

Potentiale moderner Beleuchtungssysteme

Ergebnisbericht zur Forschungsdienstleistung NOBEL

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Autorinnen und Autoren: Johannes Weninger, Maximilian Dick, Martina Ascher

Wien, 2024. Stand: 27. Januar 2025

Inhalt

Einführung	6
Projektbeschreibung	8
Übergeordneter Projektablauf	8
Ergebnisdarstellung	10
Beschreibung der Interessensgruppen	12
Stichprobenumfang	12
Stichprobencharakterisierung	14
Gebietskörperschaften	14
Beleuchtungsbezogene Fachplaner	16
Produzierende Industrie	18
Einrichtungen für Normierung und fachbezogene Empfehlungen	20
Umweltbewusstsein und Verantwortlichkeiten	22
Gesellschaftliche Relevanz und Klimaschutzpolitik	22
Verantwortungsgrade und gegenseitiges Vertrauen	24
Thematische Herausforderungen	27
Verkehrssicherheit, Sicherheitsempfinden und urbane Attraktivität	27
Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen	29
Themenbezogenes Bewusstsein	30
Voraussichtliche Entwicklung innerhalb der nächsten 10 Jahre	31
Licht und Gesundheit	32
Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen	34
Themenbezogenes Bewusstsein	35
Voraussichtliche Entwicklung innerhalb der nächsten 10 Jahre	35
Umweltverträglichkeit und Biodiversität	36
Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen	39
Themenbezogenes Bewusstsein	39
Voraussichtliche Entwicklung innerhalb der nächsten 10 Jahre	40
Energieeffizienz und Ressourcenschonung	41
Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen	44
Themenbezogenes Bewusstsein	44
Voraussichtliche Entwicklung innerhalb der nächsten 10 Jahre	45
Interoperabilität und Technologiesouveränität	46
Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen	48
Themenbezogenes Bewusstsein	48
Voraussichtliche Entwicklung innerhalb der nächsten 10 Jahre	49

Technologische Potenziale	50
Adaptive spektrale Komposition	51
Potenziale und Limitationen: Tunable White Technologie.....	53
Potenziale und Limitationen: Applikationsspezifische Spektren	55
Adaptive Lichtverteilungskurven.....	57
Potenziale und Limitationen: Adaptive Lichtverteilungen.....	58
Nanotechnologie-basierte Optikkomponenten	60
Potenziale und Limitationen: Nanotechnologie-basierte Optiken	62
Sensorik und bedarfsgerechte Beleuchtung	64
Potenziale und Limitationen: Nächtliche Komplettabschaltungen	66
Potenziale und Limitationen: Sensorbasierte Beleuchtungssysteme.....	68
Erweiterte Systemvernetzung.....	70
Potenziale und Limitationen: Erweiterte Vernetzung	72
Maschinelles Lernen.....	75
Potenziale und Limitationen: Bildgebende Sensorik	77
Potenziale und Limitationen: Maschinelles Lernen	79
Resümee.....	81
Handlungsempfehlungen	83
Energieeffizienz und Ressourcenschonung.....	83
Erweiterte LED-Umrüstung	84
Nächtliche Komplettabschaltungen	85
Bedarfsorientierte Systeme	86
Adaptive Lichtverteilungen	87
Nanobasierte Fertigungsverfahren	87
Biogene Materialien	88
Übergeordnete Potenzialbewertung	88
Umweltverträglichkeit und Biodiversität	89
Erarbeitung normativer Anforderungen	90
Adaptive spektrale Komposition	91
Übergeordnete Potenzialbewertung	91
Interoperabilität und Technologiesouveränität.....	92
Erweiterte Systemvernetzung.....	93
Maschinelles Lernen.....	93
Übergeordnete Potenzialbewertung	94
Weiterführende Empfehlungen	94
Synergetische Effekte zu anderen Applikationsfeldern.....	96

Abschlussbemerkungen	99
Abbildungsverzeichnis.....	100
Literaturverzeichnis	102

Einführung

Auch wenn nachhaltigkeitsbezogene Aspekte früher fast ausschließlich in Bezug zu Umwelt- und Artenschutz gesehen wurden, berücksichtigt nachhaltiges Handeln heute ebenso wirtschaftliche und soziale Aspekte. Der Einsatz moderner Technologien eröffnet in diesem Sinne neue Möglichkeiten des Handels, indem die Reduktion energetischer Aufwände und negativer Umwelteinflüsse vermehrt mit wirtschaftlichen Zielen wie Langlebigkeit und Wartbarkeit der Produkte sowie positiven Wirkungen auf den Menschen durch höhere Produktqualitäten in Einklang gebracht werden können.

Der weltweite Stromverbrauch für die öffentliche Beleuchtung entspricht ungefähr der Strommenge, die Deutschland jährlich verbraucht (The World Bank, 2023). Der größte Teil der öffentlichen Beleuchtung entfällt dabei auf Städte, wo sie bis zu 65 Prozent des kommunalen Strombudgets ausmachen kann (The World Bank, 2023). In Anbetracht, dass die städtische Zuwanderung anhält und bis 2050 voraussichtlich 60% der Weltbevölkerung (Laing et al., 2005) in Städten leben wird, steigen dementsprechend aktuell sowohl die Nachfrage nach öffentlicher Beleuchtung als auch die damit einhergehenden Kosten- und Umweltbelastungsfaktoren.

Durch die zunehmende Nutzung von LED-Beleuchtungstechnologien befinden sich die Energieverbräuche für Kunstlichtsysteme zwar aktuell in einem allgemeinen Abwärtstrend (International Energy Agency, 2022), eine Steigerung der energetischen Effizienz im Bereich der Beleuchtung erweist sich jedoch weiterhin als wesentlich für die Reduktion des weltweiten Energieverbrauchs. Die Erreichung von sowohl klima- als auch umweltpolitischen Zielen erfordert jedoch eine darüber hinausreichende, gesamtheitliche Betrachtung der Beleuchtungssysteme (Shahzad et al., 2018; Rossi et al., 2016), welche ausgehend vom technologiespezifischen Ressourcenverbrauch (inkl. der Wiederverwertung bzw. Entsorgung von Materialien (Scholand & Dillon, 2012)), über die Systemnutzung im Betrieb (z.B. energetisches Einsparpotenzial von intelligent-adaptiven Systemen 68%-82% (Shahzad et al., 2016)) bis hin zu planungsspezifischen Aspekten zur Reduktion negativer Umweltaspekte (z.B. Vermeidung von Lichtverschmutzung (Longcore & Rich, 2004), Aufrechterhaltung der Biodiversität (Hölker et al., 2010)) reicht und dementsprechend alle Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette einschließt.

Die aktuell aufkommende, breitere Verfügbarkeit zukunftsfähiger Technologien (z.B. sensorgestützte Verfahren, IoT (Abinaya et al., 2017)) erweist sich dabei in vielen Bereichen als vorteilhaft, stellt jedoch gleichzeitig auch neue Anforderungen an Systeme, indem sich die Lebenszeiten von Steuerungskomponenten gegenüber LED-Technologien meist als deutlich kürzer erweisen. Um eine übergeordnete Ressourceneffizienz zu gewährleisten, gewinnen deshalb hochgradig standardisierte Schnittstellen und eine erweiterbare und herstellerunabhängige Komponenten-Modularität zur Aufrechterhaltung der Systemfunktionalität und Wahrung der Technologiesouveränität zunehmend an Wichtigkeit. Darüber hinaus unterliegt die Beleuchtung im öffentlichen Raum applikationsspezifischen Anforderungen, unter welchen sowohl visuelle Aspekte (z.B. die Erkennbarkeit von Objekten, Vermeidung von Blendung (Ylinen et al., 2013)) gewahrt, als auch individuell psychologische Anforderungen (z.B. subjektives Sicherheitsempfinden im öffentlichen Raum (Peña-García et al., 2015), Orientierungshilfe durch Wiedererkennbarkeit (Januchta-Szostak, 2010)) beachtet werden müssen. Zur Wahrung der allgemeinen Nutzerakzeptanz gilt es dabei sowohl genderspezifisch unterschiedlich ausgeprägte Akzeptanzniveaus (Polko & Kimic, 2022) als auch physiologische Rahmenkriterien zu betrachten, welche sich auch im Hinblick zu langfristig gesundheitlichen Aspekten als relevant ergeben, da nächtliche Beleuchtung maßgeblich zur Störung des zirkadianen Rhythmus beitragen kann (Evans & Davidson, 2013).

Die in dem multidimensionalen Spannungsfeld des öffentlichen Raums erstellten Beleuchtungskonzepte erweisen sich als dementsprechend schwierig zu gestalten, da sich die Anforderungen der Einzelaspekte oftmals konträr zueinander darstellen. So erweisen sich beispielsweise die zur Gewährleistung des allgemeinen nächtlichen Sicherheitsempfindens erforderlichen Beleuchtungsstärken gleichzeitig als potenziell negativ hinsichtlich gesundheitlicher Zielsetzungen, können bei unbedachter technologischer Anwendung zu negativem visuellem Komfort beitragen und weisen im Allgemeinen einen negativen Einfluss auf die energetische Bilanz des Gesamtsystems auf. Im Gegensatz dazu können jedoch energetisch positive Beleuchtungssituationen mit geringen Beleuchtungsstärken visuellen Anforderungen oft nicht oder nur unzureichend genügen. Nachhaltigkeitsziele erweisen sich dementsprechend im Allgemeinen als kontextuell abhängig und nur im Rahmen einer übergeordneten Betrachtungsweise als zielführend evaluierbar.

Projektbeschreibung

Das Projekt NOBEL adressierte die einfürend beschriebene Herausforderung mit einem grundlegenden Forschungsvorhaben, welches nicht nur eine umfassende Evaluierung der nachhaltigkeitsbezogenen Potenziale zukünftiger Beleuchtungstechnologien, sondern auch deren langfristige Adressierung gewährleisten soll. Die Erreichung dieses Ziels erforderte vor allem auch die Sicherstellung einer ausreichenden Beachtung potenzieller Hinderungsfaktoren entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Unter Beachtung der beschriebenen umwelt-, wirtschaftlichkeits- und nutzerbezogenen Teilaspekte unterliegen Beleuchtungen im öffentlichen Raum zunehmend komplexer werdenden Anforderungen. Neben allgemeinen Nachhaltigkeitszielen hinsichtlich erhöhter Energieeffizienz und reduziertem Ressourcenverbrauch sollen zukünftige Systeme dementsprechend auch maßgeblich die Wiederverwertbarkeit von Teilkomponenten fördern. Zudem sollen sie zu einer allgemeinen Erhöhung der Aufenthaltsqualität im öffentlichen Umfeld beitragen und geringere negative Umwelteinflüsse in Bezug zu z.B. Lichtverschmutzung und urbaner Biodiversität aufweisen. Theoretisch erweisen sich viele der teilweise gegenläufigen Anforderungen heute als adressierbar. Die nachhaltige Markteinführung solcher Technologien und ihre fortlaufende Verwertung hängen jedoch stark von übergeordneten, einschränkenden Faktoren entlang der gesamten Wertschöpfungskette ab. Um bei der Quantifizierung der Potenziale eine ausreichende Beachtung von damit einhergehenden und möglicherweise auftretenden Limitationen vornehmen zu können, erfolgte der Einchluss aller an der Umsetzung von Außenraumbeleuchtungen beteiligten Interessensgruppen.

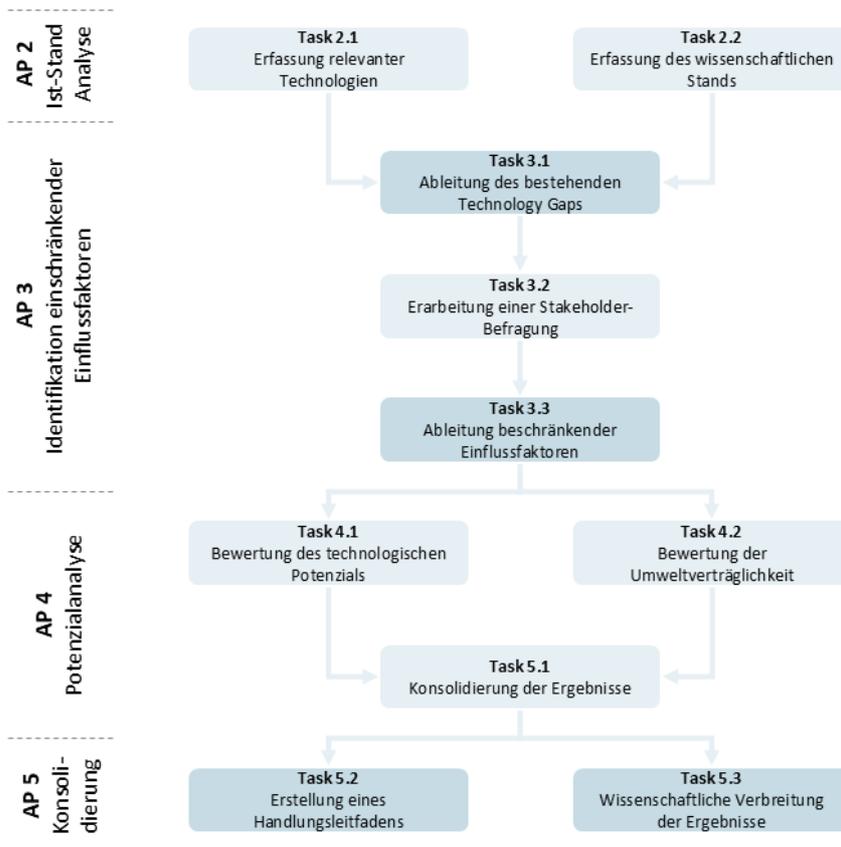
Übergeordneter Projektablauf

Das Projekt NOBEL fokussierte auf einen systematisch aufbauenden Projektablauf (siehe [Abbildung 1](#)), welche das Erreichen der übergeordneten Projektziele mittels spezifisch formulierten Teilschritten gestattete. In der eingehenden Projektphase wurden dabei im Rahmen einer Ist-Stands Analyse mittels technologischer und wissenschaftlicher Recherchen Ansätze zur aktuellen Marktlage und zukunftsorientierten Forschung abgebildet, welche

anschließend in bilateralen Gesprächen mit Vorstellungen der produzierenden Industrie abgeglichen wurden.

In der darauffolgenden Projektphase wurden auf Basis der erfassten Informationen zentrale Kerntechnologien formuliert, welche im weiteren Projektverlauf im Abgleich zu bestehenden Themenfeldern mit erhöhter Relevanz für Außenraumbeleuchtungen eine vertiefte Evaluierung erfuhren. Mit speziellem Augenmerk auf die Identifikation von sowohl technologischen Potenzialen als auch beschränkenden Faktoren (z.B. Wartbarkeit von Systemen, aktueller Netzausbau, produktionsbezogene Beschränkungen), wurde hierfür eine Online-Befragung unter Einschluss aller an der Umsetzung beteiligten Interessensgruppen durchgeführt.

Abbildung 1 Darstellung des in NOBEL angesetzten übergeordneten Projektablaufs in einem PERT-Chart mit Arbeitspaketen und Sub-Tasks.



Im Rahmen einer Potenzialanalyse wurden die erfassten Daten abschließend systematisch sowohl übergeordnet als auch in Bezug zu den einzelnen Interessensgruppen und Technologien analysiert. Die identifizierten Kerntechnologien wurden dabei sowohl hinsichtlich ihres disruptiven Potenzials als auch ihrer positiven Nachhaltigkeitsaspekte unter Beachtung der auf die einzelnen Interessensgruppen bezogenen Beschränkungsfaktoren bewertet und in den vorliegenden Handlungsleitfaden überführt. Unter Beachtung der Komplexität des Anwendungsfeldes öffentlicher Beleuchtungen im Außenbereich sollen die im weiteren angeführten Ergebnisse nicht nur dazu beitragen ein Erreichen der Energiewende bis 2030 zu fördern, sondern vor allem den erweiterten gesellschaftlichen Nutzen durch die adäquate Beachtung sozialer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen sicherstellen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle nicht weiter auf die einzelnen durchgeführten Arbeitsschritte eingegangen. Eine detaillierte Beschreibung aller inhaltlichen Tätigkeiten in Bezug zum übergeordneten Projektablauf (siehe auch Sub-Tasks in [Abbildung 1](#)) kann jedoch dem beiliegenden [Anhang A: Detaillierte Tätigkeitsbeschreibung](#) entnommen werden.

Ergebnisdarstellung

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Projekts NOBEL präsentiert. Alle angeführten Ergebnisse erweisen sich dabei als Resultat des oben beschriebenen Projektablaufs und stellen ein direktes Abbild der Befragung aller relevanter Interessensgruppen dar. Zur Förderung der Übersichtlichkeit und einfacheren Verständlichkeit wird bei der Ergebnisdarstellung auf eine Aufteilung der Antworten auf dezidierte Gruppierungen verzichtet und im Allgemeinen auf die Veranschaulichung übergeordneter Ansichten fokussiert. In Fällen von maßgeblichen Abweichungen der Meinungen zwischen Gruppierungen oder bei zwischen den Interessensgruppen abweichenden Fragestellungen werden die erhaltenen Einblicke jedoch gesondert angeführt.

Die Präsentation der Ergebnisse erfolgt in vier Abschnitten. Einführend werden die Umfrageteilnehmer:innen in Bezug zu den einzelnen Interessensgruppen charakterisiert. Die Beschreibung erfolgt sowohl im Hinblick auf die erhobenen sozio-demographischen Informationen als auch in Bezug zu den übergeordneten Haltungen zu umwelt- und nachhaltigkeitsbezogenen Aspekten. Anschließend werden im Rahmen der thematischen Relevanz kontextuelle Faktoren beschrieben. Die präsentierten Ergebnisse basieren dabei maßgeblich auf sowohl den durchgeführten Literaturrecherchen als auch den thematisch adressierten

Fragestellungen der Online-Befragung. Eine vollständige Quantifizierung der Potenziale und möglichen Hinderungsfaktoren in Bezug zu den erfassten Kerntechnologien erfolgt anschließend im Rahmen der technologischen Potentialbeschreibung. Abschließend werden zusammenfassend die Einzelergebnisse konsolidiert formuliert und die technologiebezogenen Roadmaps vorgestellt.

Aufgrund der Komplexität des untersuchten Themenkomplexes, welche maßgeblich aus dem Umstand resultiert, dass Beleuchtungstechnologien immer maßgeblich Zusammenhänge zu unterschiedlichen Themenbereichen aufweisen und dementsprechend Einzelthemen nicht zielführend im Kontext einzelner technologischer Aspekte besprochen werden können, wird bei der Präsentation der Ergebnisse auf eine schematische Abarbeitung des Fragenkatalogs verzichtet. Die gewonnenen Informationen werden vielmehr unter spezifischen Fragestellungen reflektiert und inhaltlich diskutiert. Um dennoch die Transparenz der abgeleiteten Ergebnisse zu wahren, werden in Bezug zu allen im Weiteren dargestellten Informationen die zugehörigen Fragencodes der Online-Befragung angeführt. Eine vollständige Auflistung aller Einzelergebnisse der Online-Befragung inklusive des vollständigen Fragenkatalogs mit der zugehörigen Kodierung kann dem diesem Bericht beiliegendem **Anhang B: Einzelergebnisse der Interessensgruppenbefragung** entnommen werden.

Beschreibung der Interessensgruppen

Um ein möglichst repräsentatives Abbild der aktuellen Meinungen zu thematischen Fragestellungen und technologischen Potenzialen zu erreichen, adressierte die Online-Befragung im Projekt NOBEL Interessensgruppen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Außenraumbelichtungen. Im folgenden Abschnitt werden die erreichten Umfrageteilnehmer:innen bezogen auf die jeweiligen Zielgruppen näher charakterisiert.

Die im Folgenden angeführten Beschreibungen der einzelnen Interessensgruppen erfolgen sowohl in Bezug zu dem erreichten Stichprobenumfang als auch hinsichtlich der dezidierten Stichprobencharakterisierung. Da die Befragung mehrere Gruppierungen adressierte, welche sich grundsätzlich aufgrund der unterschiedlichen Betätigungsfelder in ihrer Beteiligung an der Umsetzung von Außenraumbelichtungen sehr stark unterschieden, erfolgt die Stichprobencharakterisierung in Bezug zu den einzelnen Interessengruppen. Vorgestellte Ansichten und Haltungen zu umweltbezogenen Aspekten werden hingegen auf übergeordneter Ebene vorgestellt.

Stichprobenumfang

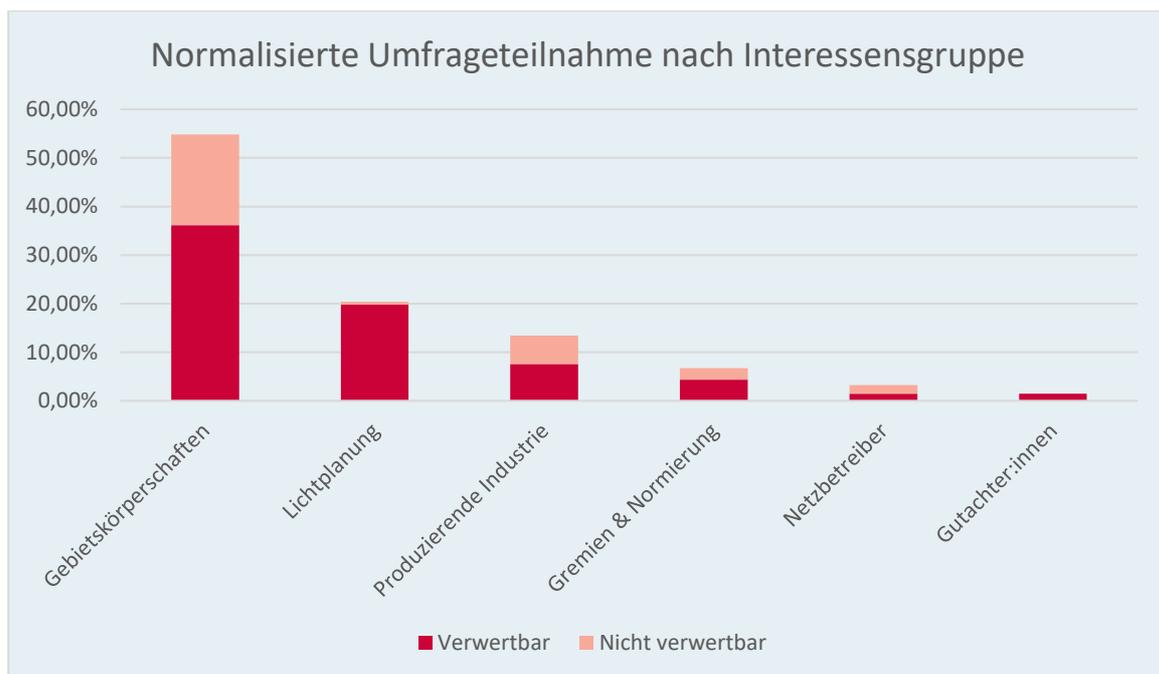
Insgesamt konnten im Rahmen der Online-Befragung 1264 Personen erreicht werden. Davon gestalteten sich nach qualitativer Prüfung der erhaltenen Rückmeldungen 246 Datensätze als verwertbar (19,5% der erreichten Personen). 119 der verwertbaren Datensätze stellen vollständig ausgefüllte Fragebögen dar (9,5% der erreichten Personen), die restlichen 127 Datensätze (10,0% der erreichten Personen) bezeichnen teilweise ausgefüllte Fragebögen, welche vorzeitig abgebrochen wurden und dementsprechend nicht vollständig in die Analyse einbezogen werden konnten. 1018 der erreichten Personen haben den Link zur Umfrage zwar geöffnet, jedoch anschließend keine oder nur unzureichend viele Teilbereiche des Fragebogens beantwortet und wurden dementsprechend aus dem Analyseprozess ausgeschlossen.

Die bereits beschriebenen Zielgruppen der Umfrage unterschieden sich nicht nur maßgeblich in Bezug zu ihrer Beteiligung an der Umsetzung von Außenraumbelichtungen,

sondern auch hinsichtlich des potenziell adressierbaren Stichprobenumfangs. Vertreter der Gruppierungen Gremien & Normierung, Gutachter:innen und Netzbetreiber erwiesen sich dabei im Zuge der Kontaktrecherche als deutlich reduziert gegenüber den Interessensgruppen Gebietskörperschaften, Lichtplanung oder der Produzierenden Industrie. Es wurden dementsprechend für die einzelnen Gruppen unterschiedliche Annahmen zur Bewertung der Repräsentativität der erzielten Stichproben getroffen.

Die Interessensgruppe Netzbetreiber konnte dabei leider nicht ausreichend adressiert werden, da eine Repräsentativität mit nur 4 vollständig verwertbaren Teilnahmen nicht angenommen werden kann. Für die Gruppe der Gutachter:innen konnte im Rahmen der Umfrage zwar ein repräsentatives Ergebnis erzielt werden, mit weniger als 10 explizit auf Beleuchtung bezogenen Gutachter:innen in Österreich erwies sich der adressierbare Stichprobenumfang jedoch für eine zu anderen Interessensgruppen vergleichbare Analyse als zu gering. Beide Interessensgruppen werden daher in die weiterführenden Analysen und Ergebnisse nicht miteinbezogen.

Abbildung 2 Darstellung der Umfrageteilnahme nach Interessensgruppe inkl. verwertbarer und nicht verwertbarer Teilnahmen normalisiert auf die Gesamtmenge an Umfrageaufrufen und absteigend gereiht nach prozentualer Verwertbarkeit; Seitenaufrufe, welche nicht einer dezidierten Interessensgruppe zugeordnet werden konnten, wurden in die dargestellten Werte nicht miteinbezogen.



Stichprobencharakterisierung

Im Folgenden werden die verwertbaren Stichproben hinsichtlich der erfassten sozio-demographischen Daten charakterisiert. Die Charakterisierungen werden dabei sowohl in Bezug zu den individuellen Umfrageteilnehmer:innen als auch den vertretenen Einrichtungen (z.B. Gebietskörperschaften oder Unternehmen) vorgenommen. Wenn nicht anders angegeben, wurden alle Zahlen auf null Nachkommastellen gerundet, um die leichte Lesbarkeit sicherzustellen.

Gebietskörperschaften

Für die Interessensgruppe der Gebietskörperschaften (nachfolgend abgekürzt GKS) liegen 126 verwertbare Datensätze vor (56 vollständig verwertbar, 70 teilweise verwertbar). 76% der Umfrageteilnehmer:innen waren männlich und 24% weiblich. Das durchschnittliche Alter in der Stichprobe betrug 48 ± 12 Jahre (Spannweite 20-69 Jahre). Bezüglich des Bildungsstandes verfügten 10% der Personen über einen Pflichtschulabschluss, 42% über einen Abschluss der Sekundarstufe II, 21% über einen Bachelor-Abschluss, 25% über einen Master-Abschluss und 2% über ein Doktorat. In Bezug zur Bewertung des Zusammenhangs der eigenen beruflichen Tätigkeit mit gestalterischen Aspekten des urbanen Raums auf einer 7-studigen Likert Skala, lag der Median bei 5 mit einer Spannweite von 1-5.

Strukturelle Charakterisierung der Gebietskörperschaften

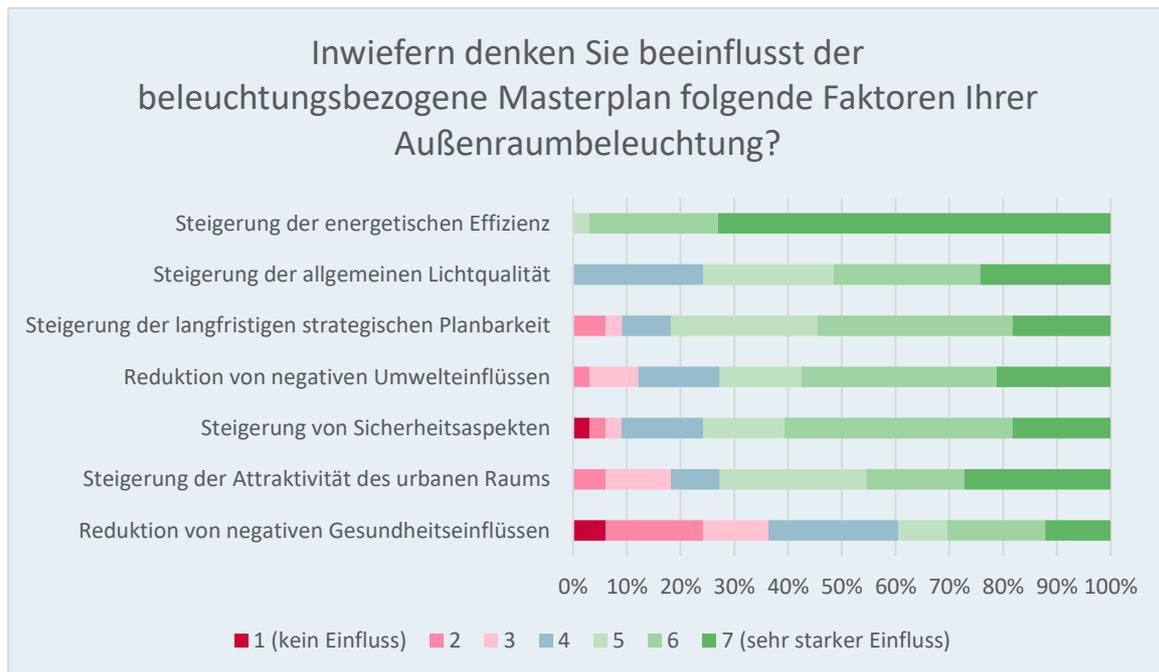
Zur genaueren Charakterisierung der zentralen strukturellen Eigenschaften der jeweiligen Gebietskörperschaft, welche bei der Bewertung beleuchtungsspezifischer Faktoren einen potenziellen Einfluss nehmen können, wurden weitere Fragen gestellt, die auf einer 7-stufigen Likert Skala beantwortet wurden. Die Rolle des Tourismus in der Gebietskörperschaft wurde dabei mit einem Median von 4 und einer den ganzen Skalenbereich umfassenden Spannweite von 1-7 bewertet. Bei der Frage, wie stark ist die Kernzone der Gebietskörperschaft vom Handel geprägt ist, lag der Median bei 3 und die Spannweite bei 1-5. Insgesamt kann dementsprechend behauptet werden, dass die Stichprobe in Bezug auf die Charakterisierungsfragen ein breites Spektrum an verschieden ausgeprägten Gebietskörperschaften abdeckt. Die Tabellen zu diesen Fragen befinden sich im Anhang unter S2GKS.

Beleuchtungsspezifische Charakterisierung der Gebietskörperschaften

41% der Gebietskörperschaften gaben an, dass für ihre GKS ein beleuchtungsbezogener Masterplan besteht. Die Einflüsse von Masterplänen auf beleuchtungsbezogene Aspekte des urbanen Raums wurde von GKS mit vorhandenem Masterplan stärker bewertet

(Abbildung 3) als von GKS, in denen zum Zeitpunkt der Befragung kein Masterplan bestand. In 63% der GKS bestehen Objektanstrahlungen öffentlicher Gebäude, von denen 31% die ganze Nacht über eingeschaltet sind. Der potenzielle Beitrag der Objektanstrahlungen zum Orientierungsvermögen im öffentlichen Raum wird als eher gering eingeschätzt, der Beitrag zur Attraktivierung für Einwohner:innen als mittel. Beiträge zur Identitätsbildung und Attraktivierung für Tourismus werden dagegen jedoch als hoch eingeschätzt. Weiters gehen die GKS auch davon aus, dass die bestehenden Objektanstrahlungen von den Einwohner:innen eher gewünscht werden. In 33% der GKS bestehen zudem noch nach oben abstrahlende Beleuchtungssysteme, wobei in 50% dieser Fälle bereits konkrete Ansätze bestehen, diese Systeme auszutauschen bzw. deren Abstrahlung nach oben zu begrenzen. Der historische Wert der bestehenden Systeme wird als niedrig angesehen, was das Adaptionspotenzial zur Verringerung schädlicher Umweltbelastungen unterstreicht.

Abbildung 3 Einschätzung des Einflusses von bestehenden Masterplänen auf beleuchtungsrelevante Zielkriterien sortiert nach dem mittleren Einflussgrad



Niedrige Farbtemperaturen bis 3000 K in öffentlichen Bereichen werden bereits in 48% der GKS eingesetzt, sehr niedrige Farbtemperaturen kleiner 2500 K dagegen jedoch nur knapp 19% der Fälle. 33% bzw. 38% der Befragten konnten in Bezug zur eingesetzten Farbtemperatur keine Angabe machen. Spezielle Spektren, die auf die lokal vorkommenden Spezies abgestimmt sind, kommen aktuell nur in 15% der GKS zur Anwendung, wobei 35% der

Befragten dazu keine konkrete Angabe machen konnten. Eine Reduktion der nächtlichen Beleuchtung durch Dimmung ab einer gewissen Uhrzeit wird bereits in 61% der GKS umgesetzt, eine lokale Komplettabschaltung in 44%. Eine Reduktion der nächtlichen Beleuchtung durch sensorbasierte Steuerungsverfahren ist aktuell in 32% der befragten GKS in Anwendung und nach oben abstrahlende Beleuchtungssysteme werden bereits in 80% der GKS vermieden.

Lediglich 12% der GKS gaben an, dass die Bevölkerung aktuell in die Planung der Außenbeleuchtung involviert wird. Die Entscheidungen bezüglich zukünftiger Beleuchtungsmaßnahmen werden dabei vor allem basierend auf der aktuellen Normgebung getroffen (78%), gefolgt von der politischen Haltung (56%) und Empfehlungen/Positionspapieren von Gremien (37%). Bevölkerungsumfragen (14%) oder marketingorientierte Grundlagen (17%) spielen nur eine untergeordnete Rolle. Für mehr als die Hälfte der Gemeinden bietet die Außenraumbeleuchtung keinen oder nur einen geringen Marketingwert als Instrument zur Steigerung der touristischen Attraktivität. 53% der GKS beschreiben ihre Außenraumbeleuchtung als innovativ, von den verbleibenden 47% geben 29% an, dass es konkrete Pläne gibt, die Innovativität der Außenbeleuchtung zu steigern. Die Tabellen zu diesen Fragen befinden sich im Anhang unter S4GKS.

Beleuchtungsbezogene Fachplaner

Für die Interessensgruppe der Fachplaner (nachfolgend abgekürzt FP) liegen insgesamt 70 Datensätze vor, von welchen 38 vollständig verwertbar, und 32 teilweise verwertbar sind. Die Umfrageteilnehmer:innen waren zu 67% männlich und 32% weiblich. Eine Person gab divers bei der Geschlechtsauswahl an. Das durchschnittliche Alter in der Stichprobe der FP betrug 47 ± 13 Jahre (Spannweite 23-72 Jahre). Bezüglich des Bildungsstandes verfügte 1% der Personen über einen Pflichtschulabschluss, 13% über einen Abschluss der Sekundarstufe II, 20% über einen Bachelor-Abschluss, 63% über einen Master-Abschluss und 3% über ein Doktorat.

Unternehmensbezogene Charakterisierung

49% der FP hatten ihren Sitz in Deutschland, 34% in Österreich, 11% in der Schweiz, und 6% verteilten sich auf Indien, Luxemburg und Italien. 77% der Unternehmen wurden als kleines Unternehmen klassifiziert, 17% als mittlere Unternehmen und 1% als große Unternehmen. Der Innovationsanspruch des Unternehmens wurde auf einer 7-studigen Likert Skala bewertet (1 = kein Anspruch vorhanden; 7 = zentrale Zielvorgabe). Der Median lag hier bei 6, mit einer Spannweite von 1-7.

