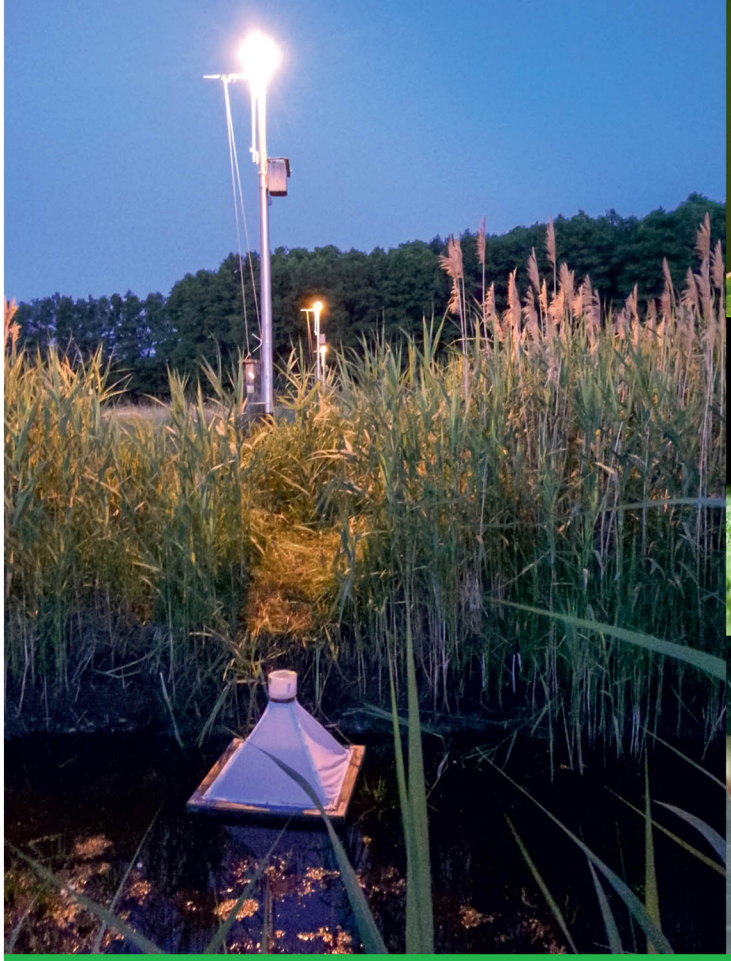

Naturschutz und Biologische Vielfalt 168

Analyse der Auswirkungen künstlichen Lichts auf die Biodiversität

Bestimmung von Indikatoren für die Beeinträchtigung und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Vermeidung negativer Effekte im Rahmen von Eingriffen

Sibylle Schroer, Nina-Sophie Weiß, Maja Grubisic,
Alessandro Manfrin, Roy H. A. van Grunsven,
Mona Storms, Anne Berger, Christian C. Voigt,
Reinhard Klenke und Franz Hölker

BfN
Bundesamt für Naturschutz

Naturschutz und Biologische Vielfalt
Heft 168

Analyse der Auswirkungen künstlichen Lichts auf die Biodiversität

Bestimmung von Indikatoren für die Beeinträchtigung und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Vermeidung negativer Effekte im Rahmen von Eingriffen

Ergebnisse des gleichnamigen F+E-Vorhabens des Bundesamtes für Naturschutz (FKZ 3514 82 1700)

Sibylle Schroer
Nina-Sophie Weiß
Maja Grubisic
Alessandro Manfrin
Roy H. A. van Grunsven
Mona Storms
Anne Berger
Christian C. Voigt
Reinhard Klenke
Franz Hölker

Bundesamt für Naturschutz
Bonn - Bad Godesberg 2019

Titelfotos: links: Experimentalfeld zur Messung der Auswirkungen künstlichen Lichts auf ein aquatisch-terrestrisches Ökosystem (Maja Grubisic); rechts von oben nach unten: Ampferspanner *Timandra griseata* (Hamon, CC-BY-SA-3.0), Igel bei Nacht (Ro Irvin, CC-BY-SA-2.0), Barsche im Labor (Anika Brüning)

Adressen der Autorinnen und der Autoren:

Dr. Sibylle Schroer
PD Dr. Franz Hölker
Nina-Sophie Weiß
Dr. Maja Grubisic
Dr. Alessandro Manfrin
Dr. Roy H. A. van Grunsven
Mona Storms

Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
Müggelseedamm 310, 12587 Berlin
E-Mail: schroer@igb-berlin.de

PD Dr. Christian C. Voigt
Dr. Anne Berger

Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung (IZW)
Alfred-Kowalke-Str. 17, 10315 Berlin
E-Mail: voigt@izw-berlin.de

Dr. Reinhard Klenke

Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ)
Permoserstr. 15, 04318 Leipzig
E-Mail: reinhard.klenke@web.de

Fachbetreuung im BfN:

Marita Böttcher — Fachgebiet II 4.2 „Eingriffsregelung, Verkehrswegeplanung“

Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (FKZ 3514 82 1700).

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

Institutioneller Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz (BfN)
Konstantinstr. 110, 53179 Bonn
URL: www.bfn.de

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

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des institutionellen Herausgebers unzulässig und strafbar.

Nachdruck, auch in Auszügen, nur mit Genehmigung des BfN.

Bezug über: BfN-Schriftenvertrieb – Leserservice –
im Landwirtschaftsverlag GmbH
48084 Münster
Tel.: 02501/801-300, Fax: 02501/801-351

oder im Internet:
www.buchweltshop.de/bfn

ISBN 978-3-7843-4068-5

DOI 10.19213/973167

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **6**

Tabellenverzeichnis **10**

Vorwort **11**
1 Einleitung 11
1.1 Problemstellung 13
1.2 Definition der Lichtverschmutzung 15
1.3 Leuchtmittel 16
1.3.1 Leuchtdioden 19
1.3.2 Metalldampflampen 20
1.3.3 Natriumdampflampen 21
1.3.4 Quecksilberdampflampen 21
1.3.5 Halogen-Metalldampflampen 21
1.3.6 Leuchtstofflampen 22
1.4 Störwirkungen von Außenlichtanlagen 22

2 Experimentalaufbau und Literaturrecherche des F+E-Projekts **23**
2.1 Literaturrecherche 23
2.2 Die Experimentalfelder 23

