

Künstliches Licht bei Nacht: Stand der Wissenschaft 2022

International Dark-Sky Association

DOI: 10.5281/zenodo.6967711

Diese Übersicht fasst den aktuellen Stand des Wissens zusammen, wie der weitverbreitete und zunehmende Gebrauch von künstlichem Licht in der Nacht sechs wichtige Bereiche beeinflusst: den Nachthimmel (Kapitel 1), Wildtiere und Ökologie (Kapitel 2), die menschliche Gesundheit (Kapitel 3), öffentliche Sicherheit (Kapitel 4), Sicherheit der Energieversorgung und Klimawandel (Kapitel 5) und soziale Gerechtigkeit (Kapitel 6). Sie diskutiert ausserdem die zusätzliche Lichtverschmutzung durch Objekte auf einer Erdumlaufbahn (Kapitel 7). Zuletzt diskutiert sie Wissenslücken innerhalb dieser Bereiche und schlägt wissenschaftliche Fragen vor, um diese zu schliessen (Kapitel 8). Sie möchte allen nützlich sein, die ihr Verständnis der Forschung über die Ursachen und Folgen von künstlichem Licht in der Nacht erweitern wollen.

Einführung

Die Lichtverschmutzung nimmt durch ihre Präsenz und Reichweite auf unserem Planeten stark zu (1, 2). Sie ist eine Quelle von bekannten und vermuteten Schäden an der nächtlichen Umwelt (3). Wissenschaftliche Studien vermuten als Hauptquelle der Lichtverschmutzung (4, 5) die Übernutzung von künstlichem Licht in der Nacht (wiss. engl. artificial light at night, ALAN). Sie identifizierten als grösste Herausforderung, wie man den Nutzen von ALAN für die Menschen maximiert und gleichzeitig die möglichen negativen Auswirkungen auf die Gesellschaft und die Umwelt begrenzt (6–8).

1 Der Nachthimmel

Es wird schwierig die Sterne zu sehen, wenn Licht in den Nachthimmel strahlt. Am Boden erhellt ALAN die nächtliche Umwelt. Das Wetter kann diese Wirkung durch Wolken oder Schneelagen verstärken. Neue und kostengünstige Lichtquellen wie Licht Emittierende Dioden (LED) haben einen wachsenden Einfluss, sowohl auf den Nachthimmel, als auch auf die Aussenräume bei Nacht.

Das unmittelbarste Symptom der Lichtverschmutzung ist das Phänomen der Lichtglocke («skyglow»). Es hellt den Nachthimmel in und um Städte auf, wo viel Aussenbeleuchtung installiert ist. Die unteren Schichten der Erdatmosphäre streuen das in Bodennähe abgestrahlte Licht. Ein Teil dieses Lichts entweicht aus der Atmosphäre, wo es von erdumlaufenden Satelliten erfasst wird, aber viele Lichtstrahlen

treffen Luftmoleküle und Staub in der Atmosphäre. Diese Wechselwirkungen lenken die Pfade einiger Lichtstrahlen zurück an den Boden. Dortige Beobachter sehen Licht, das scheinbar vom Nachthimmel selbst kommt, siehe Abbildung 1. Die Himmelsaufhellung konkurriert mit dem schwachen Licht astronomischer Objekte am Nachthimmel. Sie verringert den Kontrast zwischen diesen Objekten und dem Himmelshintergrund und erschwert deren Beobachtung.

Die langsame, aber stetige Zunahme der Himmelsaufhellung in weiten Teilen der Welt führt zu einer allmählich verminderten Sichtbarkeit des natürlichen Nachthimmels und einem Wandel hin zu beleuchteten Aussenräumen. Eine solche Veränderung, die über Jahrzehnte hinweg langsam passiert, bleibt aufgrund eines psychologischen Effekts, der als «shifting baseline» (9) bekannt ist, unbemerkt. Das gilt für verschiedene Aspekte von künstlichem Licht in einer «gewöhnlichen» Nacht: die Anzahl der sichtbaren Sterne, die Menge des künstlichen Lichts, die ein Sicherheitsempfinden vermittelt, und die Erfahrung, nachts nicht-visuelle Sinne wie Gehör und Gleichgewicht zu benutzen. Neben anderen Auswirkungen wird der Verlust des Nachthimmels kaum wahrgenommen.

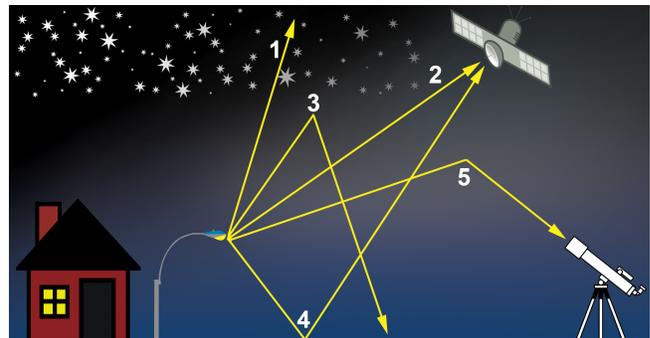


Abbildung 1. Die Strassenlampe links strahlt Licht in viele verschiedene Richtungen. Einige Lichtstrahlen (1) zeigen himmelwärts und durchdringen die Erdatmosphäre vollständig. Satelliten erfassen einige dieser Strahlen (2) wenn sie die Nachtseite unseres Planeten überfliegen. In anderen Fällen (3) streut die Atmosphäre das Licht zurück zum Boden. Dieses Licht erzeugt die bekannten Lichtglocken über Städten («skyglow»). Einige abwärts gerichtete Lichtstrahlen (4) reflektieren am Boden in den Himmel, wo sie von Satelliten gesehen werden. Zuletzt streuen einige Lichtstrahlen in astronomische Teleskope (5), wo sie den Blick aufs Universum blockieren. Quelle: IDA.

Fernerkundung der Lichtverschmutzung

«Fernerkundung» ist eine Methode, um Eigenschaften aus

der Distanz zu ermitteln, ohne direkt zu messen. Sie wird oft durch umlaufende Satelliten zur Beobachtung unseres Planeten verwendet. Wenn diese Satelliten auf das Licht der Nachtseite der Erde blicken, vermitteln sie einen Eindruck über das globale Ausmass der Lichtverschmutzung (1, 10, 11).

Abbildung 2 zeigt eine Weltkarte des Nachtlights aus Beobachtungen der Fernerkundung (12). Das ist ein zusammengesetztes Bild aus Beobachtungen der Erde über viele Nächte eines Jahres. Es zeigt das Aussehen unseres Planeten, wie wenn es überall gleichzeitig Nacht wäre. Es stellt auch sicher, dass das Resultat keine Wolken oder Polarlichter enthält.

Die Kamera, die diese Karten erzeugt, benützt einen empfindlichen Sensor für schwaches Licht im sichtbaren Bereich. Er kann Merkmale auf der Erde auflösen, die kleiner als einen Kilometer ausgedehnt sind. Das ist kleiner als die Ausdehnung der meisten Städte, daher können die Bilder detaillierte Informationen über die Anzahl und die Merkmale verschiedener Lichtquellen am Boden geben. Abbildungen wie diese sind seit den frühen 1970er Jahren für die Öffentlichkeit und wissenschaftliche Forschung zugänglich.

Forscher haben in den letzten Jahren durch das Studium der Daten aus der Fernerkundung viel über die Ausbreitung der Lichtverschmutzung über den Globus gelernt. Sie fanden, dass die Himmelsaufhellung den Nachthimmel für mehr als 80% der Menschheit und mehr als 99% der U.S. und Europäischen Bevölkerung verschmutzt (10).

Sowohl das sichtbare Kunstlicht auf der Erde bei Nacht, als auch die durch das Licht überstrichene Landfläche wächst im Durchschnitt etwa zwei Prozent pro Jahr (Abbildung 3) (1). Allerdings variieren beide Zahlen über unseren Planeten verteilt (13). Es gibt nur wenige Länder, wo sie entweder zu stagnieren oder abzunehmen scheinen (1, 14).

Satelliten-Fernerkundung für Studien wie diese sind nicht perfekt. Zum Beispiel sind die besten verfügbaren Satellitenkameras für einige Lichtfarben weniger empfindlich. Im Speziellen sehen sie das blaue Licht der weissen LED nicht. Das bedeutet, dass die Hauptindikatoren für Lichtverschmutzung wahrscheinlich unterschätzt werden. Wenn man die Satellitendaten mit erdgebundenen Beobachtungen kombiniert, kann das die Verlässlichkeit der Resultate verbessern (15), aber der Bedarf für neue, spezifische Fernerkundung aus dem Orbit ist dringend, um wichtige Forschungsfragen zu klären (16, 17). Das gilt insbesondere angesichts dem geplanten Ende einiger erdbeobachtenden Satellitenmissionen, wie z. B. für die Terra-Mission der NASA in den kommenden Jahren.

Umweltbedingungen verändern die Qualität des Nachthimmels

Bei bewölktem Himmel ist die Himmelsaufhellung über Städten und Agglomerationen in der Regel intensiver, da bewölkte Nächte die Intensität des auf den Boden reflek-

tierten Lichts bis zu zehnfach verstärken können (18, 19). In ländlichen Gebieten mit wenig Lichtquellen macht die Wolkendecke den Nachthimmel tendenziell *dunkler* (20). Dies, weil Wolken Licht aus natürlichen und künstlichen Quellen absorbieren und streuen und so den Anteil verringern, der den Boden erreicht. Die Himmelsaufhellung reagiert auch empfindlich auf kleine Partikel (Staub) in der Luft (21), und sie kann durch Luftverschmutzung erhöht werden (22).

Eis und Schnee verstärken die Himmelsaufhellung, weil sie viel mehr Licht reflektieren als dunklere Böden. Das erhöht die scheinbaren nächtlichen Kunstlicht-Emissionen von Städten (23). Schneedecken können die Nachthimmelshelligkeit unter klarem Himmel bis zum Dreifachen erhöhen (24). Wenn Wolken die Himmel in den Wintermonaten bedecken, verstärken das reflektierte Licht vom Schnee *und* den Wolken die Himmelsaufhellung. Als Resultat kann die Himmelshelligkeit bis zu 3500 Mal stärker werden als bei bewölktem Himmel ohne Kunstlicht (25). Sogar bei klarem Wetter kann die Bodenbedeckung aus Asphalt und Beton die Himmelshelligkeit erhöhen, weil sie meistens mehr Licht reflektiert (26, 27).

Die Zunahme der Festkörper-Beleuchtung könnte dunkle Himmel verdrängen

Die globale Lichtverschmutzung hat in den letzten Jahren teils wegen der Einführung der Festkörper-Beleuchtung (SSL) zugenommen. Diese Art der Beleuchtung benötigt Halbleitermaterial, um Licht zu erzeugen. Sie unterscheidet sich von früheren Technologien, die elektrische Ströme durch mit Natriumdampf gefüllte Gasampullen leiteten. Diese früheren Methoden beherrschten einst den weltweiten Markt für Aussenbeleuchtung.

Die bekannteste Festkörper-Technologie ist die weisse LED. Diese Technologie steht nun für beinahe 50% des globalen Lichthandels (28). Das explosive Wachstum des Lichtmarkts in den letzten Jahren ist teils auf die aussergewöhnliche Energieeffizienz der SSL zurückzuführen, die bis zu zehn Mal besser ist als frühere Lichttechnologien wie Glühfadenlampen. Während der Eins-zu-Eins-Ersatz mit SSL im Vergleich zu früheren Technologien Energie einspart (mit vorteilhaften Auswirkungen, siehe Kapitel 5), können die Energieeffizienz und tiefe Kosten der SSL zur Überbeleuchtung verleiten (mit negativen Auswirkungen, siehe Kapitel 2, 3 und 5). Um die volle Wertschöpfung der SSL zu erreichen, sollten auch Aspekte wie das Spektrum und die Lichtverteilung sorgfältig geplant werden.

Der schnelle Ansturm auf die Einführung und Installation von SSL hat die Farbe verändert, die das Kunstlicht in die nächtliche Umwelt strahlt (29, 30). Weisse LED emittieren im allgemeinen viel mehr kurzwelliges (d. h. blaues) Licht als andere Technologien. Das verursacht eine Farbverschiebung in den Städten, wenn sie auf SSL umstellen (31). Es kann die Himmelsaufhellung über Städten schlimmer machen, selbst wenn die Anzahl Lumen – das heisst, der

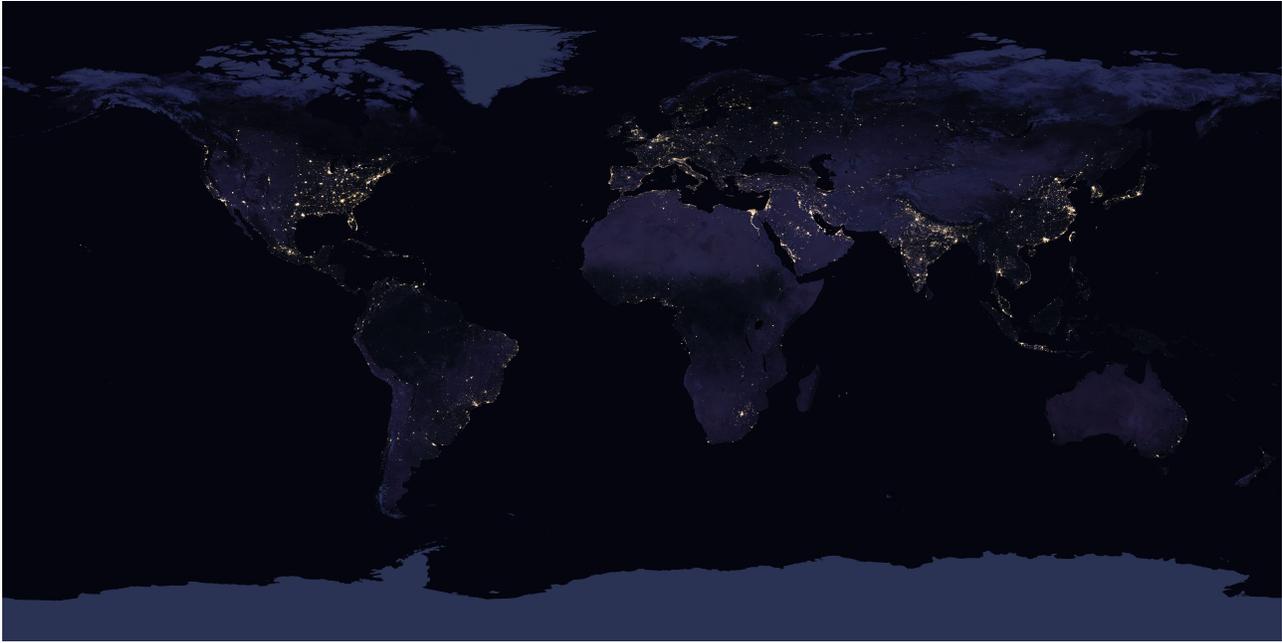


Abbildung 2. Ein wolkenfreies Mosaik der Erde bei Nacht aus Daten des Jahres 2016, aufgenommen von erdumlaufenden Satelliten. Quelle: NASA Earth Observatory/Goddard Space Flight Center/J. Stevens/M. Román.

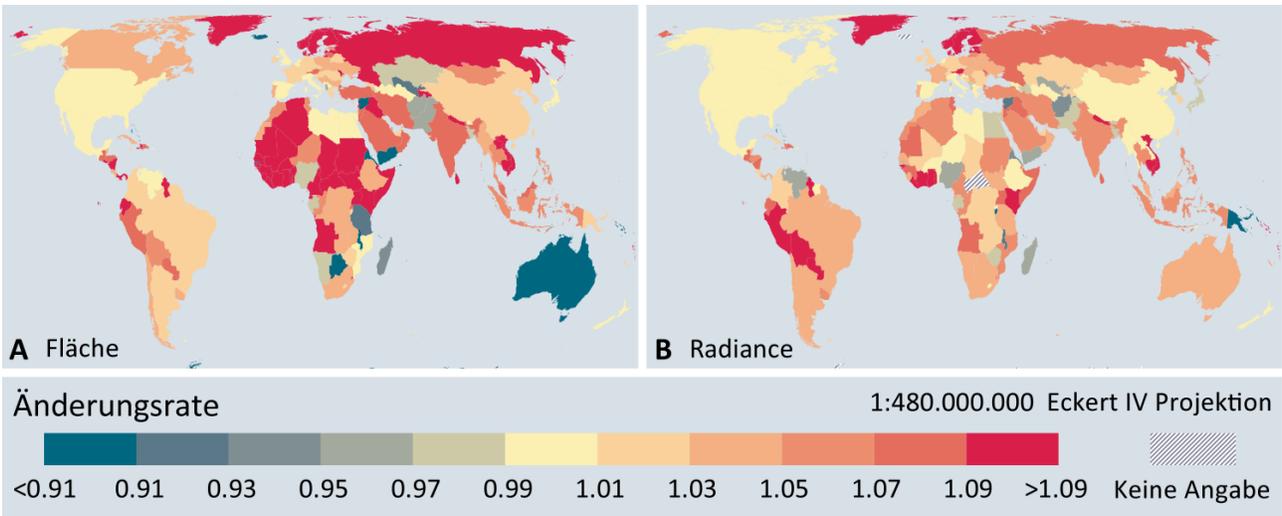


Abbildung 3. Diese Abbildung aus Referenz (1) zeigt die Veränderung des Nachtlichts auf der Erde von 2012-2016. Die Karte links zeigt den Wechsel in der Ausbreitung des Kunstlichts auf der Landfläche wie vom Weltall aus gesehen und die Karte rechts zeigt, wie sich die Helligkeit veränderte. Rote Farben bedeuten Zunahme der beleuchteten Fläche/oder Helligkeit während der Studiendauer und Blaue Farben bedeuten Abnahme. Gelbe Flächen haben sich nicht verändert.

Anteil des Lichts, auf den das menschliche Auge empfindlich ist – gleich bleiben (32–34). Dadurch können die Auswirkungen der Stadtbeleuchtung viel weiter in angrenzende, ökologisch sensible Gebiete hineinreichen (35, 36). Es bedroht im Speziellen die Produktivität erdgebundener astronomischer Sternwarten (37), die auf Standorte mit dunklem Himmel angewiesen sind, um neue Erkenntnisse über unser Universum zu gewinnen. Die Eigenschaften der LED-Beleuchtung erlauben jedoch einen effizienteren Einsatz, da für dieselben Anwendungen oft weniger Licht benötigt wird,

als bei früheren Technologien (38). Wenn Städte LED-Umrüstungen sorgfältig planen, können sie die Lichtverschmutzung konstant halten oder sogar reduzieren (39–41).

Schutz des dunklen Himmels und Astrotourismus

In der Zwischenzeit kann die fortschreitende Umstellung der weltweiten Aussenbeleuchtung auf SSL und ihr Potential, die Himmelsaufhellung zu verstärken, dem Schutz dunkler Landschaften entgegenwirken. Das öffentliche Interesse wächst, natürlich dunkle Orte zu besuchen (42). Das führt zu einer neuen Art von «Astrotourismus» (43, 44) mit

erheblichem Umsatzpotenzial (45). Dies kann wiederum Beleuchtungskonzepte und öffentliche Massnahmen zum Schutz des Nachthimmels fördern, wirft jedoch die Frage auf, was einen «Dark Sky» (46) definiert und wie er quantifiziert werden sollte (47, 48). Ausserdem muss man verstehen, wie man Nachtdunkelheit messen oder beschreiben kann, um sie bestmöglich zu erhalten (49, 50). Einige Hinweise deuten darauf hin, dass die Anerkennung des Werts der Nachtdunkelheit und die Förderung ihres Erhalts sich regional positiv auf die Reduzierung der Himmelselligkeit auswirken (51).

2 Ökologische Auswirkungen

Die ALAN-Exposition wirkt sich auf nahezu alle Arten aus, die wissenschaftlich untersucht wurden. Sie greift in ihre Biologie ein und verändert ihre Interaktion mit der Umwelt. Dies schadet den Ökosystemen und kann die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen und Tieren gegenüber Umweltveränderungen beeinträchtigen.

