicht hat ein S/P von etwa 0.65, eine 4000 K LED von 1.65. Damit erscheint eine 4000 K LED-Lampe skotopisch 1.65/0.64 = 2.5 mal heller als eine Natriumdampflampe. Ein ausführlicher Vergleich von skotopischer und fotopischer Helligkeit verschiedener Lampen ist in Tabelle 2 der Studie von Pacific Northwest National Laboratory (2017, S. 17) dargestellt. Im Umkehrschluss könnte eine mit 4000 K-LED beleuchtete Straße 2.5mal schwächer beleuchtet werden als eine mit Natriumlicht beleuchtete. In den USA ist es teilweise tatsächliche Praxis, dass Natriumdampflampen durch 4000 K-LED mit halbem Lichtstrom ersetzt werden (DoE 2017).

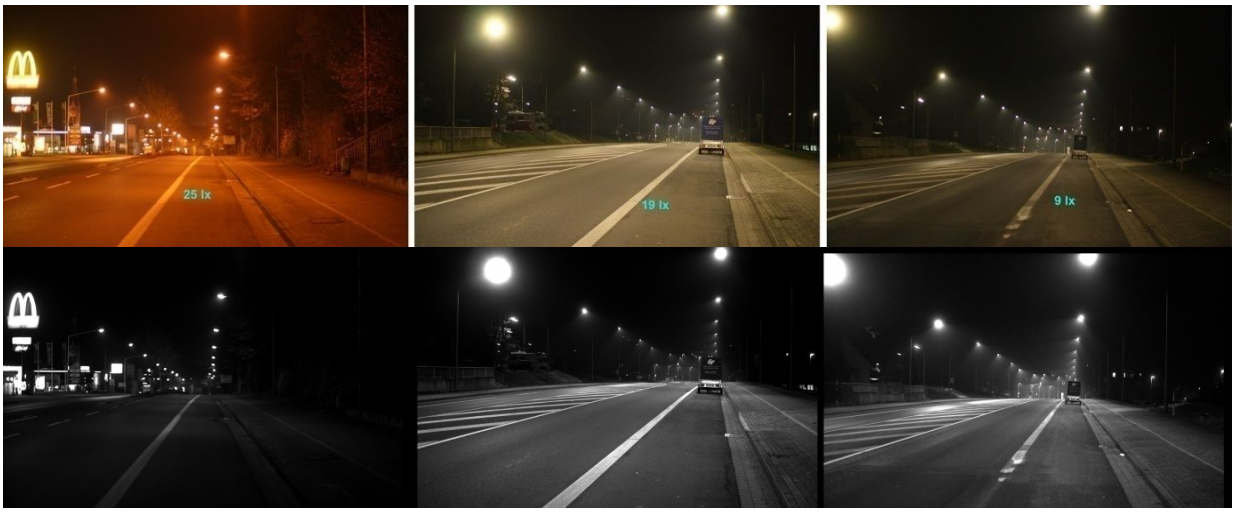

Abbildung 26: Ein Eine Straße mit Natriumdampfbeleuchtung vor (links) und nach der Umrüstung auf 4000K-LED bei normalem Betrieb (mitte) und nach 50% Reduzierung (rechts) um 22:30 Uhr. Besonders der untere Grün-Auszug, der der menschlichen Augenempfindlichkeit entspricht, zeigt, dass die Straße selbst nach der Reduzierung deutlich heller erscheint als mit Natriumdampfbeleuchtung (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).

Konnten ursprünglich nur effiziente LEDs mit hoher Farbtemperatur hergestellt werden, ging der Trend hin zu warmweißen Leuchtmitteln. Die ursprüngliche Differenz der Energieeffizienz wurde immer kleiner und wird inzwischen durch Streuungen der Energieeffizienz der Produkte unterschiedlicher Hersteller übertroffen (DoE 2017). Stellt man Bürger in Innenstädten vor die Wahl der bevorzugten Lichtfarbe, werden immer niedrige Farbtemperaturen um 3000 K bevorzugt (Hofheim: Haders 2016; Chemnitz: Freie Presse 2017).

Trends bei der Straßenbeleuchtung und Ordnungslicht im Allgemeinen

Es finden aktuell umfangreiche Erneuerungen der öffentlichen Straßenbeleuchtung statt, die in einer vermehrten Anwendung von LED Technologie im Außenraum münden. Zentrale Treiber dieser Entwicklung sind der Kostendruck auf Kommunalhaushalten, das Alter der Bestandsleuchten, die Bestimmungen der EU-Ökodesign-Richtlinie (2005/32/EG), durch die bestimmte Leuchtmittel nicht mehr auf dem Markt verfügbar sind (etwa Quecksilber-Hochdrucklampen, bislang ca. 30% der bundesweiten Straßenbeleuchtung (Rechnungshof 2015, S. 10), sowie förderpolitische Maßnahmen. Bis zu 40% des kommunalen Eigenstromverbrauchs kann laut Hochrechnungen um das Jahr 2009 die öffentliche Beleuchtung ausmachen, zudem stammen circa 30% der Beleuchtungstechnik der deutschen Straßenbeleuchtung aus den 60er Jahren und stehen damit häufig am Ende ihres technischen Lebenszyklus (Deutscher Städte- und Gemeindebund (DStGB et al. 2009; Wegner Ullrich Müller-Helle & Partner Rechtsanwälte; PwC 2015). Durch den Kostendruck, der auf den kommunalen Haushalten lastet, in Verbindung mit Förderungen u.a. im Rahmen der Kommunalrichtlinie (KRL) der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI), wird die Umrüstung auf LED im Bereich der öffentlichen Beleuchtung stark gefördert (siehe Kapitel 4.1.5 Förderpolitik). Das politische Interesse an der Verbreitung der LED in der Straßenbeleuchtung zeigt sich auch deutlich in dem 2013 veröffentlichten Bericht der EU-Kommission “Lighting the Cities: Accelerating the Deployment of Innovative Lighting in European Cities”, in dem als Potenziale der neuen Technologie Energie-, CO2- und Kosteneinsparungen, lokale Innovation und Wirtschaftswachstum sowie intelligente Smart-City-kompatible Systeme benannt werden (Europäische Kommission 2013b, S. 5). Eine Stichprobenbefragung von 160

Kommunen im Jahr 2014 ergab, dass bereits 11% der Straßenleuchten auf LED umgerüstet wurden (PwC 2015).

Bislang wurden die lichttechnischen Anforderungen an die Industrienormen zur Straßenbeleuchtung kaum erfüllt, da die Installations-, aber auch die laufenden Kosten zu hoch waren. Durch die höhere Effizienz der LED-Technik sollten sich die laufenden Kosten reduzieren, und es wird mehr Licht eingesetzt. Bei vielen Umrüstungen ist festzustellen, dass die Beleuchtungsstärken auf der Verkehrsfläche merklich zugenommen haben (z.B. Hessen: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie 2013); Regensburg: Swaczyna/Moeck 2012), was oft der Tatsache geschuldet ist, dass man versucht, Normen einzuhalten oder befürchtet, zu schwach zu beleuchten. Dadurch ergeben sich trotz höherer Energieeffizienz Energiekostensteigerungen um durchschnittlich 25% (PwC 2015).

Bei der Umrüstung der Straßenbeleuchtung werden aus Kostengründen oft nur die Leuchtmittel durch Retrofitlampen ausgetauscht, wobei die effizienteste Umrüstung neue Leuchtenköpfe und eventuell neue, optimierte Mastabstände vorsehen würde. Quecksilber-, Natriumdampflampen und Kompaktleuchtstofflampen ("Energiesparlampen") mit E27- oder E40-Gewinde werden durch sogenannte "Maiskolben-" Lampen mit integriertem Vorschaltgerät ersetzt, und in Langfeldleuchten mit Leuchtstoffröhren werden LED-Röhren eingesetzt. Die Effizienz ist oft deutlich geringer und die Abstrahlcharakteristik der Leuchten wird kaum geändert, wodurch die Lichtverschmutzung nicht verringert wird. Bei den Maiskolbenlampen gibt es allerdings technische Lösungen (z.B. Asmetec-Metolight SLG28-Plus[12], Helecta[13]), wo durch geneigt eingebaute LED-Chips oder Optiken eine bessere Lichtlenkung erreicht werden kann, beispielsweise bei Pilz- oder Zylinderleuchten ohne Mattglas. Für klassische Laternengehäuse gibt es Einbauplatinen mit LED (ATON[14], Bergmeister[15]), die im Leuchtendach montiert werden und dann nur nach unten abstrahlen. (Erfahrungen A. Hänel, Sternenpark Rhön)

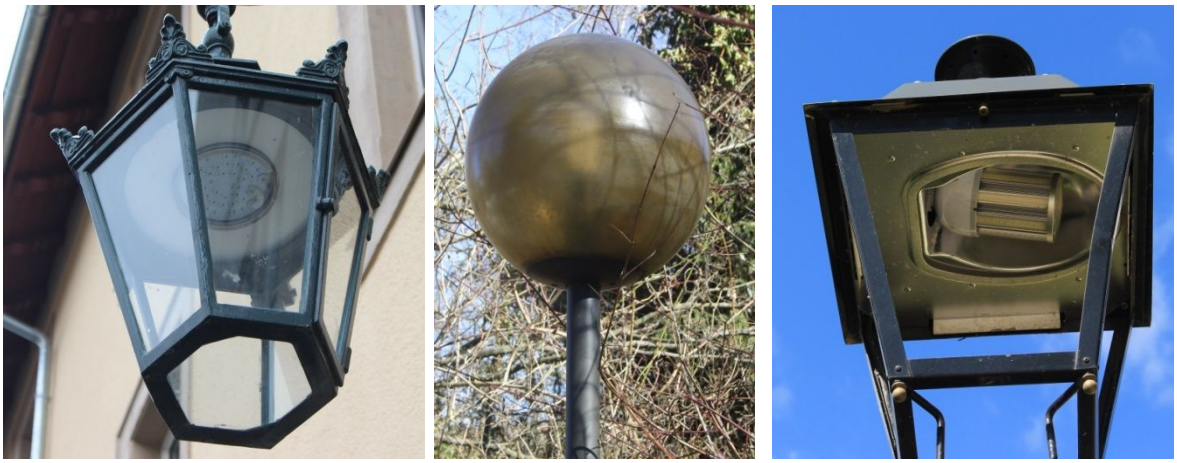

Abbildung 27: voll abgeschirmte Altstadtleuchten durch entsprechendes LED-Modul im Dach, Mitte: ineffiziente Kugelleuchte, Rechts: "Maiskolben"Lampen als Retrofit-Lampen (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).

Auch Autoscheinwerfer werden seit einigen Jahren mit neuen Technologien ausgestattet, etwa 30% der deutschen Kraftfahrzeuge verfügen über neue Xenon-Leuchtmittel (Pauen-

[12] http://www.asmetec.de/ (11.12.2017)
[13] https://www.helecta.com/ (11.12.2017)
[14] http://aton-lichttechnik.com/(11.12.2017)
[15] http://www.bergmeister-leuchten.de/de/home.html(11.12.2017)

Höppner/Höppner 2013, S. 106). Diese stehen in der Kritik, häufig Blendung zu verursachen (Zydek 2014; Mehri et al. 2017).

Zudem ist zu beobachten, dass immer mehr Parkplätze (z.B. Autobahnparkplätze) beleuchtet werden und diese auch außerhalb der Öffnungszeiten weiter betrieben wird. Bei Umrüstungen oder Neuinstallationen wird oft mit höheren Lichtniveaus (Abbildung 28) beleuchtet (Mohar 2013, Experteneinschätzung Hänel).

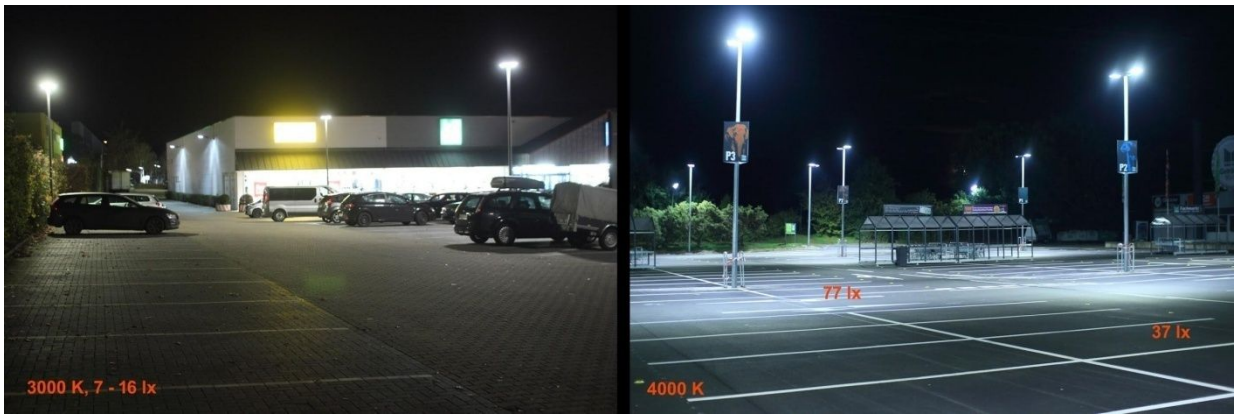

Abbildung 28: Der Parkplatz links wurde auf eine warmweiße (3000 K) LED-Beleuchtung umgerüstet mit Helligkeiten, die etwa der vorherigen Beleuchtung entsprachen. Der Parkplatz rechts wurde mit einer neutralweißen (4000 K) Beleuchtung und wesentlich (etwa 3-4-mal) höheren Beleuchtungswerten umgerüstet, entsprechend mehr Energie wird verbraucht (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).

Digitalisierte, vernetzte und schnurlos steuerbare Lichtanlagen werden als Grundpfeiler der Entwicklung zur "Smart City" gehandelt, da sie vielfältige Integrationsmöglichkeiten für entsprechende Systeme bieten. Angeboten werden solche "intelligenten Beleuchtungssysteme" bspw. von der Firma Tvilight[16], Trilux[17], OSRAM[18], PHILIPS[19]. Eine Vorreiterrolle spielt die Stadt Kopenhagen (Cardwell 2014), aber auch in Deutschland werden entsprechende Systeme testweise angewendet, so z.B. in Leipzig (Crissxcross 2014), Berlin (Lux Review 2016a) oder in Göttingen (Stadt Göttingen 2014).

Aktuell sind adaptive Techniken wie Dimmung, Sensorentechnik und Software noch sehr kostenaufwendig (Weirauch 2011) und wurden bislang erst an wenigen Standorten umgesetzt. Bei geringen Lichtmengen können die Zusatzkosten nicht rentabel sein, oder die Kosten des Energieverbrauchs der elektronischen Bauteile sind relativ hoch, weshalb auf Reduzierungen im Laufe der Nacht verzichtet wird. So werden nach Umstellungen in Nebenstraßen mit geringen Beleuchtungsniveaus kaum noch Reduzierungen vorgenommen.

Integrierte multifunktionale Straßenbeleuchtung mittels einer offenen urbanen Datenplattform werden in der DIN SPEC 91357 und DIN SPEC 91347 behandelt. Es sei auch angemerkt, dass mit der Energiewende und der Einführung sog. Smart Grids die Stromverfügbarkeit sich tageszeitlich verändert, was auch Auswirkungen auf die Beleuchtung haben kann, da nicht mehr die Auslastung des Stromnetzes in der Nacht von Bedeutung ist (Knab et al. 2010).

[16] http://www.tvilight.com/ (11.12.2017)
[17] https://www.trilux.com (11.12.2017)
[18] https://www.osram.de/ls/licht-fuer/smart-city/index.jsp (11.12.2017)
[19] http://www.lighting.philips.de/systeme/vernetzte-beleuchtung/city-touch (11.12.2017)

Ein demgegenüber weit verbreiteter, bereits länger anhaltender Trend sind Maßnahmen zur Reduktion der Betriebsdauer der öffentlichen Straßenbeleuchtung, wie sie von vielen Kommunen in unterschiedlicher Ausprägung praktiziert werden. Zentrale Motivation für das vollständige oder teilweise Abschalten in den späten Stunden der Nacht scheint die Senkung der Betriebskosten zu sein - insbesondere dann, wenn die Anschaffung neuer, energiesparender Systeme für nicht finanzierbar gehalten wird. So ergab eine Befragung im Rahmen einer Querschnittsprüfung des Thüringischen Rechnungshofes, dass 90% der befragten Kommunen Kostenreduktion als Ziel für ihre Straßenbeleuchtung angaben, und ebenso viele fehlende Haushaltsmittel als größtes Hemmnis nannten (Rechnungshof 2015, S. 12). Zu vermuten ist daher, dass derlei Reduktionen im Zuge der sukzessiven Modernisierung hin zu energieeffizienteren Technologien wieder an Bedeutung verlieren - es sei denn, sie werden aus einer neuen Motivation heraus, wie der Reduktion der Lichtverschmutzung, begründet (s. auch 3.3- Stichwort: Rebound-Effekt). Ausdruck dieses Trends sind auch die Pilotprojekte zu bedarfsgerechtem Einschalten per SMS des kommerziellen Anbieters „Dial4Light". Diese begannen ab 2007 und werden aktuell noch in drei Kommunen in Deutschland eingesetzt (Peters 2007), wobei der Service Ende 2017 von der Firma eingestellt wird (persönliche Kommunikation mit „Dial4Light"[20]). Im privaten Werbelicht und Festlicht hat der Kostenaspekt demgegenüber bis heute kaum Bedeutung (Hänsch et al. 2012).

Aus Medienberichten und persönlichen Kommunikationen lässt sich schließen, dass die (teilweise) Abschaltung der Straßenbeleuchtung unterschiedlich konfliktbehaftet sein kann. In manchen Orten kommt es zu gehäuften Beschwerden und Protesten, wie etwa im genannten Beispiel in Zwiesel oder der englischen Stadt Cambridge (Cambridge News 2016), in anderen Orten finden Reduktionsmaßnahmen breite Unterstützung, z.B. in der französischen Gemeinde Givors, in der sich 70% der Bewohner für die Nachtabschaltung aussprachen (FR/VVL 2016), oder Goslar, wo sich drei Viertel der Bewohner, die sich an einer Umfrage zu Energiesparmaßnahmen beteiligten, positiv zur Option Nachtabschaltung äußerten (Matt 2015a, S. 4). Bedeutend für eine breite Akzeptanz solcher Maßnahmen scheint eine offene Informationspolitik der Kommunen gekoppelt, mit einer Beteiligung der Bürger*innen, zu sein. So führten zwei Gemeinden in Liechtenstein zunächst Testphasen durch, zu denen Informationsveranstaltungen und Bewohnerbefragungen stattfanden. Es wurde deutlich, dass Vorstellungen und Wünsche bzgl. Ausmaß und Betriebsdauer der Straßenbeleuchtung teils weit auseinander gehen - in den Befragungen sprach sich jedoch die große Mehrheit für den Beibehalt der Reduktionen aus (69% bzw. 78%) (Matt 2015a, S. 3-4).

Geäußerte Bedenken in Bezug auf Nachtabschaltungen/-absenkungen beziehen sich oft auf das Thema Sicherheit in den drei Dimensionen: Verkehrssicherheit, Kriminalität, subjektives Sicherheitsgefühl. Studien, die sich möglichen Zusammenhängen zwischen Nachtabschaltungen/-absenkungen und verschiedenen Formen von Sicherheit widmen, sind für Deutschland nicht bekannt. Jedoch kommt Matt (2015), basierend auf Daten aus Liechtenstein, wo sämtliche Gemeinden Nachtabschaltungen durchführen, und ergänzt um Erkenntnisse aus anderen Städten, zum Schluss, dass kein klarer Zusammenhang zwischen (teilweisen) Nachtabschaltungen und Verkehrsunfällen oder Einbrüchen zu erkennen ist. Auch Steinbach et al. (2015) konnten in der Auswertung sehr umfangreichen Materials in England keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Reduzierungen oder Abschalten der Beleuchtung und Zahl der Kollisionen oder Kriminaltaten nachweisen.

[20] https://www.dial4light.de (30.10.2017)

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 (Köhler 2009; Meier et al. 2015). Eine stärker auf die Gestaltung des nächtlichen Stadtbilds orientierte Lichtplanung entstand erst Ende der 1990er Jahre (Hänsch et al. 2012). Dies spiegelt sich auch darin, dass erst in den letzten Jahren vermehrt Lichtplanung als Fach an Fachhochschulen und Universitäten angeboten wird (z.B. an der Universität Wismar der Master "Architectural Lighting Design" seit 2012 und an der TU München seit 2013 der Masterstudiengang „Lichtplanung und Lichtgestaltung").

In den großen Ballungszentren werden Arbeitszeiten, Produktionsketten und Wertschöpfungsketten immer flexibler über den Tag und die Nacht verteilt, hier wirkt die sog. postfordistische Globalisierung am stärksten. Dazu gehört das Bestreben, Modernität, Wohlstand und städtischen Lebensstil auszustrahlen, im internationalen Wettbewerb die Aufmerksamkeit auf sich zu lenken und damit die wirtschaftliche Entwicklung voranzutreiben (Hänsch et al. 2012.; Pottharst et al. 2014; Köhler 2015; Evans 2012). In diesem Kontext wird künstliche Beleuchtung zum Mittel der Stadterneuerung und des Standort- bzw. Stadtmarketings (Wiemken/Froessler 2011, S. 11): Mit ihr soll Orten ein „neues Gesicht" bzw. ein unverkennbares Image gegeben werden, die Stadtidentität gefördert und attraktive soziale Räume geschaffen werden - kurz: die (Nacht)Stadt soll attraktiver werden, für Bewohner und/oder Besucher (Wiemken/Froessler 2011; Schulte-Römer 2011; Schulte-Römer 2015, EURAC 2013, S.6; Praxisbeispiele in Ebbensgaard 2015). Initiiert und umgesetzt werden entsprechende Maßnahmen sowohl von öffentlichen als auch von privaten Akteuren und mit Beleuchtung unterschiedlichster Art. Teils handelt es sich um Einzelmaßnahmen, teils werden Konzepte für Stadtteile, z.B. im Bochumer Projekt "Bermudalicht" (Stadt Bochum 2008) oder für gesamte Städte entwickelt (s. hierzu auch 4.1.2.2 Lichtkonzepte). Ziele und inhaltliche Schwerpunktsetzungen können dabei stark variieren. Der Trend, Licht für Stadtgestaltung und -marketing anzuwenden, wird durch die vielseitige und energieeffiziente LED maßgeblich vorangetrieben. Besonders markante Beispiele für diesen Trend sind die Großprojekte zur Beleuchtung von Brücken in London (Illuminated River Project)[21] und New York (Lux Review 2016b). Auch im kleineren Maßstab eine zentrale Rolle spielt die Beleuchtung von Sehenswürdigkeiten und historischen Gebäuden, damit diese auch bei Nacht das Ortsbild prägen. Fehlt eine solche, kann ein bei Tageslicht historisch geprägter Raum nachts eine industriell geprägte Atmosphäre ausstrahlen, wenn Werbelicht und Ordnungslicht vorherrschen und historische Sehenswürdigkeiten durch fehlende Beleuchtung in den Hintergrund treten, wie eine Studie in Potsdam ergab (Haase 2015). Ebenso wird vermehrt Lichtkunst eingesetzt, um Attraktionspunkte zu setzen und Räume aufzuwerten - etwa in Unterführungen (z.B. in Karlsruhe - (Grewe 2009)) oder unter Bahnbrücken (z.B. in Berlins City-West (Eltzel 2012)). Bedeutend ist, dass Licht mit den neuen technischen Möglichkeiten quasi nach Belieben individuell eingestellt werden kann (Horx 2016): Bewegte und statische Lichtquellen, Veränderungen und Flexibilität in Farbspektrum und Lichtstärke, Dimm-Möglichkeiten und sensorische Steuerbarkeit , Licht wird digitaler und kann wahrscheinlich bald durch die neue OLED Technologie als Folien auf ganzen Flächen angebracht werden.

[21] http://illuminatedriver.london/ (30.10.2017)

Ein weiterer 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 i.d.R. ein zentrales Ziel. Ein Bericht zur wirtschaftlichen Nutzung von Lichtfestivals ergab, dass die Einnahmen pro Besucher 35 mal höher als die Kosten pro Besucher sind (LUCI 2012).

Abbildung 29: Einsatz von Skybeamern bei der Luminale während der Light+Building in Frankfurt (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel und C. Kyba)

Neben dieser stadtökonomischen Komponente bieten Lichtfestivals auch Möglichkeiten zu Experimenten mit weniger hergebrachten Beleuchtungsformen und können damit zur Kreativität von Lichtdesignern und -künstlern beitragen sowie zur Entwicklung neuer Gestaltungsansätze (Schulte-Römer 2012). Im Rahmen von Lichtevents wird besonders deutlich, dass man mit Licht die Wahrnehmung eines Stadtraumes sowie emotionale und affektive Atmosphären verändern kann (Edensor 2015).

Im Wesentlichen ermöglicht durch die neue Lichttechnologie, fanden in den vergangenen ca. 10-15 Jahren in vielen Städten “urban screens” bzw. “media screens” 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”) (Kronhagel 2010; Heiden 2009; André Boße 2016). Die Installationen sind i.d.R. großflächig und dynamisch, und nicht selten auch interaktiv und können ebenso Lichtkunst sein wie auch Werbung (Neumann 2007; McQuire et al. 2009; Struppek 2011). Diese Installationen haben hohe Lichtintensitäten, um am Tag sichtbar zu sein, eine Reduktion dieser findet in der Nacht oft nicht statt (CIE 2017, S. 10). Beispiele für Lichtinstallationen sind das Klubhaus des FC St. Pauli in Hamburg, das als erstes Gebäude in Deutschland mit einer digitalen Medienfassade ausgestattet wurde (Detail 2017), die Lichtinstallation “Walk” in Zürich (Zielinska-Dabkowska/ Hartmann 2016) oder die Mercedes-Benz-Arena (ehemals: 02-Arena) in Berlin (Krause 2015, S. 135).

Das Spektrum der Verwendung von Licht für Werbezwecke hat sich in den vergangenen Jahren deutlich aufgefächert. Seit Mitte der 1990er Jahre kommt es in Städten zu einer Verbreitung großflächiger Werbung in Form von Megapostern, die insbesondere an Baugerüsten, aber auch an Gebäudefassaden angebracht wird (Lehmann 2008, S. 11,29). Allein in Berlin betrug der Zuwachs beleuchteter Außenwerbungen von 2007-2012 307% (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2014, S. 22). Diese sind nachts mittels Anstrahlung oft hell beleuchtet. Deutlich kleiner, aber seit ihren Anfängen Mitte der 1980er Jahre mittlerweile weit verbreitet sind sog. "City Light Poster", die häufig Bestandteil von Bus- und Straßenbahnhaltestellen sind, aber auch freistehend vorkommen (Lehmann 2008, S. 28). Zu nennen sind darüber hinaus LED-Werbeschilder und -Schriftzüge in Schaufenstern oder an Geschäften, die häufig blinkend bzw. dynamisch sind. Auch bei der Beleuchtung von Werbeschildern werden bei der Verwendung von LED wesentlich hellere Leuchtdichten eingesetzt (Abbildung 30).

Abbildung 30: Leuchtpylon mit gemessenen Leuchtdichten (in cd/m^2). Durch LED werden hohe Leuchtdichten erreicht, eine Begrenzung auf 100 cd/m^2 erscheint sinnvoll. (Bildquelle und Messungen: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).

Auch außerhalb von Städten kommt künstliche Beleuchtung vermehrt zum Einsatz, insbesondere zur Ermöglichung klassischer Tagsportarten bei Nacht: Zu nennen sind insbesondere intensiv beleuchtete Skipisten (Hänel 2017a; mdr 2017), aber auch Möglichkeiten wie Nachtgolf (Engler 2015). Öfters gibt es auch Diskussionen, Joggingstrecken in Parkanlagen oder naturnahen Gebieten zu beleuchten (z. B.: Reimann 2008), Diskussionen in Stadt und Landkreisgemeinden Osnabrück).

Zurückhaltender Umgang mit künstlicher Beleuchtung

Lichtanlagen können miteinander in Konkurrenz treten. Ist eine Umgebung stark ausgeleuchtet, sind immer höhere Lichtintensitäten bzw. ausgefallenere Effekte notwendig, um die gewünschte Aufmerksamkeit zu erreichen. Ansätze, die dieser sich selbst verstärkenden Entwicklung Einhalt gebieten wollen, legen den Fokus auf minimal notwendiges, aber ästhetisches Licht. Insbesondere entwickelte die Künstlerin Siegrun Appelt das bereits mehrfach umgesetzte Konzept „Langsames Licht“[22], welches den Fokus auf einen zurückhaltenden, auf die jeweilige Situation abgestimmten Umfang mit Beleuchtung legt (Appelt 2017). Ähnliche Positionen werden etwa vom Leuchtenhersteller Zumtobel Licht GmbH vertreten (Zumtobel Licht GmbH 2014) oder durch das Architekturbüro Allmann Sattler Wappner in München (Herwig 2010).

Viele Kommunen und Städte haben seit der Jahrtausendwende begonnen, die Koordination der Außenbeleuchtung dezidiert zu thematisieren (Fisher/Junagade 2016)- Ausdruck dessen ist etwa die 2002 gegründete Lighting Urban Community International (LUCI Association)[23], ein internationales Städtenetzwerk zum Thema Beleuchtung. Zentrales Instrument sind Lichtkonzepte bzw. Lichtmasterpläne (Schmidt 2007; Köhler 2015; Küster 2017) (siehe. auch Kapitel 4.1.2.2). Vorreiterrollen spielen hier die Städte Lyon in 1989 und Zürich 2004 mit dem Plan Lumière (Stadt Zürich 2017). Es wird gegenwärtig vermehrt erkannt, dass der meist gestalterische Fokus auf das nächtliche Stadtbild in diesen Lichtkonzepten zu einseitig ist und Themen wie Lichtverschmutzung und die Regulierung der privaten Beleuchtung stärkere Berücksichtigung finden sollten (z.B. Altstadt im grellen Licht, Nürnberger Nachrichten 29. August 2017). So hat auch die LUCI Association eine “Charta zur Förderung einer Kultur der Nachhaltigkeit in der Stadtbeleuchtung” entwickelt (LUCI Association 2011). Bei diesem Trend steht nicht der totale Verzicht auf künstliche Beleuchtung in Außenbereichen im Vordergrund, sondern der Einsatz einer bedarfsgerechten Beleuchtung, im Sinne der Empfehlung „das richtige Licht - in der richtigen Menge, am richtigen Ort und zur richtigen Zeit“ der International Dark-Sky Association (IDA). Mittlerweile wird diese Neuorientierung auch von großen Leuchtenherstellern wie Philips[24] und von Lichtplanern wie dpa lighting consultants[25] vertreten.

Ein weiteres Konzept, das auch in Deutschland immer mehr Bedeutung gewinnt, ist die Ausweisung von sog. „Sternenparks“ (der IDA, der RASC und der Starlight Foundation), in denen Tourismus und Naturschutz zentrale Motivation für die Ausweisung darstellen (Meier 2015). Aktuell bestehen für das Gebiet Großmugl in Österreich und das Aoraki Mackenzie International Dark Sky Reserve in Neuseeland zudem Bestrebungen, um die Anerkennung als UNESCO Welterbestätten und Lichtschutzgebiete[26] zu erreichen (Kramer 2014). Durch die Ausweisung als Lichtschutzgebiet kann nicht nur die Beleuchtung in dem Gebiet selbst nachhaltiger gestaltet werden, sondern auch benachbarte Gemeinden und Städte bei ihrer Beleuchtungsplanung beeinflusst werden. Aktuell ist dies bei der Stadt Fulda zu beobachten, die in der Nähe des Sternenparks Rhön liegt und nun sich selbst zum Ziel gesetzt hat, „Sternenstadt“ (International Dark Sky Community) zu werden (NB 2017). Es wurde ein Plan entwickelt, die Lichtemissionen im Innenstadtbereich zu beschränken, für zusätzliche Anstrahlungen soll die gleiche Lichtmenge

[22] http://www.langsameslicht.com/html/dt/allgemein.html (30.10.2017)
[23] http://www.luciassociation.org (30.10.2017)
[24] http://www.lighting.philips.com/main/systems/system-areas/gas-stations-petrol/parking-road-car-wash-lighting (30.10.2017)
[25] http://www.dpalighting.com/ (30.10.2017)
[26] www2.astronomicalheritage.net (30.10.2017)

beispielsweise bei übermässiger Schaufensterbeleuchtung eingespart werden. Die öffentliche Beleuchtung soll zukünftig auf voll abgeschirmten Leuchten mit warmweißen oder PC amber LED umgerüstet werden (NB 2017).

Daneben gibt es vermehrt sog. "Bottom-up" Bewegungen, die sich neben Lichtdesign auch mit Lichtverschmutzung und Dunkelheit beschäftigen (z.B. light collective[27] oder das Münchener Guerilla Lighting Kollektiv[28], das die Aufmerksamkeit auf die Wirkung von künstlichem Licht an sich und den schlechter Einsatz von Beleuchtung mit aufmerksamkeitserregenden Aktionen setzen möchte. Das Thema Lichtverschmutzung wird auch in der Lichtplanung besonders bei der Außenbeleuchtung zunehmend ernst genommen (Clanton 2014). Neu ist hierbei auch, das vermehrt Ansätze der Partizipation in der Lichtplanung stattfindet, zum Beispiel durch Anwohnerbeteiligung in Berlin (Senatsverwaltung für Umwelt 2016) oder Chemnitz (Stadt Chemnitz 2016)) oder durch Einrichten von Teststrecken wie in Fulda oder Berlin.

Zuletzt ist anzumerken, dass in Bezug auf die Umsetzung von nachhaltiger, intelligenter Beleuchtung und einer damit verbundenen Minimierung der Lichtverschmutzung ein Defizit beim Wissenstransfer und Ressourcenmangel beobachtet werden kann, siehe hierzu auch die 10 Diskussionspunkte von Ritter (2017). Fehlende finanzielle wie auch personelle Ressourcen in den Kommunen, verstärkt durch einen oftmals fehlenden Überblick über Umfang und Zustand der existierenden Außenbeleuchtung führen zu ihrer unsachgemäßen Anwendung.

3.4. Nicht intendierte visuelle Auswirkungen von Außenbeleuchtung auf den Menschen & Auswirkungen auf das Sicherheitsempfinden

Neben den intendierten Wirkungen der Beleuchtung wie erhöhte Sichtbarkeit von Objekten, kann es durch künstliches Licht zu negativen visuellen Auswirkungen auf den Menschen kommen, auf die in diesem Kapitel näher eingegangen wird. Nicht betrachtet werden hingegen gesundheitliche Auswirkungen und Beeinträchtigungen durch künstliche Beleuchtung in Innenräumen, da diese ausführlich im Bearbeitungsschwerpunkt 3 zur humanmedizinischen Wirkung von Lichtverschmutzung abgedeckt werden. Darauf aufbauend wird auch auf den Zusammenhang von Licht und Sicherheit in diesem Kapitel eingegangen.

Nicht intendierte visuelle Auswirkungen

Zu den direkten negativen Auswirkungen von Außenbeleuchtung gehört die **Blendung**, die nach DIN EN 12665:2016-09 "Licht und Beleuchtung - Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung" als „Sehzustand, der als unangenehm empfunden wird oder eine Herabsetzung der Sehfunktion zur Folge hat, verursacht durch eine ungünstige Leuchtdichteverteilung oder durch zu hohe Kontraste" definiert wird. Dabei unterscheidet man zwischen **physiologischer** und **psychologischer** Blendung. Physiologische Blendung beschreibt ein direktes messbares Herabsetzen des Erkennungsschwellenwerts, wodurch Hindernisse schlechter oder nicht mehr wahrgenommen werden können. Psychologische Blendung bezeichnet die subjektive Wahrnehmung von Beleuchtung als störend „durch die ständige und ungewollte Ablenkung der Blickrichtung zur Lichtquelle hin, die bei

[27] https://lightcollective.net (30.10.2017)
[28] https://www.guerrilla-lighting.de/ (30.10.2017)

einem großen Unterschied der Leuchtdichte der Lichtquelle zur Umgebungsleuchtdichte die ständige Adaptation des Auges auslöst“ (LAI 2012, p. 3). Blendung kann direkt durch den Lichtkörper oder indirekt durch Reflexion z.B. einer nassen Fahrbahn erfolgen (Wittlich 2010). Das Problem hat sich in den letzten Jahren durch neue Lichtquellen mit extrem hohen Leuchtdichten, bedingt durch die kleine Lichtaustrittsfläche (bis zu über 10.000.000 cd/m2), vor allem Entladungslampen mit Keramikbrennern und Hochleistungs-LEDs und Xenon-Leuchtmittel, verschärft (OÖ Energiesparverband 2015). In einer Online-Befragung im Auftrag der Firma ZEISS gaben über 50% der Befragten an, dass sie sich besonders stark durch moderne LED- und Xenon-Scheinwerfer geblendet fühlen (ZEISS 2015). Weiterführende ausführliche Informationen zur Blendung sind unter Strahlenschutzkommission (2006) und Wittlich (2010) zu finden.

Daneben wird in der DIN 12665:2016 auch **Flimmern**, der „Eindruck der Unstetigkeit visueller Empfindungen, hervorgerufen durch Lichtreize mit zeitlicher Schwankung der Leuchtdichten oder der spektralen Verteilung“ genannt. Bewegte oder blinkende Lichtquellen, Farbveränderungen von Leuchtmitteln sowie Videoinstallationen werden durch die neuen LED/OLED Technologien immer verbreiteter, ihre nichtintendierten visuellen Auswirkungen auf den Menschen sind dabei generell noch relativ wenig erforscht. Nach Schierz 2009 in BAFU (2017) wird blaues Licht sowie blinkendes Licht mit geringer und mit hoher Blinkfrequenz als besonders störend wahrgenommen. Vergleiche können hier auch mit der rot blinkenden Nachtbeleuchtung von Windparkanlagen gezogen werden, bei der die Störung auf Menschen an bewölkten Nächten am größten war (Fachagentur Windenergie an Land 2016; Hübner/Pohl 2010, S. 16,20).

Eine weitere nichtintendierte visuelle Auswirkung von Außenbeleuchtung ist die **Raumaufhellung**, die den Menschen bei der Nutzung seines Wohnraumes einschränken kann (LAI 2012).

Die Erheblichkeit der visuellen Auswirkung von Außenbeleuchtung ist dabei sowohl von dem Zeitpunkt, der Zeitdauer, der Nutzung des Gebietes als auch der individuellen Empfindlichkeit und den Adaptionseigenschaften des menschlichen Auges abhängig. So sind zum Beispiel viele ältere Menschen durch eine häufig altersbedingte Trübung der Augenteile schneller von künstlichem Licht geblendet (Strahlenschutzkommission 2006). Ein weiterer wichtiger Faktor ist das Bestehen eines Bewusstseins über das Thema Lichtverschmutzung (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 stark in die Wahrnehmung mit eingeht (Radicchi et al. 2016; Schulte-Römer 2010, S. 20). Erlaubt man sich bestehende Befragungen in Deutschland und der Schweiz zur negativen Wahrnehmung von künstlicher Außenbeleuchtung in der Nacht zusammenzufassen, so fühlen sich 8% (periurbaner Raum) bis zu 45% (Großstadt) von der allgemeinen Stadtbeleuchtung gestört (Honold 2009, S. 2; Rehmann 2013, S. 37; Schaub 2015, S. 45; Besecke/Hänsch 2015, S. 233). Drei Viertel der Antwortenden in der Befragung von Besecke & Hänsch (2015 S.231) (innerstädtischer und periurbaner Raum zusammengenommen) gaben an, dass ihre Wohnräume mindestens zeitweilig von künstlicher Beleuchtung aus dem Außenraum erhellt werden. Genannte Hauptquellen waren die Straßenbeleuchtung in 54% der Fälle, Licht vom eigenen Gebäude/Grundstück 38% (v.a. im periurbanen Raum), von umliegenden Gebäuden/Grundstücken ca. 46% (v.a. im urbanen Raum), von Verkehrslicht ca. 41% und in der Stadt Werbebeleuchtung 40%. In der Studie von Honold (2009, S.2) geben als negative Effekte 65% Schlafstörungen an. Bei der ästhetischen Wahrnehmung und Atmosphäre, die Außenbeleuchtung an einem Ort beeinflusst, gibt es

Hinweise, dass blauweißes Licht besonders in historischen Innenstadtbereichen von der Bevölkerung negativ bewertet wird (Squires 2017; Fachgruppe Dark Sky 2017). Das individuell tolerierte Beleuchtungsniveau wird von der Umgebungsbeleuchtung beeinflusst, das durch die Art und Dichte der Bebauung in der Umgebung und ihrer Beleuchtung bestimmt wird. Zudem wird Licht während der frühen Abendstunden anders wahrgenommen, im Vergleich zu den Zeiten, in denen die Bewohner*innen schlafen möchten (CIE 2017, S. 4).

Sicherheitsempfinden und Verkehrssicherheit

Außenbeleuchtung kann uns das Sehen in der Nacht ermöglichen, bei falschen Beleuchtungsverhältnissen aber auch unsere Sicht einschränken und ablenken (Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr 2003). Ob in diesem Zuge Außenbeleuchtung nicht nur das individuelle Sicherheitsgefühl stärkt (Knight 2010; Lobão et al. 2015; Mattoni et al. 2017), sondern auch zu einer Verringerung der Kriminalität führt (z.B. Jackett/Frith 2013; Lorenc et al. 2013; Schmidt 2007), ist sehr umstritten und statistisch meist nicht nachweisbar (Welsh/Farrington 2008; Beyer/Ker 2009; Marchant 2010; Steinbach et al. 2015; Marchant 2017). Darüber hinaus ist der gefühlte Sicherheitsgewinn durch Beleuchtung relativ gering im Vergleich zu anderen Faktoren (Willis et al. 2005). Auch bei der Verkehrssicherheit sollte differenziert betrachtet werden, ob Licht allein diese per se verbessert. Bislang nicht berücksichtigt wurde zum Beispiel die Gefährdung der Verkehrsteilnehmer durch Kollisionen mit Masten, die laut Verkehrsstatistik des Statistischen Bundesamtes[29] einen erheblich höheren Anteil an Unfällen haben als beispielsweise eine mangelhafte Auto- oder Straßenbeleuchtung (Hänel 2017b). Zu den Masten gehören natürlich auch Verkehrszeichen, Ampeln oder Oberleitungsmasten, als grobe Schätzung kann man 50% als Beleuchtungsmasten ansehen. Mehr Masten stellen also ein höheres Unfallrisiko dar.