3 Auswirkungen auf Flora und Fauna **29**
3.1 Flora 29
3.1.1 Auswirkungen auf Bäume und Wirt-Parasit Beziehungen 33
3.1.1.1 Untersuchungen an Kastanien und -Miniermotten im Gewächshaus 33
3.1.1.2 Ergebnisse 34
3.1.1.3 Freilandmonitoring von Kastanien und Miniermotten 36
3.1.1.4 Ergebnisse 37
3.1.2 Auswirkungen auf die Primärproduktion in Gewässern 39
3.1.2.1 Untersuchungen an Periphyton in den Experimentalfeldern 39
3.1.2.2 Ergebnisse 42
3.1.2.3 Untersuchungen in einem alpinen Fluss 44
3.1.2.4 Ergebnisse 45
3.2 Fauna 47
3.2.1 Insekten und andere Arthropoden 47
3.2.1.1 Untersuchungen zu Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht auf die Arthropodenfauna in einem aquatisch-terrestrische Ökosystem 52
3.2.1.2 Ergebnisse 54
3.2.1.3 Emergenzfallen 55
3.2.1.4 Bodenfallen 59
3.2.1.5 Flugeklektoren 63
3.2.1.6 Beispiel Käfer – am Boden und in der Luft 68
3.2.1.7 Analyse des Attraktionsverhaltens und der Barrierewirkung 69

3.2.1.8 Ergebnisse ... 71
3.2.1.9 Auswirkungen durch Beleuchtungsumrüstungen auf das Attraktionsverhalten ... 73
3.2.1.10 Geschlechterspezifisches Attraktionsverhalten ... 75
3.2.1.11 Untersuchungen an Spinnen und anderen Prädatoren ... 75
3.2.1.12 Ergebnisse ... 77
3.2.1.13 Zusammenfassung der Auswirkungen auf Insekten und andere Arthropoden ... 80
3.2.2 Schnecken ... 80
3.2.3 Amphibien ... 83
3.2.3.1 Untersuchungen an Erdkröten ... 84
3.2.3.2 Ergebnisse ... 86
3.2.4 Fische ... 87
3.2.4.1 Untersuchungen an Barschen und Plötzen ... 90
3.2.4.2 Ergebnisse ... 91
3.2.5 Vögel ... 97
3.2.5.1 Untersuchungen an Staren ... 101
3.2.5.2 Ergebnisse ... 103
3.2.6 Säugetiere ... 106
3.2.6.1 Beobachtungen an Igeln ... 109
3.2.6.2 Erfassung der Bewegungsmuster von Igeln im Treptower Park ... 110
3.2.6.3 Ergebnisse ... 112
3.2.7 Fledermäuse ... 117
3.2.7.1 Vermeidung von Lichtbarrieren in geeigneten Jagdbereichen ... 119
3.2.7.2 Mögliche Beleuchtungslösungen ... 120
3.3 Zusammenfassung und Relevanz der Auswirkungen auf Flora und Fauna ... 122
3.3.1 Auswirkungen durch Beleuchtungsintensität ... 124
3.3.2 Auswirkungen durch temporäre Verschiebung des Lichtsignals ... 126
3.3.3 Auswirkungen durch spektrale Veränderungen des Lichtes ... 127
3.3.4 Offene Forschungsfragen ... 127
3.3.4.1 Auswirkungen durch Beleuchtung auf den Rückgang der Insektenbiomasse ... 128
3.3.4.2 Auswirkungen durch Beleuchtung in und um Gewässer ... 128
3.3.4.3 Die globalen Veränderungen durch ansteigende Helligkeiten in Nachtlandschaften ... 129

4 Über den rechtlichen und gesellschaftlichen Umgang mit Beleuchtung ... 131
4.1 Naturschutzrechtliche Rahmenbedingungen ... 131
4.2 Immissionsschutzrechtliche Rahmenbedingungen ... 132
4.3 Baugesetzliche Rahmenbedingungen ... 132
4.4 Licht-Richtlinie der Arbeitsgemeinschaft Bund/Länder für Immissionsschutz (LAI) ... 133
4.5 Ökodesignverordnung ... 133

5 Handlungsempfehlungen 134
5.1 Beleuchtungsstärke nach Bedarf regulieren 136
5.2 Lichtfarben an die Umgebung anpassen 137
5.3 Technische Normen 138
5.4 Abstrahlungsgeometrie optimieren 139
5.5 Forschung verstärken 142

6 Zusammenfassung 144

7 Literaturverzeichnis 147

8 Anhang 181
Glossar 181
Nachweise über Beeinträchtigungen 187
Adresse der Autoren 199

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Spektrale Verteilung von thermischen Lichtquellen zeigen das kontinuierliche Spektrum von Tageslicht und einer Glühlampe.... 16

Abb. 2: Lichtspektren unterschiedlicher Leuchtmittel, Natriumdampf-Niederdruck und Hochdruck und LED mit unterschiedlichen Farbtemperaturen 18

Abb. 3: CIE-Farbraum-Diagramm 19

Abb. 4: Erzeugen von weißem Licht mit einer ultravioletten Leuchtdiode und Fluoreszenzfarbstoffen und von weißem Licht mit einer blauen Leuchtdiode und einem breitbandigen Fluoreszenzfarbstoff 20

Abb. 5: Experimentalfeld mit Messstation für abiotische Daten, Emergenz- und Fallen für Fluginsekten. 24

Abb. 6: Natriumdampf-Hochdruckbeleuchtung des Experimentalfeldes 26

Abb. 7: LED Beleuchtung des Experimentalfeldes....26

Abb. 8: Schematisches Raster des Versuchsfeldes mit Messdaten der Beleuchtungsstärke....27

Abb. 9: LED- und Natriumdampf-Hochdruckdampf-Spektren, gemessen im Experimentalfeld 28

Abb. 10: Straßenbäume unter Beleuchtung.. 32

Abb. 11: Versuchsaufbau im Gewächshaus zu Untersuchungen an der Kastanienminiermotte 34

Abb. 12: Blattseneszenz nach drei Monaten Versuchslaufzeit im Gewächshaus 35

Abb. 13: Anzahl der Kastanienminiermotten (*Cameriaria ohridella*), die sich in beleuchteten und unbeleuchteten Fiederblättchen zu freien oder festen Puppen versponnen haben. 36