Tätigkeitsbezogene Charakterisierung

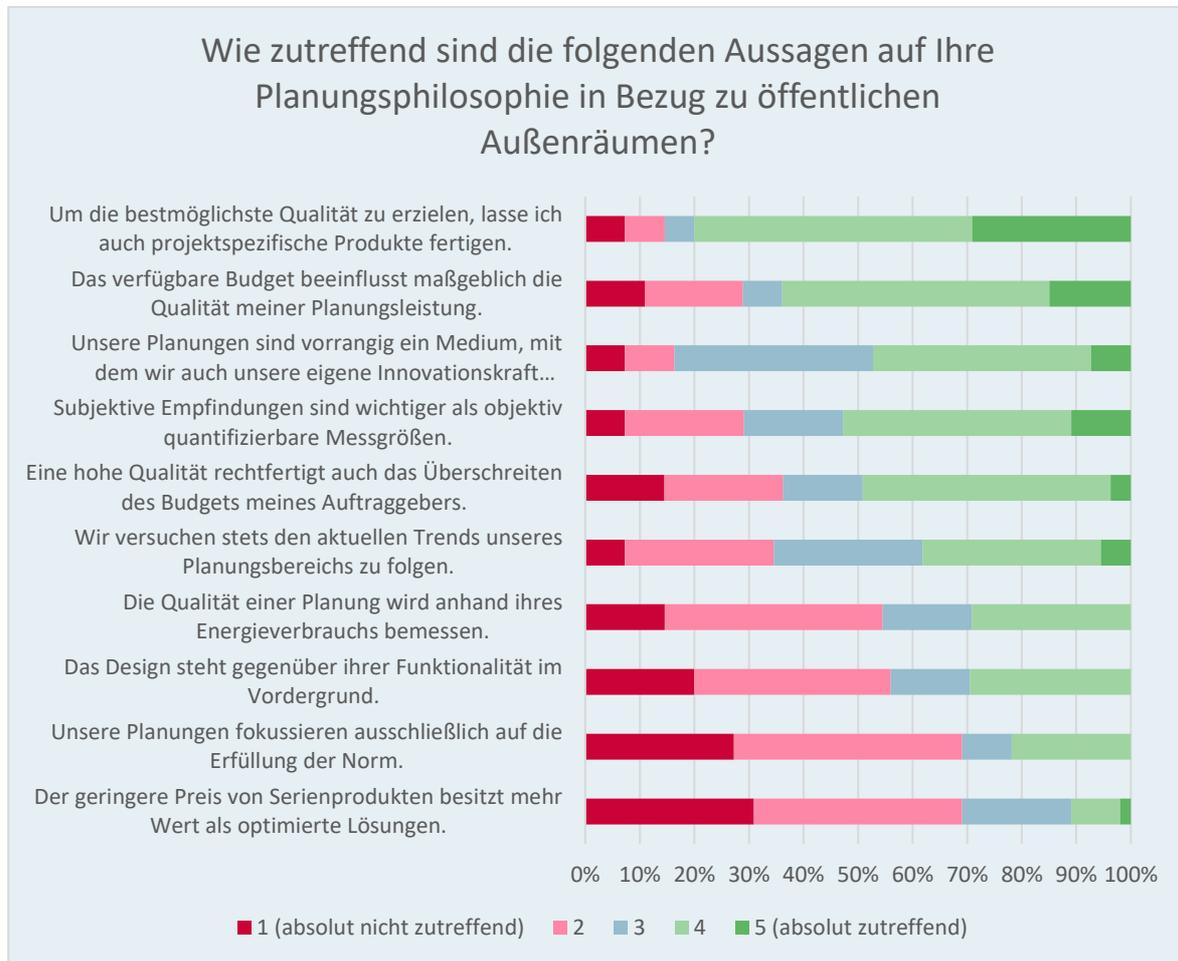
Im Durchschnitt arbeiteten die an der Umfrage beteiligten Personen bereits seit 19 ± 11 Jahren in ihrer aktuellen Position (Spannweite 2-46 Jahre). Der Bezug zu den inhaltlichen vorrangigen Tätigkeitsbereichen wurde mittels einer 5-stufigen Likert Skala (1 = keine Beschäftigung; 5 = sehr hohe Beschäftigung) abgefragt. In den abgefragten Bereichen „gestalterische Aspekte des urbanen Raums“, „Umwelt- oder Artenschutz“, „Psychische und körperliche Gesundheit“ sowie „Normen und Richtlinien“ wurde mit einem Median von 3 ein ausgeglichener Beschäftigungsgrad angegeben. Mit einem Median von 4 lag die Beschäftigung mit dem Bereich „Licht und Beleuchtung in Außenräumen“ erwartungsgemäß höher. Der Beschäftigungsgrad im Bereich „Digitalisierung und künstliche Intelligenz“ wurde dagegen mit einem Median von 2 geringer eingestuft. Die auftretenden Spannweiten betragen bei allen Items 1-5, was die Heterogenität der adressierten Themenbereiche unterstreicht. Die Tabellen zu diesen Fragen befinden sich im Anhang unter S2FP.

Beleuchtungsspezifische Charakterisierung der Fachplaner

47% der FP gaben an, dass sie in der Vergangenheit bereits einen beleuchtungsbezogenen Masterplan gestaltet haben, wobei die möglichen positiven Einflüsse als stark bewertet wurden. 73% der FP haben in der Vergangenheit bereits Objektanstrahlungen öffentlicher Gebäude geplant, wobei deren Beitrag zum Orientierungsvermögen, der Identitätsbildung und der Attraktivität des öffentlichen Raums für Einwohner und Tourismus als mittel bis hoch eingeschätzt wird und dementsprechend von den Einwohnern eher schon gewünscht werden.

In Bezug zu allgemeinen Nachhaltigkeitskriterien werden nach oben abstrahlende Beleuchtungssysteme aktuell nur von 16% der FP verplant, wobei der historische Wert dieser Beleuchtungssysteme grundsätzlich als eher hoch eingeschätzt wird. Dies verweist darauf, dass diesbezügliche Systeme nach Möglichkeit in Planungsprozessen bereits vermieden werden. Am häufigsten werden von den FP niedrige Farbtemperaturen unter 3000 K verwendet sowie die nächtliche Beleuchtung durch Dimmung ab einer gewissen Uhrzeit reduziert. Spezielle Spektren, die auf die vorkommenden Spezies abgestimmt sind, werden nur eher selten verwendet. Die Planungen werden vorrangig von internen Planungsphilosophien (**Abbildung 4**) und der aktuellen Normengebung beeinflusst, Empfehlungen aus Fachgremien oder die politische Haltung der auftraggebenden GKS beeinflussen die Planungen zwar auch, spielen jedoch eine eher untergeordnete Rolle. 45% der FP würden ihre Planung von Außenraumbeleuchtung als innovativ beschreiben. Die Tabellen zu diesen Fragen befinden sich in S4FP.

Abbildung 4 Bewertung planungsphilosophischer Einflussfaktoren der befragten beleuchtungsbezogenen Fachplaner sortiert nach dem Grad des Zutreffens



Produzierende Industrie

Für die Interessensgruppe der produzierenden Industrie (nachfolgend abgekürzt PI) liegen insgesamt 27 verwertbare Datensätze vor, von denen 11 vollständig und 16 teilweise verwertbar sind. Die Umfrageteilnehmer:innen waren zu 74% männlich und 26% weiblich. Das durchschnittliche Alter in der Stichprobe der PI betrug 47 ± 11 Jahre (Spannweite 28-65 Jahre). Bezüglich des Bildungsstandes verfügten 4% der Personen über einen Pflichtschulabschluss, 11% über einen Abschluss der Sekundarstufe II, 22% über einen Bachelor-Abschluss, 52% über einen Master-Abschluss und 11% über ein Doktorat.

Unternehmensbezogene Charakterisierung

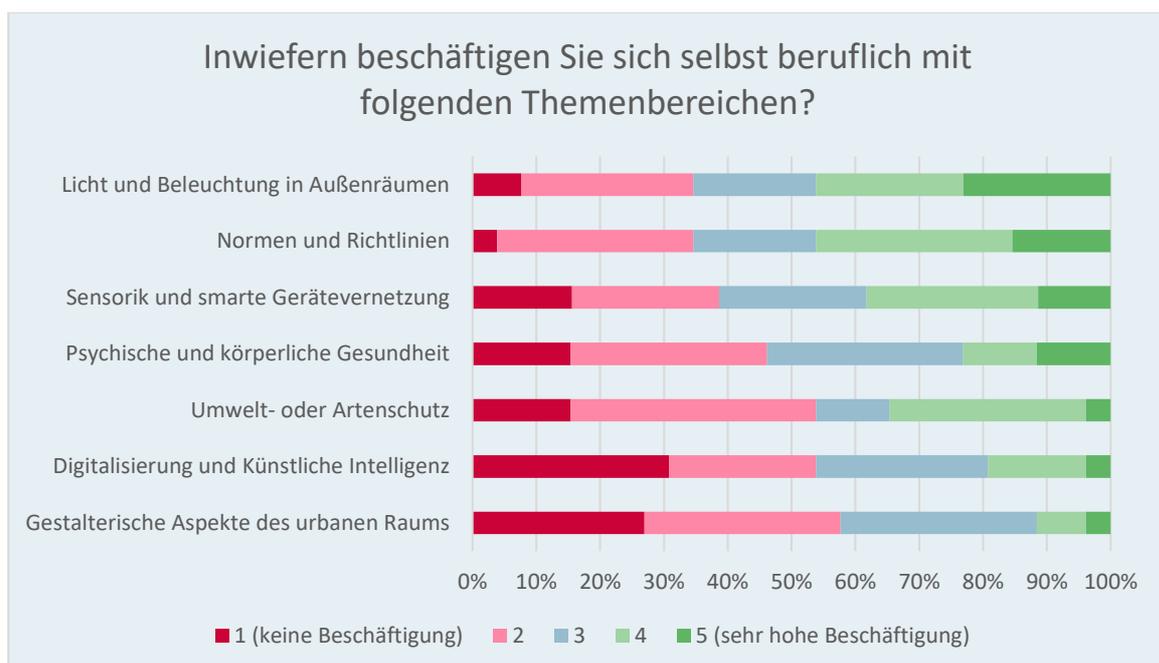
46% der PI hatten ihren Sitz in Deutschland, 38% in Österreich und 15% verteilten sich auf die Benelux Staaten und Italien. 38% der Unternehmen wurden als kleines Unternehmen

klassifiziert, 23% als mittlere Unternehmen und 46% als große Unternehmen. Der Innovationsanspruch des Unternehmens wurde auf einer 7-stufigen Likert Skala bewertet (1 = kein Anspruch vorhanden; 7 = zentrale Zielvorgabe). Mit einem Median von 5 und einer Spannweite von 2-5 verorteten sich die Unternehmen mit mittleren Innovationssegment, was auf eine breite Adressierung des Beleuchtungsmarktes schließen lässt.

Tätigkeitsbezogene Charakterisierung

Im Durchschnitt arbeiteten die an der Umfrage beteiligten Personen bereits seit 16 ± 11 Jahren in ihrer aktuellen Position (Spannweite 1-35 Jahre). Der Bezug zu den inhaltlichen vorrangigen Tätigkeitsbereichen (Abbildung 5) wurde mittels einer 5-stufigen Likert Skala (1 = keine Beschäftigung; 5 = sehr hohe Beschäftigung) abgefragt. In den abgefragten Bereichen „Licht und Beleuchtung in Außenräumen“, „Sensorik und smarte Gerätevernetzung“, „Psychische und körperliche Gesundheit“ sowie „Normen und Richtlinien“ wurde mit einem Median von 3 ein ausgeglichener Beschäftigungsgrad angegeben. Der Beschäftigungsgrad in den Bereichen „gestalterische Aspekte des urbanen Raums“, „Digitalisierung und künstliche Intelligenz“ und „Umwelt- oder Artenschutz“ wurde dagegen mit einem Median von 2 geringer eingestuft. Trotz des Fehlens höherer Einstufungen betrug die auftretenden Spannweiten bei allen Items 1-5, was die Heterogenität der adressierten Themenbereiche unterstreicht. Die Tabellen zu diesen Fragen befinden sich im Anhang unter S2PI.

Abbildung 5 Bewertung des Bezugs der produzierenden Industrie zu inhaltlichen Tätigkeitsbereichen sortiert nach dem Beschäftigungsgrad



Beleuchtungsspezifische Charakterisierung der produzierenden Industrie

Nach eigenen Angaben erweisen sich in Bezug zu den vorrangigen Rahmenbedingungen, welche Produktentwicklungen beeinflussen, aktuelle Normen, interne Produktphilosophien sowie aktuelle Produktionsmöglichkeiten bzw. Herstellverfahren als maßgebend. Positionspapiere/Empfehlungen von Fachgremien oder die politische Haltung stellen dagegen nur verringerte Einflussfaktoren dar. Die Befragten beschrieben ihre Produkte generell als eher teuer, qualitativ hochwertig, high-end, funktional und kreativ. 77% der PI würden ihre Produkte dabei als innovativ beschreiben. Für 77% der PI lag der maßgebende Fokus des Produktportfolios auf der Straßen- und Platzbeleuchtung, für 62% auf der Parkbeleuchtung, für 54% auf der Beleuchtung untergeordneter Verkehrswege und der dekorativen Außenraumbeleuchtung und für 46% auf der Beleuchtung von Sportstätten. Für 85% der PI stehen ihre Entwicklungen in Zusammenhang mit physischen Produkten, wobei eine sehr starke Fokussierung auf die lichttechnischen Kenngrößen vorherrscht und eine zunehmende Fokussierung auf die Nutzung von standardisierten Schnittstellen erfolgt. 54% der PI entwickeln auch Steuerungslösungen bzw. integrieren Steuerungslösungen in ihre Produkte, wobei Steuerungskonzepte für dynamische Veränderungen bei fast allen Herstellern vorhanden sind. Auf maschinellem Lernen basierende Steuerungsverfahren sind jedoch sehr selten und werden von den befragten Unternehmen kaum implementiert. Die Tabellen zu diesen Fragen befinden sich im Anhang unter S4PI.

Einrichtungen für Normierung und fachbezogene Empfehlungen

Für die Interessensgruppe der Einrichtungen für Normierung und fachbezogene Empfehlungen (nachfolgend abgekürzt EFN) liegen insgesamt 16 Datensätze vor, von denen jeweils 8 vollständig und 8 teilweise verwertbar sind. 56% der Umfrageteilnehmer:innen waren männlich und 44% weiblich. Das durchschnittliche Alter in der Stichprobe der EFN betrug 48 ± 12 Jahre (Spannweite 35-82 Jahre). Bezüglich des Bildungsstandes verfügten 6% der Personen über einen Pflichtschulabschluss, 13% über einen Abschluss der Sekundarstufe II, 13% über einen Bachelor-Abschluss, 31% über einen Master-Abschluss und 38% über ein Doktorat. 88% der adressierten EFN arbeiten vorrangig in Bezug zu österreichischen Anwendungsfeldern. Die verbleibenden 12% entfielen auf Deutschland.

Tätigkeitsbezogene Charakterisierung

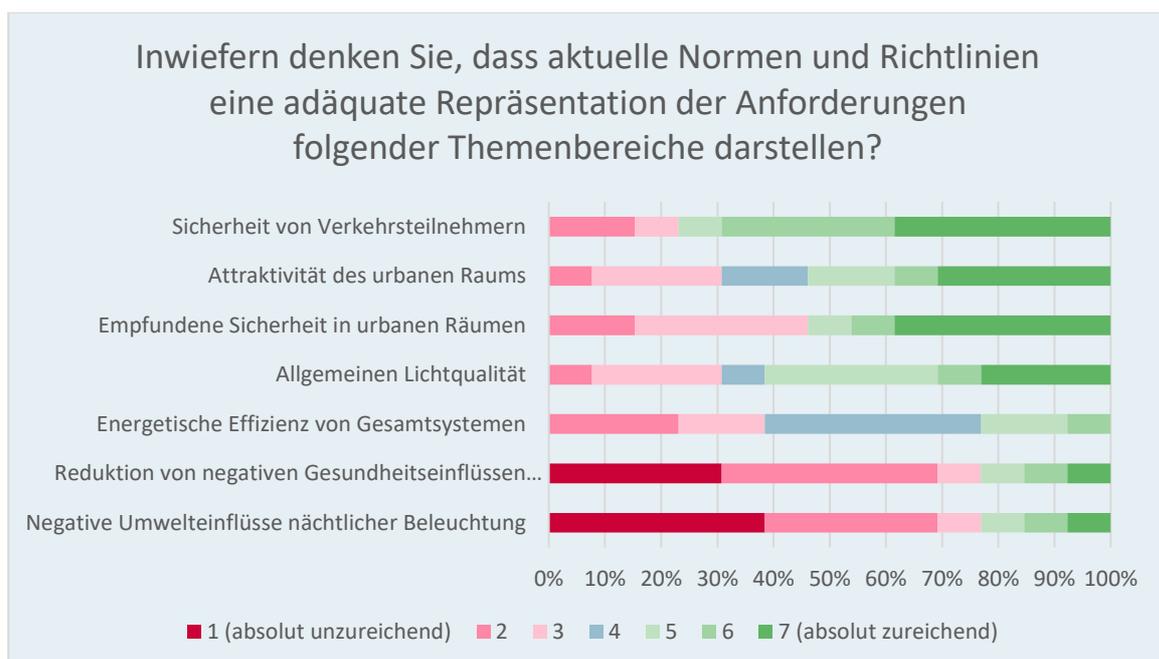
Im Durchschnitt arbeiteten die an der Umfrage beteiligten Personen bereits seit 14 ± 10 Jahren in ihrer aktuellen Position (Spannweite 1-44). Der Bezug zu den inhaltlichen vorrangigen Tätigkeitsbereichen wurde mittels einer 5-stufigen Likert Skala (1 = keine Beschäftigung; 5 = sehr hohe Beschäftigung) abgefragt. Im abgefragten Bereich „Psychische und

körperliche Gesundheit“ lag der Median bei 3. Mit einem Median von 4 im Bereich „Licht und Beleuchtung in Außenräumen“ und einem Median von 5 in Bezug zu „Umwelt- oder Artenschutz“ wurde der Beschäftigungsgrad mit nachhaltigkeitsbezogenen Themenfeldern deutlich höher eingestuft. Die Bereiche „gestalterische Aspekte des urbanen Raums“ sowie „Sensorik und smarte Gerätevernetzung“ wurde mit einem Median von 2 geringer eingestuft und mit einem Median von 1 wies der Bereich „Digitalisierung und künstliche Intelligenz“ den geringsten Beschäftigungsgrad auf. Die auftretenden Spannweiten betragen bei allen Items 1-5, was die Heterogenität der adressierten Themenbereiche unterstreicht. Die Tabellen zu diesen Fragen befinden sich im Anhang unter S2EFN.

Beleuchtungsspezifische Charakterisierung der Einrichtungen für Normierung

Die aktuellen Normen und Richtlinien repräsentieren nach Sicht der EFN die Anforderungen an die Sicherheit von Verkehrsteilnehmer:innen am besten, gefolgt von der Attraktivität des urbanen Raums und der allgemeinen Lichtqualität (Abbildung 6). Die Anforderungen negativer Umwelteinflüsse nächtlicher Beleuchtung sowie die Reduktion von negativen Gesundheitseinflüssen nächtlicher Beleuchtung werden aktuell jedoch deutlich unzureichend repräsentiert. Im Hinblick auf aktuelle fachbezogene Empfehlungen zeichnet sich ein ähnliches Bild. Hier wird von den EFN jedoch eine eher adäquate Repräsentation des Problembereichs der negativen Auswirkungen von nächtlicher Beleuchtung gesehen.

Abbildung 6 Bewertung des Standes aktueller Normen zu verschiedenen beleuchtungsrelevanten Zielkriterien sortiert nach dem Grad der Angemessenheit



Die aktuelle Geschwindigkeit der Anpassung verpflichtender Regulierungen in Bezug auf das Fortschreiten des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes wird als unzureichend gesehen. Eine direktere Integration fachbezogener Positionspapiere und Empfehlungen in verpflichtende Regulierungen wird in diesem Zusammenhang als sinnvoll gesehen. Die in fachbezogenen Empfehlungen oftmals deutlich erhöhten lichtbezogenen Gütekriterien werden jedoch als problematisch gesehen, um erhöhte Kosten zur Erreichung der Empfehlungen zu rechtfertigen. 69% der EFN sind keine konkreten Bestrebungen bekannt, die aktuellen Minimal Kriterien zur Beleuchtung des öffentlichen Raumes maßgeblich zu erhöhen. 92% der EFN sind der Meinung, dass die verpflichtende Einhaltung von Minimal Kriterien langfristig zur Verbesserung von nutzer- und umweltbezogenen Beleuchtungskriterien beitragen kann. Verpflichtend einzuhaltende Regulierungen sollten dabei jedoch nur in geringem Maß Aspekte der Wirtschaftlichkeit von Unternehmen berücksichtigen müssen, die Akzeptanz von Endnutzern hingegen in einem moderaten Maß. Die Schwierigkeit, steuerungsbezogene Aspekte in verpflichtend einzuhaltenden Regulierungen zu spezifizieren, wird als moderat eingeschätzt. Bei der Erstellung von Richtlinien und Normen fühlen sich die EFN nur moderat durch EU-Regulierungen in ihrer Freiheit beschränkt.

Umweltbewusstsein und Verantwortlichkeiten

Zur erweiterten Abbildung konfundierender Faktoren wurden von allen Umfrageteilnehmer:innen auch dezidierte Fragen zur Einschätzung des Umweltbewusstseins und der zur Erreichung von Umweltschutzaspekten betrachteten Verantwortlichkeiten verschiedener Interessengruppen beantwortet. Übergeordnetes Ziel der Fragestellungen war dabei sowohl eine Einschätzung der Unterstützung von Umwelt- und Artenschutz verschiedener Gruppen zu erreichen als auch Abbild des Grads der Verantwortungsübernahme oder -zuweisung zu erhalten.

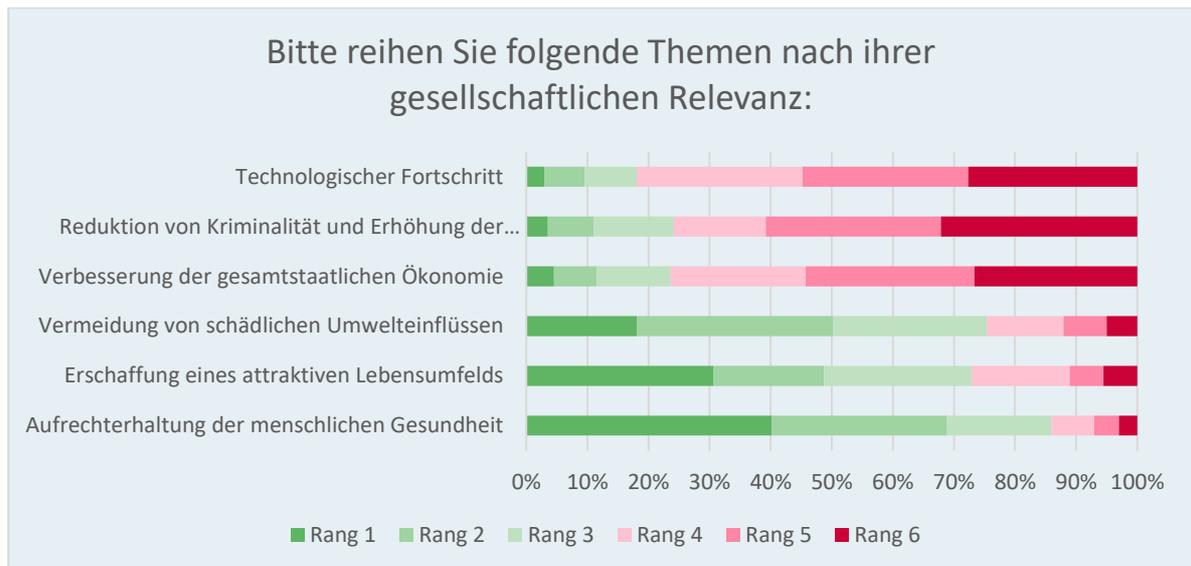
Gesellschaftliche Relevanz und Klimaschutzpolitik

Da Außenraumbelichtungen sich grundsätzlich im Rahmen eines multidimensionalen Anforderungsfelds verankern und dementsprechend gegenläufige Anforderungskriterien aus verschiedenen Themenbereichen existieren, zielte eine der gestellten Fragen auf die Abschätzung der gesellschaftlichen Relevanz der einzelnen Bereiche ab. Die Bereiche wurden dabei von den Teilnehmern absteigend gereiht. Obwohl alle angeführten Themenstellungen in Bezug zu Außenraumbelichtungen eine erhöhte Relevanz besitzen, folgt die Reihung nicht zwangsweise den normalerweise zu erwarteten Ergebnissen (**Abbildung 7**).

Am häufigsten auf Rang 1 oder Rang 2 wurde die Aufrechterhaltung der menschlichen Gesundheit gereiht (von knapp 70% der Befragten), welche thematisch gesehen für Beleuchtung ein relativ neues und meist schwer zu adressierendes Aufgabenfeld darstellt. Sowohl die Vermeidung von schädlichen Umwelteinflüssen als auch Erschaffung eines attraktiven Lebensumfelds (jeweils knapp 50% der Befragten) stellen dagegen zentrale und adressierbare Faktoren dar, die unter anderem auch einen erhöhten Aktualitätswert besitzen.

Weit dahinter liegen auf einem sehr ähnlichen, niedrigen Niveau, die Verbesserung der gesamtstaatlichen Ökonomie, die Reduktion von Kriminalität und Erhöhung der Sicherheit sowie der technologische Fortschritt. Speziell die niedrige Bewertung von Sicherheitsaspekten erweist sich in Bezug zu Außenraumbelichtungen als interessant, da hiermit eine Kernaspekt bestehender Zielkriterien eine äußerst niedrige Bewertung findet.

Abbildung 7 Beurteilung der gesellschaftlichen Relevanz der Themenbereiche



Weiters interessant ist der Umstand, dass die Vermeidung schädlicher Umwelteinflüsse eine sehr starke Wichtigkeit zugesprochen bekommt, die mit humanbezogenen Faktoren eine ähnliche Ausprägung aufweist und sich deutlich über ökonomischen und technologischen Zielsetzungen verortet. Der hohe Aktualitätswert von Umweltschutz und Nachhaltigkeitsbestrebungen erweist sich dabei als Ergebnis langjähriger wissenschaftlicher Grundlagenforschung und darauf aufbauender Öffentlichkeitsarbeit. Dass diese jedoch grundsätzlich bereits zu einem gesamtgesellschaftlichen Konsens beigetragen hat und auch von beleuchtungsbezogenen Interessensgruppen unterstützt wird, kann anhand der Umfrageergebnisse aufgezeigt werden.

Die Teilnehmer:innen wurden auf einer siebenstufigen Skala gefragt (Abbildung 8), ob Österreich ihrer Meinung nach zukünftig in der Klimaschutzpolitik voran gehen oder sich dem Tempo anderer Länder anpassen sollte (3 Antwortoptionen für Anpassung, 3 Antwortoptionen für voran gehen, 1 neutrale Option). Etwa 75% der Befragten waren der Meinung, dass Österreich zukünftig in der Klimaschutzpolitik voran gehen sollte, nur 14% waren der Meinung, dass sich Österreich anpassen sollte. Etwa 10% wählten die neutrale Option.

Abbildung 8 Einschätzung der österreichischen Klimaschutzpolitik



Verantwortungsgrade und gegenseitiges Vertrauen

Zur Einschätzung des übergeordneten Verantwortungsgrads an zur Erreichung von umweltschutzspezifischen Zielsetzungen beteiligten Institutionen und des gegenseitigen Vertrauens der einzelnen Interessensgruppen im Hinblick auf die Unterstützung zur Bewältigung dieser Herausforderung, wurden weitere Reihungsaufgaben gestellt.

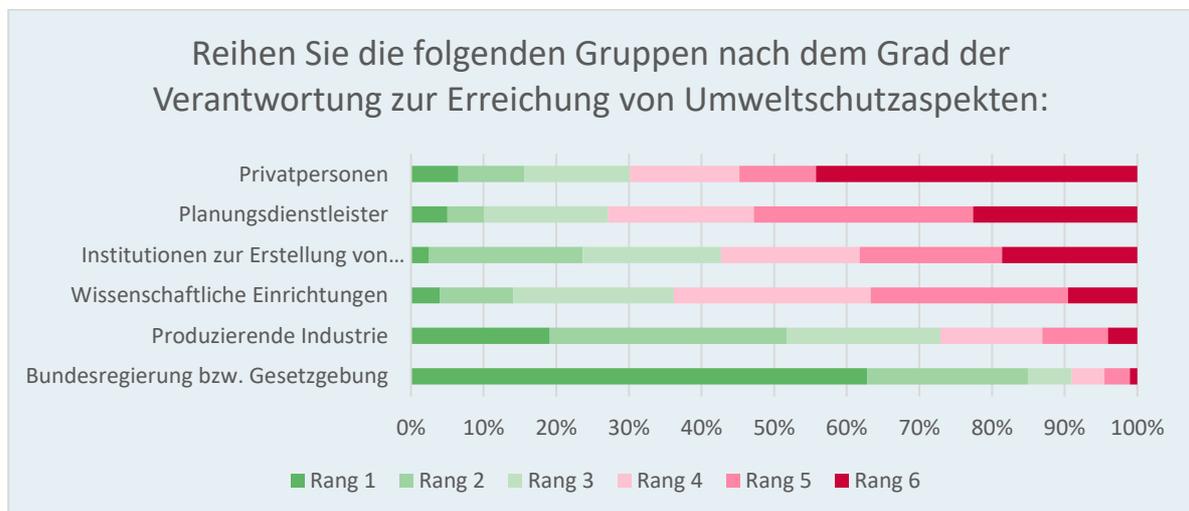
In Bezug zum Grad der Verantwortung wurde dabei der eindeutig höchste Verantwortungsgrad der Bundesregierung bzw. Gesetzgebung zugesprochen (Abbildung 9). Knapp 85% der Befragten setzten diese Gruppe auf Rang 1 oder Rang 2, etwas über 60% auf Rang 1. Bereits mit relativ großem Abstand folgte die produzierende Industrie, welche von knapp 50% der Befragten mit Rang 1 oder Rang 2 dennoch ein, bezogen auf die anderen abgefragten Gruppen, hoher Verantwortungsgrad zugesprochen wurde. Institutionen zur Erstellung von disziplinbezogenen Richtlinien folgten auf Rang 3 mit etwa 20% der Nennungen auf Rang 1

oder Rang 2. Dahinter liegen auf einem untereinander sehr ähnlichen Niveau die Privatpersonen, wissenschaftliche Einrichtungen und Planungsdienstleister.

Im Hinblick auf Außenraumbeleuchtungen erweist sich speziell die niedrige Einordnung von Planungsdienstleistern als Interessant. Während die hohen Einstufungen der produzierenden Industrie und normativen Einrichtungen über die Bereitstellung adäquater Produkte und Richtlinien gerechtfertigt werden können, zeigen sich planerische Konzepte dennoch auch als maßgeblich an der Erreichung umweltschutzbezogener Ziele beteiligt. Der richtige Einsatz von Produkten, fachbezogenes Knowhow zur richtigen Beurteilung situativer Anforderungen sowie die Kenntnis von über normative Forderungen hinausreichenden Planungsempfehlungen von Interessensvertretungen sind nur einige Beispiele, die im Kontext des Einflusses von Fachplanern auf den Umweltschutz angeführt werden können.

Bei genauerer Betrachtung der auf die Interessensgruppen bezogenen Einzelergebnisse der Umfrage wird hierbei auch deutlich, dass die Gruppe der Fachplaner sich selbst als Planungsdienstleister wesentlich stärker in Verantwortung setzte, als dass dies auf gruppenübergreifender Ebene der Fall ist. Vor allem GKS sahen die potenziellen Beiträge von FP als deutlich niedriger und werteten dementsprechend den Grad der Verantwortung als sehr gering. Potenziell erweist sich diese Abweichung als Symptomatik einer Vernachlässigung der Wichtigkeit planerischer Beiträge durch die auftraggebenden Gebietskörperschaften. Speziell kleinere Gemeinden nutzen häufig interne Abteilungen zur Planung und Umsetzung ihrer Außenraumbeleuchtungen und vernachlässigen so potenzielle Beiträge fachkundigen Knowhows. Die Ergebnisse können auch dem Anhang unter S3 entnommen werden.

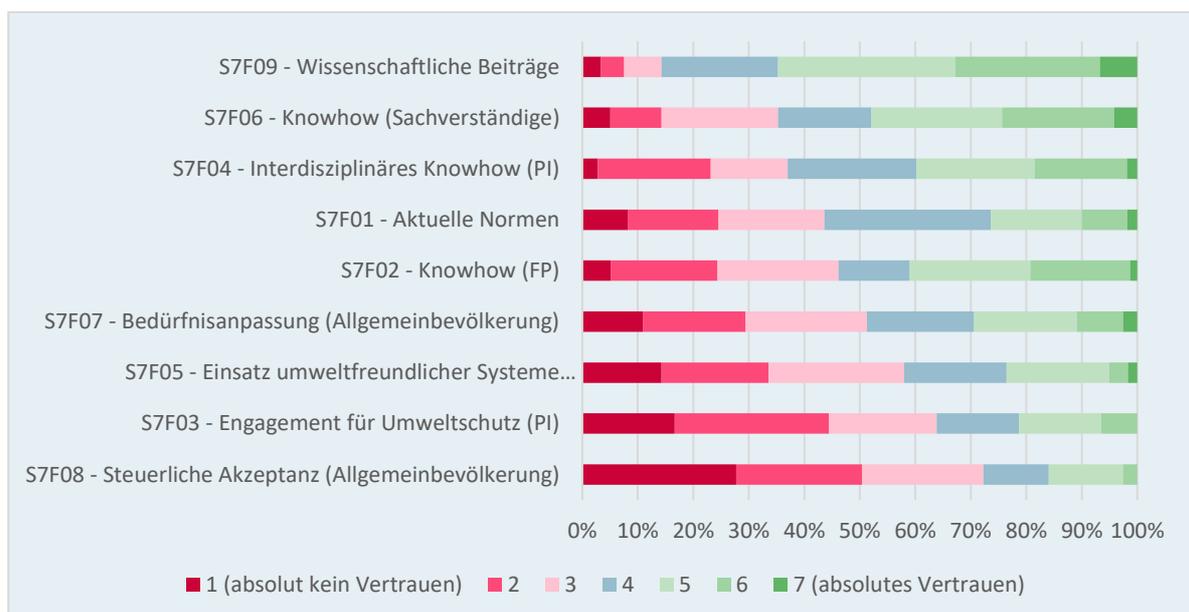
Abbildung 9 Verantwortungsgrade zur Erreichung von Umweltschutzaspekten



Bezogen auf das zwischen den Interessensgruppen vorhandene Vertrauen auch unter limitierenden Rahmenbedingungen einen nachweislichen Beitrag zu österreichischen Klima- und Umweltschutzbemühungen leisten zu wollen, zeigte sich ein interessantes Bild (Abbildung 10). Die Teilnehmer:innen beantworteten dabei mehrere gruppenbezogene Aspekte auf einer 7-stufigen Likert Skala (1 – absolut kein Vertrauen, 7 – absolutes Vertrauen).

Gruppenübergreifend wurde das größte Vertrauen dabei eindeutig wissenschaftlichen Beiträgen zugesprochen. Auch dem bestehenden Knowhow von Sachverständigen zur adäquaten Beurteilung von umgesetzten Projekten und dem vorhandenen Knowhow der produzierenden Industrie zur themenunabhängigen Adressierung von Problemstellungen wurde ein relativ großes Vertrauen beigemessen. Die Angemessenheit aktueller Normen sowie das bestehende Knowhow von Fachplanern wurde nur mittelgradig bemessen, was auch den Bewertungen zur Einschätzung des normativen Standes der EFN und den bereits angeführten reduzierten Verantwortungsgrad von Fachplanern entspricht. Schlussendlich wird gruppenübergreifend kein Vertrauen ausgesprochen, sobald monetäre Limitationen vorherrschen. So wird beispielsweise der Einsatz umweltfreundlicher Systemlösungen bei erhöhten Kosten als sehr unrealistisch angesehen und ein ernsthaftes Engagement für den Umweltschutz ohne Gewinnaussicht wird bei der produzierenden Industrie kein Vertrauen geschenkt, auch wenn diese im Rahmen der thematischen Fragestellungen dies konkret ausdrückte. Schlussendlich scheitern laut den Umfrageergebnissen umweltbezogene Problemlösungen, wenn steuerliche Mehrbelastungen resultieren.

Abbildung 10 Vertrauen in den Beitrag zu Klima- und Umweltschutzbemühungen



Thematische Herausforderungen

Beleuchtungen des urbanen Außenraums stehen im Kontext eines multifunktionalen Anforderungsfelds, das neben nachhaltigkeitsbezogenen und umweltschonenden Themenbereichen auch sowohl sicherheitsspezifische, psychologische als auch gesundheitsbezogene Faktoren umfasst. Zudem stehen die Systeme in starker Abhängigkeit zu Wartungsintensivität und zunehmenden Interoperabilitätsanforderungen.

Im Folgenden werden die für Außenraumbelichtungen maßgeblichen Themenfelder inhaltlich kurz in ihrer Relevanz erörtert. Die angeführten Beschreibungen sind dabei direkte Ergebnisse der einführenden wissenschaftlichen Literaturrecherche und stellen vorrangig kontextuelle Faktoren zur Verortung der abgeleiteten Kerntechnologien dar, welche grundsätzlich mehrere der Themenbereiche gleichzeitig adressieren können. Zusätzlich zu den inhaltlichen Umrissen werden zudem dezidierte Befragungsergebnisse aller Interessensgruppen angeführt. Die themenbezogenen Fragestellungen bezogen sich dabei vorrangig auf die Quantifizierung des Bewusstseinsgrads, aktuellen Marktlagen und potenziellen Entwicklungen innerhalb der nächsten 10 Jahre. Zugehörige Fragestellungen können grundsätzlich dem Anhang unter der übergeordneten Fragegruppe S5 entnommen werden.

Verkehrssicherheit, Sicherheitsempfinden und urbane Attraktivität

Beleuchtung stellt einen maßgeblichen Einflussfaktor auf visuelle Wahrnehmungskriterien wie der allgemeinen Objekterkennbarkeit und Sehleistungsfaktoren wie Sehschärfe und Kontrastempfindlichkeit dar (Fotios et al., 2005). Dass diesen Aspekten der visuellen Leistungsfähigkeit eine übergeordnete Rolle zur Aufrechterhaltung objektiver Sicherheitskriterien im Straßenverkehr zugesprochen werden muss, bestätigt sich bereits auf darauf bezogene normative Verankerungen (DIN, 2016). Darüber hinaus erweist sich die Beleuchtung nächtlicher urbaner Außenräume jedoch auch im Hinblick auf subjektive Faktoren wie der empfundenen Sicherheit oder der wahrgenommenen Attraktivität von entscheidendem Einfluss, welche zwar im Allgemeinen in beleuchtungsspezifischen Empfehlungen adressiert werden, (Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LiTG), 2023), jedoch keine gesetzliche Verankerung finden.

Die Konzepte der empfundenen Sicherheit in urbanen Räumen orientieren sich dabei stark an Untersuchungen zur Kriminalität. In einer bereits 1995 durchgeführten systematischen Überblicksarbeit (Boyce & Gutkowski, 1995) wurde der Zusammenhang von Beleuchtung und Kriminalität näher untersucht. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse veröffentlichter Studien bis in die späten 1980er Jahre keinen eindeutigen Effekt aufwiesen. Auch aktueller Studien konnten bis heute nicht zu einer klaren Effektabbildung beitragen. So zeigte sich beispielsweise in einer Untersuchung des Effekts von ausgeschalteter Straßenbeleuchtung auf das Kriminalitätsniveau (Davies & Farrington, 2020) eine Zunahme von Einbrüchen und Fahrzeugkriminalität und eine Abnahme von Gewalttaten. Eine weitere Studie erzielte die Senkung des Kriminalitätsniveaus im Hinblick auf Gewalttaten (Raub- und Körperverletzungen) jedoch bei Beleuchtungsinstallationen mit erhöhter Beleuchtungsstärke (Chalfin et al., 2022). Die Komplexität des potenziellen Zusammenhangs liegt dabei in der überdurchschnittlich großen Anzahl an möglichen Einflussfaktoren, wie bspw. baulichen Voraussetzungen, Fluchtoptionen oder auch die Einsicht von Zeugen, welche zueinander in Beziehung stehen und unter anderem auch die Wirkungsweise von Beleuchtung auf die Kriminalitätsrate beeinflussen. Der direkte Einfluss der Beleuchtung ist demnach derzeit nicht eindeutig empirisch belegbar. Studien zur Kriminalitätsangst sind dagegen allerdings eindeutig.