Besonders durch ungleichmäßige Beleuchtung und Blendung kann sich die öffentliche Beleuchtung negativ auf die Sicherheit im Straßenverkehr auswirken, des Weiteren kann häufig die Beleuchtungsstärke um die Hälfte reduziert werden, wie Untersuchungen in Wien zeigten, ohne die Verkehrssicherheit negativ zu beeinflussen (Posch 2013; Matt 2015a; Steinbach et al. 2015; Pauen-Höppner/Höppner 2013) kommen auf Grundlage ihrer Analysen für das Land Berlin zum Ergebnis, dass die Unfallfolgen bei Dunkelheit nicht erhöht sind und wiederum die "*einfache Formel ‚mehr Licht, mehr Sicherheit' … nicht überzeugend*" ist. Gleichzeitig weisen sie auf die besondere Gefährdung von Fußgängern an Lichtsignalanlagen hin - als Gründe werden vermutet: ungeeignete Beleuchtung der Furten sowie Blendung von Autofahrern durch starke Scheinwerfer.

In Bezug auf das Themenfeld Sicherheit und Beleuchtung kommen sowohl Mosser (2007, S.89) als auch Krause (Krause 2013, S. 11 f) mit Blick auf den (angelsächsisch dominierten) Stand der Forschung zum Ergebnis: Die Frage, ob mehr Licht tatsächlich mehr Sicherheit im öffentlichen Raum bringt, ist höchst umstritten (Studien kommen zu eindeutigen, teils auch widersprüchlichen Ergebnissen, zudem steht z.T. Kritik aufgrund von methodischen Unzulänglichkeiten im Raum), und erlauben keine Schlussfolgerungen für die Beleuchtungspraxis (Mosser 2007, S. 89). Demgegenüber weisen Befragungen häufig auf die bedeutende Rolle von Beleuchtung für das subjektive Sicherheitsgefühl hin (Stichwort: Angsträume) (Krause 2013, S. 13 f; Boomsma/Steg 2014), welches sich jedoch nicht durch statistische Daten zu Kriminalität im öffentlichen Raum erklären lässt (Pauen-Höppner/Höppner 2013, S. 105,107): "*Dunkle Orte weisen nicht mehr*

[29] https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/VerkehrsunfaelleJ.html (30.10.2017)

Zwischenfälle auf als hell beleuchtete, obwohl das Gefühl etwas anderes sagt." So ist zusammenfassend zu konstatieren, dass Zusammenhänge zwischen öffentlicher Beleuchtung, Nachtabschaltungen und unterschiedlichen Formen der Sicherheit noch weitestgehenden Klärungsbedarf aufweisen.

3.5. Beeinträchtigtes Erleben natürlich dunkler Nächte durch Lichtverschmutzung

Künstliche Außenbeleuchtung formt die Nachtlandschaft, sie kann Raumstrukturen hervorheben oder in ihrem Schatten verschwinden lassen und beeinflusst damit maßgebliche die visuelle Wahrnehmung eines Ortes (Haber 2013). Kein Europäer lebt unter einem natürlich dunklen Nachthimmel (nur 1,3% der europäischen Landfläche sind durch künstliches Licht nicht beeinflusst). Ab einer nächtlichen Himmelshelligkeit, die 50% des natürlichen Lichtniveaus überschreitet (87 bis 688 µcd/m2), geht das natürliche Aussehen des Nachthimmels verloren und das Erkennen der Milchstrasse ist nicht mehr möglich (41,6% der deutschen und 59,5% der europäischen Bevölkerung leben unter diesem Niveau der Himmelshelligkeit). Weiterhin ist bei Lichtintensitäten größer 3000 µcd/m2 die Dunkeladaption des menschlichen Auges nicht mehr möglich, was bedeutet, dass das Erleben der Dunkelheit der Nacht bereits rein physisch stark eingeschränkt ist (3% der Bevölkerung in Deutschland und über 20% in Europa leben unter diesen nächtlichen Himmelshelligkeitswerten) (Falchi et al. 2016). Somit müssen durch die flächendeckende Lichtverschmutzung immer größere Distanzen überwunden werden, um eine natürliche Nacht erleben zu können.

Kulturell betrachtet wird deutlich, dass der Nacht ein hoher Eigenwert zukommt - auch wenn in unserer christlich geprägten Welt bis heute negative Assoziationen mit Dunkelheit - und damit einer zentralen Eigenschaft der Nacht - weit überwiegen (Koslofsky 2011 in Edensor 2013; Gwiazdzinski 2015). Die Nacht bewahrt die Identität von Kriminellen genauso wie von liebenden Paaren, kann Kreativität befördern und Intimität, Anonymität, Transformationen und Transgressionen ermöglichen in seiner räumlichen Alternative und als Gegenstück zum Tag (Stone et al. 2009; Bach/Degenring 2015). Der Autor Ernst Peter Fischer geht in seiner Bedeutung noch einen Schritt weiter indem er die Nacht als Zeit

> *„ohne all die Ablenkungen des Tags* [sieht]. *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."*. Und weiter merkt er an:*" …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."* (von Bergen 2015)

Einen konkreten Hinweis darauf gibt es auch in einer durchgeführten Befragung von Besecke/Hänsch 2015 (S. 238ff), in der 60-70% der Antwortenden jeweils angaben, dass Dunkelheit für sie eine Phase der Ruhe bedeutet bzw. dass die Nacht vor zu viel künstlicher Beleuchtung geschützt werden soll.

Zusammenfassend in Stone (2009) werden als positive Werte des Erlebens der Dunkelheit Freude, das Naturerleben, die Sicht auf den Sternenhimmel, Kultur, Spiritualität und Tradition,

Schönheit des Nachthimmels und Ästhetik aufgeführt. Beispielhaft kann dies an der Betrachtung des Sternenhimmels erläutert werden, siehe auch in der "Declaration in defence of the night sky and the right to starlight" (Marín/Jafari 2007, S. 455). In der Dunkelheit tritt anders als am Tage der Himmel in den Vordergrund (Edensor 2013). Wird dieser durch künstliche Beleuchtung erhellt, ist das Betrachten der Sternkörper nicht mehr möglich, und damit unser Gefühlsbezug zum Universum, das Erleben dessen immensen räumlichen Ausmaßes und des kleinen Raums, den wir dabei selbst einnehmen (Smith 2009; Blair 2015).

Die Ästhetik der Nacht verändert sich grundlegend und Kulturtechniken wie die Orientierung in der Nacht anhand von Sternbildern (Huth 2013), ebenso wie kulturelles Erbe, welches fast überall auf der Welt mit dem Sternenhimmel und seinen Konstellationen verbunden ist (Sagen und Mythologie, kalendarisches Wissen usw.) (Ruggles et al. 2010, S. 266) verlieren ihren realen Bezugspunkt. Die Natur bei Nacht unter natürlichen Bedingungen oder historische Stätten aus der Zeit vor der Verbreitung künstlicher Beleuchtung unter damaligen Bedingungen zu erleben (Kulturerbe), ist ein Verlust durch Lichtverschmutzung (Meier 2015, S. 186f) - zu letzterem zählen auch Beispiele, bei denen der Sternenhimmel integraler Bestandteil oder gar Ausgangspunkt des historischen Bauwerks oder der Landschaftsgestaltung waren und die kaum ohne diesen zu verstehen sind (Marín et al. 2009). Auch die wechselnden Helligkeitsverhältnisse von dem Lauf des Mondes in der Nacht und den Mondphasen können nicht mehr oder nur noch eingeschränkt wahrgenommen werden.

In der Dunkelheit treten andere menschliche Sinneswahrnehmungen jenseits des Sehens in den Vordergrund, die uns den Raum anders wahrnehmen lassen (Edensor 2013). Dies kann die Kreativität und Selbstwahrnehmung positiv beeinflussen (Steidle et al. 2013; Steidle/Werth 2013b). Aber auch die vollständige Dunkeladaption des menschlichen Auges, die bis zu 30 Minuten dauert, ist eine Wahrnehmung, die durch zunehmende künstliche Beleuchtung immer seltener erlebt werden kann (Hecht/Mandelbaum 1940). Je weniger Dunkelheit erlebt wird, desto mehr können die negative Assoziationen mit ihr in den Vordergrund treten (Edensor 2013). Interessant ist hierbei auch, dass vor der Industrialisierung der Schlaf meist durch zwei Phasen geprägt war, dem ersten tiefen Schlaf und dem darauffolgenden Schlummern, unterbrochen von verschiedenen nächtlichen Aktivitäten wie Arbeiten, sexuellen Aktivitäten, Konversationen und Träumen (Ekirch 2005). Untersuchungen, die eine Bewertung und Funktion von Dunkelheit und das Erleben natürlicher Nächte kleinräumig sozialwissenschaftlich gerade in Bezug auf das Minimieren von negativen Assoziation mit diesen untersucht, fehlen zum aktuellen Zeitpunkt (siehe auch Krause 2013). Dies zeigt, dass sich unser komplettes Verhältnis zur Nacht seit dem Beginn der künstlichen Beleuchtung und der mit ihr eintretenden Industrialisierung verändert hat, eine natürliche Dunkelheit wird von der Stadtbevölkerung kaum mehr erlebt. Das Erleben von Dunkelheit hat sich über ganze Generationen verändert, was den Referenzzustand einer „normalen Nacht" verschiebt (engl. shifting baseline) und eine Amnesie der Existenz der Sterne und Dunkelheit hervorgebracht hat. Wenn man in seinem Leben noch nie die Milchstraße oder einen von Sternen bedeckten Himmel im Allgemeinen gesehen hat, wird man sich auch nicht für den Schutz eines natürlichen Nachthimmels aussprechen (Luginbuhl 2008, S. 202). Das Problem ist, dass die Menschen gar kein Problem wahrnehmen können, weil sie die Alternative nicht kennen (Bogard 2013, S. 252).

Durch die raumgreifende Erhellung der Nacht ist natürliche Dunkelheit in Europa knapp geworden - und das Erleben der Dunkelheit der Nacht damit gewissermaßen zum Luxusgut avanciert (Entwistle et al. 2015; Hasenöhrl 2015). So ist auch zu beobachten, dass natürliche

Dunkelheit an Bedeutung für den Tourismus gewinnt (nicht nur, aber insbesondere: Astrotourismus) und damit zu einer Entwicklungschance für strukturschwache Regionen werden kann (Mazenauer 2015; Projektgruppe Dunkelheit als Chance 2014; Weaver 2011); (s. auch 4.1.2.3 über Auszeichnung als Sternenpark). Auch in der Lichtplanung wird das Thema zum Beispiel explizit im Lichtmasterplan für die Stadt Rennes in Frankreich beachtet (Narboni 2013). Ebenso ist zu beobachten, dass Dunkelheit auch in der Wirtschaft als Wert erkannt und für Team- und Strategieentwicklung bei Unternehmensseminaren eingesetzt wird (Walther 2014) oder auch in der Immobilienwirtschaft (Chen 2014) und für das Ranking gesunder Städte herangezogen wird (Handelsblatt 2016).

3.6. Beeinträchtigungen der erdgebundenen Weltraumforschung durch Lichtverschmutzung

Die zunehmende Aufhellung des Nachthimmels wirkt sich schon seit langem negativ auf die professionelle Astronomie aus. Wichtige Forschungssternwarten wurden aus den Städten erst in die Randbereiche und dann immer weiter nach draußen in weniger dicht besiedelten Gebieten verlagert (Hamburg, Berlin, Bonn, Heidelberg, Jena, München).
Heute gibt es nur noch wenige geeignete Standorte weltweit, die für die professionelle Weltraumforschung in Frage kommen. Dies liegt daran, dass in moderne Observatorien die investierten Finanzmittel für Technik, Erschließung und Infrastruktur so hoch liegen, dass jede Nachtstunde optimal für Beobachtungen genutzt werden muss. Neben der Himmelsaufhellung sind Luftstabilität und eine hohe Zahl klarer Nächte für die Auswahl von Standorten wichtig. Hohe Erschließungs- und Transportkosten werden dafür in Kauf genommen. Die inzwischen übliche Fernbeobachtung, d.h. dass der Forscher seine Ergebnisse durch Fernverbindungen geliefert bekommt, haben zudem die Reisekosten reduziert. Allerdings stehen solche oft wüstenhafte Gebiete auch zunehmenden unter Druck durch neue Siedlungen. 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/Arizona, in Nordchile und Hawaii. Wesentliche Kriterien sind dabei, dass voll abgeschirmte Leuchten mit schmalbandigen (z.B. Natriumniederdruck) oder wenig blauhaltigen Leuchtmitteln verwendet werden und eine Reduzierungen der Beleuchtungsstärke im Laufe der Nacht erfolgt. Diese Methoden ermöglichen eine effektive Reduzierung der Himmelsaufhellung, wie Messungen gezeigt haben.

Einen viel größeren Einfluss hat die Lichtverschmutzung allerdings auf die zahlreichen Volkssternwarten sowie Hobby- und Amateurastronomen, die nur lokal tätig sein können. Sternwarten, die dadurch in Außenbereiche verlagert werden, kommen häufig in Zielkonflikte mit Naturschutzbestimmungen. Teilweise werden auch von Amateuren robotisch gesteuerte Teleskope an besseren Standorten genutzt, die zwar Daten und schöne Bilder liefern können, aber keinen direkten Eindruck eines sternenübersäten Himmels bieten. Notgedrungen hat sich ein Astrotourismus in Gegenden mit noch dunklem Sternhimmel entwickelt, etwa nach la Palma, in Marokko oder Namibia. Zudem hat sich ein Astrotourismus in Gegenden mit noch dunklem Sternenhimmel entwickelt (Fayos-Solá et al. 2014), etwa auf La Palma, in Marokko oder Namibia. In diesem neuen Wirtschaftszweig sind mehrere Anbieter tätig, genaue Zahlen sind aber nicht verfügbar (siehe Kapitel 4.1.2.3).

4. Identifikation von technischen und regulatorischen Handlungsoptionen

Für die Identifikation von technischen und regulatorischen Handlungsoptionen ist eine Zusammenfassung und Diskussion bestehender Regularien in Deutschland und der EU zielführend. Einen Überblick über diese gibt Kapitel 4.1., wobei zuerst Regelungen und Rahmensetzungen in Deutschland auf Bundesebene (4.1.1) betrachtet werden und dann auf weitere Instrumente und Ansätze zur Minimierung der Lichtverschmutzung in Deutschland (4.1.2), wie Vollzugshilfen, und Stellungnahmen und Empfehlungen, Lichtkonzepte und Regionale Nachtschutzgebiete /Sternenparks, eingegangen wird. Industrienormen (4.1.3), Verbraucherinformationen (0) und die Darstellung der aktuellen Förderpolitik (4.1.5) folgen hierauf. Einen erweiterten Blick auf mögliche Handlungsoptionen bietet die Betrachtung der Regelungen und Beschlüsse Europäischer Institutionen und außerhalb Deutschlands in anderen Ländern der EU (Frankreich, Italien, Österreich, Schweiz, Slowenien, Spanien, Tschechien und dem Vereinigten Königreich) und der Schweiz (4.1.6). Darauf aufbauend werden konkrete Handlungsoptionen in Kapitel 4.2 mit der Darstellung möglicher Parameter für Verwendung in Regulierungen der Lichtverschmutzung (4.2.1) und Handlungsinstrumenten (4.2.2) aufgezeigt. Abschließend werden positive technologische Entwicklungen zur Reduzierung der Lichtverschmutzung in Kapitel 4.3 dargestellt und Vorschläge für ein erhöhtes Bewusstsein für das Thema Lichtverschmutzung bei der Beleuchtungsplanung, Beratung und Öffentlichkeitsarbeit in Kapitel 4.4 gemacht.

4.1. Zusammenfassung und Diskussion bestehender Regulationen in Deutschland und der EU

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 einem fehlenden Problembewusstsein (Krause et al. 2014a) wird häufiger mehr Licht eingesetzt als zwingend notwendig wäre. In den letzten 5-10 Jahren hat das Thema Lichtverschmutzung aber an politischer Aufmerksamkeit gewonnen, was sich auch an der deutlichen Zunahme der schriftlichen Anfragen von Parlamentariern auf nationaler und EU Ebene zeigt (Meier/Pottharst 2013). Die jüngste Anfrage im Deutschen Bundestag erfolgte 2015 (Drucksache 18/4853 und 18/4996) (Deutscher Bundestag 2015b; a).

Unter den bestehenden Regulierungen in Deutschland und in der EU, die sich auf die Lichtverschmutzung beziehen, finden sich sowohl sog. “harte”, bindende Instrumente wie Gesetze und Verordnungen, als auch “weiche”, orientierungsgebende Instrumente wie Lichtkonzepte oder Richtlinien zum Schutz der Nacht in Schutzgebieten. Des Weiteren spielt die Förderpolitik eine bedeutende Rolle, indem sie Anreize schafft und Standards definiert, die für eine Förderung zu erfüllen sind - durch deren zielgerichtete Ausrichtung kann eine Minimierung der nichtintendierten Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung im Außenbereich befördert werden. Jenseits des staatlichen Regelwerks kommt Industrienormen ein hoher Einfluss, insbesondere auf die Gestaltung der Straßenbeleuchtung, zu. Ergänzend werden Empfehlungen

und andere orientierungsgebende Werke aufgeführt, die sich auf Lichtverschmutzung auswirken können.

Eine grundlegende Herausforderung für Regelungsansätze zu Lichtverschmutzung besteht zunächst in der Definition und der Quantifizierung des Phänomens und dass viele Lichtquellen nicht in öffentlicher Hand sind. Soweit möglich, wird daher hier versucht, auf die unterschiedlichen Arten der negativen Auswirkungen differenziert einzugehen. Im Folgenden werden die rechtlichen Regelungen und Rahmensetzungen in Deutschland (4.1.1) und der EU (4.1.6) und weitere Instrumente zur Minimierung der Lichtverschmutzung (4.1.2) vorgestellt und diskutiert. Es soll hier kurz auch auf die Regelungsimpulse der UNESCO und der Internationalen Energieagentur (IEA) hingewiesen werden, die in Meier/Pottharst (2013)

sowie auf die Regulationen in Südkorea, die in Cha et al.(2014) und Morgan-Taylor/Kim (2016) näher beleuchtet werden.

4.1.1. Rechtliche Regelungen und Rahmensetzungen in Deutschland

In Deutschland stehen auf Bundesebene nur grobe bindende Instrumente zur Verfügung, um die künstliche Beleuchtung zu steuern (Krause et al. 2014a; Walkling/Stockmar 2013). Umfassende Rechtsgutachten zum Thema künstliche Beleuchtung und Lichtverschmutzung bestehen bislang nicht. In diesem Abschnitt werden daher die aus der Literatur bekannten rechtlichen Regelungen vorgestellt, ohne jedoch die Existenz weiterer, weniger bekannter, Ansatzpunkte auszuschließen. Weiterer Aufschluss lässt das gegenwärtig an der Universität Münster in Bearbeitung befindliche F+E-Vorhaben “Licht und Glas: Rechtsfragen der Gefährdung von Arten durch Licht und Glas" erwarten, in dem rechtliche Anforderungen und Regelungsmöglichkeiten “zur Vermeidung und Minimierung von Gefahren durch Licht und Glas für wildlebende Tierarten” in den Blick genommen werden[30] . Empfehlungen für die Anpassung der institutionellen Rahmenbedingungen, um Lichtverschmutzung zu reduzieren, sind in Krause et al. (2014b; a) zu finden.

In Bezug auf die öffentliche Straßenbeleuchtung sei hier darauf hingewiesen, dass keine allgemeine Beleuchtungspflicht existiert, sondern nur eine Verkehrssicherungspflicht (allg. Rechtsgrundsatz § 823 BGB, § 839 BGB). Eine innerörtliche Beleuchtungspflicht für Kommunen besteht im Rahmen ihrer finanziellen Möglichkeiten nach Landesgesetz in Bayern, Baden-Württemberg, Berlin und Sachsen (Riedel et al. 2013, S. 77 ff; Ringwald/Engel 2013). Daraus ergeben sich Handlungsspielräume für viele Kommunen - grundsätzlich was den Einsatz von Straßenbeleuchtung betrifft, als auch hinsichtlich Maßnahmen wie Teil- oder Ganzabschaltungen, z.B. eine entsprechende Auseinandersetzung dazu bzgl. Abschaltung der Straßenbeleuchtung in Weimar (Baar 2014). Zur Erfüllung der Verkehrssicherheitspflicht richten sich viele Kommunen nach der Industrienorm DIN EN 13201 (siehe Kapitel 4.1.3). Diese ist zwar nicht rechtlich bindend, hat aber durch fehlende anderweitige Orientierungsrahmen mit offiziellem Charakter, aktuell einen “quasi-rechtlichen” Status Die Beleuchtung von Kraftfahrzeugen (mobiles Verkehrslicht) ist in § 17 Beleuchtung der Straßenverkehrsordnung StVO[31] und §52 Zusätzliche Scheinwerfer und Leuchten und § 67 Lichttechnische Einrichtungen an Fahrrädern der

[30] https://www.jura.uni-muenster.de/de/institute/institut-fuer-umwelt-und-planungsrecht/forschung1/licht-und-glas/ (30.10.2017)
[31] https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/ (30.11.2017)

Straßenverkehrszulassungsverordnung StVO geregelt. Die letzte Änderung erfolgte am 18. Mai 2017[32] und erlaubt nun zum Beispiel auch Fernlicht an Fahrrädern.

Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und "Licht-Richtlinie" des LAI

Im deutschen Bundes-Immissionsschutzgesetz wird künstliches Licht nach § 3 Abs. 2 und 3 „[...] zu den schädlichen Umwelteinwirkungen" gezählt, „die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder für die Nachbarschaft herbeizuführen" (BImSchG 2011). Grundlagen für einheitliche Messungen und Beurteilungen von immissionsschutzrechtlichen Erheblichkeitsgrenzen, wie sie zum Beispiel für die Lärmbelästigung existieren, fehlen jedoch.

Aus diesem Mangel und zur Regelung des Einflusses privater Lichtquellen hat der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) als Empfehlung die sogenannte „Licht-Richtlinie" ("Hinweise zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen") verfasst. Diese wurde als Arbeitsmittel für die „Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen für den Vollzug des BImSchG" erstellt und konkretisieren die zentralen Begriffe "schädliche Umwelteinwirkungen" und "erhebliche Belästigung" (LAI 2012, S. 2). Eine wichtige Grundlage für ihre Erarbeitung waren die "Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen 12.3" des Arbeitskreises "Lichtimmissionen" der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG 2011). Die Licht-Richtlinie bezieht sich in ihrem Hauptteil ausschließlich auf das Schutzgut Mensch und definiert Immissionsrichtwerte für die Bereiche "Raumaufhellung" und "Blendung", als schutzwürdige Räume werden insbesondere Wohn- und Schlafräume sowie Unterrichtsräume, Büroräume definiert. 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 (siehe auch Maaß 2003, S. 15). Die Licht-Richtlinie ist nicht rechtsverbindlich und wurde bislang nur in einzelnen Bundesländern – bekannt sind Brandenburg (Land Brandenburg 2014) und Nordrhein-Westfalen (Land Nordrhein-Westfalen 2014) – als Verordnung umgesetzt (Meier/Pottharst 2013, S. 36). Anzumerken ist, dass eine Technische Anleitung (TA) für Licht, in der immissionsbezogene Grenzwerte formuliert werden, bislang nicht existiert, anders als dies bspw. für Lärmimmissionen der Fall ist (Krause et al. 2014a).

In den Anwendungsbereich des Immisionsschutzrechts auf Bundesebene fallen nur gewerbliche Anlagen – u.a. öffentliche Beleuchtung sowie Vereinsbeleuchtung, z.B. von Sportstätten, sind somit ausgeschlossen: für sie gilt, sofern vorhanden, das Immissionsschutzrecht der einzelnen Bundesländern, andernfalls deren Polizeirecht (Maaß 2003, S. 19). Im Bezug auf die Lichtverschmutzung sind besonders die nicht genehmigungspflichtigen Anlagen von Bedeutung, da Lichtanlagen meist nicht Teil der Hauptanlage darstellen und so nicht als genehmigungspflichtige Anlage gelten. Für diese gilt ein Vermeidungs- und Minderungsgebot nach Stand der Technik einzuhalten, wodurch Anordnungen zu Lampen, Leuchten und Betriebszeiten (auch nachträglich) gemacht werden können (Hofmeister 2013, S. 133 f; Maaß 2003).

[32]https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl#__bgbl__%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl117s1282.pdf%27]__1496388943412 (30.11.2017)

Naturschutzrechtliche Regelungen

Weitere gesetzliche Handlungsmöglichkeiten bietet in Deutschland die Naturschutzgesetzgebung, z.B. durch die Eingriffsregelung §§ 13ff. BNatSchG. § 23 Abs. 2 BNatSchG verbietet „Handlungen, die zu einer Zerstörung, Beschädigung oder Veränderung des Naturschutzgebiets oder seiner Bestandteile oder zu einer nachhaltigen Störung führen können“, wobei in der aktuellen Praxis Licht als temporärer Eingriff bewertet wird (Krause et al. 2014a), da Unwissenheit über Art und Umfang der Beeinträchtigung besteht, sodass keine Ausgleichs- oder Ersatzmaßnahmen durchgeführt werden müssen (Hofmeister 2013). hierzu im Bearbeitungsschwerpunkt 2 und in Maaß (1999), Böttcher (2001, S. 12-15), Herrmann et al. (2006) und Haupt/Schillemeit (2011) zu finden.

Baurechtliche Regelungen

Das Baugesetzbuch 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, S. 15). Das Bauordnungsrecht wird in Form der Landesbauordnungen 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 (s. Hofmeister S. 134 sowie ausführlicher: Böttcher 2001 S.131f; Maaß 2001 S.156ff; Maaß 2003 S.26ff). Beispielsweise formuliert §9 “Gestaltung” Abs. 1-2 der Berliner Bauordnung:

> *“(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, wobei aufgrund des sehr allgemein gefassten Begriffs der Verunstaltung solche Entscheidungen vor Gericht nicht zwingend Bestand haben (Rehmann 2013 S. 14). Im Falle von Berlin bietet auch §10 “Anlagen der Außenwerbung, Warenautomaten” im Prinzip eine Regelungsmöglichkeit für künstliche Beleuchtung in Form von Lichtwerbung. Auch hier gilt das Verunstaltungsgebot inkl. der Unzulässigkeit einer “störenden Häufung” (Abs. 2) von Werbeanlagen. Jedoch führt der breite Ausnahmenkatalog dazu, dass viele Formen der gewerblichen Beleuchtung nicht genehmigungspflichtig sind (Rehmann 2013 S. 14).

Im Rahmen der den Gemeinden obliegenden Bauleitplanung besteht die Möglichkeit, Lichtquellen indirekt über den Ausschluss von Nutzungen gem. §1 Abs. 5 BauNVO zu regulieren, wobei es sich hierbei eher um einen “Nebeneffekt der Planung” handelt (Rehmann 2013 S. 15 - so können bspw. bestimmte Arten von, ggf. besonders lichtintensiven, Gewerbebetrieben ausgeschlossen werden). Direkt können Lichtanlagen unter dem “Rücksichtnahmegebot” (s. §15 BauNVO) verhindert werden (Hofmeister 2013, S. 134; Maaß 2003, S. 27).

Einen weiteren Anknüpfungspunkt für die Steuerung von Lichtanlagen bietet die im Baugesetzbuch formulierte Erhaltungssatzung (§172 BauGB): Sie ermöglicht es den Gemeinden, u.a. zur “Erhaltung der städtebaulichen Eigenart eines Gebiets auf Grund seiner städtebaulichen Gestalt” (§172 Abs. 1 BauGB), eine besondere Genehmigungspflicht für bauliche Maßnahmen im

Satzungsgebiet einzuführen (Rehmann 2013 S. 15). 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 gestalterischen Qualität des Ortsbildes abzielen, und Werbesatzungen, die die Zulässigkeit von Werbeanlagen im öffentlichen Raum regeln. Solche Satzungen stellen eine Möglichkeit dar, für konzeptionelle Festlegungen bspw. aus Lichtkonzepten (s.u.) eine allgemeine Verbindlichkeit herzustellen, wie es zum Beispiel in Düsseldorf 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" (Dannemann 2009, S. 8). Das heißt, dass wie etwa in Berlin Charakteristika wie Größe und Farben der geplanten Anlage geprüft werden, während der Frage, ob und in welchem Intervall eine Leuchtwerbung sich bewegt oder blinkt, keine explizite Rolle spielt (Dannemann 2009, S. 8).

Hofmeister fasst bezüglich der baurechtlichen Regelungen zusammen: "Die Bauleitplanung bietet in besonderer Weise Möglichkeiten, Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft durch Lichtimmissionen ex ante zu vermeiden und/oder zu reduzieren." (2013, S. 134) und weist damit auf die Chance hin, im Rahmen des Bauordnungs- und Bauplanungsrechts Lichtverschmutzung, bevor sie entsteht, zu verhindern, statt erst entstehende Problematiken im Nachhinein durch Eingriffe beheben zu müssen. Insgesamt bestehen im Prinzip mehrere baurechtliche Ansatzpunkte, gerade auch privat betriebene künstliche Beleuchtung zu regeln - es handelt sich dabei jedoch um eine eher fragmentierte Landschaft der Möglichkeiten, die zunächst erkannt, ergriffen und ausgestaltet werden müssen.

Arbeitsstättenverordnung ArbStättV

Die Beleuchtung für den Arbeitsschutz im Außenbereich ist durch eine Bundesrechtsverordnung, der Arbeitsstättenverordnung ArbStättV seit 1975 geregelt. Diese werden vom Ausschuss für Arbeitsstätten verfasst und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Gemeinsamen Ministerialblatt bekannt gegeben. Letzte Änderungen erfolgten im November 2016[33]. Die Technische Regel für Arbeitsstätten „Beleuchtung" (ASR 2014, S. 21, A3.4 Anhang 2) konkretisiert die Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung an die 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 - 20 Lux, in besonders kritischen Fällen, die eine hohe Sehleistung erfordern, wie die Reparatur an Motoren und elektrischen Einrichtungen von Kläranlagen, aber auch bei 200 Lux. Abweichende und ergänzende Anforderung für Baustellen sind in Tabelle 2 der ASR gegeben und liegen zwischen 20-200 lx (ASR 2014, S. 13).Flughäfen müssen zum Beispiel auf dem Vorfeld mindestens 20 lx und im Umschlagsbereich auf dem Vorfeld 30 lx Beleuchtungsstärke aufweisen. Der Farbwiedergabeindex liegt meist bei mindestens 25 (für Natriumhochdruckdampflampen).

[33] http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl116s2681.pdf (04.12.2017)

Auf sehphysiologische und produktionsbezogene Erfordernisse wird hier nicht eingegangen, diese werden in der DIN EN 12464-2 behandelt (siehe Kapitel 4.1.3). Die Anforderungen weichen in Einzelfällen von der ASR ab (ausführliche Informatioenn auch in Fördergemeinschaft Gutes Licht 2010a)

4.1.2. Weitere Instrumente und Ansätze zur Minimierung der Lichtverschmutzung in Deutschland

Neben den geringen rechtlichen Regelungen gibt es verschiedene mehr oder weniger bindende Ansätze auf anderen institutionellen Ebenen (insbesondere: Kommunen) sowie orientierungsgebende Empfehlungen verschiedener Organisationen.

4.1.2.1. Vollzugshilfen, Stellungnahmen und Empfehlungen

Strahlenschutzkommission zum Thema Blendung (SSK 2006, 2010)

Die deutsche Strahlenschutzkommision berät das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Blendung durch künstliches Licht und ihre negativen Auswirkungen auf das Sehvermögen sind gut untersucht. Es wurden auch schon entsprechende Grenzwerte definiert (Strahlenschutzkommission 2006). Das Problem hat sich in den letzten Jahren durch neue Lichtquellen mit extrem hohen Leuchtdichten bis zu 3.000.000 cd/m² (Strahlenschutzkommission 2010), vor allem Entladungslampen mit Keramikbrennern und Hochleistungs-LEDs, verschärft. Von der deutschen Strahlenschutzkommission werden daher „konstruktive Maßnahmen empfohlen, die [...] einen direkten Blick in Leuchtmittel und Geräte mit LED, Xenon- oder Halogenlampen verhindern, um so Blendungen und lange Nachbilder zu vermeiden.“.

Lichttechnische Gesellschaft LiTG zum Thema Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen (LiTG 2011)

Empfehlungen zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen wurden von der Lichttechnischen Gesellschaft in einer Broschüre zusammengefasst (LiTG 2011). Die darin zitierten Immissionsgrenzwerte der vertikalen Beleuchtungsstärke auf Fenstern oder Balkonen gelten international als akzeptiert und basieren in der deutschen Regelung auf einer Untersuchung des bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen aus dem Jahre 1984 (Hartmann et al. 1984). Danach liegen die Grenzwerte in Wohngebieten nach 22 Uhr bei 1 Lux und in Industrie- und Gewerbegebieten bei 5 Lux. Zum Vergleich: die maximale horizontale Beleuchtungsstärke des winterlichen Vollmondes beträgt ca. 0.3 Lux. Eine Masterarbeit aus der Schweiz (Schobesberger 2010) kommt zu dem Resultat, dass in Schweizer Städten die Beleuchtungsstärke auf eine vertikale Fensterfläche selten 0.2 Lux überschreitet. Daran ist aus Sicht des Autors erkennbar, dass die geltenden Grenzwerte der Licht-Richtlinie von mehr als 1 Lux zu hoch sind und eher an der geringen natürlichen Beleuchtungsstärke des Mondes orientiert sein könnten.

Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI)

Mit den „Hinweisen zur Messung und Beurteilung von Lichtemissionen” “wurde ein wichtiges Arbeitsmittel für den Vollzug des BImSchG“ gesetzt (LAI 2012). Die Leitlinien, die erstmals 1993

erschienen, sind nicht rechtsverbindlich, befassen sich aber auch mit ökologischen Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung neben Möglichkeiten der Beurteilung, Messung und Minderung von Störeinwirkungen durch Licht. Weiterführende Informationen sind auch im Text über das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in Kapitel 4.1.1 zu finden. Grenzwerte für die Beleuchtungsstärke in Wohngebieten werden räumlich, nach Gebietsart nach § BauNVO, und zeitlich unterschieden (Tabelle 1 in LAI 2012, S.5) und sind in Tabelle 4 aufgelistet. Für blinkende Lichtquellen, die einen Wechsel des Betriebszustandes von weniger als 5 Minuten aufweisen werden in Tabelle 1a (LAI 2012, S. 6) Korrekturfaktoren gegeben (maximaler Korrekturfaktor 3 bei einer Periodendauer von 2 bis 1,5 Sekunden und einer Frequenz von größer 30 Herz), für nichtperiodische Anlagen, wie zum Beispiel Videoinstallationen, existiert derzeit kein Korrekturfaktor. Farbiges Licht wird mit dem Korrekturfaktor 2 versehen, für blinkendes farbiges Licht ist der höhere Wert der beiden einzelnen Korrekturfaktoren anzuwenden.

Tabelle 4: Grenzwerte für die Beleuchtungsstärke für weißes Licht; Gebietsart nach § BauNVO (Tabelle 1 LAI 2012, S.5)

	Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	reine Wohngebiete (§ 3) allgemeine Wohngebiete (§ 4) besondere Wohngebiete (§ 4 a) Kleinsiedlungsgebiete (§ 2) Erholungsgebiete (§ 10)	Dorfgebiete (§ 5) Mischgebiete (§ 7)	Kerngebiete (§ 7) Gewerbegebiete (§ 8) Industriegebiete (§ 9)
6 -22 Uhr	1 lx	3 lx	5 lx	15 lx
22-6 Uhr	1 lx	1 lx	1 lx	5 lx

In Tabelle 2 (LAI 2012, S.9) werden Grenzwerte zur maximal zulässigen Blendung mit zeitlicher (6-22 Uhr, 20-22 Uhr und 22-6 Uhr) Unterteilung und nach Gebietsart nach § BauNVO gegeben, diese Immisionsrichtwerte betragen minimal 32 (Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten zu allen Nachtzeiten und alle Gebiete bis auf Kerngebiete (§ 7) Gewerbegebiete (§ 8) Industriegebiete (§ 9) von 22-06 Uhr) und maximal 160 (Kerngebiete (§ 7) Gewerbegebiete (§ 8) Industriegebiete (§ 9) zwischen 22-6 Uhr und Dorfgebiete (§ 5) Mischgebiete (§ 7) zwischen 6-22 Uhr), wobei keine Grenzwerte für Kerngebiete (§ 7) Gewerbegebiete (§ 8) Industriegebiete (§ 9) zwischen 6-22 Uhr gesetzt werden.

Commission international de l'eclairage: Guide on the limitation of obtrusive light from outdoor lighting installations

Dieser technische Bericht, der erstmals 2003 erschienen ist, stellt einen Leitfaden zur Begrenzung der Störlichtwirkungen von Außenbeleuchtungsanlagen dar und hat das Ziel "*Richtlinien zur Bewertung von Einflüssen der Außenbeleuchtung auf die Umwelt [zu]formulieren* [...] *und Grenzen für relevante lichttechnische Größen zu empfehlen*" (CIE 2017, S. VII). Die Empfehlungen basieren auf eine Berücksichtigung der Umgebungshelligkeit und Funktion eines Gebietes in den Beleuchtungszonen (CIE 2017, S. 8 Tabelle 1):

- E0: an sich dunkle Gebiete wie Nachtschutzgebiete und Orte von astonomischen Observatorien
- E1: Dunkle Gebiete, die hauptsächlich unbewohnt sind
- E2: Gebiete mit geringer Umgebungshelligkeit (ländliche Gebiete mit geringer Bevölkerungsdichte)
- E3: Gebiete mit mittlerer Umgebungshelligkeite (gut besiedelte ländliche und urbane Gebiete)
- E4: Gebiete mit hoher Nachthelligkeit wie Innenstadtbereiche und Industriegebiete

Für Wohngebäude werden die Grenzwerte für die Beleuchtungsstärke zeitlich, bis 23 Uhr ("pre-curfew) und danach, wenn die meisten Bewohner schlafen möchten, und räumlich, zu der Entfernung der Lichtquelle, unterschieden. Grenzwerte für die vertikale Beleuchtungsstärke sind in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5: Grenzwerte für die vertikale Beleuchtungsstärke (Tabelle 2 CIE 2017, S.8)

	E0	**E1**	**E2**	**E3**	**E4**
vor 23 Uhr	n/a	2 lx	5 lx	10 lx	25 lx
nach 23 Uhr	n/a	<0,1 lx (Straßenbeleuchtung < 1lx)	1 lx	2 lx	5 lx

Weiterhin werden in Tabelle 3 des Berichtes (CIE 2017, S.9) Maximalwerte für die Leuchtstärke in Abhängigkeit von der Entfernung des Betrachters und der Größe der Lichtquelle (Projektionsfläche) und in Tabelle 4 des Berichtes für Lichtquellen auf Verkehrsflächen, die nicht Teil der Verkehrsbeleuchtung sind, gegeben.

Für eine Minimierung der Himmelshelligkeit werden Grenzwerte für ULR (Abstrahlung in horizontaler Richtung, engl. Upward Light Ratio) und UFR (Abstrahlung und Reflexion in horizontaler Richtung, engl. Upward Flux Ratio, für 4 oder mehr Lichtquellen und Berücksichtigung der direkten und reflektierten Lichtemissionen) (Tabelle 5 und 6 CIE 2017, S.10) in der folgenden Tabelle dargelegt:

Tabelle 6: Maximalwerte für die Abstrahlung oberhalb der Horizontalen für eine Minimierung der Himmelshelligkeit

		E0	E1	E2	E3	E4
	ULR [%]	0	0	2,5	5	15
Straßen	UFR [%]	n/a	2	5	8	12
Freizeit /Erholung	UFR [%]	n/a	n/a	6	12	35
Sport	UFR [%]	n/a	n/a	2	6	15

Beleuchtete Fassaden und Schilder haben meist hohe Lichtintensitäten, um am Tag sichtbar zu sein. Häufig wird die Beleuchtung in der Nacht mit der gleichen Intensität fortgeführt und sollte eingeschränkt werden, Grenzwerte sind in Tabelle 7 aufgezeigt (Tabelle 7 CIE 2017, S.10-11).

Tabelle 7: Maximalwerte der Leuchtdichte für Fassaden und Schilder, die nicht der Verkehrssicherheit dienen

	E0	E1	E2	E3	E4
Fassaden	< 0,1 cd/m²	< 0,1 cd/m²	5 cd/m²	10 cd/m²	25 cd/m²
Schilder	< 0,1 cd/m²	50 cd/m²	400 cd/m²	800 cd/m²	1000 cd/m²

Weiterhin gibt der Leitfaden Empfehlungen für das Design, die Installation und Wartung von Beleuchtungsanlagen (Kapitel 4), Dokumentation des Lichtdesign (Kapitel 5) und Berechnung und Messung der Bewertungsparameter (Kapitel 6 & 7).

Weitere Empfehlungen

Blendung durch helle Lichtquellen ist eine wesentliche Form der Lichtverschmutzung im weiteren Sinne, zu der es bereits mehrere Untersuchungen und Empfehlungen gibt. Neben der Strahlenschutzkommission (s.o.) hat sich z. B. die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Reidenbach et al. 2008) mit dem Thema und insbesondere der Blendung mit Nachbildern durch LED-Lichtquellen beschäftigt und deren Klassifizierung nach der Dauer der Nachbilder vorgeschlagen. Auch der Fachverband für Strahlenschutz hat Empfehlungen zur Reduzierung der Lichteinwirkung auf die Nachbarschaft veröffentlicht (Borgmann/Kurz 2014).

Nationale und internationale Handlungsempfehlungen

Daneben gibt es eine Vielzahl von Empfehlungen und weiteren Ansätzen, Lichtverschmutzung zu minimiere n, die zu großen Teilen in Deutschland Anwendung finden können. Genannt seien hier die „Vollzugshilfe Lichtemissionen“ des Schweizer Bundesamts für Umwelt (BAFU 2017a), der „Leitfaden besseres Licht“ des Amtes der Oberösterreichischen Landesregierung (Amt der Oberösterreichischen Landesregierung 2013), die „Guidelines for Outdoor Lighting for Low-Impact Lighting“ (Dick 2016) und die Empfehlungen des europäischen Forschungsverbundes Loss of the Night Network (LoNNe 2015).