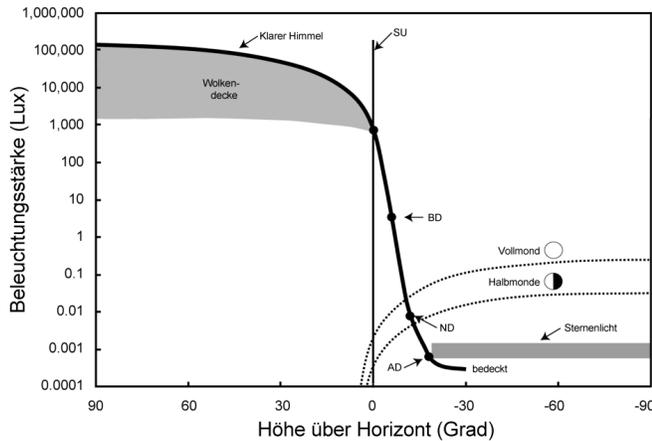


Abbildung 4. Natürliche Beleuchtung am Tag und bei Nacht. Die dicke schwarze Linie entspricht dem Licht, das am Boden auftritt. Gewisse Zeiten sind angegeben: SU = Sonnenuntergang (wenn der Sonnenwinkel über Horizont 0°) erreicht, BD = Bürgerliche Dämmerung endet (Sonnenwinkel = -6°), ND = Nautische Dämmerung endet (Sonnenwinkel = -12°), AD = astronomische Dämmerung endet (Sonnenwinkel = -18°). Beachten Sie die Abstufungen auf der senkrechten Achse in Zehnerpotenzen. Die waagrechte Achse zeigt den Winkel von Sonne und Mond über oder unter dem Horizont. Gestrichelte Linien zeigen die Beleuchtungsstärke für Vollmond- und Halbmondphasen. Wolkendecken mindern die Bodenelligkeit um den Betrag der schattierten Fläche oben links. Die schattierte Fläche unten rechts ist der Beitrag vom Sternenlicht bei klarem Himmel. Übersetzt und adaptiert von (52); Abbildung zur Verfügung gestellt von T. Longcore.

Lebewesen auf oder nahe der Erdoberfläche erleben natürliche Lichtstärken, die sich um Faktoren von über einer Milliarde ändern (Abbildung 4). Der Auf- und Untergang von Sonne und Mond bestimmen die Lichtstärke und den Zeitpunkt und die Dauer der Belichtung. Sie sind die wichtigsten Quellen von Licht in der natürlichen Umgebung, und sie schaffen Orientierungspunkte, auf die die Arten in ihrer Umgebung achten. So erfahren sie, wann sie bestimmte Verhaltensweisen wie die Nahrungssuche und die Partnersuche ausüben müssen.

Einige Arten sind für die Orientierung und die Navigation auf sehr schwache natürliche Lichtquellen wie dem Sternenlicht angewiesen (53–57). Künstliches Licht kann die Aktivitäten dieser Arten stören. Ihr Verhalten hat sich im Laufe von Milliarden von Jahren in Gegenwart ausschliesslich natürlicher Lichtquellen in der Nacht entwickelt.

Das Ausmass der Auswirkungen auf die Tierwelt

Wissenschaftler haben mindestens 160 Arten auf Auswirkungen der Lichtexposition untersucht. Sie haben Schäden auf allen Ebenen beobachtet, von einzelnen Pflanzen und Tieren bis hin zu ganzen Beständen (58, 59). Nahezu alle Lebewesen reagieren auf Licht. Häufig wirken sich diese Reaktionen sowohl auf einzelne Organismen, als auch auf ganze Bestände negativ aus. Beobachtete Auswirkungen wurden festgestellt bei Vögeln (60–62), Fischen (63–65), Säugetieren (66–68), Reptilien (69–71), Amphibien (72–74), Insekten und anderen Wirbellosen (75–78) und Pflanzen (79–82). Auswirkungen sind insbesondere in der aquatischen Umwelt zu beobachten (83) inklusive der Weltmeere (84, 85) bis in Tiefen von Hunderten von Metern (86).

Die Exposition durch ALAN stört die natürliche Lichtintensität, das Timing und die Farbeigenschaften des Lichts (87). Sie erhöht die Gesamtlichtstärke im Vergleich zum natürlichen Niveau und verschiebt das Spektrum des Umgebungslichts weg vom natürlichen Zustand hin zu kürzeren Wellenlängen, auf die viele nachtaktive Arten besonders empfindlich reagieren (88, 89). Lichtexposition zur falschen Zeit unterbricht verschiedene biologische Aktivitäten bei Pflanzen und Tieren (90). Diese Aktivitäten hängen von den täglichen und saisonalen Rhythmen der Lichtexposition in der Umwelt ab. Beispiele beinhalten die Nahrungssuche (91–93), den Zeitpunkt zu dem bestimmte Tiere erstmals aus ihren Verstecken auftauchen (94, 95), die Fortpflanzung von Pflanzen und Tieren (66, 96–98) und Tierwanderungen (99) und -kommunikation (100, 101). All diese Auswirkungen können das Überleben und die Fortpflanzung von Organismen erschweren – sie können sogar die Entwicklung der Arten beeinflussen (102, 103). Dies kommt zu anderen Umweltbelastungen, wie dem Verlust von Lebensräumen und dem Klimawandel hinzu, denen viele Arten ausgesetzt sind (104–106).

Künstliche Lichtexposition scheint das Immunsystem einiger Organismen zu schwächen (107–109). Eltern können diese Schwäche an ihren Nachwuchs weitergeben (110, 111). Die nächtliche Lichtexposition kann daher einige Arten anfälliger für Fressfeinde und Parasiten machen (112, 113). Die Forscher stellen ausserdem fest, dass die Lichtexposition häufig mit dem durch menschliche Aktivitäten verursachten Lärm einhergeht (114). Die Kombination aus künstlichem Licht und Lärm kann einige Arten zusätzlich schädigen (115, 116).

Wie Licht die Biologie beeinflusst

Licht hat zwei Arten von Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere: interne (durch die Physiologie) und externe (durch Interaktionen mit der Umwelt und mit anderen Arten). Zu den physiologischen Auswirkungen der ALAN-Exposition gehört die Störung der normalen chemischen Signalübertragung in Organismen (117, 118). Diese Signalgebung hängt mit dem zirkadianen Rhythmus zusammen, einem etwa 24-stündigen Aktivitätszyklus, der an die Tageslänge gebunden ist. Die Exposition gegenüber Sonnenlicht, gefolgt von vielen Stunden der Dunkelheit, schafft einen Reiz durch die Umgebung. Dieser hilft, den zirkadianen Rhythmus zu «tackten», wenn die Dauer des Rhythmus von der Tageslänge abweicht. Künstliche Lichtexposition zu Zeiten, die mit diesen natürlichen Reizen überlappen, ist ein Umwelteinfluss, der die Taktung beeinträchtigen kann.

Darüber hinaus reagieren einige Arten empfindlich auf die *Polarisation* des Lichts (119, 120). Die Polarisation bezieht sich auf die Ebene, in der sich die Lichtwellen bewegen. Licht kann durch Reflexion an Oberflächen wie Wasser polarisiert werden, was für aquatische Arten in der Nähe von ALAN-Quellen eine besondere Herausforderung darstellt (121, 122). Das Beispiel der Polarisierungseffekte zeigt, dass wir bei der Bewertung der Auswirkungen von ALAN auf Wildtiere neben der Intensität, dem Spektrum, der Dauer und dem Zeitpunkt der Lichtexposition noch weitere Faktoren berücksichtigen müssen (123).

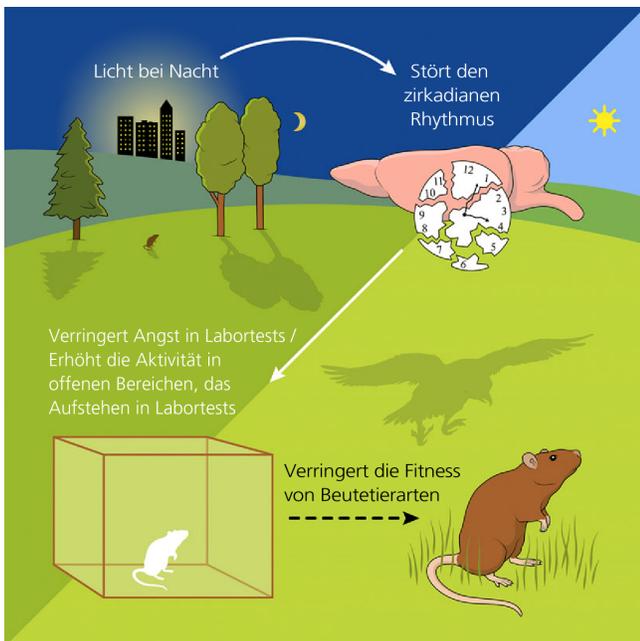


Abbildung 5. Eine Bildgeschichte zeigt wie Beutetiere in der Natur durch ALAN-Exposition anfälliger für Raubtiere werden können. In Labortests mit Nagetieren stört ALAN die Signalprozesse, die in der Zirbeldrüse des Gehirns beginnen. Diese Störung vermindert offenbar Angstreaktionen vor Aktivitäten in offenen Bereichen und vor Verhaltensweisen, wie dem Aufrichten auf die Hinterbeine, die ihre Sichtbarkeit für Raubtiere erhöhen könnte. Übersetzte Abbildung 1 aus Russart und Nelson 2018 (124).

Die nächtliche Veränderung des Aussenraums mit künstlichem Licht hat Auswirkungen auf die Umwelt durch die Exposition von Arten. In der nächtlichen Umgebung gibt es ausser dem Mond und den Sternen nur wenige natürliche Lichtquellen. Dieses Licht beherrschte nachts die Landschaft während Milliarden von Jahren, bis zur Erfindung des elektrischen Lichts. ALAN kann daher ein Nachteil für Arten sein, die sich in einer Welt ohne Kunstlicht entwickelt haben.

Die tiefgreifenden Veränderungen, die ALAN mit sich bringt, haben zahlreiche Auswirkungen auf die Ökosysteme (Abbildung 6). So kann die ALAN-Exposition beispielsweise die Interaktion zwischen Raubtierarten und ihrer Beute verändern (126–128). Das schwächt die Nahrungsnetze (129, 130) und kann Wildtiere anfällig für andere Umweltschäden machen (131–133). ALAN schadet der Umwelt auch dadurch, dass es die Möglichkeiten zur Nahrungssuche einschränkt (91, 92, 134), die Art und Weise beeinflusst, wie Arten Partner finden und sich fortpflanzen (135–138) und die Fähigkeit der Organismen beeinträchtigt, sich zu orientieren und fortzubewegen (56, 62, 139–141). ALAN verändert auch den Wettbewerb um Ressourcen zwischen den Arten, indem es Arten je nach ihrer Belichtungstoleranz entweder in ihre Lebensräume aufnimmt oder aus ihnen ausschliesst (142–144).

ALAN kann in der Umwelt eine wirksame Barriere für die Bewegungsfreiheit von Organismen schaffen. Sie meiden manchmal beleuchtete Bereiche und bevorzugen dunklere, und ALAN kann grosse Hindernisse verschleiern, die Vögel verletzen oder töten können (145, 146). Es kann auch *Phototaxis* auslösen, ein Zustand, in dem Organismen dazu neigen, sich entweder in Richtung Licht zu bewegen (positive Phototaxis, z. B. 133, 147, 148) oder weg vom Licht (negative Phototaxis, z. B. 149, 150). Phototaxis ist sowohl bei Vögeln als auch bei Insekten eine Ursache für Verletzungen und Todesfälle (151–153).

ALAN ist eine der dringendsten und unmittelbarsten Bedrohungen für die weltweite Artenvielfalt (154, 155). Studien deuten auf eindeutige Auswirkungen auf Wildtierbestände durch künstliches Licht hin, selbst bei indirekter Belichtung (156). Insbesondere bestimmte Arten der Aussenbeleuchtung beeinträchtigen die Biologie der Wildtiere (157). In einigen Fällen kann sie invasiven Arten Vorteile bringen (158), ihnen dabei helfen, einheimische Arten zu verdrängen. Die biologischen Auswirkungen künstlicher Lichtquellen werden jedoch immer noch hauptsächlich auf das menschliche Sehvermögen bezogen. Unser Verständnis der Auswirkungen von künstlichem Licht auf andere Arten als unsere eigene, wird daher durch die Konvention beeinträchtigt, Licht in Bezug auf das menschliche Sehvermögen zu messen. Die Wissenschaftler betonen, dass die unterschiedlichen visuellen Systeme von Tieren und Menschen berücksichtigt werden müssen (89, 159).

ALAN ist wahrscheinlich jedes Jahr für den Tod von Millionen von Vögeln und Insekten verantwortlich. In den fol-

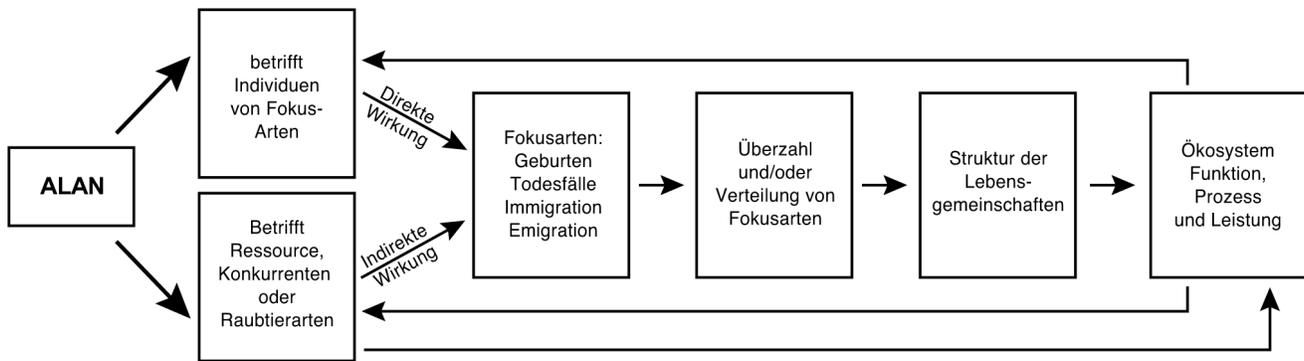


Abbildung 6. Pfade, über die die ALAN-Exposition die Interaktionen zwischen verschiedenen Arten beeinflussen kann. Die Abbildung zeigt einige der ökologischen Folgen dieser Wechselwirkungen. Übersetzte Abbildung 7 in Gaston *et al.*, 2014 (125), lizenziert unter CC-BY-3.0.

genden Abschnitten konzentrieren wir uns auf diese beiden Tierklassen.

Zugvögel

Die meisten Zugvögel navigieren, indem sie das Magnetfeld der Erde wahrnehmen (160), viele Arten sind auch auf Lichtreize in der Umwelt angewiesen. Einige nutzen diese Reize, um ihre magnetische Empfindlichkeit zu «kalibrieren» (161, 162). Künstliche Lichteinwirkung beeinträchtigt dieses Verhalten (163).

Positive Phototaxis ist von besonderer Bedeutung für die Erhaltung der Zugvögel. Helle Beleuchtung in Städten kann für manche Arten ein Leuchtfeld sein, das sie von ihren Wanderwegen ablenkt (164, 165). Senkrecht abstrahlende Leuchten scheinen die stärkste Wirkung zu haben (140), aber selbst eine «dark-sky friendly» Beleuchtung zieht nachts Vögel an (166). Die Anziehungskraft des Lichts kann tödlich sein, da sie zu mehr Zusammenstößen zwischen Vögeln und Fenstern führt (167).

ALAN kann sich negativ auf die Verteilung der Vögel an Raststellen und Fressplätzen entlang der Zugrouten auswirken (168). Das Vorhandensein von beleuchteten Städten entlang dieser Routen veranlasst die Vögel, höher zu fliegen als in ländlicheren Gebieten (169). Sehr helle Anlagen können so viele Vögel anziehen, dass sie von Wetterradaranlagen erfasst werden (165). Diese Tatsache wird nun genutzt, um das Ausmass der Anziehung von Vögeln durch helle Lichtquellen auf Landschaftsebene zu messen. Forscher haben herausgefunden, dass das regelmässige Abschalten starker Lichtquellen während der Nacht diesen Effekt verringern kann, indem Vögeln, die durch positive Phototaxis «gefangen» sind, die Möglichkeit gegeben wird zu entkommen (170).

Bestäubende Insekten

Ökologen haben untersucht, welche Rolle verschiedene Arten bei der Erbringung von «Ökosystemleistungen» spielen. Das sind die Vorteile, die der Mensch aus der natürlichen Umwelt zieht. Ein Beispiel für eine Ökosystemleistung, die

für das menschliche Wohlergehen von entscheidender Bedeutung ist, ist die Bestäubung von Nahrungspflanzen durch Insekten. Viele dieser Insekten sind nur nachts aktiv. Einige Arten scheinen nur unter schwachen, natürlichen Lichtverhältnissen wie Mondlicht zu bestäuben (171).

ALAN scheint zumindest einige Arten nächtlicher Bestäuber zu schädigen (101, 172–174). Dies könnte die Ernteerträge verringern und in einigen Fällen die Nahrungsmittelversorgung gefährden (175). Es könnte sogar zu einem erheblichen Rückgang der Bestäuberpopulationen beitragen, der von einigen als «Insektensterben» bezeichnet wird (176–178).

Die Forscher stellen Auswirkungen vieler Arten von Aussenbeleuchtung fest, einschliesslich gängiger Anwendungen wie Strassenbeleuchtung (179) und zumindest in einigen Fällen kann die Lichtfarbe die nächtliche Bestäubung stören (180). Einige Bestäuber suchen zwar einfach dunklere Orte auf, finden dort aber möglicherweise weniger geeignete Bedingungen vor (181). Es sind weitere Arbeiten erforderlich, um die Bedeutung der Bedrohung zu ermitteln und festzustellen, welche Beleuchtungsänderungen die grössten Verbesserungen für Bestäuber bringen.

3 Menschliche Gesundheit

Wissenschaftliche Erkenntnisse belegen einen Zusammenhang zwischen der ALAN-Exposition und schädlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Dazu gehören Störungen der chemischen Signalübertragung im Körper, bestimmte Veränderungen auf genetischer Ebene und Verschiebungen im Schlaf-Wach-Rhythmus durch natürliche Lichtquellen. Diese Auswirkungen können bei manchen Menschen zum Auftreten bestimmter chronischer Krankheiten beitragen. Diese Schlussfolgerungen stammen grösstenteils aus kontrollierten Studien über die Exposition gegenüber Innenraumbeleuchtung, so dass bei der Interpretation des Einflusses von der Aussenbeleuchtung auf die Gesundheit Vorsicht geboten ist.

Der Zusammenhang zwischen Licht und Melatonin

Der Zusammenhang zwischen ALAN-Exposition im Freien und menschlicher Gesundheit und Wohlbefinden ist umstritten. Die Nachbildung städtischer Umgebungen und der Einsatz von Testpersonen ist in der Praxis schwer zu erreichen. Dies führt dazu, dass sich die Forscher auf Laborstudien an bestimmten Tieren wie Mäusen und Ratten verlassen, die als gut erforschte Modelle für die Biologie von Säugetieren im Allgemeinen dienen. In diesen Studien scheint die ALAN-Exposition Auswirkungen auf den gesamten Lebenszyklus zu haben, von der Kindheit (182, 183) und Jugend (184, 185) bis ins hohe Alter (186, 187). Insbesondere scheinen diese Effekte von kurzweiligem («blauem») Licht verursacht zu werden. Die Exposition gegenüber blauem Licht während des Tages ist zwar wichtig für eine gesunde zirkadiane Funktion (188), die nächtliche Lichtexposition damit kann den zirkadianen Rhythmus des Menschen stören. Dies kann sich auf alles auswirken, vom Zeitpunkt der Hormonausschüttung im Körper bis hin zur Dauer und Qualität unseres Schlafes (189). Die Deutlichkeit dieser Wirkungen hängt von der Intensität des blauen Lichts sowie vom Zeitpunkt und der Dauer der Exposition ab.

Lichtexposition zu unpassenden Zeiten während des 24-Stunden-Tages verzögert oder verhindert die Sekretion von Melatonin (190). Dieses starke Antioxidans ist ein Hormon, das mit dem Immunsystem interagiert (109, 191). Künstliches Licht mit geringer Intensität kann die Melatoninproduktion unterdrücken (192). Bei einigen besonders empfindlichen Personen können schon 5 Lux Belichtung diesen Effekt hervorrufen (193, 194), das ist etwa 50-mal heller als Vollmondlicht und 100-mal weniger intensiv als die Lichtmenge in einer hellen Büroumgebung. Die langfristigen Auswirkungen dieser Art von Lichtexposition sind unbekannt.