Abb. 14: Expositionsstellen für Primärproduktions-Aufzuchtfolien im Experimentalfeld 40

Abb. 15: Befestigung der Aufwuchsfolien im Graben des Experimentalfeldes....41

Abb. 16: Entwicklung der Periphyton Biomasse im Experimentalfeld in den Jahren 2015 und 2016 unter Natriumdampf-Hochdruck- und unter LED-Beleuchtung 43

Abb. 17: Untersuchungen des Periphytons an der Uferzone des Flusses Fersina....45

Abb. 18: Biomasseentwicklung der benthischen Primärproduzenten in einem subalpinen Strom 46

Abb. 19: Fallentypen des Experimentalfeldes..... 53

Abb. 20: Schematische Darstellung der Experimentalfelder mit Kennzeichnung der Lage der unterschiedlichen Fallentypen..... 54

Abb. 21: Anzahl der gefangenen Arthropoden in Emergenzfallen im Graben im Jahr 2014. 56

Abb. 22: Anzahl der gefangenen Arthropoden in Emergenzfallen im Graben im Jahr 2015. 57

Abb. 23: Anzahl der gefangenen Arthropoden in Emergenzfallen im Graben im Jahr 2016. 58

Abb. 24: Anzahl der gefangenen Arthropoden in Bodenfallen im Jahr 2014..... 60

Abb. 25: Anzahl der gefangenen Arthropoden in Bodenfallen im Jahr 2015..... 61

Abb. 26: Anzahl der gefangenen Arthropoden in Bodenfallen im Jahr 2016..... 62

Abb. 27: Anzahl der gefangenen Arthropoden in Flugeklektoren im Jahr 2014..... 64

Abb. 28: Anzahl der gefangenen Arthropoden in Flugeklektoren im Jahr 2015..... 65

Abb. 29: Anzahl der gefangenen Arthropoden in Flugeklektoren im Jahr 2016..... 66

Abb. 30: Anzahl der Arthropodenordnungen gefangen in Flug-eklektoren während der Nacht mit Natriumdampf-Beleuchtung und mit LED.. 67

Abb. 31: Aufnahme des beleuchteten Experimentalfeldes aus der Flugzeugperspektive und schematische Darstellung der Nullhypothese 71

Abb. 32: Schematische Darstellung des Markov-Modells basierend auf Insektenbewegung in einem orthogonalen Muster 71

Abb. 33: Errechnete Fänge für Nachtfalter.. 72

Abb. 34: Wahrscheinlichkeiten von Insektenordnung durch Straßen-leuchten angezogen zu werden (Attraktion) im Verhältnis zur Wahrscheinlichkeit nicht lebend das Experimentalfeld verlassen zu können (Mortalität). 73

Abb. 35: Graphische Darstellung der Methode zur Bestimmung der Nahrungszusammensetzung von Spinnen. 77

Abb. 36: Zusammensetzung der Isotopensignaturen nach Jahreszeiten bezüglich der Nahrungsdiversität und der trophischen Stellung im Nahrungsnetz bei terrestrischen und aquatischen Spinnen und deren Nahrung 78

Abb. 37: Zusammensetzung der Spinnennahrung im Frühling nach terrestrischem und aquatischem Ursprung 79

Abb: 38: Anzahl der vorkommenden Schnecken (Nackt- und Halbnacktschnecken) in den Jahren 2012 bis 2015 auf dem beleuchteten Experimentalfeld. 81

Abb. 39: Versuchsaufbau und Beleuchtungsspektren der Leuchtmittel, die im Abstand von 25 m an einem Graben für die Querung von wandernden Erdkröten installiert wurden.. 86

Abb. 40: Anzahl an Erdkröten, die pro Nacht an Amphibienschutz-Barrieren in Eimerfallen gefangen wurden..... 87

Abb. 41: Schematische Darstellung der Versuchsbedingungen für die Untersuchungen an Barschen und Plötzen im Experimentalfeld.. 93

Abb. 42: Auswirkungen durch Licht auf den Melatoningehalt im Blutserum in Fischen bei männlichen und weiblichen Barschen und Plötzen 94

Abb. 43: Relative mRNA-Expression von Follikel-stimulierendem Hormon und luteinisierendem Hormon in Hirn-Hypophysengewebe von *Perca fluviatilis* 94

Abb. 44: Relative mRNA-Expression von Follikel-stimulierendem Hormon und luteinisierendem Hormon von *Rutilus rutilus* 95

Abb. 45: Konzentration von 11-KT im Blutserum bei weiblichen und männlichen Barschen und Plötzen 96

Abb. 46: Konzentration von 17ß-Estradiol im Blutserum bei weiblichen und männlichen Barschen und Plötzen 97

Abb. 47: Anbringung der Datenlogger in Starenkästen 103

Abb. 48: Starengelege im Brutkasten und typischer Verlauf der Brut 105

Abb. 49: Datenlogger Befestigung an Igeln 111

Abb. 50: Graphische Darstellung der Effektstärke von Lichtintensität, Distanz zu Straßen, Geschlecht und Gewicht..... 114

Abb. 51: Schematische Darstellung der Wahrscheinlichkeit mit der weibliche und männliche Igel sich in der Nähe einer Straße aufhalten 116

Abb. 52: Schematische Darstellung der komplexen Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht auf Flora und Fauna 124

Abb. 53: Beleuchtungsstärke einer typischen Straßenlampe gemessen in der Horizontalebene 141

Abb. 54: Beispiel für Leuchten mit Lichtstärkeklasse G6 142

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Mittelwerte der Blattflächen und des Besatzes durch die Kastanienminiermotte (*Cameraria ohridella*), an unbeleuchteten und beleuchteten Bäumen im Stadtgebiet Berlin sowie im ländlichen Raum Brandenburg 38

Tab. 2: Anzahl des Vorkommens von Käfern (Coleoptera) bestimmt bis zu Familien, gefangen durch Boden- und Kombinationsfallen am Tag und während der Nacht.. 68

Tab. 3: Anzahl der Fänge durch Flugfallen auf dem Experimentalfeld in den jeweiligen Fallenpositionen 74

Tab. 4: Insektenfänge an LED im Vergleich mit Natriumdampf-Hochdruck-Beleuchtung in einem Waldökosystem 75