Da es in Deutschland außer der Lichtimmissionsrichtlinie keine Regelungen zur Begrenzung der Lichtimmissionen gibt, wurden erstmals für die Sternenparks im Naturpark Westhavelland und der Rhön Beleuchtungsempfehlungen entwickelt, die darauf abzielen, die Lichtimmissionen und damit die Aufhellung der Nacht zu reduzieren, z.B. mit der „Handreichung für Kommunen" des Sternenparks im Biosphärenreservat Rhön (Hänel/Frank 2013). Diese Richtlinien für die öffentliche Beleuchtung basieren auf den "Guidelines for Outdoor Lighting" (GOL)[34] der IDA (International Dark-Sky Association) und RASC (Royal Astronomical Society of Canada) und wurden in einem partizipativen Prozess zwischen Kommunen und Energieversorgern an die Verhältnisse in Deutschland angepasst.

Diese enthalten grundsätzlich folgende sieben Punkte, die bei dem Einsatz von künstlicher Beleuchtung im Außenbereich beachtet werden sollten:

- Notwendigkeit
- Abschirmung
- Intensität/Helligkeit
- Ausrichtung
- Auswahl und Platzierung der Leuchten
- Zeitmanagement/Steuerung
- Lichtspektrum/Lichtfarbe

4.1.2.2. Lichtkonzepte

Viele Kommunen und Städte haben erkannt, dass es wichtig ist, Außenbeleuchtung dezidiert zu thematisieren (Fisher/Junagade 2016) und nutzen dazu das Instrument der städtebaulich orientierten Lichtkonzepte (Schmidt 2007; Köhler 2015; Küster 2017; Schulte-Römer 2010). Vorreiterrollen spielen hier die Städte Lyon 1989 und Zürich 2004 mit ihrem jeweiligen "Plan Lumière" (Stadt Zürich 2017). Lichtkonzepte (oder auch Lichtmasterpläne, Lichtleitpläne, Aktionspläne usw. – unterschiedliche Bezeichnungen siehe Köhler 2012, S.40 und Diskussion in Schulte-Römer 2010) formulieren eine Zielrichtung für die konzeptionelle Entwicklung der städtischen Beleuchtung und erfüllen eine übergreifende Koordinierungsaufgabe (Küster 2017, S. 25). Lichtkonzepte sind informelle Planungsinstrumente. Als solche sind sie für die Allgemeinheit unverbindlich, können aber durch politischen Beschluss behördeninterne Verbindlichkeit erlangen, sowie zur Vorbereitung formeller (verbindlicher) Planungen dienen und in Abwägungsentscheidungen berücksichtigt werden (Küster 2017; Phal-Weber 2010, S. 227). Darüber hinaus können aus bzw. in Verbindung mit Lichtkonzepten bindende Verordnungen entstehen, wie in Berlin mit der Ausführungsvorschrift öffentliche Beleuchtung AVÖB geschehen (Krause 2015).

Von den bestehenden städtischen Lichtkonzepten im Jahre 2015 (Abbildung 31) haben 500 Gemeinden eine Strategie für den Umgang mit künstlichem Licht entwickelt; ein starker Anstieg also ausgehend von den rund 45 Masterplänen, die erst im Jahre 2005 existierten (Fechter 2005). Von den 14 Großstädten in Deutschland (über 500.000 Einwohner*innen) hatten im Jahr 2017 nur drei keinen Lichtkonzepte (Bremen, Essen und München), ein aktueller Vergleich zwischen großstädtischen Lichtkonzepten findet sich in Küster (2017).

[34] http://www.darksky.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/RASC-GOL_2016_51.pdf (30.10.2017)

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 weitere Beleuchtungsformen), in der inhaltlichen Ausrichtung und Schwerpunktsetzung sowie in der Anzahl und Bandbreite an Akteuren, die an der Konzeptentwicklung beteiligt sind.

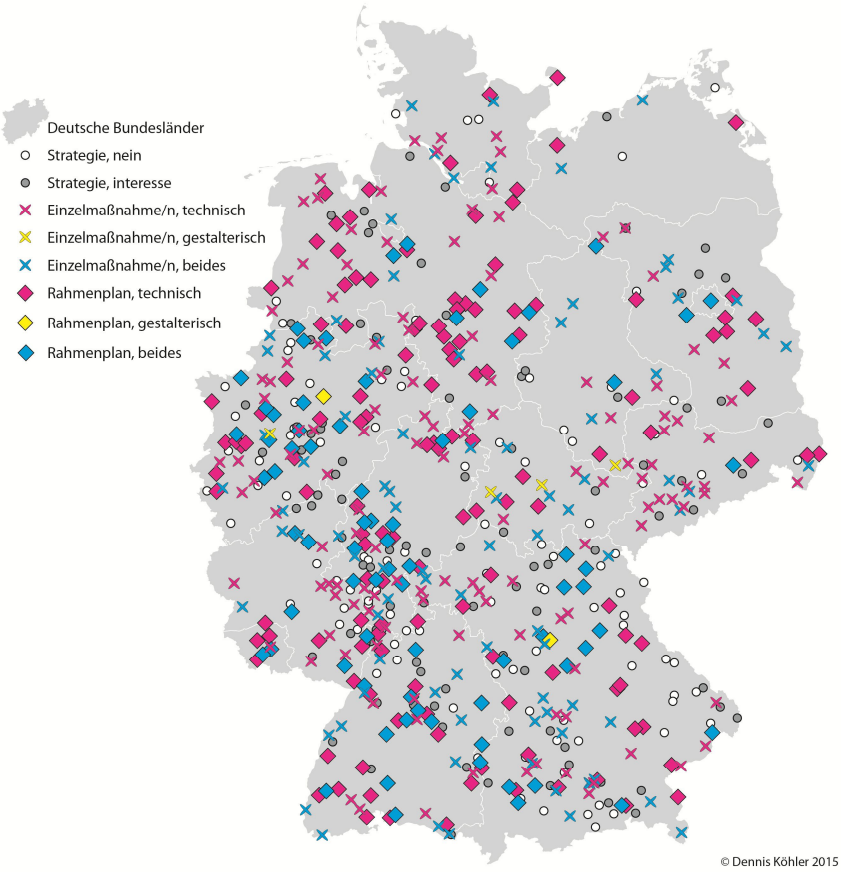

Abbildung 31: Karte beleuchtungsbezogener Strategien deutscher Städte und Gemeinden im Jahr 2015 (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von D. Köhler)

In Lichtkonzepten behandelte Themen sind häufig Energieeffizienz, finanzielle Einsparung, ökologische, demographische und kulturelle Aspekte, Architektur, Stadtdesign und Attraktivitätssteigerung des Standortes. In unter 10% der bestehenden Fälle wird das Thema Lichtverschmutzung berücksichtigt (Köhler 2015; Köhler/Sieber 2012; Schulte-Römer 2012). Oftmals wirken im Rahmen der Planentwicklung verschiedene Akteure aus Verwaltung und Wirtschaft zusammen, ebenso ist häufig bürgerschaftliche Partizipation Teil des Planungsprozesses. Kritisch wird von Köhler (2015) angemerkt, dass Empfehlungen für zu verwendende Methoden und Verfahren sowie Kriterien für die Evaluierung, Integration und Koordination von Lichtquellen von offizieller Seite, wie zum Beispiel in Südtirol, Italien mit dem "Leitfaden für die Erstellung von kommunalen Lichtplänen in Südtirol" (EURAC/Landesagentur für Umwelt 2013) fehlen. In Südtirol wird nach der vorgeschriebenen Bestandserhebung aller Lichtpunkte (öffentlich und privat) (Kapitel 4) der Aktionsplan mit Hauptzielen der Minimierung der Lichtverschmutzung und Energieverbrauch erstellt. Als zielführend wurde für das Lichtkonzept erarbeitet, dass es sich dabei um ein politisches Dokument handelt, dass durch einen

Beschluss genehmigt wird. Weiterhin sollten als Inhalte, die Ziele, die Maßnahmen, die Prioritäten, der Zeitplan, das Monitoring, die Überprüfung und die Finanzierung adressiert werden (EURAC/Landesagentur für Umwelt 2013, S. 26). Weitere Hindernisse bei der Umsetzung werden auf S. 151-152 und 154 behandelt.

4.1.2.3. Regionale Nachtschutzgebiete /Sternenparks und Sternenstädte

Nachtschutzgebiete/Sternenparks

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, S.179). Die Auszeichnungen werden von drei NGOs bzw. Stiftungen unabhängig voneinander vergeben: der International Dark-Sky Association (IDA), der Starlight Foundation und der Royal Astronomical Society of Canada (RASC), die jedoch nur Schutzgebiete in Kanada auszeichnet und auf die daher nicht weiter eingegangen wird. 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 (Meier 2015, S.177). Die Zahl der Auszeichnungen hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen (50 von insgesamt 55 identifizierten Sternenparks wurden in den 10 Jahren zwischen 2004-2014 ausgewiesen; Meier 2015 S.178), und das Konzept breitet sich geografisch von Nordamerika zunehmend nach Europa und in andere Regionen aus (Abbildung 32).

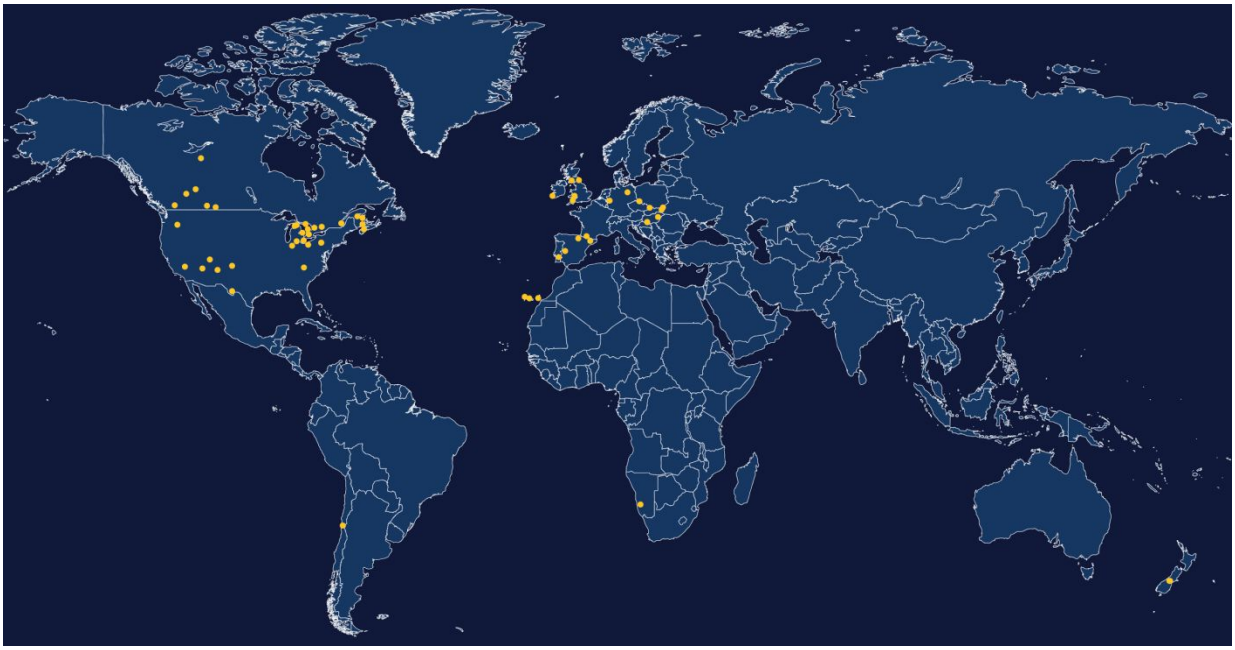

Abbildung 32: Verteilung von Nachtschutzgebieten (unterschiedliche Zertifizierung), Stand: Frühjahr 2014 (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Meier 2014)

Ein Zentrales Motiv, die Auszeichnung zu erreichen, ist das Ziel, den Bekanntheitsgrad der Region und die Besucherzahlen zu erhöhen (s. hierzu: Meier 2015). Der Gedanke ist, die mittlerweile rar gewordene Ressource Dunkelheit als Alleinstellungsmerkmal zu nutzen, um den Tourismus gerade auch in besucherschwachen "dunklen" Jahreszeiten zu fördern, insbesondere mit Blick auf die wachsende Branche des Astrotourismus bzw. des nachhaltigen Tourismus (Meier 2015, S. 184

ff; Projektgruppe Dunkelheit als Chance 2014). In Deutschland wurden Sternenparks als Ziele für nachhaltigen Tourismus zur ITB 2015 von der Reisezeitschrift GEOSaison mit der "Grünen Palme" ausgezeichnet (GEO 2015). Um Besucher anzuziehen, werden etwa Sternführungen oder auch "Teleskoptreffen" angeboten, ebenso wie Führungen durch die Natur bei Nacht. Letztere spiegeln weitere bedeutende Ziele: den Schutz der nächtlichen Natur sowie natürlicher Nachtlandschaften. 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 bzw. dass sich die getätigten Investitionen bereits nach kurzer Zeit lohnen (Projektgruppe Dunkelheit als Chance 2014, S. 23; EKOS 2011; Centre for Strategy & Evaluation Services 2013, S. 113 ff). Die ausgewiesenen Regionen sollen gleichzeitig als Best-Practice-Beispiele für einen nachhaltigen Umgang mit künstlichem Licht fungieren und dazu sowie zum Thema Lichtverschmutzung allgemein durch Publikationen, Vorträge, Beratungen u.ä. informieren.

Die Starlight Foundation[35] ist an das Astronomische Institut der Kanarischen Inseln IAC angeschlossen und wurde nach der ersten Internationalen Starlight Conference im Jahre 2007 gegründet, wobei die Ziele der dort verabschiedeten Starlight Declaration von La Palma verfolgt werden (Marín/Jafari 2007, S. 155 ff). Die meisten anerkannten Gebiete der Starlight Foundation befinden sich in Spanien. Die geforderten Kriterien sind in Mitteleuropa teils schwer zu erfüllen, z.B. die geforderte Zahl klarer Nächte (60% klare Nächte, Himmelshelligkeit >21.4 mag/arcsec^2, <=1" Seeing, Transmission <=0.15 mag, Starlight Reservas: Parámetros relativos a la calidad astronómica del cielo nocturno[36]), und der Anerkennungsprozess ist mit Kosten verbunden. Die Starlight Foundation vergibt folgende Auszeichnungen für regionale Nachtschutzgebiete:

- Starlight Reserves: Schutzgebiete, die ihren dunklen Himmel schützen.
- Starlight Tourist Destinations: Regionen, die einen dunklen Himmel haben, ihn vor Lichtverschmutzung schützen und eine touristische Infrastruktur aufweisen.

Die überwiegende Zahl der weltweiten Auszeichnungen für Sternenschutzgebiete wurden bislang von der International Dark-Sky Association IDA[37] vergeben. Die IDA ist in den USA angesiedelt und vergibt als NGO mit dem Ziel des Schutzes der Dunkelheit der Nacht folgende Auszeichnungen:

- 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 v.a. 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

[35] http://www.fundacionstarlight.org/ (30.10.2017)
[36] http://www.fundacionstarlight.org/cmsAdmin/uploads/o_1bfrg9fml1c8f1sqq1mif1cua2qed.pdf (30.10.2017)
[37] www.darksky.org (30.10.2017)

International Dark Sky Reserves (Naturpark Westhavelland und Biosphärenreservat Rhön) anerkannt und ein Dark Sky Park (Nationalpark Eifel) vorläufig anerkannt.

Für eine Anerkennung sind u.a. Messungen der Himmelsqualität, breite Unterstützung durch verschiedene Akteure, regelmässige Öffentlichkeitsarbeit notwendig. Zentral ist das Bekenntnis der ggf. im Schutzgebiet befindlichen Gemeinden mittels politischem Beschluss sowie der Schutzgebietsverwaltung zu den "Guidelines for Outdoor Lighting" (Dick 2016) der IDA und der RASC. Auf deren Basis wurden für Deutschland die **Empfehlungen für die öffentliche Beleuchtung** (Hänel/Frank 2013) erarbeitet: Sie wurden für hiesige Verhältnisse angepasst, teilweise mit Kommunen und Energieversorgern diskutiert und letztlich in der endgültigen Form den Kommunalvertretungen in den Dark Sky Reserves zur Abstimmung vorgelegt. Zur Anerkennung war eine mindestens 80%ige Zustimmung bezüglich Einwohnerzahl und Fläche notwendig. Die Kriterien variieren mit dem Abstand von den dunklen Kernzonen, wesentliche Punkte sind:

- Einsatz künstlicher Beleuchtung nur, wenn unbedingt notwendig.
- Einsatz voll abgeschirmter Leuchten, die aus der Ferne möglichst nicht zu sehen sind.
- Nutzung möglichst geringer Lichtmengen (z. B. Wahl der niedrigsten Beleuchtungsklasse in den DIN EN 13201).
- Deutliche (mindestens um 50%) Reduzierung im Laufe der Nacht oder Abschaltung.
- Verwendung von Leuchtmitteln mit geringen Blauanteilen (bernstein/gelb in der Kernzone, warmweiß (3000 K und weniger) in den Pufferzonen.
- Begrenzung von Anstrahlungen auf eine Leuchtdichte von 2 - 5 cd/m^2.

In beiden Reserves (Westhavelland und Rhön) hat sich diesbezüglich ein Eigendynamik entwickelt: um Teil des Sternenparks zu werden, haben - auch über die Grenzen der Schutzgebiete hinaus- weitere Kommunen die Beleuchtungsrichtlinien beschlossen. Damit können die Beleuchtungsempfehlungen in den Sternenpark-Kommunen als Best Practice für eine umweltfreundliche Beleuchtung gelten, die über die reinen Energieeffizienzanforderungen hinausgeht. Einige der Kriterien wurden inzwischen in die Qualitätsoffensive Naturparke des Verbands Deutscher Naturparke (VDN) übernommen (Köster/Schäfer 2015, S. 48 Frage 46).

Es besteht weiter großes Interesse in deutschen Kommunen und Schutzgebieten, als Sternenpark oder Sternenstadt anerkannt zu werden. Bei den Antragstellungen der bisherigen Sternenparks im Jahre 2014 war noch keine zeitliche Frist gesetzt für die Umrüstung der Beleuchtung entsprechend den IDA-Kriterien, was den Kommunen die Zustimmung ermöglichte. Doch durch die Änderungen der Voraussetzungen bei IDA im Oktober 2015, binnen 10 Jahren alle Leuchten entsprechend den Kriterien umzurüsten, sind die Hürden für deutsche Kommunen höher geworden.

Abbildung 33: Astronomische Beobachtungen im Sternenpark Westhavelland (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel)

Sternenstädte

Vergleichbar mit den Auszeichnungen für Schutzgebiete sind Zertifizierungen für Kommunen als "Sternenstädte" (Dark Sky Community). Hier sind nicht bestimmte Dunkelheitswerte ausschlaggebend, sondern vielmehr die Ausrichtung hin zu einer möglichst nachhaltigen Beleuchtung. Im Vergleich zu den Nachtschutzgebieten ist das Konzept der Sternenstädte bislang kaum ausgearbeitet.

International zeichnet insbesondere die IDA Kommunen als Sternenstädte aus, deren Anzahl mit aktuell 15 jedoch deutlich unter jenen der Sternenparks liegt (IDA 2017a). Eine zentrale Grundbedingung ist wiederum der Beschluss einer auf die Minimierung der Lichtverschmutzung ausgerichteten Beleuchtungssatzung durch die Gemeinde. Folgende Auszeichnungen werden vergeben:

- International Dark Sky Communities: Kommunen, die eine Beleuchtungssatzung angenommen haben und die Bewohner über die Wichtigkeit dunkler Nächte informieren.
- Dark Sky Developments of Distinction: Rechtlich nicht selbständige Gebiete (z.B. Ortsteile), die aktiv auf eine Minimierung der Lichtverschmutzung hinarbeiten, aber nicht als Dark Sky Community anerkannt werden können.

In Frankreich wird ein zurückhaltender Umgang mit künstlicher Beleuchtung auf kommunaler Ebene mit der Aktion "Villes et villages étoilées" (ANPCEN 2017d) der ANPCEN (Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes) gefördert. Damit werden Dörfer und Städte, die bestimmte Kriterien erfüllen, mit einem Sterne-Schema ausgezeichnet (ANPCEN 2017a). Seit Beginn 2009 bis 2015 wurden insgesamt 570 Gemeinden ausgezeichnet, deren Größen 2015 von kleinen Dörfern bis zu Städten mit 37000 Einwohnern reichten.

4.1.3. Industrienormen

Die Organisation "Lighting Europe", der Verband der Beleuchtungsindustrie in Europa[38], befasst sich als Industrieverband neben der Veröffentlichung von Positionspapieren und Leitlinien auch mit der Entwicklung technischer Normen, die am Rande auch Lichtverschmutzung thematisieren (Meier/Pottharst 2013). Seit 2012 ist er die gemeinsame Organisation der Federation of National Manufacturers Associations for Luminaires and Electrotechnical Components for Luminaires in the European Union (CELMA) und der European Lamp Companies Federation (ELC). In Deutschland ist der Fachverband Licht im Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektrizitätsindustrie (ZVEI Licht) angesiedelt, stellt „best-practice" Beispiele vor und informiert über Beleuchtungstechnologien.

Ein zentrales Anliegen der gesamten Lichtbranche ist die Normierung der Beleuchtungstechnologie, wobei auch hier Lichtverschmutzung nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt (Meier/Pottharst 2013). Der Normenausschuss Lichttechnik (FNL) des deutschen Institutes für Normung e.V. bearbeitet in meist enger Zusammenarbeit mit der LiTG Industrienormen (DIN und EN Normen) für die Beleuchtung (z.B. DIN EN 13201 für die Straßenbeleuchtung). Neu in 2017 hinzugekommen sind für eine integrierte multifunktionale Straßenbeleuchtung mittels einer offenen urbanen Datenplattform die DIN SPEC 91357[39] und DIN SPEC 91347[40]. Erläuterung zu letzterer sind in Heuser et al. (2017) zu finden). Auf europäischer Ebene übernimmt diese Aufgabe das European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) und auf globaler Ebene die International Electrotechnical Commission (IEC). Dieses kooperiert auch mit der ISO (International Organization for Standardization) und der ITU (International Telecommunication Union).

Die Normen, insbesondere für die Straßenbeleuchtung DIN EN 13201, haben als definierter "Stand der Technik" eine zentrale Orientierungsfunktion für die Planung der öffentlichen Straßenbeleuchtung. Die DIN EN 13201 wurde auf Grundlage des CIE:150 (CIE 2017) erstellt (Walkling/Stockmar 2013). Teil 1 der DIN EN 13201-1: Auswahl der Beleuchtungsklassen wurde hierbei länderspezifisch festgelegt, z.B. Frankreich FD X90-006-1; FD CEN/TR 13201-1:2005-05-01, Österreich ÖNORM CEN/TR 13201-1 in Verbindung mit ÖNORM O 1051, Schweiz SN TR 13201-1 mit der Ergänzung SLG 202:2005, Tschechien ČSN EN/TR 13201-1 (Gegenüberstellung in Tabelle 1-1 in Traverso et al. 2017 S.5). DIN EN 13201-1 wird für Deutschland aktuell überarbeitet[41]. Die Teile 2 bis 5 von EN 13201 (Teil 2: Gütemerkmale, Teil 3: Berechnung der Gütemerkmale, Teil 4: Methoden zur Messung der Gütemerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen, Teil 5: Energieeffizienzindikatoren) sind in den CEN-Staaten in nationale Normen umgesetzt worden. Eine grundlegende Problematik in Bezug auf Lichtverschmutzung besteht darin, dass diese Normen bislang ausschließlich minimale Lichtintensitäten in Teil 2 definierten, maximale Werte jedoch nicht festgelegt sind, und die empirischen Basis für die Bewertungsgrundlage nicht klar benannt wird ((Fotios/Goodman 2012; NABU 2011).

[38] https://www.lightingeurope.org (30.11.2017)
[39] https://www.din.de/de/wdc-proj:din21:258863507 (30.10.2017)
[40] https://www.din.de/de/wdc-beuth:din21:269487781 (30.10.2017)
[41] https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/fnl/projekte/wdc-proj:din21:266168178 (29.11.2017)

In Teil 5, der 2016 neu hinzugekommen ist, werden Energieeffizienzindikatoren definiert. Indikator der Leistungsdichte (en: power density indicator, PDI) D_P und der Indikator des jährlichen Stromverbrauchs (en: annual energy consumption indicator, AECI) D_E, die immer gemeinsam verwendet werden sollten. Die Leistungsdichte ergibt sich aus der Systemleistung der Beleuchtungsanlage, dem Wartungswert für die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke und der Größe der beleuchteten Fläche.

Es wird darauf hingewiesen, dass die in EN 13201-2 festgelegten Planungskriterien erreicht werden sollten, *„Überbeleuchtung aber auf das technisch mögliche Minimum reduziert*" (DIN EN 13201-5:2016-06 , S.5) werden sollte und aus *„energieeffizienztechnischer und umweltbezogener Perspektive* [...] *Korrekturmaßnahmen zur Verminderung jeglicher Überbeleuchtung ergriffen werden*" (DIN EN 13201-5:2016-06 , S.10) sollten. Überbeleuchtung liegt dann vor, wenn das Beleuchtungsniveau der nächsthöheren Beleuchtungsklasse überschritten wird (für die höchste Klasse: Beleuchtungsniveaus nicht um 50 % überschritten wird).

Beispielhaft werden für Straßen mit je einem Seitenstreifen an jeder Straßenseite (Straßenprofil E) typische Werte für die Indikatoren und Tabelle 8 und Tabelle 9 hier dargestellt:

Tabelle 8: Typische Werte für den Indikator der Leistungsdichte D_P in $mW \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$ bei Straßenprofil E

Beleuchtungsklasse	**Fahrbahnbreite [m]**	**Lampenart**				
		Quecksilber	**Halogen-Metalldampf**	**Natrium, elliptisch**	**Natrium, röhrenförmig**	**LED**
M3/P3	7	61	34	29	24-33	17-18
M4/P4	7	65	41	33-34	26-28	17
M5/P5	7	63	22	33	28-32	17

Tabelle 9: Typische Werte für den Indikator des jährlichen Stromverbrauchs *D*E in $kWh \cdot m^{-2}$ bei Straßenprofil E

Beleuchtungsklasse	Fahrbahnbreite [m]	Lampenart				
		Quecksilber	Halogen-Metalldampf	Natrium, elliptisch	Natrium, röhrenförmig	LED
M3/P3	7	3,8	2,3	1,8-2,0	1,6	1,0
M4/P4	7	3,2	2,0	1,5	1,2-1,5	0,7
M5/P5	7	2,0	0,6	1,0	0,7-1,0	0,5

Die Norm DIN EN 12464-2 für Arbeitsstätten im Außenbereich beschreibt Standards in Hinblick auf Sehkomfort und -leistung. Es werden Beleuchtungsstärken und Farbwiedergabewerte für unterschiedliche Arbeitsstätten angegeben, wobei die Bewertungsflächen dabei horizontal, vertikal oder geneigt sein können. Zudem werden Grenzwerte für die Gleichmäßigkeit und Blendwirkung der Beleuchtung gesetzt. Die Anforderungen können höher sein als die Größen und Gütemerkmale aus Arbeits- und Gesundheitsschutz (ASR). An Arbeitsplätzen die durchgehend besetzt sind, darf die Beleuchtungsstärke 50 lx nicht unterschreiten. Minimalwerte von 5lx sind für Parkplätze gegeben, während höhere Werte von 200 lx zum Beispiel im Flugzeugwartungsbereich, bei anspruchsvollen Installationen von Industrieanlagen, Lagerbereichen und Kraftwerken gegeben werden. Die Umgebungsbeleuchtung wird von Bereichen mit Sehaufgaben unterschieden. Die Gleichmäßigkeit darf nicht geringer als 0,10 sein. Der Farbwiedergabeindex muss mindestens 20 sein (für Natriumhochdruckdampflampen).

DIN EN 12193 gibt Mindestanforderungen für die Beleuchtung von Sportstätten an (Fördergemeinschaft Gutes Licht 2010b). Dabei wird nach drei Beleuchtungsklassen von Sportarten unterschieden (Klasse I: Hochleistungssport, Klasse II: Wettkämpfe mittleren Niveaus und Klasse III: Einfache Wettkämpfe, Training). Die meisten Außensportarten in Deutschland sind Fußball und Ski, dafür gelten folgende Beleuchtungswerte:

Tabelle 10: Mindestanforderungen nach DIN EN 12193. E_{mit}: mittlere horizontale Beleuchtungsstärke und Gleichmäßigkeit

	Fußball		Ski Alpin	
	mittlere horizontale Beleuchtungsstärke (lx)	Gleichmäßigkeit	mittlere horizontale Beleuchtungsstärke (lx)	Gleichmäßigkeit
Klasse I	500	0,7	100	0,5
Klasse II	200	0,6	30	0,3
Klasse III	75	0,5	20	0,2

Wegen der hohen Lichtmengen ist hier eine gute Planung mit Abschirmung besonders wichtig, um störende Lichtemmissionen zu vermeiden.

4.1.4. Verbraucherinformation

Eine Form der allgemeinen Verbraucherinformation stellt das Produktlabeling dar. Beispielhaft sei hier die Entwicklung für Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen für die Straßenbeleuchtung des Öko-Institutes genannt (Reintjes/Spengler 2013). Das „Fixture Seal of Approval“ der IDA ist ein bereits existierendes Prüfsiegel für Beleuchtungsanlagen, das weltweit circa 100 Leuchtenhersteller umfasst (IDA 2017b). Neben Labeling durch (unabhängige) Dritte können Unternehmen auch selbst zu einer einfacheren Erkennbarkeit von Produkten mit bestimmten Eigenschaften beitragen. So bietet die Firma OSRAM-Siteco bereits seit Jahren voll abgeschirmte Leuchten mit ULOR = 0 als “sternfreundliche” Leuchten mit einem entsprechenden Logo an.

Die französische Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturne (ANPCEN) schlägt ein Produktlabel für Straßenbeleuchtung (Lumen pro km) vor, wodurch die Begrenzung der Lichtmenge auch die Lichtintensität regulieren kann. Für die kleinste Straßenklasse (C5) wird ein Grenzwert von 7,5 lx angesetzt, das Label kann so die geringste nötige Beleuchtungsintensität nach EN 13201-2:2016 fördern (ANPCEN 2017b).

Auf öffentliche Stellen in ihrer Rolle als Verbraucher zielt das EU-Projekt GPP2020 (Green Public Procurement)[42], da, das zum Ziel hat, klimafreundliche öffentliche Beschaffungsverfahren zu fördern, darunter auch die Beschaffung von Straßenbeleuchtung. Kritisch anzumerken ist aus Lichtverschmutzungsgesichtspunkten, dass die Einhaltung der DIN EN 13201 in der aktuellen "EU Green Public Procurement Criteria" unter anderem empfohlen wird (Europäische Kommission 2012, S. 12), was wegen der höheren Lichtmengen und insbesondere der hohen Anforderungen an die Gleichmäßigkeit mehr Leuchten und damit mehr Licht erfordert (Rebound-Effekt) (Leuser et al. 2016; Saunders/Tsao 2012). Die Kriterien werden aktuell überarbeitet (Entwurf des vorläufigen Berichtes: Traverso et al. 2017) und in der aktuellen Version wird darauf verwiesen, dass nach den lokalen, regionalen und nationalen Verfahren entschieden werden soll, ob eine Straße beleuchtet werden soll oder nicht (E-Mail Rocío Rodríguez und Shane Donatello 07.12.2017 S.64 Technical report and criteria proposal (2 nd draft) August 2017).

4.1.5. Förderpolitik

Durch die Anreize, die Förderprogramme setzen, können Entwicklungen im Bereich der künstlichen Beleuchtung erheblich beeinflusst werden. Zentrales Mittel auf EU Ebene ist hier die digitale Agenda "Lighting the Future"[43] zur Förderung des Marktes von LED basierenden Festkörperlichtquellen (engl. Solid State Lighting (SSL)) (Europäische Kommission 2013a; b). Das Programm „Horizon 2020 Energy Efficiency"[44] „Energy 2020 – A strategy for competitive, sustainable and secure energy " (Europäische Kommission 2010) in dem auch energieeffiziente Außenbeleuchtung durch Forschung sowie marktbezogene Maßnahmen gefördert wird, hat durch Förderung von Energieeffizienz und Nachhaltigkeit als übergeordnetes Ziel den Klimaschutz. Das Programm „Intelligent Energy – Europe (IEE)"[45] förderte unter anderem zwischen 2003-2013 unterschiedlichste Projekte zum Thema Außenbeleuchtung, die vor allem auf Effizienz und Adaption abzielten, ohne jedoch Aspekte der Lichtverschmutzung weitgehend zu thematisieren. Zwischen 2007-2013 wurden im Rahmen des EU LIFE+-Programmes Kommunen, Forschungseinrichtungen und NGOs vermehrt mit Lichtverschmutzungsprojekten wie „Life at Night" finanziert. Auch der Aktionsplan für Umwelttechnologie (Environmental Technologies Action Plan, ETAP) hat bereits Umweltinnovationen für eine Reduktion der Lichtverschmutzung gefördert („Dial4Light"). Weitere bereits abgeschlossene Förderungen der EU sind in Meier/Pottharst (2013, S.20-25) zusammengefasst. Durch das interreg Förderprogramm der EU[46] werden aktuell verschiedene Europäische Projekte gestartet. Im Projekt „Nightlight"[47] arbeiten seit Anfang 2017 regionale Verwaltungen aus den Niederlanden, Ungarn, Spanien, Luxemburg, Dänemark, Slowenien und Spanien zusammen, um regionale Richtlinien zur Lichtverschmutzung zu verbessern. „Lighting Metropolis"[48] in Kopenhagen beschäftigt sich mit smarten Beleuchtungssystemen. Im Projekt „Dynamic Light"[49] werden dynamische Lichtlösungen entwickelt. Besonders an diesem Projekt ist, dass sich die LiTG hier erstmals an einem europäischen Forschungsvorhaben beteiligt und "*eine vergleichende Analyse [für Normung auf EU-Ebene und Best-Practice-Beispielen] durch* [...] *führt, ein Handbuch zur Interpretation der*

[42] www.gpp2020.eu (30.10.2017)
[43] https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/lighting-future (04.12.2017)
[44] https://ec.europa.eu/easme/en/energy%20 (30.10.2017)
[45] https://ec.europa.eu/easme/en/intelligent-energy-europe(30.10.2017)
[46] http://www.interreg4c.eu (30.10.2017)
[47] https://www.interregeurope.eu/nightlight/ (30.10.2017)
[48] http://lightingmetropolis.com (30.10.2017)
[49] http://www.interreg-central.eu/Content.Node/Dynamic-Light.html (30.10.2017)

europäischen Straßenbeleuchtungsnorm EN 13201 verfasst [... und] *Strategien zur Implementierung dynamischen Lichts in die EN 13201 entwickelt*" (LiGT 2017).

Auf Bundesebene werden Projekte im Bereich der öffentlichen Beleuchtung in Teilen durch Sanierungsförderungen der öffentlichen Straßenbeleuchtung mit LED-Leuchten durch die Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) und durch Förderung von Demonstrationsvorhaben innerhalb des Umweltinnovationsprogramms gefördert. Durch den Bundeswettbewerb „Energieeffiziente Stadtbeleuchtung" wurden weiterhin in Zusammenarbeit mit der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und dem Umweltbundesamt (UBA) Pilot- und Demonstrationsprojekte zur kommunalen Energieeinsparung bei der öffentlichen Beleuchtung gefördert und durch Kommunalwettbewerbe bewertet und publik gemacht[50]. Aktuell fördert die KfW Projekte im Bereich Außenbeleuchtung durch den IKK - Investitionskredit Kommunen[51]. Seit Anfang 2012 gibt es durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) die LED-Leitmarktinitiative (BMUB 2017, 2016), die auch den Wettbewerb „Kommunen im neuen Licht" beinhalten. Förderungen können hier, zum Beispiel durch bessere Lichtlenkung, die Minimierung der Lichtverschmutzung voranbringen. Weitere Projekte, die sich indirekt auch mit künstlicher Beleuchtung befassen und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bei der „Forschung nachhaltiger Entwicklung" (FONA), im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) bei der „energieeffiziente Stadt (EnEff:Stadt)" oder Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) angesiedelt, sind in Meier/Pottharst 2013, S.26-30 näher beschrieben. Bei allen genannten Förderprogrammen stellen Energie- und CO_2-Einsparung zentrale Ziele dar; die Minderung der Lichtverschmutzung spielt jedoch keine wesentliche Rolle (Meier/Pottharst 2013). Zudem werden für einige Förderungsprogramme die Einhaltung der DIN EN 13201 gefordert (z.B. WIBank 2015; Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2017; KfW 2013).

4.1.6. Regelungen in der EU und der Schweiz

Erste Bestrebungen zur Regulierung von Lichtverschmutzung entstanden auf kommunaler Ebene und hatten als primäres Ziel, die Dunkelheit des Nachthimmels für astronomische Beobachtungen zu schützen. Als Vorreiter gilt Flagstaff (Arizona) in den USA, wo bereits 1958 zum Schutz zweier astronomischer Observatorien "Outdoor Lighting Restrictions" in Kraft traten (IDA 2017a). Auch auf überörtlicher Ebene stand zunächst der Schutz des Nachthimmels im Mittelpunkt: So diente die weltweit erste nationale Regulierung der Lichtverschmutzung dem Schutz der Observatorien auf den Kanarischen Inseln (Königreich Spanien 1988; Marín et al. 2009). Mit den wachsenden Erkenntnissen über die vielfältigen Auswirkungen der künstlichen Beleuchtung verbreiterten sich auch die Zielstellungen und die Anzahl überörtlicher Regelungen ab der Jahrtausendwende. Als Vorreiter ist die italienische Provinz Lombardei mit ihrem 2000 verabschiedetem Lichtverschmutzungsgesetz zu nennen, welches beispielgebend für entsprechende Gesetzgebungen in weiteren italienischen Regionen sowie als Grundlage für die nationale Lichtverschmutzungs-Verordnung Sloweniens von 2007 diente.

[50] zum Beispiel https://youtu.be/x3ZBkbwuyB0 (04.12.2017)
[51] https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-soziale-Basisversorgung/Finanzierungsangebote/Investitionskredit-Kommunen-(208)/ (04.12.2017)

Bislang bestehen kaum international vergleichende Studien zu existierenden Regelungsansätzen für Lichtverschmutzung. Zu den Ausnahmen gehören Morgan-Taylor (2015) für den Vergleich England-Frankreich-Italien, Youyuenyong (2015) für England und mehrere, u.a. europäische, Länder) und Wagner et al. (2015) für Österreich und Nachbarländer. Ein plausibler Grund für die geringe Anzahl an Untersuchungen besteht in der vergleichsweise jungen Geschichte der Regelung von Lichtverschmutzung, insbesondere auf überörtlicher Ebene, hinzu kommen sprachliche und institutionelle Barrieren.

Noch weniger als die existierenden Regelungsansätze sind ihre Genese, ihre Handhabung in der Praxis und ihre Wirksamkeit systematisch untersucht. Entsprechende Studien, die tiefer greifen als es im Rahmen der hier folgenden Übersicht möglich ist, die auch aufschlussreiche Beispiele außerhalb Europas betrachten (so z.B. Südkorea, s. dazu Cha et al. 2014) und die detaillierte rechtliche Einordnungen für den deutschen Kontext vornehmen, wie in der Publikation "Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung" (Wagner et al. 2015) für Österreich geschehen, wären im Sinne der Auslotung von Best-Practice-Optionen im Rahmen der Erwägung bzw. Vorbereitung entsprechender Regelungen für die Bundesrepublik jedoch sehr zu empfehlen.

Nachfolgend werden bestehende Regelungen auf europäischer Ebene und in einzelnen Mitgliedstaaten sowie der Schweiz in alphabetischer Reihenfolge näher betrachtet, wobei keine Vollständigkeit gewährleistet werden kann (sprachliche und institutionelle Barrieren). Der Fokus liegt auf Ländern mit dezidierten Lichtverschmutzungsregelwerken. Wo möglich, wird auf die Frage der Wirksamkeit bzw. auf Stärken und Schwächen eingegangen. Als Informationsgrundlagen dienen neben den genannten Vergleichsstudien (sofern weiterhin aktuell) insbesondere Dokumentationen und Präsentationen von Fachtagungen zu Regelungen in einzelnen Ländern, Medienberichte sowie - sofern auf deutsch oder englisch verfügbar oder sprachlich anderweitig zugänglich - 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.

4.1.6.1. Regelungen und Beschlüsse Europäischer Institutionen

Europäische Union

Die Europäische Union hat keine dezidierten Lichtverschmutzungsregelungen, jedoch wirken sich insbesondere Regelungen zum Handel mit Beleuchtungsprodukten auf die Entwicklung der Außenbeleuchtung – und damit auf die Lichtverschmutzung – aus. 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).

Geprägt werden die Aktivitäten der EU im Beleuchtungsbereich durch die „20-20-20-Ziele" von 2008: Sie sehen die Etablierung einer integrierten Klima- und Energiepolitik vor, die dem Klimawandel entgegenwirkt und die Energiesicherheit sowie die Wettbewerbsfähigkeit der EU erhöht. Ein zentrales Instrument ist die EU-Ökodesign-Richtlinie, die Bestandteil sowohl der Wettbewerbs- und Handelspolitik als auch der Umwelt- und Energiepolitik der EU ist: Sie setzt den rechtlichen Rahmen für den Ausschluss von energieverbrauchsrelevanten Produkten vom Handel in der EU (Meier/Pottharst 2013, S. 13 f; vgl. auch Morgan-Taylor 2015, S. 171). Die Ökodesign-Richtlinie wurde 2011 durch das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz

(EVPG) in deutsches Recht umgesetzt (Meier/Pottharst 2013, S. 13 f; vgl. auch Morgan-Taylor 2015, S. 171).

