Künstliches Licht bei Nacht

Physik, Biologie, Gesundheit, Maßnahmen und Recht – ein Fachbuch

Thomas Schüller · Syntagma Forschung · ORCID 0009-0003-9799-6747 · Fassung 1.0 ·
2026 · Alle Rechte vorbehalten

Vorwort

Dieses Buch beschreibt, was künstliches Licht bei Nacht physikalisch ist, wie es auf Tiere, Pflanzen, Ökosysteme und Menschen wirkt, wie man es misst und wie man es mit bekannten, wirtschaftlichen Mitteln vermindert. Ein eigenes Kapitel führt den Rechtsrahmen in Deutschland und Österreich aus.

Jede Aussage trägt eine Evidenzstufe (Kapitel 5), damit gesicherte Befunde von Plausibilitäten und offenen Fragen unterscheidbar bleiben. Zahlen sind Größenordnungen der genannten Studien und vor Zitation gegen die Originalquelle zu prüfen. Der Rechtsstand ist im Kapitel 8 mit Datum angegeben; der Wortlaut der österreichischen Landesgesetze ist im Rechtsinformationssystem des Bundes (RIS) gegenzulesen.

Abkürzungen

Kürzel	Bedeutung
ALAN	artificial light at night, künstliches Licht bei Nacht
CCT / K	korrelierte Farbtemperatur in Kelvin
LED	Leuchtdiode
NaHP	Natriumdampf-Hochdrucklampe
VIIRS-DNB	Satellitensensor mit Day/Night Band
SQM	Sky Quality Meter
ipRGC	intrinsisch photosensitive retinale Ganglienzelle (Melanopsin)
RIS	Rechtsinformationssystem des Bundes
ÖNORM O 1052	Österreichische Norm zu Lichtimmissionen

Glossar

Begriff	Erklärung
Skyglow	Aufhellung des Nachthimmels über besiedelten Gebieten durch Streuung von Kunstlicht in der Atmosphäre
Lichtimmission (Light Trespass)	unerwünschtes Eindringen von Licht in Räume oder Flächen, die nicht beleuchtet werden sollen
Blendung (Glare)	Störung des Sehens durch zu hohe Leuchtdichte im Gesichtsfeld
Lux	Einheit der Beleuchtungsstärke (Lichtstrom je Fläche)
Candela je Quadratmeter (cd/m²)	Einheit der Leuchtdichte
Korrelierte Farbtemperatur (CCT)	Maß für die Farbanmutung weißen Lichts in Kelvin; niedrige Werte wirken warm, hohe kalt und blaureicher
Full-cut-off	Leuchtenbauart ohne Lichtabstrahlung über die Waagrechte
Bortle-Skala	neunstufige Skala zur Beschreibung der Himmelsdunkelheit
Melanopsin	Sehpigment in bestimmten Netzhautzellen (ipRGC), das die innere Uhr mit Licht abstimmt
Melatonin	Hormon, das nachts ausgeschüttet wird; helles, blaureiches Licht kann seine Ausschüttung unterdrücken
Rebound-Effekt	Mehrverbrauch, der entsteht, wenn effizientere Technik die Nutzung ausweitet und so Einsparungen mindert
Evidenzstufe	Einordnung einer Aussage nach Belastbarkeit der Befundlage (Raster A bis D, Kapitel 5)

Inhalt

1. Physik des Lichts, der Lichtquellen und der Atmosphäre
2. Tiere, Pflanzen und Ökosysteme
3. Mensch, Gesundheit und Schlaf
4. Maßnahmen, Technik und Recht
5. Evidenz und Forschungslücken
6. Messung, Satelliten und Bürgerwissenschaft
7. Energie, Wirtschaft und Rebound
8. Recht in Österreich: Außenbeleuchtung

Literatur

Kapitel 1: Physik des Lichts, der Lichtquellen und der Atmosphäre

Dieses Kapitel legt die physikalische Grundlage: Begriffe, Messgrößen, die Funktionsweise der Lichtquellen und die Streuung in der Atmosphäre.