Tab. 5: Anteil aquatischer und terrestrischer Fluginsekten, welche in Flugeklektoren gefangen wurden 80

Tab. 6: Vorkommen von Nackt- und Halbnacktschnecken auf dem unbeleuchteten Referenz- und dem beleuchteten Experimentalfeld..... 82

Tab. 7: Geschlecht, Gewicht, Anzahl der Peilungen, Erfassungsdauer sowie Aktionsflächender erfassten Igel . 113

Tab. 8: Ergebnisse der linearen Modellen (GLMM, ANOVA) bezüglich der Einflussfaktoren..... 114

Tab. 9: Ergebnisse der GLMR bezüglich Einflussfaktoren 115

Tab. 10: Typische durch künstliches Licht-induzierte Verhaltensreaktionen europäischer Fledermäuse in Bezug auf spezifische Aktivitäten und Lebensräume. 118

Tab. 11: Zusammenfassung der Beeinträchtigungen durch Straßenbeleuchtung, welche anhand der in diesem F+E-Projekt erhobenen Beobachtungen festgestellt werden können 122

Tab. 12: Schwellenwerte für Beleuchtungsstärken, die Veränderungen in unterschiedlichen Tiergruppen hervorrufen 125

Tab. 13: Zusammenfassung der Beeinträchtigungen auf wildlebende Tiere durch Beleuchtung..... 187

Vorwort

Licht und demnach auch künstliche Beleuchtung wird vielfach positiv assoziiert. Es mehren sich jedoch die Hinweise und Erkenntnisse, dass herkömmliche künstliche Beleuchtung in der Dämmerung und in der Nacht nachhaltig nicht nur die menschliche Gesundheit beeinträchtigen, sondern auch Arten, Lebensgemeinschaften und Nahrungsnetze in ihren Wechselbeziehungen stören kann. Hinzu kommt, dass derzeit eine weltweite Umstellung der Beleuchtung auf LED (Licht-emittierende Dioden) erfolgt, die neben den bislang genannten Auswirkungen möglicherweise stärker als herkömmliche Natriumdampf-Hochdruckbeleuchtung auch Stoffwechselprozesse im Einzelorganismus nachhaltig beeinträchtigen kann.

Das Beleuchtungsniveau nimmt weltweit jährlich um zwei bis sechs Prozent zu. Deutschland bildet hier keine Ausnahme. Einsparungen der Energiekosten durch den Einsatz energieeffizienterer LED-Leuchtmittel gemäß Ökodesignrichtlinie und niedrige Herstellerpreise führen oftmals zu einem höheren Einsatz von LED-Leuchtmitteln. Aufgrund dadurch eintretender Reboundeffekte werden Energiesparpotenziale nicht vollständig erreicht und Nachtlandschaften aufgehellt.

Dass aber Nachtlandschaften ihren eigenen Wert haben und die Dunkelheit bei Nacht eine Funktion für alle Organismen hat, seien sie nun nacht- oder tagaktiv, ist im öffentlichen Diskurs um das Aufstellen von Beleuchtungsanlagen bislang wenig bis gar nicht bekannt bzw. bewusst und berücksichtigt worden.

Die in diesem Band vorgelegten Untersuchungen und Ergebnisse erweitern das Wissen zu den Auswirkungen künstlicher Beleuchtung auf aquatisch-terrestrische Ökosysteme. Dargestellt werden Auswirkungen auf verschiedene an Land und im Wasser lebende Tier-und Pflanzenartengruppen, auf ausgewählte Nahrungsnetze und auch Veränderungen im Stoffwechsel an Beispielorganismen. Die Untersuchungen beziehen eine heute vielerorts durchgeführte Umrüstung von Natriumdampf-Hochdruckleuchten zu LED mit ein.

Die Ergebnisse liefern wichtige Hinweise für die gezielte Planung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Beeinträchtigungen durch künstliche Beleuchtung.

Der vorliegende Band schließt mit Hinweisen für eine nachhaltige Lichtplanung und zur rechtlichen Einordnung ab. Das Bundesamt für Naturschutz möchte mit dieser Veröffentlichung einen Beitrag dazu leisten, dass eine nach dem aktuellen Stand des Wissens durchgeführte Lichtplanung der Gesundheit des Menschen genauso zugutekommt, wie dem Klimaschutz und der biologischen Viel-

falt. Handeln ist aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar geboten, denn eine die biologische Vielfalt und den Menschen minimal beeinträchtigende Beleuchtung ist nach dem Stand des Wissens und der Technik schon jetzt möglich.

Prof. Dr. Beate Jessel

Präsidentin des Bundesamtes für Naturschutz

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Lichtbeeinflussung von Nachtlandschaften nimmt jährlich weltweit um über mindestens 2 bis zu 6% zu (HÖLKER et al. 2010a; KYBA et al. 2017). Trotz dieser erheblichen Veränderung der Nachtlandschaften wird der Faktor Licht in der Forschung noch vergleichsweise wenig betrachtet. Während die Messung und Dokumentation globaler Temperaturveränderungen im Zuge des Klimawandels selbstverständlich erscheinen, sind Messungen für Lichtumgebungen noch nicht standardisiert. Den Zielen der Umweltforschung stabile Ökosysteme mit hoher Artenvielfalt und Ökosystemfunktionen zu erhalten wird bisher vor allem am Tage nachgekommen. Es gibt aber zunehmend Hinweise darauf, dass Fortpflanzungs-, Ruhestätten und andere lichtempfindliche Lebensräume durch (a) direkte künstliche Lichteinstrahlung, durch (b) gestreutes Licht aus beleuchteten Räumen außerhalb der Lebensräume (AUBRECHT et al. 2010; GASTON et al. 2015) sowie durch (c) Reflektion von künstlichem Licht durch wolkenatmosphärische Moleküle, Aerosole und besonders durch Wolken gestört werden (KYBA & HÖLKER 2013). Eine zunehmende Anzahl an Studien weist darauf hin, dass künstliches Licht in der Nacht zirkadiane Rhythmen und fitnessrelevante Organismeneigenschaften nachhaltig stört (RICH & LONGCORE 2006; NAVARA & NELSON 2007; EISENBEIS & HÄNEL 2009; HÖLKER et al. 2010b; GASTON et al. 2013; HÖLKER & TOCKNER 2013; PERKIN et al. 2014C; SCHROER & HÖLKER 2017a). Auf das Vorkommen von Fledermäusen könnte der Faktor Licht einen vergleichbaren Einfluss haben wie Landnutzung und Bodenversiegelung (AZAM et al. 2016). Den Fragen, welchen Einfluss künstliches Licht in der Nacht auf die Verarmung der Biodiversität, Lebensraumbeschneidungen und Fragmentierung von Landschaften hat und wie sich der Faktor in Verbindung mit Landnutzungsänderungen verhält, muss dringend erforscht werden, denn künstliches Licht in der Nacht verändert zunehmend die Nachtlandschaften (KYBA et al. 2017).