Verordnung Nr. 245/2009 (Europäische Kommission 2009) definiert die Ökodesign-Anforderungen an Lampen, Leuchten und Vorschaltgeräte, die auch in der Außenbeleuchtung zum Einsatz kommen. Die darin enthaltenen verbindlichen Vorgaben beziehen sich aktuell nur auf die Energieeffizienz und den Quecksilbergehalt der Produkte, sie "*haben also unmittelbar für den Bereich der Lichtverschmutzung keine Bedeutung*" (Volgger 2015, S. 207); in Absatz (9) der Verordnung wird darauf verweisen, dass international anerkannter wissenschaftliche Methoden zur Messung der Umweltauswirkung von Lichtverschmutzung fehlen. Nach Einschätzung von Volgger (2015, S. 207) stünde es jedoch "*den Mitgliedsstaaten derzeit frei, andere Ökodesign-Anforderungen (eben etwa mit Bezug zur Lichtverschmutzung) aufzustellen, sofern sie die primärrechtlichen Schranken* [Stichwort: Warenverkehrsfreiheit, Erg. d. Verfasser] *beachten*." Neben den verbindlichen Anforderungen formuliert die Verordnung allerdings auch unverbindliche Vorgaben, so auch zu Lichtverschmutzung durch Straßenbeleuchtung (s. hierzu auch Volgger 2015, S. 207f). Lichtverschmutzung wird in Anhang II definiert als "*die Summe aller nachteiligen Auswirkungen von Kunstlicht auf die Umwelt einschließlich der Auswirkung von Abfalllicht*", welches 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, das heißt 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 werden unverbindliche Höchstwerte für den ULOR (in den oberen Halbraum abgestrahlten Lichtanteil) von optimal installierten Leuchten angegeben, differenziert nach Straßenbeleuchtungsklassen. 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 (Europäische Kommission 2009, Anhang VII, 3.1.).

Die Verordnung wirkt sich erheblich auf die Entwicklung der Außenbeleuchtung aus: Da bestimmte, teils 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. 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 (DoE 2017, Kapitel 3.3.3). Eine bedeutende Gefahr in Bezug auf die Entwicklung der Lichtverschmutzung besteht jedoch in dem unter Kapitel 3.3 erläuterten Rebound-Effekt. Morgan-Taylor (2015, S. 171) weist auf die Möglichkeit der EU hin, dass das von der Europäischen Kommission formulierte Vorsorgeprinzip (Europäische Kommission 2010) evtl. auf künstliche Beleuchtung mit hohem Blauanteil Anwendung finden könnte.

Eine weitere Regelung der EU mit Relevanz für Lichtverschmutzung ist die UVP-Richtlinie (RL 2011/92/EU – Europäische Union 2011; eine überarbeitete Fassung trat 2014 in Kraft: RL 2014/52/EU – Europäische Union 2014). Die Richtlinie "*verpflichtet die Mitgliedsstaaten vor der Genehmigung bestimmter öffentlicher und privater Projekte eine sog. Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen, deren Ergebnisse dann bei der Genehmigungsentscheidung zu berücksichtigen sind*" (Volgger 2015, S. 208). Gemäß Artikel 3 der Richtlinie (Fassung 2014: RL 2014/52/EU) sind die "*unmittelbaren und mittelbaren erheblichen Auswirkungen eines Projekts*" u.a. auf die Faktoren "*Bevölkerung und menschliche Gesundheit", "biologische Vielfalt*" und "*Sachgüter, kulturelles Erbe und Landschaft*" zu identifizieren, beschreiben und bewerten. Licht wird in Anhang IV (Fassung 2014: RL 2014/52/EU) explizit als eine der Emissionen aufgeführt, deren Umfang und Auswirkungen, sofern relevant, in den Beschreibungen der Projekte aufzuführen sind. In Deutschland regelt das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) die Umsetzung der UVP-Richtlinie der EU.

Europarat

Die parlamentarische Versammlung des Europarates verabschiedete am 12. November 2010 die Resolution 1776 zum Thema Lärm- und Lichtverschmutzung (Parlamentarische Versammlung des Europarates 2011b). Sie war das Ergebnis einer 2008 lancierten Initiative mehrerer Mitglieder der parlamentarischen Versammlung und basiert auf einem Bericht der parlamentarischen Umweltkommission, der zahlreiche Aspekte des Problems Lichtverschmutzung anspricht. Weiterhin nimmt sie Bezug auf die Aktivitäten der UNESCO, insbesondere der "Starlight Declaration" von 2002. Die Mitgliedstaaten werden 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 Standardisierung entsprechender Indikatoren, zur Festlegung hoher Umweltstandards im Beleuchtungsbereich sowie zur Integration des Themas in die Lehre an Schulen" (Meier/Pottharst 2013, S. 16). Dem Ministerkomitee des Europarates wird in den an die Resolution 1776 anknüpfenden Empfehlungen geraten, "die Mitgliedsstaaten 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, S. 17). Während das Ministerkomitee in seiner Stellungnahme 2011 den Empfehlungen weitgehend folgt, wird eine Rahmenkonvention aus finanziellen Gründen nicht umgesetzt (Parlamentarische Versammlung des Europarates 2011c).

4.1.6.2. Frankreich

Zentrale Grundlage für die Regelung von Lichtverschmutzung in Frankreich bilden die neuen Umweltschutzgesetzgebungen "Grenelle I" von 2009 und "Grenelle II" von 2010. Diese haben ihren Hintergrund im Umweltforum von Grenelle ("Grenelle de l'environnement") und formulieren Grundsätze und langfristige Ziele (Grenelle I) sowie Maßnahmen zu deren Erreichung (Grenelle II) (Französische Botschaft 2010). Das Thema Lichtverschmutzung wurde von der französischen Nachtschutz-Organisation ANPCEN (Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes) in den Grenelle-Prozess eingebracht und wird in Artikel 41 des ersten Gesetzes thematisiert (ANPCEN o.J.): „*Für die Emissionen künstlichen Lichts, die eine Gefahr oder erhebliche Störungen für den Menschen, Fauna, Flora oder Ökosysteme, eine Energieverschwendung darstellen oder die Beobachtung des Nachthimmels verhindern, sind*

Maßnahmen der Vorsorge, Unterdrückung oder Begrenzung zu treffen." (eigene Übersetzung). Das zweite Grenelle-Gesetz sieht u.a. eine Verstärkung von Maßnahmen gegen Lichtverschmutzung vor (Französische Botschaft 2010; ANPCEN o.J.).

Infolge der Grenelle-Gesetze wurde 2013 die international viel beachtete Verordnung "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" beschlossen und trat am 1. Juli 2013 in Kraft (République Francaise 2013; Morgan-Taylor 2015, S. 168 f). Die Verordnung zielt darauf, sowohl die Lichtverschmutzung als auch den nächtlichen Energieverbrauch zu senken, indem die Beleuchtung von Nicht-Wohngebäuden zeitlich eingeschränkt wird. So sollen 250.000 Tonnen CO2 sowie 200 Mio. Euro an Energiekosten pro Jahr eingespart werden (Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie 2013). Insbesondere müssen:

- die Innenbeleuchtung von Büro- und Geschäftsräumen spätestens eine Stunde nach Ende deren Nutzung ausgeschaltet werden,
- Schaufensterbeleuchtungen zwischen 1 und 7 Uhr ausgeschaltet sein bzw. bei längeren Öffnungszeiten spätestens eine Stunde nach Geschäftsschluss oder eine Stunde vor Geschäftseröffnung,
- Gebäudeanstrahlungen spätestens um 1 Uhr ausgeschaltet werden (einschalten frühestens bei Sonnenuntergang) (République Francaise 2013, Art. 2 & 3).

Von den Regelungen ausgenommen ist neben der Innenbeleuchtung von Wohngebäuden auch Sicherheitsbeleuchtung, sofern sie an Bewegungs- oder Einbruchmelder gekoppelt ist. Darüber hinaus haben Präfekte die Möglichkeit, Ausnahmeregelungen zu erlassen für Vorabende von Feiertagen, den Zeitraum der Weihnachtsbeleuchtung, bei besonderen lokalen Ereignissen oder für Orte mit außergewöhnlichem Tourismusaufkommen oder beständigen kulturellen Aktivitäten. Ebenso betrifft die Regelung nicht die Straßenbeleuchtung oder Werbebeleuchtung, für die im "Décret n° 2012-118 du 30 janvier 2012 relatif à la publicité extérieure, aux enseignes et aux préenseignes" (République Francaise 2012) gesonderte zeitliche Abschaltregelungen verfasst sind (Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie 2013). Die Kontrolle der Einhaltung der Regelung obliegt den Bürgermeistern und Präfekten. Im Falle der Nichtbeachtung können Strafen von bis zu 750 € verhängt werden (République Francaise 2013; Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie 2013).

Morgan-Taylor (2015, S. 168f, 173f) schätzt das Regelwerk insofern als Positivbeispiel ein, 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" Regelungsinstrument 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 weit reichenden Möglichkeiten für Ausnahmeregelungen.

Die ANPCEN hat die Einhaltung der Verordnung seit Inkrafttreten dreimal überprüft. In der jüngsten Überprüfung, die anderthalb Jahre nach Inkrafttreten des Gesetzes durchgeführt wurde, zieht sie eine gemischte Bilanz: Während die Regelungen in einigen Städten mit großer Wirkung angewandt werden, werden sie in anderen noch nicht umgesetzt bzw. ihre Umsetzung wird nicht (ausreichend) durch die Gemeinden und den Staat kontrolliert. Deutliche Verbesserungen werden

bei Städten konstatiert, die infolge der ersten, auch in den Medien aufgegriffenen Überprüfung von der ANPCEN angesprochen wurden (ANPCEN o.J. 2014, 2017e).

Weitere Gesetze und Verordnungen, in denen das Thema Lichtverschmutzung bzw. Außenbeleuchtung Berücksichtigung gefunden hat, listet die ANPCEN auf ihrer entsprechenden Themenseite (ANPCEN o.J.). Hierzu zählen u.a. Regelungen in den Bereichen Biodiversitäts- und Landschaftsschutz, Energiepolitik sowie Außenwerbung.

4.1.6.3. Italien

In Italien besteht keine nationale Regelung für Lichtverschmutzung, zahlreiche Regionen haben jedoch entsprechende Gesetze eingeführt. Übersichten der bestehenden regionalen Gesetze finden sich auf LoNNe (o.J.), Cinzano (2007) und in italienischer Sprache in CieloBuio (2004). Vorreiter war die Lombardei mit der bereits im Jahr 2000 beschlossenen "Legge della Regione Lombardia n. 17/00 del 27/03/2000" (Youyuenyong 2015). Die Gesetzgebung der Lombardei, auf die nachfolgend eingegangen wird, ist gemäß LoNNe (o.J.) die strengste, und diente zahlreichen anderen italienischen Regionen wie auch einigen Ländern (insbesondere: Slowenien) als Vorbild.

Das lombardische Gesetz wurde seit seinem Beschluss mehrfach – zuletzt: 2015 (Regione Lombardia 2015) – angepasst, gegenwärtig wird an neuen Ausführungsbestimmungen gearbeitet (persönliche Kommunikation mit Fabio Falchi 2017). Die Bestimmungen betreffen im Grundsatz sämtliche künstliche Beleuchtung im Außenraum (also öffentliche und private Beleuchtung), mit Ausnahme von kleinen Anlagen, temporären Installationen, Weihnachtsbeleuchtung, Verkehrs- und andere Signalbeleuchtung sowie Formen der Not- und Sicherheitsbeleuchtung (Art. 3 Abs. 1).

Zentral für das lombardische Gesetz ist die Regelung, dass Leuchten kein Licht oberhalb der Horizontalen abstrahlen dürfen und die energieeffizientesten Lampen (zum Zeitpunkt des ersten Beschlusses: Natriumhochdruckdampflampen, heute: nach aktuellem Stand der Technik) einzusetzen sind. Die eingesetzte Beleuchtung hat fotobiologische Anforderungen zu erfüllen, darf sich nicht verändernd auf den zirkadianen Rhythmus auswirken und hat auf die biologische Vielfalt und ökologische Gleichgewichte Rücksicht zunehmen. 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 Lichtverschmutzungs-Schutzzonen eingerichtet werden (max. Radius von der Beobachtungsstelle: 25km) (Regione Lombardia 2015 Art. 3,9; LoNNe 2017).

Der Region kommen koordinierende und beratende Funktionen zu, inkl. der Definition anzuwendender technischer Standards und der Förderung von Informationsinitiativen (Regione Lombardia 2015, Art. 4). Von der Region ist ein Geoinformationssystem mit Daten zu öffentlichen Außenbeleuchtungsanlagen (Leuchtenkataster) zu führen, die von den Gemeinden zur Verfügung zu stellen sind (Art. 5). Die Gemeinden sind zuständig für die Überwachung der Bestimmungen und können Verstöße mittels Geldbußen sanktionieren (Art. 6, 10).

Zur Wirksamkeit des lombardischen Gesetzes liegen unterschiedliche Informationen vor. Falchi (2011) konnte nachweisen, dass die Himmelsaufhellung trotz Zunahme der Leuchten konstant geblieben ist, was er auf den Erfolg des Gesetzes in der Lombardei zurückführt. Mohar und Hänel stellten in Beobachtungen vor Ort (jeweils 2017) zahlreiche Verstöße fest. Letzteres weist auf Schwierigkeiten in der Durchsetzung der beschlossenen Regelungen hin, was von Youyuenyong

(2015, S. 266f) als grundsätzliche Schwierigkeit der regionalen – statt nationalen – Regelung eingeschätzt wird.

Die Autonome Provinz Bozen – Südtirol beschloss im Jahr 2011 das Landesgesetz "Massnahmen zur Einschränkung der Lichtverschmutzung und andere Bestimmungen in den Bereichen Nutzung öffentlicher Gewässer, Verwaltungsverfahren und Raumordnung" (Nr. 4/2011)[52]. 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 2015a). Der entsprechende Beschluss der Landesregierung vom 30.12.2011 (Nr. 2057)[53] definiert einen umfassenden Anwendungsbereich: Als "öffentliche Außenbeleuchtung" gelten "*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*" (Art. 2; Ausnahmen gelten nach Art. 5 u.a. für Anlagen, deren Bau und Verwaltung von spezifischen Gesetzen geregelt ist, 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 (Art. 3). In den technischen Bestimmungen (Art. 4) ist u.a. die "*Verwendung von besonders effizienten Leuchtmitteln mit einer Lichtausbeute von mindestens 70 lm/W und möglichst geringem UV- und Blau-Lichtanteil sowie einer maximalen Farbtemperatur von 4000 K*" festgelegt und es wird bestimmt, dass Beleuchtungsanlagen so zu planen und zu bauen sind, dass der in den Sicherheitsnormen vorgesehene Mindestwert der durchschnittlichen Leuchtdichte nicht überschritten wird (d.h. das Normen-Minimium wird als Maximum festgelegt) (s. weiteres auch Sagerer 2015a). In einem Informationsportal zum Thema Lichtverschmutzung bietet die Provinz u.a. einen Leitfaden für die Erstellung kommunaler Lichtpläne in Südtirol (EURAC, Autonome Provinz Bozen – Südtirol, 2013).

4.1.6.4. Österreich

In der Republik Österreich besteht kein übergreifendes Regelwerk zu Lichtverschmutzung. Rechtliche Regelungen existieren bisher nur vereinzelt und in Bezug auf Lichtimmissionen und -emissionen, während beleuchtungstechnische Fragen bislang gänzlich ungeregelt sind (Wagner 2015, S. 13).

Es bestehen jedoch mehrere (außerrechtliche) Industrienormen, die ergänzend zur europäischen Straßenbeleuchtungsnorm EN 13201 in Österreich für die Planung der öffentlichen Beleuchtung von Bedeutung sind und die z.T. Aspekte der Lichtverschmutzung thematisieren (Wagner 2015; Amt der Oberösterreichischen Landesregierung 2013). Besonders hervorzuheben ist die seit 2012 gültige ÖNORM O 1052 "Lichtimmissionen – Messung und Beurteilung", in der maximal zulässige Grenzwerte für Lichteinwirkungen auf Mensch und Umwelt ebenso festgelegt sind wie Mess- und Berechnungsverfahren zur Kontrolle der Einhaltung der Grenzwerte (Wagner 2015, S.

[52]http://lexbrowser.provinz.bz.it/doc/de/194214/landesgesetz_vom_21_juni_2011_nr_4.aspx (30.10.2017)
[53]http://lexbrowser.provinz.bz.it/doc/de/195353/beschluss_vom_30_dezember_2011_nr_2057.aspx (12.12.2017)

13). Die Norm verfolgt den Ansatz, 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 (s. hierzu und zu den folgenden Ausführungen die Zusammenfassung der Wiener Umweltanwaltschaft 2014):

Tabelle 11: Betriebszeiten für „nicht sicherheitstechnischen Zwecken dienender Beleuchtung (NNB) aus der ÖNORM O 1052 (Wiener Umweltanwaltschaft 2014)

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

Darüber hinaus werden 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, eine Minimierung bläulichen Lichts und von UV-Strahlung; eine Bevorzugung von Leuchtmittel mit warmweißer Farbtemperatur (≤ 3000 Kelvin).

Weiter besteht mit der ÖNORM O 1053 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 RVSen (Richtlinien und Vorschriften über das Straßenwesen) behandelt: RVS 05.06.11 "Visuelle Störwirkungen – Kriterien zu Standorten von Informationsträgern" und "RVS 05.06.12 Visuelle Informationsträger für verkehrsfremde Zwecke" (Wagner 2015).

Einzelne österreichische Bundesländer befassen sich seit einigen Jahren intensiv mit dem Thema (Regelung von) 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 Landes-Immissionsschutzgesetz Luft (Wagner 2015; Kerschner/Schulev-Steindl 2014). Ebenso wurde 2013 ein "Leitfaden besseres Licht" veröffentlicht (Amt der Oberösterreichischen

Landesregierung, 2013), ein Lichtmessnetz zur langfristigen Beobachtung der Himmeslaufhellung etabliert sowie ein Lichtkataster für den Zentralraum des Bundeslandes erarbeitet (Land Oberösterreich 2017).

4.1.6.1. Schweiz

In der Schweiz hat das Thema Lichtverschmutzung seit der Publikation der „Empfehlungen zur Vermeidung von Lichtemissionen“ (Klaus et al. 2005) durch das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) eine breitere Resonanz gefunden, und verschiedene Kantone und Städte haben in der Folge weitere Informationsbroschüren erstellt. Es gibt kein direktes Gesetz gegen Lichtverschmutzung, doch wird in dem oben genannten Dokument auf die Anwendbarkeit unterschiedlicher Gesetze zur Vermeidung von Lichtverschmutzung hingewiesen. Hierzu gehören (Klaus et al. 2005):

- das Umweltschutzgesetz, welches nach Art. 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 o.g. Publikation des BUWAL gestützt sprach sich das schweizerische Bundesgericht für die Abschaltung einer ganzjährigen Zierbeleuchtung im Nachtruhezeitfenster von 22-06 Uhr (Sagerer 2015b, S. 252).
- das Natur- und Heimatschutzgesetz, welches in Bezug auf die Auswirkungen übermäßiger Lichtemissionenen auf die nächtliche Landschaft anzuwenden ist, da diese auch das heimatliche Erscheinungsbild beeinträchtigen.
- das Raumplanungsgesetz mit seinen Grundsätzten 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 Bundesamt für Umwelt (BAFU), die “Empfehlungen zur Vermeidung von Lichtemissionen” zu aktualisieren und zu erweitern. Die Grundlagen für die zu erarbeitende Vollzugshilfe wurden in einem Prozess gestützt auf Begleit- und Arbeitsgruppen zusammengetragen (BAFU 2017b). Inzwischen ist die “Vollzugshilfe Lichtemissionen” in der Konsultation und soll 2018 veröffentlicht werden (BAFU 2017a).

Zudem finden sich in einzelnen Kantonen Regelungen zu Lichtemissionen bzw. Beleuchtung. Besonders präsent ist laut Sagerer (2015b) das Verbot von Skybeamern.

4.1.6.2. Slowenien

In der Republik Slowenien wurde 2007 auf Grundlage insbesondere des dortigen Umweltschutzgesetztes die landesweit gültige “Verordnung über die Grenzwerte der Lichtverschmutzung der Umwelt” (Verordnung Nr. 4162) erlassen (Republik Slowenien 2007; Schlager 2015a). Die Verordnung wurde in einem ca. 12-jährigen Prozess unter Einbezug von Experten aus unterschiedlichen Fachrichtungen erarbeitet (Marchand 2011; Mohar 2015b). Ziele sind 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 Stromverbrauches der die Lichtverschmutzung verursachenden Lichtquellen” (Republik Slowenien 2007, I. Art. 1). Lichtverschmutzung wird dabei verstanden als “die Lichtemission aus den Lichtquellen, durch welche die natürliche Beleuchtungsstärke der Umwelt erhöht wird” (Republik Slowenien 2007, I. Art. 3), d.h. jegliche künstliche Beleuchtung wird als Lichtverschmutzung gewertet.

Der Ansatz der Verordnung ist vergleichbar mit den Regelungen in der Italienischen Provinz Lombardei (Mohar 2015b) und adressiert sowohl öffentliche als auch privat betriebene Beleuchtungsquellen im Außenraum. Ausgenommen sind verschiedene Formen der Sicherheitsbeleuchtung, Verkehrssignale, temporäre Festbeleuchtung sowie unter bestimmten Bedingungen Lichtquellen mit einem Anschlusswert von weniger als 25 W (I. Art. 2(2)).

Festgesetzt sind v.a. Grenzwerte für folgende Parameter (Republik Slowenien 2007; Mohar 2007; Schlager 2015a):

- Abstrahlungen über die Horizontale (grundsätzlich sind mit wenigen Ausnahmen Lichtquellen mit 0% Emissionen über der Horizontalen zu verwenden; gemäß Marchand (2011) wurde 2010 infolge Einwänden des Weltfußballverbandes Fifa hinsichtlich der Beleuchtung in einem neuen Stadion die entsprechende Grenze auf 0,5% erhöht),
- den jährlichen Stromverbrauch der öffentlichen (Straßen-)Beleuchtung (pro Einwohner pro Kommune für öffentliche Beleuchtung: 44,5 kWh, pro Kopf für öffentliche Straßen und Autobahnen: 5,5 kWh),
- E-Anschlusswerte für die Beleuchtung von Industrie- und Gewerbeflächen, Fassaden, Kulturdenkmälern und Werbeobjekten (z.B. für Produktionsstätten: 0,090 W/m2 während der Durchführung des Produktionsprozesses sowie 30 Minuten vor Beginn und nach Ende der Betriebszeit und 0,015 W/m2 außerhalb der Produktionszeit, für Geschäftsgebäude 0,075 resp. 0,015 W/m2, für Einrichtungen wie Schulen 0,060 resp. 0,015 W/m2; für Werbetafeln nimmt die maximal zulässige Leistung pro m2 mit der Größe der Fläche ab, z.B. 17 W/m2 für Flächen größer 18,5 m2 und 80 W/m2 für Flächen kleiner 2 m2),
- die Leuchtdichte von Fassaden- und Kulturdenkmalbeleuchtung (max. 1 cd/m2 im Durchschnitt der Gesamtfläche des beleuchteten Fassadenteils).

Für Arbeitsplätze im Freien (Flughäfen, Häfen, Eisenbahn) ist sicherzustellen, dass die durchschnittliche vorhandene Beleuchtungsstärke nicht 10% der für Arbeitsplätze im Freien geltenden Standardbeleuchtungsstärke überschreitet (Ausnahmen sind für Sondervorschriften vorgesehen). Für bestimmte Werbebeleuchtungen gelten Abschaltzeiten von 24 Uhr bis 5 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: Als Grund wird genannt, dass die Verordnung noch vor der Verbreitung von LED in der Außenbeleuchtung entwickelt wurde (Mohar 2007, 2015b).

Zur Erlangung von Baugenehmigungen ist die Einhaltung der in der Verordnung festgelegten Grenzwerte und Auflagen erforderlich (Republik Slowenien 2007, Abschnitt III). Im Sinne des Lichtverschmutzungs-Monitorings 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 (Abschnitt IV). Für Verstöße gegen die Verordnung sind Strafen in Höhen von 600 bis 12.000 Euro vorgesehen (Abschnitt VI). Die Übergangsbestimmungen (Abschnitt VII) sehen Fristen für die Anpassung bestehender Beleuchtung an die Verordnung vor (z.B. für Sportstätten und gewerbliche Beleuchtung bis Ende 2012, also ca. 5 Jahre nach Inkrafttreten der Verordnung).

Mohar (2015b) schätzt das Gesetz in zahlreichen Punkten als erfolgreich ein. Insbesondere zeige es Wirksamkeit hinsichtlich einer Reduktion der Abstrahlungen über der Horizontalen sowie Energieeinsparungen (40-60%, Mohar 2011), beträchtliche Verbesserungen seien bei der Beleuchtung von Straßen, Gewerbegebieten und historischen Bauten (v.a. Kirchen) zu konstatieren. Bedeutende Unzulänglichkeiten stellt er hinsichtlich der Regulierung beleuchteter

Werbetafeln (als Problematik wird genannt: zu viele unterschiedliche Akteure) sowie der – im Rahmen der Verordnung nicht geregelten – spektralen Zusammensetzung von Beleuchtung (Ausbreitung von "neutralweißer" Beleuchtung mit 4000K) fest (Mohar 2015b). Eine Schwierigkeit besteht gemäß Bizjak (zitiert in Marchand 2011) für Kommunen jenseits der Hauptstadt Ljubljana in der Umsetzung der geforderten Umrüstungen der Straßenbeleuchtung zu den gesetzten Fristen: Die notwendigen Finanzmittel fehlen und zugesagte Förderungen seien ausgeblieben. Darüber hinaus besteht nach Einschätzung der Gutachter eine grundlegende Problematik in der Nutzung von E-Anschlusswerten als Bemessungsgröße, da Beleuchtung immer energieeffizienter wird, sodass mit einer geringeren Wattzahl zunehmend hell beleuchtet werden kann.

So kommt auch der slowenische Rechnungshof in seinem jüngst veröffentlichten Prüfbericht zur Umsetzung der Verordnung durch das Umweltministerium im Zeitraum 2007-2017 zu dem Ergebnis, dass bedeutende Unzulänglichkeiten in der Vermeidung von Lichtverschmutzung bestehen. Die festgelegten Grenzwerte werden als z.T. nicht mehr zielführend eingeschätzt, insbesondere seien die festgelegten E-Anschlusswerte aufgrund der technischen Entwicklung nicht mehr angemessen, ebenso wird die Nichtexistenz von Bestimmungen hinsichtlich Lichtspektren bzw. Farbtemperatur angesichts wissenschaftlicher Erkenntnisse zu Auswirkungen von Beleuchtung auf die menschliche Gesundheit bemängelt. Zudem wird das Monitoring durch das Umweltministerium bemängelt (Court of Audit of the Republic of Slovenia 2017a; b). Nach Einschätzung von Mohar (persönliche Kommunikation: E-Mail vom 9.12.2017) wird die Verordnung eine Abänderung erfahren, in der die Grenzwerte für E-Anschlusswerte gesenkt werden und die spektrale Zusammensetzung von Beleuchtung im Sinne einer Einschränkung "weißer" (4000K) Beleuchtung geregelt wird.

4.1.6.3. Spanien

Ähnlich wie in Italien besteht auch in Spanien kein dezidiertes Lichtverschmutzungs-Gesetz für das gesamte Land, sehr wohl gelten jedoch in mehreren Regionen 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 S. 267f). Eine Übersicht findet sich auf der Website des Forschungsnetzwerks LoNNe (LoNNe 2017).

Zum Schutz des Observatoriums Roque de los Muchachos auf der Kanaren-Insel La Palma, das mit dem Gran Telescopio Canarias eines der größten Teleskope beherbergt, wurde im Jahre 1988 ein „Ley del Cielo" (Himmelsgesetz; Königreich Spanien 1988) erlassen, das auf der Insel La Palma und für den nordwestlichen Teil Teneriffas gilt (Marín et al. 2009; Youyuenyong 2015, S. 267 f). Es wurde im Jahr 1992 durch ein königliches Dekret konkretisiert (Real Decreto 243/1992). 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 Prozent der Gesamtstrahlung betragen darf. Nicht definiert ist allerdings eine maximal erlaubte Lichtmenge. Da die Technik der Natriumdampfniederdrucklampen ausläuft, werden vermehrt bernsteinfarbene (PC amber) LED-Lampen eingesetzt. Eine beratende und kontrollierende Funktion hat das Büro zum Schutz des Nachthimmels (OTPC), das an das Astronomische Institut der Kanaren angeschlossen ist. Messungen weisen auf die Wirksamkeit der Maßnahmen hin: Die Himmelshelligkeit hat seit

Erlass des Gesetzes nicht wesentlich zugenommen, obwohl mehr Leuchten installiert wurden (Pedani 2004).

In mehreren Regionen Spaniens wurden seit der Jahrtausendwende ebenfalls Gesetze gegen Lichtverschmutzung erlassen, wobei jenes in Katalonien auch den Schutz der nächtlichen Natur beinhaltet (Generalitat de Catalunya 2012). Eine der treibenden Kräfte hinter der Entstehung des Gesetzes war die katalanische Nachtschutz-NGO Cel Fosc (LoNNe 2017). Das Gesetz basiert auf den "Guidelines for minimizing sky glow" der International Commission on Illumination CIE 126:1997 (CIE 1997) und teilt ganz Katalonien in vier Lichtschutzzonen, in denen unterschiedliche Regelungen zum Schutz des nächtlichen Himmels gelten. In Schutzgebieten und der Umgebung eines Observatoriums auf dem Berg Montsec in der dunklen nordwestlichen Ecke Kataloniens dürfen nur noch voll abgeschirmte Leuchten und gelbe Lampen installiert werden. Das Observatorium auf dem Montsec wurde eigens als Referenzort errichtet. Neben astronomischen Forschungseinrichtungen und Messstationen, u.a. zur Überwachung der Entwicklung der Lichtverschmutzung, verfügt es über eine öffentliche Sternwarte mit Planetarium, in der die Öffentlichkeit mehr über Astronomie erfahren und die Qualität des Sternhimmels beobachten kann (OAdM 2017).

In der Region Andalusien gibt es ebenfalls ein Gesetz, durch das beispielsweise der Himmel der Observatorien Calar Alto (ehemals deutsch-spanisches Observatorium) und Sierra Nevada geschützt werden soll. Obwohl auf dem Berg Calar Alto in Andalusien die größten Teleskope Kontinentaleuropas stehen, war die Arbeit des Observatoriums lange Zeit nicht vor der Lichtverschmutzung geschützt. Neben einigen benachbarten Ortschaften verursacht vor allem die Stadt Almeria die Aufhellung des Himmels, die sich in den letzten Jahren erheblich verstärkte. Die andalusische Regionalregierung hat im Jahre 2007 die Reduzierung der Lichtverschmutzung in das Umweltgesetz "Gestión Integrada de la Calidad Ambiental" aufgenommen und im Jahre 2010 ein Dekret mit Regelungen erlassen (Junta de Andalucía o.J.). Danach wird in Andalusien eine Zonierung mit unterschiedlichen Schutzkriterien eingeführt, wobei um die Observatorien in der Sierra Nevada und um den Calar Alto nochmals strengere Regelungen gelten. Es wurde eine umfangreiche technische Anleitung zur Erfüllung der Verordnungen erstellt (Junta de Andalucia 2012). Eine Problematik besteht darin, dass die maximale Lichtmenge nicht begrenzt ist. Generell erzeugt die Praxis der Straßenbeleuchtung in Spanien höhere Beleuchtungsniveaus als beispielsweise in Deutschland (Sánchez de Miguel/Zamorano 2008). Dies zeigt, dass das reine – wenn auch vollständige – Abschirmen von Leuchten nicht als alleinige Maßnahme gegen Lichtverschmutzung ausreicht, da das Licht reflektiert wird und zur Himmelshelligkeit beiträgt (s. hierzu auch Abbildung 34).

Abbildung 34: Straßen mit voll abgeschirmter Beleuchtung in Sta. Cruz de La Palma (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel)

4.1.6.4. Tschechische Republik

Als Teil eines Gesetzes zur Reinhaltung der Luft führte die Tschechische Republik 2002 als erstes Land ein nationales Gesetz gegen Lichtverschmutzung ein (Lorenzen 2017; Hollan 2002; Dark Sky Czech Republik 2013). Als Lichtverschmutzung definiert wird jegliche Beleuchtung, die über die zu erhellenden Bereiche hinausgeht, insbesondere wenn sie über die Horizontale gerichtet ist (eigene Übersetzung a.d. Englischen nach der auszugsweisen Übersetzung des Gesetzes von Hollan 2002). Das in Bezug auf Lichtverschmutzung allgemein gehaltene Gesetz sieht vor, dass in einer Verordnung Bestimmungen auszuführen sind, u.a. hinsichtlich Gebieten, in denen keine Lichtverschmutzung zulässig ist, weiterhin Maßnahmen zur Begrenzung der Lichtverschmutzung sowie Obergrenzen für Lichtverschmutzung (Hollan 2002, §55 (1)).

Für die folgenden Ausführungen ist einschränkend anzumerken, dass keine vollständige Übersetzung des Gesetzestextes auf Deutsch oder Englisch vorliegt und trotz eingehender Recherche die Informationslage nur bruchstückhaft und teils uneindeutig ist.

Kritisiert wurde bzw. wird seitens der tschechischen Dark-Sky-Bewegung, dass diese Konkretisierung bislang ausgeblieben sei und die Wirksamkeit des Gesetzes damit erheblich geschmälert wird (Dark Sky Czech Republik 2013). Ebenso hält Hollan (2004, S. 11–12) fest, dass der Bereich Lichtverschmutzung in einer Überarbeitung des Gesetzes 2003/04 auf ein Minimum reduziert wurde. 2012 wurde das Thema Lichtverschmutzung laut tschechischem Wikipedia-Eintrag zu „Světelné znečištění“ (poln. Lichtverschmutzung) (Wikipedia 2017) vollständig aus dem Gesetz gestrichen, weitere Informationen und eine Quellenangabe hierzu fehlen jedoch. Demgegenüber findet sich in einem für das Amt für Umweltschutz des Fürstentums Liechtenstein erstellten Bericht zum Thema Lichtemissionen eine Zusammenfassung zentraler Regelungsinhalte

der tschechischen Gesetzgebung (RENAT AG 2008; s. darauf gestützt auch Schlager 2015b), für die jedoch ebenfalls keine Quellenangabe erfolgt.

4.1.6.5. Vereinigtes Königreich

Im Vereinigten Königreich besteht keine eigenständige Lichtverschmutzungs-Regelung, jedoch finden unerwünschte Auswirkungen künstlicher Beleuchtung Berücksichtigung in national gültigen Regelwerken zu übergeordneten Zielstellungen (Morgan-Taylor 2015, S. 167ff).

Das zentrale Instrument ist der in England und Wales gültige "Clean Neighbourhoods and Environment Act 2005" (Youyuenyong 2015, S. 11; Vereinigtes Königreich 2005). Das 2005 parlamentarisch beschlossene 'Gesetz für saubere Nachbarschaften und Umwelt' berücksichtigt in Abschnitt 102 'von Grundstücken ausgehende Lichtemissionen, die gesundheitsschädlich oder störend sind', als eine mögliche Form der Belästigung ("statutory nuisance"). Damit wurde die Grundlage geschaffen, dass lokale Verwaltungen in Beschwerdefällen Untersuchungen einleiten können und dass rechtlich gegen Lichtemissionen vorgegangen werden kann (Youyuenyong 2015, S. 299; DEFRA 2006). Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn Licht von Parkplätzen oder Sportstätten in Hausfenster eindringt. Es gelten jedoch recht umfangreiche Ausnahmen, so finden Lichtemissionen keine Berücksichtigung, wenn sie von Grundstücken ausgeht, 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 (Morgan-Taylor 2015; Youyuenyong 2015). Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass keine festen Bemessungsgrößen zur Feststellung der Störwirkung bestehen: diese ist von Fall zu Fall durch öffentliche Gesundheitsexperten festzustellen (s. auch DEFRA 2006, S. 27ff).

Daneben gibt es weitere Regelungen, die jeweils in bestimmter Hinsicht auf künstliche Beleuchtung bzw. Lichtverschmutzung Anwendung finden können, z.B. im Bauplanungsrecht. Orientierungshilfe bietet z.B. die Website "When Is Light Pollution Relevant to Planning" des Department for Communities and Local Government (2014).

Grundsätzlich sehen Morgan-Taylor (2015) und Youyuenyong (2015) im Hinblick auf eine ganzheitliche Regulierung der Lichtverschmutzung die aktuelle Situation kritisch, da sie fragmentiert ist und insgesamt nur Teilaspekte der Lichtverschmutzung regelt, sodass sie der Bandbreite der Problematik nicht gerecht werden kann.

4.2. Handlungsoptionen

Um eine angemessene Beleuchtung zu erreichen, die nicht intendierte Auswirkungen von künstlichem Licht im Außenbereich reduziert, sollten die verschiedenen Funktionen und Auswirkungen der künstlichen Beleuchtung ganzheitlich sowie räumlich und zeitlich differenziert betrachtet werden. In diesem Kapitel werden die technischen und regulatorischen Handlungsoptionen aus Kapitel 4.1 zusammengefasst diskutiert und daraus mögliche direkte Parameter für eine Reduzierung der Lichtverschmutzung entwickelt (4.2.1). Eine Umsetzung der dargestellten möglichen Parameter in Deutschland kann mit einer Reihe von Handlungs- und Regelungsinstrumenten erreicht werden, für die Optionen zur Umsetzung vorgeschlagen werden (4.2.2). Die Betrachtung der Gesamtbeleuchtungssituation, Informationsvermittlung, förderpolitische Anreize, sowie eine erhöhte Verbindlichkeit der Instrumente sind dabei grundlegende Elemente für eine Reduzierung der Lichtverschmutzung.

4.2.1. Darstellung möglicher Parameter für Verwendung in Regulierungen der Lichtverschmutzung

Für eine Vermeidung und Reduzierung der Lichtverschmutzung steht ganz grundlegend bei der Vermeidung von Lichtverschmutzung nicht der totale Verzicht auf künstliche Beleuchtung im Außenbereichen im Vordergrund, sondern der Einsatz einer bedarfsgerechten Beleuchtung, wie in den Empfehlungen „*das richtige Licht - in der richtigen Menge, am richtigen Ort und zur richtigen Zeit*“ der International Dark-Sky Association (IDA), s.a. Schroer/Hölker (2014). Diese Meinung wird mittlerweile auch von großen Leuchtenherstellern wie Philips[54] und Lichtplanern wie dpa lighting consultants[55] vertreten. Wichtig hierfür ist die Kenntnis der Gesamtbeleuchtung (öffentlich und privat) und die vorherrschende Umgebungshelligkeit an einem Ort. Die Definition von Gebieten mit unterschiedlichen Charakteristiken und Beleuchtungsbedarfen als Umgebungszonen (z.B. unterschiedlich dicht besiedelte und genutzte Gebiete) (CIE 2017; BAFU 2017a; LAI 2012) kann helfen, eine bedarfsgerechte nachhaltige Beleuchtung zu etablieren.

Hinweise zum Vorgehen für die Erarbeitung eines grossräumigen Beleuchtungskonzepts mit Berücksichtigung der Belange der Lichtverschmutzung finden sich zum Beispiel in Anhang A4 (BAFU 2017a) und in dem Leitfaden zur Begrenzung der Störlichkeitswirkung von Außenbeleuchtungsanlagen CIE 150:2017 (CIE 2017). Als erstes sieht dieser eine Bestandsaufnahme mit einer Unterteilung der Gebiete nach Funktionen & Nutzung (Wohnen, Gewerbe etc.) und Identifikation & Evaluierung von bestehenden Verkehrsachsen, Naturräumen und deren Beleuchtung vor. Darauf folgen die Konzeption mit der Definition von Zielen und Leitideen in einem Raum- und Zeitbezug des betrachteten Gebietes sowie die Erarbeitung eines detaillierten Konzeptes und Planungsrahmens. Zuletzt beinhaltet es die Umsetzung mit Hilfe von Rechtsinstrumenten, der Zusammenarbeit verschiedener Akteure, die Realisierung, und das Controlling. Die Evaluierung von aktuellen und geplanten Beleuchtungssituationen kann mit Hilfe von lichttechnischen Modellierungen erleichtert werden. Brons et al. (2008) haben hierfür eine Methode entwickelt (Outdoor Site-Lighting Performance (OSP). Es werden Lichtübertritt und Lichtemissionen in einem vorher definierten Lichtraum („Box“) berechnet, wodurch unterschiedliche Lichtdesignansätze miteinander verglichen werden können, detaillierte Angabe

[54] http://www.lighting.philips.com/main/systems/system-areas/gas-stations-petrol/parking-road-car-wash-lighting (30.10.2017)
[55] http://www.dpalighting.com/ (30.10.2017)

zur Berechnung sind unter Rensselaer Polytechnic Institute (2008) zu finden . Das Projekt wurde von den Beleuchtungsherstellern Acuity Brands Lighting, Lumec, Philips Lighting, und R-Tech Schreder finanziert (Lighting Research Center 2009), allerdings ist es nicht weit verbreitet. In der in Deutschland gängigen Lichtsoftware wie DIALux und RELUX ist die Methode nicht direkt implementiert. Bei DIALux ist da so, da diese Programme eigene Algorithmen haben, die auch Werte für die Blendung liefern können (persönliche Kommunikation mit DIALux 11.10.2017 E-Mail); bei RELUX ist es nicht möglich, die Methode zu integrieren (persönliche Kommunikation mit RELUX 18.10.2017 E-Mail). Eine ähnliche Methode ist das UFR-Verfahren (Abstrahlung und Reflexion in horizontaler Richtung, engl. Upward Flux Ratio), dass den gesamten (also auch vom Boden reflektierte) Lichtstrom berechnet. Beschrieben ist das Verfahren in LiTG 12.3 und in CIE:150 (CIE 2017), siehe auch Kapitel 4.1.2.1. Das Verfahren geht auf die Vereinigung der französische Beleuchtungsingenieure zurück (Les Nuisances dues à la Lumiere 2006). Soweit bekannt, ist es in keinen der üblichen Lichtrechenprogrammen integriert, zudem sind keine Grenzwerte definiert.

Zur Evaluierung von verschiedenen Beleuchtungsszenarien eignet sich auch der Lichtverschmutzungsindex „Light Pollution Index“ (LPI) an (Saraiji/Oommen 2012). Mit diesem können zum Beispiel Fassadenbeleuchtung und Straßenbeleuchtung aufeinander abgestimmt werden. In der gängigen Praxis werden diese meist komplett getrennt voneinander betrachtet, obwohl sie sich gegenseitig beeinflussen (Saraiji/Oommen 2012), wobei durch das Fehlen von Grenzwerten eine Evaluation schwierig ist und allein verschiedene Beleuchtungsszenarien miteinander verglichen werden können.