1. Begriffe

Lichtverschmutzung (englisch: light pollution, im ökologischen Zusammenhang: artificial light at night, ALAN) bezeichnet künstliches Licht, das zur falschen Zeit, am falschen Ort, in falscher Menge oder in falscher Zusammensetzung wirkt. Es lassen sich vier Erscheinungsformen unterscheiden:

Form	Beschreibung	Typische Wirkung
Himmelsaufhellung (Skyglow)	Licht wird in der Atmosphäre gestreut und erhellt den Nachthimmel großräumig	Sterne verschwinden, Orientierung von Zugvögeln und Insekten gestört
Lichtimmission (Lichteinfall, Light Trespass)	Licht fällt auf Flächen, für die es nicht vorgesehen war (Schlafzimmer, Gewässer, Hecken)	Schlafstörung, Störung von Lebensräumen
Blendung (Glare)	Direkte Sicht auf helle Leuchtmittel	Sehleistung sinkt, Gefährdung im Verkehr
Überbeleuchtung und Unordnung (Over-Illumination, Clutter)	Mehr Licht als für die Aufgabe nötig, viele konkurrierende Lichtquellen	Energieverlust, Kosten, visuelles Chaos

2. Messgrößen

- Beleuchtungsstärke in Lux (lx): auf eine Fläche fallender Lichtstrom je Quadratmeter. Vollmond etwa 0,1 bis 0,3 lx, Straßenbeleuchtung je nach Klasse etwa 5 bis 30 lx.
- Leuchtdichte in cd/m²: vom Beobachter wahrgenommene Helligkeit einer Fläche, maßgeblich für Himmelshelligkeit und Blendung.
- Himmelshelligkeit in mag/arcsec² (Größenklassen je Quadratbogensekunde): logarithmische Skala, höhere Zahl bedeutet dunkler. Ein natürlich dunkler Himmel liegt bei etwa 21,8 bis 22 mag/arcsec². Messgerät: Sky Quality Meter (SQM) oder Eigenbau mit Lichtsensor.
- Umrechnung: L (cd/m²) ≈ $1{,}08 \cdot 10^5 \cdot 10^{\wedge}(-0{,}4 \cdot m)$. Für m = 22 ergibt das rund $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ cd/m². Das Werkzeug `06_WERKZEUGE/licht_rechner.py` rechnet das aus.

- Bortle-Skala (neun Stufen) beschreibt den Himmel nach sichtbaren Objekten, von Stufe 1 (echter Dunkelhimmel) bis Stufe 9 (Innenstadthimmel). Sie ist eine grobe, beobachtungsbasierte Einteilung.
- Farbtemperatur (CCT, Kelvin) beschreibt die Lichtfarbe: 2700 K warmweiß, 4000 K neutralweiß, 5000 bis 6500 K kaltweiß mit hohem Blauanteil. Die CCT sagt nur indirekt etwas über den Blauanteil, das Spektrum selbst ist aussagekräftiger.

3. Lichtquellen und ihre Atomphysik

Jede Lampenart erzeugt Licht über einen anderen physikalischen Mechanismus. Das bestimmt ihr Spektrum und damit ihre ökologische und gesundheitliche Wirkung.

3.1 Glühlampe und Halogenlampe

Thermische Strahlung eines heißen Wolframdrahts. Das Spektrum ist kontinuierlich und entspricht näherungsweise einem Planck-Strahler mit etwa 2700 bis 3000 K. Blauanteil gering, Infrarotanteil hoch, Wirkungsgrad niedrig.

3.2 Gasentladungslampen (Atomlinien)

Elektronen stoßen in einem Gas oder Dampf auf Atome, regen sie an, und die Atome geben beim Zurückfallen Licht mit atomtypischen Wellenlängen ab. Es entsteht ein Linienspektrum, das bei höherem Druck verbreitert wird.

- Natriumdampf-Niederdrucklampe (LPS): nahezu einfarbig bei etwa 589,0 und 589,6 nm (die Natrium-D-Linien), gelb-orange. Der Blauanteil ist praktisch null.
- Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS): Linien durch den hohen Druck verbreitert, Spektrum goldgelb, vom Blauanteil her gering.
- Quecksilberdampflampe: Linien unter anderem bei 404,7 nm, 435,8 nm, 546,1 nm und 577/579 nm, daher bläulich-weißes Licht mit Violett- und Blauanteil. Wegen Quecksilbers und geringer Effizienz in der EU weitgehend vom Markt verdrängt.
- Halogenmetalldampflampe: Mischung aus Metallhalogeniden, vielen Linien, weißes Licht mit deutlichem Blauanteil.