Die Angst vor kriminellen Handlungen kann grundsätzlich weitreichende Konsequenzen für eine Gesellschaft haben und im Hinblick auf die negativen Folgen sogar größer als die von Kriminalität selbst sein (Schweitzer et al., 1999). Der Einfluss der Beleuchtung in diesem Kontext wurde mittlerweile von mehreren Studien eindeutig belegt. Bereits 1992 wurde im Rahmen der Theorie der Ortscharakteristika vermutet (Fisher & Nasar, 1992), dass die Überblickbarkeit eines Ortes sowie Anzahl von Versteck- und Fluchtmöglichkeiten bedingen zu welchem Grad Kriminalitätsangst an einem Ort ausgelöst wird. In einer Folgestudie (Nasar & Jones, 1997) wurde der Stellenwert der Beleuchtung innerhalb der Theorie verdeutlicht, indem vor allem Dunkelheit und das Vorhandensein von Schatten als Angstausröser und gute Beleuchtung als Sicherheitsfaktor beschrieben wurden. Der Effekt nächtlicher Beleuchtung begrenzt sich dabei jedoch auf das Sicherheitsgefühl, das ein Ort bei Tageslicht vermitteln würde (Fotios et al., 2019) und kann auch maßgeblich durch bauliche Faktoren eingeschränkt werden (Boyce, 2019). Inzwischen konnte ein eindeutiger Bezug zwischen verschiedenen Beleuchtungsstärken und empfundenen Angst- und Sicherheitsfaktoren hergestellt werden (Fotios et al., 2019; Haans & De Kort, 2012)

Diese Ergebnisse dienen aktuell auch als Grundlage für eine Publikation der CIE zur Fußgängerbeleuchtung, welche eine mittlere Beleuchtungsstärke von 4,0 lx bei einer minimalen Beleuchtungsstärke von 0,8 lx für das Adressieren von Kriminalitätsangst vorschlägt (CIE,

2019). Weiters wird ein hohes skotopische-photopisches Verhältnis der Lampe zur Verstärkung der räumlichen Helligkeitswahrnehmung (Boyce, 2014), sowie eine hohe Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke als positiv für das Sicherheitsempfinden beschrieben. Der Einsatz niedriger Farbtemperaturen ist diesbezüglich zur Förderung des Sicherheitsempfindens nicht zu empfehlen, da warmweiße Lichtquellen im Allgemeinen ein geringes skotopisch-photopisches Verhältnis aufweisen (Van Bommel, 2015). In Bezug zur Erkennung von Personen werden derzeit keine optimalen Beleuchtungsstärken empfohlen, obwohl das Erkennen von Personen neben dem Absuchen des Bodens die zweithäufigste visuelle Tätigkeit von Fußgängern darstellt (Fotios et al., 2015). Trotz dieser aktuell noch unzureichend adressierten Teilbereiche erweist sich die Beleuchtung jedoch als nachweislich wichtiger Faktor zur Verbesserung der wahrgenommenen Sicherheit (Fotios et al., 2015; Boomsma & Steg, 2014; Lorenc et al., 2012), indem sowohl räumliche Wahrnehmungsaspekte als auch darauf bezogenen ästhetische Empfindungen angesprochen werden.

Es erweist sich dementsprechend nicht als verwunderlich, dass Beleuchtung auch zur Steigerung der ästhetischen Qualität nächtlicher Umgebungen (Nikunen & Korpela, 2012) eingesetzt werden kann. Lichtplanerische Ansätze stellen dabei einen wesentlichen Aspekt zur Verbesserung der Qualität unseres Alltagsumfelds dar. Obwohl mehrere Eigenschaften des Lichtes die Wahrnehmung der nächtlichen Umgebung beeinflussen können, wie z.B. die Gleichmäßigkeit (Portnov et al., 2020), Helligkeit (Luo et al., 2021) oder auch die räumliche Verteilung von Lichtquellen (Fotios et al., 2015), geht die bisherige Literatur davon aus, dass im Speziellen die angewandte Lichtfarbe einen wesentlichen Einfluss auf die Reaktionen von Menschen auf die Umwelt (Birren, 1983; Sanmartín et al., 2017) nimmt. Weißes Licht erzeugt dabei grundsätzlich ein größeres Sicherheitsgefühl bei Menschen (Peña-García et al., 2015) als farbiges Licht und nimmt gleichzeitig auch einen signifikanten Einfluss auf die ästhetische Präferenz (Zhao et al., 2022). Auf Basis der positiv linearen Beziehung zwischen der ästhetischen Präferenz und dem Sicherheitsempfinden bei Nacht erweist sich dementsprechend die Adressierung subjektiv empfundener Sicherheitsaspekte bei gleichzeitiger Attraktivierung des urbanen Umfelds als maßgebliches beleuchtungsbezogenes Potenzial.

Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen

Die aktuelle Studienlage zu objektiven und subjektiven Sicherheitsfaktoren nächtlicher Außenraumbeleuchtungen zeigen deutlich auf, dass im Grunde eine Erhöhung der Beleuchtungsstärken deutliche Vorteile aufweisen würde. Aufgrund des Zusammenhangs mit verbesserten wahrnehmungsbezogenen Eigenschaften steigen dadurch potenziell nicht nur verkehrsbezogen relevante Aspekte wie visuelle Aufmerksamkeit und

Reaktionsgeschwindigkeiten, sondern das verbesserte Erkennen urbaner Strukturen bildet auch einen signifikanten Einflussfaktor auf das subjektive Empfinden von Sicherheit und das darauf bezogene Angstepfinden vor kriminellen Handlungen. Auf sozialer Ebene sind dadurch maßgebliche Beiträge zur gesellschaftlichen Inklusion von Gruppen erwartbar, welche aktuell aufgrund erhöhter Unsicherheiten vor der nächtlichen Nutzung urbaner Gebiete abschrecken.

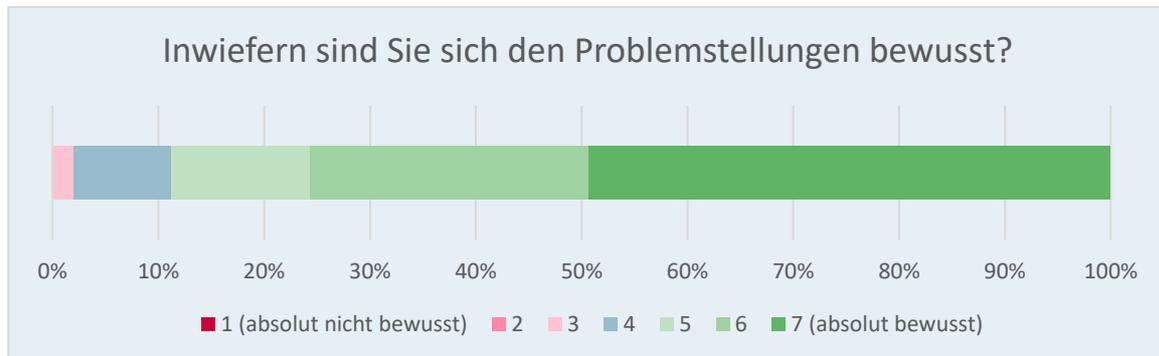
In Bezug zu den anderen relevanten Themenbereichen erweisen sich die hierfür notwendigen erhöhten Beleuchtungsstärken jedoch als durchaus negativ. Gesundheitsbezogen tendieren die aktuellen Empfehlungen deutlich zur Reduktion nächtlicher Helligkeiten zur Vermeidung zirkadianer Störfaktoren, aus energetischen Betrachtungen resultieren höhere Helligkeiten automatisch in erhöhten Energieverbräuchen und die Störung nachtaktiver Lebewesen erweist sich neben einer Erhöhung der Lichtemission als durchaus wahrscheinlich. Auch die in Bezug zur Förderung des subjektiven Sicherheitsempfindens empfohlenen erhöhten Farbtemperaturen müssen im Hinblick auf die restlichen Themenfelder kritisch betrachtet werden, da sich hierbei die potenziell negativen Effekte auf Mensch und Tierwelt verstärken.

Themenbezogenes Bewusstsein

Sowohl Aspekte der Verkehrssicherheit als auch der Einfluss auf subjektive Wahrnehmungskriterien und das allgemeine Stadt- und Ortsbild stellen langjährige Kernthemen von Außenraumbeleuchtungen dar. Es ist dementsprechend nicht verwunderlich, dass das Bewusstsein für die Problemstellungen dieses Themenbereichs in allen Interessensgruppen als stark bis sehr stark bewertet wurde (**Abbildung 11**). Zudem würden Lösungsfindungen zu bestehenden Herausforderungen auch dann von allen Interessengruppen weiterhin gefördert werden, wenn nur eine geringe Akzeptanz von Einwohner:innen gegenüber notwendigen Maßnahmen bestehen würde.

Die Verfügbarkeit normativer Regulierungen und fachspezifischer Planungsempfehlungen wird als sehr ausreichend empfunden und deckt sich somit mit der bereits beschriebenen Einschätzung der normativen Einrichtung. Die adäquate Abbildung der sicherheitsbezogenen Anforderungen führt dementsprechend auch zu einer breiten Verfügbarkeit von Produkten am Markt und einer hohen planungsbezogenen Nachfrage zur Adressierung der Herausforderungen. Auch die Rechtfertigung von Mehrkosten zur Steigerung von Sicherheitsaspekten wird im Allgemeinen mit einem sehr geringen Schwierigkeitsgrad bewertet. Die zugehörigen Befragungsergebnisse können dem Anhang unter S5 entnommen werden.

Abbildung 11 Bewusstsein der Interessensgruppen für Problemstellungen im Bereich Verkehrssicherheit, Sicherheitsempfinden und urbane Attraktivität



Voraussichtliche Entwicklung innerhalb der nächsten 10 Jahre

Ähnlich zum Bewusstseinsgrad gegenüber den Herausforderungen des Themenbereichs wird die Entwicklung der Wichtigkeit zur Adressierung von Verbesserungsmaßnahmen innerhalb der nächsten 10 Jahre im Allgemeinen als wichtiger werdend empfunden (Abbildung 12). Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der Kernaufgabe öffentlicher Außenraumbeleuchtungen verständlich. Dennoch gaben mehr als 35% der Befragten an, dass die Wichtigkeit der Adressierung der Herausforderungen keine Veränderung bzw. eine Abnahme erfahren wird. Die Angemessenheit aktueller normativer Abbildungen und die dementsprechend auch zukünftig angenommene, gut gestaltete Adressierbarkeit der Problemstellungen könnte für die diesbezüglichen Einschätzungen verantwortlich sein.

Abbildung 12 Einschätzung der Entwicklung der Wichtigkeit des Bereich Verkehrssicherheit, Sicherheitsempfinden und urbane Attraktivität



Licht und Gesundheit

Beleuchtungen des öffentlichen Raumes weisen grundsätzlich einen immanenten gesundheitsrelevanten Bezug auf, indem sie direkt zur Aufrechterhaltung verkehrssicherheitsbezogener Faktoren beitragen und somit einen direkten Einfluss auf die Reduktion von Unfallwahrscheinlichkeiten und -schweregraden nehmen. Die diesbezüglichen Effekte werden maßgeblich von visuellen Wahrnehmungskriterien beeinflusst und referenzieren somit auf den visuellen Verarbeitungsmechanismus sensorisch erhaltener Informationen hin. Darüber hinaus besitzt Licht jedoch auch in Bezug zu nicht-visuellen Verarbeitungsmechanismen einen maßgeblichen Effekt, welcher vorrangig langfristige gesundheitliche Auswirkungen adressiert. Die zugehörigen unterliegenden Zusammenhänge wurden speziell in den letzten Jahren vermehrt untersucht.

Heute gilt es als allgemein anerkannt, dass nicht-visuelle Lichteffekte maßgeblich im Zusammenhang zur Rezeptorischen Empfindlichkeit intrinsisch photosensitiver Ganglienzellen stehen (Schlangen & Price, 2021), welche vorrangig im kurzwelligen Bereich angesiedelt ist und dementsprechend maßgeblich von den Empfindlichkeitskurven des Farb- und Helligkeitssehens abweicht. Modulierende Faktoren der auftretenden Effektstärken sind deswegen nicht nur in Bezug zur Beleuchtungsstärke definiert, sondern umfassen vorrangig auch spektrale Zusammensetzungen, welche im Bezug zu weißem Licht hinsichtlich der eingesetzten Farbtemperatur angegeben werden. Niedrige Farbtemperaturbereiche weisen dementsprechend gegenüber höheren Bereichen grundsätzlich verringerte nicht-visuelle Effektstärken auf. Gleichzeitig sind jedoch auch niedrige Beleuchtungsstärken zur Vermeidung negativer Lichteinflüsse erforderlich. Aktuell werden diese Zusammenhänge im Rahmen der melanopisch tageslichtäquivalenten Beleuchtungsstärken (MEDI) beschrieben (CIE, 2018), bei welcher die photopischen Helligkeiten vergleichend zu tageslichtbezogenen Wirksamkeiten mit Faktoren zu Verringerung oder Erhöhung der Wirksamkeit beaufschlagt werden.

Studien zu nächtlichen Effekten von Außenraumbeleuchtungen verweisen in diesem Zusammenhang auf die Förderung zahlreicher Gesundheitsprobleme und medizinischer Anomalien, wie beispielsweise Fettleibigkeit (McFadden et al., 2014; Sorensen et al., 2020; Zhang et al., 2020), und schlechte psychische Gesundheitszustände (Yu et al., 2022; Paksarian et al., 2020; Min & Min, 2018) oder auch Krebs (Stevens 2006; Hurley, et al., 2014). Die Effekte werden heute auch bereits von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) und der World Health Organization (WHO) anerkannt und die American Medical Association (AMA) veröffentlichte im Jahr 2016 Empfehlungen zur Straßenbeleuchtung (AMA, 2016), welche dezidiert vor dem Einsatz von blaureichen LED-Straßenleuchten

warnten. Die Aufmerksamkeit der Allgemeinbevölkerung auf mit Beleuchtung assoziierten, bestehenden Gesundheitsrisiken wurde zudem in den letzten Jahren durch zahlreiche populärwissenschaftliche Veröffentlichungen gefördert (Domonoske, 2016; Middlebrook, 2016; Wilson, 2022). Nicht zuletzt stellen diese Bestrebungen auch den Grund dafür dar, dass viele elektronische Geräte heute über softwarebasierte Blaufilter oder Nachteinstellungen verfügen, um den vermehrt aufkommenden Erwartungshaltungen von Nutzer:innen gerecht zu werden.

Der im Zusammenhang mit nicht-visuellen Lichtwirkungen am häufigsten genannte Mechanismus mit Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit stellt die Unterdrückung der Ausschüttung von Melatonin dar. Oftmals als schlafförderndes Hormon bezeichnet, steht dessen Ausschüttung eigentlich vorrangig im Zusammenhang mit zirkadianen Synchronisationsmechanismen und dient dem somit regulatorischen Aspekten des Körpers durch die externe Zeitgeberfunktion. Es gilt heute als anerkannt, dass die Einwirkung von künstlichem Licht in der Nacht die Melatoninsekretion unterdrückt und somit die Regulationsfähigkeit des Körpers im Hinblick auf den zirkadianen Rhythmus stört (Boyce, 2022; Hu et al., 2022; Patel, 2019). Diese Störung reduziert auf kurzfristiger Wirkebene sowohl die Schlafdauer als auch -qualität (Lewy et al., 1980), was erhöhte Müdigkeit am Folgetag mit dazu assoziierten Leistungsschwächen zur Folge hat.

Auf langfristiger Wirkebene wird aktuell vermutet, dass Störungen des zirkadianen Rhythmus zur Entwicklung von maßgeblichen gesundheitlichen Problemen (da Silva et al., 2016; Haim & Zubidat, 2015) beiträgt, darunter Krebs (Blask et al., 2014), insbesondere Brustkrebs (Kubatka et al., 2018). Die Annahmen werden dabei durch aktuelle Tierstudien unterstützt, die nächtliche Lichtexposition mit Tumorwachstum in Verbindung bringen (Zubidat et al., 2018), darunter Nagetiermodelle des Krebswachstums über die Unterdrückung von Melatonin durch künstliche Beleuchtung (Agbaria et al., 2019). Zudem werden Unterdrückungen der Melatoninausschüttung auch mit Effekten auf entzündliche Prozesse im Körper (Favero et al., 2017) in Verbindung gebracht, indem sie entzündungsfördernde Zustände (Lamers et al., 2019) und andere Melatonin-vermittelte Prozesse wie Fettansammlung (Bayon et al., 2014) und die allgemeine Immunfunktion (Baxter & Ray, 2020) beeinflussen.

Neben hormonellen Effekten werden zudem speziell neurologische und psychologische Effekte nächtlicher Beleuchtung vermutet, einschließlich der negativen Auswirkungen auf die psychische Gesundheit, die kognitiven Leistungsfähigkeiten und das Risiko des Auftretens einer Autismus-Spektrum-Störung (Xie et al., 2022). So wurde beispielsweise nachgewiesen, dass die Ausprägung depressiver Symptome in deutlichem Zusammenhang mit nächtlicher

Beleuchtung steht (Zhu et al., 2024) und erhöhte Beleuchtungsstärken die Entwicklung depressiver Erkrankungsformen fördern kann (Paksarian et al., 2020). Zudem werden inadäquate nächtliche Beleuchtungsszenarien heute auch mit der Förderung stressbezogener physiologischer Auswirkungen in Verbindung gebracht (Stefanaki et al., 2018), darunter auch eine verminderte kardiovaskuläre Regulationsfähigkeit, die Langfristig zur Entwicklung von Herzkrankheiten beitragen kann.

Obwohl einige Forschungsergebnisse nahelegen, dass Außenbeleuchtung keine gesundheitsschädlichen Wirkungen aufweisen (James et al., 2017), oder deren Auswirkungen vernachlässigbar sind (Ritonja et al., 2020), werden die negativen Auswirkungen nächtlicher Beleuchtung heute allgemein anerkannt. Aktuelle Empfehlungen beleuchtungsbezogener Vereinigungen orientieren sich dementsprechend an einer maßgeblichen Reduktion der nächtlichen melanopisch wirksamen Beleuchtungsstärken. Das Auftreten von Störungen wird dabei bereits ab 1 lx MEDI vermutet. In Abhängigkeit zu applikationsspezifischen Anforderungen und normativen Regulierungen erweist sich dieser Wert grundsätzlich als nur bedingt erreichbar, da auch bei Einsatz reduzierter Farbtemperaturen noch Mindestbeleuchtungsstärken für visuelle Tätigkeiten bereitgestellt werden müssen und in Bezug zu Außenraumbeleuchtungen speziell auch sicherheitsrelevante Anforderungskriterien zu erfüllen sind.

Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen

Die Aufrechterhaltung gesundheitlicher Faktoren bedingt vorrangig eine Reduktion der nächtlichen Beleuchtungsstärken, um negativen Einwirkungen vorzubeugen. Die Relevanz dieses Anspruchs bestätigt sich vorrangig darin, dass negative nicht-visuelle Lichtwirkungen im Hinblick auf Melatoninsuppression immanente Effekte aufweisen, d.h. bereits kurzfristige Expositionen zu größerer Beleuchtungsintensitäten zum Auftreten von Wirkzusammenhängen führen. Der Einsatz niedriger Farbtemperaturbereiche kann diesbezüglich eine förderliche Wirkung besitzen.

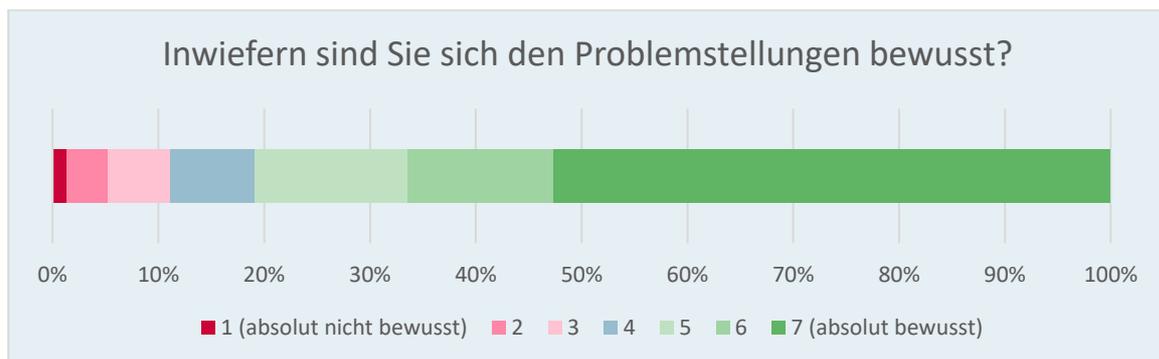
Grundsätzlich stehen die gesundheitlichen Anforderungen mit vielen der anderen Themenbereiche im Einklang. Eine Reduktion der Beleuchtungsstärken würde gleichzeitig den energetischen Einsatz reduzieren und Lichtemissionen vermeiden. Reduzierte Farbtemperaturen bieten auch deutliche Vorteile im Hinblick auf negative Wirkungen auf die Tier- und Pflanzenwelt. Dennoch stehen die Forderungen in starkem Kontrast zu Sicherheitsaspekten und werden dementsprechend stark durch bestehende normative Regulierungen begrenzt.

Themenbezogenes Bewusstsein

Die Beachtung gesundheitsbezogener Lichtwirkungen erfuhr speziell in den letzten Jahren eine zunehmende Aufmerksamkeit, welche dazu führte, dass wissenschaftliche Erkenntnisse nur erstmals in konkrete und international anerkannte Planungs- und Produktempfehlungen überführt wurden. Es ist dementsprechend nicht verwunderlich, dass das Bewusstsein für die Problemstellungen dieses Themenbereichs in allen Interessensgruppen als stark bis sehr stark bewertet wurde (Abbildung 13). Lösungsfindungen zu bestehenden Herausforderungen werden auch in Zukunft von allen Interessengruppen gefördert.

Die Verfügbarkeit normativer Regulierungen und fachspezifischer Planungsempfehlungen wird als ausreichend empfunden und deckt sich somit mit der bereits beschriebenen Einschätzung der normativen Einrichtung. Aufgrund des relativen Neuheitsgrads der Richtlinien wird die Verfügbarkeit von Produkten am Markt trotz einer hohen planungsbezogenen Nachfrage nur als ausreichend eingestuft. Auch die Rechtfertigung von Mehrkosten zur Reduktion von gesundheitlich negativen Effekten der Beleuchtung wird jedoch als sehr schwierig erachtet, da im Grunde kaum bis keine harten Evaluierungsmechanismen bestehen, mit denen die positiven Wirkungen eindeutig belegt werden können. Die zugehörigen Befragungsergebnisse können dem Anhang unter S5 entnommen werden.

Abbildung 13 Bewusstsein der Interessensgruppen für Problemstellungen im Bereich Licht und Gesundheit



Voraussichtliche Entwicklung innerhalb der nächsten 10 Jahre

Ähnlich zum Bewusstseinsgrad gegenüber den Herausforderungen des Themenbereichs wird die Entwicklung der Wichtigkeit zur Adressierung von Verbesserungsmaßnahmen innerhalb der nächsten 10 Jahre im Allgemeinen als wichtiger werdend empfunden (Abbildung 14). Dies ist vor allem vor dem Hintergrund des thematischen Aktualitätsgrads

verständlich. Nur ca. 10% der Befragten gaben an, dass die Wichtigkeit der Adressierung der Herausforderungen zukünftig eine Abnahme erfahren wird. Speziell die problematischen Wirkungsnachweise in Realinstallationen gegenüber dem Auftraggeber, sowie die schlechte Referenzierbarkeit von langzeitlichen Wirkeffekten durch Endnutzer:innen und damit einhergehenden Akzeptanzproblematiken von erhöhten Kosten könnten für die diesbezüglichen Einschätzungen verantwortlich sein.

Abbildung 14 Einschätzung der Entwicklung der Wichtigkeit des Bereich Licht und Gesundheit



Umweltverträglichkeit und Biodiversität

Als vom Menschen geschaffene Lösungen adressierten künstliche Beleuchtungssysteme über lange Zeit vorrangig menschliche Bedürfnisse, speziell im Hinblick auf visuelle Wahrnehmungsfaktoren. Mit dem Fortschreiten in der Beleuchtungstechnologie und dem steigenden Bewusstsein potenzieller negativer Effekte auf den Menschen rücken jedoch vermehrt auch Aufmerksamkeiten zu negativen Umweltauswirkungen, insbesondere durch Lichtverschmutzung, in den Fokus aktueller Zielsetzungen. Die Auswirkungen der Lichtverschmutzung sind dabei nicht nur auf den Menschen begrenzt, sondern betreffen auch andere Lebewesen und erweisen sich dementsprechend unter Beachtung der verschiedenen rezeptorischen Empfindlichkeiten unterschiedlicher Spezies als äußerst komplex.

Dass auf übergeordneter Ebene jedoch eine erweiterte Beachtung der Umweltverträglichkeit speziell im Hinblick auf die Aufrechterhaltung der Biodiversität in urbanen Räumen erfolgen sollte, bestätigt auch ein kürzlich veröffentlichter Bericht zu SDG 15, welches sich auf die nachhaltige Nutzung gemeinschaftlich genutzter Lebensräume bezieht. Der Bericht

veranschaulicht einen erheblichen Rückgang der Biodiversität durch das Aussterben von Arten, mit einem Rückgang der Aussterberaten von 0,82 im Jahr 1993 auf 0,73 im Jahr 2020 und einer Prognose von 0,69 bis 2030 (UN, 2020). Die alarmierenden Raten sind dabei maßgeblich auf die Zerstörung von Lebensräumen zurückzuführen, unter welche auch Lichtverschmutzung als verschärfende Bedrohung für die Biodiversität eingeschlossen werden muss. Da das SDG 15 als eines der sechs gefährdeten Ziele gilt, erweist es sich als dringend erforderlich, Maßnahmen zur Minderung anthropogener Eingriffe in terrestrische Ökosysteme zu ergreifen.

Beweise für die Auswirkungen von Licht auf die nicht-visuelle Wahrnehmung sind heute bei vielen Tieren sowohl in Bezug zu terrestrischen und als auch Süßwasserumgebungen dokumentiert. Basierend auf den Ergebnissen einer systematischen Literaturrecherche wurden beispielsweise die minimalen Werte der Melatoninsuppression bei Vögeln, Nagetieren und Huftieren bei Beleuchtungsstärken von 0,3 lx, 0,03 lx bzw. 2,3 lx festgestellt (Grubisic et al., 2019). Auch bei Amphibien und Reptilien konnten Auswirkungen nächtlicher Beleuchtung im Hinblick auf Veränderungen in der Fortpflanzung (Onorati & Vignoli, 2017) und nächtlichen Aktivität (Dananay & Benard, 2018) festgestellt werden. Zudem bestehen eindeutige Hinweise auf Desorientierung (Swindall et al., 2019) auch in Bezug zu Fröschen, Echsen und Schlangen in städtischen Umgebungen (Perry et al., 2008).

Darüber hinaus konnten negative Effekte der Lichtverschmutzung auch in Bezug zu wirbellosen Tieren beobachtet werden, welche grundsätzlich für die Artenvielfalt und das ökologische Gleichgewicht als von entscheidender Bedeutung gelten. Erste Studien weisen beispielsweise bereits auf einen Zusammenhang zwischen nächtlicher Beleuchtung und Migration, Wachstum, Fütterung, Prädation und Fortpflanzungsverhalten von Insekten hin (Grubisic et al., 2018; Owens et al., 2020). Der darauf zurückzuführende Rückgang der Insektenpopulation führt gleichzeitig zu negative Effekten auf Bestäubung, Schädlingsbekämpfung und Nährstoffkreisläufe (Macgregor et al., 2015). Auch in wirtschaftlicher Hinsicht erweisen sich diesbezügliche Effekte als negativ. Bienen beispielsweise sind das Herzstück des Imkereimarkts und mit Beiträgen zur Landwirtschaft und Biodiversität die wichtigsten Bestäuberinsekten der Welt (Patrício-Roberto & Campos, 2014). Der Rückgang der weltweiten Bienenpopulation ist maßgeblich auf den Verlust von Lebensräumen und Flora zurückzuführen (Goulson et al., 2008), zu welchem Lichtverschmutzung einen vorrangigen Beitrag leistet. Es wird in diesem Kontext offensichtlich, dass Umweltbelastungen nicht nur durch direkte Effekte auf einzelne Spezies evaluiert werden können, sondern dass es hierfür eine differenzierte Betrachtung von Ökosystemen benötigt, um Übertragungseffekte zwischen verschiedenen Wirkungsbereichen ausreichend quantifizieren zu können.

So sind beispielsweise Pflanzen auf Insekten für ihre Fortpflanzungsdynamik angewiesen, was bedeutet, dass die Auswirkungen auf Insekten auch indirekt Pflanzen betreffen. Eine Studie hebt in diesem Kontext die Auswirkungen von künstlichem Licht auf den Bestäubungserfolg hervor, der durch einen Kaskadeneffekt zwischen Wirtspflanzen, Raubtieren und Beutetieren verursacht wird (Owens et al., 2020). Eine weitere kürzlich durchgeführte Studie untersuchte diese Quereffekte, indem sie die Auswirkungen künstlicher Beleuchtung auf die Interaktion zwischen Pflanzen und Insekten unter variierenden Spektrumbedingungen untersuchte (Boom et al., 2020). Derartige Untersuchungen erweisen sich jedoch als äußerst komplex und es erweist sich noch nicht klar, inwiefern die abgeleiteten Implikationen in applikationsspezifische Anforderungen überführt werden können.

Auch in Bezug zu Pflanzen zeigen sich Störungen in ihrem nächtlichen Zyklus, die durch Lichtverschmutzung verursacht werden (Gaston et al., 2013; Singhal et al., 2019; Bennie et al., 2016; Škvareninová et al., 2017). Die Auswirkungen auf Pflanzen hängt dabei maßgeblich vom Spektrum und der Menge an Strahlung ab, die auf die Blätter einwirkt. In natürlichen Umgebungen, wie beispielsweise in Wäldern, in denen die Lichtverschmutzung gering ist, erreicht die Menge an künstlicher Strahlung keine relevanten Werte, um Photosynthese direkt auszulösen (Raven & Cockell, 2006). In städtischen Gebieten ist die Präsenz von künstlichem Licht jedoch höher, und die Auswirkungen der Lichtverschmutzung auf Pflanzen sind deutlich stärker (Singhal et al., 2019; Škvareninová et al., 2017). Obwohl dadurch verursachten Störungen in einigen Fällen vorteilhaft genutzt werden können, um beispielsweise die Ernte in der Florikultur (Blümel et al., 2015) und im Gartenbau (Higuchi, 2018) zu planen, erweisen sich die Effekte nächtlicher Beleuchtung auf Pflanzen im Normalfall als negativ und können auch in Indikatoren der Pflanzenphänologie beobachtet werden (Škvareninová et al., 2017). Die Lichtverschmutzung beeinflusst die Pflanzen dabei in physiologischen und Verhaltensfunktionen, einschließlich der circadianen Uhr, der nächtlichen Erholung von Stressfaktoren, des Stoffwechselflusses und des Ertrags. Speziell im Bezug zu Erträgen identifizieren Studien eine 20% bis 40%ige Reduktion der Ernteerträge aufgrund von Verzögerungen in der Blüte von Pflanzen, die niedrigen Beleuchtungsstärken entlang von Straßenlichtern ausgesetzt waren (Chen et al., 2009). Verstärkt werden solche Effekte maßgeblich in attraktivitätsbezogenen Anwendungsfeldern, bei welchen Pflanzen zu ästhetischen Zwecken nachts beleuchtet werden, da die Photosynthetisch Aktive Strahlung (PAR) in diesen Anwendungen sehr hoch ist.

Die vollumfängliche Bewertung der Umweltverträglichkeit und des Einflusses auf die urbane Biodiversität von Außenraumbeleuchtungen erweist sich als äußerst komplex, da Wirkungen in Bezug zu verschiedenen Spezies auf unterschiedlichen Ebenen existieren und

gleichzeitig ökosystemische Eigenschaften zur Quantifizierung herangezogen werden müssen. Zur Adressierung bedarf es im Allgemeinen eines tiefgreifenden Knowhows zu spektralen Empfindlichkeiten und vorhandenen Wechselwirkungen. Inwiefern sich einerseits eine vereinfachte Betrachtung als zielführend erweist und andererseits eine vollumfängliche Aufnahme der Anforderungen in applikationsrelevante Kriterien übersetzt werden kann, ist aktuell noch nicht ausreichend geklärt. Zudem fehlen in biologischen Studien mitunter lichttechnische Angaben oder Messungen erfolgen in der Einheit Lux, die sich aufgrund unterschiedlicher spektraler Hellempfindlichkeiten der Tiere nur bedingt übertragen lässt.

Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen

Aufgrund der Vielfalt potenziell zu adressierender Spezies in urbanen Bereichen erweisen sich die beleuchtungsrelevanten Anforderungen aktuell als nur äußerst schwer zu definieren. Obwohl dezidierte Einzelstudien Wirkmechanismen und negative Lichteffekte in Bezug zu einzelnen Gattungen aufzeigen, haben diese in Beleuchtungsapplikationen auf übergeordneter Ebene adressiert zu werden. Aktuelle Richtlinien reduzieren sich deswegen vorrangig auf die Reduktion maximaler Beleuchtungsstärken zur Vermeidung von Anlockpunkten sowie das generelle Ausschalten künstlicher Beleuchtung während der Nacht, um schädliche Effekte zu vermeiden.

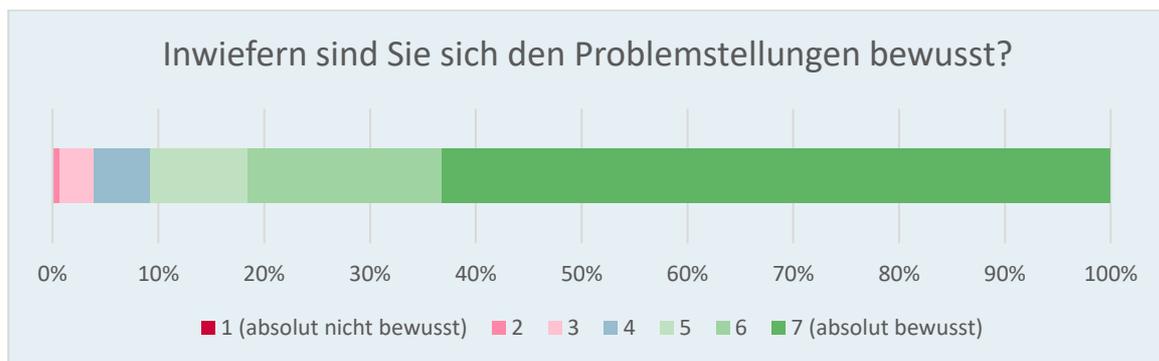
Grundsätzlich stehen diese Anforderungen mit vielen der anderen Themenbereiche im Einklang. Eine Reduktion der Beleuchtungsstärken würde gleichzeitig den energetischen Einsatz reduzieren und gesundheitliche Störungen bei Menschen vermeiden. Dennoch stehen die Forderungen in starkem Kontrast zu Sicherheitsaspekten und werden dementsprechend stark durch bestehende normative Regulierungen begrenzt.

Themenbezogenes Bewusstsein

Die Beachtung negativer Umweltbelastungen durch die nächtliche Beleuchtung von Außenräumen erfuhr speziell in den letzten Jahren eine zunehmende Aufmerksamkeit. Dennoch bestehen bis heute nur relativ grobe Ansätze zu Regulierungen und bestehende Planungsempfehlungen reduzieren sich aufgrund der thematischen Komplexität auf eine wenige Kernaspekte, ohne eine vollständige Adressierung der Problemstellung zu erreichen. Trotz dieser Beschränkungen erweist sich das Bewusstsein für die Problemstellungen dieses Themenbereichs in allen Interessensgruppen als äußerst stark ([Abbildung 15](#)).

Die Verfügbarkeit normativer Regulierungen und fachspezifischer Planungsempfehlungen wird als unzureichend empfunden und deckt sich somit mit der bereits beschriebenen Einschätzung der normativen Einrichtung, welche jedoch auch angeben, dass grundsätzlich ausreichend Informationen für regulatorische Maßnahmen bestehen würden. Zudem wird bemängelt, dass keine adäquaten Informationen zum Vorkommen spezifischer Spezies vorliegen und trotz marktbezogener Nachfrage fast keine Produktverfügbarkeiten bestehen. Die Rechtfertigung von Mehrkosten zur Reduktion von Umweltbelastungen wird als mittelmäßig erachtet. Die zugehörigen Befragungsergebnisse können dem Anhang unter S5 entnommen werden.