Auch die verschiedenen Funktionen der künstlichen Beleuchtung, wie Verkehrssicherheit und Ästhetik, sowie ihre Auswirkungen, z.B. auf die Natur und den Energieverbrauch, sollten vollständig berücksichtigt werden. Bei der Festlegung von Parametern hat sich aus Erfahrungen in anderen Ländern gezeigt, dass es zweckmäßig ist, diese möglichst direkt zu definieren sind (z.B. nicht indirekt über den Energieverbrauch).

Notwendigkeit

Grundsätzlich sollte zunächst bei der Planung die Notwendigkeit einer Außenbeleuchtung überprüft werden. Hierfür müssten Kriterien entwickelt werden, welche 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) in Betracht nehmen. Räumliche Zonierungen, wie z.B. in der spanischen Provinz Katalonien etabliert, ebenso wie zeitliche Begrenzungen, wie z.B. in Frankreich, bieten Umsetzungsmöglichkeiten. Private, also auch kommerzielle, Beleuchtung kann dabei nicht vernachlässigt werden (BAFU 2017a). Doppelbeleuchtungen (z.B. die öffentliche Straßenbeleuchtung und kommerzieller Beleuchtung in einem Gebiet) und zeitliche Veränderungen des Beleuchtungsbedarfes (z.B. durch Rückbauten) können Beleuchtung an einem Standort unnötig machen (von Fellenberg 2013).

Abstrahlung / Abschirmung

Verschiedene Modellrechnungen (Gestang 1989; Cinzano 2000; Luginbuhl et al. 2009; Baddiley/Werbster 2007; Opto Services 2007) haben gezeigt, dass zur Reduzierung der diffusen Lichtglocken über den Städten vor allem die **Abstrahlung in horizontaler Richtung** unterbunden werden muss. Dies reduziert gleichzeitig die Blendung. Diese Abstrahlung einer Leuchte wird meist durch das "**upward light output ratio" ULOR** (CIE 2017) beschrieben, das ist das Verhältnis des in den oberen Halbraum der Leuchte abgegebenen Lichtstroms zum gesamten abgegebenen Lichtstrom der Leuchte. Ausschlaggebend für die Praxis ist allerdings die Abstrahlung im installierten Zustand, was früher als $ULOR_{inst}$ (ULOR installed) bezeichnet wurde, jetzt als **"upward light ratio" ULR** (CIE 2017). Zur Verdeutlichung: eine Leuchte mit ULOR=0 strahlt, wenn sie schräg montiert wird, durchaus Licht in der Horizontalen ab, es ist dann ULR > 0. ULR lässt sich für Straßenszenen mit Programmen für die Beleuchtungsplanung (Dialux, Relux) berechnen.

Abbildung 35: Beispiel schräg (links) und horizontal (nur dann ist ULR = 0) montierte voll abgeschirmte Leuchte mit ULOR = 0 (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel)

Leuchten verhindern also nur bei exakt horizontaler Montage eine Abstrahlung in der Horizontalen. In der DIN EN 12301 wird die Abstrahlung durch die **Lichtstärkeklassen G** beschrieben, von denen nur die Klasse G6 keine Abstrahlung in den oberen Halbraum zulässt, zudem dürfen im Winkelbereich bis 10° unter der Horizontalen maximal 100 cd/klm, im Bereich bis 20° unter der Horizontalen maximal 350 cd/klm abgestrahlt werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Abstrahlcharakteristika einer Leuchte genauer zu definieren, ist das sog. "Backlight-Uplight-Glare" (BUG) System (IESNATM-15-11), das durch die International Dark Sky Association (IDA) und Illuminating Engineering Society (IES) in den USA entwickelt wurde (Illuminating Engineering Society 2011). Danach wird die Abstrahlung einer Leuchte in drei Bereiche eingeteilt: das Backlight beschreibt die rückwärtig gelenkte Lichtmenge, die nicht unmittelbar für den Beleuchtungszweck benutzt wird. Uplight beschreibt die nach oben

angegebene Lichtmenge für verschiedene Winkelbereiche. Und Glare beschreibt die in bestimmte Winkelbereiche, die besonders blendend erscheinen, abzugebende maximale Lichtmenge, wobei es zusätzlich noch eine Regel für symmetrisch abstrahlende Leuchten gibt, die sich vor allem in der Zone unterscheiden. Als Kennzahl werden für Leuchten die drei Werte in Lumen angegeben (z.B. B2 U0 G1). Dieses System wurde auf der IDA-Versammlung 2017 als das bessere System zu ULR diskutiert (persönliche Kommunikation Dr. A. Hänel).

Die amerikanische Beleuchtungsvereinigung IESNA unterscheidet "**fully shielded**" als Leuchten, die kein Licht oberhalb der Horizontalen abgeben (NLPIP 2007). Bei "**full cutoff**"-Leuchten ist wie bei G6 zusätzlich die Abstrahlung zwischen der Horizontalen und bis zu 10° darunter auf 10 cd/klm beschränkt. Diese Bezeichnungen können für die Beantragung von Schutzgebieten nach den Kriterien der International Dark-Sky Association (IDA) von Interesse sein.

Abbildung 36: Links: voll abgeschirmte (Mitte) und zwei teilweise abgeschirmte Leuchten (oben und unten), Mitte: eine nicht abgeschirmte Leuchte, rechts: "Maiskolben"-LED-Lampen als Retrofit-Leuchtmittel (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Hänel)

Der Einfluss von voll abgeschirmten Leuchten auf die Himmelshelligkeit nimmt mit der Entfernung der Lichtquelle zu und kann z.B. im Vergleich zu Leuchten mit 2% ULOR in 40 km Entfernung 95% der Himmelshelligkeit reduzieren (DoE 2017 S.2). In der nationalen Gesetzgebungen von Slowenien und in regionalen Gesetzgebungen von Italien dürfen nur Leuchten verwendet werden, die im montierten Zustand kein Licht oberhalb der Horizontalen abstrahlen (ULR = 0). Ein ULOR von Null kann zum Beispiel durch Reflektorengeometrien in den Lichtquellen erreicht werden. Leuchten, die mit Reflektorentechnik nicht nur weniger Leistung benötigen, haben einen guten Wirkungsgrad und keine direkte Abstrahlung in den Nachthimmel. So haben im Vergleich dazu z.B. Kugelleuchten einen Streuverlust von über 50% (NLPIP 2007; Volz 2011). Neben Kugelleuchten sind auch freistrahlende Wandleuchten und LED-Strahler nach Einschätzung von Dr. A. Hänel in Industrie, Handel sowie im Privatbereich weit verbreitet und haben keine gezielte Lichtlenkung, wodurch bis zu 80% des Lichtes als nichtintendierte Strahlung ungenutzt emittiert wird. Zusätzlich kann durch eine aufgeneigte Installation leicht Blendung entstehen. Skybeamer und permanente Bodenleuchten sind z.B. sowohl in Slowenien als auch in Regionen Italiens verboten. Generell fällt auf (Beobachtungen A. Hänel), dass schon seit Jahren in

Italien, Frankreich und Spanien erheblich mehr voll abgeschirmte Leuchten eingesetzt werden als in Deutschland, die Lichtmenge demgegenüber aber höher ist.

Intensität/Helligkeit

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. Daneben ist bei der Festlegung der Helligkeit auch die intendierte Funktion der künstlichen Beleuchtung ausschlaggebend: Geht es zum Beispiel um eine rein ästhetische Beleuchtung, um die Verkehrssicherheit von Kraftfahrzeugen, oder um die Erkennbarkeit von Objekten oder Gesichtszügen? So sind circa 1 Lux für das Erkennen von Gesichtszügen ausreichend, jenseits von 10 Lux (1 cd/m² siehe Tabelle 12 und

Tabelle 13) ist kaum noch eine Verbesserung zu (von Bommel 2015; Fotios/Uttley 2016; Fotios et al. 2017 und EN 13201-2:2016 Variable Semi-cylindrical illuminance, Esc).

Tabelle 12: Detektionsrate und Reaktionsgeschwindigkeit von 40-70 jährigen in Abhängigkeit von der Beleuchtungsintensität (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Fotios et al. 2017)

Beleuchtung	Schweinwerfer	0,1 cd/m²	1 cd/m²	2 cd/m²
Detektionsrate	20%	79%	89%	88%
Reaktionsgeschwindigkeit	2,83	2,59	2,19	2,13

Tabelle 13: Detektionsrate und Reaktionsgeschwindigkeit von 18-30 jährigen in Abhängigkeit von der Beleuchtungsintensität (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Fotios et al. 2017)

Beleuchtung	Schweinwerfer	0,1 cd/m²	1 cd/m²	2 cd/m²
Detektionsrate	51%	93%	95%	95%
Reaktionsgeschwindigkeit	2,63	2,18	2,08	1,95

Die Beleuchtungsintensität und die Himmelshelligkeit verhalten sich linear, d.h. reduziert man die Beleuchtungsstärke um 50%, wird auch die Himmelshelligkeit halbiert (DoE 2017 S.20).

Die Beleuchtungsintensität und -helligkeit von Straßen wird in Deutschland aktuell entsprechend ihrer Beleuchtungsklasse (abhängig von Breite, der Zahl der Fahrbahnen, der Geschwindigkeit, der Nutzungshäufigkeit usw.) über die DIN EN 13201 Normen empfohlen. Normalerweise wird die mittlere Leuchtdichte als Maß festgelegt und, sofern nicht möglich, für kleinere Straßen und Fußgängerbereiche die Beleuchtungsstärke. Für die Wahl der Beleuchtungsklasse sind gewisse Freiheiten möglich, gängige Anhaltswerte sind 0.75 cd/m² für die Klasse M4, 10 lx für die Klasse C4 und 2 lx für die Klasse P6 (Fußgängerbereiche). Lichtplaner, die für Kommunen oft auch von Leuchtenherstellern gestellt werden, orientieren sich nach dem Wissen der Gutachter i.d.R. an den Normen. Letztlich liegt aber die Entscheidung, welche Beleuchtungsklasse und damit Beleuchtungsmenge in der öffentlichen Beleuchtung gewählt wird, bei den Verwaltungen oder der Politik. Dabei wird meist ein Kompromiss zwischen den Installations- und Betriebskosten

einerseits und andererseits einer möglichst hohen Lichtmenge, die sich aus dem Bestreben nach (oft vermeintlich) mehr Sicherheit an einem Ort ergibt, angestrebt.

Die Festlegung von minimalen Beleuchtungsstärkewerten, wie sie in der DIN EN 13201 festgehalten werden, sind auch deswegen zu überdenken, da eine Erkennbarkeit von Objekte wesentlich durch den Kontrast mit der Umgebungshelligkeit gegeben ist. Halbnachtabschaltungen, durch die z.B. in Wien die Beleuchtungsstärke auf 50% reduziert wurde, blieben von der Bevölkerung unbemerkt (Posch 2013) , bleiben von der Bevölkerung oft unbemerkt, solange keine Vergleichsmöglichkeit existiert, da sich das Auge leicht an die geänderte Helligkeit adaptiert. Weiterhin werden die genannten minimal empfohlenen Beleuchtungswerte auf den meisten Verkehrswegen in Deutschland unterschritten, eine flächendeckende Einhaltung der Norm würde so zu einer starken Zunahme der Lichtverschmutzung, und (im Falle der Installation von LEDs) nicht die maximal mögliche Einsparung von CO_2-Emissionen und Energiekosten ausschöpfen. Durch die fortschreitenden technologischen Entwicklungen sind heutzutage extrem hohe Leuchtdichten der Leuchtmittel möglich (z.B. LED über 10.000.000 cd/m2) (OÖ Energiesparverband 2015), die sehr blendend und sogar Augenschädigend sind. Dadurch werden so hohe Beleuchtungsstärken erreicht, dass die Einführung von Maximalwerten als sinnvoll erscheint, um künstliche Beleuchtung auf ein nötiges Maß für ihre Funktionen zu reduzieren. In einigen bestehenden Regelungen werden Maximalwerte der Beleuchtungsintensität indirekt über den Stromverbrauch definiert, so zum Beispiel in Slowenien, wo der Energieverbrauch der Straßenbeleuchtung in Gemeinden 44,5 kWh und auf Bundesstraßen 5 kWh pro Einwohner nicht überschreiten darf. Im Bundeswettbewerb Energieeffiziente Stadtbeleuchtung (Umweltbundesamt (Hrsg.) 2009) wurde der maximale Energieverbrauch auf 7.000-9.000 kWh/(km*a] festgelegt. Auch in der DIN EN 13201-5 werden 0,5-10 kWh/m^2 als Indikator des jährlichen Stromverbrauchs (AECI) angegeben. Wenn allerdings Beleuchtungsmittel immer energieeffizienter betrieben werden können, wird diese Einheit auf lange Sicht nicht zielführend für eine Reduzierung der Lichtverschmutzung sein. Allein durch die Umrüstung der Straßenbeleuchtung auf LED konnte in Deutschland zwischen 2010 und 2014 der durchschnittliche Energieverbrauch um rund 44 % von 468 kWh auf 260 kWh pro Lichtpunkt und Jahr gesenkt werden (PwC 2015). Ein auf die Fläche bezogener Grenzwert wie die Leistungsdichte (PDI) von 20-100 mW/lx m^2 (DIN EN 13201-5), oder Lumen mal Stunden pro Kilometer im Jahr (lm*h/km) (Kyba et al. 2014) sind für die öffentliche Beleuchtung von Verkehrswegen geeignetere Maßzahlen. Um die Zunahme von künstlicher Beleuchtung in einem Gebiet zu regulieren, schlagen Falchi et al. (2011) vor, einen maximalen Lichtstrom für ein Verwaltungsgebiet festzulegen der nicht überschritten werden darf. Bei Neuinstallationen künstlicher Lichtquellen bedeutet dies, dass zuvor der Lichtstrom bestehender Lichtquellen gesenkt werden muss, um den gesamt zulässigen Lichtstrom nicht zu überschreiten.

Die Reflexion am beleuchteten Objekt kann ebenfalls zu störenden Lichtemissionen führen. Sie kann durch die Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte am Objekt selbst geregelt werden. Vergleicht man den Straßenuntergrund (heller Betonbelag zu dunklem Asphalt) und Umgebungshelligkeit, empfiehlt die Fördergemeinschaft Gutes Licht (Fördergemeinschaft gutes Licht 2010c) zum Beispiel unterschiedliche Richtwerte für Licht im öffentlichen Raum. Helle Straßenoberflächen können daher mit geringerer Lichtmenge beleuchtet werden, um den gleichen Helligkeitseindruck zu erhalten. Andererseits hängt die Leuchtdichte einer Fläche von vielen Faktoren, wie dem Blickwinkel und der Rauigkeit der Fläche ab, oder ob die Fläche trocken oder nass ist. Obwohl die Qualität einer Straßenbeleuchtung in den Normen über die Leuchtdichte beschrieben und geplant wird, ist ihre Messung aufwendig und es ist schwierig, einen

charakteristischen Wert abzuleiten. Da normalerweise Standardbeläge für die Straßen angenommen werden, ist zu hinterfragen, ob nicht die deutlich einfacher zu messenden Beleuchtungsstärken als Kenndaten für Straßen sinnvoller wären (meist wird auf die Leuchtdichte verwiesen), wie sie beispielsweise von einigen Städten (z.B. Lichtmasterplan Berlin) verwendet werden.

Für beleuchtete Flächen wie zum Beispiel Werbetafeln ist zu beachten, dass helle Leuchttafeln Blendung verursachen können und ein Sicherheitsrisiko darstellen. Von der Strahlenschutzkommission (2006) wird hierfür ein Grenzwert von 730 cd/m2 angegeben, wobei dieser Grenzwert beim Alterungsprozess des menschlichen Auges durch eine erhöhte Streuwirkung herabgesetzt wird, da ältere Menschen schneller von Lichtquellen geblendet sein können (Berechnung z.B. mit der Schleierleuchtdichte möglich, siehe hierzu Strahlenschutzkommission 2006 und Wittlich 2010). Die Sichtbarkeit der beleuchteten Flächen hängt neben der Leuchtdichte auch von der Lichtfarbe und der Größe ab, so kann zum Beispiel eine gute Lesbarkeit bei selbstleuchtenden Werbetafeln auch allein durch die Wahl einer hellen Schrift vor dunklem Hintergrund erreicht werden (siehe auch Abbildung 30 Hänel 2013). Entscheidend für die Sichtbarkeit ist auch der Kontrast zur Umgebungs- und Hintergrundhelligkeit, wodurch in weniger beleuchteten Gebieten zum Beispiel viel geringere Leuchtdichten erforderlich sind. Hänel (2013) empfiehlt daher einen Grenzwert von 100 cd/m² für urbane Gebiete und 50 cd/m² für naturnahe Gebiete. Im Lichtmasterplan der Stadt Luzern ist Dachreklame auf maximal 110 cd/m² begrenzt (Stadt Luzern 2006, S.109). Im „Werbekonzept Stadtbild Berlin“ werden maximal tolerable Leuchtdichten zur Blendungsbegrenzung zwischen 14-500 cd/m² empfohlen, die nach Gebietsart, Hintergrundhelligkeit, Uhrzeit und farbigen und bewegten Lichtquellen unterschieden werden (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2014, S.75-76). Bei der maximalen Beleuchtung von Gebäuden und Denkmälern sind in Regionen Italiens bis zu 2 cd/m² zulässig und bei Fassaden von Geschäftsgebäuden, Instituten, Produktionsgebäuden und Baudenkmälern ist in Slowenien eine Leuchtdichten bis 1 cd/m² erlaubt.

Für den Lichteinfall von Außenbeleuchtung in Schlafzimmern wurden nach LiTG 2011 die Grenzwerte für die vertikalen Beleuchtungsstärke auf Fenster oder Balkone in Wohngebieten nach 22 Uhr auf 1 Lux und in Industrie- und Gewerbegebieten auf 5 Lux festgelegt. Bei Messungen im Rahmen einer Masterarbeit in der Schweiz wurde selten 0,2 Lux oder mehr an Fenstern gemessen (Schobesberger 2010). Dies deutet darauf hin, dass deutlich niedrigere Niveaus problemlos möglich wären. Orientierung könnten die natürliche Beleuchtungsstärke des Mondes bieten (0,05 to 0,1 Lux) (Kyba et al. 2017). In einem Gerichtsentscheid (Landgericht Wiesbaden, 10 S46/01, 2001) wurde ein Wert von 1 lx, wie in der Lichtimmissionsrichtlinie vorgegeben, als zu hoch beurteilt und bereits eine Beleuchtungsstärke von 0,33 Lux einer Hauseingangsleuchte auf ein Nachbarfenster als störend eingestuft.

Ausrichtung / Gleichmäßigkeit

Eine alleinige Betrachtung der Intensität und Helligkeit ist noch kein Maß für eine gute Beleuchtungssituation. Es gibt unter Lichtplanern und -technikern die generelle Annahme, dass eine gleichförmige Ausleuchtung gutes Sehen fördert (Richter 2005; EURAC/Landesagentur für Umwelt 2013, S. 7). Im folgenden Absatz wird kritisch diskutiert, ob diese Aussage allgemeine Gültigkeit besitzt.

Die **Gleichmäßigkeit** der Ausleuchtung, $u = E_{min}/E_{mit}$ (u = Gleichförmigkeit, E_{min} = kleinste Beleuchtungsstärke, E_{mit} = mittlere Beleuchtungsstärke) ist in DIN EN 13201 zum Beispiel für M1-M4 (Straßen mit mittleren bis höheren Fahrgeschwindigkeiten) auf 0,4 festgelegt, meist dürfte sie auf deutschen Straßen viel geringer sein (A. Hänel, pers. Kommunikation). Eine Studie von Narendran et al. (2015) ergab, dass eine gleichmäßige Parkplatzbeleuchtung mit 3 Lux besser bewertet wurde, als eine ungleichmäßigere, aber viel hellere 30 Lux Beleuchtung. Durch den höheren Sehkomfort, der mit mehr Gleichmäßigkeit erreicht wird, scheint es, dass das allgemeine Beleuchtungsniveau reduziert werden kann. Auch Fotios et al. (2017) kamen zu dem Schluss, dass die Erkennbarkeit von Objekten durch Autofahrern direkt bei Erreichen der dunklen oder hellen Gebiete ab- bzw. zunahm, d.h. eine gleichmäßige Beleuchtung hat hier die Sichtbarkeit von Objekten deutlich erhöht. Oft sind auf Straßen die Mastabstände der Leuchten so weit auseinander, dass dazwischen ausgeprägte Dunkelzonen entstehen. Auf der anderen Seite kamen Clanton & Associates, Inc. und Northwest Energy Efficiency Alliance Clanton & Associates/Northwest Energy Efficiency Alliance (2014) zu dem Schluss, dass zwar für Fußgänger und ihre gefühlte Sicherheit gleichmäßige Beleuchtung besser bewertet wurde, allerdings ungleichmäßige Beleuchtung auf Straßen bessere Sichtbarkeit und Kontraste ergab. Zu dieser Erkenntnis kam auch eine Studie von Burtt im Jahre 1916. Jackett und Frith (2013) begründen dies durch die erhöhte Aufmerksamkeit bei leicht ungleichmäßiger Beleuchtung. Die Bewertung von Gleichmäßigkeit ist demzufolge aus unterschiedlichen Perspektiven zu sehen, wie der Verkehrssicherheit gegenüber dem Sicherheitsempfinden. Eine allgemeine Aussage, dass Gleichmäßigkeit die Erkennbarkeit von Objekten ganz allgemein fördert, kann daher nicht gemacht werden.

Auswahl und Platzierung der Leuchten

Um eine gute Auswahl und Platzierung von Leuchten gewährleisten zu können, sind Informationen zur Gesamtbeleuchtungssituation notwendig. Diese ergibt sich aus Art, Funktion und der räumlichen Verteilung der Leuchten, der Umgebungssituationen (s. Einteilung in Gebietskategorien in BAFU 2017, Tabelle 5 S.76) zusammen mit der Berücksichtigung der Umgebungshelligkeit/Hintergrundbeleuchtung und weiteren Faktoren wie der Topographie. Daneben ermöglichen die Kenntnis von Position, Masthöhe, Leuchtentyp, Leuchtmittel, Anschlusswert und Installationszeit die Planung von Reparaturen, Austausch von Leuchtmitteln oder Leuchtenköpfen und geben ganz grundlegend Aussagen über die Verteilung der Lichtemissionen. In Regionen Italiens ist daher die Führung eines aktuellen Leuchtenkatasters Pflicht (in Südtirol neben der öffentlichen Beleuchtung auch private Anlagen von Betrieben und Privatpersonen mit über 50 Lichtpunkten).

Die Platzierung von Leuchten in ökologisch sensiblen Räumen sollte gesondert betrachtet werden. Die dahingehenden Empfehlungen der CIE TP 150-2003 wurde bereits in Großbritannien und in der Zonierung von Sternenparks umgesetzt (Hänel/Frank 2013) und beinhaltet, dass zum Beispiel in Kernzonen kein stationäres künstliches Licht, außer für Sicherheitszwecke (dann ULOR=0 und geringer Blauanteil), erlaubt ist.

Zeitmanagement/Steuerung

Die Notwendigkeit einer dauerhaften Beleuchtung, insbesondere mit gleichbleibender Stärke (circa 4000 Stunden im Jahr) ist zu hinterfragen (Posch 2013). Eine Anpassung an Fluktuationen in Nutzungsintensitäten, z.B. in der Verkehrsdichte, ist empfehlenswert und kann durch Abschaltung in den späten Nachtstunden (Matt 2015b), eine Leistungsreduzierung, oder gar eine bedarfsorientierten Beleuchtung (z.B. durch Bewegungsmelder) erreicht werden (Hänel 2013). In vielen europäischen Ländern wurde dies in nationalen und regionalen Gesetzen bereits eingebettet. So sind in Frankreich und Regionen Italiens Gebäudeanstrahlungen spätestens um 1 Uhr abzuschalten. In Regionen Italiens müssen Straßenleuchten mit Vorrichtungen ausgestattet werden, die eine mindestens 30%ige Leistungsreduzierung erlauben. Auch ein Großteil der kommerziellen Beleuchtung (Werbeobjekte und -schilder) muss in Italien und Slowenien nach 24 Uhr abgeschaltet werden. Erste Schritte werden in Deutschland jüngst auch bei der Beleuchtung von Windparkanlagen unternommen (Fachagentur Windenergie an Land 2016).

Bislang konnte die Beleuchtung sinnvoll nur um 30 - 50 % reduziert werden, mit LEDs ist eine stärkere Reduzierung möglich, wobei die Stromeinsparung proportional zu der Helligkeitsreduzierung ist. Hinzu kommt, dass eine 50%ige Reduzierung, bei fehlenden Vergleichsmöglichkeiten, dem menschlichen Auge kaum auffällt. Erst eine Reduzierung um 2/3 erscheint dunkler und vermittelt daher Menschen auch eher ein Gefühl, dass es Nacht ist. Andererseits ermöglicht ein gleichförmig niedriges Beleuchtungsniveau eine gute Sehleistung.

Bewegtes Licht

Stationäre Lichtquellen sollten von mobilen Lichtquellen unterschieden werden, wobei auch stationäre Lichtquellen mit bewegten Leuchten ausgestattet sein können. Häufige Lichtquellen mit bewegtem Licht sind Scheinwerfer von Kraftfahrzeugen, Sicherheits-Warnlichter, Skybeamer, Werbetafeln und auch die bedarfsgerechte Beleuchtung mit Dimmung. Bewegtes Licht kann schneller negative Auswirkungen haben als statisches Licht, indem es schon bei geringeren Lichtintensitäten als störend empfunden wird (Amt der Oberoesterreichischen Landesregierung 2013; Schierz 2009 in BAFU 2017, S. 108). In den in Deutschland aktuell existierenden Regulierungen findet bewegtes Licht noch kaum Berücksichtigung (Krause 2015, S.137).

In Österreich werden in Tabelle 5 der ÖNORM O 1052 - Lichtimmissionen - Messung und Beurteilung abhängig von der Frequenz niedrigere Grenzwerte für veränderliches Licht festgelegt. Im „Werbekonzept Stadtbild Berlin“ werden maximal tolerable Leuchtdichten zur Blendungsbegrenzung nach farbigen und bewegten Lichtquellen unterschieden (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2014, S. 75 f). Daneben ist in Berlin auch der Fall der ehemaligen O2-Arena bekannt, bei dem, durch eine Bezirksverordnung des Bundesamtes, Helligkeitsgrenzwerte festgelegt wurden und die Betriebszeit der bewegten medialen Beleuchtung nur während Veranstaltungen erlaubt wurde (Krause 2015). Skybeamer sind sowohl in Slowenien als auch in Regionen Italiens verboten.

Im Straßenverkehr sollte die künstliche Beleuchtung durch Scheinwerfer von Kraftfahrzeugen stärkere Berücksichtigung finden und in Betrachtungen der Beleuchtungs- und Helligkeitsverhältnisse mit einbezogen werden (Bullough 2017). Nach der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) ist zwar geregelt, wann Fernlicht abgeschaltet werden muss, eine Regelung für die Beleuchtungsstärke der Scheinwerfer existiert aktuell nicht. Durch eine Zunahme der gängigen Beleuchtungsstärke von Scheinwerfern, gerade durch LED und Xenon-Leuchtmittel, die zu starker Blendung führen können (Pauen-Höppner/Höppner 2013, S. 106; Mehri et al. 2017; Zydek 2014), kann eine Regulierung hilfreich sein, um unbegünstigende Faktoren durch Scheinwerfer zu minimieren. Die Lichttechnische Gesellschaft weist auch auf die stroboskopischen Effekte von pulsweitenmodulation-gesteuerten Autoscheinwerfern hin und empfiehlt für die Praxis eine maximale PWM-Frequenz um 460 Hz (Polin/Khanh 2017). Ähnlich sollte auch der Fahrradbeleuchtung gesteigerte Aufmerksamkeit zukommen (Blendung), gerade in Bezug auf Blendung und die neuen Möglichkeiten wie Fernlicht (Pardey 2017).

Lichtfarbe und Lichtspektrum

Auch das Lichtspektrum bzw. die Lichtfarbe einer Lichtquelle kann nichtintendierte Wirkungen aufweisen. Für den Menschen nimmt die Störwirkung zum Beispiel in folgender Reihenfolge zu: gelbe oder weiße, grüne, rote oder blaue Lichtfarbe sowie bewegtes Licht mit geringer und mit hoher Blinkfrequenz (Schierz 2009 in BAFU 2017a, S.108). In LiTG 12.3 werden für farbiges und flimmerndes Licht Korrekturfaktoren angegeben. Für langsam veränderliche Quellen (wie es z.B. LED-Großmonitoren sein können) gibt es noch keine Grenzwerte. Die Auswirkungen verschiedener Lichtspektren auf Flora und Fauna werden gezielt in Bearbeitungsschwerpunkt 3, Kapitel 4.5, dargestellt, die Sensibilität einzelner Artengruppen wird auch in der Literaturstudie von CDC Biodiversité (2015) in Tabelle 1-5 in Traverso et al. (2017, S.22) aufgelistet. UV-Strahlung (<400 nm), die das für den Menschen nicht sichtbar ist, aber eine hohe Wirkung auf alle Artengruppen hat, sollte vermieden bzw. ausgefiltert werden. Es gibt mehrere Gründe, blaue Wellenlängenbereiche zu vermeiden: das zirkadiane System (innere Uhr) von Säugetieren reagiert besonders empfindlich auf dieses Lichtspektrum, es wirkt besonders hinderlich auf die Dunkeladaption, verursacht mehr Blendung (vor allem bei älteren Bevölkerungsgruppen), kann netzhautschädigend sein und wird in klaren Nächten stärker in der Atmosphäre gestreut und erhöht somit die Himmelshelligkeit (Falchi et al. 2011; BUFA 2017, S. 21; DoE 2017, S. 22). Bei der Umrüstung von Natriumdampf-Hochdrucklampen auf LED kann sich die Himmelshelligkeit, je nach Blauanteil, um bis zu 50% erhöhen (bei einer PC Amber LED mit geringer kurzwelliger Strahlung wird die Himmelshelligkeit dagegen nicht erhöht) (DoE 2017, S. 22). Es gibt allerdings unterschiedliche Definitionen für den Wellenlängenbereich von blauem Licht. In Tabelle 14 sind Blauanteile unter 500 nm und 540 nm im Verhältnis zum gesamten sichtbaren Spektralbereich für verschiedene Leuchtmittel zusammengefasst. Die Tabelle zeigt auch, dass mit Zunahme der Farbtemperatur (T) der Anteil an blauem Licht zunimmt. Als Näherung kann die **ähnlichste Farbtemperatur** angegeben werden, die in Kelvin [K] angeben wird. Ein Schwarzkörperstrahler von 3000 K hat einen Blauanteil von 15 Prozent unterhalb einer Wellenlänge von 500 nm.

Tabelle 14: Blauanteile unter 500 und 540 nm, Farbwiedergabewert CRI und S/P (skotopisch/photopisch)-Verhältnis für verschiedene Leuchtmittel aus verschiedenen Literaturquellen und Spektralmessungen von Harald Bardenhagen. Zudem sind Grenzwerte für die Blauanteile angegeben, wie sie in verschiedenen Publikationen oder Regelungen gefordert werden.

	T [K]	<500nm [%]	<540nm [%]	CRI	S/P
Quecksilberdampf	4200	29	33	45	1.1
Fluoreszenz 3000K	3000	22	26	85	1.3
Fluoreszenz 4100K	4100	24	47	85	1.7
Halogenmetalldampf 4000K	4000	50	83	64	1.49
LED 4000 K	4000	24	57	100	1.65
Halogenmetalldampf 3000K	3000	25	53	79	1.5
Cosmopolis (Philips)	2900	20	35	100	1.2
LED 3000 K	3000	13	25	100	1.21
LED 2400K	2400	12	21		
Natriumhochdruck 70W	2000	7	9	20	0.65
Pharox 2200K	2200	4	20		
LED PC amber	1800	0	0		
Natriumniederdruck	1800	0	0	0	0.25
Clearfield (Philips)		2	5		
GoldenOrange (Innolumnis)		1	11		
Falchi et al.			15		
Sherbrooke			10, 22, 30 < 530		
Pic du Midi			18 < 530		
La Palma			15 < 550		
Catalunya		1, 15			

Daher wird in regionalen Gesetzen Italiens die Farbtemperatur auf 4000K beschränkt. Um ökologische (z.B. Anziehung von Insekten) und humanmedizinische Auswirkungen (z.B. Melatoninhaushalt) des blauen Lichtspektrums zu vermeiden (Falchi et al. 2011), sollten Farbtemperaturen von unter 3000 K verwendet werden (Matt 2015a; Frank/Sternenpark im Biosphärenreservat Rhön 2017; LoNNe 2015; DoE 2017). In naturnahen Bereichen sind bevorzugt Lampen mit minimalen Blauanteilen (Natriumdampflampen bzw. 1800 K) einzusetzt werden. Auch der Deutsche Städte- und Gemeindetag hat gemeinsam mit dem Leuchtenhersteller Philips die Umrüstung auf warmweiße Lichtquellen in den Städten empfohlen (Fachgruppe Dark Sky 2017).

Energieverbrauch

Der Energieverbrauch ist ein indirekter Parameter für die Lichtverschmutzung und ist durch die steigende Energieeffizienz nur bedingt geeignet, um die nichtintendierten Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung zu minimieren (s. auch Erläuterungen unter Intensität/Helligkeit). So liegen auch die Effizienzunterschiede von warmweißen LEDs im Vergleich zu neutral- und kaltweiße LEDs inzwischen bei maximal 10-15 % (DoE 2017). Zudem ist eine Energieeinsparung auch durch geringere Beleuchtungsstärke, Dimmung und durch verbessertes Lichtmanagement möglich (Fachgruppe Dark Sky 2017). Es kann sinnvoll sein, eine minimale Lichtausbeute festzusetzen, wie in regionalen Gesetzgebungen in Italien, die nur Leuchten mit mindestens einer Lichtausbeute von 70 lm/W zulässt.

4.2.2. Handlungsinstrumente

Für die Umsetzung der in Kapitel 4.2.1 dargestellten möglichen Parameter für eine Regulierung der Lichtverschmutzung in Deutschland stehen verschiedene Handlungsinstrumente zur Verfügung. Es gilt, bereits bestehende Instrumente durch eine gesteigerte Verbindlichkeit und eine explizite Berücksichtigung der unerwünschten Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung effektiver zu nutzen, sowie gegenwärtige Lücken in der Regelungslandschaft zu schließen. Viele der hier genannten Instrumente wurden bereits in Krause et al. (2014a) und Krause et al. (2014b) aufgelistet. 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. Zudem scheint es angebracht, einen räumlich differenzierten Ansatz zu wählen: dies erlaubt es, unterschiedliche Bedürfnisse, räumlich gebundene Funktionen und Nutzungen von Beleuchtung zu berücksichtigen, etwa indem ein Bezug zu Flächennutzungskategorien hergestellt wird. Für die verschiedenen staatlichen Ebenen (Bund, Länder, Kommunen etc.) gilt es, klare Zuständigkeiten zu definieren - auch für den Vollzug entsprechender Regelungen. Ergänzend zu den Regelungen kommt Ansätzen zur Wissensgenerierung, -bündelung und -vermittlung eine hohe Bedeutung zu: inter- und transdisziplinäre Gremien wie auch Kompetenzzentren können hilfreich sein, um die unterschiedlichen Perspektiven über das Thema und Herangehensweisen in unterschiedliche Forschungs- und Wissensbereichen zusammenzuführen sowie Synergien und Kommunikation zum Thema Lichtverschmutzung voran zu treiben.

Es besteht im Moment in Deutschland keine Regelung, die die Belästigungen für Mensch, Flora, und Fauna durch künstliche Beleuchtung umfassend behandelt. Steuerungsinstrumente fehlen weitestgehend. Im aktuellen Planungs-, Bauordnungs- und Naturschutzrecht könnten klare Kriterien für die Eingrenzung der Lichtverschmutzung enthalten sein. Richt- und Grenzwerte sind für eine Festlegung der Erheblichkeit mit einem klaren Raum- und Zeitbezug und für eine Umsetzung von nachhaltiger Beleuchtung notwendig. Eine direkte gesetzliche Regelung der Lichtverschmutzung mit bindenden Grenzwerten, wie sie in anderen europäischen Ländern bereits mehreren Jahren existiert, lässt sich aus diesen bestehenden Erfahrungen in ein zielführendes Instrument umsetzen, um die negativen Auswirkungen künstlicher Beleuchtung zu reduzieren. Bedeutsam ist hier, dass die Regelungen so gestaltet sind, dass sie gut verständlich (bspw. auch für private Bauherren) sind und ihre Anwendung, besonders in technischer Hinsicht, auf die (begrenzten) Möglichkeiten und Ressourcen, gerade auf kommunaler Ebene, abgestimmt ist.

Gerade auch in Anbetracht der Tatsache, dass sich in Deutschland bei der Planung von Straßenbeleuchtung aus Ermangelung an gesetzlichen Regelungen meist an Industrienormen orientiert wird (z.B. Richter 2005), entstehen zwei grundsätzliche, aber lösbare Defizite. Einerseits ist die Norm in großem Maße auf die Verkehrssicherheit des motorisierten Individualverkehrs gerichtet, und es ist zu empfehlen, die bis jetzt unbeachteten Belange von Außenbeleuchtung, wie die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Ökologie, Klimaschutz, Stadtbild etc. stärker zu berücksichtigen, ebenso wie jene anderer Verkehrsteilnehmer, insbesondere Fußgänger und Fahrradfahrer. Zweitens befürchten viele Kommunen bei Nichteinhaltung der Vorgaben der DIN EN Norm 13201, rechtlich dafür belangt zu werden, auch wenn eine Industrienorm nicht rechtsverbindlich ist (Riedel et al. 2013, S. 77 ff; Ringwald/Engel 2013) und seit 1953 keine Rechtsprechung zur Haftung der Kommune wegen unzureichender Beleuchtung vorliegt (Ringwald/Bauer 2009). Um hier Kommunen mehr

Planungssicherheit zu geben, aber auch aus Naturschutzgründen, wäre es von daher wichtig zu klären, unter welchen Kriterien die Verkehrssicherungspflicht durch die Norm definiert wurde und ob sich durch die Rechtsprechung tatsächlich eine (implizite) Notwendigkeit zur Heranziehung der Norm ergibt. Eine klare offizielle Stellungnahme staatlicher Institutionen zu den existierenden Industrienormen kann helfen, Entscheidungsträger und Planer bei der Umsetzung von nachhaltigen Beleuchtungskonzepten zu unterstützen.

Steuerungsinstrumente auf Bundes- und Landesebene können Kommunen in ihrer lokalen Beleuchtungsplanung entlasten, indem sie Orientierung bieten. Durch die Erarbeitung eines bundesweiten Leitfadens mit einer integrierten Perspektive auf Außenbeleuchtung können Planungsprozesse zielgerichtet verbessert werden, wie dies zum Beispiel im Land Oberösterreich bereits geschehen ist. Dies schließt eine Quantifizierung der Lichtemissionen in Raumordnungs- und Landschaftsplanung (siehe Schweiz) mit ein. Durch eine Verpflichtung für Länder und Kommunen zur querschnittsorientierten Licht-Rahmenplanung, eine (verstärkte) Aufnahme der Lichtemissionen in die Planungsfeststellungsverfahren und Umweltverträglichkeitsprüfungen, die zum Beispiel auch eine Bewilligungspflicht für Beleuchtungsanlagen vorsehen, und die bindende Verpflichtung zur Erstellung von Leuchtenkatastern (wie in Südtirol, Italien), die sowohl öffentliche als auch privat betriebene Außenbeleuchtung mit einschließen, kann der notwendige umfassende Blick auf die künstliche Beleuchtung implementiert und ein zurückhaltender Umgang mit ihr gewährleistet werden. Im Rahmen von Genehmigungsverfahren können so, ähnlich zu Lärm- und Luftemissionen, Grenzwerte für die Lichtemissionen eingeführt werden und damit negative Auswirkungen von nächtlicher Beleuchtung vermieden werden. Eine Erweiterung der Befugnisse der Länder im Bundesimmisionsschutzgesetz (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-Leitlinie (LiTG 2011) neue Technologien, wie Dimmung, bewegtes und farbiges Licht, berücksichtigt. Ähnlich wie die Technischen Anordnung (TA) Lärm tageszeitliche Differenzierungen für zulässige Lärmbelästigung vorsieht, könnte eine TA Licht auf Bundes- und Länderebene nachtzeitliche Differenzierungen für zulässige Lichtimmissionen vorsehen (Hettich/Herzog 2009; Mückenberger 2017).

Die Schaffung eines unabhängigen Kompetenzzentrums für künstliche Beleuchtung, welches eine breite, interdisziplinäre Perspektive in den Blick nimmt, kann ein Gegengewicht zu den aktuell dominierenden technischen und vornehmlich auf Energieeffizienz orientierten Perspektiven darstellen und fragmentiertes Wissen aus unterschiedlichen Disziplinen bündeln. Es ermöglicht weiterhin ein Bewusstsein über das Thema Lichtverschmutzung in die Öffentlichkeit, Verwaltung und Politik zu stärken und kann Entscheidungsträger bei Belangen zur künstlichen Beleuchtung im Außenbereich unterstützen. Weiterhin können unabhängige lichttechnische Experten den Prozess bei der Umsetzung und Planung von künstlicher Beleuchtung zielgerichtet vorantreiben.

Ähnlich wie die Technischen Anordnung (TA) Lärm tageszeitliche Differenzierungen für zulässige Lärmbelästigung vorsieht, könnte eine TA Licht auf Bundes- und Länderebene nachtzeitliche Differenzierungen für zulässige Lichtimmissionen vorsehen (Hettich/Herzog 2009; Mückenberger 2017).