3.3 Leuchtstofflampen

Eine Quecksilberentladung erzeugt Ultraviolett, ein Leuchtstoff wandelt es in sichtbares Licht um.

3.4 LED (Halbleiter)

Eine Leuchtdiode erzeugt Licht durch Rekombination von Elektronen und Löchern über die Bandlücke eines Halbleiters. Photonenenergie und Wellenlänge hängen über $E = h \cdot c / \lambda$ zusammen, also $E\,(\text{eV}) \approx 1240 / \lambda\,(\text{nm})$.

- Blaue InGaN-LED: Bandlücke etwa 2,7 eV entspricht etwa 450 bis 460 nm.

- Weiße LED (Standardbauart): blaue LED plus Leuchtstoff (häufig Ce:YAG), der einen Teil des Blaus in Gelb bis Rot umwandelt. Das Gesamtlicht hat daher einen ausgeprägten Blauspitzenwert im Bereich 440 bis 460 nm. Je kälter die Lichtfarbe, desto höher der Blauanteil.
- Phosphorkonvertierte Amber-LED (PC-Amber): blaue LED mit Leuchtstoff, der fast alles Blau konvertiert. Blauanteil sehr gering.
- Schmalbandige LED (z. B. reines Amber oder Grün): einzelne Farbe ohne Leuchtstoff.

3.5 Vergleichstabelle (qualitativ)

Lichtquelle	**Mechanismus**	**Blauanteil**	**Ökologische Bewertung (qualitativ)**
Glühlampe/Halogen	thermisch	gering	historisch, ineffizient
Natrium-Niederdruck	Atomlinien 589 nm	praktisch null	günstig im Spektrum, schlechte Farbwiedergabe
Natrium-Hochdruck	Atomlinien verbreitert	gering	mittel
Quecksilber	Atomlinien inkl. Blau/Violett	hoch	ungünstig
Halogenmetalldampf	Metalllinien	hoch	ungünstig
LED kaltweiß (≥ 5000 K)	Blaupumpe + Leuchtstoff	hoch	ungünstig
LED warmweiß (≤ 3000 K)	Blaupumpe + Leuchtstoff	mittel bis gering	deutlich besser
LED PC-Amber	Blaupumpe + fast voller Leuchtstoff	sehr gering	gut für empfindliche Lebensräume

Wichtig: Die Wirkung hängt nicht allein vom Blauanteil ab, sondern auch von Lichtmenge, Richtung, Dauer und Abschirmung. LED ermöglicht Dimmen und Lenken (Vorteil), senkt aber die Kosten pro Lichtmenge so stark, dass insgesamt mehr beleuchtet wird (siehe Abschnitt 6).

4. Atmosphäre: Streuung und Himmelsaufhellung

- Rayleigh-Streuung (an Luftmolekülen, klein gegen die Wellenlänge) ist proportional zu λ^{-4}. Blaues Licht bei 450 nm wird gegenüber rotem bei 650 nm um den Faktor $(650/450)^4 \approx 4{,}3$ stärker gestreut. Blaureiches Licht erhöht daher bei klarer Luft die Himmelsaufhellung in der Umgebung stärker.
- Mie-Streuung (an Aerosolen, Dunst, Tröpfchen) hängt schwächer von der Wellenlänge ab. In trüber, feuchter Luft und unter Wolken überwiegt sie.

- Wolken wirken als Verstärker: Über Städten mit bedeckter Himmelsdecke wird die Himmelshelligkeit gegenüber klarem Wetter deutlich erhöht (Kyba et al. 2011, Größenordnung bis etwa Faktor 10 in Stadtnähe). In einer natürlichen Nacht dagegen macht eine Wolkendecke den Himmel dunkler. Künstliches Licht kehrt diesen Effekt um.
- Reichweite: Der Lichtschein einer Stadt ist je nach Größe und Luftzustand über Dutzende, in klaren Nächten auch über mehr als hundert Kilometer wahrnehmbar.
- Die Aufhellung hängt außerdem vom Abstrahlwinkel ab. Nach oben gerichtetes Licht (Upward Light Ratio, ULR) und flach abgestrahltes Licht tragen überproportional zur Streuung bei. Abschirmung und Neigung der Leuchte sind deshalb wichtiger als die reine Wattzahl.