Abbildung 15 Bewusstsein der Interessensgruppen für Problemstellungen im Bereich Umweltverträglichkeit und Biodiversität

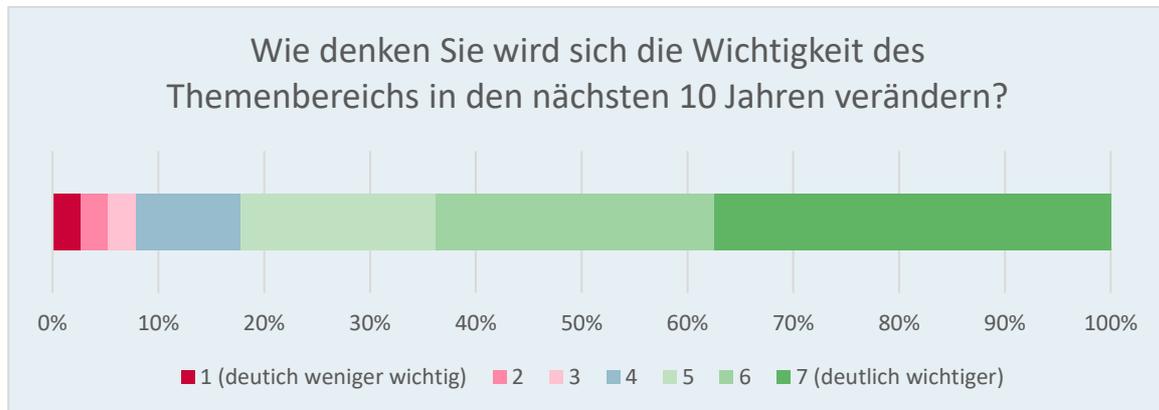


Voraussichtliche Entwicklung innerhalb der nächsten 10 Jahre

Ähnlich zum Bewusstseinsgrad gegenüber den Herausforderungen des Themenbereichs wird die Entwicklung der Wichtigkeit zur Adressierung von Verbesserungsmaßnahmen innerhalb der nächsten 10 Jahre im Allgemeinen als wichtiger werdend empfunden (Abbildung 16). Dies ist vor allem vor dem Hintergrund des thematischen Aktualitätsgrads verständlich. Weniger als 10% der Befragten gaben an, dass die Wichtigkeit der Adressierung der Herausforderungen zukünftige eine Abnahme erfahren wird.

Speziell vor dem Hintergrund aktuell unzureichender Richtlinien erweise sich diese Einschätzung als von übergeordneter Bedeutung, indem grundsätzlich eine adäquate Repräsentation der Anforderungen auf normativer und marktbezogener Ebene gefordert wird. Obwohl aktuell bereits einige der bestehenden Ansätze sinnvolle Beiträge zur Verbesserung der Umweltbelastungen versprechen, erweist sich die Möglichkeit zur vollumfänglichen Adressierung der Problemstellung jedoch nach wie vor als fraglich.

Abbildung 16 Einschätzung der Entwicklung der Wichtigkeit des Bereichs Umweltverträglichkeit und Biodiversität



Energieeffizienz und Ressourcenschonung

Die technologische Umstellung der Beleuchtungssysteme auf das Leuchtmittel LED hat maßgebliche Beiträge zur Reduktion der energetischen Verbräuche geleistet. Gleichzeitig erfordert die Herstellung von LED-Beleuchtungsprodukten jedoch mehr Energie und die Herausforderungen beim Recycling der Materialien hat aufgrund der Komplexität der notwendigen elektronischer Komponenten in den LED-Systemen deutlich zugenommen. Um die zu erwartenden Umweltfolgen von Elektro- und Elektronikgeräten abschätzen und zukünftig vermehrt beachten zu können, wurden diese in den letzten Jahren weltweit gesetzlich geregelt. In der Europäischen Union gibt es diesbezüglich inzwischen mehrere Richtlinien und Verordnungen, wie z. B. die Richtlinie 2011/65/EU (RoHS) und Richtlinie 2009/125/EG (Ökodesign-Richtlinie). Um dabei sowohl dem Herstellungsprozess, dem notwendigen Materialeinsatz und dem Betrieb ausreichend Beachtung zu schenken, basieren die Regulierungen dabei auf einer Betrachtung des gesamten Lebenszyklus der Produkte.

Obwohl dies grundsätzlich auch in Bezug zu Beleuchtungsprodukten sinnvoll erscheint, stellen diese jedoch im Vergleich zu anderen elektronischen Geräten durchaus eine Ausnahme dar. Die lange Lebenszeit von LEDs von durchschnittlich ca. 80.000 bis 100.000 Stunden führt in Kombination mit dem hohen Energieverbrauch im Betrieb zu einer deutlichen Dominanz der Nutzungsphase gegenüber Herstellungs- oder Entsorgungsprozessen. Bereits mehrere Studien, welche auf ein Life Cycle Assessment von Beleuchtungsprodukten fokussieren, verweisen darauf, dass die Nutzungsphase sich dementsprechend für ca. 99% der verursachten Umweltbelastungen verantwortlich (Elijošiuė et al., 2012; Tähkämö et al., 2014; Zhang et al., 2017). Aus einer nachhaltigkeitsbezogenen Perspektive erweist sich die

Optimierung des Betriebs dadurch gegenüber Optimierungen in Herstellung oder Entsorgung der Produkte als deutlich wichtiger.

Zum einen wird der betriebsbedingte Ressourcenverbrauch dabei grundsätzlich durch die Gesamteffizienz der Leuchte beeinflusst, welche sich neben dem Wärmemanagement maßgeblich über eine Kombination der Effizienzgrade des Leuchtmittels, Treibers oder Vorschaltgeräts und optischen Systems bestimmt. In den letzten Jahren hat sich hierbei speziell die Lichtausbeute von LEDs stark verbessert und ist bei weißen LED-Paketen von 69 lm/W im Jahr 2006 auf 175 lm/W im Jahr 2019 angestiegen. Bis 2035 werden diesbezüglich weitere Verbesserungen bis 249 lm/W vermutet (Pattison et al., 2020). Zudem haben Fortschritte bei in LED-basierten Beleuchtungsprodukten integrierten leistungselektronischen Komponenten zu maximalen Effizienzsteigerungen der LED-Treiber beigetragen (Wang et al., 2017) und erreichten 2019 eine Effizienz von bis zu 92% bei Außenbeleuchtungsanwendungen (Pattison et al., 2020).

Auch im Hinblick auf die Wärmeableitung konnten in den letzten Jahren maßgebliche Fortschritte erzielt werden, um dem die Lebensdauer und Effizienz von LED-Leuchten zu maximieren (Lasance & Poppe, 2014). Obwohl der thermische Effizienzabfall bei Außen-LEDs aktuell 90% (Pattison et al., 2020) beträgt, bestehen viele Studien zur Optimierung mittels passiver Ableitung (ur Rahman et al., 2019; Ma et al., 2017), aktiver Ableitung (Ma et al., 2017; Chen et al., 2019), thermischem Design über das LED-Paket (Chang & Pao, 2014) und Befestigungsschnittstellen (Lasance & Poppe, 2014). Unter Beachtung der aktuellen Effizienz von optischen Systemen bei LED-Außenleuchten von ca. 87% ergibt sich daraus eine Gesamteffizienz der Außenleuchten von 72% bei einer finalen photopischen Lichtausbeute von 126 lm/W (Pattison et al., 2020), welche unter Berücksichtigung von mesopischen Sichtbedingungen noch höher sein kann (Kostic et al., 2013). Bis 2035 wird angestrebt, für Treiber- und Optiken eine Effizienz von 95%, eine Gesamteffizienz der Leuchte von 86 % und eine Lichtausbeute von 214 lm/W bei LED-Außenleuchten zu erreichen (Pattison et al., 2020). Im Vergleich zu den erreichbaren 85 lm/W herkömmlicher Beleuchtungsmittel (Penning et al., 2016) zeigen sich die ressourcenschonenden und energiesparenden Effekte LED-basierter Beleuchtungssysteme eindeutig.

Zudem besitzen LEDs gegenüber bisherigen Leuchtmitteln noch einen entscheidenden weiteren Vorteil. Als elektronische Komponente ermöglichen sie erstmalig eine softwarebasierte Kontrolle und darauf bezogene erweiterte Ansteuerungsmöglichkeiten. Mit energetischen Einsparmöglichkeiten im Außenbereich von bis zu 84% gegenüber ungesteuerten Systemen (Beccali et al., 2019) überschreiten die Potentiale der Steuerung dabei die einer

Steigerung der Leuchteneffizienz bei weitem. Bestehende Ansätze zur Lichtsteuerung können dabei in verschiedene Strategien unterteilt werden: zeitplanungsbezogene Logiken nutzen definierte Tages- oder Uhrzeiten, um spezifische Beleuchtungsszenarien bereitzustellen, Gruppen- oder Zonensteuerungen beziehen Veränderungen auf definierte räumliche Abschnitte und bedarfsorientierte Ansätze orientieren die notwendige Beleuchtung nach situativen Anforderungen und werden häufig mit Helligkeits- bzw. Tageslichtanpassungen verbunden (Pandharipande & Newsham, 2018). Praktisch gesehen können all diese Steuerungssysteme in Außenbereichen aktuell jedoch mit einer Änderung in einem einzigen Beleuchtungsmerkmal verbunden werden: der Intensität.

Derzeit gibt es zahlreiche Beleuchtungslösungen auf dem Markt, die sich auf Zeit- und Dimmsteuerungen beziehen. Zeitsteuerungen beziehen sich dabei auf den programmierbaren Ein- und Ausschaltstatus der Lampe. In Bezug zu Außenbeleuchtungen erweist sich dieser Ansatz aktuell, als der am häufigsten verwendete, da er eine extrem geringe Betriebskomplexität aufweist und dadurch auch für bestehende Lampentechnologien angewendet werden kann. Die zeitgesteuerten Leuchten können dabei so vorprogrammiert werden, dass sie zu einer bestimmten Zeit in der Nacht ausgeschaltet werden. Die energetischen Vorteile von Komplettabschaltungen sind grundsätzlich offensichtlich, können jedoch nur adressiert werden, wenn keine zeit- oder ortsbezogenen Anforderungen hinsichtlich der Aufrechterhaltung von Wahrnehmungs- oder Sicherheitsaspekten bestehen. In Fällen, bei denen keine Komplettabschaltungen möglich oder gewollt sind, werden heute vorrangig Dimmsteuerungen eingesetzt, um den Energieverbrauch von Leuchten zu senken. Gedimmte Beleuchtungssysteme können ihre Helligkeit entsprechend den Anforderungen an Außenbeleuchtung anpassen und dadurch die Optimierung negativer Auswirkungen wie Energieverbrauch und Lichtverschmutzung bei gleichzeitiger Einhaltung der normativen Anforderungen priorisieren (Pracki & Skarzynski, 2020). Grundsätzlich können die angewandten Dimmstufen dabei nach Kriterien wie Anwesenheitserkennung oder Tageslichtverfügbarkeit (Pandharipande & Newsham, 2018) gewählt werden. Praktisch werden heute in Außenbereichen jedoch vordefinierte Dimmstufen uhrzeitabhängig definiert und eingesetzt.

Dennoch können bereits niederschwellige Implementierungen von Systemsteuerungen zu maßgeblichen Verbesserungen beitragen. Ein Retrofit-Projekt, das auf dem Campus der Universität Palermo (Italien) durchgeführt wurde, implementierte beispielsweise Zeit- und Dimmsteuerungen in öffentlichen LED-Beleuchtungssystemen und erzielte dadurch Energieeinsparungen von 84 %, was einer Einsparung von 163,2 Tonnen CO₂ entspricht (Beccali et al., 2019). Trotz dieser Vorteile ist die Steuerung von Außenbeleuchtung in öffentlichen Räumen bisher noch wenig verbreitet. Aktuell implementieren nur rund 20% zeitbasierte

Steuerungsansätze und weniger als 1% andere Steuerungen, inkl. der Anwendung von Sensorik (Penning et al., 2016). Im Vergleich zu anderen Beleuchtungssektoren erweisen sich Beleuchtungen des Außenraums dementsprechend deutlich defizitär.

Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen

Auch wenn energetische und ressourcenschonende Aspekte grundsätzlich mit den allgemeinen Zielsetzungen zur Reduktion nächtlicher Beleuchtung zur Förderung des Umweltschutzes und Aufrechterhaltung der menschlichen Gesundheit übereinstimmen, erweisen sie sich im eigentlichen Sinne ohne Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen. Das übergeordnete Ziel der Verbesserung der ökologischen Bilanz folgt dementsprechend nicht einer Kompromisslösung, sondern unterliegt der Herausforderung die Erreichung unter Aufrechterhaltung der Qualität von Beleuchtungslösungen sicherzustellen.

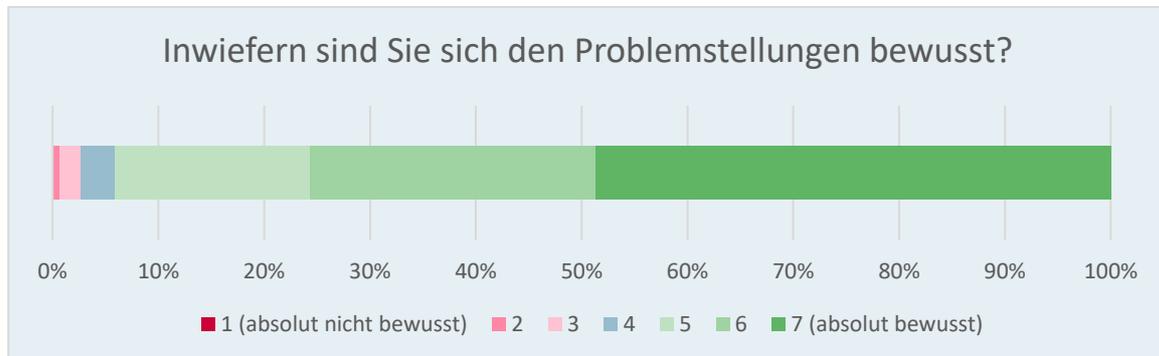
Als solches sollten Maßnahmen zur Förderung der energetischen Effizienz und Reduktion des Ressourcenverbrauchs weitestgehend immer ergriffen werden, wenn dies nicht in Konflikt mit dem Erreichen von Anforderungen anderer Themenbereiche steht. Dennoch kann die Nutzung synergetischer Effekte einen maßgeblichen Beitrag zur Überwindung bestehender Herausforderungen leisten.

Themenbezogenes Bewusstsein

Die Effizienz von Beleuchtungssystemen stellt aufgrund des starken Bezugs von künstlicher Beleuchtung mit energetischen Verbräuchen seit jeher einen maßgeblichen Kernaspekt der Beleuchtungsindustrie dar. Es ist dementsprechend nicht verwunderlich, dass das Bewusstsein für die Problemstellungen dieses Themenbereichs in allen Interessensgruppen sehr stark bewertet wurde (**Abbildung 17**) und bestehende Herausforderungen auch zukünftig von allen Gruppen maßgeblich gefördert werden.

Die Verfügbarkeit von Produkten und die Planungsnachfrage werden als sehr gut empfunden, die normativen Regulierungen jedoch als mittelmäßig, was sich mit der bereits beschriebenen Einschätzung der normativen Einrichtungen deckt. Die Rechtfertigung von Mehrkosten zur Steigerung der Energieeffizienz in Planungsumsetzungen werden grundsätzlich als nicht schwierig eingeschätzt. Es kann angenommen werden, dass speziell die Reduktion der zu erwartenden Kosten im Betrieb einen maßgeblichen Beitrag zur bestehenden Nachfrage und Umsetzungswahrscheinlichkeit darstellen. Die zugehörigen Befragungsergebnisse können dem Anhang unter S5 entnommen werden.

Abbildung 17 Bewusstsein der Interessensgruppen für Problemstellungen im Bereich Energieeffizienz und Ressourcenschonung



Voraussichtliche Entwicklung innerhalb der nächsten 10 Jahre

Ähnlich zum Bewusstseinsgrad gegenüber den Herausforderungen des Themenbereichs wird die Entwicklung der Wichtigkeit zur Adressierung von Verbesserungsmaßnahmen innerhalb der nächsten 10 Jahre im Allgemeinen als wichtiger werdend empfunden (Abbildung 18). Dies ist nicht nur vor dem Hintergrund des thematischen Aktualitätsgrads verständlich, sondern versteht sich auch auf den starken inhärenten Bezug von Beleuchtung und Energieverbrauch, welcher dazu führt, dass gesteigerte Effizienzgrade von Produkten maßgebliche Mechaniken zum Ausbau von Wettbewerbsvorsprüngen darstellen. Weniger als 10% der Befragten gaben an, dass die Wichtigkeit der Adressierung der Herausforderungen zukünftig eine Abnahme erfahren wird.

Abbildung 18 Einschätzung der Entwicklung der Wichtigkeit des Bereich Energieeffizienz und Ressourcenschonung



Interoperabilität und Technologiesouveränität

Besonders vor dem Hintergrund der zunehmenden Technologisierung und der Möglichkeiten, welche im Speziellen durch die Nutzung von Sensorik, erweiterten Systemvernetzungen und den dadurch erzeugten Systemdaten, erweist sich eine strategische Souveränität sowohl in Bezug zu wirtschaftlichen als auch regulatorischen Aspekten als wichtiger werdend. Das übergeordnete Ziel orientiert sich dabei nicht nur an der Aufrechterhaltung der Innovationskraft eines Landes, sondern auch an der Beibehaltung technologischer Kapazitäten und Vermögenswerten. Viele der damit einhergehenden Konzepte drehen sich um den Schutz der Privatsphäre, Vertrauen und die Verlässlichkeit von Inhalten (Benhamou, 2018; Goujard, 2018; Pohlmann et al., 2014). Zudem entstehen neue Herausforderungen durch bestimmte Technologieunternehmen (Gueham, 2017), insbesondere auch in Bezug zu künstlicher Intelligenz (DigitalGipfel, 2018) und Cybersicherheit (Bonenfant, 2018), dem allgemeinen Zugang zu kritischen Technologien (Drent, 2018), sowie technologischen Abhängigkeiten im öffentlichen Beschaffungswesen (FMIBC, 2019; Lippert et al., 2019).

Die Identifikation strategischer Technologien erweist sich dementsprechend alles andere als einfach und wird zudem grundsätzlich in multilateralen geopolitischen Einheiten wie der EU durch den Umstand erschwert, dass sich das Konzept der Souveränität als Funktion des Erreichens gemeinsamer Ziele ergibt. Vor diesem Hintergrund haben strategisch relevante Bereiche sich vor allem eng an den europäischen Prioritäten einer nachhaltigen, digitalen und gesunden Gesellschaft zu orientieren. Die Bewältigung der Herausforderungen wird zudem tiefgreifende technologische und innovative Durchbrüche in den digitalen Bereichen (z.B. Edge-Computing, künstliche Intelligenz, Cloud-Infrastrukturtechnologien und Technologien für das Internet der Dinge), im Umweltbereich (z.B. neue Wege zur Produktion, Einsatz biologisch konstruierte Materialien, Förderung der Energieeffizienz) sowie im Gesundheitswesen (z.B. E-Health-Lösungen, allgemeine Präventionsmaßnahmen) erfordern.

Beleuchtung im Allgemeinen bietet hierbei ein maßgebliches Potenzial zur Erreichung von Souveränitätszielen beizutragen. Wie bereits vorhergehen in den thematischen Bereichen beschrieben, zeigt sich künstliche Beleuchtung insbesondere in Bezug zu Umweltbelastungen und Energieverbrauch als relevanter Faktor und besitzt zudem eine beachtenswerte Rolle bei der Aufrechterhaltung der menschlichen Gesundheit. Darüber hinaus erweist sich der aktuelle Stand der Beleuchtungstechnologie in Bezug zur Digitalisierung weiterhin noch als äußerst zurückhaltend. Obwohl speziell in Bezug zu technologischen Bereichen wie dem Internet der Dinge (IoT) und Smart Cities zunehmend neue Applikationsbereiche eröffnet werden und im Allgemeinen diesbezüglich auch bereits erste Systemlösungen bestehen, da

Beleuchtung aufgrund seiner breiten Verfügbarkeit eine besondere Rolle in der nachhaltigen Entwicklung dieser Bereiche zugeschrieben wird, erweisen sich die Märkte noch als deutlich von proprietären Systemlösungen mit mangelhafter Interoperabilität als gekennzeichnet. Da diese aktuell auch international weit verbreitenden Technologien zumeist von europäischen Unternehmen entwickelt und betrieben werden, kann im Rahmen der aktuell zunehmenden Digitalisierung der Geschäftsmodelle, Produkt- und Dienstleistungsportfolios im Beleuchtungssektor von einem erweiterten Potenzial auf europäischer Ebene ausgegangen werden.

Um diese jedoch langfristig auch abrufbar zu gestalten, gilt es vor allem bestehende Herausforderungen zu bewältigen und regulatorische Maßnahmen zu setzen, welche speziell im Hinblick auf die Datennutzung bestehen. Um einen für durch Beleuchtungssysteme im Rahmen von Smart Cities erhobene Information fortschrittlichen, sicheren und wettbewerbsfähigen europäischen digitalen Raum zu gewährleisten ist nicht nur die Entwicklung eines kohärenten Politiksystems erforderlich, sondern vor allem die Beseitigung von Hindernissen für die Schaffung eines digitalen Binnenmarkts sowie wettbewerbsfähiger Daten- und Cloud-Infrastrukturen. Darüber hinaus müsste eine klare und konsistente Gesetzgebung, insbesondere in Bezug auf Cybersicherheitsfragen und den Datentransfer, etabliert werden. Dass die Europäische Union durch ihre Führungsrolle hierzu einen entscheidenden Beitrag zur Festlegung von Regeln leisten kann, kann durch die Einführung der Datenschutz-Grundverordnung aufgezeigt werden, durch welche Unternehmen weltweit dazu verpflichtet wurden, europäischen Wertevorstellungen zu folgen.

Darüber hinaus ist speziell in Bezug zu IoT-bezogenen Lösungsansätzen eine erweiterte Nutzung standardisierter und offener Schnittstellen erforderlich, welche im Optimalfall zur Etablierung offener und frei zugänglicher Möglichkeiten des Informationsaustausches führen. Technologische Souveränität impliziert dabei jedoch nicht die Suche nach vollständiger technologischer Unabhängigkeit, sondern vor allem die Notwendigkeit, mit Blick auf Schlüsseltechnologien ein gewisses Maß an Autonomie zu entwickeln und einseitige Abhängigkeiten, insbesondere von internationalen Partnern, die als weniger zuverlässig angesehen werden, zu vermeiden. In diesem Sinne sollten im Kontext eines erneuten Interesses an der Wiederbelebung einer europäischen Industriepolitik (Mazzucato, 2016; Archibugi & Mariella, 2021) Überlegungen der wirtschaftlichen Zielsetzungen in die Gestaltung politischer Ziele und Instrumente einbezogen werden, um eine gemeinsame Definition dieses Konzepts sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene zu erreichen.

Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen

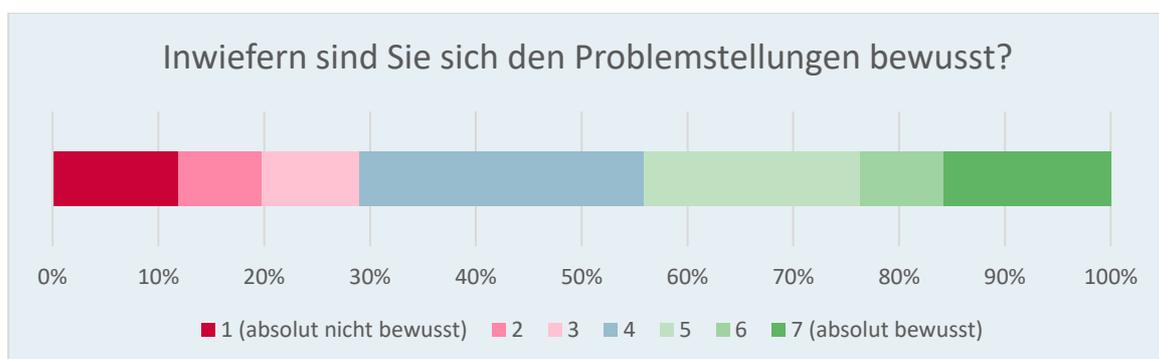
Auch wenn durch erweiterte Systeminteroperabilitäten die Entwicklung zukunftsfähiger Systeme und Geschäftsmodelle im digitalisierten Wirtschaftstraum definitiv gefördert werden können und regulatorische Eingriffe zur Wahrung der Technologiesouveränität hierbei nicht nur unterstützend wirken, sondern auch maßgebliche Entwicklungsbeiträge leisten können, erweist sich der Themenbereich im eigentlichen Sinne ohne Verhältnis zu anderen thematischen Bereichen.

Themenbezogenes Bewusstsein

Die Kerninhalte des Themenbereichs sind vorrangig an Digitalisierungsaspekte des Marktes gebunden. Da dieser Bereich in Bezug zu Beleuchtungssystemen, speziell aber in Bezug zu Beleuchtungen des Außenraums, noch sehr schwach ausgeprägt ist, erweist sich das Bewusstsein für die diesbezüglichen Problemstellungen als deutlich schwächer ausgeprägt, als dies in den anderen Bereichen der Fall ist. Am stärksten war das Bewusstsein bei der produzierenden Industrie ausgeprägt, ca. 30% der Umfrageteilnehmer:innen gaben jedoch an, kein bis gar kein Bewusstsein mit diesem Thema zu besitzen (**Abbildung 19**).

Auch die Marktnachfrage wurden als moderat bis niedrig empfunden und im Hinblick auf die Verfügbarkeit von normativen Regulierungen zeigte sich eine ähnlich niedrige Bewertung. Es kann angenommen werden, dass speziell die fehlende Nachfrage digitaler Methoden in den Bereichen Smart City, IoT oder auch Datennutzung aus den erhöhten Systemkomplexitäten resultiert, welche im Normalfall in Projektierungen vermieden werden. Die zugehörigen Befragungsergebnisse können dem Anhang unter S5 entnommen werden.

Abbildung 19 Bewusstsein der Interessensgruppen für Problemstellungen im Bereich Interoperabilität und Technologiesouveränität



Voraussichtliche Entwicklung innerhalb der nächsten 10 Jahre

Ähnlich zum Bewusstseinsgrad gegenüber den Herausforderungen des Themenbereichs wird die Entwicklung der Wichtigkeit zur Adressierung von Verbesserungsmaßnahmen innerhalb der nächsten 10 Jahre im Allgemeinen sehr differenziert empfunden (Abbildung 20), wobei ein leichter Hang zu einer positiven Entwicklung der Wichtigkeit besteht. Grundsätzlich kann es sein, dass dieses Ergebnis aus dem geringen Bewusstseinsgrad unter den Umfrageteilnehmer:innen resultiert. Andererseits wäre es jedoch auch möglich, dass die Einschätzungen speziell in Bezug zur Technologisierung im digitalen Kontext erfolgt ist.

Erfahrungsgemäß erweist sich die Beleuchtungsindustrie als sehr umsetzungsträge, da speziell in Bezug zu Außenraumbeleuchtungen viele Interessensgruppen an der Umsetzung beteiligt sind, welche jeweils andere Ziel- und Wertevorstellungen besitzen. Als Resultat dieser Rahmenbedingungen haben sich in den vergangenen Jahren meist Systemlösungen bewährt, welche einen möglichst geringen technologischen Grad und eine gering ausgeprägte Systemkomplexität aufweisen. Digitalisierte Methoden und ausgeweitete Systemvernetzungen erweisen sich im Kontext von Außenraumbeleuchtungen insofern an der Erhöhung der unerwünschten Komplexität als beteiligt, als dass erweiterte Systemteilnehmer Beachtung finden müssten, aktuelle Schnittstellen, Steuerungsverfahren und Planungsprozesse jedoch grundsätzlich nicht auf diese Erweiterung ausgelegt wurden. Die Größe der bestehenden Hindernisse kann dementsprechend bei Fachkenntnis dazu geführt haben, die Entwicklung des Themenbereichs in den nächsten 10 Jahren als weniger wichtig zu schätzen.

Abbildung 20 Einschätzung der Entwicklung der Wichtigkeit des Bereich Interoperabilität und Technologiesouveränität



Technologische Potenziale

Die Nutzung moderner Technologien kann helfen aktuelle Herausforderungen zu überwinden. Für eine nachhaltige Adressierung der Möglichkeiten erweist sich jedoch auch ein vollumfassendes Verständnis potenzieller Beschränkungsfaktoren als erforderlich, welche grundsätzlich entlang der gesamten Wertschöpfungskette auftreten können.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Potenzialanalysen der identifizierten Kerntechnologien unter Beachtung möglicher Beschränkungsfaktoren vorgestellt. Neben der Diskussion der Potenziale in Bezug zu der einführenden wissenschaftlichen Literaturrecherche, werden auch die kontextuellen Abhängigkeiten der Kerntechnologien zu den einzelnen Themenbereichen erörtert. Zusätzlich zu diesen inhaltlichen Umrissen werden die technologiebezogenen Befragungsergebnisse der Interessensgruppen angeführt, welche sowohl der Identifizierung von Limitationen als auch der Bewertung der Potenziale dienen.

Im Rahmen der Umfrage wurden alle Teilnehmer:innen zu ihren Einschätzungen des Einflusses aller identifizierten Kerntechnologien auf mehrere relevante Faktoren befragt. Die abgefragten Aspekte umfassten die Bereiche Umwelt (Lichtverschmutzung und Energieverbrauch), endnutzerspezifische Aspekte (Gesundheit, Privatsphäre und Akzeptanz), Sicherheit (subjektiv und objektiv), resultierende Komplexitäten (in Bezug zu Planung, Normierung und Schnittstellendefinitionen), sowie die allgemeinen Bereiche Herstellungskosten, Wartungsaufwand und Technologiesouveränität. Alle Antworten wurden dabei auf einer 7-stufigen Likert-Skala (1 – sehr negativer Einfluss, 7 – sehr positiver Einfluss) abgegeben.

Um im Hinblick auf den differenzierten Hintergrund und das unterschiedliche Vorwissen der Umfrageteilnehmer:innen die erweiterte Vergleichbarkeit abgegebenen Antworten sicherstellen zu können, wurden die Fragen unter Anwendung von Ankerreizen formuliert. Die in diesem Zuge bereitgestellten Informationen zu den einzelnen Technologien umfassten sowohl mögliche Potenziale als auch aus der Anwendung möglicherweise resultierende Problemstellungen. Alle genutzten Ankerreize wurden auf Basis der Ergebnisse der wissenschaftlichen Literaturrecherche abgeleitet, welche auch einleitend zu jedem der nachfolgenden Kapitel umrissen werden. Die zu diesem Teil zugehörigen Fragestellungen können dem Anhang unter der übergeordneten Fragegruppe S6 entnommen werden.

Adaptive spektrale Komposition

Der vorrangige Anwendungszweck öffentlicher Außenraumbeleuchtungen bestand lange Zeit alleinig in der Adressierung wahrnehmungsbezogener Anforderungskriterien, welche ausschließlich menschliche Bedürfnisse im Hinblick auf die Erkennbarkeit von Personen, Fahrzeugen oder Objekten beinhalteten. Speziell in Bezug zu dem sich zwischenzeitlich stark veränderten Anforderungsportfolio wird jedoch auch die Reduktion umweltschädlicher Effekte, im Speziellen in Bezug auf schädliche Einwirkungen nächtlicher Beleuchtung auf die Tier- und Pflanzenwelt, zunehmend wichtiger. Zudem gilt es auch vermehrt nicht-visuelle Bewertungskriterien in der Gestaltung zukünftiger Beleuchtungsumsetzungen zu beachten.

Grundsätzlich wäre der Ansatz einer Minimierung nächtlicher Beleuchtung speziell aus Sicht der Umweltverträglichkeit anzustreben. In einigen Bereichen erweist sich dieser Ansatz jedoch nicht als adäquat, da beispielsweise sicherheitsbezogene Faktoren überwiegen. Normativ werden die zugehörigen Kennwerte aktuell in Bezug zu von Menschen empfundenen Helligkeiten definiert. Die Problematik besteht jedoch darin, dass Wildtierarten visuelle Systeme besitzen, welche sich von denen des Menschen in ihrer Empfindlichkeit gegenüber verschiedenen Lichtwellenlängen unterscheiden. In ihrem Kern erweisen sich die Problemstellungen dieses Bereichs demnach nicht alleinig von den Helligkeiten nächtlicher Beleuchtung als abhängig, sondern sie stehen auch in Relation zu den angewandten Spektren.

Naturforscher und Biologen haben diesbezüglich schon lange erkannt, dass verschiedene Teile des Lichtspektrums unterschiedlich auf verschiedene Gruppen wirken. Motten wurden beispielsweise als empfindlich gegenüber kürzeren Wellenlängen identifiziert (Cleve, 1964), was zur langfristigen kommerziellen Verfügbarkeit von gelben „Insekten“-Lichtern führte. Ebenso sind Meeresschildkröten-Schlüpflinge stärker von kürzeren Wellenlängen beeinflusst (Witherington & Bjorndal, 1991), was zu Vorschriften für schildkrötenfreundliche Beleuchtung geführt hat, die in Küstengebieten Floridas Anwendung finden.

In Bezug zu Außenbeleuchtungen waren Bemühungen zur Verringerung der Auswirkungen lange Zeit begrenzt, da nur eine reduzierte Anpassungsmöglichkeit mit herkömmlichen Leuchtmitteln bestand. Langwellige Natriumdampflampen waren beispielsweise dafür bekannt, weniger anziehend für Insekten zu sein, während Quecksilberdampflampen, mit ihren Emissionen im ultravioletten Bereich, extrem anziehend auf Insekten wirkten (Eisenbeis et al., 2006; Eisenbeis & Hassel, 2000; van Grunsven et al., 2014). Mit dem Aufkommen von LEDs und der Möglichkeit, das Farbspektrum durch die Mischung verschiedenfarbiger Dioden anzupassen, besteht heute jedoch grundsätzlich die technologische Fähigkeit zur

erweiterten spektralen Abstimmung (Deichmann et al., 2021; Eisenbeis & Eick, 2011; Longcore et al., 2015; Longcore et al., 2018; van Grunsven et al., 2014).

Das Ziel des Ansatzes liegt im Grunde genommen darin, das Spektrum in die Bewertung und Minderung von Lichtverschmutzung zu integrieren, indem die spektrale Leistungsverteilung der Beleuchtung mit der spektralen Empfindlichkeit von Spezies verglichen wird. Als Anforderung stehen heute vielfältige Informationen zu verschiedenen Tierarten zur Verfügung (Saunders et al., 2008; van Grunsven et al., 2014; Cleve, 1964; Menzel & Greggers, 1985), deren Gültigkeit auch bereits in verschiedenen Applikationen zur Anziehung getestet wurden (Longcore et al., 2018; Deichmann et al., 2021). Die Auswirkungen von künstlichem Licht in der Nacht erweisen sich dementsprechend als wissenschaftlich replizierbar (Seymoure et al., 2019). Zur Reduktion der Umweltauswirkungen auf empfindliche Arten müsste jedoch jede spektrale Abstimmung zur Minderung von Lichtverschmutzung auf den zugehörigen spektralen Reaktionskurven beruhen.

Das Problem liegt jedoch grundsätzlich darin, dass visuelle Reaktionssysteme eine große Variabilität aufweisen und es folglich kein einzelnes Spektrum gibt, das perfekt für die visuelle Sicherheit des Menschen in der Nacht sorgt und gleichzeitig Auswirkungen auf andere Arten vermeidet. Auf der anderen Seite erweisen sich auf spezifische Spezies abgestimmte Spektren oft aus menschlicher Perspektive für wahrnehmungsbezogene Bedingungen als fremd oder unzureichend und diesbezügliche Implementierungen erfordern dementsprechend langfristigen Vorlauf zur Umsetzung von Öffentlichkeitskampagnen, welche die Akzeptanz von Anwohnern auch unter unzureichenden oder ungewöhnlichen Lichtbedingungen sicherstellen sollen.

Unter Nutzung der spektralen Anpassbarkeit von LEDs in Außenraumbelichtungen wären diesbezüglich erweiterte Reduktionen schädlicher Umwelteinwirkungen zu erwarten, welche in Verbindung mit anderen Minderungsmaßnahmen verfolgt werden sollten, wie z.B. der Einschränkung der Betriebszeiten, dem Dimmen und der Steuerung der Lichtrichtung (Jägerbrand & Bouroussis, 2021). Hierfür würde es jedoch zusätzliche Bewertungskriterien bedürfen, welche aktuell noch nicht zureichend formuliert wurden (Ditmer et al., 2021). Zudem wäre speziell im Hinblick auf die Integration moderner Steuerungsansätze auch eine adaptive Lösung anzustreben, bei welcher in Abhängigkeit der Anwesenheit verschiedene Spektren appliziert werden, um eine Reduktion der gegenseitigen Störwirkungen verschiedener Spezies zu erreichen. Grundsätzlich sind adaptive spektrale Kompositionen der Beleuchtungsindustrie nicht fremd und kommen beispielsweise bereits in Tunable White Anwendungen zum Einsatz.