Lichtkonzepte stellen ein weiteres Instrument dar, private und öffentliche Beleuchtung in Städten und Regionen zu koordinieren, wobei das Thema Lichtverschmutzung, die gezielte Berücksichtigung der Dunkelheit (wie im Lichtmasterplan der Stadt Rennes in Frankreich siehe Narboni 2013) und die Regulierung der privaten Beleuchtung stärkere Berücksichtigung finden sollten (z.B. "Altstadt im grellen Licht", Nürnberger Nachrichten 29. August 2017). Eine integrierte und räumlich differenzierte Betrachtung der Beleuchtung für Lichtkonzepte ist zu empfehlen, was durch eine weit gefächerte Expertengruppe bei der Erstellung der Pläne erreicht werden kann (Schulte-Römer 2010). Zudem können dadurch die verschiedenen Akteure (nicht nur z.B. Lichttechniker) aus Verwaltung und Wirtschaft zusammengebracht werden und es kann eine bürgerschaftliche Partizipation in dem Planungsprozess integriert werden. Empfehlungen für zu verwendende Methoden und Verfahren, sowie Kriterien für die Evaluierung, Integration und Koordination von Lichtquellen sollten den Gemeinden hierfür von offizieller Seite bereitgestellt werden (Köhler 2015), wie dies zum Beispiel in Südtirol in Italien durch die Landesagentur für Umwelt schon umgesetzt wurde (EURAC/Landesagentur für Umwelt 2013). Ebenso wäre zu erwägen, ob den Gemeinden und Regionen finanzielle Unterstützung für die Entwicklung integrierter Lichtkonzepte im Rahmen von Förderprogrammen zur Verfügung gestellt wird, die Anforderungen an einen nachhaltigen Umgang mit Beleuchtung formulieren.

Um einen Beitrag zum Schutz der nächtlichen Dunkelheit und Vermeidung von Lichtverschmutzung leisten zu können, gilt es, den Vollzug der bestehenden Regelungen auch zu kontrollieren (vgl. Frankreich). Diese Kontrolle sollte schon bei der Abnahme von Beleuchtungsanlagen stattfinden. Lichtemissionen können in das Umweltmonitoring mit aufgenommen werden, wie dies zum Beispiel kürzlich in der Schweiz im Bericht zum Landschaftswandel passiert ist (BAFU/WSL 2017), um den tiefgreifenden Landschaftswandel zu überwachen (BBSR, (Bundesinstitut für Bau- 2014). Ein weiteres mögliches Monitoring der räumlichen Verteilung und Trends der Außenbeleuchtung kann durch Luftbild- und Satellitenbilder gewonnen werden, wie z.B. in der Lichtmesskampagne im Zentralraum Oberösterreich (Ruhtz et al. 2015). Kalibrierte Messinstrumente und Raumfahrtmissionen erhöhen den Mehrwert dieser Messungen, besonders bei Trendbetrachtungen. Multispektrale Satelliteninstrumente, die das gesamte Leuchtensprektrum abbilden, könnten die Nachteiler des aktuellen Satelliten VIIRS beheben. Auch eine systematische Aufzeichnung der Himmelshelligkeit und eine Ausweitung der existierenden SQM-Netzwerke sind zu empfehlen.

Fördermöglichkeiten bei der energetischen Sanierung der Straßenbeleuchtung bestehen bereits. Eine niedrigschwellige, aber effektive Maßnahme in Bezug auf die öffentliche Beleuchtung bestünde darin, Aspekte der Lichtverschmutzung in den Katalog der Förderkriterien mit aufzunehmen. Im Rahmen der Förderpolitik können darüber hinaus weiter z.B. auch im Rahmen der Städtebauförderung von Bund und Ländern positive Anreize zu einem nachhaltigen Umgang mit Außenbeleuchtung gesetzt werden.

Lichtemissionen sollten auch in ausgewiesenen Naturschutzgebieten und Landschaftsschutzgebieten kritisch überprüft 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 ist man mit der Qualitätsoffensive für Naturparke gegangen, in der auch Kriterien der Lichtverschmutzung enthalten sind (Köster/Schäfer 2015). Ein naheliegender nächster Schritt wäre die grundsätzliche Berücksichtigung des Schutzes der Dunkelheit der Nacht in bereits unter Schutz stehenden Gebieten, wie es gegenwärtig in den Nationalparks der USA umgesetzt wird (U.S. National Park Service o.J.).

Auch jenseits 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. Langfristig wird der Erfolg des Erhalts der Dunkelheit in diesen Gebieten jedoch nicht allein von dort getroffenen Maßnahmen abhängen: Selbst wenn in einem Schutzgebiet keinerlei Licht emittiert wird, kann ein übermäßiger Einsatz von Beleuchtung in nahegelegenen (z.B. Industrieanlagen, Gewächshäuser) oder auch entfernteren Bereichen (z.B. Städte) die Dunkelheit stark beeinträchtigen. Entsprechend hohe Bedeutung kommt der Berücksichtigung dieser gegenseitigen, überörtlichen Abhängigkeiten zu. Ein geeignetes Instrument hierfür könnten regionale Lichtkonzepte bieten.

Zuletzt kann noch angemerkt werden, dass in den bereits bestehenden Gesetzen, Normen, Empfehlungen und allgemeinen Erfahrungen zum Thema Lärm zahlreiche Orientierungsmöglichkeiten für den Umgang mit künstlichem Licht bestehen, da zwischen Lärm und Licht zahlreiche Parallelen in Eigenschaften und Auswirkungen existieren (Radicchi et al. 2016, Schroer/Hölker 2014). Die Vorzüge der Stille haben sich im Vergleich zur natürlichen Dunkelheit schon längst durchgesetzt, wie das Ziel der EU- Umgebungslärmrichtlinie, ruhige Gebiete zu schützen, und die „Good practice guide on quiet areas“ der Europäische Umweltagentur EEA zeigt (Hintzsche 2014). Stille ist auch ein Qualitätskriterium in der Immobilienwirtschaft (Posch 2010, S. 25; BAFU 2011; Bartos/Hohenwarter 2011). Erste parallelen werden hier mit der Qualität der Sicht des natürlichen Sternenhimmels gemacht (Chen 2014), aber auch der Wert einer geringen Störung durch Außenbeleuchtung, zum Beispiel im Schlafzimmer, kann durch eine höhere Bewusstseinsbildung zum Thema Lichtverschmutzung an Wert gewinnen. Schon früh wurden Parallelen zu Lärm erkannt (Hildebrand 1970) und werden immer wieder in den Medien aufgegriffen (z.B. Boyle 2015). Erste politische Schritte in diese Richtung wurden mit der Resolution 1776 des Europarates über Lärm- und Lichtverschmutzung gegangen (Parlamentarische Versammlung des Europarates 2011b). Lichtaktionspläne ähnlich zu Lärmaktionsplänen (Schormüller/Langel 2015) sowie ein Lichtverschmutzungsnetzwerk durch Observatorien mit einer Onlineinformationsplattform vergleichbar zu „NOISE: Noise Observation and Information Service for Europe“ existiert bereits europaweit (EEA/ETC-ACM 2017) und wäre auch für das Thema Lichtverschmutzung zielführend.

Zusammenfassend werden im Folgenden die aus Sicht der Gutachter zentralen Regelungs- und Einflussmöglichkeiten auf Bundesebene aufgeführt. Grundsätzlich ist eine Förderung interministerielle Zusammenarbeit als wichtiger Bestandteil anzusehen, um Lücken in der querschnittsorientierte Kompetenz und Organisationsstruktur zu beseitigen. Grundsätzliches Ziel sollte die Etablierung eines nachhaltigen Umgangs mit Beleuchtung sein. Hierfür ist ein ganzheitlicher Ansatz erforderlich, der die vielfältigen Auswirkungen der künstlichen Beleuchtung in den Blick nimmt:

- Verstärkte Integration (Mainstreaming) von Lichtemissionen als dezidiert zu berücksichtigendem Faktor in bereits existierende formelle Planungs- und Steuerungsinstrumente, wie das Imissionsschutz-, Planungs-, Bauordnungs- und Naturschutzrecht, mit Bemessungsgrundlagen nach neuestem Wissensstand und Prüfung von Verwaltungsvorschriften, z.B. Einführung einer technischen Verwaltungsvorschrift zu Licht (TA Licht) innerhalb des Bundes-Imissionsschutzgesetzes.
- Prüfung der Möglichkeit eigenständiger Regelungen zur Begrenzung der Lichtverschmutzung, bspw. eines Lichtverschmutzungsgesetzes, einschließlich der Verpflichtung für Länder und Kommunen zur querschnittsorientierten Licht-Rahmenplanung;

- ❖ Etablierung von Mess- und Monitoringsystemen zur Überwachung der Entwicklung der Lichtverschmutzung;
- ❖ Bereitstellung von Orientierungshilfen zum Thema für Länder und Kommunen, zwecks Beseitigung planerischer und rechtlicher Unsicherheiten (u.a. hinsichtlich des Umgangs mit Industrienormen) bei der Konzipierung öffentlicher Beleuchtungsanlagen sowie Informationen zu Möglichkeiten der nachhaltigen Beleuchtungsplanung (u.a. mittels Best-Practice-Beispielen), etwa in Form eines Informationsportals und Leitfadens;
- ❖ Entwicklung und Umsetzung von Beleuchtungsrichtlinien zur Minimierung der Lichtverschmutzung für bundeseigene Gebäude und Anlagen;
- ❖ Förderung der Wissensgenerierung, -bündelung und -vermittlung, um bestehende Forschungslücken zu schließen, Synergien zwischen unterschiedlichen Wissensbereichen zu schaffen und ein breiteres Problembewusstsein zum Thema Lichtverschmutzung zu erreichen, bspw. mittels eines bundesweiten Kompetenzzentrums für nachhaltige Beleuchtung; Schaffung von Anreizen für eine Minimierung der Lichtverschmutzung mittels einer entsprechenden Anpassung der Förderkriterien in bestehenden Programmen (s. mögliche Parameter in Kapitel 4.2.1) sowie der Einrichtung von Förderprogrammen, Auszeichnungen und Wettbewerben für nachhaltige Beleuchtung, bspw. für die Entwicklung integrierter lokaler und regionaler Lichtkonzepte.

4.3. Positive technologische Entwicklungen zur Reduzierung der Lichtverschmutzung

Mit den heute gängigen Beleuchtungsmöglichkeiten ist es möglich, die Lichtverschmutzung drastisch zu reduzieren (z.B. Aubé 2016, p.11, Sternenpark im Biosphärenreservat Rhön 2017). Es bedarf daher weniger technischer Neuerungen und Entwicklungen als dem flächendeckenden intelligenten Einsatzes und des Designs von künstlicher Beleuchtung. Nichtsdestotrotz gibt es weitreichende technologische Entwicklungen, die helfen, die negativen Auswirkungen von künstlichem Licht im Außenbereich zu minimieren.

Steuerung

Durch Lichtmanagementsysteme kann künstliches Licht bedarfsgerecht bereitgestellt werden, d.h. der Nutzungsstärke, den Standorteigenschaften aber auch der Wetterlage und Nutzergruppen wie Radfahrern angepasst werden (Bowden 2017; Weirauch 2011). Als einfachster Fall ist hier die Nachtabsenkung und –abschaltung zu nennen, zum Beispiel von wenig frequentierten Leuchtenstandorten in den Nachtstunden. Weiter kann die benötigte Helligkeit durch Dimmen bei bestimmten Leuchtmitteln wie LEDs bedarfsgerecht angepasst werden, durch eine autarke Lichtsteuerung direkt in der Lampe, durch das Powerline-Verfahren über vorhandene Stromleitungen, die mit der Lampe verbunden sind, oder durch Lichtsteuerung über Funk (OÖ Energiesparverband 2017). Bewegungssensoren erlauben weiter, die Beleuchtung automatisch aus-/anzuschalten oder zu dimmen, je nach der realen aktuellen Anwesenheit von Menschen und Kraftfahrzeugen.

Abbildung 37: Adaptive Tankstellenbeleuchtung in Möderbrugg, Österreich: Bei Annäherung eines

Fahrzeuges wird die Helligkeit langsam erhöht, die dann bei der Betankung den höchsten Helligkeitswert erreicht (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel)

Anwendungsbeispiele zu ferngesteuerten drahtlosen Mesh-Netzwerkkomponenten und Dimmung finden sich zum Beispiel bei Tvilight (Leeming 2017; Tvilight 2017; Zorluer/Quan 2014; Halper 2017) und in den folgenden Publikationen, Daintree Networks (2011) und Leccese et al. (2014). Dabei ist nicht die LED Technologie die einzige Option als Beleuchtungsmittel für diese Technologien, sondern moderne Gasentladungslampen (NAV) kombiniert mit bedarfsgerechter Steuerung, z.B. dimmLight sind ebenbürtige Alternativen, da sie auch geringe Anschaffungs- und Folgekosten aufweisen (DimmLight 2017).

Ungeklärt ist aktuell, wie Dimmen und bedarfsgerechte Beleuchtung von den Menschen wahrgenommen und angenommen werden und wie sie das Leben der Bewohner beeinflussen (Shaw 2014).

Beleuchtungskörper

Der einfachste und effiziente Weg, Lichtverschmutzung zu vermeiden, ist es, wie schon wie vielfach in diesem Bericht erwähnt, voll abgeschirmte Leuchten zu verwenden, die ihre Leuchte horizontal montiert haben, bei denen das Leuchtmittel nicht aus dem Gehäuse ragt und die eine nicht gewölbtes Abdeckglas haben, Eine Liste von Leuchtenherstellern in Deutschland ist in der folgenden Publikation zu finden: Hänel (2017c).

Abbildung 38: Umrüstung der Beleuchtung einer Tankstelle mit eingelassenen Leuchten, die damit nicht mehr zu den Seiten abstrahlen und sehr geringe Blendung verursachen, zeigen, wie Lichtverschmutzung ohne Beleuchtungsnachteile reduziert werden kann (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Michael Weasner).

Bei der Anstrahlung von Objekten kann mit Reflektoren, Abblendklappen, Gitterblenden und Projektionstechniken wie einem Fassadenumriss als Schablone auf der Leuchte (GOBO (Graphical Optical Blackout)-Technik) ungewolltes Beleuchten der Umgebung des Objektes unterbunden werden (Fachhochschule Nordwestschweiz/Kobler 2009; Mohar et al. 2014, S. 20 f; Offenberger 2015).

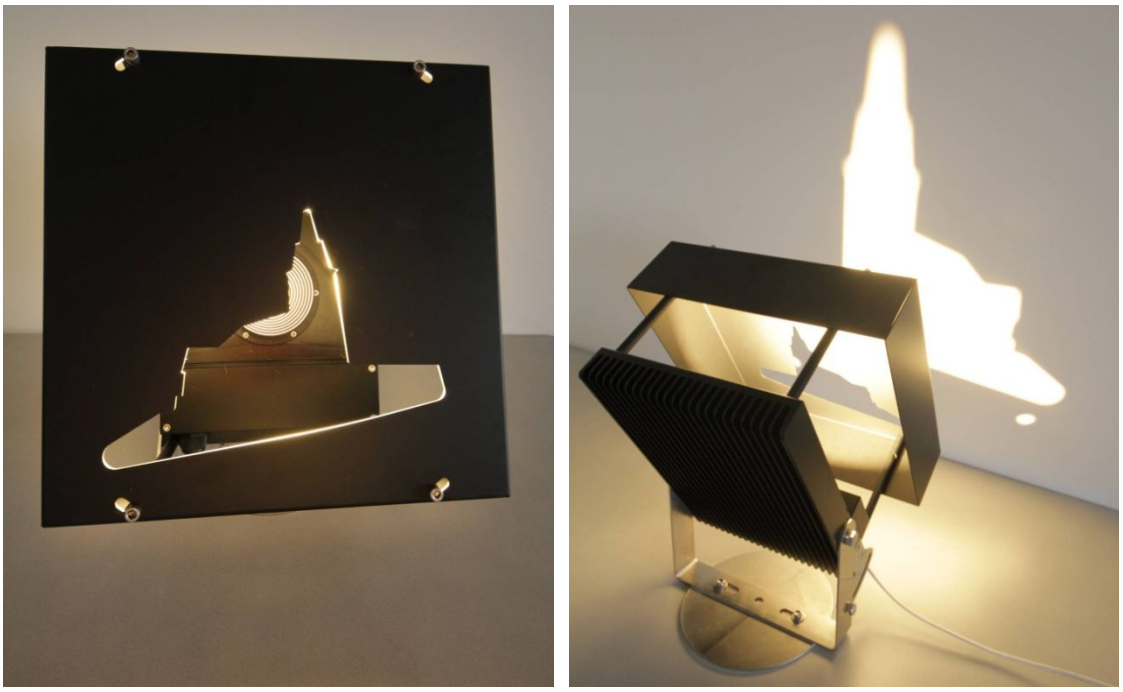

Abbildung 39: Strahler mit GOBO-Technik (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Andrej Mohar)

Farbspektrum

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der Lichtverschmutzung reduzieren kann, ist das Lichtspektrum: *"Leuchtmittel mit Ausstrahlungen außerhalb des für den Menschen sichtbaren Bereichs verschwenden wertvolle Energie!"* (Amt der Oberösterreichischen Landesregierung 2013, S. 21)

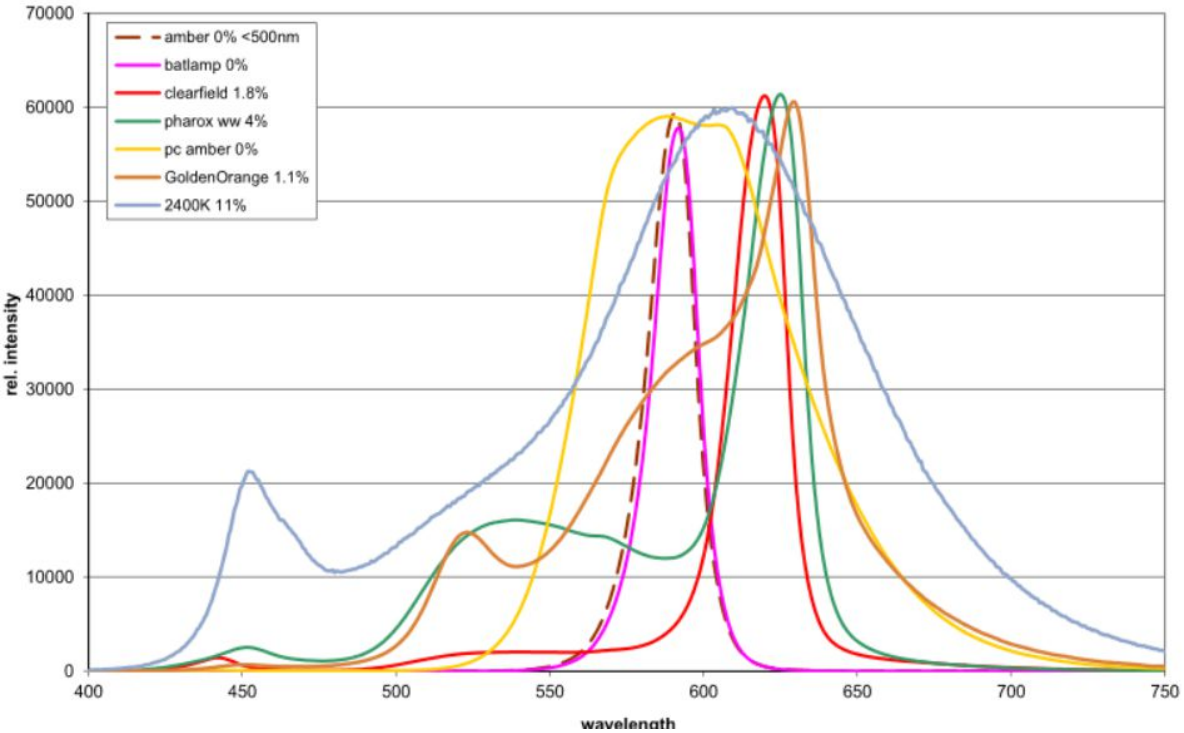

Abbildung 40: Spektren unterschiedlicher Leuchtmittel mit geringen Blauanteilen basierend auf Messungen von Harald Bardenhagen (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel).

Farbtemperaturen von unter 3000 K sollten verwendet werden (Matt 2015a; Frank/Sternenpark im Biosphärenreservat Rhön 2017), um ökologische (z.B. Anziehung von Insekten) und humanmedizinische Auswirkungen (z.B. Melatoninhaushalt) des blauen Lichtspektrums zu vermeiden (Falchi et al. 2011). Eine technische Entwicklung hier sind LEDs mit gelb-orangenen Farbtönen, wie die Philips LED pc amber, ähnlich zu den Spektren von Natriumdampflampen (Philips Lighting 2013). Eine weitere Entwicklung hat beispielsweise die niederländische Firma Innolumnis gemacht durch Hybridsysteme, die einzelne LEDs unterschiedlicher Farbe verwenden, die dann gemeinsam eine gute Farbwiedergabe ermöglichen, zugleich aber hohe Blau- oder auch Rotanteile vermeiden ("GoldenOrange"). Monochromatische LED haben ähnliche Eigenschaften wie Natriumniederdruckdampflampen, beeinflussen nur Teile des Spektrums und ziehen nochmal weniger Insekten an (z.B. Batlamp von Innolumnis), siehe Abbildung 38. In Deutschland wurden solche Leuchten erstmals auf der Wasserkuppe im Sternenpark Rhön installiert (Hänel et al. 2017). In der Folge wurde in weiteren Kommunen des Sternenparks solche gelbe LED-Beleuchtung installiert, und inzwischen bieten mehrere deutsche Hersteller ähnliche Produkte an.

Abbildung 41: Straße mit pc amber LED-Beleuchtung, Rasdorf, Rhön (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel)

Weitere technische Entwicklungen

Neben den vorgestellten Entwicklungen in Bezug auf Beleuchtungstechnologien gibt es noch weitere Möglichkeiten zum Beispiel auf öffentlichen Straßen den Einsatz von künstlicher Beleuchtung zu reduzieren, ohne die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer zu gefährden. Höhere Sichtbarkeit der Fahrbahn kann z.B. schon durch vibrierende thermoplastische Straßenbahnmarkierung mit passiven Retroreflektierungen oder Microprismen oder aktiv mit Solar-LED-Straßenmarkierung, z.B. Daan Roosegaarde's Projekte in den Niederlande (WIRED Germany 2014), erreicht werden. Höhere Sichtbarkeit von Radfahrern kann z.B. durch beleuchtete Räder erreicht werden.

Aktuell müssen die Rahmenbedingungen für die praktische Umsetzung der genannten Technologien auch durch eine Kostenreduzierung durch gezielte Förderpolitik noch geschaffen werden um eine Minimierung der Lichtverschmutzung voran zu treiben (Krause/Pottharst, 2014). Zudem müssen diese technologischen Entwicklungen auch in Normen und gesetzliche Regelungen aufgenommen werden. Im Moment ändert die LED-Entwicklung allerdings die Möglichkeiten schneller als die Norm angepasst werden kann. (Ratingen 2014).

4.4. Vorschläge für ein erhöhtes Bewusstsein für das Thema Lichtverschmutzung bei der Beleuchtungsplanung, Beratung und Öffentlichkeitsarbeit

Ein Problembewusstsein über die Lichtverschmutzung ist noch nicht allgemein etabliert (Krause et al. 2014a), daher ist es wichtig, das bestehende Wissen zu dem Thema einerseits an die Zivilgesellschaft und Unternehmen und andererseits an die Mitarbeiter von Behörden und Ämter weiter zu vermitteln und sensibilisierte Personen in Politik und Gesellschaft für das Thema zu finden. Denn Bewusstseinsbildung hat keinen Selbstzweck, sonder verändert die Sichtweise und Wahrnehmung (Brinkmeier 2013). Nur so kann der Einsatz von Steuerungs- und Planungsinstrumente zum Standard werden und die Lichtverschmutzung minimiert werden (Krause et al. 2014 a).

Positive Assoziation von Sicherheit, Wohlstand und Fortschritt in Bezug auf Licht und eine gewisse Bequemlichkeit konfligieren mit dem Schutz der Dunkelheit. Unter politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsträgern stehen bei der künstlichen Beleuchtung im Außenbereich besonders Finanz- und CO_2-Einsparungen im Vordergrund, während die Bevölkerung einen Fokus auf Sicherheit, Mobilität und Kriminalität in Bezug auf Beleuchtung legt (Green et al. 2015; Schulte-Römer 2012). Daher ist es wichtig zu vermitteln, dass eine Minimierung der Lichtverschmutzung nicht das Ziel hat, auf künstliches Licht komplett zu verzichten, sondern dass es sinnvoll eingesetzt wird, „das richtige Licht, zur richtigen Zeit am richtigen Ort".

Für eine bessere Vermittlung hinsichtlich der Lichtverschmutzung kann ein Fokus auf Synergieeffekte zwischen Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit, Gestaltung & Design, Gesundheit & Wohlbefinden sowie Natur-, Umwelt- und Emmissionsschutz, gelegt werden (Leuser et al. 2016). Ein Bewusstsein über ökologische, gesundheitliche oder ästhetische Folgen zu schaffen, ist dabei genauso wichtig wie das Wissen über technische, regulatorische und antizipative Möglichkeiten (Krause et al. 2014a).

Betrachtet man die bestehende Öffentlichkeitsarbeit und Beratung zum Thema Lichtverschmutzung in Deutschland, fällt auf, dass diese Initiativen auf einzelne handelnde Personen und Gruppen zurückgehen. Bei politischen Akteuren sind dies besonders Projekte auf kommunaler Ebene, hier können verstärkt Personen bei der Umsetzung von Einzelprojekten unterstützt werden. Durch Zunahme kommunaler Projekte kann die regionale Ebene beeinflusst werden, z.B. wie schon in der Rhön und im Westhavelland geschehen, durch die Schaffung eines Dark Sky Parks, aber auch durch kommunale Lichtkonzepten. Diese haben das Potential, eine Bewusstseinsbildung in der breiten Öffentlichkeit weit über die regionalen Grenzen hinaus in Deutschland zu schaffen, besonders wenn die Öffentlichkeit und Akteure beteiligt werden. Lokale und regionale Entwicklungen sind wichtig, um das Thema auf Bundes- und Länderebene zu bringen, wodurch eine Verbindlichkeit erhöht werden kann (Brinkmeier 2013).

Der staatliche Umgang mit dem Thema Beleuchtung und Lichtverschmutzung kann ein Wegweiser sein, durch Befugnisse in Regierung, Parlamenten, Räten und Verwaltungen, weitere Handlungsmöglichkeiten zu einer Bewusstseinsbildung sind:

- Fort- und Weiterbildungen, z.B. Verbreitung des aktuellen Wissenstandes durch Informationsmaterial, Vortragsreihen und Schulungen. Förderung des Ausbaus von Studiengängen zu Beleuchtungsgestaltung.
- Kommunikation und Sensibilisierung durch Erstellung von Best-Practice Beispielen und Leitfäden.
- Etablierung der industrieunabhängigen Lichtberatung und Gründung von Lichtplanungseinrichtungen.
- Schaffung interdisziplinäre Kooperationen und integrierter Beleuchtungsplanung.
- Demonstration von verschiedenen Beleuchtungstechniken anhand von Beleuchtungsmusterstrecken.
- gut organisierte Medienkampagnen und Aktionen in den sozialen Netzwerken
- Förderung von nachhaltigem Tourismus inkl. Astrotourismus für ein Erleben der natürlichen Dunkelheit

Wichtig ist hierbei auf die verschiedenen Interessengruppen aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft einzugehen und auch unter ihnen zu differenzieren, so zum Beispiel zwischen Amateuren und Experten, aber auch den Bevölkerungsgruppen in urbanen und ländlichen Gebieten oder zwischen der emotionalen und der rationalen Wissensvermittlung (Challéat/Poméon 2017). Ein erster Fokus kann auf bestehende Institutionen und Informationsplattformen gerichtet werden. So hilft eine stärkere Einbindung des Themas in bestehende Lichtdesign-Studiengänge durch Entwicklung entsprechender Lehrkonzepte (Schulte-Römer 2011). Für Handwerksbetriebe könnten hier verstärkt die regionalen Industrie- und Handelskammern akquiriert werden. Die von Lichtplanern häufig verwendete Internetplattform „Prediger – Lichtberatung“ weist zum Beispiel nur sehr lückenhafte und fehlerhafte Informationen zum Thema[56] auf, und auch im Grünbuch zur Zukunft der Beleuchtung der Europäischen Kommission wird Lichtverschmutzung nicht erwähnt. Wegen dieser bestehenden Defizite wurden Kommentare "Wege zum Licht in der Zukunft gibt es mehrere" von Falchi und Marin (2012) verfasst. Auch auf der Seite der Europäischen Umweltagentur EEA[57] sind keine Informationen zu dem Thema zu finden (Europäische Kommission 2011). Eine weitere Möglichkeit, Fachleute zu erreichen, ist auf Messen, wie der kommenden Light+Building im März 2018, das Thema besser publik zu machen. Daneben ist ein sehr praktischer Ansatz die Errichtung von Beleuchtungsmusterstrecken und die aktive Beteiligung der Bürger*innen. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist die Waldstrasse in Berlin (Senatsverwaltung für Umwelt 2016), der BMBF finanzierte LEDlaufsteg[58] in Berlin (aktuell sind die Musterstrecke für Lichtfarben noch nicht umgesetzt worden) oder die Anwohnerbeteiligung in Chemnitz (Stadt Chemnitz 2016). Der lokale Energieversorger RhönEnergie hat auf seinem Betriebsgelände in Fulda nur Muster von warmweißen und gelben voll abgeschirmten LED-Leuchten installiert, um einen realen Eindruck versch. Beleuchtungslösungen gewinnen zu können (Abbildung 42).

[56] https://prediger.de/lichtberatung/lexikon/lichtverschmutzung.html (30.10.2017)
[57] https://www.eea.europa.eu (30.10.2017)
[58] http://www.led-laufsteg.de/ (07.12.2017)

Abbildung 42: Musterstraße der RhönEnergie in Fulda mit warmweißen, gelben und Hybrid-LED-Leuchten (Bildquelle: Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von A. Hänel)

Beispielhaft folgen nun zwei Vorschläge zur Kommunikation für ein erhöhtes Bewusstsein in der Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und für Bürger*innen, erstens zur DIN EN Norm 13201 und zweitens zum Thema Dunkelheit an sich.

Bei der Norm DIN EN 13201 besteht häufig die falsche Annahme, dass diese Industrienorm rechtsverbindlich ist. Die Unsicherheit darüber hindert Personen und Planungsprozesse im Bereich der Straßenbeleuchtung, neue Wege zu gehen (Riedel et al. 2013, S. 77 ff; Ringwald/Engel 2013).. Es besteht keine bekannte offizielle Erklärung zu dieser Norm, auch Informationen, welche Auswirkungen ein Nichteinhalten der Norm für die Entscheidungsträger und Planer haben kann sind nicht eindeutig. Erst eine intensive Auseinandersetzung mit dem Thema, wie es zum Beispiel aktuell in Ludwigsburg geschieht, werden alternative Lichtplanungskonzepte wie Langsames Licht / Slow Light erst ermöglichen (persönliche Kommunikation E-Mail Sigrun Appel 19.10.2017). Wenigen Akteuren ist bewusst, dass eine deutschlandweit flächendeckende Anwendung die öffentliche Ausgaben für Beleuchtung und Lichtemissionen drastisch erhöhen würde (Krause et al., 2014a). Durch klare Kommunikation, wie mit Industrienormen umgegangen werden soll, ebenso mit Veröffentlichung von offiziellen Leitfäden und Best-Practice Beispielen wie Lichtkonzepten, kann hier effiziente und zielgerichtete Hilfe geleistet werden und bestehendes Wissen einer breiten Öffentlichkeit vermittelt werden. Zusammenarbeit mit unterstützenden internationalen Regierungs- und Nichtregierungsorganisationen, die bereits zu dem Thema aktiv sind, hilft Wissen zu vernetzten und weiter zu verbreiten (z.B. die LUCI Assoication Online Datenbank[59], Leitfaden für besseres Licht des Land Oberösterreich (Amt der Oberösterreichischen Landesregierung 2013) und Informationen der Fachgruppe Dark Sky der Vereinigung der Sternfreunde e.V. zur Straßenbeleuchtung[60]).

[59] http://www2.luciassociation.org/Articles-best-practices.html (30.10.2017)
[60] http://www.lichtverschmutzung.de/seiten/strassenbeleuchtung_1.php (30.10.2017)

Dunkelheit, als zweites Beispiel, ist in urbanen Räumen mittlerweile selten geworden und bietet ein besonderes Erlebnis von Natur und Nacht (Krause et al. 2014a). Wie das Thema Biodiversität kann auch der Nachthimmel konkret als nicht menschengemachte Ressource und Ökosystemdienstleitung verstanden werden (Challéat/Poméon 2017). Ein dunkler Nachthimmel mit einem natürlichen Tag/Nachtrhythmus ist für die menschliche Gesundheit, Flora und Fauna sehr wichtig, weiterhin sind mit dem Nachthimmel ein spiritueller und geistiger Gewinn durch hervorgerufene Emotionen und Inspirationen, die Betrachtung von Schönheit der Landschaft, Ausführung nächtliche Navigation und Astronomie mit den Sternbildern sowie das kulturelle Erbe und Religion verbunden (Challéat/Poméon 2017). Wichtig bei der Vermittlung des Wertes eines natürlichen Nachthimmels ist auch der Raumbezug. So wird der Einfluss künstliche Beleuchtung generell sehr lokal betrachtet, hat jedoch in diesem Beispiel durch die Erhöhung der Himmelshelligkeit durch nach oben emittiertes und reflektiertes Licht viel weitreichendere Folgen. Für eine erweiterte Bewusstseinsbildung zur Wahrnehmung von Dunkelheit kann auch der Ökotourismus / Astrotourismus herangezogen werden, z.B. durch die weitere Ausweisung von Sternenparks, Sternführungen oder auch "Teleskoptreffen", die Vermarktung des „Schlafen unterm Sternenhimmel" (z.B. ATTRAP'RÊVES[61] in Frankreich, Kakslauttanen Artic Resort[62] in Finnland und "Unterm Sternenhimmel"[63] im Sternenpark Westhavelland in Deutschland). Daneben können Veranstaltungen wie Lichtfestivals oder das von der UN ausgerufene internationale Jahr des Lichtes 2015[64] auch umgekehrt mit Aktionen zum Thema Lichtverschmutzung, Nacht und Dunkelheit das Thema weiter in der Öffentlichkeit verbreiten, wie z.B. die schon seit vielen Jahren erfolgreich durchgeführte "Nacht van de Duisternis" Nacht der Dunkelheit in Flandern[65] .

Zuletzt sind hier noch einige Initiativen genannt, die zu einem erhöhten Bewusstsein zum Thema Lichtverschmutzung gegenwärtig beitragen (in alphabetischer Reihenfolge):

- Guerilla lighting Kollektive wie z.B. in München[66], die auf die Wirkung von Licht und schlechtem Einsatz von Beleuchtung durch spontane Aktionen aufmerksam machen
- "Grüne Palme" der GEOSaison: Sternenparks als Ziel für nachhaltigen Tourismus (GEO 2015)
- Fatal light awareness programm (Kanada)[67]: Ziel der Organisation ist es, kollisionsfreie urbane Räume für Vögel zu schaffen, breites Informationsspektrum zur Auswirkungen von Lichtverschmutzung auf Vögel
- Fördergemeinschaft gute Licht[68]
- Initiative gegen Lichtverschmutzung, Fachgruppe Dark Sky der Vereinigung der Sternfreunde e.V.[69]: weitreichendes Informationsangebot
- International Dark-Sky Association (IDA)[70]
- Lichtforum NRW[71]: Ziel ist Förderung und Weiterentwicklung von innovativer Lichtplanung, -anwendung und –technik für Unternehmen, Kommunen, Verbände, Planer, Techniker und Personen, die für die Ausführung von Lichtprojekten beauftragt werden.

[61] http://www.attrap-reves.com/en/(30.10.2017)
[62] http://www.kakslauttanen.fi/(30.10.2017)
[63] http://www.unterm-sternenhimmel.de/unterkunft/schlafen-unterm-sternenhimmel(30.10.2017)
[64] http://www.jahr-des-lichts.de/(30.10.2017)
[65] https://www.bondbeterleefmilieu.be/activiteiten/nacht-van-de-duisternis(30.10.2017)
[66] https://www.guerrilla-lighting.de/(30.10.2017)
[67] www.flap.org(30.10.2017)
[68] https://www.licht.de (30.10.2017)
[69] http://www.lichtverschmutzung.de/(30.10.2017)
[70] http://darksky.org/(30.10.2017)
[71] http://www.lichtforum-nrw.de/(30.10.2017)

Neben Schulungen, Vorträgen und Seminaren gibt es auch Veröffentlichungen zur Technologie und Anwendung von LED.

- light collective[72]: Lichtdesigner, die sich auch mit dem Thema Lichtverschmutzung, nachhaltige Beleuchtung und Dunkelheit auseinandersetzten
- Loss of the Night Network LoNNe[73]: Internationales Forschungsnetzwerk zum Thema Lichtverschmutzung mit Empfehlungen und Informationsmaterialien
- LUCI Association[74]: Internationales Netzwerk von Beleuchtungsexperten, Verwaltung, Herstellern, Wissenschaftlern und Designern. Breites Spektrum an Broschüren, Netzwerken, Online Datenbank zu Best-Practice-Anwendungen etc.
- LUX: Lightplanung Homepage[75]
- NABU Projekt Kommunale Lichtplanung[76]
- Sternenpark Rhön[77]: Informationsportal für Kommunen zur nachhaltigen Lichtnutzung
- Sternenpark Schwäbische-Alb[78]
- Umwelt im Unterricht, BMUB Bildungsservice[79]: Informationsmaterial zu Unterrichtseinheiten über Lichtverschmutzung
- Verlust der Nacht[80]: Interdisziplinäres Forschungsprojekt mit breitem Informationsmaterial

[72] https://lightcollective.net(30.10.2017)
[73] http://www.cost-lonne.eu/recommendations/(30.10.2017)
[74] http://www2.luciassociation.org/(30.10.2017)
[75] http://luxreview.com(30.10.2017)
[76]https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/energieeffizienz-und-gebaeudesanierung/beleuchtung/index.html(30.10.2017)
[77]https://www.sternenpark-rhoen.de/informationsportal-fr-kommunen/nachhaltigen-lichtnutzung/index.html(30.10.2017)
[78] https://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/ (30.10.2017)
[79] http://www.umwelt-im-unterricht.de/hintergrund/licht-und-lichtverschmutzung/(30.10.2017)
[80] http://www.verlustdernacht.de(30.10.2017)

5. Fazit & Einschätzung der Gutachter*innen

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, unsere positiven Assoziationen 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: ihre ‚Schattenseiten' bleiben verborgen. So hilfreich Außenbeleuchtung auch sein mag, so problematisch ist ihre Wirkung auf die Natur, einschließlich des Menschen. Es erfolgt erst seit wenigen Jahren ein Umdenken, die nicht intendierten 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 - sollten wir mit Ressourcen schonend umgehen, frühzeitig und vorausschauend und im Interesse künftiger Generationen handeln, auch wenn Ursache-Wirkungs-Beziehungen noch nicht vollständig definiert sind. Einem bereits zu beobachtenden Rebound-Effekt durch energieeffiziente Beleuchtung ist entgegenzuwirken, die Beleuchtungsanwendung im Außenbereich ist zu prüfen, gesellschaftlich zu diskutieren, und Regelungsformen sind zu entwickeln - nur so kann sich ein nachhaltiger Umgang mit künstlichem Licht im Außenbereich etablieren.

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 *angemessene* Beleuchtung ist - und entsprechende Grenzwerte sind im Konsens zu definieren. Dazu wird es notwendig sein, zwischen den gesellschaftlichen und ökologischen Kosten einerseits und den vielfältigen Nutzen der Beleuchtung andererseits abzuwägen. Wissen und Positionen aus unterschiedlichen Disziplinen und Zugängen sind einzubeziehen. Dies beinhaltet, die Kausalitäten zwischen der Vielfalt der Nutzung und Wirkung von Licht im Außenbereich (Ordnungslicht, Werbelicht, Festlicht, Wohnlicht und Arbeitslicht) und die mit seiner Nutzung verbundenen sozialen, psychologischen, kulturellen und ökologischen Auswirkungen auf den Menschen und seine Umwelt näher zu beleuchten. Um dies zu erreichen, ist nicht nur weitere Grundlagenforschung notwendig (Hölker et al. 2010; Henckel/Moss 2015), sondern auch die kritische Überprüfung der Belastbarkeit der Evidenz der heute gängigen Beleuchtungspraxis: Woher kommt das Wissen, auf Grundlage dessen künstliche Beleuchtung geplant wird, und ist es 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. Zentral ist angesichts der immer breiter gefächerten Anwendung künstlicher Beleuchtung die Betrachtung der Gesamtbeleuchtungssituation, d.h. der Einbezug nicht nur öffentlich, sondern auch privat betriebener Lichtquellen (Gebäudebeleuchtung, Werbung usw.). Mit einem deutschlandweit flächendeckenden Leuchtenkataster der öffentlichen und privaten Beleuchtung kann neben einer effektiven Betriebsführung und Lenkung des Energieverbrauches auch der Anteil des nichtintendierten Lichtes bestimmt werden und würde eine fundierte Basis für Monitoring und Kontrolle von Lichtemissionen bilden.
Ausmaß und Trends der Nutzung von Außenbeleuchtung können mit Hilfe der Fernerkundung und durch Messungen am Boden untersucht werden. Die Satellitenfernerkundung im optischen Bereich konzentriert sich bisher stark auf Tageslicht-Aufnahmen. Die nächtliche Erderkundung wurde weniger berücksichtigt. Aus der hier relevanten Sichtweise kann bei Satellitenbildern eine

Erweiterung der Sensoren in den blauen Wellenlängenbereich, die Erstellung von multispektralen Aufnahmen, eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung und Kalibrierung der Sensoren, sowie eine Konzeption einer Mission für Lichtverschmutzung wichtige Lücken schließen. Bei den weiteren wichtigen Messmethoden am Boden, wie vertikale und Fischaugenfotografien sowie SQM Messungen der Himmelshelligkeit muss die Kalibrierung weiter vorangetrieben werden. Der Vergleich mit Luft- und Lärmmessnetzen legt nahe, auch für die Lichtverschmutzung ein weitreichendes Monitoring-Netz 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.

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 zum Beispiel 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?

Durch Bündelung von Kompetenzen und Förderung eines Wissenstransfers (Kompetenzzentrum) und erhöhte personelle wie finanzielle Mittel (inkl. Messinstrumente) kann ein Bewusstsein über ökologische, gesundheitliche oder ästhetische Folgen von künstlicher Beleuchtung im Außenbereich und ein Wissen über technische, regulatorische und antizipative Möglichkeiten weiter verbreitet werden. Besonderer Fokus sollte auch auf Synergieeffekte zwischen Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit, Gestaltung & Design, Gesundheit & Wohlbefinden sowie Natur-, Umwelt- und Immissionsschutz gelegt werden. Mehr Bürgerbeteiligung in Fragen der Beleuchtung und der Entwicklung der entsprechenden Beteiligungsformen kann zu einer höheren Akzeptanz führen, aber auch Teil der Wegfindung hin zur Beantwortung der grundlegenden Fragen sein: Wie viel Licht, welcher Art brauchen wir wann & wo? Demonstrations- und Testprojekte helfen ebenso, diese Fragen an einem Ort zu beantworten.