5. Globale Befunde

- Falchi et al. (2016): Mehr als 80 Prozent der Weltbevölkerung und über 99 Prozent der Bevölkerung der USA und Europas leben unter lichtverschmutztem Himmel. Mehr als ein Drittel der Menschheit und etwa 60 Prozent der Europäerinnen und Europäer können die Milchstraße nicht mehr sehen.
- Kyba et al. (2017): Die künstlich beleuchtete Fläche der Erde wuchs zwischen 2012 und 2016 um etwa 2,2 Prozent pro Jahr, die Strahlungsleistung um etwa 1,8 Prozent pro Jahr (Satellitendaten).
- Kyba et al. (2023): Auswertung von Bürgerbeobachtungen (Globe at Night) zeigt eine Zunahme der Himmelshelligkeit um etwa 9,6 Prozent pro Jahr zwischen 2011 und 2022. Die Satellitendaten unterschätzen den Trend, unter anderem weil sie weder blaues Licht gut erfassen noch seitlich abgestrahltes Licht.
- Sánchez de Miguel et al. (2022): Für 26 Länder Europas zeigen Auswertungen von Astronautenfotos eine spektrale Verschiebung zu mehr Blau (Grünkanal +11,1 %, Blaukanal +24,4 %) und steigende Indizes für Melatoninunterdrückung und Skyglow. Eine Aussage zu einem „Anteil Europas“ wird daraus nicht abgeleitet.
- Rebound-Effekt: Der Umstieg auf LED sparte in vielen Anlagen Energie je Leuchte, die insgesamt beleuchtete Fläche und Lichtmenge nahm aber zu. Einsparungen werden dadurch teilweise oder ganz aufgezehrt.

Kapitel 2: Tiere, Pflanzen und Ökosysteme

Auf der Grundlage von Kapitel 1 folgt, wie Licht bei Nacht auf Insekten, Vögel, Säugetiere, Gewässer und Pflanzen wirkt.

1. Grundgedanke

Fast alle Lebewesen haben ihre Aktivität, Fortpflanzung, Wanderung und Wahrnehmung über Jahrmillionen an den Wechsel von Tag, Nacht, Mondphase und Jahreszeit angepasst. Künstliches Licht verändert diese Signale. Gaston et al. (2013)

ordnen die Wirkungen nach Mechanismen: Licht dient Lebewesen zur Orientierung, zur Zeitmessung (Tageslänge, innere Uhr), zur Nahrungssuche und zur Feindvermeidung. Jedes dieser Systeme kann gestört werden. Etwa 30 Prozent der Wirbeltiere und über 60 Prozent der wirbellosen Tiere gelten als nachtaktiv (Hölker, Wolter, Perkin und Tockner 2010, Trends in Ecology & Evolution, [68]), ein erheblicher Teil der Lebewesen ist also betroffen.

2. Insekten

- Anlockung und Erschöpfung: Viele nachtaktive Insekten fliegen Lampen an, kreisen um sie und werden Beute von Fressfeinden oder sterben an Erschöpfung (Eisenbeis 2006). Anlockung ist bei kurzwelligem Licht (UV, Violett, Blau) deutlich stärker als bei gelbem oder orangem Licht (van Langevelde et al. 2011).
- Bestandsentwicklung: Lichtverschmutzung gilt als einer von mehreren Treibern des Insektenrückgangs, neben Landnutzung, Pestiziden und Klimawandel (Owens et al. 2020). Hallmann et al. (2017) fanden in deutschen Schutzgebieten einen Rückgang der Fluginsektenbiomasse um mehr als 75 Prozent in 27 Jahren, die Ursachen im Einzelnen sind aber nicht allein dem Licht zuzuordnen.
- Experimente: Boyes et al. (2021) fanden an Hecken in Südengland, dass Straßenbeleuchtung die Raupen von Nachtfaltern verringert (Hecken mit LED −52 %, mit Natriumdampf-Hochdrucklampen −41 %). Die Aussage gilt für Nachtfalterraupen an Hecken, nicht für Insekten allgemein. Ein Übersichtsartikel derselben Gruppe (Boyes et al. 2021, Insect Conservation and Diversity) sieht für Nachtfalter auf Populationsebene bisher nur begrenzte Belege, dass Lichtverschmutzung Bestandsrückgänge treibt [89].
- Bestäubung: Knop et al. (2017) zeigten, dass Licht nachts die Besuche von Bestäubern an Pflanzen stark verringert (nächtliche Blütenbesuche um 62 Prozent, Fruchtansatz bei der untersuchten Kohldistel um 13 Prozent) und den Fruchtansatz mindert.
- Gemeinschaften: Straßenbeleuchtung verändert die Zusammensetzung der Wirbellosen-Gemeinschaften (Davies et al. 2012).
- Glühwürmchen: Leuchtkäfer kommunizieren über eigenes Licht. Fremdes Licht stört die Partnerfindung (Hinweise aus mehreren Studien, hier ohne eigene Detailangabe geführt).