Die Produktion von Melatonin schwankt im Laufe eines 24-Stunden-Tages. Die Forscher vermuteten, dass es einen Weg geben muss, wie der Körper das Licht in der Umgebung wahrnimmt. Sie vermuteten, dass es nicht mit unserem bildgebenden Sehsinn zu tun haben könnte. Im Jahr 2001 entdeckten Professor George Brainard und seine Mitarbeiter das fehlende Teil des Puzzles. Sie fanden Beweise für die chemischen Signale in lichtempfindlichen Zellen in der Netzhaut des Auges, die die Lichtexposition mit dem System zur Regulierung des zirkadianen Rhythmus verbindet (195). An diesem Mechanismus ist eine Substanz namens Melanopsin beteiligt, die sehr empfindlich auf blaues Licht reagiert (196).

ipRGC, die blauem Licht ausgesetzt sind, senden Signale an die «Hauptuhr» des zirkadianen Rhythmus im Gehirn. Dadurch wird der Zeitgeber für andere derartige «Uhren» in verschiedenen Organen und Systemen des Körpers geschaffen. Diese Uhren steuern ihrerseits verschiedene biologische Aktivitäten (197, 198). Die Exposition gegenüber ALAN kann dazu führen, dass die Hauptuhr nicht mehr mit dem natürlichen Lichtmuster des 24-Stunden-Tages syn-

chronisiert ist (199). Die Folgen solcher Verststellungen sind noch nicht vollständig geklärt. Und einige der peripheren Uhren scheinen unabhängig vom Gehirn selbst auf Licht zu reagieren (200).

Ausserdem ist inzwischen bekannt, dass Lichteinwirkung Veränderungen auf der Ebene unseres genetischen Codes bewirkt. Es ist zwar nicht bekannt, dass es unsere DNA (das Molekül, das diesen Code buchstabiert) verändert, aber Licht kann beim Menschen «epigenetische» Veränderungen hervorrufen (201, 202). Diese Veränderungen schalten Gene «ein» oder «aus» oder verändern ihre normale Funktion. Einige dieser Gene stehen im Zusammenhang mit der Funktion unserer zirkadianen Uhr. Epigenetische Veränderungen an diesen Genen scheinen das Risiko für bestimmte Krebsarten zu erhöhen (203), insbesondere Brustkrebs (204, 205).

Die Folgen einer häufigen ALAN-Exposition

Die häufige Exposition gegenüber übermässigem Licht in der Nacht kann neben anderen Faktoren im Zusammenhang mit Schichtarbeit ein neu auftretendes Risiko in der Lebensführung darstellen, das zu verschiedenen Gesundheitsproblemen beiträgt. Dazu gehören Übergewicht (206–208), Diabetes (209, 210) und gewisse Krebsarten (211–213), so wie Brustkrebs (214–216) und Prostatakrebs (217–220). ALAN-Exposition scheint auch die aggressivere Ausbreitung einiger Krebsarten zu fördern (221). Es kann Krebs selbst gegen die besten verfügbaren medikamentösen Therapien resistent machen (222) und die Selbstreparaturmechanismen des Körpers schwächen (223).

In einigen epidemiologischen Studien wurde eine starke Korrelation zwischen ALAN-Niveaus aus Satellitendaten und dem Auftreten von Brust- und Prostatakrebs festgestellt, was darauf schliessen lässt, dass die Lichtexposition im Freien einen Einfluss hat (224, 225). Gleichzeitig weisen Kritiker darauf hin, dass die Verwendung von Satellitendaten zur Vorhersage krankheitsbedingter ALAN-Belastungen untauglich sei (226). Dies kann dazu führen, dass die Ergebnisse einiger Studien weniger zuverlässig sind, da die Satellitenmessungen nur grobe Schätzungen der tatsächlichen ALAN-Dosen sind, die die meisten Menschen aus Aussenquellen erhalten.

Viel häufiger löst ALAN-Exposition beim Menschen Schlaflosigkeit aus (227, 228). Die Melatoninproduktion und die Zyklen von Schlaf und Wachsein folgen einander. Regelmässige nächtliche Lichtexposition in Verbindung mit Nachtschichtarbeit kann dazu führen, dass sich diese beiden Zyklen entkoppeln (229). Die Folge ist häufig eine schlechte Schlafqualität und eine geringe Schlafdauer (230). Viele soziale und gesundheitliche Folgen sind mit häufiger Schlaflosigkeit verbunden (231, 232), die eine Gefahr für die öffentliche Gesundheit, die Sicherheit und die Produktivität der Arbeitnehmer darstellt (233, 234).

Einflüsse auf die Gesundheit

Gesundheitspraktiker erkennen jetzt die Rolle, die Licht und Dunkelheit bei der Heilung von Krankheiten und in medizinischen Verfahren spielen. ALAN-Exposition verzögert oder verhindert Erholung nach einem Schlaganfall (235, 236), Arterienverkalkung (237), Hautverletzungen (238) und Entzündungen im ganzen Körper (239). Gesteuerte ALAN-Belastungen an Orten wie Krankenhäusern führen zu besseren Gesundheitsergebnissen (240, 241). Die zunehmende Aussenbeleuchtung kann die Verbreitung übertragbarer Krankheiten begünstigen (242). Sie kann auch die Voraussetzungen für das Auftreten neuer und verheerender Krankheiten wie COVID-19 schaffen (243, 244).

Andere Studien zeigen, dass ALAN einen Einfluss auf den normalen Alterungsprozess hat (245). Nächtliche Lichtexposition und häufige Störungen des zirkadianen Rhythmus stehen im Zusammenhang mit psychischen Erkrankungen (246–249), fehlerhafter Signalübertragung zwischen Nerven (250) und dem Auftreten von Demenz (251) und sie könnte eine Rolle beim Auftreten von Autismus spielen (252). Die Babies einiger Frauen, die in der Schwangerschaft ALAN ausgesetzt waren, leiden unter bestimmten Entwicklungsstörungen (253, 254). Andererseits trägt die Begrenzung der nächtlichen Lichtexposition – insbesondere des blauen Lichts – zur Aufrechterhaltung eines normalen zirkadianen Rhythmus bei. Es kann einige Anomalien abwehren, die zu Krankheiten führen können (255).

Wir wissen jetzt viel darüber, wie ALAN mit unserer Gesundheit interagiert. Unser Wissen ist jedoch unvollständig. Es ist derzeit nicht möglich, einen direkten Zusammenhang zwischen nächtlicher Aussenlicht-Exposition und dem Auftreten von Krankheiten bei einzelnen Personen herzustellen. Das Zusammenspiel zwischen dem Zeitpunkt und der Dauer der ALAN-Belichtung, sowie der Helligkeit und Farbe des Lichts, sind entscheidende Faktoren. Die Frage, ob die Lichtverschmutzung im Freien die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen beeinflusst, muss jedoch noch weiter erforscht werden. Ein Teil der Herausforderung besteht darin, den Einfluss von ALAN von dem anderer Umweltbelastungen wie Lärm und Luftverschmutzung, sowie von anderen Umweltstressoren zu unterscheiden.

4 Öffentliche Sicherheit

Die Überzeugung, dass die Aussenbeleuchtung die Verkehrssicherheit erhöht und von Kriminalität abhält oder diese verhindert, ist weit verbreitet. Dies mag zum Teil die rasche Zunahme der nächtlichen Beleuchtung im Freien in den letzten Jahren und Jahrzehnten erklären. Es gibt Fälle, in denen eine sorgfältige Aussenbeleuchtung die Sicherheit in der Nacht verbessern kann, aber es gibt keinen allgemeinen, wissenschaftlich belegten Nutzen.

Verkehrssicherheit und Kriminalität

Es gibt viele widersprüchliche Forschungsergebnisse zu diesem Thema. Einige Studien belegen, dass die Beleuchtung von Aussenbereichen die Kriminalität und die Zahl der Verkehrsunfälle verringert (256, 257) und empfehlen sogar bestimmte Beleuchtungsstärken auf der Grundlage der Ergebnisse von Feldversuchen (258). Andere finden entweder einen negativen Einfluss (259), überhaupt keine Wirkung (260–262), oder unklare Ergebnisse (263, 264). Einige Forscher stellen die Frage, ob die Verringerung der Aussenbeleuchtung in Gebieten, die für Verbrechen oder Verkehrsunfälle anfällig sind, zu schlechteren Ergebnissen führt. Für diese Hypothese gibt es kaum Belege (265).

Sowohl Verkehrs- als auch Kriminalitätsstudien sind bekanntermaßen schwierig zu gestalten. Insbesondere ist es schwierig, alle Variablen, die die Ergebnisse verändern könnten, angemessen zu berücksichtigen. Bei einer Studie zur Strassenverkehrssicherheit über die Beleuchtung könnte beispielsweise das sich ändernde Verkehrsaufkommen während der Nacht nicht berücksichtigt werden. Einige Variablen können einen stärkeren Einfluss auf die Beobachtungen haben als Beleuchtungsänderungen.

Manchmal handelt es sich bei diesen Variablen um subtile Effekte, die sich zu wichtigen Ergebnissen summieren. Es kann leicht sein, der Beleuchtung die Verantwortung zuzuschreiben, obwohl sie eigentlich nur sehr wenig dazu beigetragen hat. Infolgedessen sind viele der Behauptungen über die Aussenbeleuchtung und ihre Auswirkungen auf die Kriminalität und die Verkehrssicherheit – im Guten wie im Schlechten – möglicherweise grundlegend falsch (266, 267).

Den Forschern ist es bisher nicht gelungen, die Auswirkungen der Aussenbeleuchtung auf die Sicherheit vorherzusagen. Dies ist ein Grund, warum es schwierig ist, die Bedeutung der Beleuchtung in Studien zu ermitteln. Es gibt keine eindeutig bekannte «Dosis-Wirkungs-Beziehung», die angemessene Beleuchtungsstärken vorherzusagen könnte (268). Mit anderen Worten: Selbst wenn die Beleuchtung die Ergebnisse beeinflusst, können die Wissenschaftler nicht bestimmen, wie viel Licht erforderlich ist.

In internationalen Beleuchtungsnormen werden häufig keine eindeutigen Richtwerte für die von Autofahrern und Fussgängern benötigte nächtliche Beleuchtungsstärke auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse festgelegt (269). Es gibt nur wenige Fälle, in denen diese Frage gründlich untersucht wurde, z. B. (38) und es ist unklar, ob die Ergebnisse universell anwendbar sind. Entscheidungsträger, von gewählten Vertretern bis hin zu Beleuchtungsdesignern, ersetzen mangelnde Leitlinien oft durch ihre Intuition. In dem Glauben, dass mehr von etwas immer besser ist, geben sie oft zu viel Licht im Verhältnis zum tatsächlichen Bedarf an.

Die Menge an Licht, die nachts in Aussenbereichen verwendet wird, entspricht möglicherweise nicht den Erwartungen der Öffentlichkeit in Bezug auf das Gefühl von Sicherheit und Komfort (270) und künstliches Licht selbst kann die

menschliche Wahrnehmung von Angst beeinflussen (271). In einigen Fällen kann eine übermäßige Beleuchtung selbst zur Quelle von Sicherheitsrisiken werden (272). Eine richtig konzipierte Beleuchtung kann jedoch die Lichtverschmutzung verringern und Energie sparen, ohne das Sicherheitsgefühl der Bürger in nächtlichen Aussenräumen zu beeinträchtigen (273).

Fahrzeug- und Strassenbeleuchtung

Niemand bezweifelt, dass die Fahrzeugbeleuchtung einen eindeutigen Nutzen für die öffentliche Sicherheit hat, aber diese Art von Beleuchtung kann selbst die Quelle von unerwünschter Lichtverschmutzung sein. Bisher gibt es nur wenige Erkenntnisse über den Beitrag von Autolichtern zur Lichtverschmutzung. Einige frühe Arbeiten deuten darauf hin, dass die Auswirkungen nicht gering sind (274–276). Viele erwarten, dass sich autonome (selbstfahrende) Fahrzeuge in den kommenden Jahrzehnten durchsetzen werden. Die Forscher fangen gerade erst an zu untersuchen, was dies für die Verringerung des Bedarfs an Strassenbeleuchtung in der Zukunft bedeutet (277).

Die Gefahren der Blendung

Blendung durch helle künstliche Lichtquellen ist ein besonderes Problem für die Sicherheit in der Nacht. Sie entsteht durch intensive Lichtstrahlen, die direkt von einer Quelle in das Auge einfallen. Ein Teil dieses Lichts wird im Auge des Betrachters gestreut, wodurch der Kontrast zwischen Vorder- und Hintergrund verringert wird. Dieser Effekt erschwert die Wahrnehmung von Gegenständen, die sich von dem unterscheiden, was sie umgibt. Ausserdem verengt sich die Pupille des Auges des Betrachters, wodurch die Sichtbarkeit eingeschränkt wird, da die gesamte Szene dunkler erscheint.

Blendung verringert die Sichtbarkeit von Objekten bei Nacht für Autofahrer, Fussgänger und Radfahrer. Obwohl einige ältere Beobachter berichten, dass sie die Blendung durch bestimmte Quellen stärker wahrnehmen, scheint sie Menschen jeden Alters zu betreffen (278). Einige moderne Lichtquellen, wie LED, können die Blendung verschlimmern, da sie viel Licht in einem sehr flachen Winkel nach unten abgeben (9) und auch durch die Verwendung ungleichmässiger Lichtquellen mit unzureichender optischer Streuung (279).

Die Wahrnehmung von Blendung scheint von der Wellenlänge des Lichts abhängig zu sein. Im Allgemeinen verursacht kurzwelliges (‹kaltes›) Licht stärkere Blendung als langwelliges (‹warmes›) Licht (280). Beobachter berichten, dass es unabhängig von der Farbe des Lichts etwa gleich lange dauert, bis man sich von der Blendung erholt hat (281). Die Schwere der Blendung scheint eher mit der ‹Dosis› (Lichtintensität mal Belichtungsdauer) als mit der Farbe zusammenzuhängen (280). Wenn der Hintergrund, der eine Blendquelle umgibt, eine höhere Leuchtdichte hat, ist die wahrgenommene Intensität geringer. Wärmere Lichthinter-

gründe reduzieren die wahrgenommene Blendung stärker als kühlere Hintergründe (282).

5 Energienutzung und Klimawandel

Verschwendetes Aussenlicht in der Nacht ist verschwendete Energie. Die Welt ist weiterhin in hohem Masse von fossilen Brennstoffen zur Stromerzeugung abhängig. Da die Lichtverschmutzung eine Energieverschwendung darstellt, trägt sie auch direkt zum Klimawandel bei.

Licht und globaler Energiebedarf

Der Stromverbrauch für die Aussenbeleuchtung machte früher etwa 1.5% des weltweiten Stromverbrauchs aus (283–285). Die Forscher stellten die Hypothese auf, dass die Einführung von energieeffizienter Festkörperbeleuchtung diesen Verbrauch reduzieren würde. Viele Regierungen haben sich in den letzten zehn Jahren mit der Einführung der neuen Technologie beeilt. Da die Preise für SSL-Produkte sanken, stieg die Akzeptanz. Die Beweggründe hierfür waren unter anderem geringere Betriebskosten und die Erfüllung der Anforderungen der ‹grünen› Politik.

Auf den ersten Blick scheint die hohe Energieeffizienz von SSL gut für die Umwelt zu sein. So schätzt das Umweltprogramm der Vereinten Nationen, dass eine Umstellung auf energieeffiziente Beleuchtung den weltweiten Strombedarf für Beleuchtung bis 2030 um 30 bis 40% senken würde (286). Die rasche Einführung von SSL kann jedoch ungewollt das Problem der Lichtverschmutzung verschärfen. SSL macht Licht für den Aussenbereich preiswerter und bequemer in der Nutzung. Billigeres Licht wiederum kann dazu führen, dass nachts mehr und helleres Licht verwendet wird, wo es nicht benötigt wird.

Das ‹Greenwashing› der Festkörperbeleuchtung

Da die Herstellung von ALAN billiger geworden ist, hat die Welt mehr davon verbraucht. Tatsächlich verbrauchen die Menschen heute tausendmal mehr Lumen als in der historischen Vergangenheit (287). Es gibt jetzt Anzeichen bei der Beleuchtung für das, was Wirtschaftswissenschaftler einen ‹Rebound-Effekt› nennen. Es wird angenommen, dass dies auf die verbesserte Energieeffizienz und die lange Lebensdauer von SSL-Produkten zurückzuführen ist. Unter diesen Bedingungen werden die erwarteten Einsparungen beim Energieverbrauch und die Verringerung der Treibhausgasemissionen durch den erhöhten nächtlichen Lichtverbrauch wieder zunichte gemacht. Einige Forscher bezweifeln nun, ob SSL wirklich ‹nachhaltige› Beleuchtung ist (288).

Bis Mitte der 2010er Jahre änderte sich die jährliche Wirtschaftsleistung eines durchschnittlichen Landes in dem Masse, wie der nächtliche Lichtverbrauch des Landes zunahm (1), obwohl es grosse Unterschiede zwischen den Ländern gab. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass die

Kosteneinsparungen durch die Umstellung auf SSL in den Einsatz neuer Aussenbeleuchtung geflossen sind. Wenn dies zutrifft, bedeutet dies, dass SSL bis heute keine Verringerung des weltweiten Energieverbrauchs gebracht hat. Die Autoren der bahnbrechenden Studie aus dem Jahr 2017, die zu diesen Ergebnissen kam, schrieben, dass ihre Ergebnisse «im Widerspruch zu der Hypothese stehen, dass der weltweite Energieverbrauch für Aussenbeleuchtung aufgrund der Einführung von Festkörperbeleuchtung stark gesunken ist».

Die Behauptungen über die Umweltvorteile von SSL sind bestenfalls übertrieben. Einige Forscher schliessen daraus, dass eine neue Definition von «Effizienz» erforderlich ist (9). Sie würde die Gesamtkosten der nächtlichen Aussenbeleuchtung über den gesamten Lebenszyklus von Aussenbeleuchtungsprodukten berücksichtigen und neben den reinen Stromkosten auch Faktoren wie die Umweltbelastung einbeziehen. Eine solche Neudefinition der Effizienz kann den Regierungen helfen, in Zukunft bessere Entscheidungen über die Aussenbeleuchtung zu treffen. Darüber hinaus ist unklar, ob die Ursache des Problems in der Technologie selbst oder in ihrer Anwendung liegt und ob eine Änderung der Art und Weise, wie SSL eingesetzt wird, zu einem anderen Ergebnis führen könnte.

Die Gesamtkosten der Aussenbeleuchtung

Die Festkörperbeleuchtung bietet möglicherweise keine nennenswerten Umweltvorteile in Bezug auf die Verringerung der Kohlenstoffemissionen. Die Verwirklichung des Versprechens von SSL erfordert ein Umdenken bei der Regulierung der Aussenbeleuchtung durch die Regierungen. Andernfalls könnte SSL das Problem der Lichtverschmutzung noch verschärfen. Ihre Auswirkungen verursachen Kosten für die Umwelt, die nicht allein in Geld gemessen werden können.

Die sozialen und finanziellen Vorteile von SSL scheinen zu verblassen, wenn man die gesamten Umweltkosten der Beleuchtung betrachtet. Eine Studie über ein SSL-Nachrüstungsprogramm in den Vereinigten Staaten ergab beispielsweise eine Zehn-Jahres-Rendite von +118.2%, die allein auf den Einsparungen durch den geringeren Stromverbrauch beruhte. Die Forscher bereinigten dann die Rendite um externe Effekte wie die sozialen Kosten schlechter Gesundheitsergebnisse, die mit der ALAN-Exposition zusammenhängen können und den Nutzen der vermiedenen Kohlenstoffemissionen. Die daraus resultierende Rendite sank auf -146.2% (289).

SSL-Programme verlieren an Attraktivität, wenn die negativen Folgen von ALAN in die Berechnung der Kapitalrendite einbezogen werden. Die Frage, ob SSL die versprochenen Umweltvorteile ohne eine Verringerung des Lichtverbrauchs im Freien liefern kann, bleibt offen.

6 Licht und Soziale Gerechtigkeit

Wir wissen sehr wenig darüber, wie ALAN auf Menschen in sozialen Kontexten wirkt. Die nächtliche Beleuchtung kann in einer Weise eingesetzt werden, die sich je nach vermuteter Herkunft der dort lebenden Menschen auf die Nachbarschaft auswirkt. Das kann die Nutzung von Licht in der Nacht zu einer Frage der sozialen Gerechtigkeit und Umweltfreundlichkeit machen.