Leben ist Rhythmus; Tiere und Pflanzen sind auf deutliche rhythmische Unterschiede in der Wahrnehmung ihrer Lichtumgebung angewiesen, um ihr saisonales und tagesrhythmisches Verhalten und die damit verbundenen physiologischen Prozesse mit der Außenwelt synchronisieren zu können. Die Eigenschaften dieser endogenen Rhythmen wurden an einer Vielzahl von Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen im Labor und im Freiland untersucht. Die prominentesten Rhythmen haben eine Periodenlänge von ungefähr 24 Stunden und heißen daher zirkadian (lateinisch für circa = ungefähr, dies = Tag). Zudem gibt es noch die kürzeren ultradianen Rhythmen (z. B. Herzschlag, Atmung), die längeren infradianen, (z. B. zirkalunarer Rhythmus oder Menstruationszyklus) und zirkannualen oder saisonalen Rhythmen. Licht wirkt für all

diese Rhythmen als Zeitgeber, der regelmäßig die inneren Uhren stellt und damit alle Rhythmen untereinander und mit der Außenwelt abstimmt.

Die unterschiedlichen Lichtphasen zu Tag, Nacht, Sonnenauf- und Sonnenuntergang bieten temporale Nischen, an die sich Organismen evolutionär angepasst haben. Die Sinnesorgane und Rezeptoren für Licht haben sich auf die individuellen raum-zeitlichen Bedürfnisse eingestellt und viele Aktivitäten und Interaktionen (Räuber-Beute, Partnerfindung und Eltern-Nachwuchsbeziehungen) haben sich an die Lichtverhältnisse des Habitats evolutionär angepasst. Ein Drittel der Wirbeltiere sind nachtaktiv, dazu gehören alle Fledermausarten und fast alle Amphibien. Bei den Wirbellosen sind sogar zwei Drittel der bekannten Arten nachtaktiv (HÖLKER et al. 2010b). Die Erhellung von Nachtlandschaften kann insbesondere Organismen beeinträchtigen, welche sich in den zeitlichen Nischen der Dämmerung und der Nacht entwickelt und deren Wahrnehmungssysteme sich auf die Lichtbedingungen der Nachtnische angepasst haben (RICH & LONGCORE 2006). Lichtinduzierte Veränderungen des Verhaltens und der Artzusammensetzungen in Lebensgemeinschaften könnten kaskadenartige Auswirkungen auf Ökosysteme haben und verändern daher nicht nur die Bedingungen für nachtaktive, lichtsensible Arten, sondern auch indirekt die Bedingungen für tagaktive Arten und das Funktionieren ganzer Ökosysteme (BENNIE et al. 2015; KNOP et al. 2017).

Erst seit wenigen Jahren werden die Auswirkungen des künstlichen Lichts zu jenen Immissionen gezählt, die unzulässige Nachteile oder Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft hervorrufen. Art und Ausmaß von Lichtimmissionen werden teilweise in Regelwerken (z. B. LAI (Länderausschuss für Immissionsschutz), LiTG Schrift 12.3 (LITG, 2011), CIE 150: 2003) erfasst. Die Arbeitsgemeinschaft Bund/Länder für Immissionsschutz (LAI), bewertet Lichtimmissionen als schädliche Umwelteinwirkung, wenn durch Art, Ausmaß und Dauer Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder für die Nachbarschaft zu erwarten sind. Neben dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) bieten Raumordnungsgesetz (ROG), das Bundes-Baugesetzbuch (BauGB) sowie das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) Möglichkeiten die Vorhabenplanung von Außenlichtanlagen zu regulieren. Die Bauleitplanung und die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung bieten Möglichkeiten, Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft durch Lichtimmissionen während der Vorhabenplanung zu bewerten und notwendige Vermeidungs- oder Kompensationsmaßnahmen zu definieren. Für die Bewertung einer Beeinträchtigung müssen die Erheblichkeit und Nachhaltigkeit nachgewiesen werden. Diese Bewertung einer Beeinträchtigung durch Licht enthält viele subjektive Variablen und der gesetzliche Rahmen ist heute noch bruchstückhaft (HOFMEISTER 2013). Fehlende Standards für Mess-

und Bewertungsverfahren erschweren die Durchsetzung von Regulierungen und wichtige Bereiche, wie die Beleuchtung von Verkehrswegen, welche einen Hauptanteil der Gesamtlichtemissionen ausmachen (KUECHLY et al. 2012), sind von der Vermeidungspflicht des Bundes-Immissionsschutz-Gesetzes (BImSchG) ausgenommen und werden normativ geregelt.