Potenziale und Limitationen: Tunable White Technologie

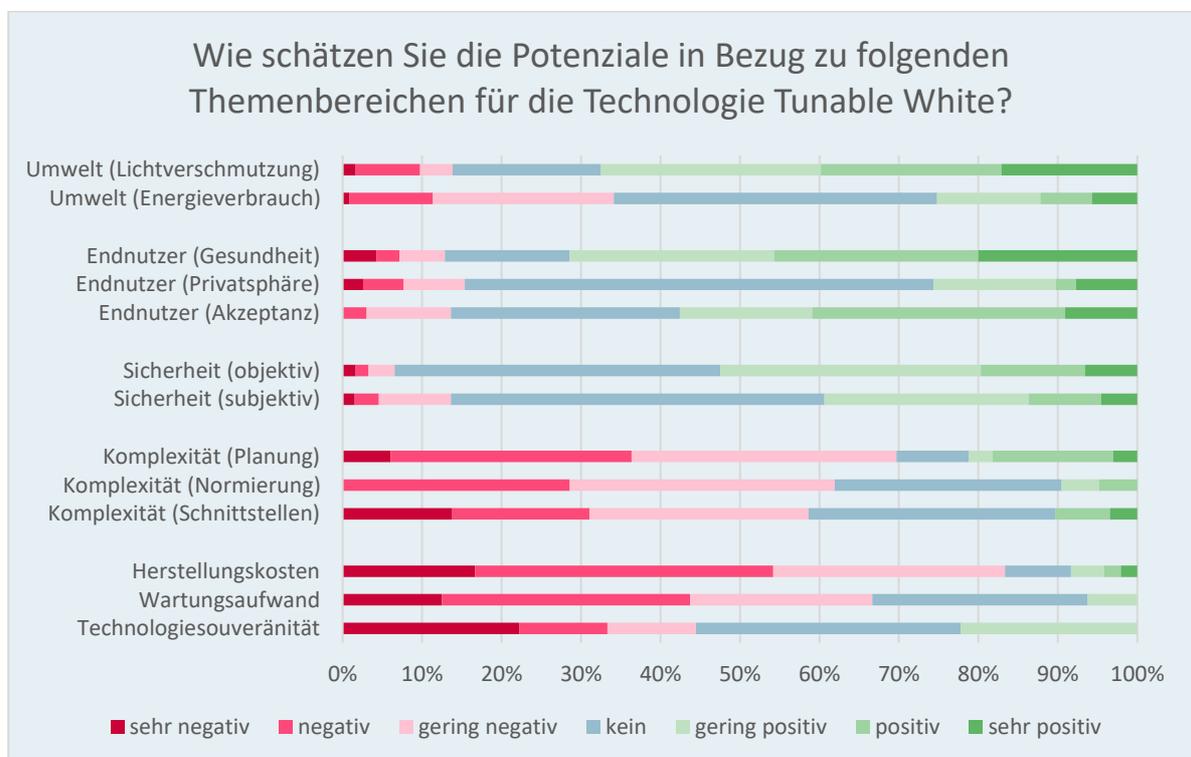
Tunable White Technologien beruhen auf der spektralen Mischung mehrerer verschiedener weißer LEDs mit verschiedenen Farbtemperaturen. Ihr vorrangiges Anwendungsfeld liegt dabei in der Vermeidung zirkadianer Störfaktoren beim Menschen. Technologisch gesehen erweisen sich Tunable White Lösungen dabei als umsetzbar und es bestehen vor allem für Innenraumbelichtungen bereits vermehrt Produkte am Markt, mit denen die Aufrechterhaltung der menschlichen Gesundheit adäquat adressiert werden kann. Die Wirkzusammenhänge gelten dabei im Allgemeinen als wissenschaftlich konsolidiert, was es in den letzten Jahren ermöglichte, dezidierte Planungsempfehlungen auszusprechen und Bewertungsverfahren zu etablieren. Auch wenn aktuell keine normativen Verankerungen in Bezug zu Tunable White Lösungen vorhanden sind, werden gesundheitsbezogene Aspekte bereits zunehmend in Lichtplanungen von Gebäuden beachtet. Das vorhandene Knowhow bei Planungsdienstleistern und in der Industrie hat dementsprechend in den letzten Jahren deutlich zugenommen.

In Bezug zu Außenraumbelichtungen spielen Tunable White Technologien eher eine untergeordnete Rolle, da sie sich vorrangig durch eine tageszeitbezogene Anpassung der spektralen Zusammensetzung auszeichnen, welche im Rahmen von Außenanwendungen nur eine verringerte Relevanz besitzt. Dennoch erweist sich die ausreichende Beachtung zirkadianer Störfaktoren speziell in Bezug zu nächtlichen Beleuchtungen als wichtig. Zudem erweisen sich geringe Farbtemperaturen auch hinsichtlich der Reduktion von negativen Umwelteinflüssen, speziell im Hinblick auf Biodiversitätsaspekte, als positiv, auch wenn sie grundsätzlich keine adäquate Reaktion auf veränderte spektrale Empfindlichkeiten verschiedener Spezies darstellen. Über diesen Aspekt hinausreichend, besitzen Tunable White Technologien in Außenraumbereichen das Potenzial zirkadiane Aspekte mit erhöhten wahrnehmungsbezogenen Anforderungen in Einklang bringen zu können, indem sie speziell in Tageszeitrandbereichen ein erhöhtes Anwendungspotenzial finden.

Die Einschätzung der Umfrageteilnehmer:innen ([Abbildung 21](#)) erweisen sich vor diesem technologischen Hintergrund als durchaus nachvollziehbar. Die Potenziale zu positiven Beiträgen sowohl im Hinblick auf die Reduktion negativer Umwelteinflüsse als auch in Bezug zu gesundheitlichen Aspekten wurden mit jeweils ca. 70% positiven Einschätzungen überdurchschnittlich hoch bewertet. Auch die Adressierbarkeit der Sicherheit und Akzeptanz wird hoch eingeschätzt, vor allem da keine Einwirkungen auf die Privatsphäre anzunehmen sind. Der energetische Verbrauch tendiert leicht zu einer negativen Einschätzung, was im Allgemeinen mit den leicht erhöhten Verbräuchen von Tunable White Systemen übereinstimmt. Dagegen verweisen die Ergebnisse vor allem in Bezug zu den mit dem Einsatz der

Technologie erwarteten Komplexitätsgraden auf maßgebliche Limitationen. Planungsbezogen wird die Technologie dabei überaus kritisch gesehen, vor allem, weil der adäquate Einsatz in Außenräumen noch nicht vollständig beschrieben wurde. In Innenraumanwendungen bestehen grundsätzlich die gleichen Problematiken. Dennoch bieten sich hier die Vorteile, Nutzer direkt in die Steuerung integrieren zu können und dementsprechend falschen Steuerungsannahmen entgegenzuwirken, was in Außenraumanwendungen nicht möglich ist. Zudem werden auch die Komplexitäten in Bezug zu Normierung und der Verfügbarkeit von Schnittstellen kritisch gesehen, was eine kurz- bis mittelfristige Adressierung der Potenziale maßgeblich beschränken kann. Weitere Limitationen werden auch in Bezug zu den Herstellungskosten vermutet, welche aufgrund der erhöhten LED-Anzahl und komplizierteren Optik durch die Notwendigkeit der Farbmischung grundsätzlich vorhanden sind. Gleiches gilt auch in Bezug zum Wartungsaufwand, welcher sich im Normalfall vorrangig durch Probleme mit Steuerungskomponenten auszeichnet, die jedoch bei Tunable White Lösungen Anwendung finden müssen. Schlussendlich werden leicht negative Einflüsse auf die Technologiesouveränität erwartet, im Speziellen da sich ein zu starker Fokus auf die technologische Nutzung nicht in einem erwarteten Marktpotenzial wiederfinden könnte.

Abbildung 21 Potenziale und Limitationen von Tunable White Technologien



Potenziale und Limitationen: Applikationsspezifische Spektren

Gegenüber Tunable White Lösungen adressiert der Einsatz applikationsspezifischer Spektren dezidiert die Reduktion der negativen Effekte nächtlicher Beleuchtungen auf verschiedene Spezies. Grundsätzlich bestehen aktuell keine Ansätze, spezielle spektrale Kompositionen bereitzustellen, welche dabei die Anforderungen mehrerer Spezies in gleichem Maße berücksichtigt. Vielmehr werden spektrale Kompositionen für den jeweiligen Anwendungsfall optimiert und dementsprechend der Schutz einer spezifischen Gattung adressiert.

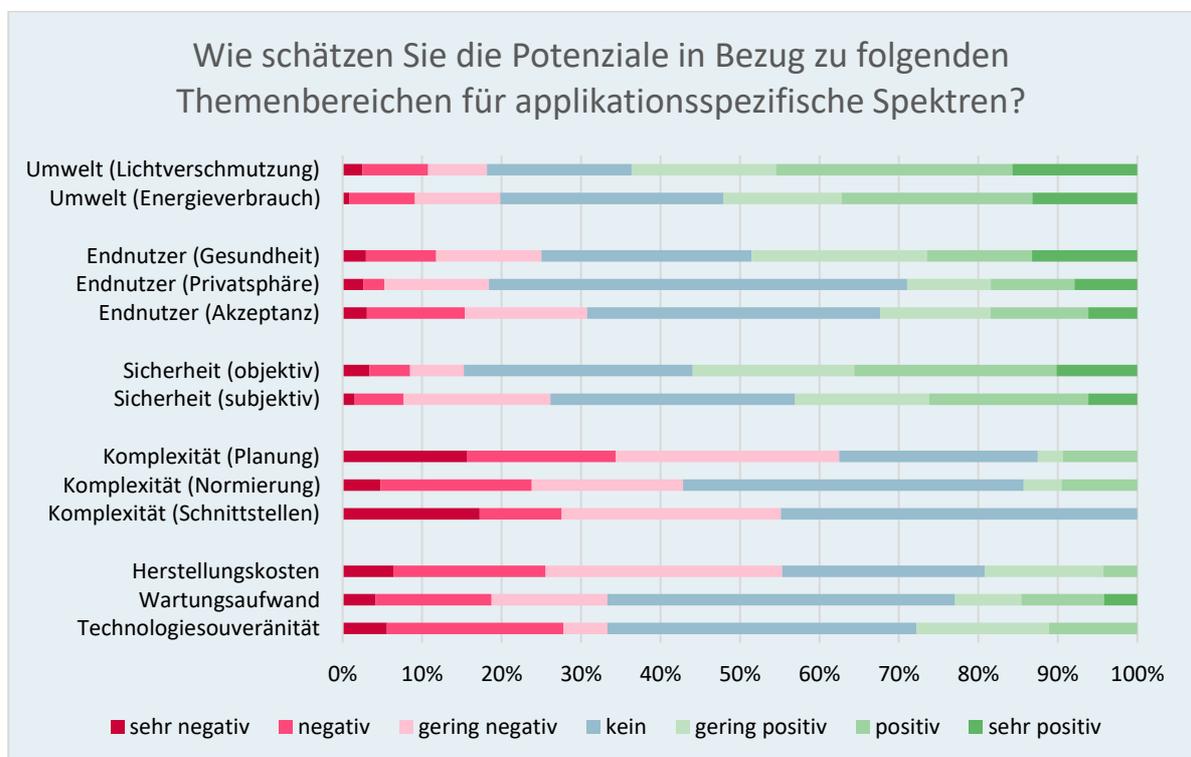
Obwohl die Technologie grundsätzlich der Anwendung von Tunable White Ansätzen sehr ähnlich ist und speziell im Bereich Spectral Tuning sehr großes Fachwissen besteht, bestehen aktuell jedoch kaum Produkte am Markt, um eine breite Anwendbarkeit der Potenziale zu ermöglichen und es wurden bis heute nur einige wenige Pilotinstallationen umgesetzt, welche auf Allgemeinbeleuchtungen in urbanen Außenräumen mit gleichzeitiger Nutzung durch den Menschen fokussieren. Die wenigen Fälle, in denen derartige Umsetzungen erfolgten, wurden dabei durch dezidierte Aufmerksamkeitskampagnen für die Allgemeinbevölkerung begleitet, um die Endnutzerakzeptanz speziell im Hinblick auf die reduzierte Lichtqualität und das veränderte urbane Erscheinungsbild zu gewährleisten.

Zudem bestehen zur adäquaten Adressierung der Problemstellungen heute so gut wie keine planungsbezogenen Richtlinien oder Informationen über die Verbreitung und das Vorkommen zu beachtender Spezies. Die Anwendungen beschränken sich dementsprechend heute vorrangig auf Bereiche, in denen eine besonders zu schützende Gattung explizit adressiert werden soll. Im Sinne einer allgemeinen und adäquaten Reduktion umweltbezogener Belastungsfaktoren bestehen die Limitationen dementsprechend vorrangig in der richtigen technologischen Applikation und weniger der Technologie an sich.

Die Einschätzung der Umfrageteilnehmer:innen ([Abbildung 22](#)) erweisen sich vor diesem technologischen Hintergrund als durchaus nachvollziehbar. Die Potenziale zu positiven Beiträgen sowohl im Hinblick auf die Reduktion negativer Umwelteinflüsse als auch in Bezug zu energetischen Verbräuchen werden von mehr als 50% sehr positiv eingeschätzt. Auch in Bezug zu gesundheitlichen und sicherheitsbezogenen Aspekten zeigen sich positive Tendenzen, da spektrale Optimierungen grundsätzlich auch in Bezug zu menschlichen Empfindlichkeiten vorgenommen werden können. Es werden keine Einwirkungen auf die Privatsphäre angenommen. In Bezug zur Akzeptanz zeigen sich jedoch deutliche Reduktionen gegenüber dem Einsatz von Tunable White Technologien. Die Gründe hierfür wurden bereits beschrieben. Die Ergebnisse vor allem in Bezug zu den mit dem Einsatz der Technologie erwarteten Komplexitätsgraden verweisen jedoch auf maßgebliche Limitationen. Sowohl in Bezug zur

Planbarkeit, dem normativen Stand als auch hinsichtlich von Schnittstellen zur Steuerung werden die Einflüsse deutlich negativ beurteilt. Zum einen zeigen sich hierfür die bis heute fehlende Generalisierbarkeit der wissenschaftlichen Ergebnisse zur spektralen Empfindlichkeit einzelner Spezies als verantwortlich, welche eine breite Adressierbarkeit durch einen zu komplexen Wirkzusammenhang sowohl im Hinblick auf planungsbezogene als auch normative Prozesse verhindern. Zum anderen erweist sich die Steuerung applikationsspezifischer Spektren als durchaus komplex und erfordert einen Wissensstand zur adäquaten Umsetzung, welcher in vielen Fällen am Markt nicht vorhanden ist. Weitere Limitationen werden auch in Bezug zu den Herstellungskosten vermutet, welche aufgrund der erhöhten LED-Anzahl und komplizierteren Optik durch die Notwendigkeit der Farbmischung grundsätzlich vorhanden sind. Die Wartungsaufwände werden jedoch ausgeglichen bewertet, da sich gegenüber Tunable White Lösungen die Nutzung von Systemsteuerungen nicht als grundsätzliche Anforderung erweist. Schlussendlich werden jedoch gegenüber Tunable White Technologien deutlich positive Beiträge zur Technologiesouveränität erwartet, im Speziellen auch, da sich aktuell ein zunehmendes Marktpotenzial abbildet, welches langfristig gesichert werden sollte.

Abbildung 22 Potenziale und Limitationen vom Einsatz applikationsspezifischer Spektren



Adaptive Lichtverteilungskurven

Grundsätzlich umfassen nächtliche Beleuchtungen eine Vielzahl potenzieller Applikationsfelder. Eine Adressierung von Verbesserungsmaßnahmen in Bezug zur Straßenbeleuchtung erscheint hinsichtlich der Reduktion negativer Umwelteinflüsse jedoch insofern von vorrangiger Bedeutung, als dass nicht nur ein signifikanter Teil der öffentlichen Beleuchtung auf diesen Bereich entfällt, sondern vor allem auch hinsichtlich der erhöhten Beleuchtungsanforderungen aus Gründen der Verkehrssicherheit einen maßgeblichen Beitrag zur Lichtverschmutzung und zum energetischen Verbrauch von Gebietskörperschaften leistet. Die Optimierung von Straßenbeleuchtungsanlagen stellt dementsprechend einen maßgeblichen Hebel dar, um Städte an die Anforderungen der ökologischen Transformation anzupassen.

Der Einsatz von LEDs in der Straßenbeleuchtung leistet heute bereits einen bedeutenden Beitrag zur energetischen Reduktion, insbesondere dann, wenn die optischen Eigenschaften der Straße bei der Planung der Beleuchtungsanlage berücksichtigt werden (Muzet et al., 2019; Muzet et al., 2023). Zudem erweist sie sich mitunter durch ihre erhöhte Echtzeit-Reaktivität in der Ansteuerung in der Lage intelligenter Umsetzungen von Beleuchtungssystemen zu ermöglichen, indem Anpassungen der Beleuchtungsstärken beispielsweise auf Basis des Verkehrsaufkommens oder der Anwesenheit von Fußgängern durchgeführt werden (Gibbons et al., 2015). In Bezug zu verkehrsintensiven Straßen, werden die Anforderungen dabei in Bezug zu den Leuchtdichten auf der Fahrbahn definiert, welche sich grundsätzlich aus den aufgetragenen Beleuchtungsstärken und den Reflexionseigenschaften des Fahrbahnbelags zusammensetzen.

Die optischen Eigenschaften von Fahrbahnbelägen ändern sich jedoch auf Basis der Wetterbedingungen und der Feuchtigkeitszustand der Fahrbahn (trocken, feucht, nass oder durchnässt) nimmt dementsprechend einen maßgeblichen Einfluss auf die Reflexionseigenschaften von Deckschichtbelägen. Dies kann die durchschnittlichen Leuchtdichtenniveaus und damit verbundenen Leuchtdichtegleichmäßigkeiten, welche als normative Anforderungskriterien gelten, erheblich verändern. Aus diesem Grund werden diesbezügliche Veränderungen der Leistung von Beleuchtungsanlagen bei nasser Fahrbahn heute bereits normativ berücksichtigt, indem die Anforderungen an die Gesamtgleichmäßigkeit reduziert werden (CIE, 2010; CEN, 2015). Eine Reduktion der Gleichmäßigkeit adressiert jedoch nicht die bei nassen Fahrbahnen auftretenden verstärkten Reflexionsblendungen, welche die visuelle Wahrnehmung stören und die darauf bezogene Leistungsfähigkeit reduziert. Da es unveränderlichen Beleuchtungsanlagen dementsprechend nicht möglich ist bei unterschiedlichen Reflexionseigenschaften eine gleichbleibende Lichtqualität zu erzielen,

erfordert die Veränderung von Helligkeiten oder das Auftreten von Spiegelungen auf der Fahrbahn (CIE, 1979; CIE, 1978) auch Änderungen in der photometrischen Charakteristik der Leuchten, sowohl in Bezug zum ausgehenden Lichtstrom als auch der erzielten Verteilung auf der Fahrbahn. Obwohl das Bewusstsein für die Problemstellung grundsätzlich in der Praxis vorhanden ist, erweisen sich variable Lichtverteilungen in Außenraumbelichtungen nach wie vor als nicht adäquat adressiert und es bestehen keine technischen Möglichkeiten zur Umsetzung. Vergleichbare und in Innenräumen angewandte Technologien nutzen hierfür meist mechanisch verstellbare Elemente, was in Außenbereichen eine zu hohe Wartungs-Intensivität erfordern würde, und die einzig verbleibende Restmöglichkeit wäre die Nutzung doppelter Systemausstattungen mit verschiedenen Abstrahlcharakteristiken, mit deutlichen Nachteilen in Bezug zu Ressourcenverbrauch und Wartung.

Eine Adressierung dieser Problemstellung würde sich jedoch aus mehreren Gründen lohnen. Nicht nur würden nachhaltige Verbesserungen der Verkehrssicherheit durch Vermeidung von Reflexionsblendungen entstehen, sondern auch Potenziale zu erweiterten energetischen Einsparmaßnahmen genutzt werden können. Simulationsbasierte Studien (Greffier et al., 2022) zeigen in diesem Kontext beispielsweise, dass Beleuchtungssysteme, welche auf Basis der normativen Anforderungen dimensioniert wurden, bei zunehmender Nässe der Fahrbahn zu einer erheblichen Überbeleuchtung führen können. Gleichzeitig nehmen die Leuchtdichte mit zunehmender Nässe stark zu und die Gesamtgleichmäßigkeit signifikant ab. Die simulationsbasierten Strategien unter Nutzung adaptiver Lichtverteilungen zeigten dagegen eine maßgebliche Verbesserung der Gesamtgleichmäßigkeit. Zudem konnte durch die vorgenommenen Anpassungen des Lichtstroms der energetische Bedarf der Verkehrsbeleuchtung um 22% reduziert werden.

Zur Adressierung dieser Potenziale müssen jedoch nicht nur neuartige Systemlösungen zur Anpassung von Lichtverteilungen entwickelt werden, sondern die einzunehmenden Systemzustände erweisen sich auch als vollkommen von äußeren Bedingungen abhängig. Dementsprechend erweisen sich sinnvolle Implementierungen nur unter Anwendung von Sensortechnologien und minimal-intelligenten Systemsteuerungen erreichbar.

Potenziale und Limitationen: Adaptive Lichtverteilungen

Die Umsetzung variabler Lichtverteilungen stellt aktuell eine maßgebliche Herausforderung für die Beleuchtungsindustrie dar, die grundsätzlich neben den Potenzialen, welche in Bezug zu Außenraumbelichtungen vorhanden sind, auch vielfältige Möglichkeiten in Innenraumanwendungen bieten würde. Obwohl aktuell bereits einige Ansätze bestehen, diese

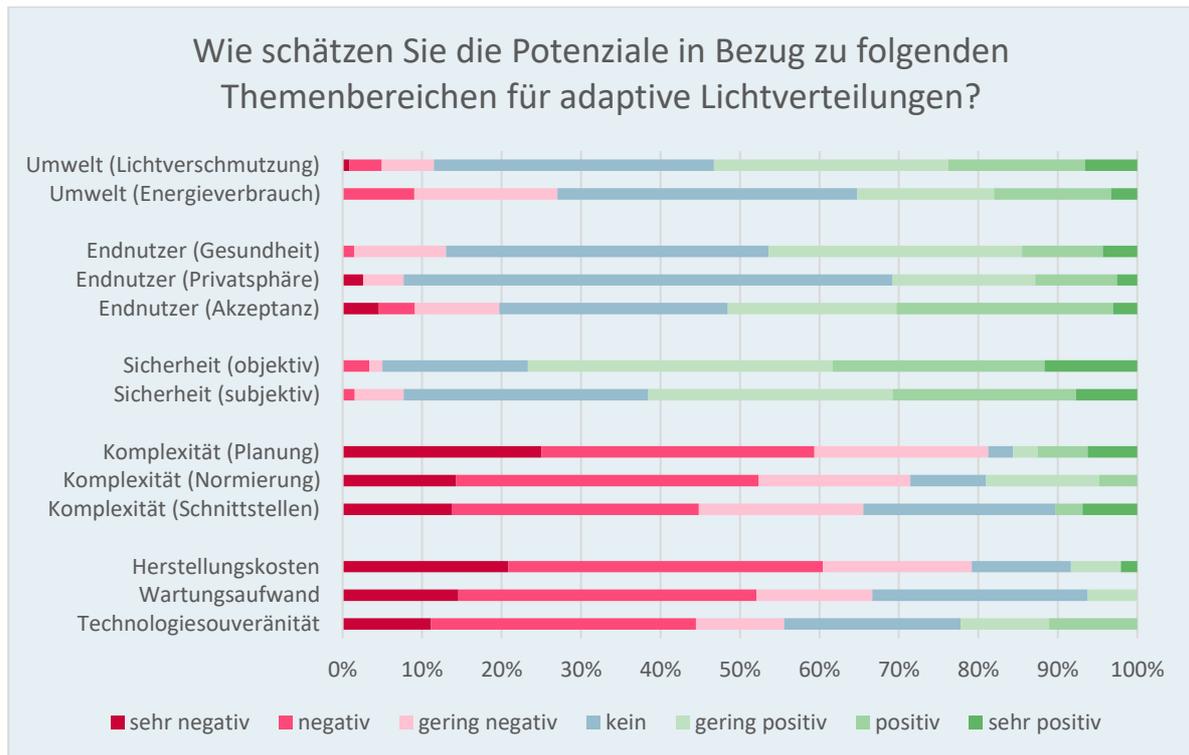
Problemstellung zu adressieren, erweisen sich die entwickelten Lösungen jedoch nur für einige Teilbereiche als zielführend anwendbar, da sie vorrangig auf dem Einsatz eines mechanischen Verstellens von systembezogenen Teilkomponenten beruhen, welche vor allem bei dynamischen Anpassungen an Umgebungsbedingungen in zu hohen Wartungsfaktoren resultieren würden. Die Nutzung elektronischer bzw. steuerungsbezogener Anpassungen mittels optischer Lösungsansätze ohne mechanische Beanspruchung würde dementsprechend zur Eröffnung maßgeblicher Potenziale in Beleuchtungsanwendungen beitragen, erweisen sich jedoch nach wie vor als Forschungsthema.

Die Einschätzung der Umfrageteilnehmer:innen ([Abbildung 23](#)) erweisen sich vor diesem technologischen Hintergrund als durchaus nachvollziehbar. Sowohl in Bezug zur Reduktion von umweltbelastenden Faktoren, der Erhöhung der energetischen Effizienz der Gesamtsysteme als auch in Bezug zur den auf Endnutzer:innen bezogenen Faktoren der Aufrechterhaltung der Gesundheit und Akzeptanz werden die Einflüsse zur Adressierung bestehender Herausforderungen mit jeweils ca. 50% als sehr positiv bewertet. Im Hinblick auf Einflüsse auf die Privatsphäre ergeben sich dagegen keine dezidierten Effekte, was auch in Anbetracht des fehlenden inhaltlichen Bezugs des technologischen Ansatzes nachvollziehbar erscheint. Die Ergebnisse in Bezug zu den mit dem Einsatz der Technologie erwarteten Komplexitätsgraden verweisen jedoch auf eine überdurchschnittlich hohe Bewertung der Limitationsfaktoren. Sowohl in Bezug zur Planbarkeit, dem normativen Stand als auch hinsichtlich von Schnittstellen zur Steuerung werden die Einflüsse deutlich negativ beurteilt. Technologisch wurden die Gründe hierfür bereits beschrieben. Es zeigt sich jedoch zudem auch als nach wie vor fraglich, inwiefern Anpassungen der Lichtverteilungen auf gesetzlicher Ebene adäquat implementiert und die umsetzungsbezogenen Funktionalitäten von Systemen auch sichergestellt werden können. Zudem erweisen sich Veränderungen von Lichtverteilungen auch speziell in planerischer Hinsicht mit mehr als 80% negativer Einschätzungen als äußerst schwer handzuhaben. Die Hinderungsgründe hierfür stellen einerseits die zunehmende Dimensionalität von in Planungen zu beachtenden und veränderlichen Beleuchtungsparametern dar, ergeben sich jedoch auch andererseits über den inhärenten technologischen Zusammenhang zu Oberflächencharakteristiken, welche im Normalfall nicht adäquat in Planungsprozessen bekannt sind. Bestehende normative Regulierungen erweisen sich dabei aktuell noch insofern als unzureichend, als dass tabellenbasierte Klassifikationen keine ausreichende Abbildung der realen Anforderungen darstellen.

Weitere Limitationen werden auch in Bezug zu den Herstellungskosten vermutet, welche aufgrund der erhöhten Systemkomplexität und komplizierteren Optik grundsätzlich angenommen werden kann und vor allem auch in Bezug zur Steuerungsnotwendigkeit auf

erhöhte Wartungsintensitäten zurückgeführt werden können. Schlussendlich werden auch deutlich negative Einflüsse auf die Technologiesouveränität erwartet, im Speziellen da sich ein zu starker Fokus auf die technologische Nutzung nicht in einem erwarteten Marktpotenzial wiederfinden könnte.

Abbildung 23 Potenziale und Limitationen vom Einsatz adaptiver Lichtverteilungen



Nanotechnologie-basierte Optikkomponenten

Auf allgemeiner Ebene kommen in Beleuchtungsanwendungen heute aufgrund der günstigen Entwicklungs- und Produktionskosten oftmals diffus abstrahlende Elemente zum Einsatz, deren lichttechnische Charakteristiken jedoch entscheidende Nachteile aufweisen. So führt beispielsweise die ungerichtete Lichtlenkung zu einer deutlichen Reduktion des Wirkungsgrads (Chaves, 2017), die hohen Streuleuchtdichten erhöhen das Blendungsrisiko (CIE, 1995) und sowohl die menschliche Tiefenwahrnehmung als auch das Objektdetailerkennungsvermögen wird durch die fehlenden Direktanteile (Tai & Inanici, 2010) maßgeblich verschlechtert. In Bezug zu funktionalen Außenraumbeleuchtungen werden diffuse System grundsätzlich nicht eingesetzt, da sie die bestehenden lichttechnischen Anforderungen nicht ausreichend abdecken können und auch hinsichtlich dekorativer

Beleuchtungselemente werden die Systeme zunehmend in ihrem Einsatz reduziert, da sie entscheidende Nachteile im Hinblick auf umweltbelastende Faktoren aufweisen (Hänel et al., 2016). Obwohl direktstrahlende Systeme sich speziell in Bezug zur Beleuchtung von Außenräumen von übergeordneter Wichtigkeit bei der Adressierung einer Reduktion der Umweltbelastungen erweisen, unterliegen sie aufgrund der Komplexität der notwendigen geometrischen Oberflächenstrukturen maßgeblichen Herausforderungen. So können die lichttechnisch aktiven Flächen heute zwar als Freiformflächen exakt berechnet werden, produktbedingte (z.B. inhomogen-farbige LEDs) und produktionsbedingte Limitierungen (z.B. Positionierungsgenauigkeiten) verursachen jedoch verschiedener Farb- und Strukturdefekte (z.B. color-over-source bzw. color-over-angle Verhalten (Mukherjee, 2016), Edge-Effekte, Zielfeld-Inhomogenitäten, usw.), welche gegenüber diffusen Systemen kompensiert werden müssen.

Grundsätzlich wird hierfür eine dezidierte Micro-Facettierung der Freiformflächen eingesetzt, um die Systemtoleranzen zu erhöhen. Die zunehmende Verkleinerung der Dimension der LED-Lichtquellen in den letzten Jahren (Liu et al., 2009) bedingte jedoch die Notwendigkeit zur Reduktion der Facettendimensionierung, um den Anforderungen an die Qualität der Fernfeldverteilung weiterhin gerecht werden zu können. Produktionsspezifische Beschränkungen gewinnen deswegen zunehmend an Bedeutung und stellen heute eine maßgebliche Limitation sowohl in Hinblick auf die Erhöhung der energetischen Effizienz als auch der Verbesserung der visuellen Lichtqualität dar. Die Fertigung nano-basierter Optikkomponenten kann dementsprechend aufgrund der erreichbaren Skalierungsgrößen einen maßgeblichen Beitrag zur Weiterentwicklung optischer Qualitätsmerkmale leisten, stellt jedoch gleichzeitig neue Herausforderungen an die herstellungsbezogene Wertungskette.

Zum Beispiel erweisen sich Berechnungs- und Simulationsmethoden zur Beschreibung lichttechnischer Oberflächen als stark an nachfolgende Produktionsprozesse gekoppelt, da die eingesetzten Optimierungsmethoden produktionspezifische Limitationen beachten müssen, um innerhalb umsetzbarer geometrischer Strukturen zu konvergieren. Da die Limitationen für Fertigungsprozesse unterhalb aktuell erreichbarer Strukturgrößen jedoch noch nicht ausreichend bekannt sind, erweisen sich aktuell vorhandene Berechnungsverfahren hinsichtlich der Stetigkeit, Krümmung und Form der Facettenstruktur eventuell als nicht zielführend. Zudem führt die Reduktionen der Facettendimension zu einer maßgeblichen Vergrößerung der zur geometrischen Beschreibung notwendigen Datenmenge, was eine Neudefinition des Datenformats zur lichttechnischen Analyse erfordert, speziell mit Hinblick auf Anforderungen hinsichtlich der Parallelisierung von Simulationsmethoden (z.B. Monte-Carlo Strahlenverfolgung).

Andererseits bestehen aktuell noch maßgebliche Limitationen bei der Umsetzung der geforderten Oberflächenkomplexitäten durch nano-basierte Produktionsmethoden. Obwohl sich grundsätzlich hochpräzise Verfahren aus typischen Laser-Anwendungen wie die 2-Photonen Print-Technologie zur Herstellung der geforderten Geometrien in Kombination mit UV-Polishing Verfahren zur Oberflächenglättung als einsetzbar erweisen, indem Master-Templates angefertigt und anschließend mittels Nickel-Galvanik abgeformt werden können, erweist sich die Umsetzbarkeit der geforderten Bauteildimensionen in Verbindung mit den geforderten Oberflächenkrümmungen nach wie vor als fraglich. Grundlegend erforderliche Funktionalitäten wie bspw. das UV-Polishing konnten bislang nur für einfache Oberflächen nachgewiesen werden, da der Glättungsprozess die Einbringung der gleichen Strahlungsleistung an jedem Oberflächenpunkt erfordert (Pong-Ryol et al., 2016). Die für optische Komponenten erforderlichen Krümmungsradien in Verbindung zur Mikro-Facettierung stellen damit eine maßgebliche Herausforderung hinsichtlich der Übertragbarkeit des aktuellen Wissenstandes dar. Die Adressierung der Verbesserung der optischen Effizienz bei gleichzeitiger Reduktion von Streulicht durch die Möglichkeiten reduzierter Facettengrößen mittels nano-basierter Fertigungsverfahren erweist sich dementsprechend maßgeblichen Hinderungsfaktoren unterworfen, die unter anderem auch eine vollständige Quantifizierung der Potenziale bis heute nicht ermöglichten.

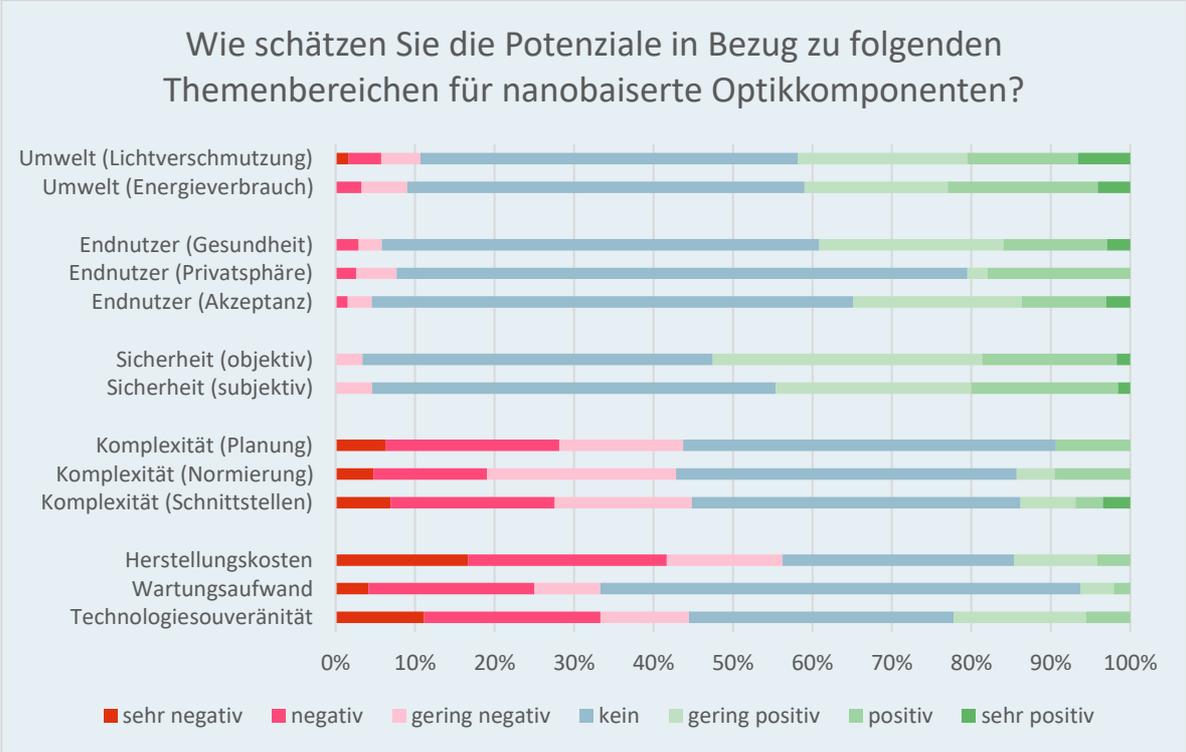
Potenziale und Limitationen: Nanotechnologie-basierte Optiken

Obwohl klassische Herstellprozesse inzwischen im europäischen Raum eine überaus hohe Qualität erreicht haben und dementsprechend die Umsetzung qualitativ hochwertiger Produkte ermöglichen, erweisen sich die Limitationen im Hinblick auf die damit umsetzbaren Komponentendimensionen für die Weiterentwicklung der Effizienz optischer Beleuchtungskomponenten als zunehmender Hinderungsfaktor. Sowohl im Hinblick auf die Reduktion von Streulicht zur Förderung des Abbaus umweltbezogener Belastungsfaktoren als auch zur Verbesserung der energetischen Effizienz von Beleuchtungssystemen wird dementsprechend die Fokussierung auf Potenziale von nano-technologischen Fertigungsverfahren zur weiteren Minimierung von bspw. Facettengrößen immer wichtiger. Die Erfüllung von qualitativen Anforderungen lichtlenkender optischer Systeme stehen jedoch in direkter Abhängigkeit zu hochkomplexen Geometrien und äußerst geringer Oberflächenrauigkeiten und die Anforderungen erweisen sich dementsprechend noch nicht vollständig mittels nano-basierter Fertigungsverfahren abbildbar. Obwohl die Nutzung minimierter Oberflächenstrukturen zur Eröffnung maßgeblicher Potenziale in Beleuchtungsanwendungen beitragen könnte, erweisen sich deren Adressierung jedoch nach wie vor als Forschungsthema.

Die Einschätzung der Umfrageteilnehmer:innen (Abbildung 24) erweisen sich vor diesem technologischen Hintergrund als durchaus nachvollziehbar. Sowohl in Bezug zur Reduktion von umweltbelastenden Faktoren, der Erhöhung der energetischen Effizienz der Gesamtsysteme als auch in Bezug zur den auf Endnutzer:innen bezogenen Faktoren der Aufrechterhaltung der Gesundheit, Akzeptanz und Sicherheitsaspekten werden die Einflüsse zur Adressierung bestehender Herausforderungen jeweils gering positiv bewertet. Die Bewertung erscheint speziell in Anbetracht der aktuell noch fehlenden Quantifizierung der potenziell adressierbaren Effekte als sinnvoll, veranschaulicht jedoch gleichzeitig auch, dass grundsätzlich positive Einflüsse angenommen werden können.

Im Hinblick auf Einflüsse auf die Privatsphäre ergeben sich dagegen keine dezidierten Effekte, was auch in Anbetracht des fehlenden inhaltlichen Bezugs des technologischen Ansatzes nachvollziehbar erscheint. Die Ergebnisse in Bezug zu den mit dem Einsatz der Technologie erwarteten Komplexitätsgraden sowie Wartungsfaktoren und Beiträge zu Technologiesouveränität verweisen ebenfalls aus Gründen unzureichender Abschätzungsmöglichkeiten auf potenzielle Hinderungsfaktoren, welche sich auch in Bezug zu den Herstellungskosten niederschlagen.