Wir wissen wenig über die sozialen Auswirkungen der Verwendung von Aussenlicht bei Nacht. Die Fernerkundung des nächtlichen Lichts aus dem Weltraum kann bestimmte Muster der Lichtnutzung aufzeigen. Diese Beobachtungen können soziale Ungleichheiten in anderen Variablen aufzeigen, die sonst unbemerkt bleiben (290). Schlechte soziale Auswirkungen können der Anwendung von Beleuchtung im Aussenraum folgen. Zu den Überlegungen gehören Gerechtigkeit, Gesundheitsergebnisse, Mobilitätshindernisse und gemeinschaftlicher Zusammenhalt (291). Die bisher

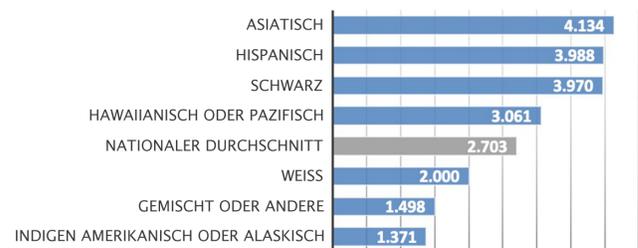


Abbildung 7. Durchschnittliche Belastung durch Lichtverschmutzung in den kontinentalen Vereinigten Staaten nach vermuteter Herkunft/ethnischer Gruppe. Die Balken zeigen die bevölkerungsgewichtete durchschnittliche Helligkeit des Nachthimmels im Zenit in Millicandela pro Quadratmeter. Abbildung 4 in Nadybal, Collins und Grineski, 2020 (292).

einzigste umfassende Studie zu diesem Thema befasste sich ausschliesslich mit den sozialen Aspekten der Beleuchtung in den Vereinigten Staaten (292). Die Forscher fanden heraus, dass Amerikaner asiatischer, hispanischer und schwarzer Abstammung eher in helleren Vierteln leben (Figure 7). In diesen Gebieten sind die Lichtglocken etwa doppelt so stark wie in überwiegend weissen Stadtvierteln. Sie stellen ferner fest, dass ein niedriger sozioökonomischer Status auch mit einer höheren nächtlichen Lichtexposition verbunden ist. Diese Bedingungen können zu anderen sozialen und ökologischen Stressfaktoren wie Armut und Luft- und Wasserverschmutzung hinzukommen und die Lebensqualität beeinträchtigen.

Andere Ansätze stellen einen Zusammenhang zwischen der nächtlichen Lichtexposition und bestimmten gesundheitlichen Auswirkungen her, die bestimmten Gruppen mehr schaden können als anderen (293, 294). Auch aus etablierten Bereichen wie der Umweltpsychologie liegen nur begrenzte Ergebnisse vor (295, 296). So kann beispielsweise das Gefühl der «Sicherheit» dazu führen, dass Men-

schen niedrigere Beleuchtungsstärken akzeptieren (297). Vorurteilsbehaftete Wahrnehmungen können dazu führen, dass in bestimmten Stadtvierteln Straßbeleuchtungen installiert werden.

Schliesslich haben einige Wissenschaftler kritisiert, dass die Idee der Beseitigung der «Dunkelheit» in Bezug auf die Nutzung von Licht im Aussenraum bei Nacht, marginalisierte Menschen beeinträchtigen kann (298, 299). Sie argumentieren, dass das Versäumnis, aus den Lektionen der Umweltgeschichte zu lernen, dazu führen kann, dass die Fehler der Vergangenheit einfach wiederholt werden. Eng damit verbunden ist der Gedanke, dass Lichtverschmutzung Menschen schadet, deren religiöse oder kulturelle Praktiken auf den Zugang zum Nachthimmel angewiesen sind. Die Auslöschung der Sterne aus dem Blickfeld durch die Himmelsaufhellung trennt die Menschen von dieser Quelle. Einige argumentieren, dass dies insbesondere indigene Traditionen und Wissenssysteme bedroht, die auf der Zugänglichkeit des natürlichen Nachthimmels beruhen (300).

7 Lichtverschmutzung aus dem All

Die Zahl der künstlichen Satelliten, die die Erde umkreisen, steigt rapide an. Satelliten reflektieren das Sonnenlicht auf den Boden und verändern das Aussehen des Nachthimmels. Da sie die Helligkeit des Nachthimmels erhöhen, stellen sie eine neue Art der Lichtverschmutzung dar.

Künstliche Satelliten umkreisen die Erde seit den späten 1950er Jahren. Bis vor kurzem galten sie nicht als Quelle der Lichtverschmutzung. Diese Sichtweise änderte sich im Mai 2019, als mit dem Start von 60 Satelliten im Rahmen des SpaceX-Projekts «Starlink» eine neue Ära der Nutzung des Weltraums eingeleitet wurde (301). Private kommerzielle Raumfahrtunternehmen haben inzwischen Pläne für den Start von rund 100'000 neuen Satelliten angekündigt. Die Satelliten sollen den Breitband-Internetzugang auf der ganzen Welt erweitern. Einige Forscher bezweifeln jedoch, dass Satelliten notwendig sind, um dieses Ziel zu erreichen (302).

Satelliten werden zunehmend als eine neue Form der Lichtverschmutzung angesehen (303–305). Sie beeinflussen den Nachthimmel auf zwei wichtige Arten. Erstens reflektieren sie das Sonnenlicht auf die Nachtseite der Erde. Beleuchtete Satelliten erscheinen als helle, sich bewegende Lichtpunkte. Sie können sich sowohl auf die Aktivitäten von Amateur- als auch von Berufsastronomen auswirken (306–309). Zweitens: Satelliten können den Nachthimmel selbst heller machen (Abbildung 8). Dies kann auch dann der Fall sein, wenn die Beobachter die einzelnen Satelliten nicht sehen. Als eine Form der Lichtverschmutzung trägt sie zusammen mit dem durch Städte verursachten Himmelsleuchten zur beobachteten Helligkeit des Nachthimmels bei. Forscher schätzen, dass Satelliten die Helligkeit des Nachthimmels bereits um zehn Prozent gegenüber natürlichen Lichtquellen

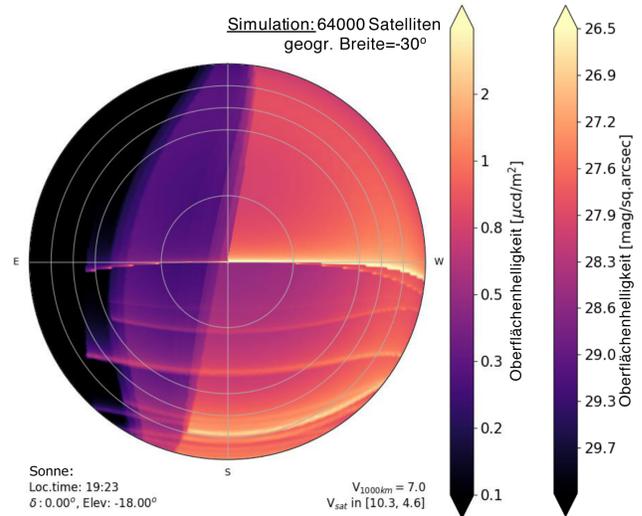


Abbildung 8. Eine simulierte Ansicht des Nachthimmels, die die Helligkeit zeigt, die einer Anzahl von 64.000 Satelliten in der Erdumlaufbahn entspricht. Der Ausschnitt ist auf den Zenith zentriert, mit dem Horizont, der um den äusseren Rand verläuft, um den Zenith zentrierte Kreise markieren Linien mit konstanter Höhe über dem Horizont bei 10°, 20°, 30° und 60°. Wärmere Farben zeigen hellere Teile des Himmels an. Unveröffentlichte Resultate übernommen von Bassa, Hainaut und Galadí-Enríquez, 2021 (309).

erhöhen (310). Bis zum Jahr 2030 könnte sie den Einfluss der «terrestrischen» Lichtverschmutzung übertreffen. Es wird angenommen, dass Beobachter in hohen Breitengraden stärker betroffen sind, als Beobachter in den Tropen (311).

Astronomen und Vertreter der Raumfahrtindustrie begannen ihre Beratungen kurz nach dem ersten Starlink-Start. Die Wissenschaftler schlugen vor, die Helligkeit der Satelliten zu verringern, um ihre Beobachtungen nicht zu beeinträchtigen. Designänderungen haben die Starlink-Satelliten abgeschwächt, aber sie übertreffen immer noch die Zielvorgabe (312–316). Weitere Empfehlungen betrafen die Begrenzung der Höhe, in der Satelliten die Erde umkreisen dürfen.

Die jüngsten Bemühungen betonten die Notwendigkeit, die Industrie und die Regulierungsbehörden mit Interessengruppen ausserhalb der Astronomie zusammenzubringen (317). Sie forderten auch die Bereitstellung von Mitteln, um das Problem eingehender zu untersuchen und eine zentrale Clearingstelle für Informationen einzurichten (318). Es ist wichtig, einen angemessenen Zugang zum Weltraum für die kommerzielle Entwicklung zu gewährleisten, aber wir wissen noch nicht, wie wir dies tun und gleichzeitig den Nachthimmel vor den Auswirkungen von Satelliten schützen können.

8 Wissenslücken und Forschungsbedarf

Wir haben zwar viel über die Auswirkungen und Kosten von ALAN gelernt, aber es gibt auch vieles, was wir noch nicht wissen. Hier fassen wir die wichtigsten Forschungsfragen für das kommende Jahrzehnt zusammen.

Das Interesse an ALAN ist bei Forschern aus allen Bereichen sprunghaft gestiegen (319). Die durchschnittliche Anzahl der jährlich veröffentlichten wissenschaftlichen Arbeiten ist seit dem Jahr 2000 um über 1000 % gestiegen. Die zur Beantwortung bestimmter Fragen erforderlichen Methoden erstrecken sich zunehmend auf viele verschiedene Disziplinen (320), und das Aufkommen der ›Nachtforschung‹ als eigenes Forschungsgebiet zeigen, dass das Thema rasch reift (321).

Der in diesem Bericht zusammengefasste Stand der Wissenschaft führt zur Identifizierung wichtiger Themen für die zukünftige Forschung:

Der Nachthimmel

- Was treibt den Anstieg der ALAN-Emissionen in der Welt an?
- Wie verändert sich die Helligkeit des Nachthimmels im globalen Massstab?
- Wie hell ist der Nachthimmel weltweit in bewölkten Nächten?

Ökologische Auswirkungen

- Welches sind die Empfindlichkeitsschwellen und Spektralanteile, bei denen unterschiedliche ALAN-Auswirkungen für verschiedene Arten auftreten?
- Beeinträchtigt das Himmelsleuchten insbesondere viele oder die meisten Pflanzen- und Tierarten? Wirkt es sich auf ganze Ökosysteme aus?
- Was sind die langfristigen ökologischen Folgen der Lichtverschmutzung?
- Wie trägt ALAN zum Rückgang oder Aussterben von Arten bei?
- Inwieweit ist ALAN für den Rückgang der Insektenpopulationen verantwortlich?

Menschliche Gesundheit

- Beeinträchtigt die Exposition gegenüber ALAN in bestimmten Aussenräumen die menschliche Gesundheit in irgendeiner Weise?
- Beeinträchtigt nächtliches Aussenlicht in Innenräumen den Schlaf und die Gesundheit?

- Sind die beobachteten Zusammenhänge zwischen nächtlichem Aussenlicht und Gesundheit das Ergebnis von Ursache und Wirkung?

Öffentliche Sicherheit

- Wie hängt die nächtliche Aussenbeleuchtung mit der Verkehrssicherheit zusammen?
- Wie stehen die Aussenbeleuchtung und Gewalt- und Eigentumsdelikte in Zusammenhang?
- Können wir bessere Studien konzipieren, um diese Fragen endgültig zu beantworten?
- Mit welchen Merkmalen der Beleuchtung, wie Intensität, Farbe und anderen Gestaltungsmerkmalen, lassen sich die gewünschten Sicherheitsergebnisse erzielen?
- Wie können die Ausrichtung, die Gleichmässigkeit, die Steuerung und die spektrale Abstimmung der LED-Beleuchtung die tatsächliche und wahrgenommene Sicherheit mit minimal störenden Lichtpegeln unterstützen?
- Wie weit können Fahrbahn-, Strassen- und Arealbeleuchtungen zu verkehrsarmen Zeiten in der Nacht auf sichere und rechtlich vertretbare Weise gedimmt werden?

Energienutzung und Klimawandel

- Hat sich der derzeitige weltweite Übergang zur Festkörperbeleuchtung positiv auf die Verringerung des Stromverbrauchs und der Treibhausgasemissionen ausgewirkt?
- Welche sozialen, finanziellen und ökologischen Kompromisse hat die LED-Beleuchtungsumstellung mit sich gebracht?
- Um wie viel senkt eine gute Beleuchtungsplanung den Stromverbrauch?
- Wie wirksam sind adaptive Steuerungen bei der Reduzierung der Lichtnutzung in der Nacht?
- Können wir die Menge, der mit der Aussenbeleuchtung verbundenen Kohlenstoffemissionen, besser quantifizieren?
- Mit welchen Beleuchtungstechnologien, Planungspraktiken und Massnahmen lassen sich Lichtverschmutzung und Stromverbrauch auf ein sicheres Mindestmass reduzieren?

Licht und Soziale Gerechtigkeit

- Wie gut stimmt die Anwendung von ALAN mit den Indikatoren für die öffentliche Gesundheit in Bezug auf Ethnie und Wirtschaft überein? Wenn bei der Anwendung von ALAN konsistente Unterschiede festgestellt werden, warum gibt es sie?

- Welche öffentlichen Massnahmen sind wirksam bei der Verringerung der ALAN-Diskrepanzen zwischen verschiedenen Gemeinschaften?

Lichtverschmutzung aus dem All

- Sind die Vorhersagen über den Beitrag der Satelliten zur Helligkeit des Nachthimmels korrekt?
- Wie unterscheiden sich die Auswirkungen auf den Nachthimmel in Abhängigkeit von der Anzahl der Satelliten, ihrer Umlaufhöhe und ihrer räumlichen Verteilung?
- Gibt es eine bestimmte «Toleranzschwelle» von Satelliten in der erdnahen Umlaufbahn?
- Gibt es Satellitenkonzepte, mit denen die Auswirkungen auf die Sichtbarkeit des Nachthimmels verringert oder beseitigt werden können?

Wir berücksichtigen auch Fragen und Themen, die mehr als einen Bereich der ALAN-Forschung betreffen, sowie die Anwendung dieser Forschung selbst:

Inderdisziplinäre Forschung

- Wie hängen die verschiedenen Beleuchtungsmetriken zusammen? Können wir zum Beispiel Lichtlocken auf der Grundlage breiter Messungen von Leuchtdichten modellieren?
- Wie interagiert die Luftverschmutzung mit ALAN?
- Wie hängen einige ALAN-Messungen, wie die Himmelsaufhellungen, speziell mit einer Reihe unerwünschter Folgen zusammen (z. B. negative ökologische, gesundheitliche oder astronomische Folgen)?

Anwendungen der ALAN-Forschung

- Wie wirksam sind öffentliche Massnahmen zur Aussenbeleuchtung bei der Reduzierung von ALAN?
- Welche Massnahmen stehen neben der öffentlichen Politik zur Verfügung, um die unerwünschten Folgen von ALAN abzumildern?
- Welche besonderen wirtschaftlichen Vorteile bringt der Astrotourismus den Gemeinden?
- Welchen messbaren Nutzen haben Orte mit Dark-Sky Labels? Welche Kosten entstehen ihnen durch die Verwaltung ihres Dark-Sky-Status?
- Welche Gemeinden beantragen und erhalten Dark-Sky Zertifikate für den dunklen Himmel und warum?

Methodik

Dieser Bericht wurde unter Verwendung der Artificial Light at Night Research Literature Database erstellt (ALANDB;

<https://alandb.darksky.org/>), eine Datenbank mit wissenschaftlichen Literaturzitate, die von Experten aus verschiedenen Bereichen der ALAN-Forschung kuratiert wurde. Wir ergänzten ALANDB mit anderen Online-Ressourcen wie Google Scholar (<https://scholar.google.com/>) und PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>).

Wir definierten «wissenschaftliche Literatur» als Ergebnisse, die zumindest einer einblindigen, externen Peer-Review unterzogen und unserer Meinung nach in seriösen Medien veröffentlicht wurden. Es wurden sowohl frei zugängliche als auch nicht frei zugängliche Arbeiten berücksichtigt. Soweit verfügbar, haben wir bei der Entscheidung, welche Quellen wir verwenden, auch nachgelagerte Metriken wie Zitate berücksichtigt. Wir geben Vorbehalte und Unzulänglichkeiten zu den Quellen an, wenn sie uns bekannt sind.

Im Allgemeinen haben wir technische Berichte, White Papers, Dissertationen und andere Quellen, die manchmal als «graue Literatur» bezeichnet werden, nicht berücksichtigt. Künftige Ausgaben des Berichts können auf graue Literatur ausgedehnt werden, wenn es genügend Belege für eine gründliche Überprüfung gibt, insbesondere in Fällen, in denen sonst nur sehr wenige oder gar keine Informationen zu einem Thema verfügbar sind.

Der daraus resultierende Bericht wurde extern von Fachleuten geprüft, denen wir für ihre Kommentare danken, die zur Verbesserung des Ergebnisses beigetragen haben. Wir betrachten diesen Bericht als ein «lebendiges Dokument», das in Zukunft aktualisiert werden wird, um weiteren Entwicklungen in den verschiedenen Bereichen der ALAN-Forschung Rechnung zu tragen.

Referenzen

1. Kyba, C.C.M., Kuester, T., de Miguel, A.S., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C.D., Gaston, K.J. and Gunter, L. Artificially lit surface of earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances*, 3(11):e1701528, nov 2017. doi: 10.1126/sciadv.1701528.
2. Azman, M.I., Dalimin, M.N., Mohamed, M. and Bakar, M.F.A. A brief overview on light pollution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 269(1):012014, Jul 2019. doi: 10.1088/1755-1315/269/1/012014.
3. Falchi, F. Light pollution. In Charlesworth, S.M. and Booth, C.A., editors, *Urban Pollution: Science and Management*, chapter 11, pages 147–156. Wiley-Blackwell, 2018.
4. Leng, W., He, G. and Jiang, W. Investigating the spatiotemporal variability and driving factors of artificial lighting in the beijing-tianjin-hebei region using remote sensing imagery and socioeconomic data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(11):1950, jun 2019. doi: 10.3390/ijerph16111950.
5. Pothukuchi, K. City light or star bright: A review of urban light pollution, impacts, and planning implications. *Journal of Planning Literature*, 36(2):155–169, jan 2021. doi: 10.1177/0885412220986421.
6. Morgan-Taylor, M. Regulating light pollution in europe: Legal challenges and ways forward. In Meier, J., Hasenöhr, U., Krause, K. and Pottharst, M., editors, *Urban Lighting, Light Pollution and Society*, chapter 9. Taylor & Francis, 2014.
7. Gaston, K.J., Gaston, S., Bennie, J. and Hopkins, J. Benefits and costs of artificial nighttime lighting of the environment. *Environmental Reviews*, 23(1):14–23, mar 2015. doi: 10.1139/er-2014-0041.
8. Stone, T. Light pollution: A case study in framing an environmental problem. *Ethics, Policy & Environment*, 20(3):279–293, sep 2017. doi: 10.1080/21550085.2017.1374010.
9. Kyba, C.C.M., Hänel, A. and Hölker, F. Redefining efficiency for outdoor lighting. *Energy Environ. Sci.*, 7(6):1806–1809, 2014. doi: 10.1039/c4ee00566j.
10. Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C.C.M., Elvidge, C.D., Baugh, K., Portnov, B.A., Rybnikova, N.A. and Furgoni, R. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6):e1600377, jun 2016. doi: 10.1126/sciadv.1600377.
11. Levin, N., Kyba, C.C., Zhang, Q., de Miguel, A.S., Román, M.O., Li, X., Portnov, B.A.,