Mit Inkrafttreten der Ökodesign-Richtlinie befindet sich der Markt für Leuchtmittel in einem dynamischen Wandel. Schrittweise werden veraltete Leuchtstofflampen und Hochdruckentladungslampen sowie ineffiziente Vorschaltgeräte vom Markt genommen. Kommunen und auch die Industrie sind damit in der Pflicht, auf energieeffiziente Technologien umzurüsten. Neue Beleuchtungstechnologien, wie Licht emittierende Dioden (LED) werden flächendeckend installiert, ohne dass bislang eine Risikoabschätzung bezüglich ihrer ökologischen Auswirkungen existiert. Selbst die allgemeinen Auswirkungen künstlichen Lichts auf Ökosysteme sind bisher noch kaum verstanden, wie beispielsweise Fallen-, Staubsauger- und Attraktionseffekte sowie Migrations- und Ausbreitungsbarrieren bei verschiedenen Tiergruppen, insbesondere bei Insekten, Spinnen, Fische, Fledermäuse und Vögel. Hinzu können Störungen und Änderungen von zirkadianen Rhythmen auftreten, die zur Abnahme der Resilienz bestimmter Lebensgemeinschaften und Ökosysteme führen können. Wegen der durch die Ökodesign-Richtlinie eingeleiteten Umrüstung der öffentlichen Beleuchtung auf energieeffizientere Beleuchtungssysteme sind zwei Szenarien denkbar und zum Teil schon jetzt zu beobachten. Entweder führt kostengünstiges Licht aufgrund des Rebound-Effekts zu einer immer stärkeren Nutzung und die Erhellung der Nachtlandschaften setzt sich fort. Oder das Potenzial moderner Beleuchtungstechnologien wie LED wird genutzt, um die gesamten Lichtemissionen drastisch zu reduzieren und gleichzeitig die Sichtbarkeit im Nutzungsraum zu verbessern, was zu einer Verringerung der unnatürlichen Aufhellung von Nachtlandschaften führen könnte (KYBA 2018). Für eine solche positive Entwicklung sind die Bildung des öffentlichen Bewusstseins für das Problem Lichtverschmutzung und Handlungsleitlinien für eine gute Praxis mit dem Konsumgut Licht essentiell.

1.2 Definition der Lichtverschmutzung

Der Begriff „Lichtverschmutzung" entstand höchstwahrscheinlich erst in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts (DEGENRING 2015). Es handelt sich um eine Umweltverschmutzung durch künstliches Licht, die das natürliche nächtliche Licht (z. B. Sterne, Mond) verschmutzt mit unerwünschten Auswirkungen auf den Menschen, Flora und Fauna, die ästhetische Qualität von Stadt- und Naturlandschaften sowie die Sichtbarkeit des Sternenhimmels. RICH & LONGCORE (2006) unterscheiden von daher auch „astronomische Lichtverschmutzung",

die Überblendung des Nachthimmels, von „ökologischer Lichtverschmutzung", welches die Auswirkungen auf Ökosysteme umfasst.

1.3 Leuchtmittel

Licht ist der Teil der elektromagnetischen Strahlung, der für das menschliche Auge sichtbar ist. Längere Wellenlägen, Infrarotstrahlung (IR) wird nicht als visueller Reiz über die Retina aufgenommen, sondern als Wärme über die Haut. Auch kurzwellige, ultraviolette (UV) Strahlung kann nicht vom Menschen visuell wahrgenommen werden, aber von vielen Insekten, Vögeln, Reptilien und einigen Säugetieren. Daher hat dieser Spektralbereich eine hohe ökologische Bedeutung (DOUGLAS & JEFFERY 2014).

Prinzipiell unterscheidet man zwischen thermischen und nicht-thermischen Lichtquellen. Thermische Strahler beziehen die Energie für die Lichtemission aus der thermischen Bewegung ihrer Teilchen, wie z. B. Kerzenflammen, Glühdraht oder die Sonne. Das Spektrum einer thermischen Lichtquelle ist kontinuierlich, es treten alle Wellenlängen auf (Abb. 1). Nicht-thermische Lichtquellen haben ein Linien- oder ein Bandenspektrum, d. h. es werden nur bestimmte Wellenlängen abgestrahlt. Beispiele sind die Lichtemissionen von Gasentladungsröhren, Leuchtdioden, Polarlichter oder Leuchtkäfer. Linienspektren sind oft charakteristisch für bestimmte Stoffe, wie beispielsweise Natrium oder Quecksilber (Abb. 1 und 2).

Je schmaler die Wellenlängenbereiche sind, welche die Lichtquellen abstrahlen, umso geringer ist die Farbwiedergabe. Mit dem Farbwiedergabeindex (engl. = colour rendering index) wurde deshalb ein Wert benannt, der für jede Lichtquelle errechnen lässt, wie weit die Farbwiedergabe der Lichtquelle von kontinuierlichen Spektren thermischer Lichtquellen einer Glühlampe oder von Tageslicht abweicht.

Die spektrale Verteilung stellt die Energieverteilung der verschiedenen Wellenlängen dar. Das CIE-Farbraum-Diagramm mit Wellenlängen in Nanometern, das 1931 entwickelt wurde, wird bis heute als Standard zur Definition von Farben verwendet. Das Diagramm ist eine zweidimensionale Darstellung von Farben mit derselben Intensität (Helligkeit) gemäß menschlicher Wahrnehmung. Eine vollständige Darstellung der Farben ist eigentlich dreidimensional, wobei die Z-Achse die Helligkeit anzeigt. Die schwarze Linie innerhalb des Diagramms ist der Planck'sche Kurve. Diese Skala gibt die Farbtemperatur wieder. Wenn ein schwarzer Körper (Titan) erhitzt wird leuchtet dieser je nach Erhitzungsgrad erst rot, dann gelb und dann blau (Abb. 3). Die Farbtemperatur gemessen in Kelvin (K) wird also immer höher, umso kaltweißer das Licht wirkt.