Der politische Rahmen kann durch die Entwicklung einer Beleuchtungs-Governance erreicht werden, die auf einer breiten Kombination von Ansätzen stützt. Bedeutend sind sowohl die (Weiter-)Entwicklung von Regelungen, um bestehende Lücken in der Regelungslandschaft zu schließen, als auch die Gestaltung von Prozessen. Dabei kann von den Erfahrungen anderer europäischer Länder profitiert werden. Besonders bedeutend auf Bundesebene wäre es, für die öffentliche Beleuchtung Orientierungsrahmen zu bieten, die ein Gegengewicht zu den bestehenden Industrienormen (z.B. DIN EN 13201) bilden, indem sie den Gebietskörperschaften eine rechtssichere Grundlage für ihre Beleuchtungsplanung bieten, welche die große Bandbreite der Aspekte bezogen auf Licht zu berücksichtigen und Grenzen und Maßstäbe setzen. Gerade bei der in Deutschland gängigen, durch die gegebenen Normen stark beförderten, Praxis der ausschließlichen Festlegung von Minimalwerten bei der öffentlichen Beleuchtung sehen die Autoren großen Handlungsbedarf, da diese allein aus einer lichttechnischen Betrachtung der

Verkehrssicherheit entstanden sind und Maximalwerte der zulässigen Beleuchtung fehlen. Ein ganz zentraler Aspekt ist es auch, Lichtverschmutzung zu verhindern, bevor sie entsteht, statt im Nachhinein einzugreifen. Dies wäre insbesondere im Rahmen von baurechtlichen Regelungen möglich. Räumlich 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. Flankierend zu "harten" rechtlichen Regelungen können Handlungsempfehlungen bzw. Leitfäden notwendige Orientierung bieten, und die Berücksichtigung von Lichtverschmutzung in den Kriterien von Förderprogrammen wichtige Anreize setzen.

Die moderne Lichttechnik ermöglicht Vieles: Sie birgt Chancen ebenso wie Risiken in Bezug auf die weitere Entwicklung der Lichtverschmutzung. Das heißt: Der Einsatz neuer Technik führt nicht automatisch zur Entwicklung einer - notwendigen - umsichtigen Kultur im Umgang mit Beleuchtung. Durch geringe Energiekosten und drastisch fallende Anschaffungskosten wird sich die Verbreitung der LED rasant durchsetzen. Das Problem ist dabei nicht mehr nur die öffentliche Beleuchtung, sondern zunehmend sind es auch Formen der privaten Beleuchtung, etwa im Gewerbe- und Handelsbereich, aber auch im Umfeld von Wohnhäusern. In immer weiteren Bereichen wird LED-Beleuchtung eingesetzt, ob sinnvoll oder nicht - der Markt ist da. Dazu gehören auch die Leuchtkugeln, Lichterketten und Diskostrahler für Gartenillumination. Halogenflutlichtstrahler werden durch kleine LED-Strahler ersetzt, die kaum noch eine effiziente Lichtlenkung ermöglichen, da keine Spiegel (z.B. asymmetrische Planflächenstrahler) mehr eingesetzt werden. Oft werden sie komplett mit Bewegungsmeldern so verkauft, dass keine gezielte Ausrichtung nach unten mehr möglich ist. Inzwischen sind im Baumarkt extrem helle Fluter mit 7500 lm zu kaufen, die weitflächige Ausstrahlungen ermöglichen. Wegen ihrer kleinen Abmessungen und hohen Blauanteile sind die LEDs extrem blendend und stellen damit eine Gefährdung für die Augen dar. Vor diesem Hintergrund ist dringendst zu prüfen, ob nicht durch eine gesetzliche Regelung die rasante Zunahme heller Lichtquellen beschränkt werden muss.

Bedeutend ist daher, dass in Fragen der Außenbeleuchtung künftig nicht vorrangig das technisch Mögliche ausschlaggebend sein sollte, sondern dass die Möglichkeiten der Technik eingesetzt werden, um bedarfsorientierte und situationsgerechte Beleuchtungsziele umzusetzen. Diese gilt es jedoch zuerst zu definieren. Hierfür ist die Verfügbarkeit von Informationen über die (Entwicklung der) Beleuchtungssituation (Dokumentationen und Kataster, Monitoring) ebenso bedeutend wie die Vermittlung von Wissen über Nutzen und Risiken künstlicher Beleuchtung (an Laien wie auch an Fachleute) und der Einbezug der Bürger*innen. Als Instrument bieten sich lokale und regionale Lichtkonzepte an, die die gesamte Beleuchtungssituation (öffentliche und private Lichtquellen) in den Blick nehmen und in deren Entwicklung verschiedene disziplinäre Perspektiven Eingang finden sollten. Sie bieten die Möglichkeit, in Städten und Regionen nicht nur Einigung darüber zu erzielen, wo wie viel Licht welcher Art zum Einsatz kommen sollte, sondern auch, wo es gilt, die Dunkelheit zu schützen. Sie zu erhalten bzw. wiederherzustellen und auch für Menschen ohne Überwindung von großen Distanzen erlebbar zu machen - nicht als Luxusgut, sondern vielmehr als breit erlebte Erfahrung der Bevölkerung - bietet die Chance, dem Phänomen der "shifting Baselines" zu begegnen und ihre Wertschätzung zu erhalten.

Die vorliegende Untersuchung über das Ausmaß der Lichtverschmutzung und über Optionen zur Minderung der negativen Auswirkungen zeigt eines aber bei all den offenen Fragen ganz deutlich: Mit den gängigen Beleuchtungsmöglichkeiten ist es heute bereits möglich, die Lichtverschmutzung drastisch zu reduzieren.

6. Literaturverzeichnis

Amt der Oberösterreichischen Landesregierung (2013): Leitfaden Besseres Licht. http://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/us_besseresLicht2013_leitfaden.pdf (13.12.2017)

André Boße (2016): Weltneuheit: Medienfassade. In: karriereführer. http://www.karrierefuehrer.de/branchen/bauingenieure/weltneuheit-medienfassade.html (30.10.2017)

ANPCEN (Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environment Nocturnes) (o.J.): Bilan no. 2 de l'ANPCEN: L'extinction des bâtiments non résidentiels est-elle appliquée un an et demi plus tard? https://www.anpcen.fr/?id_rub=11&id_ss_rub=197&id_actudetail=82 (13.12.2017)

ANPCEN (Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environment Nocturnes) (o.J): Découvrir les enjeux de la qualité de la nuit > Législation, Règlements et normes. https://www.anpcen.fr/?id_rub=11&id_ss_rub=39&rub=decouvrir-les-enjeux-de-la-qualite-de-la-nuit&ss_rub= (13.12.2017)

ANPCEN (Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environment Nocturnes) (2014): Arrêté du 1er juillet 2013 d'extinction des façades, vitrines, bureaux: Gaspillages énergétiques-nuisances lumineuses: des progrès, mail la réglementation reste à appliquer, et à faire appliquer far l'Etat et par les communes! 2e Bilan ANPCEN. Communiqué.

ANPCEN (Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environment Nocturnes) (2017a): Participez à Villes et Villages étoilés Règlement et critères de notation 2017. https://www.anpcen.fr/?id_rub=19&id_ss_rub=100&rub=participez-%E0-villes-et-villages-etoiles&ss_rub= (13.12.2017)

ANPCEN (Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environment Nocturnes) (2017b): Des étiquett es de qualification des lumières et installations. https://www.anpcen.fr/?id_rub=96&id_ss_rub=115 (13.12.2017)

ANPCEN (Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environment Nocturnes) (2017c): Participez à Villes et Villages étoilés. https://www.anpcen.fr/?id_rub=19 (13.12.2017)

ANPCEN (Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environment Nocturnes) (2017d): Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environment Nocturnes. www.anpcen.fr (13.12.2017)

ANPCEN (Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environment Nocturnes) (2017e): Notre actualité - ANPCEN. https://www.anpcen.fr/?id_rub=&id_ss_rub=127&id_actudetail=165 (13.12.2017)

Appelt, S. (2017): Touched by Light. In: International Journal of Sustainable Lighting 19(1), S. 36–47

Arnold, G.; Burke, M.; Lahar, D. (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, S.14-23

ASR (Ausschuss für Arbeitsstätten) (2014): Arbeitsstätten Richtlinien Verordnung A3.4 Beleuchtung. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/pdf/ASR-A3-4.pdf?__blob=publicationFile (13.12.2017)

Aubé, M. (2015): Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment. In: Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 370(1667), DOI: 10.1098/rstb.2014.0117, S. 20140117–20140117

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), DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.20664.x, S. 819–830

Auer, G. (1997): Die Verlichtung der Stadt (Overexposed cities). In: Topos - the international review of landscape architecture and urban design 20. S. 6–14

Baar, M. (2014): Rathaus in Weimar sieht Straßenbeleuchtung nicht als seine Pflichtaufgabe an. In: Thüringer Allgemeine vom 18.10.2014.

Bach, S.; Degenring, F. (2015): Dark Nights, Bright Lights: Night, Darkness, and Illumination in Literature., Berlin, Boston

Baddiley, C.J.; Werbster, T. (2007): Towards understanding skyglow: a contribution to the discussion. In: British Astronomical Assoc. Campaign for Dark Skies.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2011): Lärm entwertet Mietliegenschaften. In: Bundesamt für Umwelt BAFU. http://www.bafu.admin.ch/laerm/13598/16674/index.html?lang=de (13.12.2017)

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2017a): Vollzugshilfe Lichtemissionen (Entwurf zur Konsultation). Bern, Schweiz.

BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2017b): Konsultation Vollzugshilfe Lichtemissionen. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/fachinformationen/lichtemissionen--lichtverschmutzung-/konsultation-vollzugshilfe-lichtemissionen.html (13.12.2017)

BAFU (Bundesamt für Umwelt); WSL (2017): Wandel der Landschaft. Erkenntnisse aus dem Monitoringprogramm Landschaftsbeobachtung Schweiz (LABES). Bern. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/landschaft/publikationen-studien/publikationen/wandel-der-landschaft.html (13.12.2017)

Bará, S.; Rodríguez-Arós, Á.; Pérez, M.; Tosar, B.; Lima, R.C.; de Miguel, A.S. ; Zamorano, J. (2017): Estimating the relative contribution of streetlights, vehicles and residential lighting to the urban night sky brightness. S. 1–25

Barentine, J.C. (2017): Skyglow Changes Over Tucson, Arizona, Resulting From A Municipal LED Street Lighting Conversion. Cellers, Spanien: Light Pollution Theory Modelling and Measurement 2017, Cellers, Spanien

Bartos, M.; Hohenwarter, S. (2011): Lärm am Immobilienmarkt. In: Universität Innsbruck. https://www.uibk.ac.at/ipoint/news/2011/laerm-am-immobilienmarkt.html.de (13.12.2017)

Bayrischer Rundfunk (2015): Straßenlampen-Patenschaft: Für 95 Euro geht das Licht in Zwiesel an. http://www.br.de/nachrichten/niederbayern/inhalt/patenschaft-fuer-laternen-in-zwiesel-100.html (19.05.2015)

Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2017): Ökodesign-Verordnung - Verordnung (EG) Nr. 245/2009 (Leuchtstofflampen ohne eingebautes Vorschaltgerät, Hochdruckentladungslampen sowie Vorschaltgeräte und Leuchten zu ihrem Betrieb). https://www.umweltpakt.bayern.de/energie_klima/recht/eu/312/oekodesign-verordnung-verordnung-eg-nr-2452009-leuchtstofflampen-ohne-eingebautes (13.12.2017)

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, S.R. (2014): Zwei Drittel der deutschen Landschaftsbilder in nur einer Generation tiefgreifend verändert. http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Home/Topthemen/landschaftswandel.html (13.12.2017)

Besecke, A.; Hänsch, R. (2015): Residents' Perceptions of Light and Darkness. In: Meier, J.; Hasenöhrl, U.; Krause, K.; Pottharst, M. (Hg.): Urban Lighting, Light Pollution and Society, S. 224–248 New York/Oxon

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

BGBl (Bundesgesetzblatt) (1975): Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV). Bundesgesetzblatt Teil 1.

BImSchG (Bundes-Immissionsschutzgesetz) (2011): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge,vom 15. März 1974 (BGBl. I, S. 721, 1193) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Mai 1990 (BGBl. I, S. 880)

Birriel, J.J.; Ky, M.; Walker, C.E. & Thornsberry, C.R. (2014): Analysis of Seven Years of Globe at Night Data. In: 42, S. 219–228.

Blair, A. (2015): The Psychology of Dark Skies. In: International Dark-Sky Association. http://darksky.org/the-psychology-of-dark-skies/ (13.12.2017)

BMUB (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit) (2016): Klimaschutz in neuem Licht - Die LED-Leitmarktinitiative: Innovation für Kommunen und Wirtschaft. Berlin, Germany. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/nki_klimaschutz_in_neuem_licht_bf.pdf (13.12.2017)

BMUB (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit) (2017): Klima und Kasse mit LED-Lampen entlasten: Bundesumweltministerium bilanziert LED-Leitmarktinitiative. Pressemitteilung Nr. 064/17. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. http://www.bmub.bund.de/N54013/ (13.12.2017)

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

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, DOI: 10.1177/0013916512453838, S. 193–212

Borgmann, R.; Kurz, T. (2014): Leitfaden „Lichteinwirkung auf die Nachbarschaft" FS-2014-160-AKNIR-Netz. Köln.

Böttcher, M. (Hg.) (2001): Auswirkungen von Fremdlicht auf die Fauna im Rahmen von Eingriffen in Natur und Landschaft Analyse, Inhalte, Defizite und Lösungsmöglichkeiten Referat und Ergebnisse der gleichnahmigen Fachtagung auf der Insel Vilm vom 06. bis 09. Dezember 1999. In: Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz. Bonn - Bad Godesberg: Bundesamt für Naturschutz. http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Auswirkungen+von+Fremdlicht+auf+die+Fauna+im+Rahmen+von+Eingriffen+in+Natur+und+Landschaft#0 (13.12.2017)

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 (13.12.2017)

Boyle, A. (2015): Noise vs. Nature: How We're Upsetting America's Soundscapes. In: NBC News. http://www.nbcnews.com/science/environment/noise-vs-nature-how-were-upsetting-americas-soundscapes-n307216 (13.12.2017)

Brinkmeier, M. (2013): Lichtverschmutzung und Schutz der Nacht – Bewusstseinsbildung. In: Held, M.;Hölker, F.; Jessel, B. (Hg.): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 109–112, Bonn - Bad Godesberg

Brons, J.; Bullough, J.; Rea, M. (2008): Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution. In: Lighting Research and Technology 40, DOI: 10.1177/1477153508094059, S. 201–224

Bullough, J.D. (2015): Spectral Sensitivity Modeling and Nighttime Scene Brightness Perception. In: Leukos 11, S. 11–17.

Bullough, J.D. (2017): Opinion : Will road lighting wither ? In: Lighing Res. Technology 49, S. 2017.

Burtt, H.E. (1916): The effect of uniform and non-uniform illumination upon attention and reaction-times, with especial reference to street illumination. In: Journal of Experimental Psychology 1, DOI: 10.1037/h0071640, S. 155–182

Cambridge News (2016): Cambridge streetlights are staying on as city council steps in to pay the bill. http://www.cambridge-news.co.uk/Cambridge-streetlights-STAYING-city-council-steps/story-28467423-detail/story.html (13.12.2017)

Cardwell, D. (2014): Conehagen Lighting the Way to Greener More Efficient Cities. In: The New York Times.

CDC Biodiversité (2015): Eclairage du 21ème siècle et biodiversité. Paris. http://www.mission-economie-biodiversite.com/publication/eclairage-du-21eme-siecle-et-biodiversite (13.12.2017)

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, UK. https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/21053b77-a08e-431c-a00e-1ba49612e2b9/language-en/format-PDF/source-search (13.12.2017)

Cha, J.S.; Lee, J.W.; Lee, W.S.; Jung, J.W.; Lee, K.M.; Han, J.S.; Gu, J.H. (2014): Policy and status of light pollution management in Korea. In: Lighting Research and Technology 46, S. 78–88 (13.12.2017)

Challéat, S.; Poméon, T. (2017): Working paper Assess the nocturnal environmental resources through their protection in the territories. S. 1–18. https://www.researchgate.net/profile/Samuel_Challeat/publication/315640583_Assess_the_nocturnal_environmental_resources_through_their_protection_in_the_territories_Working_paper/links/58d8afde4585153378bbc222/Assess-the-nocturnal-environmental-resources-t (13.12.2017)

Chen, S. (2014): Luxury Homes With Starry Nights. In: Wall Street Journal.

CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) (1997): CIE 126: Guidlines for minimizing sky glow.

CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) (2003): Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations. Wien. http://www.cie.co.at/index.php/Publications/index.php?i_ca_id=425 (13.12.2017)

CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) (2017): CIE 150:2017: Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations.

CieloBuio (2004): Documentazione tecnico legislativa. http://cielobuio.org/articolo-874/ (13.12.2017)

Cinzano, P. (2000): The Propagation of light pollution in diffusely urbanised areas. In: Memorie della Società Astronomia Italiana 71, S. 93–112.

Cinzano, P.; Falchi, F.; Elvidge, C.D.C. ~D. (2001): The World Atlas of the Artificial Night Sky Brightness - Europe. In: Copyright Royal Astronomical Society. Reproduced from the Monthly Notices of the RAS by permission of Blackwell Science 328, DOI: 10.1046/j.1365-8711.2001.04882.x , S. 689–707

Cinzano, P. (2007): Laws against light pollution in italy. In: Pierantonio Cinzano Web pages. http://www.lightpollution.it/cinzano/en/page95en.html (13.12.2017)

Clanton, N. (2014): Opinion: Light pollution … is it important? In: Lighting Research and Technology 46, DOI: 10.1177/1477153513519378, S. 4

Clanton & Associates, I. & Northwest Energy Efficiency Alliance (2014): Seattle LED Adaptive Lighting Study. Boulder, USA.

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

Court of Audit of the Republic of Slovenia (2017b): Summary of the audit report „The effectiveness of the prevention of light pollution". (Dark-Sky Slovenia, Übers.). Ljubljana: Court of Audit of the Republic of Slovenia.

Crissxcross (2014): Intelligente netzwerkfähige LED – Straßenlaternen in Leipzig. In: Siio. https://www.siio.de/intelligente-netzwerkfaehige-led-strassenlaternen-leipzig/ (13.12.2017)

Daintree Networks (2011): Applying Mesh Networking to Wireless Lighting Control

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/ (13.12.2017)

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. In: Environment. London. http://www.darkwightskies.com/wp-content/files/DEFRA - Statutory Nuisance.pdf (13.12.2017)

Degenring, F. (2015): On Behalf of the Dark? Functionalisations of Light Pollution in Fiction. In: Dark Nights, Bright Lights Night, Darkness, and Illumination in Literature. Berlin, Boston

DENA (Deutsche Energie-Agentur) (2013): Monitoring der Energieeffizienz- und Marktentwicklung von „Straßenbeleuchtung". In: Präsentation. S. 54. https://industrie-energieeffizienz.de/fileadmin/user_upload/IeeUI/02_Dateien/Praesentationen/Praesentation_Monitoring_Strassenbeleuchtung_2013.pdf (13.12.2017)

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, S. 9603–9612

Department for Communities and Local Government (2014): Guidance Light Pollution -Advises on how to consider light within the planning system. https://www.gov.uk/guidance/light-pollution (13.12.2017)

Detail (2017): Transparente Medienfassade für das Klubhaus des FC St. Pauli - entwickelt von Multivision LED-Systeme und Onlyglass. In: DETAIL - Magazin für Architektur + Baudetail 7+8, S. 110–130

Deutscher Bundestag (2015a): Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia 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: Lichtverschmutzung. Drucksache 18/4853. Deutscher Bundestag. http://dipbt.bundestag.de/extrakt/ba/WP18/668/66891.html (13.12.2017)

Deutscher Bundestag (2015b): 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): Lichtverschmutzung. Drucksache 18/4996. Deutscher Bundestag. http://dipbt.bundestag.de/extrakt/ba/WP18/668/66891.html (13.12.2017)

Dick, R. (2016): Guidelines for Outdoor Lighting for Low-Impact Lighting. http://www.darksky.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/RASC-GOL_2016_51.pdf (13.12.2017)

DimmLight (2017): Dimmer für Straßenbeleuchtung. Zerbst: KD Elektroniksysteme GmbH. http://www.dimmlight.de/fileadmin/dimmlight/pdf/DY-Mappe_dimmLIGHT_web-20150129.pdf (13.12.2017)

DLR (Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt) (2015): Alexander Gersts Mission Blue Dot - Shaping the future. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). http://www.dlr.de/dlr/de/desktopdefault.aspx/tabid-10768/ (13.12.2017)

Dobler, G.; Ghandehari, M.; Koonin, S.E.; Nazari, R.; Patrinos, A.; Sharma, M.S.; Tafvizi, A.; Vo, H.T.; Wurtele, J.S. (2015): Dynamics of the urban lightscape. In: Information Systems 54, DOI: 10.1016/j.is.2015.06.002, S. 115–126

Dobler, G.; Ghandehari, M.; Koonin, S.E.; Sharma, M.S. (2016): A hyperspectral survey of New York City lighting technology. In: Sensors (Switzerland) 16, DOI: 10.3390/s16122047, S.2047

DoE (US Department of Energy) (2017): Snapshot Outdoor Area Lighting

DStGB (Deutscher Städte- und Gemeindebund); Philips & Rechtsanwälte Wegner Ullrich, M.-H.& P. (2009): Öffentliche Beleuchtung. Analyse, Potenziale und Beschaffung. In: DStGB-Dokumentation 29, S. 48

Ebbensgaard, C.L. (2015): Illuminights: A Sensory Study of Illuminated Urban Environments in Copenhagen. In: Space and Culture 18, DOI: 10.1177/1206331213516910, S. 112–131

Edensor, T. (2013): Reconnecting with darkness: gloomy landscapes, lightless places. In: Social & Cultural Geography 14, DOI: 10.1080/14649365.2013.790992, S. 446–465

Edensor, T. (2015): The Rich Potentialities of Light Festivals: Defamiliarisation, a Sense of Place and Convivial Atmospheres. In: Meier, J.; Hasenöhrl, U.; Krause, K.; Pottharst, M. (Hg.): Urban Lighting, Light Pollution and Society, S.85–98, New York/Oxon

EEA; ETC-ACM (2017): NOISE: Noise Observation and Information Service for Europe. http://noise.eionet.europa.eu/ (13.12.2017)

Ekirch, R. (2005): At Day's Close: Night in Times Past. London, UK: W.W.Norton and Company

EKOS (2011): Dark Sky Park Economic Impact Assessment. Report for Forestry Commission Scotland. Glasgow

Eltzel, B. (2012): Magenta und Grün im Wechselspiel - In der City West werden S-Bahnbrücken illuminiert - wenn Anrainer Strom und Wartung bezahlen. In: Berliner Zeitung

Engler, S. (2015): Mit Nachtgolf die Dunkelheit bekämpfen. In: GolfPost. http://www.golfpost.de/mit-nachtgolf-die-dunkelheit-bekaempfen-7777200142/ (13.12.2017)

Entwistle, J.; Slater, D.; Sloane, M. (2015): "Darkness has become a luxury good in London": On the social meaning of street lighting. In: CityMetric. http://www.citymetric.com/horizons/darkness-has-become-luxury-good-london-social-meaning-street-lighting-1504 (13.12.2017)

EURAC; Landesagentur für Umwelt (2013): Leitfaden für die Erstellung von kommunalen Lichtplänen in Südtirol

Europäische Kommission (2009): Verordnung (EG) Nr. 245/2009 der Kommission zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Leuchtstofflampen ohne eingebautes Vorsc. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0017:0044:DE:PDF (13.12.2017)

Europäische Kommission (2010): Energy 2020. A strategy for competitive, sustainable and secure energy. In: SEC(2010) 1346, DOI: COM(2010) 639, Brüssel. https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy/2020-energy-strategy (13.12.2017)

Europäische Kommission (2011): GRÜNBUCH Die Zukunft der Beleuchtung Beschleunigung des Einsatzes innovativer Beleuchtungstechnologien. Brüssel: Europäische Kommission. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0889&from=EN (13.12.2017)

Europäische Kommission (2012): EU GPP Criteria for Street Lighting & Traffic Signals, DOI: 10.2788/57886, S. 1–21. http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/criteria/street_lighting.pdf (13.12.2017)

Europäische Kommission (2013a): Lighting the Cities: Accelerating the Deployment of Innovative Lighting in European Cities. Brussels. https://ec.europa.eu/digital-agenda/en/news/new-commission-report-lighting-cities-accelerating-deployment-innovative-lighting-european (13.12.2017)

Europäische Kommission (2013b): Neues Licht für Städte Die Einführung innovativer Beleuchtung in den Städten Europas beschleunigen.

Europäische Union (2011): Richtlinie 2011/92/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten, 2011/92/EU §. S. 1–21

Europäische Union (2014): Richtlinie 2014/52/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 2011 16. April 2014 zur Änderung der Richtlinie 2011/92/EU über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten

Evans, G. (2012): Hold back the night: Nuit Blanche and all-night events in capital cities. In: Current Issues in Tourism 15, DOI: 10.1080/13683500.2011.634893, S. 35–49

Fachagentur Windenergie an Land (2016): Bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung von - Windenergieanlagen - Hintergrundpapier. Berlin

Fachgruppe Dark Sky (2017): Empfehlungen zur Förderung energiesparender und umweltschonender Außenbeleuchtung. Vereinigung der Sternfreunde e.V., Astronomische Gesellschaft e.V. S. 2. http://www.lichtverschmutzung.de/zubehoer/download.php?file=ReduzierungLichtverschmutzung_ah1705.pdf (13.12.2017)

Fachhochschule Nordwestschweiz, F.; Kobler, R.L. (2009): Lichtprojektionsverfahren. Muttenz. http://opticalight.ch/wordpress/wp-content/uploads/2016/08/KTI_Forschungsbericht_Lichtemmisionen-1.pdf (13.12.2017)

Falchi, F. (2011): Campaign of sky brightness and extinction measurements using a portable CCD camera. In: Mon Not R Astron Soc 412, S. 33–48

Falchi, F.; Cinzano, P.; Elvidge, C.D.; Keith, D.M.; Haim, A. (2011): Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. In: Journal of environmental management, DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.06.029, S. 1–9

Falchi, F.; Cinzano, P.; Duriscoe, D.; Kyba, C.C.M.; Elvidge, C.D.; Baugh, K.; Portnov, B.A.; Rybnikova, N.A.; Furgoni, R. (2016): The new world atlas of artificial night sky brightness. In: Science Advances 2, DOI: 10.1126/sciadv.1600377, S. e1600377

Fayos-Solá, E.; Marín, C.; Jafari, J.; et al. (2014): Astrotourism: No Requiem for Meaningful Travel. In: PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural 12, S. 663–671

Fechner, G.T. (1860): Elemente der Psychophysik. Leipzig: Breitkopf und Hartel

Fechter, C. (2005): Lichtpläne in Deutschland. Untersuchungen zu einem neuen Planungsinstrument. München: Ludwig-Maximilians-Universität München

Fisher, L.; Junagade, N. (2016): Managing light clutter. In: Cities & LIghts n°4, S. 24–27

Fördergemeinschaft gutes Licht (2010a): Licht.Wissen 3: Straßen, Wege und Plätze. Frankfurt am Main

Fördergemeinschaft Gutes Licht (2010b): Arbeitsplätze im Freien,licht.wissen 13. S. 36, Frankfurt am Main

Fördergemeinschaft Gutes Licht (2010c): Sport und Freizeit, licht.wissen 08. S. 64, Frankfurt am Main

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 Res Technol 0, DOI: 10.1177/1477153517725775, S. 1–19

Fotios, S.; Goodman, T. (2012): Proposed UK guidance for lighting in residential roads. In: Lighting Research and Technology 44, DOI: 10.1177/1477153511432678, S. 69–83

Fotios, S.; Uttley, J. (2016): Illuminance required to detect a pavement obstacle of critical size. In: Lighting Research and Technology 0, DOI: 10.1177/1477153516659783, S. 1–15

FR/VVL (2016): Éclairage - Givors: 70% des habitants approuvent l'extinction nocturne. In: Environnement Magazine

Frank, S.; Sternenpark im Biosphärenreservat Rhön (2017): Intelligent beleuchten - Lichtstress vermeiden. Fulda: Kreisausschuss des Landkreises Fulda. https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjVs4zQj5PWAhXLJlAKHWu5CpcQFggqMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.sternenpark-rhoen.de%2Faktuelles%2Fm_42015&usg=AFQjCNEn4oVpjIAqxHuKQV0e5FsH1oUySg (13.12.2017)

Französische Botschaft (2010): Frankreich verabschiedet Umweltschutzgesetz Grenelle 2

Freie Presse (2017): So geht es mit den LED-Leuchten weiter. In: Freie Presse

Gallaway, T.; Olsen, R.N.; Mitchell, D.M. (2010): The economics of global light pollution. In: Ecological Economics 69, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.10.003, S. 658–665

Gallaway, T. (2010): On Light Pollution, Passive Pleasures, and the Instrumental Value of Beauty. In: Journal of Economic Issues 44, DOI: 10.2753/JEI0021-3624440104, S. 71–88

Generalitat de Catalunya (2012): Contaminació lumínica. http://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/atmosfera/contaminacio_luminica/ (13.12.2017)

GEO (2015): GGoldene Palme 2015: Die preisgekrönten Reisen. http://www.geo.de/reisen/11123-bstr-goldene-palme-2015-die-preisgekroenten-reisen/151965-img-die-gruene-palme-der-preis-fuer-sanften-tourismus (13.12.2017)

Ges, X.; Bará, S.; García-Gil, M.; Zamorano, J.; Masana, E. (2017): Light pollution offshore: zenithal sky glow measurements in the Mediterranean coastal waters. In: arXiv preprin

Gestang, R.H. (1989): Night-sky brightness at observatories and sites. In: Publications of the Anstronomical Society of the Pacific 101, S. 306–329

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, DOI: 10.1016/j.healthplace.2015.05.011, S. 171–180

Grewe, R. (2009): Nachtschwärmen und Tiefseetauchen. Unterführung in Karlsruhe. Facility-Management. In: Beilage Licht Architektur Technik 6, S. 26–31

Gwiazdzinski, L. (2015): Zwischen Bewahrung und Eroberung der nächtlichen Stadt. In: Forum raumentwicklung 3, S. 4–7

Haase, J. (2015): Die verschwindende Silhouette. In: Potsdamer Neuste Nachrichten

Haber, W. (2013): Taglandschaften und Nachtlandschaften. In: In: Held, M.;Hölker, F.; Jessel, B. (Hg.): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 19-22, Bonn - Bad Godesberg

Haders, J. (2016): Hofheim: Bürger für Warmweiß. In: Frankfurter Rundschau.

Hale, J.D.; Davies, G.; Fairbrass, A.J.; Matthews, T.J.; Rogers, C.D.F.; Sadler, J.P. (2013): Mapping lightscapes: spatial patterning of artificial lighting in an urban landscape. In: PloS one 8, DOI: 10.1371/journal.pone.0061460, S. e61460

Halper, M. (2017): Wireless mesh controls augur huge savings, slash light pollution at Dutch chemical plant. In: LEDs Magazin

Handelsblatt (2016): Städteranking: Die ungesündesten Regionen zum Leben

Hänel, A. (2001): The Situation of Light Pollution in Germany. In: Cinzano, Pierantonio (Hg.): Measuring and Modelling Light Pollution. Vienna: International Astronomical Union Symp. vol. 196 „Preserving the Astronomical Sky", IAU. S. 153–159.

Hänel, A. (2011): Empfehlungen zur Reduzierung von Lichtsmog. In: Fachgruppe DARK SKY der Vereinigung der Sternfreunde e.V. Osnabrück. http://www.volkssternwarte-ubbedissen.de/dok/Lichtplan5.pdf (13.12.2017)

Hänel, A. (2013): Ökologische Beleuchtung zur Reduzierung von Lichtsmog Erläuterungen zu den Beleuchtungsrichtlinien Affiliate organisation of the International Dark Sky Association

Hänel, A. (2015): Nachthimmelshelligkeit bei Osnabrück 2006-2014. In: VdS-Journal 54, S. 36

Hänel, A.; Posch, T.; Ribas, S.J.; Aubé, M.; Duriscoe, D.; Jechow, A.; Kollath, Z.; Lolkema, D.E.; Moore, C.; Schmidt, N.; Spoelstra, H.; Wuchterl, G.; Kyba, C.C.M. (2017): Measuring night sky brightness: methods and challenges. In: J Quant Spect and Radiative Transfer, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.09.008, S.278-290

Hänel, A. (2017a): Gravierende Lichtverschmutzung durch Skipisten-Beleuchtung. https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0ahUKEwjJh_DciY_XAhVEb1AKHd5CCroQFgg6MAY&url=http%3A%2F%2Fverein-sternenpark-rhoen.de%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F03%2FSkipistenbeleuchtung-2017.pdf&usg=AOvVaw3LqiimxGWUaFVXaEKH9Cie (13.12.2017)

Hänel, A. (2017b): Licht und Sicherheit

Hänel, A. (2017c): Eine Liste voll abgeschirmter Leuchten mit ULR=0. In: Initiative gegen Lichtverschmutzung. http://www.lichtverschmutzung.de/seiten/vollabgeschirmt.php (13.12.2017)

Hänel, A.; Frank, S. (2013): Handreichung für Kommunen. Meiningen. https://www.sternenpark-rhoen.de/astronomie/download-bereich/m_42051 (13.12.2017)

Hänsch, R.; Könecke, B.; Pottharst, M.; Wukovitsch, F. (2012): Möglichkeiten der ökonomischen Bewertung des Verlusts der Nacht. In: Manfred SCHRENK/ZEILE, Vasily/ELISEI, Pietro (Hg.): Re-Mixing the City – Towards Sustainability and Resilience? REAL CORP 2012. Schwechat. S. 493–503. http://programm.corp.at/cdrom2012/ (13.12.2017)

Hartmann, E.; Schinke, M.; Wehmeyer, K.; Weske, H. (1984): Messungen und Beurteilungen der Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen. München

Hasenöhrl, U. (2015): Lighting Conflicts From a Historical Perspective. In: Meier, J.; Hasenöhrl, U.; Krause, K.; Pottharst, M. (Hg.): Urban Lighting, Light Pollution and Society. S. 105-124, New York/Oxon

Haupt, V.H.; Schillemeit, U. (2011): Skybeamer und Gebäudeanstrahlungen bringen Zugvögel vom Kurs – Neue Untersuchungen und eine rechtliche Bewertung dieser Lichtanlagen. In: Naturschutz und Landschaftsplanung 43, S. 165–170

Hecht, S.; Mandelbaum, J. (1940): Dark adaptation and experimental human vitamin A deficiency,. In: American Journal of Physiology 130, S. 651–664

Heiden, S. (2009): Die Stadt als Bildschirm - Mediafassaden verändern mehr als nur das Bild unserer Städte. In: Licht: Planung, Design, Technik, Handel 61, S. 332–337

Henckel, D.;Meier, J.; Pottharst, M.; Wukovitsch, F. (2013): Der Verlust der Nacht in der 24-Stunden-Gesellschaft. In: Posch, Thomas et al. (Hg.): Das Ende der Nacht. Lichtsmog: Gefahren - Perspektiven - Lösungen. 2. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH. S. 205–224

Henckel, D.; Moss, T. (2015): Towards a Brighter Future? Conclusions for Lighting Research and Policy. In: Meier, J.; Hasenöhrl, U.; Krause, K.; Pottharst, M. (Hg.): Urban Lighting, Light Pollution and Society, S.299-303, New York/Oxon

Hendrickson, J.R.R. (1958): The green sea turtle, Chelonia mydas (Linn.) in Malay and Sarawak. In: Proceedings of the Zoological Society of London 130, DOI: 10.1111/j.1096-3642.1958.tb00583.x, S. 455–535

Herrmann, C.; Baier, H.; Bosecke, T. (2006): Flackernde Lichtspiele am nächtlichen Himmel Auswirkungen von Himmelsstrahlern (Sybeamer) auf Natur und Landschaft und Hinweise auf die Rechtslage. In: Naturschutz Und Landschaftsplanung 38, S. 115–119

Herwig, O. (2010): Glimmende Gebäude statt grellbunte Farben. In: Süddeutsche Zeitung

Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, L. und V. (2013): Stromeffiziente LED-Straßenbeleuchtung. Wiesbaden. https://www.energieland.hessen.de/infomaterial/StromeffizienteLEDStrbeleuchtung.pdf (13.12.2017)

Hettich, P.; Herzog, R. (2009): Lichtverschmutzung; Es werde Schatten. In: Politische Ökologie 114, S. 69–70

Heuser, L.; Kappenstein, B.; Schonowski, J.; Weis, M. (2017): Die integrierte multifunktionale Straßenlaterne - Humble Lamppost Erläuterung zu DIN SPEC 91347. Beuth Pock. Berlin

Hildebrand, J.L. (1970): Noise Pollution : An Introduction to the Problem and an Outline for Future Legal Research. In: Columbia Law Review 70, S. 652–692

Hintzsche, M. (2014): Der Schutz ruhiger Gebiete - Ein Beitrag zur Stadtentwicklung. In: UMID: Umwelt und Mensch – Informationsdienst, S. 44–54

Hofmeister, S. (2013): Vermeidung von Lichtverschmutzung - Schutz der Nacht: Handlungsmöglichkeiten der Raum- und Umweltplanung. In: Held, M.;Hölker, F.; Jessel, B. (Hg.): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 133–136, Bonn - Bad Godesberg

Hölker, F.; Moss, T.; Griefahn, B.; Kloas, W.; Voigt, C.C.; Henckel, D.; Hänel, A.; Kappeler, P.M.; Völker, S.; Schwope, A.; Franke, S.; Uhrlandt, D.; Fischer, J.; Klenke, R.; Wolter, C.; Tockner, K. (2010): The dark side of light : A transdisciplinary research agenda for light. In: Ecology and Society 15, S. Art.13

Hollan, J. (2002): The Czech Act on Protection of the Air, including Light Pollution prevention. In: Sventlo Astro. http://svetlo.astro.cz/darksky/czairlaw3.htm (13.12.2017)

Hollan, J. (2004): How should the light pollution be controlled – an experience from the Czech Republic. Muskoka: Ecology of the Night. S. 1–12. http://amper.ped.muni.cz/light/law/03fall.pdf (13.12.2017)

Honold, J. (2009): Ergebnisse der Online-Umfrage „ Umweltbedingungen in Berlin “. Berlin: Graduiertenkolleg Stadtökologie Berlin. http://www.berlin21.net/fileadmin/pdf/Umweltbedingungen_in_Berlin_-_Umfrageergebnisse.pdf (13.12.2017)

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. Frankfurt a.M.: Zukunftsinstitut GmbH. https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/zukunftsreport/die-helligkeitsrevolution/ (13.12.2017)

Hsiao, H.S. (1973): Flight paths of night-flying moths to light. In: Journal of Insect Physiology 19, DOI: 10.1016/0022-1910(73)90191-1, S. 1971–1976

Hübner, G.; Pohl, J. (2010): Akzeptanz und Umweltverträglichkeit der Hinderniskennzeichnung von Windenergieanlagen. In: Abschlussbericht zum BMU-Forschungsvorhaben (FKZ: 03MAP134). Halle (Saale): Institut für Psychologie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Huth, J.E. (2013): The lost art of finding our way.

IDA (International Dark-Sky Association) (2017a): International Dark Sky Communities. http://www.darksky.org/idsp/communities/ (13.12.2017)

IDA (International Dark-Sky Association) (2017b): Fixture Seal of Approval. http://www.darksky.org/fsa/ (13.12.2017)

Illuminating Engineering Society (2011): Luminaire Classification System for Outdoor Luminaires TM-15-11. Illuminating Engineering Society. S. 15. https://www.ies.org/store/technical-memoranda/luminaire-classification-system-for-outdoor-luminaires/ (13.12.2017)

Jackett, M.; Frith, W. (2013): Quantifying the impact of road lighting on road safety - A New Zealand Study. In: IATSS Research 36, DOI: 10.1016/j.iatssr.2012.09.001, S. 139–14

Jáuregui, F.; Zamorano, J. (2017): The ‘graph observers’. Cellers, Spanien

Jechow, A.; Hölker, F.; Kolláth, Z.; Gessner, M.O.; Kyba, C.C.M. (2016): Evaluating the summer night sky brightness at a research field site on Lake Stechlin in northeastern Germany. In: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 181, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.02.005, S. 1–9

Jechow, A.; Kolláth, Z.; Ribas, S.J.; Spoelstra, H.; Hölker, F.; Kyba, C.C.M. (2017): Imaging and mapping the impact of clouds on skyglow with all-sky photometry. In: Scientific Reports 7, DOI: 10.1038/s41598-017-06998-z, S. 6741

Kerschner, F.; Schulev-Steindl, E. (2014): Rechtsschutz im Umweltrecht: Neue Herausforderungen. 19. Österreichische Umweltrechtstage, 10. un 11. September 2014, Johannes Kepler Universität Linz. Linz: Institut für Umweltrecht JKU Linz, Österreichischer Wasser- und Abwasserverband

KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) (2013): Anlage zum Merkblatt IKK - Energetische Stadtsanierung - Stadtbeleuchtung (215). https://www.kfw.de/KfW-Konzern/Service/Download-

Center/Förderprogramme-(Inlandsf.)-(D-EN)/Barrierefreie-Dokumente/IKK-Stadtbeleuchtung-(215)-Anlage-zum-Merkblatt/ (13.12.2017)

Klaus, G.; Kägi, B.; Kobler, R.L.; Maus, K.; Righetti, A. (2005): Empfehlungen zur Vermeidung von Lichtemissionen. Bern. http://www.bafu.admin.ch/publikationen/index.html?action=show_publ&lang=de&id_thema=19&series=VU&nr_publ=8010 (13.12.2017)

Kleinsteuber, F. (2016): Testing stability of VIIRS DNB Night Lights data in the US. Universität Trier

Knab, S.; Strunz, K.; Lehmann, H. (2010): Smart Grid : The Central Nervous System for Power Supply. Berlin, Germany: Universitätsverlag der TU Berlin

Knight, C. (2010): Field surveys of the effect of lamp spectrum on the perception of safety and comfort at night. In: Lighting Research and Technology 42, DOI: 10.1177/1477153510376794, S. 313–329

Kocifaj, M. (2007): Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. In: Appl Opt 46, S. 3013–3022

Köhler, D. (2009): Artificially enlightened urban spaces at night - A matter of special importance for liveable cities. In: Széll, György/Széll, Ute (Hg.): Quality of Life & Working Life in Comparison. Frankfurt/Main: Peter Lang. S. 323–339

Köhler, D. (2015): The Lighting Master Plan as an Instrument for Municipalities? A Critical Assessment of Possibilities and Limitations. In: Meier, J.; Hasenöhrl, U.; Krause, K.; Pottharst, M. (Hg.): Urban Lighting, Light Pollution and Society, S. 141-158, New York/Oxon

Köhler, D.; Sieber, R. (2011): Der Stadtraum zur Kunstlichtzeit. In: Professional Lighting Design 79, S. 38–42.