Abbildung 24 Potenziale und Limitationen vom Einsatz nanobasierter Optikkomponenten



Sensorik und bedarfsgerechte Beleuchtung

Im Hinblick auf viele der thematischen Anforderungen erweist sich im Speziellen eine Reduktion der nächtlichen Beleuchtung als die zielführendste Maßnahme zur Bewältigung bestehender Herausforderungen. Nicht nur der energetische Verbrauch könnte aufgrund seines direkten Zusammenhangs mit den aufgebrauchten Beleuchtungsstärken signifikant reduziert werden, sondern auch gesundheitliche Aspekte würden dadurch eine verbesserte Berücksichtigung erfahren, indem zirkadiane Störfaktoren eine deutlich weniger starke Ausprägung finden würden. Zudem stellt die Reduktion nächtlicher Helligkeiten heute die einzige sichere Möglichkeit dar, eine adäquate Berücksichtigung des differenzierten Anforderungsbilds der verschiedenen Spezies in urbanen Räumen zu gewährleisten.

Es ist offensichtlich, dass das Abschalten der nächtlichen Beleuchtung die wirksamste Art darstellt, einen diesbezüglich positiven Einfluss zu erreichen. Die Senkung des energetischen Verbrauchs verhält sich dabei direkt proportional zu den erreichten Abschaltzeiten, zirkadiane und umweltbezogene Störfaktoren werden mit hoher Wahrscheinlichkeit auf ein Minimum reduziert. Tatsächlich werden derartige Maßnahmen auch bereits in ganz Europa umgesetzt (Baron, 2011; Cambridgeshire County Council, 2011; Municipality of Den Haag, 2007; Municipality of Heerenveen, 2007; Trondheim SmartCity, 2009) und die an der Umfrage beteiligten Gebietskörperschaften adressieren die damit verbundenen Potenziale zu einem großen Teil. Gleichzeitig kann die Komplettabschaltung jedoch das Wohlbefinden von Endnutzer:innen negativ beeinflussen, da sowohl die visuelle Wahrnehmung der Umgebung als auch das Sicherheitsgefühl maßgeblich beeinträchtigt werden kann (Boomsma & Steg, 2014). Der erfolgreiche Einsatz von Maßnahmen zur Reduzierung der Beleuchtung hängt dementsprechend von der Akzeptanz der Öffentlichkeit ab (Steg et al., 2005; Steg et al., 2006).

Um dieses Problem zu umgehen, die energetischen Vorteile aber gleichzeitig weitestgehend zu nutzen, werden heute vorrangig sensorbasierte Steuerungssysteme eingesetzt (Roslyakova et al., 2020; Juntunen et al., 2018), die Sensoren zur Anwesenheitserkennung nutzen. Die am weitesten verbreiteten Sensoren, die diesbezüglich eine Anwendung finden, sind Passiv-Infrarot (PIR) und Radarsensoren, welche die grundsätzlichen Funktionalitäten unter Wahrung von Anonymitätsaspekten gewährleisten können. Ziel der Systeme ist dabei das Erreichen einer minimal-intelligenten Systemsteuerung, die Echtzeitreaktionen auf variierende Umgebungsbedingungen erlaubt und sich dementsprechend deutlich von den vorrangig auf Vernetzung und Datenanalyse beruhenden Ansätzen von IoT oder Smart City Anwendungen unterscheidet. Dennoch können die Systeme grundsätzlich mittels

selbstgesteuerter Leuchteneinheiten Energieeinsparungen mit den Bedürfnissen der Nutzer:innen in Einklang bringen, wie zahlreiche Pilotprojekte demonstrieren (Sánchez Sutil & Cano-Ortega, 2020). Meist erfolgt dabei auch gleichzeitig die Steuerung umliegender Leuchten, um eine Lichtzone um die anwesende Person herum zu schaffen (Pandharipande & Newsham, 2018), damit die Fernsicht nicht beeinträchtigt wird. Das heißt, dass auch eine adäquate Berücksichtigung wahrnehmungsbezogener Anforderungen im Rahmen dieser minimal-intelligenten Systemsteuerung bereits erfolgen kann.

Zudem bestehen auch bereits Ansätze, die über das reine Ein- bzw. Ausschalten der Beleuchtung in Abhängigkeit zu Anwesenheiten hinausreichen. Speziell in Bezug zu Straßenbeleuchtungen, können die aufgebrachten Beleuchtungsstärken in Verbindung zum aktuellen Verkehrsaufkommen gebracht werden, sodass die Beleuchtungsstärke proportional zur Anzahl der Fahrzeuge in den jeweiligen Bereichen angepasst wird. Beispielhafte Implementierungen dieser volumenbasierten Steuerungsansätze verweisen auf Energieeinsparungen von 60% in weniger frequentierten öffentlichen Bereichen und 40% bei stärkerem Verkehrsaufkommen (Petritoli et al., 2009).

Kombinationen dieser Ansätze ermöglichen heute auch bereits Steuerungsansätze, bei welchen mehrere Leuchteinheiten synchronisiert werden, um die Bewegung der Nutzer zu verfolgen und einen dynamischen Lichtgradienten um sie herum zu erzeugen. Einige Pilotprojekte haben diese Technik bereits für Fahrzeuge, Fußgänger (Sánchez Sutil & Cano-Ortega, 2020; Lau et al., 2015) und Radfahrer implementiert und bis zu 77 % Energieeinsparungen erzielt (Juntunen et al., 2018). Radarsensoren weisen in diesen Anwendungsfällen meist gegenüber PIR-basierten Systemen Vorteile auf, da sie neben der Erfassung reiner Anwesenheiten auch die Ableitung von Geschwindigkeiten erlauben und dementsprechend die Differenzierung zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern ermöglichen.

Der Einsatz von Dimmverfahren kann dementsprechend maßgeblich zur energetischen Verbesserung der Systeme beitragen. Zudem können die diesbezüglichen Möglichkeiten nicht nur in Abhängigkeit des Bedarfs stehen, sondern auch zur leuchten-internen Optimierung herangezogen werden. Speziell in Außenbereichen erweisen sich Leuchten aufgrund von wettbedingten Schwankungen oft erheblichen Veränderungen des Lichtstroms unterworfen. Temperaturbasierte Steuerungsansätze können unter Nutzung der Dimmmöglichkeiten von LEDs heute auch dazu genutzt werden, den Lichtstrom trotz Temperaturschwankungen konstant zu halten. Studien verweisen in diesem Zusammenhang auf eine Steigerung der Außenbeleuchtungseffizienz um 10 % (Hegedüs et al., 2016). In Abhängigkeit zum

Ort und erweiterten Umgebungsbedingungen wie bspw. Windgeschwindigkeiten könnten die Effizienzgewinne dieser Technik sogar noch höher ausfallen.

Die Wahl der geeigneten Technik und Steuerungsstrategie muss jedoch immer für den Einsatz auf Basis lokaler Eigenschaften von Städten und Standorten geprüft werden. Die dadurch entstehende Komplexität führt im Zusammenhang mit kurz- bis mittelfristig relativ geringen Kostenersparnissen aufgrund kleiner zonaler Betrachtungen häufig dazu, dass derartige Systeme trotz Verfügbarkeit nur schwer in die Umsetzung gelangen. Es ist dennoch bemerkenswert, inwiefern sich bereits minimal-intelligente Systeme zur Optimierung bestehender öffentlicher Straßenbeleuchtungssysteme (Carli & Dotoli, 2020) einsetzen lassen.

Potenziale und Limitationen: Nächtliche Komplettabschaltungen

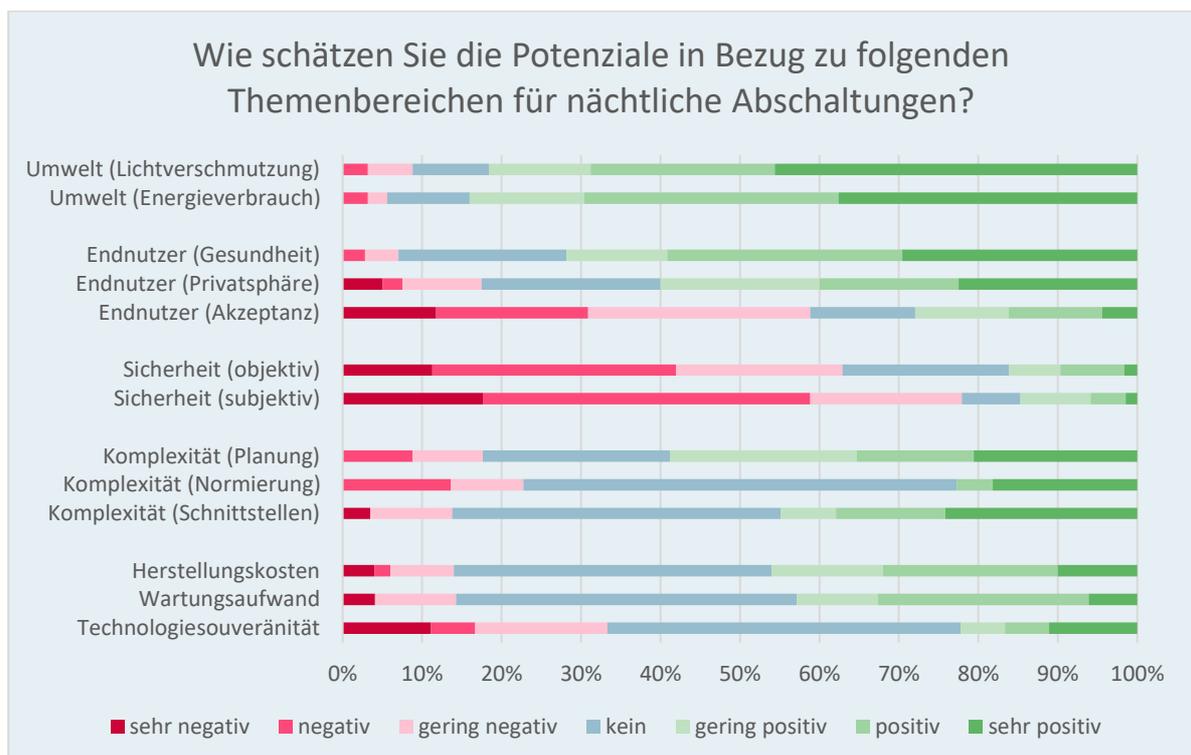
Die Reduktion umweltbelastender Faktoren sowie die Steigerung der energetischen Effizienz erweist sich vorrangig in Bezug zu Bedürfnissen als relevant, indem nächtliche Beleuchtungen im Normalfall nur dann eingesetzt werden sollten, wenn eine immediate Anforderung zur Aufhellung nächtlicher Umgebungen besteht. Bei einer fehlenden Bedürfnislage würden sich grundsätzlich nächtliche Komplettabschaltungen von Systemen empfehlen, da die Beitragspotenziale dabei nachvollziehbar am größten ausfallen. Grundsätzlich finden nächtliche Komplettabschaltungen bereits vermehrt Anwendung und werden zumeist zwischen Mitternacht und 01:00 Uhr bis zu den frühen Morgenstunden angewandt, in welchen die Nutzungswahrscheinlichkeit öffentlicher Beleuchtungssysteme äußerst gering ausfällt. Zudem stellen sich in Bezug zur Implementierung von Abschaltungen keine technologischen Hindernisse ein, da die grundlegenden Funktionalitäten bereits in allen Systemen verfügbar sind.

Problematisch werden aktuell vorrangig nachteilige Effekte auf Endnutzer:innen gesehen, welche auftreten, wenn trotz Abschaltungen Bedürfnislagen entstehen. Durch die zunehmende Wichtigkeit der Reduktion umweltbelastender Faktoren fokussiert sich die Forschung aktuell vermehrt auf die Quantifizierung diesbezüglicher Effekte. Speziell nordische Länder erweisen sich in diesem Bereich als Vorreiter, da aufgrund der verlängerten Dunkelphasen eine erhöhte ortsbezogene Relevanz vorherrscht. Obwohl aktuell noch keine eindeutigen und konsolidierten Belege zur Akzeptanz von Endnutzer:innen gegenüber nicht beleuchteten urbanen Gebieten bestehen, lassen erste Erkenntnisse bereits vermuten, dass auf Nutzer:innen bezogene Akzeptanzprobleme möglicherweise überbewertet werden. Dies wird aktuell vorrangig unter zwei Aspekten begründet: nächtliche Beleuchtungen setzen sich auch aus anderen Lichtquellen wie bspw. Werbebeleuchtungen zusammen und

erweisen sich dementsprechend oft als deutlich heller als angenommen und eine zunehmende soziale Entwicklung in Bezug zu Umweltschutzaspekten verändert auch die Haltung gegenüber von Maßnahmen. Inwiefern diese Annahmen jedoch begründet sind und ob sie sich auch auf nicht-nordische Gesellschaften übertragen lassen, erweist sich nach wie vor als Forschungsgegenstand.

Erwartungsgemäß folgt die Einschätzung der Umfrageteilnehmer:innen (Abbildung 25) den angeführten Potenzialeinschätzungen. Sowohl in Bezug zur Reduktion von umweltbelastenden Faktoren, der Erhöhung der energetischen Effizienz der Gesamtsysteme als auch in Bezug zu gesundheitlichen Aspekten zeigen die Ergebnisse mit jeweils mehr als 70% positiven Rückmeldungen deutliche Potenziale. Im Hinblick auf Einflüsse auf die Privatsphäre ergeben sich keine dezidierten Effekte, was auch in Anbetracht des fehlenden inhaltlichen Bezugs des technologischen Ansatzes nachvollziehbar erscheint. Dagegen wurden die Akzeptanz von Endnutzer:innen und sicherheitsbezogene Faktoren als potenziell negativ bewertet, was grundsätzlich die Meinungshaltung aktueller Diskussionen widerspiegelt. Des Weiteren verweisen die Ergebnisse aus bereits besprochenen Gründen auf keine potenziellen Hinderungsfaktoren in Bezug auf resultierende Komplexitäten, Kosten, Wartung oder Technologiesouveränität.

Abbildung 25 Potenziale und Limitationen vom Einsatz nächtlicher Komplettabschaltungen



Potenziale und Limitationen: Sensorbasierte Beleuchtungssysteme

Durch die Nutzung sensorbasierter Lösungsansätze können grundsätzlich bedarfsorientierte Beleuchtungssysteme umgesetzt werden, welche die Vorteile nächtlicher Komplettabschaltungen weitestgehend aufrechterhalten, gleichzeitig jedoch auch eine Reaktionsfähigkeit in Bezug zu Konfliktsituationen besitzen. Technologisch gesehen erweisen sich bedarfsgerechte Beleuchtungen als umsetzbar und es bestehen bereits vermehrt Produkte, mit denen diesbezügliche Potenziale adressiert werden können. Aus sensorischer Perspektive kommen in derartigen Systemen meist PIR-Technologien zur reinen Anwesenheitssteuerung oder Radar-basierte Sensorik für volumenbasierte Ansätze zur Anwendung. Auch wenn aktuell keine normativen Verankerungen in Bezug zu bedarfsorientierten Lösungen vorhanden sind, werden die Potenziale bereits zunehmend in Lichtplanungen adressiert. Das notwendige Knowhow hat dementsprechend in den letzten Jahren zugenommen.

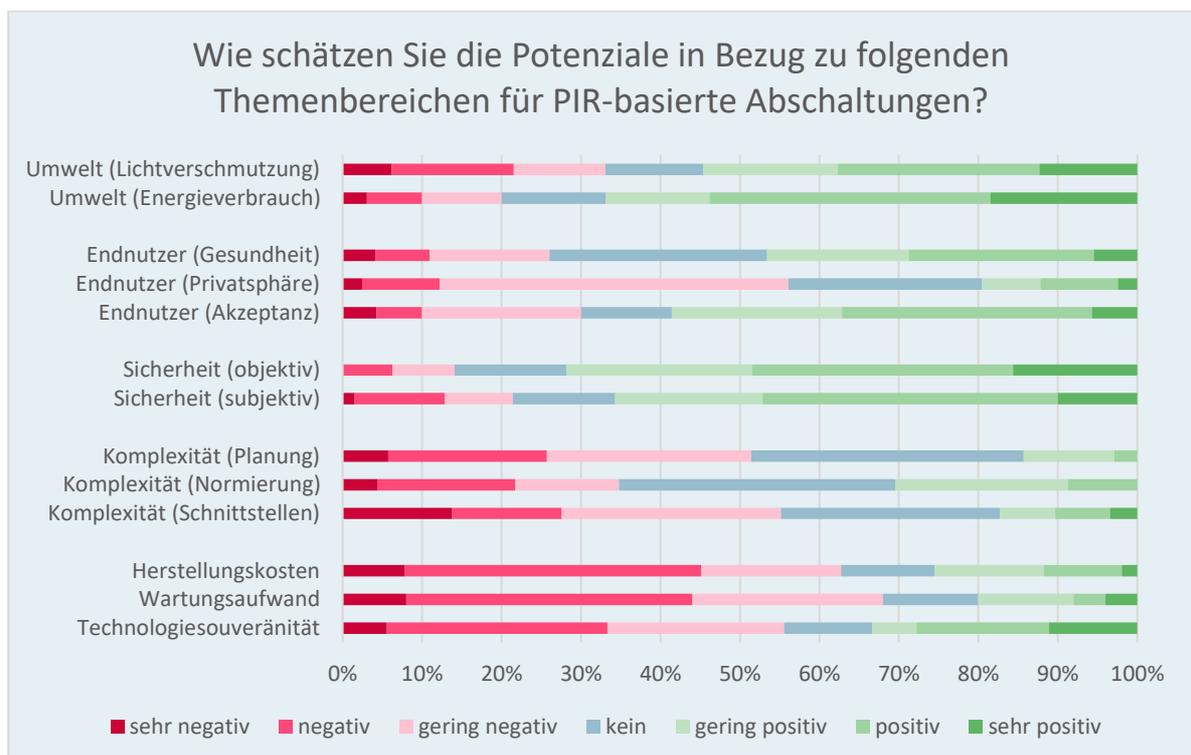
Trotz der deutlichen Vorteile dieser Systeme gegenüber zeitgesteuerten Ansätzen zur Reduktion der Beleuchtungsstärken, werden diesbezügliche Lösungen jedoch nach wie vor nur selten in Anwendungen implementiert. Als maßgebender Hindernisfaktor, welcher sich dafür als verantwortlich erweist, kann diesbezüglich der erhöhte Kostenfaktor sowohl in Bezug zur Installation als auch zur voraussichtlichen Systemwartung genannt werden. Es muss jedoch angemerkt werden, dass diesbezügliche Amortisationsberechnungen speziell im Hinblick auf die übergeordnete gesamtstaatliche Wirkung äußerst problematisch angesehen werden sollten. Implementierungen dieser Systeme werden meist nur in geringen Dimensionen geprüft. Obwohl die Amortisationszeiten in den meisten Fällen relativ kurz ausfallen, erscheinen die danach erzielbaren Einsparungen deswegen häufig zu gering, um einen möglicherweise erhöhten Wartungsaufwand rechtfertigen zu können. Obwohl auf kleiner kommunaler Ebene die Entscheidung gegen eine Implementierung demnach auf budgetärer Ebene nachvollzogen werden kann, ergeben sich übergeordnet daraus jedoch maßgebliche Problematiken im Bezug zum Ressourcenverbrauch, da auf gesamtstaatlicher Ebene die erhöhten Einzelverbräuche der Systeme in Summe betrachtet werden müssen. Eine nachhaltige Förderung bedarfsbezogener Ansätze erscheint dementsprechend nachvollziehbar.

Die Einschätzung der Umfrageteilnehmer:innen erweisen sich vor diesem technologischen Hintergrund sowohl in Bezug zu den abgefragten PIR-Technologien ([Abbildung 26](#)) als auch Radar-Technologien ([Abbildung 27](#)) als durchaus nachvollziehbar. Die Potenziale zu positiven Beiträgen sowohl im Hinblick auf die Reduktion negativer Umwelteinflüsse und energetischer Verbräuche als auch in Bezug zu den für Endnutzer:innen relevanten Faktoren Gesundheit, Sicherheit als auch Akzeptanz wurden mit ca. 50 - 60% sehr hoch bewertet, was im Grunde genommen die Kernaspekte des technologischen Ansatzes reflektiert. Einzig in

Bezug zur Privatsphäre von Endnutzer:innen können leicht negative Tendenzen verortet werden. Als Grund hierfür kann angeführt werden, dass anwesenheitsorientierte Systemansätze grundsätzlich immer das Bestehen von Anwesenheiten veranschaulichen müssen. In Bezug zu Außenraumbelichtungen ergeben sich dadurch erweiterte Ortungsmöglichkeiten im urbanen Raum, welche in den vergangenen Jahren bereits vermehrt diskutiert wurden, da sich dadurch möglicherweise die Planung und Durchführung krimineller Aktivitäten vereinfachen würde. Bis heute gibt es jedoch keine Hinweise darauf, dass bedarfsorientierte Beleuchtungsansätze zu einer Erhöhung von Kriminalitätsraten beitragen würden.

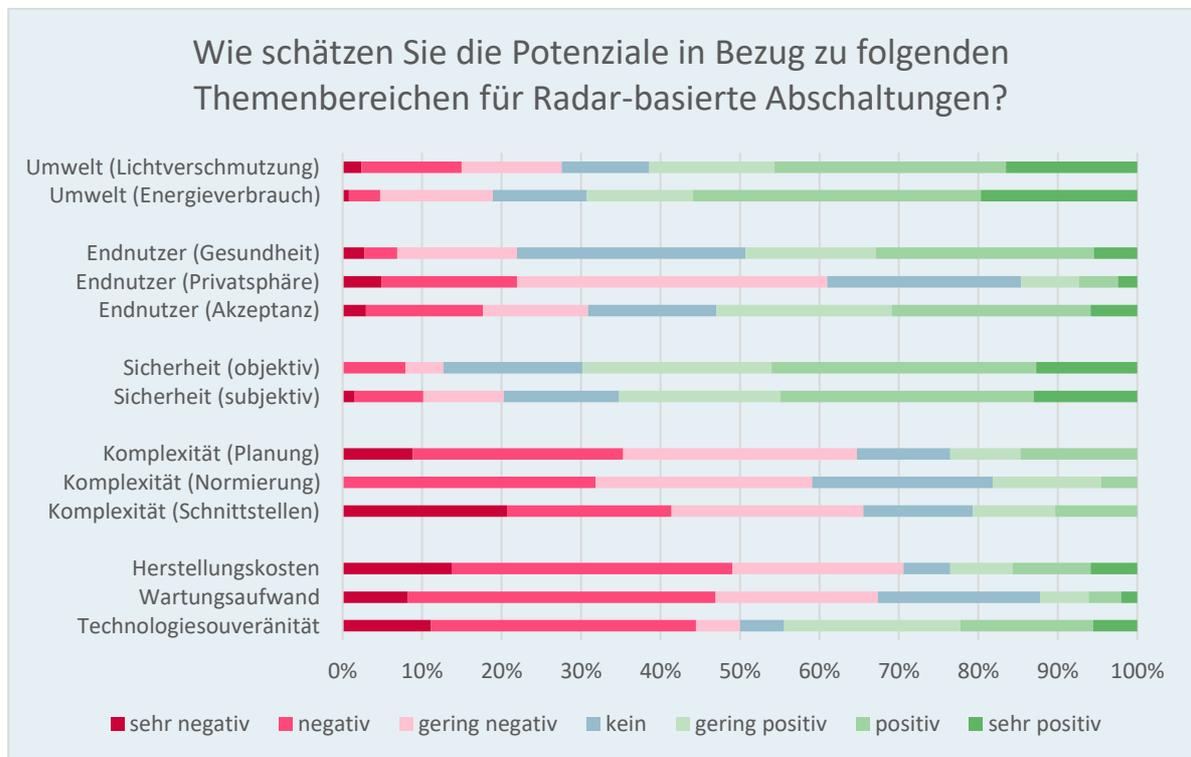
Gegenüber nächtlichen Komplettabschaltungen verweisen die Umfrageergebnisse zudem auf höhere Komplexitäten in allen Bereichen. Sowohl die planerischen Hindernisfaktoren als auch die normativen Abbildungsproblematiken erweisen sich dabei als schlüssig nachvollziehbar, da echtzeitreaktive Systemansätze sich nur erschwert in statischen Spezifikationsdokumenten darstellen lassen. Im Hinblick auf die Einschätzung zur Schnittstellenkomplexität erweisen sich die Umfrageergebnisse jedoch insofern als nicht nachvollziehbar, als dass bereits standardisierte Schnittstellen zur Sensorintegration bestehen (z.B. Zhaga) und auch Anwendung finden. Eine mögliche Interpretation der Ergebnisse besteht in einem zu geringen Fachwissen, was zu einer Überbewertung des Hindernisfaktors führen würde.

Abbildung 26 Potenziale und Limitationen vom Einsatz PIR-basierter Abschaltungen



Zudem werden in Bezug zu den Herstellungskosten und Wartungsaufwände mit jeweils mehr als 60% negativer Einschätzungen deutliche Hindernisse gesehen. Die Hintergründe hierfür wurden bereits diskutiert. Schlussendlich werden in Bezug zur Technologiesouveränität differenzierte Auswirkungen erwartet, im Speziellen da bereits eine breite Marktverfügbarkeit besteht und sich dementsprechend für Unternehmen nur ein geringer Positionierungsmehrwert einstellen kann, gleichzeitig die erweiterte Adaptierung von sensorbasierten und bedarfsorientierten Systemlösungen jedoch auch Potenziale zur nachhaltigen Marktentwicklung darstellen.

Abbildung 27 Potenziale und Limitationen vom Einsatz Radar-basierter Abschaltungen



Erweiterte Systemvernetzung

Die breiter werdende Verfügbarkeit von Sensorik, robusten Kommunikationsprotokollen und intelligenten Steuerungsanwendungen in Kombination mit den zur Übermittlung und Verarbeitung großer Datenmengen notwendigen Infrastrukturen erlauben die zunehmende Ausgestaltung von Konzepten intelligenter Städte. Unter Verschmelzung von Technologien zur Datenerfassung, -verarbeitung und -verbreitung sowie Vernetzungs-, Computer- und Datensicherheitsmaßnahmen werden somit Optimierungen im Hinblick auf soziale (Roy et

al., 2024; Gharaibeh et al., 2017), wirtschaftliche und nachhaltigkeitsbezogene (Khan et al., 2022) Zielsetzungen ermöglicht. Das Internet der Dinge (IoT) spielt beim Wachstum intelligenter Städte eine zentrale Rolle, indem es robuste Verbindungen zwischen Geräten, Sensoren und Netzwerken herstellt, die für deren Einrichtung unerlässlich sind (Mehmood et al., 2017; Chatterjee et al., 2018).

Potenziell umfasst die auf erweiterter Systemvernetzung basierende IoT-Technologie zahlreiche Anwendungen, die darauf abzielen, verschiedene Sektoren zu verbessern, insbesondere in Smart Cities. Dementsprechend erweist sich die Integration des IoT auch als attraktives Paradigma für öffentliche Verwaltungen, indem rechtzeitige Informationen für die Verbesserung und transparentere Gestaltung öffentlicher Dienstleistungen erhoben werden können (García et al., 2017; Talari et al., 2017). Die Integration von IoT-Konzepten auf städtischer Ebene fokussiert damit beispielsweise auf die Bereitstellung kostengünstiger Dienstleistungen, die Verbesserung öffentlicher Verkehrssysteme, die Reduktion von Verkehrsbehinderungen und der Erhöhung der Sicherheit und Gesundheit der Bürger. Darüber hinaus spielt IoT auf nationaler Ebene eine entscheidende Rolle, insbesondere in Bezug zu Umweltverschmutzung, Energieeinsparung, Überwachung und der Entwicklung von Infrastrukturen (Janani et al., 2021; Syed et al., 2021).

Speziell öffentliche Beleuchtung bietet hierbei das Potenzial als Grundpfeiler des städtischen Fortschritts zu dienen. Die notwendigen Technologien umfassen dabei die Ausstattung smarter Straßenbeleuchtung mit Sensoren, drahtlosen Kommunikationsmöglichkeiten und Steuerungsalgorithmen, die es ihnen ermöglichen, innerhalb des IoT-Rahmens autonom zu arbeiten (Jin et al., 2016; Gade, 2021; Dizon & Pranggono, 2022). In diesem Zusammenhang steht dabei vor allem der Fortschritt intelligenter öffentlicher Straßenbeleuchtung, die Überwachungssysteme integriert, im aktuellen Fokus der Forschung, um durch erweiterte Informationen dynamische Anpassungen der Lichtintensität entsprechend dem Verkehrsfluss und den Wetterbedingungen zu ermöglichen (Mahoor et al., 2020). Gleichzeitig werden durch den Einsatz erweiterter Vernetzungstechnologien eine Fernsteuerung der Beleuchtung, eine Überwachung der Wetterbedingungen und eine Ferndiagnose von Lampenausfällen ermöglicht (Omar et al., 2022).

Darüber hinaus können durch die erweiterte Vernetzung von Geräten jedoch auch noch Verbesserungen von Dienstleistungen außerhalb der eigentlichen Zielapplikation adressiert werden, indem Informationen zwischen einzelnen Subsystemen bereitgestellt werden. Jüngere Untersuchungen zu Implementierungen von Smart Cities verweisen in diesem Punkt beispielsweise auf Potenziale in den Bereichen Smart Parking, Smart Energy Management,

intelligente Wassersysteme, intelligente Infrastrukturentwicklung, intelligente Landwirtschaft und intelligente Gesundheitsversorgung (De Paz et al., 2016; Pardini et al., 2019; Saif et al., 2022). Zudem ergeben sich speziell in Bezug zu den zunehmenden Herausforderungen der Urbanisierung und des Verkehrsmanagements, mit denen Städte weltweit konfrontiert sind, erweiterte Potenziale, indem die flächendeckende Echtzeitüberwachung des Verkehrs neue Zugänge zur verbesserten Stadtverwaltung und Stadtplanung eröffnet (Sarrab et al., 2020).

Andererseits bestehen aktuell jedoch auch mehrere maßgebliche Herausforderungen, die mit der Einführung dieser Systeme verbunden sind. Die Umsetzung von IoT-Architekturen erweist sich als kostspielig, da Investitionen in Infrastruktur, Sensoren und Datenmanagement erforderlich sind. Zudem entstehen durch die Echtzeit-Datenerfassung über den Verkehr, Fahrzeuge und Fußgänger Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes, was eine strikte Einhaltung der Vorschriften erfordert. Technische Herausforderungen bestehen darin, die Zuverlässigkeit und Sicherheit von IoT-Geräten zu gewährleisten, um Unterbrechungen und Datenverletzungen zu verhindern.

Use-Case Demonstrationen zeigen jedoch, dass sich die Überwindung dieser Herausforderung lohnen könnte. So wurde in Barcelona beispielsweise ein umfassendes IoT-basiertes intelligentes Straßenbeleuchtungssystem implementiert, das Sensoren verwendet, um die Helligkeit der Straßenlaternen basierend auf Fußgänger- und Fahrzeugverkehr anzupassen, wodurch der Energieverbrauch um bis zu 30% reduziert wird (Khemakhem & Krichen, 2024). San Diego hat über 3000 intelligente Straßenlaternen mit Sensoren installiert, die den Verkehr und die Umgebungsbedingungen überwachen und zur Stadtplanung und Verkehrssteuerung beitragen (Khemakhem & Krichen, 2024). Los Angeles hat ein fortschrittliches Straßenbeleuchtungssystem eingeführt, das LED-Beleuchtung mit IoT-Sensoren und erweiterter Konnektivität integriert, was eine Fernüberwachung und -verwaltung der Straßenbeleuchtung ermöglicht und zu einer 60%igen Reduzierung des Energieverbrauchs und jährlichen Einsparungen in Millionenhöhe geführt hat (Khemakhem & Krichen, 2024). Diese Beispiele zeigen die Potenziale, welche durch IoT-basierte intelligente Straßenbeleuchtungssysteme grundsätzlich adressiert werden könnten.

Potenziale und Limitationen: Erweiterte Vernetzung

Die Konzepte der erweiterten Systemvernetzung berufen sich in ihrer Argumentation vorrangig auf positive Effekte, die auf gesamtstädtischer Ebene durch die Verbindung einzelner Subsysteme auftreten. Als Ergebnis entstehen dadurch vielfältige Potenziale zur

Verbesserung der allgemeinen Lebensqualität der Stadtbewohner:innen oder auch im Hinblick auf städtische Verwaltungsaspekte. Beleuchtungen von Außenräumen werden in diesem Kontext vor allem Möglichkeiten zur Beschleunigung von Umsetzungsprozessen zugesprochen, da sie aufgrund ihrer weiten Verbreitung, bestehenden Verfügbarkeit, flächen-deckenden Implementierung und Stromversorgung maßgebliche Vorteile bieten könnten.

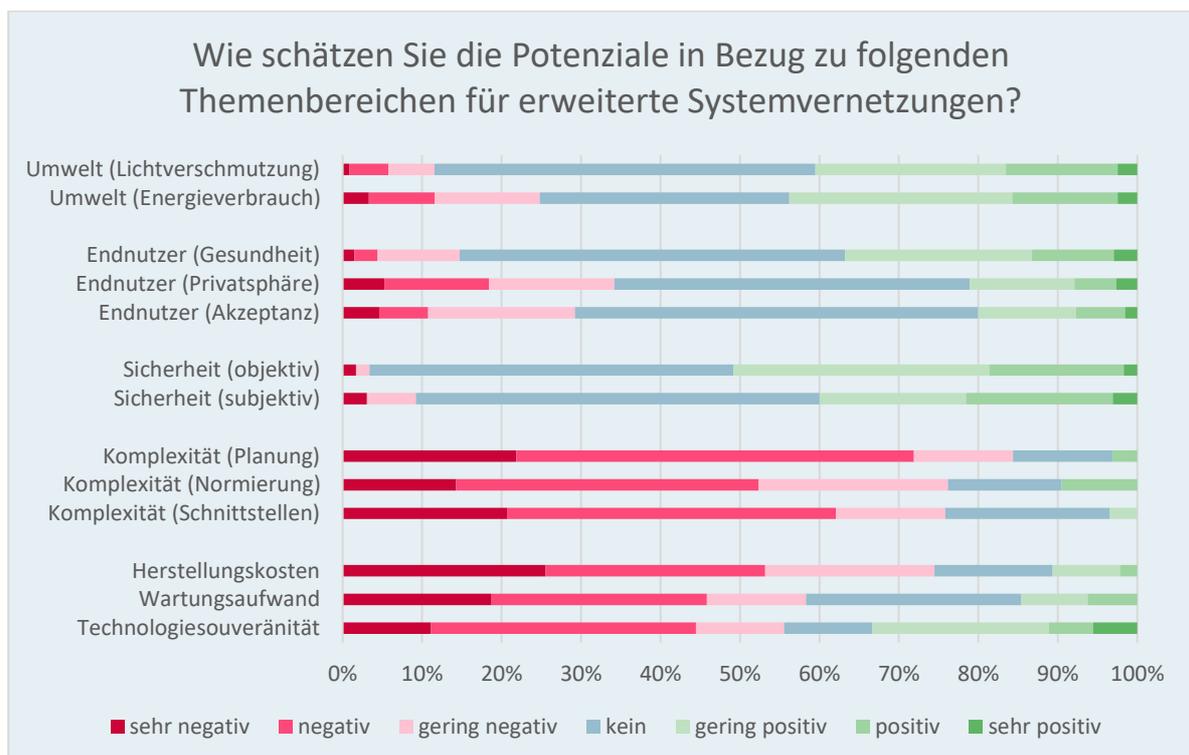
Konzepte zur Adressierung dieser Potenziale werden bereits seit mehreren Jahren in der Beleuchtungsindustrie diskutiert, die darauf bezogenen Umsetzungen reduzieren sich jedoch auf weltweit einige wenige Pilotumsetzungen. Die Gründe für eine fehlende Adaptierung der Potenziale erweisen sich diesbezüglich als vielfältig. Einerseits besteht eine fehlende Nachfrage zu Implementierungen, speziell auch aus Gründen der hohen zu erwartenden Kosten, die über die reine Umsetzung auch die notwendige softwareseitige Infrastruktur zur Datennutzung umfassen. Andererseits bestehen hinsichtlich der Trennung der verschiedenen Gewerke keine eindeutigen Verantwortlichkeiten, was eine Umsetzung speziell im Hinblick auf die erforderlichen Planungsprozesse erschwert. Zudem stehen für den Betrieb von Smart Cities keine ausreichenden Methoden zu Datenverwaltung bereit, deren Implementierung grundsätzlich auch außerhalb der Beleuchtungsindustrie erfolgen sollte. Schlussendlich erweist sich jedoch als vielleicht wichtigster Faktor die viel diskutierte und immer noch fehlende Incentivierung für die Beleuchtungsindustrie. Grundsätzliche Zielanforderungen von Beleuchtungssystemen in städtischen Bereichen können bereits mit minimal-intelligenten Systemen und niederschweligen Sensorlösungen außerordentlich gut adressiert werden. Eine erweiterte Systemvernetzung würde deshalb keine maßgeblichen Verbesserungen im Erreichen diesbezüglicher Anforderungen gewährleisten. Auf der anderen Seite würden aufgrund der erweiterten Interoperabilitätsforderungen Produkte und Systeme jedoch maßgeblich an Komplexität gewinnen, was am Ende erhöhte Kosten und damit einhergehende Umsetzungsschwierigkeiten mit sich bringen würde. Die Beleuchtungsindustrie verhält sich dementsprechend in Bezug zur technologischen Adressierung der Potenziale als nach wie vor sehr zurückhaltend. Obwohl grundsätzlich die Gefahr besteht, dass im Rahmen der aktuell zunehmenden Digitalisierung die diesbezüglichen Möglichkeiten von anderen, speziell softwaregetriebenen Unternehmen erkannt und genutzt werden, erscheint dies aufgrund der hohen Komplexität als unwahrscheinlich.