- Molthan, A.L., Jechow, A., Miller, S.D., Wang, Z., Shrestha, R.M. and Elvidge, C.D. Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*, 237:111443, feb 2020. doi: 10.1016/j.rse.2019.111443.
12. Román, M.O., Wang, Z., Sun, Q., Kalb, V., Miller, S.D., Molthan, A., Schultz, L., Bell, J., Stokes, E.C., Pandey, B., Seto, K.C., Hall, D., Oda, T., Wolfe, R.E., Lin, G., Golpayegani, N., Devadiga, S., Davidson, C., Sarkar, S., Praderas, C. et al. NASA's black marble nighttime lights product suite. *Remote Sensing of Environment*, 210:113–143, jun 2018. doi: 10.1016/j.rse.2018.03.017.
 13. Falchi, F., Furgoni, R., Gallaway, T., Rybnikova, N., Portnov, B., Baugh, K., Cinzano, P. and Elvidge, C. Light pollution in USA and Europe: The good, the bad and the ugly. *Journal of Environmental Management*, 248:109227, oct 2019. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.06.128.
 14. de Miguel, A.S., Bennie, J., Rosenfeld, E., Dzurjak, S. and Gaston, K.J. First estimation of global trends in nocturnal power emissions reveals acceleration of light pollution. *Remote Sensing*, 13(16):3311, aug 2021. doi: 10.3390/rs13163311.
 15. Kolláth, Z., Száz, D. and Kolláth, K. Measurements and modelling of artificial sky brightness: Combining remote sensing from satellites and ground-based observations. *Remote Sensing*, 13(18):3653, sep 2021. doi: 10.3390/rs13183653.
 16. Zhao, Zhou, Li, Cao, He, Yu, Li, Elvidge, Cheng and Zhou. Applications of satellite remote sensing of nighttime light observations: Advances, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 11(17):1971, aug 2019. doi: 10.3390/rs11171971.
 17. Barentine, J.C., Walczak, K., Gyuk, G., Tarr, C. and Longcore, T. A case for a new satellite mission for remote sensing of night lights. *Remote Sensing*, 13(12):2294, jun 2021. doi: 10.3390/rs13122294.
 18. Kyba, C.C.M., Ruhtz, T., Fischer, J. and Hölker, F. Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems. *PLoS ONE*, 6(3):e17307, mar 2011. doi: 10.1371/journal.pone.0017307.
 19. Ścieżor, T. The impact of clouds on the brightness of the night sky. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 247:106962, may 2020. doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.106962.
 20. Jechow, A., Hölker, F. and Kyba, C.C.M. Using all-sky differential photometry to investigate how nocturnal clouds darken the night sky in rural areas. *Scientific Reports*, 9(1), feb 2019. doi: 10.1038/s41598-018-37817-8.
 21. Kocifaj, M. and Barentine, J.C. Air pollution mitigation can reduce the brightness of the night sky in and near cities. *Scientific Reports*, 11(1), July 2021. doi: 10.1038/s41598-021-94241-1.
 22. Liu, M., Li, W., Zhang, B., Hao, Q., Guo, X. and Liu, Y. Research on the influence of weather conditions on urban night light environment. *Sustainable Cities and Society*, 54: 101980, mar 2020. doi: 10.1016/j.scs.2019.101980.
 23. Aubé, M. Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1667): 20140117, may 2015. doi: 10.1098/rstb.2014.0117.
 24. Falchi, F. Campaign of sky brightness and extinction measurements using a portable CCD camera. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412(1):33–48, dec 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17845.x.
 25. Jechow and Hölker. Snowglow—the amplification of skyglow by snow and clouds can exceed full moon illuminance in suburban areas. *Journal of Imaging*, 5(8):69, aug 2019. doi: 10.3390/jimaging508069.
 26. Kocifaj, M. Ground albedo impacts on higher-order scattering spectral radiances of night sky. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 239:106670, dec 2019. doi: 10.1016/j.jqsrt.2019.106670.
 27. Wallner, S. and Kocifaj, M. Impacts of surface albedo variations on the night sky brightness – a numerical and experimental analysis. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 239:106648, dec 2019. doi: 10.1016/j.jqsrt.2019.106648.
 28. Zissis, G., Bertoldi, P. and Serrenho, T. *Update on the status of LED-lighting world market since 2018*. Publications Office, European Commission Joint Research Centre, 2021. doi: 10.2760/759859.
 29. de Miguel, A.S., Aubé, M., Zamorano, J., Kocifaj, M., Roby, J. and Tapia, C. Sky quality meter measurements in a colour-changing world. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(3):2966–2979, mar 2017. doi: 10.1093/mnras/stx145.
 30. Kolláth, Z., Száz, D., Kolláth, K. and Tong, K.P. Light pollution monitoring and sky colours. *Journal of Imaging*, 6(10):104, oct 2020. doi: 10.3390/jimaging6100104.
 31. Robles, J., Zamorano, J., Pascual, S., de Miguel, A.S., Gallego, J. and Gaston, K.J. Evolution of brightness and color of the night sky in Madrid. *Remote Sensing*, 13(8):1511, April 2021. doi: 10.3390/rs13081511.
 32. Luginbuhl, C.B., Boley, P.A. and Davis, D.R. The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 139:21–26, may 2014. doi: 10.1016/j.jqsrt.2013.12.004.
 33. Hung, L.W., Anderson, S.J., Pipkin, A. and Frstrup, K. Changes in night sky brightness after a countywide LED retrofit. *Journal of Environmental Management*, 292:112776, August 2021. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112776.
 34. Lamphar, H., Wallner, S. and Kocifaj, M. Modelled impacts of a potential light emitting diode lighting system conversion and the influence of an extremely polluted atmosphere in Mexico city. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, page 239980832110127, May 2021. doi: 10.1177/23998083211012702.
 35. McNaughton, E.J., Gaston, K.J., Beggs, J.R., Jones, D.N. and Stanley, M.C. Areas of ecological importance are exposed to risk from urban sky glow: Auckland, aotearoa-zealand as a case study. *Urban Ecosystems*, August 2021. doi: 10.1007/s11252-021-01149-9.
 36. Baddiley, C. Light pollution colour changes at MHAONB, from distant town conversions to blue-rich LED lighting, implications for rural UK skies. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 267:107574, jun 2021. doi: 10.1016/j.jqsrt.2021.107574.
 37. Green, R.F., Luginbuhl, C.B., Wainscoat, R.J. and Duriscoe, D. The growing threat of light pollution to ground-based observatories. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 30(1), jan 2022. doi: 10.1007/s00159-021-00138-3.
 38. Bhagavathula, R. and Gibbons, R.B. Light levels for parking facilities based on empirical evaluation of visual performance and user perceptions. *LEUKOS*, 16(2):115–136, feb 2019. doi: 10.1080/15502724.2018.1551724.
 39. Barentine, J.C., Walker, C.E., Kocifaj, M., Kundracik, F., Juan, A., Kanemoto, J. and Monrad, C.K. Skyglow changes over Tucson, Arizona, resulting from a municipal LED street lighting conversion. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 212: 10–23, June 2018. doi: 10.1016/j.jqsrt.2018.02.038.
 40. Ścieżor, T. Effect of street lighting on the urban and rural night-time radiance and the brightness of the night sky. *Remote Sensing*, 13(9):1654, apr 2021. doi: 10.3390/rs13091654.
 41. Bará, S., Falchi, F., Lima, R.C. and Pawley, M. Can we illuminate our cities and (still) see the stars? *International Journal of Sustainable Lighting*, 23(2):58–69, oct 2021. doi: 10.26607/ijsl.v23i2.113.
 42. Pásková, M., Budinská, N. and Zelenka, J. Astro-tourism—exceeding limits of the earth and tourism definitions? *Sustainability*, 13(1):373, jan 2021. doi: 10.3390/su13010373.
 43. Collison, F.M. and Poe, K. "Astronomical tourism": The astronomy and dark sky program at Bryce Canyon National Park. *Tourism Management Perspectives*, 7:1–15, jul 2013. doi: 10.1016/j.tmp.2013.01.002.
 44. Rodrigues, A.L.O., Rodrigues, A. and Peroff, D.M. The sky and sustainable tourism development: A case study of a dark sky reserve implementation in Alqueva. *International Journal of Tourism Research*, 17(3):292–302, jan 2014. doi: 10.1002/ijtr.1987.
 45. Mitchell, D. and Gallaway, T. Dark sky tourism: economic impacts on the Colorado Plateau economy, USA. *Tourism Review*, 74(4):930–942, sep 2019. doi: 10.1108/tr-10-2018-0146.
 46. Crumey, A. Human contrast threshold and astronomical visibility. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442(3):2600–2619, jun 2014. doi: 10.1093/mnras/stu992.
 47. Duriscoe, D.M. Photometric indicators of visual night sky quality derived from all-sky brightness maps. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 181:33–45, sep 2016. doi: 10.1016/j.jqsrt.2016.02.022.
 48. Hung, L.W. Identifying distinct metrics for assessing night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 511(4):5683–5688, sep 2021. doi: 10.1093/mnras/stab2662.
 49. Barentine, J. Going for the gold : Quantifying and ranking visual night sky quality in international dark sky places. *International Journal of Sustainable Lighting*, 18:9–15, dec 2016. doi: 10.26607/ijsl.v18i0.16.
 50. Barentine, J.C. Methods for assessment and monitoring of light pollution around ecologically sensitive sites. *Journal of Imaging*, 5(5):54, may 2019. doi: 10.3390/jimaging5050054.
 51. Kyba, C.C.M. and Coesfeld, J. Satellite observations show reductions in light emissions at international dark sky places during 2012–2020. *International Journal of Sustainable Lighting*, 23(2):51–57, oct 2021. doi: 10.26607/ijsl.v23i2.111.
 52. Beier, P. Effects of artificial night lighting on terrestrial mammals. In Rich, C. and Longcore, T., editors, *Ecological consequences of artificial night lighting*, pages 19–42, Washington, D.C., 2005. Island Press.
 53. Dice, L.R. Minimum intensities of illumination under which owls can find dead prey by sight. *The American Naturalist*, 79(784):385–416, Sep-Oct 1945.
 54. Buchanan, B.W. Low-illumination prey detection by squirrel treefrogs. *Journal of Herpetology*, 32(2):270, jun 1998. doi: 10.2307/1565308.
 55. Kelber, A., Warrant, E.J., Pfaff, M., Wallén, R., Theobald, J.C., Weislo, W.T. and Raguso, R.A. Light intensity limits foraging activity in nocturnal and crepuscular bees. *Behavioral Ecology*, 17(1):63–72, nov 2005. doi: 10.1093/beheco/arj001.
 56. Dacke, M., Baird, E., Byrne, M., Scholtz, C.H. and Warrant, E.J. Dung beetles use the milky way for orientation. *Current Biology*, 23(4):298–300, feb 2013. doi: 10.1016/j.cub.2012.12.034.
 57. Hagen, O., Santos, R.M., Schindwein, M.N. and Viviani, V.R. Artificial night lighting reduces firefly (coleoptera: Lampyridae) occurrence in sorocaba, Brazil. *Advances in Entomology*, 03(01):24–32, 2015. doi: 10.4236/ae.2015.31004.
 58. Sanders, D., Frago, E., Kehoe, R., Patterson, C. and Gaston, K.J. A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night. *Nature Ecology & Evolution*, 5(1):74–81, nov 2020. doi: 10.1038/s41559-020-01322-x.
 59. Falcón, J., Torriglia, A., Attia, D., Viénot, F., Gronfier, C., Behar-Cohen, F., Martinsons, C. and Hicks, D. Exposure to artificial light at night and the consequences for flora, fauna, and ecosystems. *Frontiers in Neuroscience*, 14, nov 2020. doi: 10.3389/fnins.2020.602796.
 60. Rodríguez, A., Holmes, N.D., Ryan, P.G., Wilson, K.J., Faulquier, L., Murrillo, Y., Raine, A.F., Penniman, J.F., Neves, V., Rodríguez, B., Negro, J.J., Chiaradia, A., Dann, P., Anderson, T., Metzger, B., Shirai, M., Deppe, L., Wheeler, J., Hodum, P., Gouveia, C. et al. Seabird mortality induced by land-based artificial lights. *Conservation Biology*, 31(5):986–1001, may 2017. doi: 10.1111/cobi.12900.
 61. de Jong, M., van den Eertwegh, L., Beskers, R.E., de Vries, P.P., Spoelstra, K. and Visser, M.E. Timing of avian breeding in an urbanised world. *Ardea*, 106(1):31, may 2018. doi: 10.5253/arde.v106i1.a4.
 62. Adams, C.A., Fernández-Juricic, E., Bayne, E.M. and Clair, C.C.S. Effects of artificial light on bird movement and distribution: a systematic map. *Environmental Evidence*, 10(1), dec 2021. doi: 10.1186/s13750-021-00246-8.
 63. Brüning, A., Kloas, W., Preuer, T. and Hölker, F. Influence of artificially induced light pollution on the hormone system of two common fish species, perch and roach, in a rural habitat. *Conservation Physiology*, 6(1), jan 2018. doi: 10.1093/conphys/coy016.
 64. O'Connor, J., Fobert, E., Besson, M., Jacob, H. and Lecchini, D. Live fast, die young: Behavioural and physiological impacts of light pollution on a marine fish during larval recruitment. *Marine Pollution Bulletin*, 146:908–914, sep 2019. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.05.038.

65. Kupprat, F., Hölker, F., Knopf, K., Preuer, T. and Kloas, W. Innate immunity, oxidative stress and body indices of eurasian perch *perca fluviatilis* after two weeks of exposure to artificial light at night. *Journal of Fish Biology*, 99(1):118–130, mar 2021. doi: 10.1111/jfb.14703.
66. Robert, K.A., Lesku, J.A., Partecke, J. and Chambers, B. Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1816):20151745, oct 2015. doi: 10.1098/rspb.2015.1745.
67. Hoffmann, J., Palme, R. and Eccard, J.A. Long-term dim light during nighttime changes activity patterns and space use in experimental small mammal populations. *Environmental Pollution*, 238:844–851, jul 2018. doi: 10.1016/j.envpol.2018.03.107.
68. Kumari, R., Verma, V., Kronfeld-Schor, N. and Singaravel, M. Differential response of diurnal and nocturnal mammals to prolonged altered light-dark cycle: a possible role of mood associated endocrine, inflammatory and antioxidant system. *Chronobiology International*, 38(11):1618–1630, jun 2021. doi: 10.1080/07420528.2021.1937200.
69. Kamrowski, R., Limpus, C., Moloney, J. and Hamann, M. Coastal light pollution and marine turtles: assessing the magnitude of the problem. *Endangered Species Research*, 19(1): 85–98, nov 2012. doi: 10.3354/esr00462.
70. Zheleva, M. The dark side of light: light pollution kills leatherback turtle hatchlings. *Biodiscovery*, sep 2012. doi: 10.7750/biodiscovery.2012.3.4.
71. Baxter-Gilbert, J., Baider, C., Florens, F.V., Hawlitschek, O., Mohan, A.V., Mohanty, N.P., Wagener, C., Webster, K.C. and Riley, J.L. Nocturnal foraging and activity by diurnal lizards: Six species of day geckos (*phelsuma* spp.) using the night-light niche. *Austral Ecology*, 46(3):501–506, feb 2021. doi: 10.1111/aec.13012.
72. Dananay, K.L. and Benard, M.F. Artificial light at night decreases metamorphic duration and juvenile growth in a widespread amphibian. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1882):20180367, jul 2018. doi: 10.1098/rspb.2018.0367.
73. Deng, K., Zhu, B.C., Zhou, Y., Chen, Q.H., Wang, T.L., Wang, J.C. and Cui, J.G. Mate choice decisions of female serrate-legged small treefrogs are affected by ambient light under natural, but not enhanced artificial nocturnal light conditions. *Behavioural Processes*, 169:103997, dec 2019. doi: 10.1016/j.beproc.2019.103997.
74. Dias, K.S., Dosso, E.S., Hall, A.S., Schuch, A.P. and Tozetti, A.M. Ecological light pollution affects anuran calling season, daily calling period, and sensitivity to light in natural brazilian wetlands. *The Science of Nature*, 106(7–8), jul 2019. doi: 10.1007/s00114-019-1640-y.
75. Macgregor, C.J., Evans, D.M., Fox, R. and Pocock, M.J.O. The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. *Global Change Biology*, 23(2):697–707, jul 2016. doi: 10.1111/gcb.13371.
76. Davies, T.W., Bennie, J., Cruse, D., Blumgart, D., Inger, R. and Gaston, K.J. Multiple night-time light-emitting diode lighting strategies impact grassland invertebrate assemblages. *Global Change Biology*, 23(7):2641–2648, jan 2017. doi: 10.1111/gcb.13615.
77. Bennie, J., Davies, T.W., Cruse, D., Inger, R. and Gaston, K.J. Artificial light at night causes top-down and bottom-up trophic effects on invertebrate populations. *Journal of Applied Ecology*, 55(6):2698–2706, aug 2018. doi: 10.1111/1365-2664.13240.
78. Desouhant, E., Gomes, E., Mondy, N. and Amat, I. Mechanistic, ecological, and evolutionary consequences of artificial light at night for insects: review and perspective. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 167(1):37–58, jan 2019. doi: 10.1111/een.12754.
79. Bennie, J., Davies, T.W., Cruse, D. and Gaston, K.J. Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology*, 104(3):611–620, feb 2016. doi: 10.1111/1365-2745.12551.
80. Škvareninová, J., Tuhárska, M., Škvarenina, J., Babálová, D., Slobodníková, L., Slobodník, B., Středová, H. and Mindáš, J. Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. *Moravian Geographical Reports*, 25(4):282–290, dec 2017. doi: 10.1515/mgr-2017-0024.
81. Brelsford, C.C. and Robson, T.M. Blue light advances bud burst in branches of three deciduous tree species under short-day conditions. *Trees*, 32(4):1157–1164, mar 2018. doi: 10.1007/s00468-018-1684-1.
82. Dani, M., Molnár, P. and Skribanek, A. The sensitivity of herbaceous plants to light pollution. *Acta Universitatis de Carolo Eszterházy Nominatae. Sectio Biologicae*, 46:173–181, 2021. doi: 10.33041/actauniversitaterhazybiol.2021.46.173.
83. Khanduri, M. and Saxena, A. Ecological light pollution: Consequences for the aquatic ecosystem. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 8(3):1–5, 2020.
84. Davies, T.W., McKee, D., Fishwick, J., Tidau, S. and Smyth, T. Biologically important artificial light at night on the seafloor. *Scientific Reports*, 10(1), jul 2020. doi: 10.1038/s41598-020-69461-6.
85. Tidau, S., Smyth, T., McKee, D., Wiedenmann, J., D'Angelo, C., Wilcockson, D., Ellison, A., Grimmer, A.J., Jenkins, S.R., Widdicombe, S., Queirós, A.M., Talbot, E., Wright, A. and Davies, T.W. Marine artificial light at night: An empirical and technical guide. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(9):1588–1601, jul 2021. doi: 10.1111/2041-210x.13653.
86. Berge, J., Geoffroy, M., Daase, M., Cottier, F., Priou, P., Cohen, J.H., Johnsen, G., McKee, D., Kostakis, I., Renaud, P.E., Vogedes, D., Anderson, P., Last, K.S. and Gauthier, S. Artificial light during the polar night disrupts arctic fish and zooplankton behaviour down to 200 m depth. *Communications Biology*, 3(1), mar 2020. doi: 10.1038/s42003-020-0807-6.
87. Davies, T.W., Bennie, J., Inger, R., Ibarra, N.H. and Gaston, K.J. Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? *Global Change Biology*, 19(5):1417–1423, mar 2013. doi: 10.1111/gcb.12166.
88. Johnsen, S., Kelber, A., Warrant, E., Sweeney, A.M., Widdler, E.A., Lee, R.L. and Hernández-Andrés, J. Crepuscular and nocturnal illumination and its effects on color perception by the nocturnal hawkmoth *deilephila elpenor*. *Journal of Experimental Biology*, 209(5):789–800, mar 2006. doi: 10.1242/jeb.02053.
89. Longcore, T., Rodríguez, A., Witherington, B., Penniman, J.F., Herf, L. and Herf, M. Rapid assessment of lamp spectrum to quantify ecological effects of light at night. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 329(8-9):511–521, jun 2018. doi: 10.1002/jez.2184.
90. Svechikina, A., Portnov, B.A. and Trop, T. The impact of artificial light at night on human and ecosystem health: a systematic literature review. *Landscape Ecology*, 35(8):1725–1742, jun 2020. doi: 10.1007/s10980-020-01053-1.
91. Farnworth, B., Innes, J. and Waas, J.R. Converting predation cues into conservation tools: The effect of light on mouse foraging behaviour. *PLOS ONE*, 11(1):e0145432, jan 2016. doi: 10.1371/journal.pone.0145432.
92. Silva, A.D., Díez-Méndez, D. and Kempenaers, B. Effects of experimental night lighting on the daily timing of winter foraging in common european songbirds. *Journal of Avian Biology*, 48(6):862–871, apr 2017. doi: 10.1111/jav.01232.
93. Leveau, L.M. Artificial light at night (ALAN) is the main driver of nocturnal feral pigeon (*columba livia f. domestica*) foraging in urban areas. *Animals*, 10(4):554, mar 2020. doi: 10.3390/ani10040554.
94. Stone, E.L., Jones, G. and Harris, S. Street lighting disturbs commuting bats. *Current Biology*, 19(13):1123–1127, jul 2009. doi: 10.1016/j.cub.2009.05.058.
95. Kurvers, R.H.J.M., Drägestein, J., Hölker, F., Jechow, A., Krause, J. and Bierbach, D. Artificial light at night affects emergence from a refuge and space use in guppies. *Scientific Reports*, 8(1), sep 2018. doi: 10.1038/s41598-018-32466-3.
96. Agarwal, N., Srivastava, S., Malik, S., Rani, S. and Kumar, V. Altered light conditions during spring: effects on timing of migration and reproduction in migratory redheaded bunting (*emberiza bruniceps*). *Biological Rhythm Research*, 46(5):647–657, may 2015. doi: 10.1080/09291016.2015.1046245.
97. Tallec, T.L., Théry, M. and Perret, M. Melatonin concentrations and timing of seasonal reproduction in male mouse lemur (*microcebus murinus*) exposed to light pollution. *Journal of Mammalogy*, 97(3):753–760, jan 2016. doi: 10.1093/jmammal/gyw003.
98. Dominoni, D.M., Jensen, J.K., Jong, M., Visser, M.E. and Spoelstra, K. Artificial light at night, in interaction with spring temperature, modulates timing of reproduction in a passerine bird. *Ecological Applications*, 30(3), jan 2020. doi: 10.1002/eap.2062.
99. Torres, D., Tidau, S., Jenkins, S. and Davies, T. Artificial skyglow disrupts celestial migration at night. *Current Biology*, 30(12):R696–R697, jun 2020. doi: 10.1016/j.cub.2020.05.002.
100. Geffen, K.G.V., Groot, A.T., Grunsven, R.H.A.V., Donners, M., Berendse, F. and Veenendaal, E.M. Artificial night lighting disrupts sex pheromone in a noctuid moth. *Ecological Entomology*, 40(4):401–408, apr 2015. doi: 10.1111/een.12202.
101. Borges, R.M. Dark matters: Challenges of nocturnal communication between plants and animals in delivery of pollination services. *Yale Journal of Biology and Medicine*, 91:33–42, 2018.
102. Hopkins, G.R., Gaston, K.J., Visser, M.E., Elgar, M.A. and Jones, T.M. Artificial light at night as a driver of evolution across urban-rural landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(8):472–479, sep 2018. doi: 10.1002/fee.1828.
103. Keinath, S., Hölker, F., Müller, J. and Rödel, M.O. Impact of light pollution on moth morphology—a 137-year study in germany. *Basic and Applied Ecology*, 56:1–10, nov 2021. doi: 10.1016/j.baaec.2021.05.004.
104. May, D., Shidemantle, G., Melnick-Kelley, Q., Crane, K. and Hua, J. The effect of intensified illumination and artificial light at night on fitness and susceptibility to abiotic and biotic stressors. *Environmental Pollution*, 251:600–608, aug 2019. doi: 10.1016/j.envpol.2019.05.016.
105. Walker, W.H., Meléndez-Fernández, O.H., Nelson, R.J. and Reiter, R.J. Global climate change and invariable photoperiods: A mismatch that jeopardizes animal fitness. *Ecology and Evolution*, 9(17):10044–10054, aug 2019. doi: 10.1002/ece3.5537.
106. Lian, X., Jiao, L., Zhong, J., Jia, Q., Liu, J. and Liu, Z. Artificial light pollution inhibits plant phenology advance induced by climate warming. *Environmental Pollution*, 291:118110, dec 2021. doi: 10.1016/j.envpol.2021.118110.
107. Durrant, J., Green, M.P. and Jones, T.M. Dim artificial light at night reduces the cellular immune response of the black field cricket, *teleogryllus commodus*. *Insect Science*, 27(3): 571–582, mar 2019. doi: 10.1111/1744-7917.12665.
108. Thoenen, J., Ripper, D. and Duke, E. Light pollution and immunosuppression: Determining the role of artificial lighting in coccidiosis in non-migratory birds. *The Bluebird*, 86(3):131–140, 2019.
109. Walker, W.H., Bumgarner, J.R., Becker-Krail, D.D., May, L.E., Liu, J.A. and Nelson, R.J. Light at night disrupts biological clocks, calendars, and immune function. *Seminars in Immunopathology*, nov 2021. doi: 10.1007/s00281-021-00899-0.
110. Cissé, Y.M., Russart, K.L. and Nelson, R.J. Parental exposure to dim light at night prior to mating alters offspring adaptive immunity. *Scientific Reports*, 7(1), mar 2017. doi: 10.1038/srep45497.
111. Cissé, Y.M., Russart, K. and Nelson, R.J. Exposure to dim light at night prior to conception attenuates offspring innate immune responses. *PLOS ONE*, 15(4):e0231140, apr 2020. doi: 10.1371/journal.pone.0231140.
112. Becker, D.J., Singh, D., Pan, Q., Montoure, J.D., Talbot, K.M., Wanamaker, S.M. and Kettererson, E.D. Artificial light at night amplifies seasonal relapse of haemosporidian parasites in a widespread songbird. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1935):20201831, sep 2020. doi: 10.1098/rspb.2020.1831.
113. Diltner, M.A., Francis, C.D., Barber, J.R., Stoner, D.C., Seymoure, B.M., Fristrup, K.M. and Carter, N.H. Assessing the vulnerabilities of vertebrate species to light and noise pollution: Expert surveys illuminate the impacts on specialist species. *Integrative and Comparative Biology*, 61(3):1202–1215, jul 2021. doi: 10.1093/icb/ibab091.
114. Buxton, R.T., Seymoure, B.M., White, J., Angeloni, L.M., Crooks, K.R., Fristrup, K., McKenna, M.F. and Wittermyer, G. The relationship between anthropogenic light and noise in u.s. national parks. *Landscape Ecology*, 35(6):1371–1384, may 2020. doi: 10.1007/s10980-020-01020-w.
115. Willems, J.S., Phillips, J.N. and Francis, C.D. Artificial light at night and anthropogenic noise alter the foraging activity and structure of vertebrate communities. *Science of The*