Köhler, D.; Sieber, R. (2012): Lichtmasterplan - Auf dem Weg zu einem zielführenden Instrument? In: Professional Lighting Design, S. 40–44

Kolláth, Z. (2010): Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park. In: Journal of Physics: Conference Series 218, S. 12001

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, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.02.025, S. 46–51

Königreich Spanien (1988): 25332 Ley 31/1988 de 31 de octubre, sobre Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias

Köster, U.; Schäfer, A. (2015): Qualitätsoffensive Naturparke, 3.Phase 2016-2020. Bonn

Kramer, N. (2014): Entwicklungsperspektiven von Lichtschutzgebieten : Vom Sternenpark zum Welterbe? Technische Universität Berlin

Krause, K. (2013): Funktionen der künstlichen Beleuchtung und der Dunkelheit - Ein Bericht zum Stand der sozialwissenschaftlichen Forschung. In: Schriftenreihe Verlust der Nacht. Berlin. http://www.worldcat.org/oclc/930641820 (13.12.2017)

Krause, K.; Pottharst, M.; Hasenöhrl, U. (2014a): Steuerung nächtlicher Außenbeleuchtung. Erkner: Institut für Regionalentwicklung und Strukturplanung. S. 12

Krause, K.; Pottharst, M.; Hasenöhrl, U. (2014b): Licht in Maßen: Umwelt- und sozialverträgliche Beleuchtung in Kommunen (Policy Briefing Paper). Erkner. http://www.verlustdernacht.de/tl_files/VDN/Literature/Kommunen_final.pdf (13.12.2017)

Krause, K. (2015): Regulating Urban Lighting: Prospects for Institutional Change. In: Meier, J.; Hasenöhrl, U.; Krause, K.; Pottharst, M. (Hg.): Urban Lighting, Light Pollution and Society, S.125-140, New York/Oxon

Kronhagel, C. (2010): Mediatektur: die Gestaltung medial erweiterter Räume. Wien, Österreich

Kuechly, H.U.; Kyba, C.C.M.; Ruhtz, T.; Lindemann, C.; Wolter, C.; Fischer, J.; Hölker, F. (2012): Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany. In: Remote Sensing of Environment 126, DOI: 10.1016/j.rse.2012.08.008, S. 39–50

Kundracik, F. (2017): The possible sky glow effects of lighting system conversion in the City of Tucson. Cellers, Spain: Light Pollution Theory Modelling and Measurement 2017

Küster, I. (2017): Verbreitung und Verwendung von Lichtmasterplänen in Großstädten im deutschsprachigen Raum. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin. (= Schriftenreihe Verlust der Nacht)

Kyba, C.C.M.; Ruhtz, T.; Fischer, J.; Hölker, F. (2011): Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems. In: PLoS ONE 6, DOI: 10.1371/journal.pone.0017307, S. e17307

Kyba, C.C.M.; Ruhtz, T.; Fischer, J.; Hölker, F. (2012): Red is the new black: How the color of urban skyglow varies with cloud cover. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society

Kyba, C.C.M.; Wagner, J.M.; Kuechly, H.U.; Walker, C.E.; Elvidge, C.D.; Falchi, F.; Ruhtz, T.; Fischer, J.; Hölker, F. (2013): Citizen science provides valuable data for monitoring global night sky luminance. In: Scientific reports 3, DOI: 10.1038/srep01835, S. 1835

Kyba, C.C.M.; Hänel, A.; Hölker, F. (2014): Redefining efficiency for outdoor lighting. In: Energy Environ. Sci. 7, DOI: 10.1039/C4EE00566J, S. 1806–1809

Kyba, C.C.M.; Tong, K.P.; Bennie, J.; Birriel, I.; Birriel, J.J.; Cool, A.; Danielsen, A.; Davies, T.W.; Outer, P.N. den; Edwards, W.; Ehlert, R.; Falchi, F.; Fischer, J.; Giacomelli, A.; Giubbilini, F.; Haaima, M.; Hesse, C.; et al. (2015a): Worldwide variations in artificial skyglow. In: Sci Rep 5, DOI: 10.1038/srep12180, S. 8409

Kyba, C.C.M.; Garz, S.; Kuechly, H.; Sánchez de Miguel, A.; Zamorano, J.; Fischer, J.; Hölker, F. (2015b): High-Resolution Imagery of Earth at Night: New Sources, Opportunities and Challenges. In: Remote Sens 7, DOI: 10.3390/rs70100001, S. 1–23

Kyba, C.C.M.; Kuechly, H.U.; 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? Cluj-Napoca, Romänien: Artificial Light at Night 2016 (13.12.2017)

Kyba, C.C.M. et a. (2017a): Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. In: Science Advances [in Review]

Kyba, C.C.M. et al. (2017b): Changes in outdoor lighting in Germany from 2012-2016 as observed by VIIRS DNB [in Review].

Kyba, C.C.M.; Mohar, A.; Posch, T. (2017): How bright is moonlight? In: A&G Astronomy and Geophysics 58, DOI: 10.1093/astrogeo/atx025, S. 1.31-1.32

Kyba, C.C.M.; Hölker, F. (2013): Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes? In: Landscape Ecol 28, S. 1637–1640

LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz) (2012): Hinweise zur Messung , Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen. In: Beschluss der LAI vom 13.09.2012

Land Brandenburg (2014): Leitlinie des Ministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen (Licht-Leitlinie) vom 16. April 2014. http://bravors.brandenburg.de/de/verwaltungsvorschriften-221296 (13.12.2017)

Land Nordrhein-Westfalen (2014): Lichtimmissionen, Messung, Beurteilung und Verminderung Gem. RdErl. des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz –V-5 8800.4.11 – und des Ministeriums für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr – VI.1 – 850 v. https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_vbl_show_pdf?p_id=22903 (13.12.2017)

Land Oberösterreich (2017): Licht - Lichtverschmutzung. https://www.land-oberoesterreich.gv.at/115999.htm (13.12.2017)

Lang, D. (2013): Neue Systemlösungen und Beleuchtungsstrategien im Außenraum. In: Held, M.;Hölker, F.; Jessel, B. (Hg.): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 91-94, Bonn - Bad Godesberg

Leccese, F.; Cagnetti, M.; Trinca, D. (2014): A smart city application: A fully controlled street lighting isle based on Raspberry-Pi card, a ZigBee sensor network and WiMAX. In: Sensors (Switzerland) 14, DOI: 10.3390/s141224408, S. 24408–24424

Leeming, R. (2017): Smart lights edge Dutch island towards energy neutrality. In: LLUX

Lehmann, F. (2008): Public Space - Public Relations: Großformatige Werbung als ein Beispiel des Umgangs mit öffentlichen Räumen. In: Schriftenreihe lebendige Stadt. Frankfurt/Main

Les Nuisances dues à la Lumiere (2006): AFE. https://www.lux-editions.fr/produit/les-nuisances-dues-a-la-lumiere/ (13.12.2017)

Leuser, L.; Weiß, U.; Brischke, L..- (2016): Beleuchtung : Auswirkungen von Rebound- Effekten und gesellschaftlichen Trends auf den Energieverbrauch sowie Möglichkeiten der Adressierung durch politische Instrumente Inhalt. Berlin. https://www.ifeu.de/energie/pdf/Rebound_Beleuchtung_161116_fv.pdf (13.12.2017)

Levin, N. (2017): The impact of seasonal changes on observed nighttime brightness from 2014 to 2015 monthly {VIIRS DNB} composites. In: Remote Sens Environ 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, DOI: 10.1016/j.rse.2017.01.006, S. 366–382

Li, X.; Zhou, Y. (2017): A Stepwise Calibration of Global {DMSP/OLS} Stable Nighttime Light Data (1992--2013). In: Remote Sens 9, S. 637

Lighting Research Center (2009): Framework Developed for Assessing Light Pollution. http://www.lrc.rpi.edu/resources/newsroom/enews/March09/partners82.html (13.12.2017)

Lighting Urban Community International (LUCI) (2012): The Cities of Light Newsletter 16. Lyon: LUCI Asociation

LiGT (Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.) (2017): EU-Projekt Dynamic Light. https://www.litg.de/Bildung-Forschung/EU-Projekt-Dynamic-Light.html (13.12.2017)

LiTG (Lichttechnische Gesellschaft) (2011): Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen. Berlin. https://www.litg.de/media/195.12_Auflage_3_InfoPubl.pdf (13.12.2017)

Lobão, J.A.; Devezas, T.; Catalão, J.P.S. (2015): Energy efficiency of lighting installations: Software application and experimental validation. In: Energy Reports 1, DOI: 10.1016/j.egyr.2015.04.001, S. 110–115

LoNNe (Loss of the Night Network) (o.J.): Legislation - Italy. http://www.cost-lonne.eu/legislation/italy/ (13.12.2017)

LoNNe (Loss of the Night Network) (2015): Statement of the EU-COST Action ES 1204 LoNNe. S. 1.

LoNNe (Loss of the Night Network) (2017): Legislation - Spain. http://www.cost-lonne.eu/legislation/spain/ (13.12.2017)

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, S. 30

Lorenzen, D. (2017): Tschechiens Lichtverschmutzungsgesetz - Dunkle Nächte per Gesetz. In: Deutschlandfunk

LUCI Association (2011): LUCI Charter für Urbanes Licht. LUCI Association. S. 5. http://www.luciassociation.org/wp-content/uploads/2015/07/LUCI-Charter-on-Urban-Lighting-EN.pdf (13.12.2017)

Luginbuhl, C.B. (2008): Coda: What the Solution Would Look Like. In: Bogard, P. (Hg.): Let There Be Night: Testimony on Behalf of the Dark. Reno, Las Vegas: University of Nevada Press. S. 199–207

Luginbuhl, C.B.; Duriscoe, D.M.; Moore, C.W.; Richman, A.; Lockwood, G.W.; Davis, D.R. (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 (2016a): Berlin unveils 'on demand' street lighting. http://luxreview.com/article/2016/10/berlin-unveils-on-demand-street-lighting- (13.12.2017)

Lux Review (2016b): New York's bridges to get multi-million dollar LED facelift. In: Lux Review. http://luxreview.com/article/2016/12/new-york-city-s-iconic-bridges-to-get-led-facelift- (13.12.2017)

Maaß, C. (1999): Die rechtliche Behandlung von Lichtimmissionen in Natur und Landschaft. In: Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz 67, S. 139–162

Maaß, C.A. (2003): Die rechtliche Regulierung von Lichtimmissionen in Natur und Landschaft. In: Lichtökologie - Insektenfreundliche und Energie sparende Außenbeleuchtung. Berlin: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND). S. 14–32

Marchand, T. (2011): Europe's unique light pollution law: dark skies over Slovenia. http://www.cafebabel.co.uk/politics/article/europes-unique-light-pollution-law-dark-skies-over-slovenia.html (13.12.2017)

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: 19, S. 69–74

Marín, C.; Wainscoat, R.J.; Smith, M.; Austin, M.; Hearnshaw, J.; Wuchterl, G.; Fayos-Solá, E. (2009): The Windows to the Universe. In: ICOMOS-IAU Thematic Study on Heritage Sites of Astronomy

Marín, C.; Jafari, J. (2007): StarLight - A Common Heritage. In: Proceedings of the Starlight Conference 2007. Canary Islands: Starlight Initiative, Instituto de Astrofísica de Canarias

Marx, H. (1972): 50 Jahre Volkssternwarte Stuttgart

Matt, A. (2015a): Nachtabschaltung: Energiesparen auf Kosten der Sicherheit? Zürich

Matt, A. (2015b): Nachtabschaltung in Liechtenstein. Lichtenstein

Mattoni, B.; Burattini, C.; Bisegna, F.; Fotios, S. (2017): The Pedestrian ' s Perspective

Mazenauer, C. (2015): Nächtliche Dunkelheit im Val Müstair: Eine Untersuchung über die Wahrnehmung und das touristische Potenzial der nächtlichen Dunkelheit. Geographisches Institut der Universität Zürich

McQuire, S.; Martin, M.; Niederer, S. (2009): Urban screen reader. Amsterdam: Institute of Network Cultures

mdr (Mitteldeutscher Rundfunk) (2017): Wintersport im Harz: Skifahren bei Flutlicht. http://www.mdr.de/sachsen-anhalt/magdeburg/flutlicht-skifahren-am-wurmberg-100.html (13.12.2017)

Mehri, A.; Farhang Dehghan, S.; Hajizadeh, R.; Zakerian, S.A.; Mohammadi, H.; Abbasi, M. (2017): Survey of discomfort glare from the headlamps of cars widely used in Iran. In: Traffic Injury Prevention 18, S. 711–715

Meier, J.; Pottharst, M.; Krause, K.; Hasenöhrl, U. (2015): The New Visibility of Lighting: An Introduction. In: Meier, J.; Hasenöhrl, U.; Krause, K.; Pottharst, M. (Hg.): Urban Lighting, Light Pollution and Society, S.1-5, New York/Oxon

Meier, J. (2015): Designating Dark Sky Areas: Actors and Interests. In: Meier, J.; Hasenöhrl, U.; Krause, K.; Pottharst, M. (Hg.): Urban Lighting, Light Pollution and Society, S.177-196, New York/Oxon

Meier, J. (2016): Schmutziges Licht: Die Abschaffung der Nacht. In: Blätter für deutsche und internationale Politik, S. 112–120

Meier, J. (2017): Temporal Profiles of Urban Lighting: Proposal for a research design and first insights from three Berlin case studies (in Review). In: International Journal of Sustainable Lighting, S. 1–33

Meier, J.; Henckel, D. (2017a): Illuminating an Urban Zone of Extended Activity: An Exploration into Temporal Profiles of Urban Functions, Public Transport and Artificial Lighting. In: Gwiazdzinski, Luc/Drevon, Guillaume (Hg.): Time - Art - Cartography

Meier, J.; Henckel, D. (2017b): Urban Lightprints: All but Static. In: Scapegoat. Architecture/Landscape/Political Economy, S. 224–227

Meier, J.; Pottharst, M. (2013): Gesellschaftliche Akteure der künstlichen Beleuchtung. Berlin. http://www.verlustdernacht.de/tl_files/VDN/PDF_allgemein/VdN-Band2_Akteure_web.pdf (13.12.2017)

Metcalf, J.P. (2012): Detecting and characterizing nighttime lighting using multispectral and hyperspectral imaging. Diss. Monterey, California. Naval Postgraduate School. https://calhoun.nps.edu/handle/10945/27869 (13.12.2017)

Miller, S.D.; Straka, W.; Mills, S.P.; Elvidge, C.D.; Lee, T.F.; Solbrig, J.; Walther, A.; Heidinger, A.K.; Weiss, S.C. (2013): Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band. In: Remote Sens 5, S. 6717–6766

Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie (2013): Eclairer Pour Rien la Nuit. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Mohar, A. (2007): Dark Skies Awareness: Slovene Light Pollution Law. http://www.darkskiesawareness.org/slovene-law.php (13.12.2017)

Mohar, A. (2011): Slovenia has survived 4 years since adoption of Light Pollution Legislation. In: 07.10.2011 (Hg.): Symposium for the Protection of the Night Sky. Osnabrück: Fachgruppe Dark Sky der Vereinigung der Sternfreunde e.V. S. 25. https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjD5ZHVjsDWAhVGtxoKHQN3CCAQFggnMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.lichtverschmutzung.de%2Fsymposium_2011%2Fzubehoer%2Fdownload.php%3Fsub%3Dfriday_morning_sess1%26file%3D02_Mohar.pdf&usg=AFQjCN (13.12.2017)

Mohar, A. (2013): Aktiver Nachtschutz in Slowenien-Verordnung zur Vermeidung von Lichtverschmutzung. In: Held, M.;Hölker, F.; Jessel, B. (Hg.): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 125–128, Bonn - Bad Godesberg

Mohar, A.; Zagmajster, M.; Verovnik, R.; Ska, B.B. (2014): Nature-friendlier lighting of objects of cultural heritage (churches) - Recommendations. http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LifeatNight_Recommendations_EN.pdf (13.12.2017)

Mohar, A. (2015a): Sky Quality Camera as a Quick and Reliable Tool for Light Pollution Monitoring. In: LPTMM 2015. Jouvence, Kanada

Mohar, A. (2015b): Achievements and Consequences of Light pollution Legislation in Slovenia. Gehalten auf der ALAN 2015, Sherbrooke. http://artificiallightatnight.weebly.com/uploads/3/7/0/5/37053463/mohar.pdf (13.12.2017)

Morgan-Taylor, M. (2015): Regulating Light Pollution in Europe: Legal Challenges and Ways Forward. In: J. Meier, U. Hasenöhrl, K. Krause, M. Pottharst (Hg.): Urban Lighting, Light Pollution and Society. New York/Oxon: Routledge. S. 159–176

Morgan-Taylor, M.; Kim, J.T. (2016): Regulating Artificial Light at Night: A Comparison Between the South Korean and English Approaches. In: The international journal of sustainable lighting, DOI: 10.22644/ijsl.2016.35.1.021, S. 21

Mosser, S. (2007): Eclairage et sécurité en ville: l'état des savoirs (=Urban Lighting and Security). In: Déviance et Société 31, S. 77–100

Mückenberger, U. (2017): Die Regeln zur Nacht

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. https://www.nabu.de/stadtbeleuchtung/cd-rom/start.html (13.12.2017)

Narboni, R. (2013): Strukturierte Dunkelheit. Lichtmasterplan für die Stadt Rennes/F. In: Professional Lighting Design 89, S. 1–5.

Narendran, N.; Freyssinier, P.; Zhu, Y. (2015): Energy and user acceptability benefits of improved illuminance uniformity in parking lot illumination. In: Lighting Res. Technol 48, DOI: 10.1177/1477153515587959 , S. 1–21

NB (2017): FULDA Auf dem Weg zur Sternenstadt „Akzentbeleuchtung" in der Friedrich- und Marktstraße - Zwischenbilanz. In: Osthessen News

Neumann, D. (2007): Architekturen des Augenblicks. In: Die Alte Stadt 34, S. 32–44

Nievas, M. (2013): Absolute photometry and Sky Brightness with ASTMONUCM. Universidad Complutense de Madrid

NLPIP (National Lighting Product Information Program) (2007): What are lighting environmental zones? http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/lightpollution/environmentalZones.asp (13.12.2017)

OAdM (2017): Montsec Astronomical Observatory. http://www.oadm.cat/en/home.htm (13.12.2017)

Offenberger, M. (2015): Geschickte Beleuchtung setzt Kulturdenkmäler ins rechte Licht ohne Tieren zu schaden. In: AnLiegen Natur. www.anl.bayern.de/publikationen/anliegen/meldungen/wordpress/kulturdenkmaeler/ (13.12.2017)

OÖ Energiesparverband (2015): Straßenbeleuchtung mit LED. Linz, Österreich. http://www.energiesparverband.at/fileadmin/redakteure/ESV/Info_und_Service/Publikationen/Strassenbeleuchtung_dt.pdf (13.12.2017)

Opto Services (2007): Magnaldo, William: RAPPORT OPTO SERVICES POUR L'ASSOCIATION FRANÇAISE D'ASTRONOMIE: Etude scientifique de la pollution lumineuse

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (2003): RVS 05.06.12 Visuelle Informationsträger für verkehrsfremde Zwecke. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr

Pacific Northwest National Laboratory (2017): An Investigation of LED Street Lighting's Impact on Sky Glow. Richland, Washington. https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwjQy7z7-6jUAhXFKlAKHVF1ALUQFggoMAE&url=https%3A%2F%2Fenergy.gov%2Fsites%2Fprod%2Ffiles%2F2017%2F05%2Ff34%2F2017_led-impact-sky-glow.pdf&usg=AFQjCNGhUTn75f4rRPkJAgIterST1nEzUw&sig2=Rz (13.12.2017)

Pack, D.W.; Hardy, B.S.; Longcore, T. (2017): Studying the Earth at night from CubeSats. In: Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, Session 10: Leo Missons. Logan, USA. S. 11. http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2017/all2017/41/ (13.12.2017)

Pardey, H.-H. (2017): Blendende Aussichten - Beleuchtung fürs Fahrrad. In: Frankfurter Allgemeine.

Parlamentarische Versammlung des Europarates (2011a): Council of Europe Parliamentary Assembly: Doc. 12644 - Noise and light pollution, Recommendation 1947 (2010): Reply from the Committee of Ministers adopted at the 1116th meeting of the Ministers' Deputies

Parlamentarische Versammlung des Europarates (2011b): Resolution 1776 (2010). Noise and light pollution. http://assembly.coe.int/nw/xml/XRef/Xref-XML2HTML-en.asp?fileid=17923&lang=en (13.12.2017)

Parlamentarische Versammlung des Europarates (2011c): Reply to Recommendation Doc. 12644 (2011) - Noise and light pollution. http://www.assembly.coe.int/nw/xml/XRef/Xref-XML2HTML-en.asp?fileid=12826&lang=en (13.12.2017)

Pauen-Höppner, U.; Höppner, M. (2013): Öffentliche Beleuchtung – mehr Licht heißt nicht mehr Sicherheit. In: Held, M.;Hölker, F.; Jessel, B. (Hg.): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 105–108, Bonn - Bad Godesberg

Pedani, M. (2004): Light Pollution at the Roque de los Muchachos Observatory. In: New Astronomy 9, S. 641–650

Peters, M. (2007): Straßenbeleuchtung per SMS. In: FOCUS online

Phal-Weber, E. (2010): Informelle Planung in der Stadt- und Regionalplanung. In: Heckel, D. et al. (Hg.): Bauen-Planen – Umwelt. Ein Handbuch, S. 227–232, Wiesbaden

Philips Lighting (2013): LED-Projekt mit Aachener Philips Forscher für den Deutschen Zukunftspreis 2013 nominiert. PHILIPS. https://www.philips.de/a-w/about/news/archive/standard/news/lighting/20131127_LED_Projekt_fuer_Deutschen_Zukunftspreis_2013_nominiert.html (13.12.2017)

Polin, T.D.; Khanh, Q. (2017): Flimmern und Stroboskopische Effekte von PWM-gesteuerten Autoscheinwerfern. LITG-PUBLIKATION 35

Posch, T. (2010): Licht im Wandel der Zeiten. In: Posch, T./Freyhoff, A./Uhlmann, T. (Hg.): Das Ende der Nacht. Die globale Lichtverschmutzung und ihre Folgen, S. 3–29, Weinheim

Posch, T. (2013): Besser beleuchten – Intensität, spektrale Zusammensetzung und Timing der Beleuchtung. In: Held, M.;Hölker, F.; Jessel, B. (Hg.): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 43–46, Bonn - Bad Godesberg

Pottharst, M.; Elkhazein, V.S.; Hänsch, R.; Könecke, B.; Kühn, A.; Müller, J.; Wukovitsch, F. (2014): Kosten und Nutzen des Verlusts der Nacht: Taxonomie und Indikatorik. Berlin

Projektgruppe Dunkelheit als Chance (2014): Dunkelheit als Chance: Nachhaltiger Tourisumus im Naturpark Westhavelland. Berlin

PwC (PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfungsgesellschaft) (2015): „Straßenbeleuchtung im Energiesparmodus?“ https://www.pwc.de/de/offentliche-unternehmen/assets/pwc_studie_strassenbeleuchtung-im-energiesparmodus_2015.pdf (13.12.2017)

Quester, W. (2015): Nachthimmelshelligkeit in Esslingen 2008-2014. In: VdS-Journal 54, S. 38

Radicchi, A.; Meier, J.; Henckel, D. (2016): Urban Planning Challenges: Toward integrated approaches to sustainable lightscape and soundscape planning. In: ALAN 2016. Cluj-Napoca: Konferenzbeitrag. http://artificiallightatnight.weebly.com/uploads/3/7/0/5/37053463/radicchi-meier-henckel.pdf (13.12.2017)

Ratingen, R. van (2014): Planung von Außenbeleuchtung Beachtung der Auswirkung auf Mensch & Tier. Philips, Lighting Solution Center - LiAs. S. 1–18

Rechnungshof, T. (2015): Kommunale Straßenbeleuchtung. Rudolstadt. http://www.energieinstitut.at/HP/Upload/Dateien/05_Lichtnormen_Fritthum.pdf (13.12.2017)

Regione Lombardia (2015): 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)

Rehmann, M. (2013): Gewerbliche Beleuchtung im Wohnquartier - eine unterschätzte nächtliche Belastung? Berlin: Verlust der Nacht

Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G.; Janßen, M.; Brose, M. (2008): Blendung durch optische Strahlungsquellen, Forschung Projekt F 2185. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Reimann, U. (2008): 19 Leuchten erhellen die Luxus-Jogging-Strecke. In: RP Online

Reintjes, N.; Spengler, L. (2013): PROSA-Straßenbeleuchtung. Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen. freiburg: Öko-Institut e.V. S. 53. http://www.oeko.de/oekodoc/1774/2013-463-de.pdf (13.12.2017)

RENAT AG (2008): Lichtemissionen in Liechtenstein. Vaduz

Rensselaer Polytechnic Institute (2008): OSP Methodology – Glow and Trespass. S. 1–6. http://www.lrc.rpi.edu/researchAreas/pdf/instructions_for_building_OSP_box.pdf (13.12.2017)

Republik Slowenien (2007): Verordnung über die Grenzwerte der Lichtverschmutzung der Umwelt. Übersetzung aus dem Slowenischen durch die Wiener Umweltanwaltschaft. http://wua-wien.at/images/stories/naturschutz_stadtoekologie/slowenisches-lichtverschmutzungsgesetz.pdf (13.12.2017)

République Francaise (2012): Décret n° 2012-118 du 30 janvier 2012 relatif à la publicité extérieure, aux enseignes et aux préenseignes, 2012-118 §. https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025240851&categorieLien=id (13.12.2017)

République Francaise (2013): 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. Version consolidée au 05 décembre 2017, Pub. L. No. NOR: DEVP1301594A. https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000027003910 (13.12.2017)

Ribas, S.J.; Torra, J.; Figueras, F.; Paricio, S.; Canal-, R. (2016): How Clouds are Amplifying (or not) the Effects of ALAN, S. 32–39

Rich, C.; Longcore, T. (2006): Ecological Consequences of Artificial Night Lighting.

Richter, H.-J. (2005): 13201 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

Riegel, K.W. (1973): Light Pollution: Outdoor lighting is a growing threat to astronomy. In: Science 179, S. 1285–1291

Ringwald, R.; Bauer, A. (2009): Stadtbeleuchtung: Rechtssichere Vertragsgestaltung. Mainz. http://www.ra-alfred-bauer.de/media/2009-02-05-04_Bauer-Riedel.pdf (13.12.2017)

Ringwald, R.; Engel, C. (2013): Straßenbeleuchtungspflicht. In: Ringwald, Roman/Rönitzsch, Henry/Riedel, Martin (Hg.): Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung - Wirtschaftlichkeit, Recht, Technik, S. 77–91, Berlin

Ritter, J. (2017): 10 theses on the issue of architectural lighting design and the specialised profession. In: Professional Lighting Design Convention 2017. https://pld-c.com/10-theses-on-the-issue-of-architectural-lighting-design-and-the-specialised-profession/ (13.12.2017)

Román, M.O.; Stokes, E.C. (2015): Holidays in lights: Tracking cultural patterns in demand for energy services. In: Earth's Future 3, S. 182–205

Ruggles, C.; Cotte, M.; Austin, M.; Belmonte, J.; Chadburn, A.; Chamberlain, V. Del (2010): Heritage Sites of Astronomy and Archaeoastronomy in the context of the UNESCO World Heritage Convention

Ruhtz, T.; Kyba, C.C.M.; Posch, T.; Puschnig, J.; Kuechly, H. (2015): Lichtmesskampagne Zentralraum Oberösterreich. Linz. http://www.land-oberoesterreich.gv.at/159660.htm (13.12.2017)

Sagerer, K. (2015a): Lichtverschmutzung in Südtirol. In: Wagner, E./Kerschner, F./Donat, M. (Hg.): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung, Band 6, S. 237–260, Linz, Österreich

Sagerer, K. (2015b): Lichtverschmutzung in der Schweiz. In: Wagner, E./Kerschner, F./Donat, M. (Hg.): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung, Band 6, S. 251–260, Linz, Österreich

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: J Quant Spectrosc Ra 139, S. 109–117.

Sánchez de Miguel, A. (2015): Spatial, Temporal and Spectral Variation of Light Pollution and its Sources: Methodology and Results. Madrid: Universidad Complutense de 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 (13.12.2017)

Sánchez de Miguel, A.; et al. (2017): Color remote sensing of the impact of Artificial Light at Night(I): Simulation with VIIRS/DNB and Nikon DSLRs(ISS + Others) [in Bearbeitung]

Sánchez de Miguel, A.; Zamorano, J. (2008): Contaminación lumínica en España. In: VIII Meeting Sanish Astron. Soc. S. 1. http://www.celfosc.org/biblio/general/sanchez-zamorano2008a.pdf (13.12.2017)

Saraiji, R.; Oommen, M. (2012): Light Pollution Index (LPI): An Integrated Approach to Study Light Pollution with Street Lighting and Façade Lighting. In: Leukos 9, DOI: 10.1582/LEUKOS.2012.09.02.004 , S. 127–146

Saunders, H.D.; Tsao, J.Y. (2012): Rebound effects for lighting. In: Energy Policy 49, DOI: 10.1016/j.enpol.2012.06.050 , S. 477–478

Schaub, A. (2015): UNIVOX Umwelt 2015. In: Markt- & Sozialforschung

Schivelbusch, W. (2004): Lichtblicke: Zur Geschichte der künstlichen Helligkeit im 19. Jahrhundert. Frankfurt am Main

Schlager, M. (2015a): Lichtverschmutzung in Slowenien. In: Wagner, E./Kerschner, F./Donat, M. (Hg.): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung, Band 6, S. 217–236, Linz, Österreich

Schlager, M. (2015b): Sonstige (gesetzliche) Regelungen gegen Lichtverschmutzung in anderen Ländern. In: Wagner, E./Kerschner, F./Donat, M. (Hg.): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung, Band 6, S. 217–236, Linz, Österreich

Schmidt, J.A. (2007): Licht in der Stadt. Leitbilder und Strategien für innovative Lichtkonzepte. Materialien für die Arbeit vor Ort 36. Sankt Augustin/Berlin. http://www.kas.de/wf/doc/kas_11538-544-1-30.pdf?070806101510 (13.12.2017)

Schobesberger, M. (2010): Messungen und Beurteilung von Lichtimmissionen im Schlafzimmer. Fachhochschule Nordwestschweiz

Schormüller, K.; Langel, N. (2015): Kommunale Lärmaktionsplanung: Von der Planung zur Aktion. Berlin

Schroer, S.; Hölker, F. (2014): Light pollution research - progress and praxis. In: ALAN 2014. Berlin: Konferenzbeitrag

Schulte-Römer, N. (2010): Urban Light Planning Evaluation, Evidence and the New, Workshop-Report Urban Light Planning – Evaluation, Evidence and the New. In: WZB, 25-26 Nov. 2010. S. 41

Schulte-Römer, N. (2011): Light for remaking cities. Trends and reflections on urban design. In: Convention Proceedings - PLDC 3rd Global Lighting Design Convention, 19.-22. October 2011, Madrid, S. 60–63

Schulte-Römer, N. (2012): Digitalisieren und sparen: Lichtkonzepte für Städte und Kommunen gefragt. In: WZB Mitteilungen, S. 18–21

Schulte-Römer, N. (2015): Innovating in public - the introduction of LED lighting in Berlin and Lyon. Technische Universität Berlin. https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/5211 (13.12.2017)

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2014): Stadtbild Berlin Werbekonzept. Berlin.

Senatsverwaltung für Umwelt, V. und K.B. (2016): Abstimmung über neue LED-Leuchten in der Waldstraße. http://www.berlin.de/senuvk/bauen/beleuchtung/de/abstimmung.shtml (13.12.2017)

Shaw, R. (2014): Streetlighting in England and Wales: new technologies and uncertainty in the assemblage of streetlighting infrastructure. In: Environment and Planning A 46, DOI: 10.1063/1.2756072 , S. 2228–2242

Smith, M. (2009): Time to turn off the lights. In: Nature 457, S. 27

Squires, N. (2017): Romance of Rome under assault from ugly LED lighting, campaigners say. In: The Telegraph

Stadt Bochum (2008): BermudaLicht - Dokumentation der Planung. Bochum

Stadt Chemnitz (2016): Abstimmung zur Lichtfarbe der LED-Straßenbeleuchtung. http://www.chemnitz.de/chemnitz/de/aktuelles/aktuelle-themen/led_strassenbeleuchtung/index.html (13.12.2017)

Stadt Göttingen (2014): "Bewegtes Licht" im Test für Straßenbeleuchtung. http://www.goettingen.de/magazin/artikel.php?artikel=6756&menuid=623 (13.12.2017)

Stadt Luzern (2006): Plan Lumière, Das Beleuchtungskonzept für die Stadt Luzern. Luzern, Schweiz. https://www.stadtluzern.ch/_rte/publikation/26158 (13.12.2017)

Stadt Zürich (2017): Plan Lumière. https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/taz/erhalten/plan-lumiere/lichtplan.html (13.12.2017)

Stark, H.; Brown, S.S.; Wong, K.W.; Stutz, J.; Elvidge, C.D.; Pollack, I.B.; Ryerson, T.B.; Dube, W.P.; Wagner, N.L.; Parrish, D.D. (2011): City lights and urban air. In: Nature Geoscience 4, DOI: 10.1038/ngeo1300 , S. 730–731

Starlight Initiative (2009): StarLight Reserves and World Heritage. Final Report. Canary Islands, Spain. https://issuu.com/pubcipriano/docs/finalreportfuerteventurasl (13.12.2017)

Steidle, A.; Hanke, E.-V.; Werth, L. (2013): In The Dark We Cooperate: The Situated Nature of Procedural Embodiment. In: Social Cognition 31, DOI: 10.1521/soco.2013.31.2.275 , S. 275–300

Steidle, A.; Werth, L. (2013a): In the spotlight: Brightness increases self-awareness and reflective self-regulation. In: Journal of Environmental Psychology, DOI: 10.1016/j.jenvp.2013.12.007 , S. 1–11

Steidle, A.; Werth, L. (2013b): Freedom from constraints: Darkness and dim illumination promote creativity. In: Journal of Environmental Psychology 35, DOI: 10.1016/j.jenvp.2013.05.003 , 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: J Epidemiol Commun H 69, DOI: 10.1136/jech-2015-206012, S. 1118–1124

Stone, E.L.; Jones, G.; Harris, S. (2009): Report street lighting disturbs commuting bats. In: Current Biology 19, DOI: 10.1016/j.cub.2009.05.058 , S. 1123–1127

Strahlenschutzkommission (2006): Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren. Bonn. http://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2006/Blendung_Lichtquellen.pdf?__blob=publicationFile (13.12.2017).

Strahlenschutzkommission (2010): Moderne Lichtquellen Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Bonn. http://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2010/2010_06.pdf?__blob=publicationFile (13.12.2017)

Struppek, M. (2011): About the urban screens initiative. http://urbanscreens.org/about.html (13.12.2017)

Swaczyna, A.; Moeck, M. (2012): Energetische Sanierung der Straßenbeleuchtung in der Altstadt von Regensburg - Abschlussbericht. Regensburg. https://www.regensburg.de/fm/121/abschlussbericht-energetische-sanierung-strassenbeleuchtung.pdf (13.12.2017)

Tong, K.P. (2017): On oversations of artificial light at night from ground and space. Unversität Bremen

Traverso, M.; Donatello, S.; Moons, H.; Rodriguez Quintero, R.; Gama Caldas, M.; Wolf, O.; Van Tichelen, P.; Van Hoof, V.; Geerken, T. (2017): Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Street Lighting and Traffic Signals - Preliminary Report, Final Version EUR 28622 EN, DOI: 10.2760/479108, Luxembourg,. https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/revision-eu-green-public-procurement-criteria-street-lighting-and-traffic-signals (13.12.2017)

Tvilight (2017): Case Studies. https://www.tvilight.com/case-studies/ (13.12.2017)

U.S. National Park Service: Managing Lightscapes. https://www.nps.gov/subjects/nightskies/management.htm (13.12.2017)

Umweltbundesamt (2009): Sammlung energieeffizienter Techniken für die Stadtbeleuchtung. BMU/UBA

Vereinigtes Königreich (2005): Clean Neighbourhoods and Environment Act 2005

Volgger, R. (2015): Lichtverschmutzung und Europarecht. In: Wagner, E./Kerschner, F./Donat, M. (Hg.): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung, Band 6, S. 185–209, Linz, Österreich

Volz, G. (2011): Von der Natriumdampflampe bis zur LED - Systemauswahl und Hinweise zu effizienter Straßenbeleuchtung

von Bergen, S. (2015): Schöne, geheimnisvolle Dunkelheit. In: Berner Zeitung (BZ)

von Bommel, W. (2015): Road Lighting. In: Fundamentals, Technology and Application, S. 253–254

von Fellenberg, L. (2013): Empfehlung zur Vermeidung von Lichtemissionen - Schweizerische Vollzugshilfe. In: Held, M.;Hölker, F.; Jessel, B. (Hg.): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 121–124, Bonn - Bad Godesberg

Wagner, E. (2015): Vorbemerkungen. In: Wagner, E./Kerschner, F./Donat, M. (Hg.): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung, Band 6., S. 7–18, Linz, Österreich

Wagner, E., Kerschner, F.,; Donat, M. (2015): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung, Band 6. Linz, Österreich

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, DOI: 10.26607/ijsl.v19i1.68, S. 48–55

Walkling, A.; Stockmar, A. (2013): Normen, Richtlinien und Empfehlungen zur Begrenzung von Lichtimmissionen. In: Held, M.;Hölker, F.; Jessel, B. (Hg.): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 137–140, Bonn - Bad Godesberg

Walther, M. (2014): Warum die Dunkelheit gut für uns ist. In: Aargauer Zeitung.

Weaver, D. (2011): Celestial ecotourism: new horizons in nature-based tourism. In: Journal of Ecotourism 10, DOI: 10.1080/14724040903576116, S. 38–45

Weber, E.H. (1834): Annotationes anatomicae et physiologicae. In: Programmata collecta 1.

Wegner Ullrich Müller-Helle; Partner Rechtsanwälte: Praxisleitfaden öffentliche Beleuchtung. http://www.wegnerpartner.de/site/pdf/plfoeb.PDF (13.12.2017)

Weirauch, T. (2011): Energieeffiziente öffentliche Beleuchtung. Universität Koblenz-Landau. http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/ (13.12.2017)

Welsh, B.C.; Farrington, D.P. (2008): Effects of improved street lighting on crime: a systematic review. In: Campbell Systematic Reviews, DOI: 10.4073/csr.2008.13, S. 59

WIBank (Wirtschafts- und Infrastrukturbank Hessen) (2015): Antrag auf Förderung von LED-Straßenbeleuchtung nach Teil II Nr. 2 der Richtlinien des Landes Hessen zur energetischen Förderung im Rahmen des Hessischen Energiegesetzes (HEG) vom 2. Dezember 2015. S. 11

Wiemken, T.; Froessler, D.R. (2011): Licht im Stadtumbau, Der Einsatz von Licht in Strategien und Projekten des Stadtumbaus - Ziele, Funktionen und Instumente. In: Good Practice Reader der Innovationsagentur Stadtumbau NRW.

Wiener Umweltanwaltschaft (2014): Österreichische Gesetze und Richtlinien. http://wua-wien.at/naturschutz-und-stadtoekologie/weiterfhrende-informationen-zum-thema17/oesterreichische-gesetze-und-richtlinien (13.12.2017)

Wikipedia (2017): Světelné znečištění. https://cs.wikipedia.org/wiki/Světelné_znečištění (13.12.2017)

Willis, K.G.; Powe, N.A.; Garrod, G.D. (2005): Estimating the value of improved street lighting: A factor analytical discrete choice approach. In: Urban Studies 42, DOI: 10.1080/00420980500332106, S. 2289–2303

WIRED Germany (2014): SolaRoad und Smart Highway: In den Niederlanden entsteht die leuchtende Zukunft der Straße

Wittlich, M. (2010): Blendung - Theoretischer Hintergrund. Sankt Augustin

Youyuenyong, P. (2015): Comparative Environmental and Planning Law Relating to Light Pollution Control in England and Other Jurisdictions. De Montfort University

ZEISS (2015): Studie: LED- und Xenon-Scheinwerfer blenden Deutschlands Autofahrer. https://www.zeiss.de/vision-care/de_de/about-us/newsroom/pressemappen/drivesafe-brillenglaeser.html (13.12.2017)

Zielinska-Dabkowska, K M Hartmann, J. (2016): LED outdoor advertising in the urban context. Case study of "Walk": a video installation integrated into the façade of a store in Zürich/CH. In: Professional Lighting Design (PLD) Magazine 101, S. 52-58.

Zorluer, F.; Quan, H. (2014): Intelligente Lichtlösungen. Tvilight B.V. https://issuu.com/tvilight/docs/brochure_de_apr2015 (13.12.2017)

Zumtobel Licht GmbH (2014): Licht für Fassade und Architektur. Lemgo. S. 54. http://www.zumtobel.com/PDB/Ressource/teaser/de/de/AWB_Fassade_und_Architektur.pdf (13.12.2017)

Zydek, B. (2014): Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen. Technische Universität Darmstadt. http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4073/ (13.12.2017)