Die Einschätzung der Umfrageteilnehmer:innen erweist sich dementsprechend zurückhaltend ([Abbildung 28](#)). Sowohl in Bezug zu den umweltrelevanten und sicherheitsbezogenen Bewertungsfaktoren als auch im Hinblick auf für Endnutzer:innen relevante Zielgrößen werden keine erweiterten Potenziale erwartet, was mit der bereits angeführten Argumentation übereinstimmt, dass die sich vorrangig außerhalb der Beleuchtungsindustrie

manifestierenden Vorteile in der Bewertung der Potenziale keinen Einfluss nehmen. Dagegen werden sowohl in Bezug zu den Komplexitäten als auch hinsichtlich der resultierenden Kosten und Wartungsaufwände mit jeweils ca. 70% negativer Bewertungen maßgebliche Hinderungsfaktoren identifiziert. Die Gründe wurden bereits diskutiert.

Überraschend fällt jedoch die Bewertung zur Technologiesouveränität aus, welche mit über 50% negativer Bewertungen deutlich negativ ausgeprägt ist. Da es sich bei Technologien zur erweiterten Systemvernetzung und der damit einhergehenden Ausbildung von Smart Cities noch um ein für die Beleuchtungsindustrie relativ neues Applikationsfeld handelt, würden entsprechende Potenziale zur Erreichung einer Technologieführerschaft auf nationaler oder auch europäischer Ebene bestehen. Speziell im Kontext der erweiterten Datennutzung, inkl. der Spezifikation von regulatorischen Maßnahmen, ergeben sich diesbezüglich auch Möglichkeiten, die Innovationskraft des europäischen Marktes nachhaltig zu fördern und abzusichern. Die Bewertung der Interessensgruppen reflektiert diese Meinung jedoch nicht. Als Grund hierfür kann die grundsätzliche Trägheit des europäischen Beleuchtungsmarktes bei der Adaptierung neuer Technologien genannt werden, welche nicht zuletzt auch aus dem Umstand resultiert, dass im Rahmen der aktuellen Technologieführerschaft ein erweitertes Interesse an der Aufrechterhaltung bestehender Systeme besteht.

Abbildung 28 Potenziale und Limitationen vom Einsatz erweiterter Systemvernetzungen



Maschinelles Lernen

Wie bereits des Öfteren erwähnt, stehen Außenraumbelichtungen grundsätzlich in Zusammenhang mit einem diversen Anforderungsfeld, in welchem zum einen teilweise gegenläufige Optimierungen verschiedener Zielgrößen (z.B. Maximierung der visuellen Qualität oder objektiven Sicherheitsaspekte bei gleichzeitiger Minimierung des energetischen Bedarfs) oder auch die Beachtung vielfältiger umgebungsbezogener Einflussgrößen erforderlich sind. Vieler der erforderlichen Maßnahmen zur Steigerung von umweltbezogenen Potenzialen erweisen sich diesbezüglich aufgrund der resultierenden Komplexität mit grundlegenden Logiken nur erschwert bzw. nicht vollständig adressierbar. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit sensorisch erfasster Informationen in echtzeitreaktiven Systemsteuerungen, welche speziell im Kontext von Smart City Anwendung finden, und dem vermehrten Aufkommen von algorithmischen Ansätzen im Bereich des maschinellen Lernens, bestehen heute jedoch Möglichkeiten, die vorherrschenden Herausforderungen durch Nutzung moderner Technologien zu bewältigen.

Aktuelle Ansätze lassen sich diesbezüglich grundsätzlich in zwei unterschiedliche Kategorien einteilen. Die erste fokussiert vorrangig auf die Entwicklung fortschrittlicher und intelligenter Straßenbeleuchtungssysteme, deren Zielkriterien grundsätzlich mit denen sensorbasierter Steuerungen übereinstimmen, jedoch einen erweiterten Komplexitätsanspruch besitzen. Häufig werden hierbei zusätzlich zu normalen Sensoren auch kamerabasierte Erfassungen genutzt, um erweiterte Zielinformationen abzuleiten und somit eine verbesserte Entscheidungsgrundlage zur Optimierung der Beleuchtung zu besitzen. Dynamische Anpassungen werden somit beispielsweise nicht nur in Bezug zum Verkehrsaufkommen, sondern auch zum Verkehrsfluss und den vorherrschenden Wetterbedingungen ermöglicht (Beccali et al., 2019). Zudem können auch lichttechnische Größen eine zielführendere Berücksichtigung zur adäquaten Dimmung der Beleuchtung finden, indem beispielsweise anstatt herkömmlicher Leuchtdichtemessungen Bewertungsverfahren der Himmelsituation genutzt werden, um lokal zonierte Anpassungen der Beleuchtungsstärken zu implementieren (Galindo et al., 2022).

Obwohl maschinelle Lernansätze bereits in relativ einfachen Anwendungsbereichen durch die passgenauere Abbildung der Zielerfordernisse Vorteile bieten, eröffnen sie jedoch speziell im Kontext von Außenraumbelichtungen aufgrund des großräumlichen Zusammenhangs der Systeme neue und weitreichendere Möglichkeiten, speziell im Hinblick auf das intelligente Management von Systemen (Sifakis et al., 2021). So führen vor allem vorausschauende Systemsteuerung zur Eröffnung neuer umweltbezogener Potenziale.

Diesbezügliche Methoden umfassen vorrangig die Implementierung verkehrsorientierter Beleuchtungsmethoden im Zusammenspiel mit der Anwendung geeigneter prädiktiver Ansätze, um energetische Optimierungen von Straßenbeleuchtungsinfrastrukturen durchzuführen (Zhao et al., 2021; Marino et al., 2017). Im Speziellen kommen hierbei häufig Schwarmsteuerungen oder -optimierungsprozesse wie z.B. Artificial Bee Colony Algorithmen (Sánchez Sutil & Cano-Ortega, 2020) zum Einsatz. Die Adressierung dieser Potenziale erfordert jedoch grundsätzlich die Nutzung von IoT-Technologie, Sensoren, Geräten und drahtlosen Kommunikationsmöglichkeiten, um Straßenbeleuchtungssysteme überwachen und steuern zu können (Bhosale et al., 2017). Nicht nur dass solche Ansätze grundsätzlich umsetzbar sind, haben bereits einige Studien aufgezeigt (Pardo-Bosch et al., 2022; Beccali et al., 2015), sondern auch, dass sie zu dezidierten wirtschaftlichen Vorteilen beitragen können (Carli et al., 2017; Pardo-Bosch et al., 2022).

Während die ersten Ansätze vorrangig beleuchtungsinterne Herausforderungen adressieren, bieten maschinelle Lernansätze jedoch speziell im erweiterten Vernetzungsrahmen deutliche Mehrwerte. In Smart City Gedanken erweisen sich mehrere Systemkomponenten und Anwendungen als zusammenhängend und gegenseitig abhängig, um zur Schaffung neuartiger Lösungen beizutragen und somit Effizienzgrade mehrerer Problemstellungen zu optimieren. In diesem Sinne werden speziell Infrastrukturen anderer Anwendungsbereiche nutzbar gestaltet, um mittels der dort verfügbaren Informationen auch verbesserte Entscheidungen in anderen Systembereichen zu ermöglichen. Der grundsätzliche Mehrwert, den Beleuchtungen in diesem Bereich aufgrund ihrer breiten Verfügbarkeit einbringen können, wurde bereits angesprochen. Speziell maschinelle Lernansätze bieten hierbei jedoch einen Vorteil in der Analyse multidisziplinärer Informationen. So wurden beispielsweise bereits Ansätze zur Optimierung der Abfallwirtschaft im Kontext smarterer und nachhaltiger Städte implementiert (Esmailian et al., 2018) oder auch Deep Learning Techniken zur Überwachung, Vorhersage und Verwaltung der Wasserqualität untersucht (Wai et al., 2022). Die hierfür notwendigen Informationen können grundsätzlich durch Beleuchtungsinstallationen flächendeckend bereitgestellt werden. Zudem können durch die Kopplung verschiedener Systeme auch anfallende Energieverbräuche reduziert werden, indem sensorische Informationen ausgetauscht und nicht mehr für jeden Anwendungsbereich separat erhoben werden. Auch in diesem Kontext bestehen aktuell Forschungen, welche darauf abzielen im Sinne einer Green IoTs in Smart Cities den Energieverbrauch von Geräten durch hybride Deep-Learning-Ansätze zu reduzieren (Zhong et al., 2023).

Die Umsetzung dieser Modelle erfordert jedoch fortgeschrittenes technisches Know-how und erhebliche Ressourcen. Ihre Wirksamkeit hängt vom Zugang zu hochwertigen

Datensätzen ab, und die anfallenden Kosten können ihre Implementierung in ressourcenarmen Umgebungen einschränken. Zudem besteht speziell im Kontext von Smart Cities eine erweiterte Energiedependenz aufgrund informativer Übertragungen und Erfassungen und die Bemühungen um Reduzierung scheitern oftmals an der technischen Komplexität von Methoden wie Green Energy-Efficient Routing (GEER), Ant Colony Optimization (ACO) und AutoEncoder (AE). Schlussendlich erweisen sich auch viele der potenziellen Anwendungen als abhängig von bildgebenden Erfassungssystemen, was speziell im Hinblick auf die Privatsphäre von Endnutzer:innen einen maßgeblichen Hindernisfaktor darstellen kann.

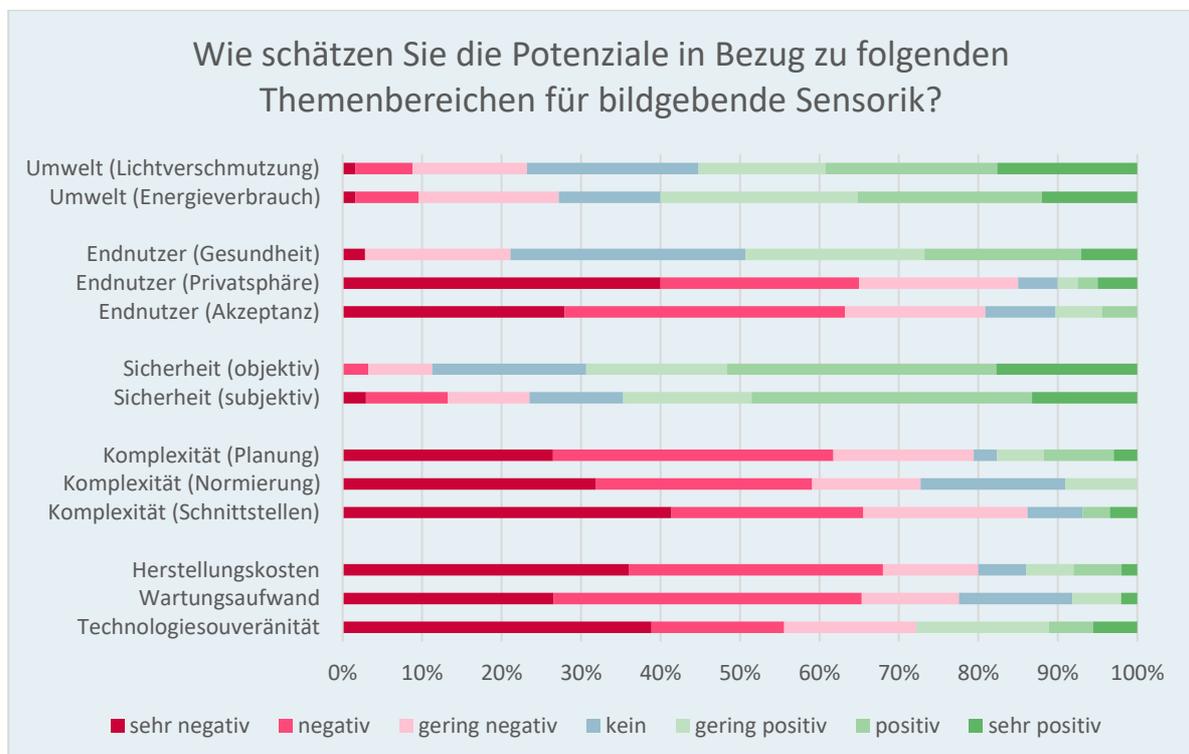
Potenziale und Limitationen: Bildgebende Sensorik

Wie erwähnt erfolgt die vorrangige Adressierung maschineller Lernansätze aktuell im Hinblick auf zwei unterschiedliche Applikationsbereiche in der beleuchtungsbezogenen Forschung. Der erste Ansatz fokussiert dabei vorrangig auf die Verbesserung der informativen Grundlage, auf Basis derer intelligente Beleuchtungsanwendungen heute in Außenraumanwendungen Entscheidungen treffen. Übergeordnetes Ziel ist es dabei, Informationen zu situativen Einschätzungen oder Umgebungsbedingungen zu erhalten, welche mittels herkömmlicher Sensoren nicht erhoben werden können. Zur Erreichung dieser Zielsetzung werden deshalb meist bildgebende Erfassungsmethoden angewandt, welche anschließend mittels maschineller Lernmethoden analysiert werden. Beispiele dazu aus der Forschung wurden bereits diskutiert. Aktuell bestehen darüber hinaus auch bereits erste sensorische Lösungen, welche auf marktreifer Ebene in Beleuchtungssteuerungen inkludiert werden können und die beispielsweise mittels Personenerkennung eine situative Gefahreinschätzung zur Anpassung der Beleuchtungsbedingungen ermöglichen, grundsätzlich also auf die Verbesserung sicherheitsbezogener Faktoren im Straßenverkehr abzielen.

Obwohl bestehende Lösungsansätze dabei vollkommen autark agieren, alle notwendigen Datenverarbeitungen im Rahmen von Edge Processing innerhalb der sensorischen Einheit vornehmen und nur Vorgabewerte zur Anpassung der Beleuchtungssituation bereitstellen, erweist sich deren Implementierung heute jedoch nach wie vor als so gut wie inexistent. Als Gründe hierfür kann einerseits die empfundene Planungskomplexität angegeben werden, welche vorrangig aus dem Umstand nicht-kontrollierbarer Echtzeitanpassungen resultiert und auch regulativ keine Entsprechung besitzt. Zudem bestehen maßgebliche Kostenhindernisse, die eine Adressierung der Potenziale nach wie vor verhindern. Schlussendlich, als wahrscheinlich maßgebendster Hinderungsfaktor, erweisen sich jedoch speziell bildgebende Sensoren für den Einsatz aus Gründen von Restriktionen der Privatsphäre in Projektierungen als nicht einsetzbar.

Die Resultate der Online-Umfrage bestätigen diese Annahmen grundsätzlich (Abbildung 29). Obwohl in Bezug zu den umweltrelevanten und sicherheitsbezogenen Bewertungsfaktoren mit jeweils 60 – 70% positiver Rückmeldungen deutliches Potenzial im Einsatz bildgebender Sensorik erkannt werden, überwiegen die Hindernisfaktoren in den restlichen abgefragten Bereichen mit ca. 80% negativer Rückmeldungen eindeutig. Sowohl die Akzeptanz als auch die Einschränkungen der Privatsphäre von Endnutzer:innen werden dabei eindeutig negativ gewertet, was den grundlegenden Vorbehalt zum Einsatz von Kamerasystemen in öffentlichen Außenbereichen reflektiert. Zudem werden sowohl in Bezug zu den resultierenden Komplexitäten in Planung, Normierung und Schnittstellenspezifikationen als auch bei den Kosten und Wartungsaufwänden deutliche Hindernisfaktoren identifiziert. Die Gründe hierfür wurden bereits angesprochen. Schlussendlich werden auch stark negative Einflüsse auf die Technologiesouveränität erwartet. Obwohl es sich bei der Anwendung bildgebender Verfahren um ein für die Beleuchtungsindustrie neues Applikationsfeld handelt und entsprechende Potenziale zur Erreichung einer Technologieführerschaft auf nationaler oder auch europäischer Ebene bestehen, erweisen sich die Vorbehalte einer Adressierbarkeit des Marktes in Bezug auf die europäischen Werte der Unantastbarkeit der Privatsphäre als überwiegend.

Abbildung 29 Potenziale und Limitationen vom Einsatz bildgebender Sensorik



Potenziale und Limitationen: Maschinelles Lernen

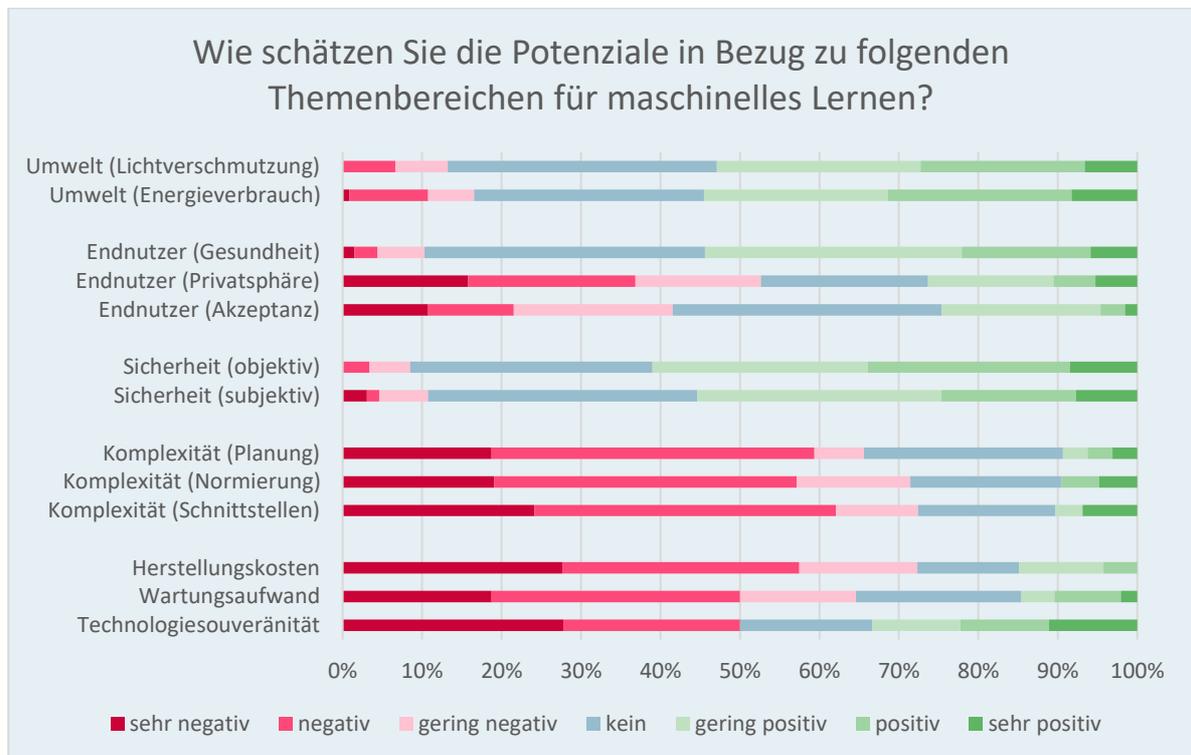
Gegenüber sensorischen Lösungen bieten maschinelle Lernansätze jedoch noch darüber hinausreichende Möglichkeiten zur Adressierung bestehender Herausforderungen. Speziell in Bezug zu prädiktiven Steuerungsansätzen, der Beachtung von Informationen zum aktuellen Verkehrsfluss oder auch der steuerungsbezogenen Verwertung von Wetterinformationen zur Abschätzung des Benetzungsgrads von Straßenoberflächen ergeben sich daraus Möglichkeiten zur Verbesserung, die nicht immediat die Anwendung bildgebender Verfahren benötigen. Aktuell bestehen hierzu jedoch nicht nur keine marktfähigen Konzepte, sondern die zielführende Nutzbarkeit der Modelle wurde vor allem unter Beachtung normativer Anforderungen noch grundsätzlich nicht ausreichend validiert. Die vorrangige Problematik besteht aktuell darin, dass maschinelle Lernmethoden maßgeblich auf statistischen Wahrscheinlichkeitsprozessen beruhen und sich zudem in ihrer Entscheidungsfindung nach wie vor als intransparent erweisen. Speziell in Bezug zu sicherheitsspezifischen Anforderungen, wie z.B. der Bereitstellung adäquater Beleuchtungsbedingungen zur optimalen Wahrnehmung im Verkehr, ergeben sich daraus nicht zuletzt auch juristische und regulatorische Fragestellungen, welche vor einer Nutzungsmöglichkeit adressiert werden müssen. Zudem werden zum zielführenden Training zugehöriger Modelle relativ viele Daten aus Realumgebungen benötigt, da im Speziellen Wetterbedingungen maßgeblich variieren können. In Bezug zur aktuellen Forschung sind derartige Datensätze aktuell nicht in ausreichendem Maße vorhanden, um eine nachhaltige Validierung der Modelle erreichen zu können.

Die Resultate der Online-Umfrage bestätigen diese Annahmen grundsätzlich ([Abbildung 30](#)) und reflektieren dabei gleichzeitig auch die in Bezug zur bildgebenden Sensorik vorherrschende Bedenken. Obwohl in Bezug zu den umweltrelevanten und sicherheitsbezogenen Bewertungsfaktoren mit jeweils 50 – 60% positiver Rückmeldungen deutliches Potenzial im Einsatz auf maschinellem Lernen basierenden Steuerungsverfahren erkannt werden, überwiegen die Hindernisfaktoren in den restlichen abgefragten Bereichen negativer Rückmeldungen eindeutig.

Gegenüber bildgebenden Verfahren werden die Limitationen dabei in Bezug zur Akzeptanz und Einschränkungen der Privatsphäre von Endnutzer:innen jedoch deutlich geringer bewertet. Der Grund dafür erscheint insofern offensichtlich, als dass bei Nutzung öffentlicher Außenbereiche das angewandte Steuerungsverfahren der Beleuchtung ohnehin nicht referenziert werden kann, d.h. dass Nutzer:innen sich des Einsatzes maschinellem Lernens in der Steuerung nicht bewusst sein werden. In Bezug zu den aus dem Einsatz der Technologie resultierenden Systemkomplexitäten ergeben sich jedoch deutlich negativer ausgeprägte Ergebnisse. So werden sowohl die Komplexitäten in Planung, Normierung und

Schnittstellenspezifikationen jeweils mit knapp 70% der Bewertungen negativ beurteilt. Grundsätzlich kann angenommen werden, dass ein maßgeblicher Teil dieser negativen Einschätzungen auf die fehlende Transparenz der Systeme in entscheidungsfindenden Prozessen zurückgeführt werden kann. In Planungen erweist sich beispielsweise grundsätzlich ein Nachweis zur Einhaltung der normativen Mindestanforderungen als notwendig, welcher in Bezug auf nicht definierbare Steuerungslogiken jedoch möglicherweise nicht gewährleistet werden kann. Auf ähnlicher Ebene gestaltet sich die Problematik der Aufnahme maschineller Entscheidungen auf normativer oder juristischer Ebene. So ist beispielsweise nicht geklärt, inwiefern bei Unfällen aufgrund unzureichender Beleuchtungsbedingungen der Hersteller oder Lichtplaner verantwortlich gemacht werden kann. Zudem bestehen aufgrund der aktuell fehlenden Marktadaptierung noch Schnittstellendefinitionen, insbesondere in Bezug zu den erforderlichen Inputdaten, was grundsätzlich zur Ausprägung von Insellösungen mit reduziertem Marktpotenzial aufgrund erhöhter Kosten und erhöhter Wartungsaufwände beiträgt. Schlussendlich werden auch stark negative Einflüsse auf die Technologiesouveränität erwartet. Die Gründe hierfür wurden bereits im Rahmen der bildgebenden Sensorik diskutiert und können ähnlich für den allgemeinen Bereich des maschinellen Lernens angenommen werden.

Abbildung 30 Potenziale und Limitationen vom Einsatz maschinellen Lernens



Resümee

Der Bereich von Außenraumbelichtungen wird von einer trägen Anpassungsdynamik und langen technologischen Adaptierungszeiten geprägt. Trotz ausreichender Grundlagenforschung zu technologischen Konzepten und Zielanforderungen erweisen sich die Ergebnisse dadurch stellenweise als schwer übertragbar. Speziell im Hinblick auf die Aufrechterhaltung der Technologiesouveränität bedarf es entsprechenden Handlungsmaßnahmen.

Das Feld der Außenraumbelichtungen wird seit jeher von verschiedenen Anforderungskriterien, Akteuren und Zielsetzungen geprägt. In den letzten Jahren hat jedoch die Erweiterung des Wissensstandes zu schädlichen Effekten nächtlicher Beleuchtung erheblich zum aktuell bestehenden Komplexitätsgrad beigetragen. Nach einer langjährigen Fokussierung der Beleuchtungstechnologie auf die Bereitstellung wahrnehmungsoptimierter Beleuchtungssituationen erweisen sich nun Forderungen zur Reduktion negativer Umwelteinflüsse, des Ressourcenverbrauchs und der Aufrechterhaltung der menschlichen Gesundheit von zunehmender Wichtigkeit.

Grundsätzlich erweisen sich viele der gestellten Forderungen durch den gezielten Einsatz aktueller technologischer Möglichkeiten als adressierbar. Zudem kann eine adäquate und ernsthafte Behandlung der bestehenden Problemstellungen nicht nur zu einer Aufrechterhaltung der europäischen Technologiesouveränität im Beleuchtungssektor, sondern auch zur nachhaltig innovativen Entwicklung der gesamten Beleuchtungsindustrie beitragen und gleichzeitig auch gesellschaftliche Mehrwerte auf übergeordneter Ebene schaffen.

Die unterliegenden Anwendungskriterien erweisen sich dabei insofern als schlüssig, als dass heute ausreichend Grundlagenforschung betrieben wurde, um eine Überführung möglicher Lösungsansätze und Zielforderungen in die applikationsbezogene Praxis zu gestatten. So belegen beispielsweise Untersuchungen zur Erhöhung der energetischen Effizienz eindeutig die Vorteile sensorbasierter Beleuchtungssteuerungen auf vielen verschiedenen Ebenen. Zudem konnten in den letzten Jahren maßgebliche Fortschritte in der Entschlüsselung nicht-visueller Wirkzusammenhänge und den darauf zurückzuführenden gesundheitlichen Einflüssen erzielt werden und auch die Auswirkungen bestehender Lichtverschmutzungen auf die Tier- und Pflanzenwelt gelten heute als gesichert.

Trotz der breiten Kenntnis der Herausforderungen und dem dezidierten Knowhow aller Interessensgruppen zu den wissenschaftlichen Ergebnissen, zeigen sich aktuelle Implementierungen von Außenraumbeleuchtungen jedoch nach wie vor durch einen äußerst geringen Grad an Technologisierung geprägt. Zum einen wird dieser Umstand durch die Marktnachfrage bestimmt, welche aufgrund hoher Wartungskosten meist vor dem Betrieb komplexerer Lösungsansätze trotz erhöhter Potenziale zurückschreckt. Zum anderen erweisen sich auch höhere Installationskosten und relativ geringe Amortisationspotenziale für die Fokussierung von Low-Tech Systemen als verantwortlich, indem sich im Speziellen erhöhte Produkt- und Planungskomplexitäten nicht rechtfertigen. Zudem werden übergeordnete Potenziale, welche über den eigentlichen Zielbereich der Beleuchtung hinausreichen, aktuell im Grunde nicht adressiert, da eindeutig Incentivierungen für die Beleuchtungsindustrie fehlen.

Für den aktuell noch fehlenden Anwendungsgrad verbesserter Technologien erweist sich jedoch nicht ausschließlich die derzeitige Marktlage als verantwortlich. Vor allem normative und regulatorische Maßnahmen beziehen sich weiterhin auf grundlegende wahrnehmungsbezogene Bewertungsfaktoren, unter denen sich umweltschädliche Effekte nächtlicher Beleuchtung als Zusatzziele formulieren, da eine dezidierte Übertragung von wissenschaftlichen Ergebnissen in formelle Anforderungskriterien aufgrund der inhaltlichen Komplexitäten schwer erbracht werden können. Trotz bestehender Grundlagenforschung erweisen sich vor allem umweltbezogene Zielsetzungen dementsprechend in Planungen nur als schwer adressierbar, Produktentwicklungen verlieren durch fehlende Bewertungsmöglichkeiten an Verkaufspotenzial und Systembetreiber und Auftraggeber vermissen notwendige Entscheidungsgrundlagen.

Grundsätzlich ist die Langwierigkeit normativer Anpassungen an wissenschaftliche Erkenntnisse für die Beleuchtungsindustrie kein unbekanntes Terrain. Nicht zuletzt erweist sie sich dadurch auch als von einer trägen Anpassungsdynamik und langen technologischen Adaptierungszeiten geprägt. Unter Beachtung der zunehmenden Brisanz zur Verbesserung umweltschonender Technologien und dem maßgeblichen Einfluss, den die nächtliche Beleuchtung dabei einnimmt, bedarf es jedoch eindeutiger Handlungsmaßnahmen, um die bestehenden und wissenschaftlich erarbeiteten Potenziale nachhaltig in Realumsetzungen zu überführen.

Handlungsempfehlungen

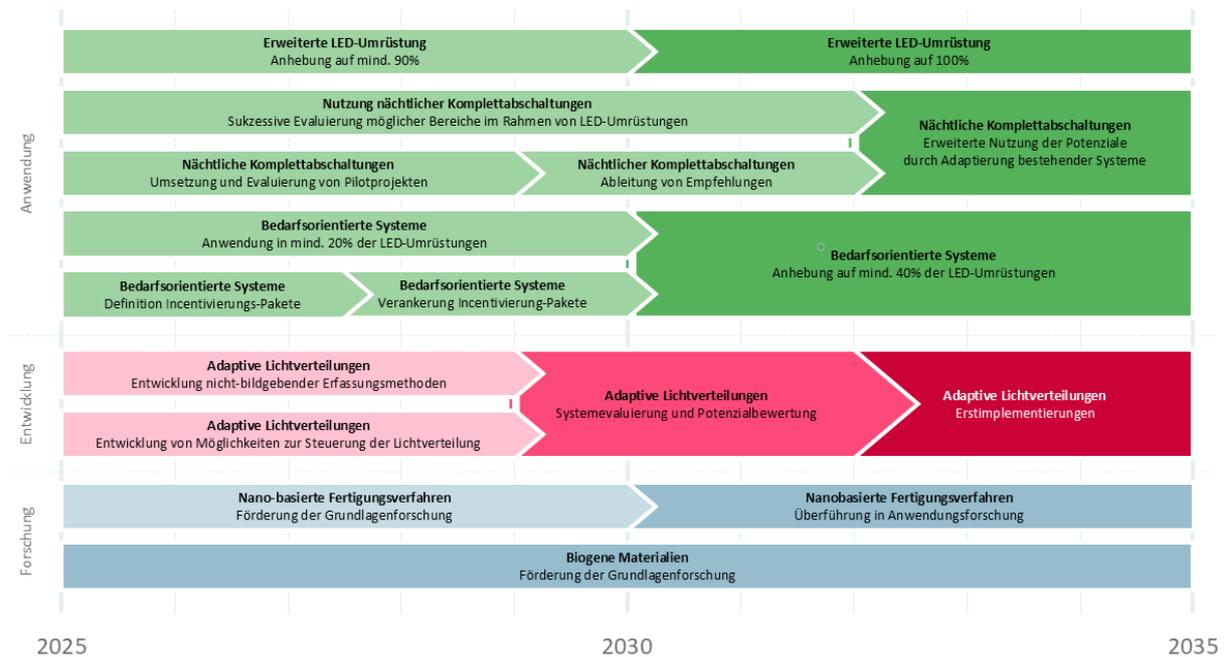
Der Einsatz intelligenter, steuerbarer und adaptiver Beleuchtungssysteme auf den Energieverbrauch von Städten und Gemeinden besitzt ein enorm hohes Potenzial zur Reduktion des Energieverbrauchs und damit verbundenen CO₂-Ausstoßes. Im Folgenden werden dezidierte Handlungsoptionen für die öffentliche Hand vorgestellt, welche eine Adressierung der Potenziale bis 2035 sicherstellen sollen.

Die nachfolgend dargestellten Handlungsempfehlungen umfassen Maßnahmen auf verschiedenen Ebenen für einen Zeithorizont bis 2035 zur Förderung der Reduktion von Umweltbelastungen durch nächtliche Beleuchtung des Außenraums. Die Empfehlungen werden dabei detailliert aufgeschlüsselt und in ihren Potenzialen bewertet. Insofern eine Bewertung nicht angegeben werden kann, werden die Gründe genannt. Zur einfacheren Übersichtlichkeit wurden die Handlungsempfehlungen in drei übergeordnete Gruppen eingeteilt, die sich an den vorgestellten thematischen Bereichen orientieren: Energieeffizienz und Ressourcenschonung, Umweltverträglichkeit und Biodiversität sowie Interoperabilität und Technologiesouveränität. Grundsätzlich ist eine vollständige Trennung der Themenbereiche jedoch nicht möglich und Übertragungseffekte der angeführten Maßnahmen auf andere Bereiche gelten als gesichert.

Energieeffizienz und Ressourcenschonung

Beleuchtungen verantworten sich in der EU für ca. 16% des Stromverbrauchs, wobei der Anteil für öffentliche Beleuchtungen, insbesondere Straßenbeleuchtung, mind. 2% beträgt (Oberösterreichische Umweltschutzbehörde, 2017; Gordic et al., 2021). Unter Bezug auf einen jährlichen Stromverbrauch von rund 61 TWh im Jahr 2023 (BMK, 2024) kann dementsprechend ein Stromverbrauch für Außenraumbelichtungen in Österreich von rund 1,22 TWh angenommen werden. Im Folgenden werden konkrete Maßnahmen zur Reduktion aktueller Treibhausgasemissionen (kg CO₂-Äquivalent) beschrieben. Obwohl sich hierfür auch Maßnahmen in Herstellung und Entsorgung von Beleuchtungsprodukten eignen, fokussieren die Handlungsempfehlungen aufgrund der dominanten Nutzungsphase, welche sich für mindestens 99% der bestehenden Treibhausgasemissionen (Elijošiuė et al., 2012) verantwortet, eindeutig auf Maßnahmen zur Verbesserung der energetischen Effizienz.

Abbildung 31 Technology Roadmap für den Bereich Energieeffizienz und Ressourcenschonung



Erweiterte LED-Umrüstung

Der geschätzte Anteil von LED-Beleuchtungen im öffentlichen Raum betrug im Jahr 2020 ca. 60% (Energy Innovation Austria, 2020). Diese Schätzungen decken sich auch weitestgehend mit den Umfrageergebnissen. Aktuell kann diesbezüglich von einem LED-Umrüstungsgrad von ca. 70% ausgegangen werden und hinsichtlich der Umsetzungsgeschwindigkeit in den vergangenen Jahren erscheint eine vollständige Umrüstung aller in Österreich bestehenden Außenraumbeleuchtungen bis 2035 als sehr wahrscheinlich. Da sich zudem der Einsatz von LED-Technologien als Grundlage für steuerbare Systeme erweist, sollte die erweiterte LED-Umrüstung vorrangig adressiert werden. Ziel sollte es sein bis 2030 einen Umrüstungsgrad von 90% zu erreichen, der bis 2035 auf 100% angehoben wird.

Eine Umrüstung von herkömmlichen Beleuchtungsmitteln auf LEDs führt dabei zu einer Reduktion des Energieverbrauchs um mind. 50% (Climate Group, 2024). Unter Beachtung der Beiträge bereits umgerüsteter Systeme kann dementsprechend ein adressierbarer jährlicher Stromverbrauch von ca. 0,56 TWh angenommen werden, welcher bei vollständiger Umrüstung bis 2035 um 50% reduziert werden kann (0,28 TWh oder ca. 50.000 Tonnen CO₂-Äquivalent). Für die Berechnung der Potenziale der folgenden Technologien wird angenommen, dass bereits umgerüstete Systeme nicht ausreichend adressiert werden können, da eine Adaptierung aus Gründen der kürzlichen Sanierung sehr unrealistisch erscheint.

Nächtliche Komplettabschaltungen

Grundsätzlich stellen nächtliche Komplettabschaltungen einen maßgeblichen Hebel bereit, um positive Umwelteffekte auszulösen. Sowohl energetische Verbräuche als auch die Reduktion nächtlicher Helligkeiten skalieren dabei direkt proportional zum anteiligen Zeitbereich der Deaktivierung. Abschaltungen stellen jedoch technologisch einen sehr niederschweligen Ansatz dar, welcher auch bereits in bestehenden Systemen ohne LED-Basis zielführend eingesetzt werden kann. Bezogen auf die Umfrageergebnisse kann angenommen werden, dass bereits in 50% der österreichischen Gebietskörperschaften eine adäquate Nutzung besteht. Zudem kann aufgrund des hohen Anteils von verkehrsrelevanten Straßenbeleuchtungen davon ausgegangen werden, dass Komplettabschaltungen nur ca. 10% der Außenraumbeleuchtungen betreffen.

Unter der Annahme, dass die Abschaltungen nach Umfrageergebnissen zwischen 01:00 und 06:00 Uhr erfolgen, kann von einer potenziellen Reduktion des Energieverbrauchs von ca. 50% ausgegangen werden. In Bezug zu noch zu adressierenden Systemen und unter Beachtung des bereits bestehenden adäquaten Anwendungsgrads, ergibt sich damit ein im Zuge der LED-Umrüstung adressierbares Potential von ca. 7 GWh jährlich (ca. 1.000 Tonnen CO₂-Äquivalent).

Es muss jedoch festgehalten werden, dass neben energetischen Effekten nächtliche Komplettabschaltungen maßgebliche Vorteile in Bezug zur Förderung der Umweltverträglichkeit bieten, welche aufgrund aktuell fehlender Bewertungsverfahren nicht quantifiziert werden können. Eine erweiterte Adressierung diesbezüglicher Potenziale kann jedoch nur unter vorhergehender Steigerung des öffentlichen Bewusstseins erfolgen, da vor allem maßgebliche Einschnitte in die öffentliche Akzeptanz von diesbezüglichen Maßnahmen erwartbar sind, sollten Komplettabschaltungen in einem erweiterten Zeitbereich erfolgen.