3. Vögel

- Zug: Nachtziehende Vögel orientieren sich unter anderem am Magnetfeld und an Sternen. Helle Lichtquellen und Lichtglocken ziehen sie an, sie umkreisen sie und verlieren Energie oder kollidieren. Das Experiment „Tribute in Light" in New York zeigte, dass starke Scheinwerfer Tausende ziehende Vögel binnen Stunden anlocken (Van Doren et al. 2017). Rotes und weißes Licht desorientiert stärker als blaues und grünes (Poot et al. 2008, Beobachtung an Offshore-Plattformen).

- Gesang und Brut: In beleuchteten Gebieten beginnen manche Singvögel früher mit dem Morgengesang (Kempenaers et al. 2010; Da Silva et al. 2015) und legen früher Eier. Dominoni et al. (2013) zeigten bei Amseln eine Vorverlegung der Fortpflanzungsphysiologie durch Nachtlicht.
- Seevögel: Jungvögel von Sturmvögeln und Sturmtauchern werden beim ersten Ausflug von Küstenlicht angezogen und stranden („Fallouts"). Rodríguez et al. (2017) fassen Daten zu zehntausenden betroffenen Vögeln zusammen.

4. Fledermäuse und andere Säugetiere

- Schnell fliegende Arten (zum Beispiel Zwergfledermaus, Abendsegler) jagen vielfach an Lampen, wo sich Insekten sammeln, und profitieren kurzfristig (Rydell 1992).
- Langsam fliegende und lichtempfindliche Arten (zum Beispiel Hufeisennasen, Mausohren, Langohren) meiden beleuchtete Flächen. Lichtbänder zerschneiden Flugrouten, Quartiere werden aufgegeben (Stone et al. 2009).
- Zusätzlich verlieren lichtempfindliche Arten Jagdgebiete an die Konkurrenz der anpassungsfähigen Arten. Die EUROBATS-Leitlinien (Voigt et al. 2018) empfehlen für Fledermausschutz geringe Beleuchtung, Abschirmung und warme oder bernsteinfarbene Spektren.
- Nagetiere und andere Kleinsäuger verändern bei Licht ihr Meideverhalten gegenüber Fressfeinden (Hinweise aus Feld- und Laborstudien).

5. Reptilien, Amphibien, Fische

- Meeresschildkröten: Schlüpflinge orientieren sich am helleren Horizont über dem Meer. Strandbeleuchtung führt sie landeinwärts, viele sterben (Witherington & Martin 2000; Salmon 2003). Langwelliges Licht (Bernstein bis Rot) stört weniger.
- Amphibien: Licht beeinflusst Ruf- und Wanderverhalten, mehrere Studien zeigen Verhaltensänderungen. Die Datenlage nach Art und Wirkung ist uneinheitlich.
- Fische: Wanderfische wie Lachs-Jungtiere zeigen Verzögerungen und Verhaltensänderungen an beleuchteten Gewässerabschnitten. Auch hier ist die Studienlage nach Art verschieden.

6. Gewässer und Plankton

Zooplankton wie Wasserflöhe (Daphnia) steigt nachts in obere Wasserschichten, um Algen zu fressen, und sinkt tagsüber ab, um Sichtjägern zu entgehen. Stadtlicht kann diese Vertikalwanderung dämpfen (Moore et al. 2000). Weniger Fraß an Algen kann Algenblüten begünstigen. Dieser Zusammenhang ist plausibel, im Freiland aber nur teilweise belegt. Für Fließgewässer und Uferzonen fassen Perkin et al. (2011) offene Fragen zusammen.