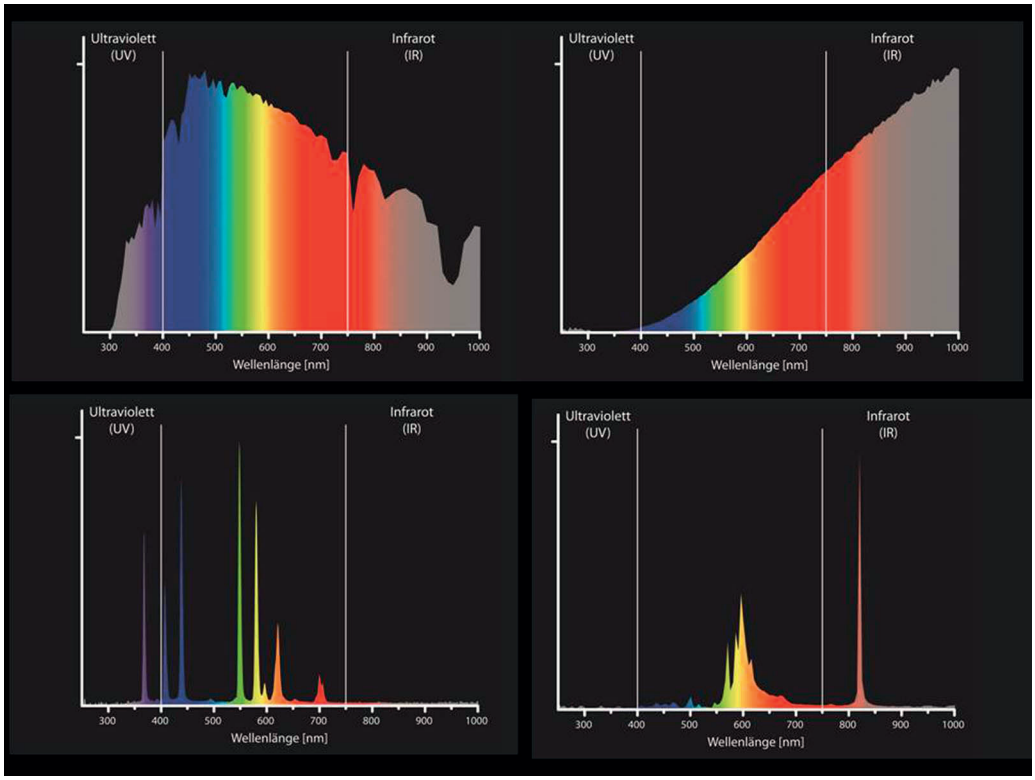

Abb. 1: Spektrale Verteilung von thermischen Lichtquellen (oben) zeigen das kontinuierliche Spektrum von Tageslicht (links) und einer Glühlampe (rechts). Die grauen Linien zeigen den Bereich der menschlichen Wahrnehmung. Thermische Lichtquellen zeichnen sich durch einen hohen Anteil infraroter Strahlung aus, die als Wärme wahrgenommen wird. Nicht-thermische Lichtquellen (unten) strahlen in einzelnen Wellenlängen charakteristisch für einzelne Stoffe, wie die Quecksilberdampf-Gasentladungslampe (links) oder die Natriumdampf-Hochdruck-Gasentladungslampe (rechts) (Graphiken: Katharina Gabriel).

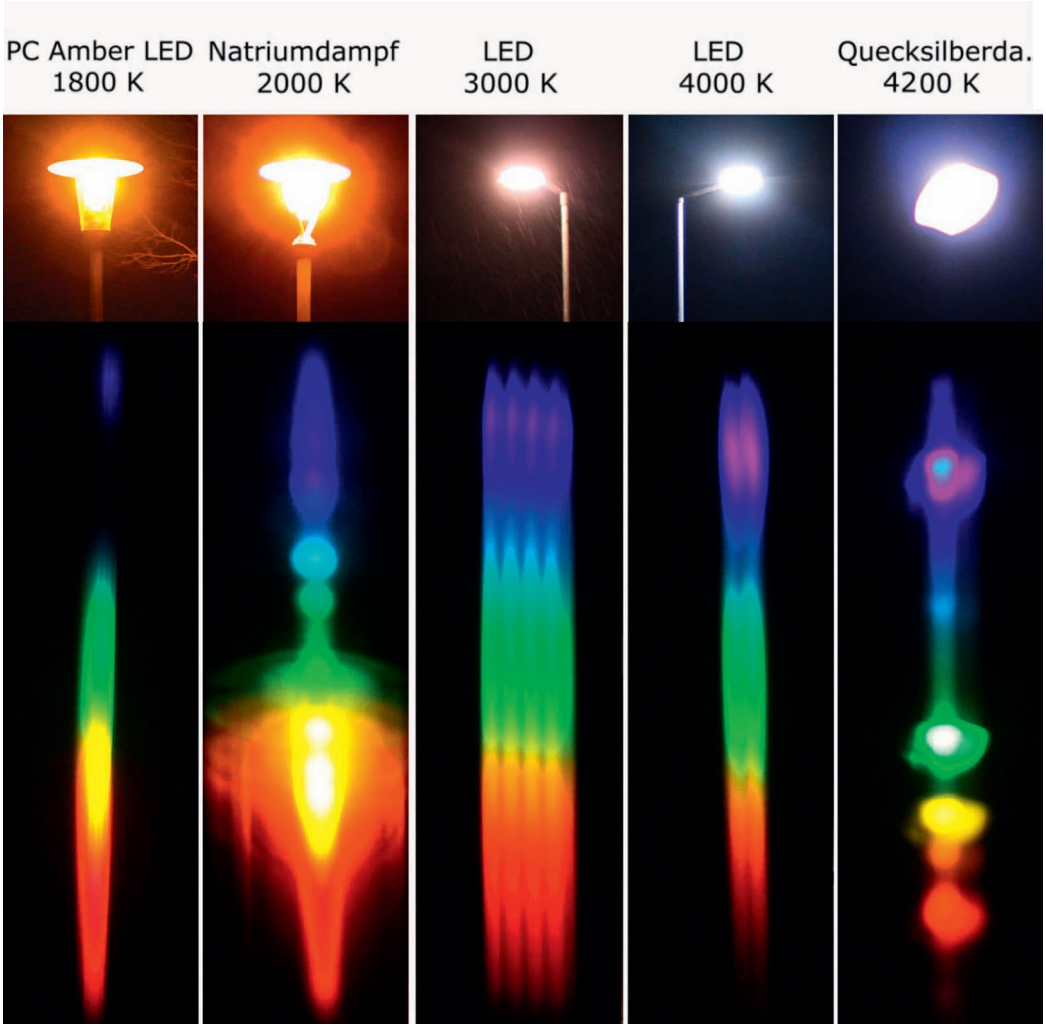

Abb. 2: Lichtspektren unterschiedlicher Leuchtmittel, Natriumdampf- Niederdruck und Hochdruck und LED mit unterschiedlichen Farbtemperaturen, weiße Bereiche = Aufnahmen im Hauptmaximum stark übersteuert, damit auch Nebenmaxima dargestellt werden können (Fotos: zusammengestellt von Thomas Becker).