- Total Environment*, 805:150223, jan 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150223.
116. Halfwerk, W. and Jerem, P. A systematic review of research investigating the combined ecological impact of anthropogenic noise and artificial light at night. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, nov 2021. doi: 10.3389/fevo.2021.765950.
 117. Russart, K.L. and Nelson, R.J. Light at night as an environmental endocrine disruptor. *Physiology & Behavior*, 190:82–89, jun 2018. doi: 10.1016/j.physbeh.2017.08.029.
 118. Yang, Y., Liu, Q., Wang, T. and Pan, J. Wavelength-specific artificial light disrupts molecular clock in avian species: A power-calibrated statistical approach. *Environmental Pollution*, 265:114206, oct 2020. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114206.
 119. Foster, J.J., Kirwan, J.D., el Jundi, B., Smolka, J., Khaldy, L., Baird, E., Byrne, M.J., Nilsson, D.E., Johnsen, S. and Dacke, M. Orienting to polarized light at night – matching lunar skylight to performance in a nocturnal beetle. *The Journal of Experimental Biology*, 222(2):jeb188532, dec 2018. doi: 10.1242/jeb.188532.
 120. Lao, S., Robertson, B.A., Anderson, A.W., Blair, R.B., Eckles, J.W., Turner, R.J. and Loss, S.R. The influence of artificial light at night and polarized light on bird-building collisions. *Biological Conservation*, 241(1):108358, jan 2020. doi: 10.1016/j.biocon.2019.108358.
 121. Szaz, D., Horvath, G., Barta, A., Robertson, B.A., Farkas, A., Egri, A., Tarjanyi, N., Racz, G. and Kriska, G. Lamp-lit bridges as dual light-traps for the night-swarming mayfly, ephoron virgo: Interaction of polarized and unpolarized light pollution. *PLOS ONE*, 10(3):e0121194, mar 2015. doi: 10.1371/journal.pone.0121194.
 122. Fraleigh, D.C., Heitmann, J.B. and Robertson, B.A. Ultraviolet polarized light pollution and evolutionary traps for aquatic insects. *Animal Behaviour*, 180:239–247, oct 2021. doi: 10.1016/j.anbehav.2021.08.006.
 123. Horváth, G., Kriska, G., Malik, P. and Robertson, B. Polarized light pollution: a new kind of ecological photopollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(6):317–325, aug 2009. doi: 10.1890/080129.
 124. Russart, K.L. and Nelson, R.J. Artificial light at night alters behavior in laboratory and wild animals. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 329(8-9):401–408, may 2018. doi: 10.1002/jez.2173.
 125. Gaston, K.J., Duffy, J.P., Gaston, S., Bennie, J. and Davies, T.W. Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences. *Oecologia*, 176(4):917–931, sep 2014. doi: 10.1007/s00442-014-3088-2.
 126. Maggi, E., Bongiorno, L., Fontanini, D., Capocchi, A., Bello, M.D., Giacomelli, A. and Benedetti-Cecchi, L. Artificial light at night erases positive interactions across trophic levels. *Functional Ecology*, 34(3):694–706, dec 2019. doi: 10.1111/1365-2435.13485.
 127. Fisher, D.N., Kilgour, R.J., Siracusa, E.R., Foote, J.R., Hobson, E.A., Montiglio, P.O., Saltz, J.B., Wey, T.W. and Wice, E.W. Anticipated effects of abiotic environmental change on intraspecific social interactions. *Biological Reviews*, 96(6):2661–2693, jul 2021. doi: 10.1111/brv.12772.
 128. Grubisic, M. and van Grunsven, R.H. Artificial light at night disrupts species interactions and changes insect communities. *Current Opinion in Insect Science*, 47:136–141, oct 2021. doi: 10.1016/j.cois.2021.06.007.
 129. Sullivan, S.M.P., Hossler, K. and Meyer, L.A. Artificial lighting at night alters aquatic-riparian invertebrate food webs. *Ecological Applications*, 29(1), dec 2018. doi: 10.1002/eap.1821.
 130. Parkinson, E., Lawson, J. and Tieg, S.D. Artificial light at night at the terrestrial-aquatic interface: Effects on predators and fluxes of insect prey. *PLOS ONE*, 15(10):e0240138, oct 2020. doi: 10.1371/journal.pone.0240138.
 131. Farnworth, B., Meitern, R., Innes, J. and Waas, J.R. Increasing predation risk with light reduces speed, exploration and visit duration of invasive ship rats (*Rattus rattus*). *Scientific Reports*, 9(1), mar 2019. doi: 10.1038/s41598-019-39711-3.
 132. Russo, D., Cosentino, F., Festa, F., Benedetta, F.D., Pejic, B., Cerretti, P. and Ancillotto, L. Artificial illumination near rivers may alter bat-insect trophic interactions. *Environmental Pollution*, 252:1671–1677, sep 2019. doi: 10.1016/j.envpol.2019.06.105.
 133. McMunn, M.S., Yang, L.H., Ansalmo, A., Bucknam, K., Claret, M., Clay, C., Cox, K., Dungey, D.R., Jones, A., Kim, A.Y., Kubacki, R., Le, R., Martinez, D., Reynolds, B., Schroder, J. and Wood, E. Artificial light increases local predator abundance, predation rates, and herbivory. *Environmental Entomology*, 48(6):1331–1339, sep 2019. doi: 10.1093/ee/nvz103.
 134. Katz, N., Pruitt, J.N. and Scharf, I. The complex effect of illumination, temperature, and thermal acclimation on habitat choice and foraging behavior of a pit-building wormlion. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 71(9), aug 2017. doi: 10.1007/s00265-017-2362-9.
 135. McLay, L.K., Nagarajan-Radha, V., Green, M.P. and Jones, T.M. Dim artificial light at night affects mating, reproductive output, and reactive oxygen species in *Drosophila melanogaster*. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 329(8-9):419–428, may 2018. doi: 10.1002/jez.2164.
 136. Fobert, E.K., da Silva, K.B. and Swearer, S.E. Artificial light at night causes reproductive failure in clownfish. *Biology Letters*, 15(7):20190272, jul 2019. doi: 10.1098/rsbl.2019.0272.
 137. Thompson, E.K., Cullinan, N.L., Jones, T.M. and Hopkins, G.R. Effects of artificial light at night and male calling on movement patterns and mate location in field crickets. *Animal Behaviour*, 158:183–191, dec 2019. doi: 10.1016/j.anbehav.2019.10.016.
 138. Shlesinger, T. and Loya, Y. Breakdown in spawning synchrony: A silent threat to coral persistence. *Science*, 365(6457):1002–1007, sep 2019. doi: 10.1126/science.aax0110.
 139. Lorne, J. and Salmon, M. Effects of exposure to artificial lighting on orientation of hatching sea turtles on the beach and in the ocean. *Endangered Species Research*, 3:23–30, 2007. doi: 10.3354/esr003023.
 140. Bolshakov, C.V., Bulyuk, V.N., Sinelschikova, A.Y. and Vorotkov, M.V. Influence of the vertical light beam on numbers and flight trajectories of night-migrating songbirds. *Avian Ecology and Behaviour*, 24:35–49, 2013.
 141. Cammaerts, M.C. and Cammaerts, R. Effect of nocturnal lighting on an ant's ethological and physiological traits. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 4(5), oct 2019. doi: 10.15406/mojes.2019.04.00156.
 142. Lacoëuilhe, A., Machon, N., Julien, J.F., Bocq, A.L. and Kerbiriou, C. The influence of low intensities of light pollution on bat communities in a semi-natural context. *PLOS ONE*, 9(10):e103042, oct 2014. doi: 10.1371/journal.pone.0103042.
 143. Firebaugh, A. and Haynes, K.J. Light pollution may create demographic traps for nocturnal insects. *Basic and Applied Ecology*, 34:118–125, feb 2019. doi: 10.1016/j.baae.2018.07.005.
 144. Murphy, S.M., Vyas, D.K., Sher, A.A. and Grenis, K. Light pollution affects invasive and native plant traits important to plant competition and herbivorous insects. *Biological Invasions*, 24(3):599–602, nov 2021. doi: 10.1007/s10530-021-02670-w.
 145. Parkins, K.L., Elbin, S.B. and Barnes, E. Light, glass, and bird–building collisions in an urban park. *Northeastern Naturalist*, 22(1):84–94, mar 2015. doi: 10.1656/045.022.0113.
 146. Hüpopp, O., Hüpopp, K., Dierschke, J. and Hill, R. Bird collisions at an offshore platform in the north sea. *Bird Study*, 63(1):73–82, jan 2016. doi: 10.1080/00063657.2015.1134440.
 147. Voigt, C.C., Roelcke, M., Marggraf, L., Pétersons, G. and Voigt-Heucke, S.L. Migratory bats respond to artificial green light with positive phototaxis. *PLOS ONE*, 12(5):e0177748, may 2017. doi: 10.1371/journal.pone.0177748.
 148. Krafft, B.A. and Krag, L.A. Antarctic krill (*euphausia superba*) exhibit positive phototaxis to white LED light. *Polar Biology*, 44(3):483–489, feb 2021. doi: 10.1007/s00300-021-02814-7.
 149. Syposz, M., Padgett, O., Willis, J., Doren, B.M.V., Gillies, N., Fayet, A.L., Wood, M.J., Alejo, A. and Guilford, T. Avoidance of different durations, colours and intensities of artificial light by adult seabirds. *Scientific Reports*, 11(1), sep 2021. doi: 10.1038/s41598-021-97986-x.
 150. Vowles, A.S. and Kemp, P.S. Artificial light at night (ALAN) affects the downstream movement behaviour of the critically endangered european eel, *anguilla anguilla*. *Environmental Pollution*, 274:116585, apr 2021. doi: 10.1016/j.envpol.2021.116585.
 151. Hauptfleisch, M. Arthropod phototaxis and its possible effect on bird strike risk at two namibian airports. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(4):957–965, Dec 2015. doi: 10.15666/aecer/1304_957965.
 152. van Grunsven, R.H., Creemers, R., Joosten, K., Donners, M. and Veenendaal, E.M. Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle. *Amphibia-Reptilia*, 38(1):49–55, 2017. doi: 10.1163/15685381-00003081.
 153. Kühne, J.L., van Grunsven, R.H.A., Jechow, A. and Hölker, F. Impact of different wavelengths of artificial light at night on phototaxis in aquatic insects. *Integrative and Comparative Biology*, 61(3):1182–1190, jun 2021. doi: 10.1093/icb/ibab149.
 154. Koen, E.L., Minnaar, C., Roever, C.L. and Boyles, J.G. Emerging threat of the 21st century lightscape to global biodiversity. *Global Change Biology*, 24(6):2315–2324, apr 2018. doi: 10.1111/gcb.14146.
 155. Garrett, J.K., Donald, P.F. and Gaston, K.J. Skyglow extends into the world's key biodiversity areas. *Animal Conservation*, 23(2):153–159, feb 2019. doi: 10.1111/acv.12480.
 156. Giavi, E., Blösch, S., Schuster, G. and Knop, E. Artificial light at night can modify ecosystem functioning beyond the lit area. *Scientific Reports*, 10(1), jul 2020. doi: 10.1038/s41598-020-68667-y.
 157. Boyes, D.H., Evans, D.M., Fox, R., Parsons, M.S. and Pocock, M.J.O. Street lighting has detrimental impacts on local insect populations. *Science Advances*, 7(35), aug 2021. doi: 10.1126/sciadv.abi8322.
 158. Murphy, S.M., Vyas, D.K., Hoffman, J.L., Jenck, C.S., Washburn, B.A., Hunnicutt, K.E., Davidson, A., Andersen, J.M., Bennet, R.K., Gifford, A., Herrera, M., Lawler, B., Lorman, S., Peacock, V., Walker, L., Watkins, E., Wilkinson, L., Williams, Z. and Tinghiella, R.M. Streetlights positively affect the presence of an invasive grass species. *Ecology and Evolution*, 11(15):10320–10326, jul 2021. doi: 10.1002/ece3.7835.
 159. Seymoure, B.M., Linares, C. and White, J. Connecting spectral radiometry of anthropogenic light sources to the visual ecology of organisms. *Journal of Zoology*, 308(2): 93–110, feb 2019. doi: 10.1111/jzo.12656.
 160. Wiltshcko, W. and Wiltshcko, R. Magnetic orientation in birds. *Journal of Experimental Biology*, 199(1):29–38, jan 1996. doi: 10.1242/jeb.199.1.29.
 161. Cochran, W.W., Mouritsen, H. and Wikelski, M. Migrating songbirds recalibrate their magnetic compass daily from twilight cues. *Science*, 304(5669):405–408, apr 2004. doi: 10.1126/science.1095844.
 162. Wiltshcko, R., Stapput, K., Thalau, P. and Wiltshcko, W. Directional orientation of birds by the magnetic field under different light conditions. *Journal of The Royal Society Interface*, 7(suppl_2), oct 2009. doi: 10.1098/rsif.2009.0367.focus.
 163. Wiltshcko, W., Munro, U., Ford, H. and Wiltshcko, R. Red light disrupts magnetic orientation of migratory birds. *Nature*, 364(6437):525–527, aug 1993. doi: 10.1038/364525a0.
 164. Sorte, F.A.L., Fink, D., Buler, J.J., Farnsworth, A. and Cabrera-Cruz, S.A. Seasonal associations with urban light pollution for nocturnally migrating bird populations. *Global Change Biology*, 23(11):4609–4619, jul 2017. doi: 10.1111/gcb.13792.
 165. Horton, K.G., Nilsson, C., Doren, B.M.V., Sorte, F.A.L., Dokter, A.M. and Farnsworth, A. Bright lights in the big cities: migratory birds' exposure to artificial light. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(4):209–214, apr 2019. doi: 10.1002/fee.2029.
 166. Cabrera-Cruz, S.A., Larkin, R.P., Gimpel, M.E., Gruber, J.G., Zenzal, T.J. and Buler, J.J. Potential effect of low-rise, downcast artificial lights on nocturnally migrating land birds. *Integrative and Comparative Biology*, 61(3):1216–1236, jul 2021. doi: 10.1093/icb/ibab154.
 167. Nichols, K.S., Homayoun, T., Eckles, J. and Blair, R.B. Bird-building collision risk: An assessment of the collision risk of birds with buildings by phylogeny and behavior using two citizen-science datasets. *PLOS ONE*, 13(8):e0201558, aug 2018. doi: 10.1371/journal.pone.0201558.
 168. Cabrera-Cruz, S.A., Cohen, E.B., Smolinsky, J.A. and Buler, J.J. Artificial light at night is related to broad-scale stopover distributions of nocturnally migrating landbirds along the yucatan peninsula, mexico. *Remote Sensing*, 12(3):395, jan 2020. doi: 10.3390/rs12030395.