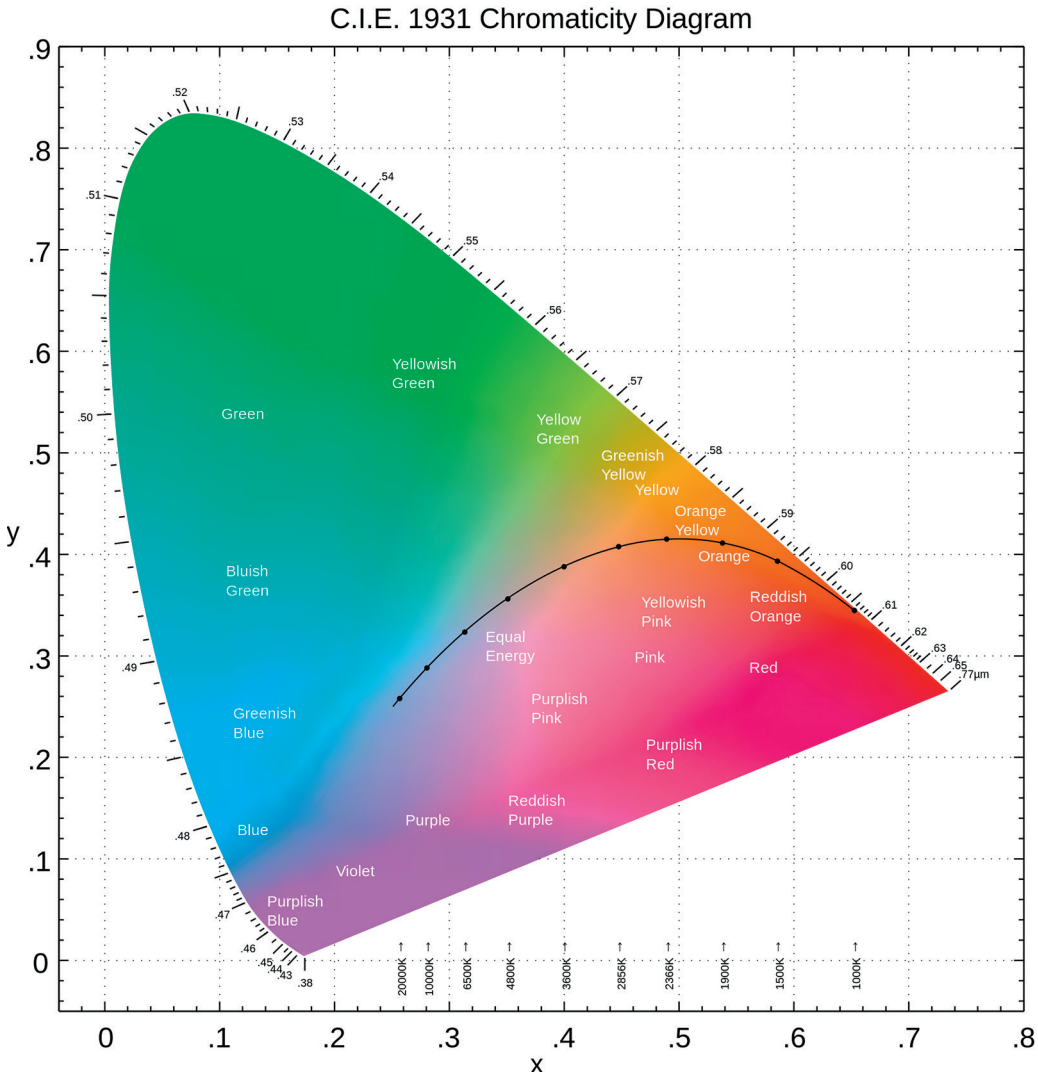

Abb. 3: CIE-Farbraum-Diagramm (URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/PlanckianLocus.png) aufgerufen am: 21.08.2019.

1.3.1 Leuchtdioden

Für Beleuchtungszwecke im Außenraum werden üblicherweise weiße oder amberfarbene Leuchtdioden (LED) verwendet. Für weiße LED wird meist eine schmalbandige blaue LED entweder mit nur einem gelben Leuchtstoff oder mit einer Kombination aus grünem und rotem Leuchtstoff kombiniert verwendet (Abb. 4). Die Lumineszenzschicht wandelt große Anteile des blauen oder ultravioletten Lichts in gelbliches Licht um. Seltener werden ultraviolette-LED mit mehreren Leuchtstoffen in weißes Licht umgewandelt. Dieses aus UV-LED

resultierende weiße Licht hat einen sehr hohen Farbwiedergabeindex. LED Lichtquellen werden je nach Art und Anteil der Leuchtstoffbeimischungen in den Farbtemperaturen „kaltweißes“ (über 5500 K), „neutralweißes“ (5500-3000 K), oder „warmweißes“ (unter 3000 K) eingeteilt (THEISS 2000). Phosphor konvertierte (engl. = phosphor converted) amber LED (pc amber LED) bestehen aus weiß leuchtenden LEDs, die von einer Phosphor-Kapseln umgeben sind. Die Phosphorhülle wandelt das weiße Licht in einen Bernstein-Farbton ähnlich einer Natriumdampf-Hochdrucklampe mit 1800-2300 K um.

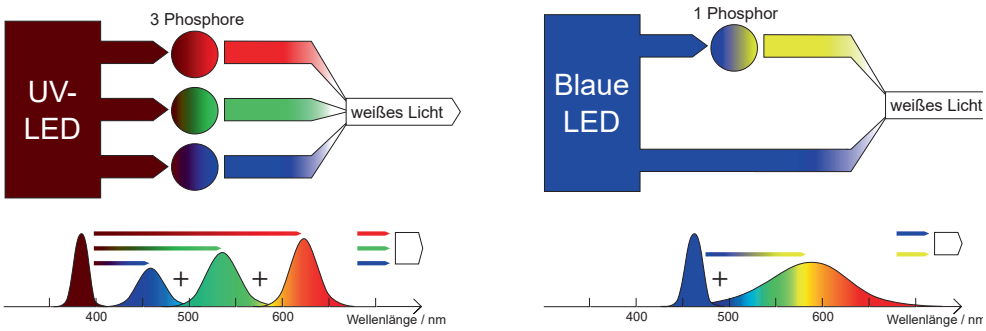

Abb. 4: Erzeugen von weißem Licht mit einer ultravioletten Leuchtdiode und Fluoreszenzfarbstoffen für blau, grün und rot (links). Erzeugen von weißem Licht mit einer blauen Leuchtdiode und einem breitbandigen Fluoreszenzfarbstoff (rechts) (Graphik: Degreen, hochgeladen von Cepheiden auf de.wikipedia (CC BY-SA 2.0 de)).

1.3.2 Metalldampflampen

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