169. Cabrera-Cruz, S.A., Smolinsky, J.A., McCarthy, K.P. and Buler, J.J. Urban areas affect flight altitudes of nocturnally migrating birds. *Journal of Animal Ecology*, 88(12):1873–1887, aug 2019. doi: 10.1111/1365-2656.13075.
170. Doren, B.M.V., Horton, K.G., Dokter, A.M., Klinck, H., Elbin, S.B. and Farnsworth, A. High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(42):11175–11180, oct 2017. doi: 10.1073/pnas.1708574114.
171. Rydin, C. and Bolinder, K. Moonlight pollination in the gymnosperm ephedra (gnetales). *Biology Letters*, 11(4):20140993, apr 2015. doi: 10.1098/rsbl.2014.0993.
172. Grubisic, M., van Grunsven, R., Kyba, C., Manfrin, A. and Höller, F. Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter? *Annals of Applied Biology*, 173(2):180–189, jun 2018. doi: 10.1111/aab.12440.
173. Briolat, E.S., Gaston, K.J., Bennie, J., Rosenfeld, E.J. and Troscianko, J. Artificial nighttime lighting impacts visual ecology links between flowers, pollinators and predators. *Nature Communications*, 12(1), jul 2021. doi: 10.1038/s41467-021-24394-0.
174. Wilson, A.A., Seymoure, B.M., Jaeger, S., Milstead, B., Payne, H., Peria, L., Vosbigian, R.A. and Francis, C.D. Direct and ambient light pollution alters recruitment for a diurnal plant–pollinator system. *Integrative and Comparative Biology*, 61(3):1122–1133, mar 2021. doi: 10.1093/icb/cab010.
175. Cordeiro, G.D., Liporoni, R., Caetano, C.A., Krug, C., Martínez-Martínez, C.A., Martins, H.O.J., Cardoso, R.K.O.A., Araujo, F.F., Araújo, P.C.S., Oliveira, R., Schliendwin, C., Warrant, E.J., Dötterl, S. and dos Santos, I.A. Nocturnal bees as crop pollinators. *Agronomy*, 11(5):1014, may 2021. doi: 10.3390/agronomy11051014.
176. Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., Gerpe, C., Hörler, M. and Fontaine, C. Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, 548(7666):206–209, aug 2017. doi: 10.1038/nature23288.
177. Owens, A.C., Cochard, P., Durrant, J., Farnworth, B., Perkin, E.K. and Seymoure, B. Light pollution is a driver of insect declines. *Biological Conservation*, 241:108259, jan 2020. doi: 10.1016/j.biocon.2019.108259.
178. Boyes, D.H., Evans, D.M., Fox, R., Parsons, M.S. and Pocock, M.J.O. Is light pollution driving moth population declines? a review of causal mechanisms across the life cycle. *Insect Conservation and Diversity*, sep 2020. doi: 10.1111/icad.12447.
179. Macgregor, C.J., Pocock, M.J.O., Fox, R. and Evans, D.M. Effects of street lighting technologies on the success and quality of pollination in a nocturnally pollinated plant. *Ecosphere*, 10(1), jan 2019. doi: 10.1002/ecs2.2550.
180. Boom, M.P., Spoelstra, K., Biere, A., Knop, E. and Visser, M.E. Pollination and fruit infestation under artificial light at night: light colour matters. *Scientific Reports*, 10(1), oct 2020. doi: 10.1038/s41598-020-75471-1.
181. Soteris, F., Camps, G.A., Costas, S.M., Giaquinta, A., Peralta, G. and Cocucci, A.A. Fragility of nocturnal interactions: Pollination intensity increases with distance to light pollution sources but decreases with increasing environmental suitability. *Environmental Pollution*, 292:118350, jan 2022. doi: 10.1016/j.envpol.2021.118350.
182. Akacem, L.D., Wright, K.P. and LeBoeuf, M.K. Bedtime and evening light exposure influence circadian timing in preschool-age children: A field study. *Neurobiology of Sleep and Circadian Rhythms*, 1(2):27–31, nov 2016. doi: 10.1016/j.nbscr.2016.11.002.
183. il Lee, S., Matsumori, K., Nishimura, K., Nishimura, Y., Ikeda, Y., Eto, T. and Higuchi, S. Melatonin suppression and sleepiness in children exposed to blue-enriched white LED lighting at night. *Physiological Reports*, 6(24), dec 2018. doi: 10.14814/phy2.13942.
184. Wilson, M. Artificial blue light and teenagers: Does artificial blue light exposure at night have negative health and wellbeing implications on teenagers? *Otago Polytechnic School of Nursing Online Journal*, 6, 2019.
185. Paksarian, D., Rudolph, K.E., Stapp, E.K., Dunster, G.P., He, J., Mennitt, D., Hattar, S., Casey, J.A., James, P. and Merikangas, K.R. Association of outdoor artificial light at night with mental disorders and sleep patterns among US adolescents. *JAMA Psychiatry*, 77(12):1266, dec 2020. doi: 10.1001/jamapsychiatry.2020.1935.
186. Hatori, M., Gronfier, C., Gelder, R.N.V., Bernstein, P.S., Carreras, J., Panda, S., Marks, F., Sliney, D., Hunt, C.E., Hirota, T., Furukawa, T. and Tsubota, K. Global rise of potential health hazards caused by blue light-induced circadian disruption in modern aging societies. *npj Aging and Mechanisms of Disease*, 3(1), jun 2017. doi: 10.1038/s41514-017-0010-2.
187. Shen, J. and Tower, J. Effects of light on aging and longevity. *Ageing Research Reviews*, 53:100913, aug 2019. doi: 10.1016/j.arr.2019.100913.
188. Wahl, S., Engelhardt, M., Schaupp, P., Lappe, C. and Ivanov, I.V. The inner clock—blue light sets the human rhythm. *Journal of Biophotonics*, 12(12), sep 2019. doi: 10.1002/jbio.201900102.
189. Walmsley, L., Hanna, L., Moulard, J., Martial, F., West, A., Smedley, A.R., Bechtold, D.A., Webb, A.R., Lucas, R.J. and Brown, T.M. Colour as a signal for entraining the mammalian circadian clock. *PLOS Biology*, 13(4):e1002127, apr 2015. doi: 10.1371/journal.pbio.1002127.
190. Lewy, A., Wehr, T., Goodwin, F., Newsome, D. and Markey, S. Light suppresses melatonin secretion in humans. *Science*, 210(4475):1267–1269, dec 1980. doi: 10.1126/science.7434030.
191. Carrillo-Vico, A., Guerrero, J.M., Lardone, P.J. and Reiter, R.J. A review of the multiple actions of melatonin on the immune system. *Endocrine*, 27(2):189–200, 2005. doi: 10.1385/endo:27:2:189.
192. Phillips, A.J.K., Vidafar, P., Burns, A.C., McGlashan, E.M., Anderson, C., Rajaratnam, S.M.W., Lockley, S.W. and Cain, S.W. High sensitivity and interindividual variability in the response of the human circadian system to evening light. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, page 201901824, may 2019. doi: 10.1073/pnas.1901824116.
193. Grubisic, M., Haim, A., Bhusal, P., Dominoni, D.M., Gabriel, K.M.A., Jechow, A., Kupprat, F., Lerner, A., Marchant, P., Riley, W., Stebelova, K., van Grunsven, R.H.A., Zeman, M., Zubidat, A.E. and Höller, F. Light pollution, circadian photoreception, and melatonin in vertebrates. *Sustainability*, 11(22):6400, nov 2019. doi: 10.3390/su11226400.
194. Stebelova, K., Roska, J. and Zeman, M. Impact of dim light at night on urinary 6-sulphatoxymelatonin concentrations and sleep in healthy humans. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(20):7736, oct 2020. doi: 10.3390/ijms21207736.
195. Brainard, G.C., Hanifin, J.P., Greeson, J.M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E. and Rollag, M.D. Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor. *The Journal of Neuroscience*, 21(16):6405–6412, aug 2001. doi: 10.1523/jneurosci.21-16-06405.2001.
196. Lucas, R.J., Peirson, S.N., Berson, D.M., Brown, T.M., Cooper, H.M., Czeisler, C.A., Figueiro, M.G., Gamlin, P.D., Lockley, S.W., O'Hagan, J.B., Price, L.L., Provencio, I., Skene, D.J. and Brainard, G.C. Measuring and using light in the melatonin age. *Trends in Neurosciences*, 37(1):1–9, jan 2014. doi: 10.1016/j.tins.2013.10.004.
197. Buijs, F.N., León-Mercado, L., Guzmán-Ruiz, M., Guerrero-Vargas, N.N., Romo-Nava, F. and Buijs, R.M. The circadian system: A regulatory feedback network of periphery and brain. *Physiology*, 31(3):170–181, may 2016. doi: 10.1152/physiol.00037.2015.
198. Fleury, G., Masis-Vargas, A. and Kalsbeek, A. Metabolic implications of exposure to light at night: Lessons from animal and human studies. *Obesity*, 28(S1), jul 2020. doi: 10.1002/oby.22807.
199. Nicholls, S. Evidence for internal desynchrony caused by circadian clock resetting. *Yale Journal of Biology and Medicine*, 92(2):259–270, 2019.
200. Koronowski, K.B., Kinouchi, K., Welz, P.S., Smith, J.G., Zinna, V.M., Shi, J., Samad, M., Chen, S., Magnan, C.N., Kinchen, J.M., Li, W., Baldi, P., Benitah, S.A. and Sassone-Corsi, P. Defining the independence of the liver circadian clock. *Cell*, 177(6):1448–1462.e14, may 2019. doi: 10.1016/j.cell.2019.04.025.
201. Haim, A. and Zubidat, A.E. Artificial light at night: melatonin as a mediator between the environment and epigenome. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1667):20140121, may 2015. doi: 10.1098/rstb.2014.0121.
202. Yonis, M., Haim, A. and Zubidat, A.E. Altered metabolic and hormonal responses in male rats exposed to acute bright light-at-night associated with global DNA hypo-methylation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 194:107–118, may 2019. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2019.03.020.
203. Joska, T., Zaman, R. and Belden, W. Regulated DNA methylation and the circadian clock: Implications in cancer. *Biology*, 3(3):560–577, sep 2014. doi: 10.3390/biology3030560.
204. Agbaria, S., Haim, A., Fares, F. and Zubidat, A.E. Epigenetic modification in 41t mouse breast cancer model by artificial light at night and melatonin – the role of DNA-methyltransferase. *Chronobiology International*, 36(5):629–643, feb 2019. doi: 10.1080/07420528.2019.1574265.
205. Zahra, H.S., Iqbal, A., Hassan, S.H., Shakir, H.A., Khan, M., Irfan, M., Ara, C. and Ali, S. Epigenetics: A bridge between artificial light at night and breast cancer. *Punjab University Journal of Zoology*, 34(2), 2019. doi: 10.17582/journal.pujz/2019.34.2.231.238.
206. Rybnikova, N.A., Haim, A. and Portnov, B.A. Does artificial light-at-night exposure contribute to the worldwide obesity pandemic? *International Journal of Obesity*, 40(5):815–823, jan 2016. doi: 10.1038/ijo.2015.255.
207. Park, Y.M.M., White, A.J., Jackson, C.L., Weinberg, C.R. and Sandler, D.P. Association of exposure to artificial light at night while sleeping with risk of obesity in women. *JAMA Internal Medicine*, 179(8):1061, aug 2019. doi: 10.1001/jamainternmed.2019.0571.
208. Lai, K.Y., Sarkar, C., Ni, M.Y., Gallacher, J. and Webster, C. Exposure to light at night (LAN) and risk of obesity: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Environmental Research*, 187:109637, aug 2020. doi: 10.1016/j.envres.2020.109637.
209. Opperhuizen, A.L., Stenvers, D.J., Jansen, R.D., Foppen, E., Fliers, E. and Kalsbeek, A. Light at night acutely impairs glucose tolerance in a time-, intensity- and wavelength-dependent manner in rats. *Diabetologia*, 60(7):1333–1343, apr 2017. doi: 10.1007/s00125-017-4262-y.
210. Russart, K.L., Chbeir, S.A., Nelson, R.J. and Magalang, U.J. Light at night exacerbates metabolic dysfunction in a polygenic mouse model of type 2 diabetes mellitus. *Life Sciences*, 231:116574, aug 2019. doi: 10.1016/j.lfs.2019.116574.
211. Zubidat, A.E. and Haim, A. Artificial light-at-night – a novel lifestyle risk factor for metabolic disorder and cancer morbidity. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, 28(4), jan 2017. doi: 10.1515/jbcp-2016-0116.
212. Erren, T.C. and Lewis, P. Hypothesis: ubiquitous circadian disruption can cause cancer. *European Journal of Epidemiology*, 34(1):1–4, dec 2018. doi: 10.1007/s10654-018-0469-6.
213. Walker, W.H., Bumgarner, J.R., Walton, J.C., Liu, J.A., Meléndez-Fernández, O.H., Nelson, R.J. and DeVries, A.C. Light pollution and cancer. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(24):9360, dec 2020. doi: 10.3390/ijms21249360.
214. Schernhammer, E.S., Laden, F., Speizer, F.E., Willett, W.C., Hunter, D.J., Kawachi, I. and Colditz, G.A. Rotating night shifts and risk of breast cancer in women participating in the nurses' health study. *JNCI Journal of the National Cancer Institute*, 93(20):1563–1568, oct 2001. doi: 10.1093/jnci/93.20.1563.
215. Dickerman, B. and Liu, J. Does current scientific evidence support a link between light at night and breast cancer among female night-shift nurses? Review of evidence and implications for occupational and environmental health nurses. *Workplace Health & Safety*, 60(6):273–290, jun 2012. doi: 10.3928/21650799-20120529-06.
216. He, C., Anand, S.T., Ebell, M.H., Vena, J.E. and Robb, S.W. Circadian disrupting exposures and breast cancer risk: a meta-analysis. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 88(5):533–547, sep 2014. doi: 10.1007/s00420-014-0986-x.
217. Kloog, I., Haim, A., Stevens, R.G. and Portnov, B.A. Global co-distribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men. *Chronobiology International*, 26(1):108–125, jan 2009. doi: 10.1080/074205208028064020.
218. Sigurdardottir, L.G., Valdimarsdottir, U.A., Fall, K., Rider, J.R., Lockley, S.W., Schernhammer, E. and Mucci, L.A. Circadian disruption, sleep loss, and prostate cancer risk: A

- systematic review of epidemiologic studies: Table 1. *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention*, 21(7):1002–1011, may 2012. doi: 10.1158/1055-9965.epi-12-0116.
219. Rybnikova, N.A., Haim, A. and Portnov, B.A. Is prostate cancer incidence worldwide linked to artificial light at night exposures? review of earlier findings and analysis of current trends. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 72(2):111–122, jun 2016. doi: 10.1080/19338244.2016.1169980.
 220. Kim, K.Y., Lee, E., Kim, Y.J. and Kim, J. The association between artificial light at night and prostate cancer in gwangju city and south jeolla province of south Korea. *Chronobiology International*, 34(2):203–211, dec 2016. doi: 10.1080/07420528.2016.1259241.
 221. Anbalagan, M., Dauchy, R., Xiang, S., Robling, A., Blask, D., Rowan, B. and Hill, S. SAT-337 disruption of the circadian melatonin signal by dim light at night promotes bone-lytic breast cancer metastases. *Journal of the Endocrine Society*, 3(Supplement_1), apr 2019. doi: 10.1210/ajs.2019-sat-337.
 222. Xiang, S., Dauchy, R.T., Hoffman, A.E., Pointer, D., Frasch, T., Blask, D.E. and Hill, S.M. Epigenetic inhibition of the tumor suppressor ARH1 by light at night-induced circadian melatonin disruption mediates STAT3-driven paclitaxel resistance in breast cancer. *Journal of Pineal Research*, 67(2), jun 2019. doi: 10.1111/jpi.12586.
 223. Lee, H.S., Lee, E., Moon, J.H., Kim, Y. and Lee, H.J. Circadian disruption and increase of oxidative stress in male and female volunteers after bright light exposure before bed time. *Molecular & Cellular Toxicology*, 15(2):221–229, mar 2019. doi: 10.1007/s13273-019-0025-9.
 224. James, P., Bertrand, K.A., Hart, J.E., Schernhammer, E.S., Tamimi, R.M. and Laden, F. Outdoor light at night and breast cancer incidence in the nurses' health study II. *Environmental Health Perspectives*, 125(8):087010, aug 2017. doi: 10.1289/ehp935.
 225. Garcia-Saenz, A., de Miguel, A.S., Espinosa, A., Valentin, A., Aragonés, N., Llorca, J., Amiano, P., Sánchez, V.M., Guevara, M., Capelo, R., Tardón, A., Peiró-Perez, R., Jiménez-Moleón, J.J., Roca-Barceló, A., Pérez-Gómez, B., Dierssen-Sotos, T., Fernández-Villa, T., Moreno-Iribas, C., Moreno, V., García-Pérez, J. et al. Evaluating the association between artificial light-at-night exposure and breast and prostate cancer risk in Spain (MCC-Spain study). *Environmental Health Perspectives*, 126(4):047011, apr 2018. doi: 10.1289/ehp1837.
 226. McIsaac, M.A., Sanders, E., Kuester, T., Aronson, K.J. and Kyba, C.C.M. The impact of image resolution on power, bias, and confounding. *Environmental Epidemiology*, 5(2): e145, apr 2021. doi: 10.1097/ee9.0000000000000145.
 227. Prayag, A., Münch, M., Aeschbach, D., Chellappa, S. and Gronfier, C. Light modulation of human clocks, wake, and sleep. *Clocks & Sleep*, 1(1):193–208, mar 2019. doi: 10.3390/clockssleep1010017.
 228. Dautovich, N.D., Schreiber, D.R., Imel, J.L., Tighe, C.A., Shoji, K.D., Cyrus, J., Bryant, N., Lisech, A., O'Brien, C. and Dzierzewski, J.M. A systematic review of the amount and timing of light in association with objective and subjective sleep outcomes in community-dwelling adults. *Sleep Health*, 5(1):31–48, feb 2019. doi: 10.1016/j.sleh.2018.09.006.
 229. Dumont, M., Lancôt, V., Cadieux-Viau, R. and Paquet, J. Melatonin production and light exposure of rotating night workers. *Chronobiology International*, 29(2):203–210, feb 2012. doi: 10.3109/07420528.2011.647177.
 230. Böhmer, M.N., Hamers, P.C., Bindels, P.J., Oppewal, A., van Someren, E.J. and Festen, D.A. Are we still in the dark? a systematic review on personal daily light exposure, sleep-wake rhythm, and mood in healthy adults from the general population. *Sleep Health*, 7(5): 610–630, oct 2021. doi: 10.1016/j.sleh.2021.06.001.
 231. Léger, D. and Bayon, V. Societal costs of insomnia. *Sleep Medicine Reviews*, 14(6): 379–389, dec 2010. doi: 10.1016/j.smrv.2010.01.003.
 232. Wade, A. The societal costs of insomnia. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, page 1, dec 2010. doi: 10.2147/ndt.s15123.
 233. Eastman, C. and Smith. Shift work: health, performance and safety problems, traditional countermeasures, and innovative management strategies to reduce circadian misalignment. *Nature and Science of Sleep*, page 111, sep 2012. doi: 10.2147/nss.s10372.
 234. Figueiro, M.G., Sahin, L., Wood, B. and Plitnick, B. Light at night and measures of alertness and performance. *Biological Research For Nursing*, 18(1):90–100, feb 2015. doi: 10.1177/1099800415572873.
 235. Fonken, L.K., Bedrosian, T.A., Zhang, N., Weil, Z.M., DeVries, A.C. and Nelson, R.J. Dim light at night impairs recovery from global cerebral ischemia. *Experimental Neurology*, 317:100–109, jul 2019. doi: 10.1016/j.expneurol.2019.02.008.
 236. Weil, Z.M., Fonken, L.K., Walker, W.H., Bumgarner, J.R., Liu, J.A., Melendez-Fernandez, O.H., Zhang, N., DeVries, A.C. and Nelson, R.J. Dim light at night exacerbates stroke outcome. *European Journal of Neuroscience*, 52(9):4139–4146, aug 2020. doi: 10.1111/ejn.14915.
 237. Obayashi, K., Yamagami, Y., Tatsumi, S., Kurumatani, N. and Saeki, K. Indoor light pollution and progression of carotid atherosclerosis: A longitudinal study of the HEIJO-KYO cohort. *Environment International*, 133:105184, dec 2019. doi: 10.1016/j.envint.2019.105184.
 238. Walker, W.H., Meléndez-Fernández, O.H. and Nelson, R.J. Prior exposure to dim light at night impairs dermal wound healing in female c57bl/6 mice. *Archives of Dermatological Research*, 311(7):573–576, may 2019. doi: 10.1007/s00403-019-01935-8.
 239. Mindel, J.W., Rojas, S.L., Kline, D., Bao, S., Rezaei, A., Corrigan, J.D., Nelson, R.J., D, P. and Magalang, U.J. 0038 sleeping with low levels of artificial light at night increases systemic inflammation in humans. *Sleep*, 42(Supplement_1):A15–A16, apr 2019. doi: 10.1093/sleep/zsz067.037.
 240. Donker, D. Light and noise nuisance ... deciphered yet underappreciated 'rosetta stone' of the modern ICU? *Netherlands Journal of Critical Care*, 27(4):144, 2019.
 241. Simons, K., van den Boogaard, M. and de Jager, C. Impact of intensive care unit light and noise exposure on critically ill patients. *Netherlands Journal of Critical Care*, 27(4), 2019.
 242. Kernbach, M.E., Martin, L.B., Unnasch, T.R., Hall, R.J., Jiang, R.H.Y. and Francis, C.D. Light pollution affects west Nile virus exposure risk across Florida. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1947), mar 2021. doi: 10.1098/rspb.2021.0253.
 243. Khan, Z.A., Yumnamcha, T., Mondal, G., Devi, S.D., Rajiv, C., Labala, R.K., Devi, H.S. and Chatteraj, A. Artificial light at night (ALAN): A potential anthropogenic component for the COVID-19 and HCoV's outbreak. *Frontiers in Endocrinology*, 11, sep 2020. doi: 10.3389/fendo.2020.00622.
 244. He, S., Shao, W. and Han, J. Have artificial lighting and noise pollution caused zoonosis and the COVID-19 pandemic? a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(6):4021–4030, jul 2021. doi: 10.1007/s10311-021-01291-y.
 245. Stock, D. and Schernhammer, E. Does night work affect age at which menopause occurs? *Current Opinion in Endocrinology & Diabetes and Obesity*, 26(6):306–312, dec 2019. doi: 10.1097/med.0000000000000509.
 246. Obayashi, K., Saeki, K. and Kurumatani, N. Bedroom light exposure at night and the incidence of depressive symptoms: A longitudinal study of the HEIJO-KYO cohort. *American Journal of Epidemiology*, 187(3):427–434, jul 2017. doi: 10.1093/aje/kwx290.
 247. young Min, J. and bok Min, K. Outdoor light at night and the prevalence of depressive symptoms and suicidal behaviors: A cross-sectional study in a nationally representative sample of Korean adults. *Journal of Affective Disorders*, 227:199–205, feb 2018. doi: 10.1016/j.jad.2017.10.039.
 248. Walker, W.H., Borniger, J.C., Gaudier-Diaz, M.M., Meléndez-Fernández, O.H., Pascoe, J.L., DeVries, A.C. and Nelson, R.J. Acute exposure to low-level light at night is sufficient to induce neurological changes and depressive-like behavior. *Molecular Psychiatry*, 25(5): 1080–1093, may 2019. doi: 10.1038/s41380-019-0430-4.
 249. Esaki, Y., Obayashi, K., Saeki, K., Fujita, K., Iwata, N. and Kitajima, T. Effect of evening light exposure on sleep in bipolar disorder: A longitudinal analysis for repeated measures in the APPLE cohort. *Australian & New Zealand Journal of Psychiatry*, 55(3):305–313, oct 2020. doi: 10.1177/0004867420968886.
 250. Fasciani, I., Petragano, F., Aloisi, G., Marampon, F., Rossi, M., Coppolino, M.F., Rossi, R., Longoni, B., Scarselli, M. and Maggio, R. A new threat to dopamine neurons: The downside of artificial light. *Neuroscience*, 432:216–228, apr 2020. doi: 10.1016/j.neuroscience.2020.02.047.
 251. Sharma, A. and Goyal, R. Long-term exposure to constant light induces dementia, oxidative stress and promotes aggregation of sub-pathological $\alpha\beta42$ in wistar rats. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 192:172892, may 2020. doi: 10.1016/j.pbb.2020.172892.
 252. Xie, Y., Jin, Z., Huang, H., Li, S., Dong, G., Liu, Y., Chen, G. and Guo, Y. Outdoor light at night and autism spectrum disorder in Shanghai, China: A matched case-control study. *Science of The Total Environment*, 811:152340, mar 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152340.
 253. Haraguchi, S., Kamata, M., Tokita, T., ichiro Tashiro, K., Sato, M., Nozaki, M., Okamoto-Katsuyama, M., Shimizu, I., Han, G., Chowdhury, V.S., Lei, X.F., Miyazaki, T., ri Kim-Kaneyama, J., Nakamachi, T., Matsuda, K., Ohtaki, H., Tokumoto, T., Tachibana, T., Miyazaki, A. and Tsutsui, K. Light-at-night exposure affects brain development through pineal allopregnanolone-dependent mechanisms. *eLife*, 8, sep 2019. doi: 10.7554/eLife.45306.
 254. Li, Y., Cheng, S., Li, L., Zhao, Y., Shen, W. and Sun, X. Light-exposure at night impairs mouse ovary development via cell apoptosis and DNA damage. *Bioscience Reports*, 39(5), may 2019. doi: 10.1042/bsr20181464.
 255. Nagai, N., Ayaki, M., Yanagawa, T., Hattori, A., Negishi, K., Mori, T., Nakamura, T.J. and Tsubota, K. Suppression of blue light at night ameliorates metabolic abnormalities by controlling circadian rhythms. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 60(12):3786, sep 2019. doi: 10.1167/iov.19-27195.
 256. Wanvik, P.O. Effects of road lighting: An analysis based on Dutch accident statistics 1987–2006. *Accident Analysis & Prevention*, 41(1):123–128, jan 2009. doi: 10.1016/j.aap.2008.10.003.
 257. Bullough, J.D., Donnell, E.T. and Rea, M.S. To illuminate or not to illuminate: Roadway lighting as it affects traffic safety at intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 53: 65–77, apr 2013. doi: 10.1016/j.aap.2012.12.029.
 258. Bhagavathula, R., Gibbons, R. and Kassing, A. Roadway lighting's effect on pedestrian safety at intersection and midblock crosswalks. Technical report, Illinois Center for Transportation, aug 2021.
 259. Morrow, N. and Hutton, S. The Chicago alley lighting project: Final evaluation report. Technical report, Illinois Criminal Justice Information Authority, 2000.
 260. Sullivan, J.M. and Flannagan, M.J. The role of ambient light level in fatal crashes: inferences from daylight saving time transitions. *Accident Analysis & Prevention*, 34(4): 487–498, jul 2002. doi: 10.1016/s0001-4575(01)00046-x.
 261. Marchant, P.R. A demonstration that the claim that brighter lighting reduces crime is unfounded. *British Journal of Criminology*, 44(3):441–447, apr 2004. doi: 10.1093/bjc/azh009.
 262. Marchant, P. Have new street lighting schemes reduced crime in London? *Radical Statistics*, 104(39–48), 2011.
 263. Wanvik, P.O. Effects of road lighting on motorways. *Traffic Injury Prevention*, 10(3):279–289, jun 2009. doi: 10.1080/15389580902826866.
 264. Jägerbrand, A.K. and Sjöbergh, J. Effects of weather conditions, light conditions, and road lighting on vehicle speed. *SpringerPlus*, 5(1), apr 2016. doi: 10.1186/s40064-016-2124-6.
 265. Steinbach, R., Perkins, C., Tompson, L., Johnson, S., Armstrong, B., Green, J., Grundy, C., Wilkinson, P. and Edwards, P. The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: controlled interrupted time series analysis. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 69(11):1118–1124, jul 2015. doi: 10.1136/jech-2015-206012.
 266. Marchant, P. Why lighting claims might well be wrong. *International Journal of Sustainable Lighting*, 19(1):69–74, jun 2017. doi: 10.26607/ijsl.v19i1.71.
 267. Marchant, P. Do brighter, whiter street lights improve road safety? *Significance*, 16(5):8–9, oct 2019. doi: 10.1111/j.1740-9713.2019.01313.x.

268. Jackett, M. and Frith, W. Quantifying the impact of road lighting on road safety — a new zealand study. *IATSS Research*, 36(2):139–145, mar 2013. doi: 10.1016/j.iatssr.2012.09.001.
269. Fotios, S. and Gibbons, R. Road lighting research for drivers and pedestrians: The basis of luminance and illuminance recommendations. *Lighting Research & Technology*, 50(1): 154–186, jan 2018. doi: 10.1177/1477153517739055.
270. Svehckina, A., Trop, T. and Portnov, B.A. How much lighting is required to feel safe when walking through the streets at night? *Sustainability*, 12(8):3133, apr 2020. doi: 10.3390/su12083133.
271. McGlashan, E.M., Poudel, G.R., Jamadar, S.D., Phillips, A.J.K. and Cain, S.W. Afraid of the dark: Light acutely suppresses activity in the human amygdala. *PLOS ONE*, 16(6): e0252350, jun 2021. doi: 10.1371/journal.pone.0252350.
272. Marchant, P., Hale, J.D. and Sadler, J.P. Does changing to brighter road lighting improve road safety? multilevel longitudinal analysis of road traffic collision frequency during the re-lighting of a UK city. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 74(5):467–472, mar 2020. doi: 10.1136/jech-2019-212208.
273. Saad, R., Portnov, B.A. and Trop, T. Saving energy while maintaining the feeling of safety associated with urban street lighting. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(1):251–269, nov 2020. doi: 10.1007/s10098-020-01974-0.
274. Lyytimäki, J., Tapio, P. and Assmuth, T. Unawareness in environmental protection: The case of light pollution from traffic. *Land Use Policy*, 29(3):598–604, jul 2012. doi: 10.1016/j.landusepol.2011.10.002.
275. Bará, S., Rodríguez-Arós, Á., Pérez, M., Tosar, B., Lima, R., de Miguel, A.S. and Zamorano, J. Estimating the relative contribution of streetlights, vehicles, and residential lighting to the urban night sky brightness. *Lighting Research & Technology*, 51(7): 1092–1107, oct 2018. doi: 10.1177/1477153518808337.
276. Gaston, K.J. and Holt, L.A. Nature, extent and ecological implications of night-time light from road vehicles. *Journal of Applied Ecology*, 55(5):2296–2307, apr 2018. doi: 10.1111/1365-2664.13157.
277. Stone, T., de Sio, F.S. and Vermaas, P.E. Driving in the dark: Designing autonomous vehicles for reducing light pollution. *Science and Engineering Ethics*, 26(1):387–403, mar 2019. doi: 10.1007/s11948-019-00101-7.
278. Davoudian, N., Raynham, P. and Barrett, E. Disability glare: A study in simulated road lighting conditions. *Lighting Research & Technology*, 46(6):695–705, nov 2013. doi: 10.1177/1477153513510168.
279. Yang, Y., Luo, M.R. and Ma, S. Assessing glare. part 2: Modifying unified glare rating for uniform and non-uniform LED luminaires. *Lighting Research & Technology*, 49(6):727–742, apr 2016. doi: 10.1177/1477153516642622.
280. Bullough, J. Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare. *Journal of Modern Optics*, 56(13):1518–1522, jul 2009. doi: 10.1080/09500340903045710.
281. Skinner, N. and Bullough, J. Influence of LED spectral characteristics on glare recovery. In *SAE Technical Paper Series*. SAE International, apr 2019. doi: 10.4271/2019-01-0845.
282. Sweater-Hickcox, K., Narendran, N., Bullough, J. and Freyssinier, J. Effect of different coloured luminous surrounds on LED discomfort glare perception. *Lighting Research & Technology*, 45(4):464–475, feb 2013. doi: 10.1177/1477153512474450.
283. IEA. Light's labour's lost: Policies for energy-efficient lighting. Technical report, International Energy Agency, Paris, 2006.
284. IEA. World energy outlook. Technical report, International Energy Agency, Paris, 2006.
285. Brown, R. *World On the Edge: How to Prevent Environmental and Economic Collapse*. W. W. Norton & Company, New York, 2010.
286. UNEP. Accelerating the global adoption of energy efficient lighting. Technical report, United Nations Environment Programme, 2017.
287. Fouquet, R. and Pearson, P. Seven centuries of energy services: The price and use of light in the united kingdom (1300-2000). *Energy Journal*, 27:139–177, 2006.
288. Schulte-Römer, N., Meier, J., Söding, M. and Dannemann, E. The LED paradox: How light pollution challenges experts to reconsider sustainable lighting. *Sustainability*, 11(21): 6160, nov 2019. doi: 10.3390/su11216160.
289. Jones, B.A. Spillover health effects of energy efficiency investments: Quasi-experimental evidence from the los angeles LED streetlight program. *Journal of Environmental Economics and Management*, 88:283–299, mar 2018. doi: 10.1016/j.jeem.2018.01.002.
290. Azad, S. and Ghandehari, M. A study on the association of socioeconomic and physical cofactors contributing to power restoration after hurricane maria. *IEEE Access*, 9:98654–98664, 2021. doi: 10.1109/access.2021.3093547.
291. Jägerbrand, A. New framework of sustainable indicators for outdoor LED (light emitting diodes) lighting and SSL (solid state lighting). *Sustainability*, 7(1):1028–1063, jan 2015. doi: 10.3390/su7011028.
292. Nadybal, S.M., Collins, T.W. and Grineski, S.E. Light pollution inequities in the continental united states: A distributive environmental justice analysis. *Environmental Research*, 189: 109959, oct 2020. doi: 10.1016/j.envres.2020.109959.
293. Li, H., Hart, J.E., Mahalingaiah, S., Nethery, R.C., James, P., Bertone-Johnson, E., Scherhammer, E. and Laden, F. Associations of long-term exposure to environmental noise and outdoor light at night with age at natural menopause in a US women cohort. *Environmental Epidemiology*, 5(3):e154, may 2021. doi: 10.1097/ee9.0000000000000154.
294. Zhong, C., Longcore, T., Benbow, J., Chung, N.T., Chau, K., Wang, S.S., Jr, J.V.L. and Franklin, M. Environmental influences on sleep in the california teachers study cohort. *American Journal of Epidemiology*, oct 2021. doi: 10.1093/aje/kwab246.
295. Kuhn, L., Johansson, M., Laike, T. and Govén, T. Residents' perceptions following retrofitting of residential area outdoor lighting with LEDs. *Lighting Research & Technology*, 45(5):568–584, nov 2012. doi: 10.1177/1477153512464968.
296. Johansson, M., Pedersen, E., Maleetipwan-Mattsson, P., Kuhn, L. and Laike, T. Perceived outdoor lighting quality (POLQ): A lighting assessment tool. *Journal of Environmental Psychology*, 39:14–21, sep 2014. doi: 10.1016/j.jenvp.2013.12.002.
297. Boomsma, C. and Steg, L. Feeling safe in the dark. *Environment and Behavior*, 46(2): 193–212, sep 2012. doi: 10.1177/0013916512453838.
298. Edensor, T. The gloomy city: Rethinking the relationship between light and dark. *Urban Studies*, 52(3):422–438, sep 2013. doi: 10.1177/0042098013504009.
299. Pritchard, S.B. The trouble with darkness: NASA's suomi satellite images of earth at night. *Environmental History*, 22(2):312–330, apr 2017. doi: 10.1093/envhis/emw102.
300. Hamacher, D.W., de Napoli, K. and Mott, B. Whitening the sky: light pollution as a form of cultural genocide, 2020.
301. Freeman, R.H. Overview: Satellite constellations. *Journal of Space Operations & Communicator*, 17(2):2, 2020.
302. Rawls, M.L., Thiemann, H.B., Chemin, V., Walkowicz, L., Peel, M.W. and Grange, Y.G. Satellite constellation internet affordability and need. *Research Notes of the American Astronomical Society*, 4(10):189, oct 2020. doi: 10.3847/2515-5172/abc48e.
303. Levchenko, I., Xu, S., Wu, Y.L. and Bazaka, K. Hopes and concerns for astronomy of satellite constellations. *Nature Astronomy*, 4(11):1012–1014, jun 2020. doi: 10.1038/s41550-020-1141-0.
304. Massey, R., Lucatello, S. and Benvenuti, P. The challenge of satellite megaconstellations. *Nature Astronomy*, 4(11):1022–1023, nov 2020. doi: 10.1038/s41550-020-01224-9.
305. Boley, A.C. and Byers, M. Satellite mega-constellations create risks in low earth orbit, the atmosphere and on earth. *Scientific Reports*, 11(1), may 2021. doi: 10.1038/s41598-021-89909-7.
306. Tyson, J.A., Ivezić, Ž., Bradshaw, A., Rawls, M.L., Xin, B., Yoachim, P., Parejko, J., Greene, J., Sholl, M., Abbott, T.M.C. and Polin, D. Mitigation of LEO satellite brightness and trail effects on the rubin observatory LSST. *Astronomical Journal*, 160(5):226, oct 2020. doi: 10.3847/1538-3881/abba3e.
307. McDowell, J.C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX starlink constellation. *Astrophysical Journal*, 892(2):L36, apr 2020. doi: 10.3847/2041-8213/ab8016.
308. Hainaut, O.R. and Williams, A.P. Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains. *Astronomy and Astrophysics*, 636:A121, apr 2020. doi: 10.1051/0004-6361/202037501.
309. Bassa, C.G., Hainaut, O.R. and Galadi-Enriquez, D. Analytical simulations of the effect of satellite constellations on optical and near-infrared observations. *Astronomy & Astrophysics*, in press(arXiv:2108.12335), 2022.
310. Kocifaj, M., Kundracik, F., Barentine, J.C. and Bará, S. The proliferation of space objects is a rapidly increasing source of artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504(1):L40–L44, mar 2021. doi: 10.1093/mnras/51ab030.
311. Lawler, S.M., Boley, A.C. and Rein, H. Visibility predictions for near-future satellite megaconstellations: Latitudes near 50° will experience the worst light pollution. *The Astronomical Journal*, 163(1):21, dec 2021. doi: 10.3847/1538-3881/ac341b.
312. Horiuchi, T., Hanayama, H. and Ohishi, M. Simultaneous multicolor observations of starlink's darksat by the murikabushi telescope with MITSUME. *Astrophysical Journal*, 905(1): 3, dec 2020. doi: 10.3847/1538-4357/abc695.
313. Cole, R.E. Measurement of the brightness of the starlink spacecraft named "DARKSAT". *Research Notes of the American Astronomical Society*, 4(3):42, mar 2020. doi: 10.3847/2515-5172/ab8234.
314. Tregloan-Reed, J., Otárola, A., Ortiz, E., Molina, V., Anais, J., González, R., Colque, J.P. and Unda-Sanzana, E. First observations and magnitude measurement of starlink's darksat. *Astronomy and Astrophysics*, 637:L1, apr 2020. doi: 10.1051/0004-6361/202037958.
315. Boley, A.C., Wright, E., Lawler, S., Hickson, P. and Balam, D. Plaskett 1.8 metre observations of starlink satellites. Technical report, University of British Columbia, <http://arxiv.org/abs/2109.12494>, September 2021 2021.
316. Tregloan-Reed, J., Otárola, A., Unda-Sanzana, E., Haeussler, B., Gaete, F., Colque, J.P., González-Fernández, C., Anais, J., Molina, V., González, R., Ortiz, E., Mieske, S., Brilliant, S. and Anderson, J.P. Optical-to-NIR magnitude measurements of the starlink LEO darksat satellite and effectiveness of the darkening treatment. *Astronomy and Astrophysics*, 647: A54, mar 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202039364.
317. Venkatesan, A., Lowenthal, J., Prem, P. and Vidaurri, M. The impact of satellite constellations on space as an ancestral global commons. *Nature Astronomy*, 4(11):1043–1048, nov 2020. doi: 10.1038/s41550-020-01238-3.
318. Hall, J. and Walker, C. Executive summary. In *SATCON2 Workshop Report*, <https://noirlab.edu/public/media/archives/techdocs/pdf/techdoc031.pdf>, October 2021 2021. NSF's NOIRLab.
319. Kernbach, M.E., Miller, C., Alaasam, V., Ferguson, S. and Francis, C.D. Introduction to the symposium: Effects of light pollution across diverse natural systems. *Integrative and Comparative Biology*, 61(3):1089–1097, jul 2021. doi: 10.1093/icb/icab157.
320. Rodrigo-Comino, J., Seeliger, S., Seeger, M.K. and Ries, J.B. Light pollution: A review of the scientific literature. *The Anthropocene Review*, page 205301962110512, nov 2021. doi: 10.1177/20530196211051209.
321. Kyba, C.C., Pritchard, S.B., Ekirch, A.R., Eldridge, A., Jechow, A., Preiser, C., Kunz, D., Henckel, D., Hölker, F., Barentine, J., Berge, J., Meier, J., Gwiadzinski, L., Spitschan, M., Milan, M., Bach, S., Schroer, S. and Straw, W. Night matters—why the interdisciplinary field of "night studies" is needed. *J — Multidisciplinary Scientific Journal*, 3(1):1–6, jan 2020. doi: 10.3390/j3010001.