Um die Potenziale zum Umweltschutz adressieren zu können, wird deshalb eine öffentlichkeitswirksame Umsetzung von Pilotprojekten empfohlen, die möglichst unter einem partizipativen Ansatz erfolgen sollten. Ziel der Pilotprojekte sollte es vorrangig sein, den Grad der Akzeptanz der österreichischen Bevölkerung gegenüber dunklen urbanen Umgebungen zu quantifizieren und gegebenenfalls zu steigern, um anschließend dezidierte Empfehlungen zur Nutzung nächtlicher Abschaltungen aussprechen zu können. Um diesbezügliche Potenziale bis 2035 ausschöpfen zu können, sollte die Umsetzung und Evaluierung bereits frühzeitig abgeschlossen und in dezidierte Empfehlungen übersetzt worden sein.

Bedarfsorientierte Systeme

Intelligente, sensorbasierte und adaptive Beleuchtungssysteme finden aktuell bereits eine breite Marktverfügbarkeit und stehen zur Anwendung bereit. Die energetischen Vorteile stehen dabei lt. den Ergebnissen der wissenschaftlichen Recherche zwar in Abhängigkeit zur Frequentierung bzw. dem Verkehrsaufkommen, belaufen sich jedoch grundsätzlich auf eine Reduktion des Stromverbrauchs von 75 – 90% (d.h. eine Verbesserung von mind. 50% gegenüber ungesteuerten LED-basierten Beleuchtungssystemen).

Da energetische Einsparpotenziale bei niedrigen Frequentierungen höher ausfallen, sollten vorrangig diese Bereiche zur Ausstattung adressiert werden, insofern keine nächtlichen Komplettabschaltungen möglich sind. Es wird grundsätzlich dazu angeraten, im Rahmen der LED-Umrüstung der verbleibenden Systeme diesbezügliche Prüfungen durch Fachplaner durchführen zu lassen. Grundsätzlich wird angenommen, dass energetische Vorteile in allen Bereichen existieren, in denen keine Komplettabschaltungen durchgeführt werden können. In hochfrequentierten Bereichen erweisen sich die adressierbaren Einsparpotenziale jedoch möglicherweise als zu gering, um erhöhte Wartungsaufwände rechtfertigen zu können. Ziel sollte es sein, bis 2030 eine anteilige Umsetzung sensorbasierter und bedarfsorientierter Systemsteuerungen in mind. 20% der verbleibenden Systeme zu erreichen und diesen bis 2035 auf 40% auszuweiten.

Bei vollständiger Erreichung der angemerkten Ziele kann ein Potenzial von ca. 56 GWh (ca. 10.000 Tonnen CO₂-Äquivalent) an energetischer Reduktion angenommen werden (Reduktion des energetischen Verbrauchs auf bereits auf LED-basis betriebener Systeme um weitere 50%, d.h. eine gekoppelte Reduktion um 75% gegenüber herkömmlichen Systemen).

Darüber hinaus sollten dezidierte Maßnahmen zur Incentivierung ergriffen werden, um eine vollständige Adressierung der Potenziale zu gewährleisten. Im Rahmen des Projekts konnte als vorrangiger Hinderungsgrund für den Einsatz sensorbasierter Außenbeleuchtungssysteme eine bezogen auf den Wartungsaufwand und die Installationskosten relativ gering ausfallende Kostenersparnis auf kommunaler Ebene identifiziert werden. Da die Bedeutung energetischer Einsparmaßnahmen auf übergeordneter, staatlicher Ebene jedoch drastisch anders einzuschätzen ist, sollten dezidierte Förderungen der Gebietskörperschaften angedacht werden, um Entscheidungsgrundlagen zum Einsatz sensorbasierter Systeme anders zu gestalten. Um diesbezügliche Potenziale bis 2035 ausschöpfen zu können, sollten Maßnahmenpakete bereits frühzeitig umgesetzt und bereitgestellt worden sein.

Adaptive Lichtverteilungen

Die Anwendung adaptiver Lichtverteilungen führt nicht nur zu möglichen Verbesserungen der Verkehrssicherheit, sondern bietet auch Potenziale zur Reduktion des energetischen Verbrauchs in Betriebszeiten, in denen sowohl Abschaltungen als auch bedarfsorientierte Reduktionen nicht möglich sind. Aktuelle simulationsbasierte Studien verweisen diesbezüglich auf ein Einsparungspotenzial von ca. 20%. Es bestehen jedoch zum aktuellen Zeitpunkt noch keine Technologien auf dem Markt, um diese Potenziale zielführend adressieren zu können.

Diesbezügliche Technologieentwicklungen sollten dementsprechend vor allem von Unternehmen zukünftig im Rahmen applikationsbezogener Forschungs- und Entwicklungsprojekte gefördert werden, um in absehbarer Zeit bestehende energetische Potenziale abrufbar zu gestalten. Die notwendigen Entwicklungen umfassen dabei nicht nur Verfahren zur Anpassung der Lichtverteilung an sich, sondern auch zugehörige Steuerungskomponenten und notwendige Sensoren zur Erfassung der relevanten Daten. Es sollte dabei insbesondere auf alternative Methoden zur Abschätzung aktueller Fahrbahneigenschaften ohne Nutzung bildgebender Sensoren geachtet werden, da sich diese in allen relevanten Interessensgruppen als maßgebende Hinderungsfaktoren für den technologischen Einsatz erwiesen haben. Zudem sollten Entwicklungen darauf achten, dass sie zu bestehenden Systemen kompatibel ausgeführt werden, um Möglichkeiten zur technologischen Nachrüstung bereitzustellen. Zugehörige Entwicklungshorizonte sollten innerhalb der nächsten 5 bis 7 Jahre angesetzt werden, damit erste Möglichkeiten zur Implementierung bis 2035 adressiert werden können.

Nanobasierte Fertigungsverfahren

Sowohl die weitere Erhöhung der Effizienz optischer Beleuchtungssysteme als auch die Verbesserung der Lichtqualität, speziell in Bezug zur Lichtverteilung, wird aktuell maßgeblich durch bestehende Limitationen in herkömmlichen Fertigungsprozessen beschränkt. Die Nutzung nanobasierter Fertigungsverfahren könnte diesbezügliche Potenziale in Beleuchtungsanwendungen eröffnen, indem sie aktuell nicht erschließbare Skalierungsfaktoren zugänglich macht. Die hierfür notwendigen Verfahren stehen grundsätzlich bereits zur Verfügung, erweisen sich jedoch hinsichtlich der geometrischen Komplexität von Beleuchtungssystemen noch nicht als anwendbar.

Der zukünftig gewinnbringende Einsatz nanobasierter Fertigungsverfahren erfordert dementsprechend weiterführende Grundlagenforschung, um aktuelle Ansätze in Bezug zu

hochkomplexen Geometrien in die Anwendung überführen zu können. Unter anderem betrifft dies auch im Speziellen notwendige Beschichtungen nanofacettierter Oberflächenstrukturen, welche die geometrischen Eigenschaften durch die zusätzlich aufgetragenen Schichtstärken nicht negativ beeinflussen dürfen. Die grundsätzliche Überführbarkeit in erste prototypische Beleuchtungsanwendungen bis 2035 erscheint vom aktuellen Stand der Forschung als äußerst wahrscheinlich, auch wenn zum aktuellen Zeitpunkt noch keine gesicherten Aussagen zur Größenordnung möglicher Verbesserungseffekte getroffen werden kann. Um dieses Ziel innerhalb der nächsten 10 Jahre zu erreichen, sollte speziell bis 2030 eine verstärkte Förderung in Bezug zur Grundlagenforschung erfolgen, welche bis 2035 sukzessive in anwendungsorientierte Forschungsprojekte überführt werden sollte.

Biogene Materialien

Obwohl bei ganzheitlicher Betrachtung von Beleuchtungsprodukten die Herstellung und Entsorgung grundsätzlich von deutlich untergeordneter Bedeutung ist und dementsprechend eine deutlich vorrangige Adressierung der Potenziale während der Nutzungsphase angestrebt werden sollte, besteht dennoch die Problematik, dass sich speziell LEDs aufgrund ihrer weiten Verbreitung und überaus hohen Stückzahlen maßgeblich am abiotischen Ressourcenverbrauch beteiligen. Speziell bei Betrachtung des gesamten LED-Marktes würde diesbezüglich eine erweiterte Nutzung biobasierter Materialien deutliche umweltbezogene Vorteile mit sich bringen.

Bezugnehmend zum aktuellen Stand der Forschung erweisen sich jedoch derzeit keine Lösungsansätze als vorhanden, welche den industriellen Anforderungen auch nur ansatzweise gerecht werden können. Eine Adressierung der Potenziale durch die verbreiterte Nutzung biobasierter Materialien bis 2035 muss aus derzeitiger Sicht als äußerst unwahrscheinlich angenommen werden. Da dennoch Potenziale zur Verbesserung schädlicher Umweltfaktoren bestehen, sollte dennoch eine verstärkte Förderung dieses Bereichs in Bezug zur Grundlagenforschung in den nächsten 10 Jahren erfolgen. Das Ausmaß der hierfür notwendigen Investitionskosten kann jedoch aus beleuchtungsbezogener Sichtweise aufgrund fehlenden Fachwissens nicht abgeschätzt und sollte dementsprechend mit fach einschlägigen wissenschaftlichen Institutionen abgestimmt werden.

Übergeordnete Potenzialbewertung

Durch die angeführten Maßnahmen ergibt sich insgesamt ein Potenzial zur Adressierung einer Reduktion des energetischen Verbrauchs von ca. 0,35 TWh jährlich oder ca. 60.000

Tonnen CO₂-Äquivalent. Die Abschätzungen beziehen sich auf Außenraumbelichtungen, welche aktuell noch mit herkömmlichen Leuchtmitteln betrieben werden und setzen eine vollständige LED-Umrüstung aller Systeme voraus. Gegenüber dem aktuellen Verbrauch der gesamten österreichischen Außenraumbelichtung ergibt sich daraus eine Reduktion um ca. 30%.

Hochgerechnet bestehen noch ca. 400.000 Stück Außenleuchten in Österreich, die mit alten Leuchtmitteln betrieben werden. Die Kosten einer Led-Umrüstung erweist sich dabei maßgeblich von der Qualität der eingesetzten Leuchten als abhängig und liegen in einer relativ großen Spannweite zwischen 350 bis 800 € pro Leuchtenkopf. Schnittstellen für Sensorik können dabei in jeder Qualitätsstufe als vorhanden angenommen werden. Zudem müssen bei der Kostenberechnung Aufschläge für beispielsweise Lichtplanung, Endentsorgung oder auch Inbetriebnahme beachtet werden, welcher auf Basis von Erfahrungen mit 30 bis 50% angenommen wird. Mehrkosten für gesteuerte Systeme und Sensorik erweisen sich in diesen Kosten bereits als beinhaltet.

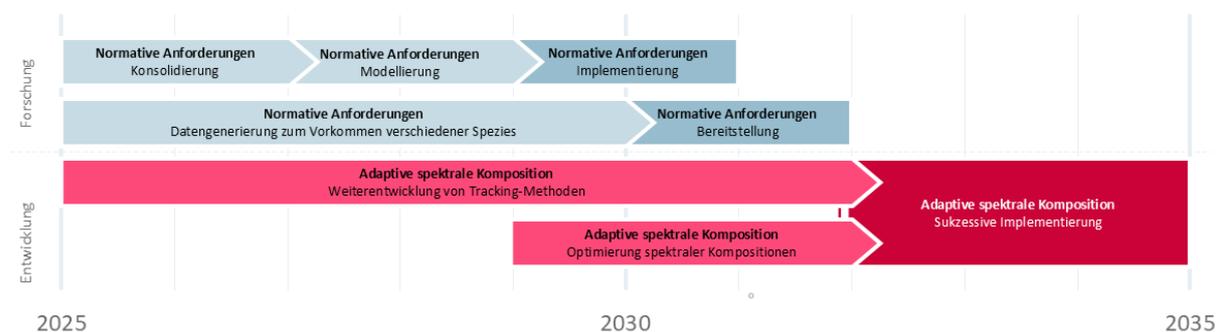
Unter Bezug der angeführten Annahmen ergibt sich somit für eine vollständige Adressierung der angeführten Maßnahmen ein innerhalb der nächsten 10 Jahre anfallender Investitionsrahmen von rund 300 – 500 Millionen €. Unter Annahme eines kWh-Preises von 0,15 € und der potenziellen Einsparung von 0,35 TWh jährlich ergeben sich daraus voraussichtliche Amortisationszeiten von 5 bis 10 Jahren, was sehr gut mit der aktuellen Markannahme übereinstimmt.

Umweltverträglichkeit und Biodiversität

Über die reine energetische Reduktion hinausreichend, besitzen nächtliche Beleuchtungen maßgebliche negative Effekte im Hinblick auf Biodiversitätsaspekte. Grundsätzlich können diese durch eine Reduktion der Beleuchtungsstärke und Anpassung spektraler Kompositionen adressiert werden. Wissenschaftlich gesehen stehen heute ausreichend Informationen zu Verfügung, um eine nachhaltige Transferierung in den Markt zu ermöglichen. Hierfür fehlt es aber vor allem an zugehörigen Bewertungsverfahren und darauf basierenden normativen Verankerungen.

Aktuell bestehende Systeme fokussieren im Hinblick auf die Problemstellung deshalb vorrangig auf die Optimierung von Beleuchtungseinstellungen für eine spezifisch zu schützende Spezies. Eine übergeordnete Adressierung der Problemstellung ist aktuell nicht möglich. Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Maßnahmen beziehen sich dementsprechend vorrangig auf die Erarbeitung der notwendigen Grundlagen, um eine Adaptierung des Marktes zu ermöglichen. In Anbetracht des ausgereiften wissenschaftlichen Stands sollte dies für einen Zeithorizont bis 2035 grundsätzlich umsetzbar sein. Eine Abschätzung des positiven Einflusses der bisherig vorgestellten Maßnahmen kann aufgrund der fehlenden Bewertungsverfahren nicht quantitativ erfolgen. Es kann im Allgemeinen angenommen werden, dass der Einsatz nächtlicher Komplettabschaltungen und bedarfsorientierter Systeme grundsätzlich einen positiven Beitrag erbringt und auch die Entwicklung adaptiver Lichtverteilungen zur nachhaltigen Förderung der erweiterten Umweltverträglichkeit von Beleuchtungssystemen beiträgt.

Abbildung 32 Technology Roadmap für den Bereich Umweltverträglichkeit und Biodiversität



Erarbeitung normativer Anforderungen

Sowohl Hersteller von Beleuchtungssystemen als auch Planungsdienstleister benötigen zur Quantifizierung der Problemstellung als auch der Einbringung von Maßnahmen zur Erhöhung der Umweltverträglichkeit grundsätzlich Vorschriften und zugehörige Bewertungsfunktionen, auf Basis derer Produkteignungen ermittelt werden können. Aktuell bestehen zwar ausreichende Informationen zu spektralen Empfindlichkeiten einzelner Spezies, diese wurden jedoch noch nicht zu einem einheitlichen Modell verallgemeinert. Grundsätzlich kann angenommen werden, dass heute ausreichend Informationen bestehen und auch ausreichende Fachkenntnis in internationalen Arbeitsgruppen der CIE zur spektralen Modellierung vorhanden ist, um solche Modelle in Bewertungsfunktionen zu übersetzen.

Zudem erweisen sich relevante Informationen zum Vorkommen verschiedener Spezies, speziell in Bezug zu urbanen Gebieten als äußerst schwer zugänglich. Ob solche Informationen für Österreich grundsätzlich bestehen, konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht ermittelt werden. Laut Umfrage bestehen in der Informationsbeschaffung jedoch maßgebliche Hinderungsfaktoren für alle Interessensgruppen. Neben der Ableitung gezielter Bewertungsfunktionen, sowie der möglichen Verankerung von Vorschriften zum Umweltschutz, sollte dementsprechend eine frei verfügbare Datengrundlage zu Vorkommen und Verteilungen unterschiedlicher Tier- und Pflanzenarten in Österreich erstellt werden, um eine nachhaltige Bewältigung aktueller Problemstellungen zu fördern.

Um Umsetzungen von Produkten sowie den notwendigen Wissensaufbau zur Anwendung der erarbeiteten Grundlagen bis 2035 zu ermöglichen, sollten diesbezügliche Maßnahmen bereits möglichst frühzeitig ergriffen werden und bis spätestens 2032 abgeschlossen sein.

Adaptive spektrale Komposition

Grundsätzlich stehen heute bereits vielfältige Möglichkeiten zur Umsetzung verschiedenster spektraler Kompositionen zur Verfügung. Diesbezügliche Anwendungsbeispiele können sowohl in Bezug zur Vermeidung zirkadianer Störfaktoren als auch bei Beleuchtungen in der Lebensmittelindustrie angeführt werden. Technologisch gesehen, sollte dementsprechend eine Abstimmung zukünftig in Außenraumbelichtungen anzuwendender spektraler Kompositionen möglich sein. Zum einen Bedarf es dafür jedoch ausgereifter Bewertungsmechanismen, welche bereits angeführt wurden. Zum anderen sollten in zugehörigen Entwicklungsprozessen zukünftig sensorbasierten Abstimmungsmöglichkeiten Beachtung geschenkt werden. Grundsätzlich eignen sich bedarfsorientierte Beleuchtungsansätze auch, um spektrale Änderungen hervorzurufen. Eine Beschränkung auf die Anpassung von Helligkeiten erscheint diesbezüglich zukünftig nicht mehr zweckmäßig. Zudem kann in diesem Kontext Tracking-Methoden bei der Beleuchtungssteuerung eine erhöhte Relevanz beigemessen werden, da sie einen zielführenden Ansatz zur Abstimmung der Bedürfnisse verschiedener Spezies darstellt.

Übergeordnete Potenzialbewertung

Eine Adressierung der beschriebenen Maßnahmen sollte zu einer nachhaltigen Reduktion zusätzlicher Umweltbelastungen führen und deutliche Verbesserungen gegenüber aktuellen Systemlösungen darstellen. Die Bewältigung der Herausforderungen betrifft hierbei jedoch vorrangig fachspezifische Gremien und Interessensvertretungen und sollte im Hinblick

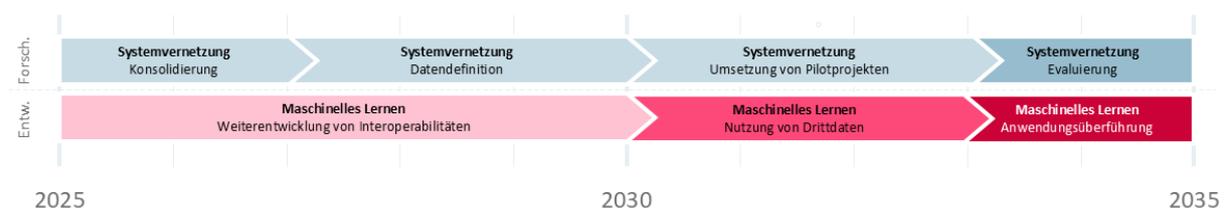
auf ihre Grundlagennähe deshalb auch im internationalen Rahmen erfolgen. Eine dezidierte Förderung der Problembewältigung auf nationaler Ebene würde jedoch eine erweiterte Positionierung des Staates Österreich in Bezug zu Umwelt- und Artenschutz fördern und verspricht demzufolge nicht quantifizierbare Potenziale auf vor allem politischer Ebene.

Interoperabilität und Technologiesouveränität

Vor allem vor dem Hintergrund der zunehmenden Digitalisierung erweisen sich aufkommende Systemvernetzungen und die Anwendung maschineller Lernalgorithmen in vielen Bereichen als vielversprechende Ansätze für umweltfördernde Maßnahmen. Wie bereits angemerkt wird weithin angenommen, dass speziell Außenraumbeleuchtungen in der Umsetzung von Smart Cities und der Nutzung der damit einhergehenden Potenziale eine übergeordnete Rolle zugesprochen werden kann.

Aufgrund der Komplexität der zugehörigen Skalierung und der bestehenden Trennung der verschiedenen beteiligten Gewerke erweisen sich aktuell jedoch Umsetzungen in diesen Bereichen als fast nicht vorhanden und trotz grundsätzlichem Interesse der Beleuchtungsindustrie bestehen fast keine Anreize zur Adressierung der Potenziale, da sich diese meist außerhalb der Zielanwendungen auf vorrangig kommunaler Ebene verorten. Auch in Bezug zur wissenschaftlichen Recherche konnten im Hinblick auf umweltbezogene Vorteile keine Effekte auf die energetische Effizienz von Beleuchtungssystemen identifiziert werden, die über die einer sensorbasierten Steuerungslogik hinausreichen würden. Eine mögliche Adressierung der Potenziale erweiterter Vernetzungen erweist sich dementsprechend bis 2035 als äußerst unwahrscheinlich.

Abbildung 33 Technology Roadmap für den Bereich Interoperabilität und Technologiesouveränität



Erweiterte Systemvernetzung

Trotz dieser Einschätzung muss festgehalten werden, dass die erweiterte Umsetzung vernetzter Systeme aus gesellschaftlicher Sicht durchaus adressiert werden sollte. Hierfür benötigt es jedoch mitunter Definitionen hinsichtlich des Datenaustausches zwischen den Systemen, um nicht übertragbare Insellösungen langfristig zu vermeiden und eine möglichst breite Anwendung von Entwicklungen zu gewährleisten. Grundsätzlich erweisen sich diesbezügliche Definitionen jedoch als außerhalb der Beleuchtungsindustrie verankert und sollten dementsprechend zumindest auf nationaler Ebene konsolidiert und bereitgestellt werden. Durch die Bereitstellung erweiterter Applikationsdaten könnte mitunter auch die Entwicklung verbesserter Lösungsansätze angestoßen werden, die heute aufgrund fehlender Informationen nicht möglich sind. Hierfür bedarf es jedoch umfangreichen Pilotimplementierungen, mittels welcher auch die Beteiligung von Unternehmen incentiviert werden könnte.

Langfristig erweisen sich diesbezügliche Umsetzungen nicht nur aus Sicht der Adressierung von Potenzialen als sinnvoll, sondern würden auch einen maßgeblichen Beitrag zur Aufrechterhaltung der Technologiesouveränität leisten, indem Systemdefinitionen und Schnittstellformate eine Austauschbarkeit von Systemkomponenten gewährleisten würden.

Maschinelles Lernen

Zusätzlich zur Anwendung maschineller Lernalgorithmen auf städtischer Ebene erweisen sich heute vorrangig sensor- und steuerungsbezogene Anwendungsfelder für die Beleuchtungsindustrie als relevant. Bei aktuellen Lösungsansätzen werden dabei vorrangig Aspekte der erhöhten Verkehrssicherheit durch eine erweiterte und verbesserte Informationslage adressiert. Grundsätzlich konnten diesbezüglich bereits erste erfolgreiche Produkte am Markt platziert werden, welche jedoch aufgrund maßgeblicher Eingriffe in die Privatsphäre eine überaus geringe bzw. keine Anwendung finden.

Um die zugehörigen Potenziale dennoch abrufbar zu gestalten, sollten zukünftige Entwicklungen vermehrt auf Interoperabilitätsaspekte und die Nutzung von bestehenden Daten aus anderen Systembereichen setzen. Durch beispielsweise die Nutzung von Informationen aus bestehenden Verkehrsüberwachungssystemen könnten bildgebende Erfassungen großflächig substituiert werden, was neben einer verringerten Systemkomplexität auch positive Effekte im Hinblick auf umweltbelastende Faktoren mit sich bringen würde, indem die doppelte Erfassung sensibler Informationen aufgelöst werden würde.

Grundsätzlich kann angenommen werden, dass diesbezügliche Systeme aufgrund der dadurch verfügbar werdenden Informationen ein sehr großes Zukunftspotential bieten, das speziell mittelfristig vermehrt adressiert werden sollte. Zum aktuellen Zeitpunkt erweisen sich jedoch auch im wissenschaftlichen Bereich die Erkenntnisse noch eindeutig als zu gering, um eine diesbezügliche Potenzialabschätzung durchführen zu können.

Übergeordnete Potenzialbewertung

Speziell vor dem Hintergrund der Aufrechterhaltung der Technologiesouveränität in Zeiten der zunehmenden Digitalisierung, werden Spezifikationen zu Datenaustauschformaten und Interoperabilitätsanforderungen zunehmend wichtiger, da bei stärkerer Vernetzung verschiedener Systeme auch eine verbesserte Austauschbarkeit der Subsysteme adressiert werden muss, um den langfristig sicheren Betrieb zu gewährleisten. Zudem eröffnen sich dabei aufgrund der erfassten Datenmenge auch zunehmende Möglichkeiten von Systemverbesserungen mittels maschineller Lernansätze.

Die Komplexität einer adäquaten Adressierung der Potenziale liegt dabei vorrangig in der Synchronisation der einzelnen Systemteilnehmer, die auf individueller Ebene die übergeordneten Ziele einer vereinigten Definition zur Erhebung, dem Austausch und der Verwertung von Daten nicht erreichen können. Es bedarf diesbezüglich einer vermehrten Steuerung auf vorrangig internationaler Ebene, um langfristig die darauf bezogenen Potenziale sowohl identifizieren als auch quantifizieren zu können.

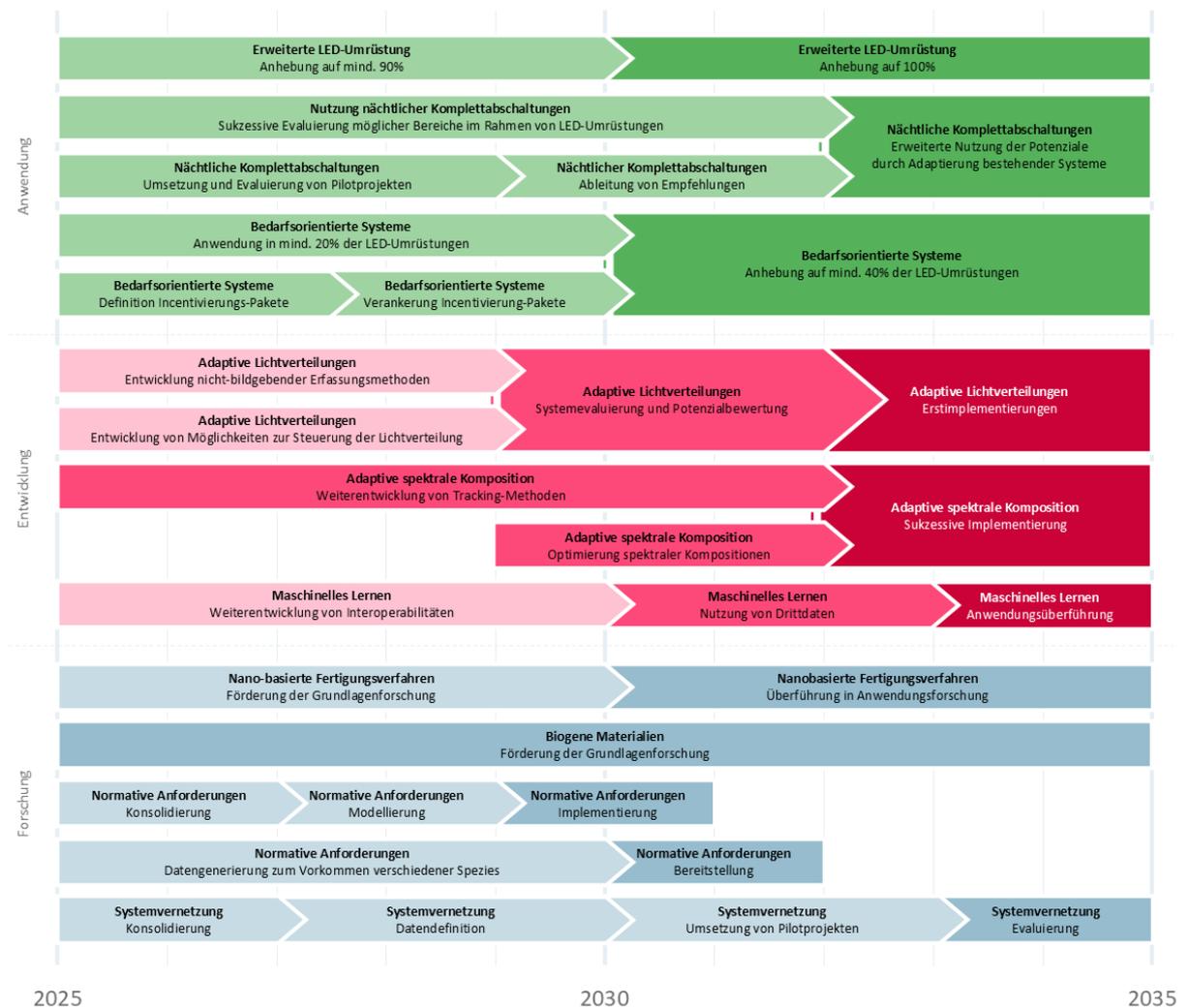
Weiterführende Empfehlungen

Die angeführten Handlungsempfehlungen adressieren verschiedene Aspekte von Technologien zur Außenraumbelichtung, die von verschiedenen Interessensgruppen adressiert werden sollten. In Bezug zu energetischen Effekten konnten dazu eindeutig quantifizierte Größenordnungen der Potenziale angeführt werden, was bei den anderen angeschnittenen Themenbereichen aufgrund fehlender Informationen oder Verfahren zur Quantifizierung nicht möglich war.

Abschließend muss jedoch festgehalten werden, dass der vorliegende Bericht aufgrund der Fokussierung auf öffentliche Beleuchtungssysteme keine vollständige Abbildung aller beleuchtungsbezogenen Einflussfaktoren darstellt. Sowohl im Hinblick auf private Außenraumbelichtungen als auch in Bezug zu werbebezogenen Beleuchtungen wie

beispielsweise Schautafeln oder auch Schaufenstern können maßgebliche umweltbelastende Effekte auftreten, welche in der vorliegenden Arbeit nicht quantifiziert wurden. Um eine möglichst umfangreiche Erfassung der aktuellen Belastungsfaktoren zu erreichen, wird demzufolge zukünftig auch eine Ausweitung der Betrachtungen auf andere Beleuchtungssektoren angeraten.

Abbildung 34 Übergeordnete Darstellung der abgeleiteten Technology Roadmap unter Einschluss der Bereiche Energieeffizienz und Ressourcenschonung, Umweltverträglichkeit und Biodiversität und Interoperabilität und Technologiesouveränität



Synergetische Effekte zu anderen Applikationsfeldern

Die zu adressierenden Problemstellungen von Außenraumbeleuchtungen erweist sich grundsätzlich nicht verschieden, von denen anderer beleuchtungsrelevanter Applikationsfelder. Speziell vor dem Hintergrund der Verbesserung der energetischen Effizienz der Systeme ergeben sich dadurch vorrangige synergetische Effekte zu Innenraumanwendungen.

Die von Außenraumbeleuchtungen adressierten Problemstellungen in Bezug zu den thematischen Bereichen erweisen sich im Allgemeinen als sehr ähnlich zu Anforderungscharakteristiken in anderen beleuchtungsspezifischen Bereichen. So wird heute beispielsweise bei Innenraumbeleuchtungen die Ausbildung adäquater Lösungsansätze zur Adressierung der Themen Licht und Gesundheit und Energieeffizienz zunehmend wichtiger. Dennoch zeigen sich Innenraumanwendungen heute technologisch gesehen aufgrund der verringerten Dimension und Komplexität gegenüber Außenraumanwendungen speziell in Bezug zu Steuerungsansätzen deutlich fortschrittlicher. Der Einsatz von Sensorik, speziell zur Anwesenheitserkennung und Abschätzung der Tageslichtmenge, erweisen sich dabei bereits als angenommener Standard und dementsprechend werden Ansätze zur Reduktion des energetischen Verbrauchs bereits deutlich stärker verfolgt.

Grundsätzlich erweisen sich technologische Förderungen der Außenraumbeleuchtung dennoch für andere Applikationen der Beleuchtung als relevant, da sich die Technologien an sich nicht sehr stark unterscheiden und dementsprechend auch in anderen Bereichen eine direkte Anwendung oder indirekte Verwertung erfahren können. So erweisen sich erweiterte Vernetzungsgedanken hin zu Smart Cities auch im Hinblick auf die Vernetzung von verschiedenen Gewerken innerhalb von Gebäuden von Interesse, nanotechnologische Optiken könnten auch in Innenräumen zu Steigerung der Energieeffizienz und Lichtqualität beitragen und die Problemstellung adaptiver Spektren und Lichtverteilungen besteht auch in gleichem Maße für andere Bereiche.

Darüber hinaus erweist sich jedoch speziell der Bereich des maschinellen Lernens innerhalb von Gebäude von vorrangigem Interesse. Hierfür können zwei Gründe angegeben werden:

erstens erweisen sich Innenraumanwendungen in Bezug zu Systemsteuerungen grundsätzlich als einfacher zu adressieren als Außenraumbereiche, da zum einen Systemverantwortlichkeiten einfacher definiert und andererseits Informationen zu Umgebungsbedingungen einfacher abgerufen werden können. Zudem erweist sich die nach wie vor bestehende Trennung der Gewerke in Innenraumbereichen durch offene Systeme und allgemeine Gebäudesteuerungen grundsätzlich nicht mehr von übergeordneter Bedeutung und als lösbare Problemstellung, was Datenverfügbarkeiten auch aufgrund der geringeren räumlichen Dimension gegenüber Außenraumbereichen deutlich erhöht.

Zweitens, und vielleicht sogar wichtiger, ergeben sich bei Gebäudesteuerungen bereits unter Beachtung weniger Einflussfaktoren hochkomplexe Anforderungsdefinitionen, welche mittels normaler Logiken nicht mehr zielführend adressiert werden können. Beispiel hierfür sind zum eine Pareto-Optimierungsprozesse von gegenläufigen Zielkriterien oder auch prädiktive Steuerungsansätze zur Optimierung solarer Einträge. Zudem erweisen sich auch personenbezogene Faktoren wie das individuelle Verhalten als maßgebliche Einflussgrößen auf die energetische Performanz. Bildgebende Verfahren stehen in diesen Anwendungsfällen grundsätzlich vor den gleichen auf die Privatsphäre bezogenen Problematiken, erweisen sich jedoch aufgrund der stärkeren Nutzernähe grundsätzlich bereits durch nicht-bildgebende Sensorik wie thermale Arrays oder stereoskopische Infrarot Tiefenerkennungen als substituierbar, was speziell im Hinblick auf die Anwendung maschineller Lernalgorithmen neue Anwendungspotenziale eröffnet.

Darüber hinaus ergibt sich in Bezug zur Simulation der energetischen Effizienz von Innenraumanwendungen das Problem, dass oft die in der Planungs- und Simulationsphase angestrebten Energieziele nicht erreicht werden. Der Grund dafür liegt in fehlerhaften Annahmen zum Nutzerverhalten, welches heute nicht gewinnbringend in Simulationsprozesse eingebunden werden kann. Aktuell bestehen diesbezügliche Annahmen auf stündlicher Ebene in Wahrscheinlichkeiten zur Verfügung. Individuelles Verhalten kann dementsprechend nicht zielführend zwischen verschiedenen Applikationen eingebracht werden, was maßgebliche Abweichungen der Simulationsergebnisse zu realen Verbräuchen zur Folge hat. Speziell erweiterte Systemvernetzungen und die damit erreichbaren Datengrundlagen stellen aktuell ein vorrangiges Potenzial zur Verbesserung zugehöriger Prozesse und Dienstleistungen dar. Auch hier bestehen jedoch noch grundlegende Fragen zum Systembetrieb und der Datennutzung und Datenverfügbarkeit, was Entwicklungszyklen verzögert und die Adressierung von Potenzialen erschwert. In diesem Sinne könnten sich Bestrebungen zur breiteren Datenverfügbarkeit auch auf anderen Anwendungsfälle erstrecken und dementsprechend erweiterte Möglichkeiten eröffnen.

Schlussendlich bestehen vor allem im Hinblick auf bestehende und zukünftige Fertigungsprozesse und Materialanwendungen potenzielle Synergien zu anderen Disziplinen. Auf der einen Seite erweisen sich nanotechnologische Prozesse für eine Vielzahl möglicher Anwendungsbereiche als relevant. Die dezidierte Förderung von Herstellverfahren zur Umsetzung hochkomplexer geometrischer Formen könnte dementsprechend auch in anderen Applikationsbereichen neue Möglichkeiten eröffnen. Zudem erweisen sich heute europäische Unternehmen mit Bezug zu klassischen Herstellverfahren wie Spritzgusstechnologien als internationale Technologieführer, welche sich für eine Vielzahl hochqualitativer Produktumsetzungen als verantwortlich erweisen. Eine Förderung zukünftiger Herstellverfahren sollte dementsprechend zur Aufrechterhaltung der Technologiesouveränität und Innovationskraft des Standorts Österreich und der europäischen Union beitragen.

Darüber hinaus können in Bezug zur Nutzung biogener Materialien synergetische Effekte zu anderen Applikationen bestehen, die ähnlich wie die Beleuchtungsindustrie vorrangig erdölbasierte Grundmaterialien zur Herstellung von Teilkomponenten nutzen. Obwohl dieser Punkt in Bezug zu Beleuchtungen aufgrund des sehr geringen Effekts bei Betrachtungen des gesamten Lebenszyklus nur von eindeutig untergeordneter Rolle ist und aktuelle Bestrebungen zu Verbesserungen beizutragen auch eindeutig noch der grundlagennahen Forschungen zugeschrieben werden müssen, könnten dennoch andere industrielle Bereiche bestehen, welche geringere Materialanforderungen stellen und bei welchen dementsprechend eine kurzfristigere Verwertbarkeit der Ergebnisse zu erwarten wäre.

Abschließen muss grundsätzlich festgehalten werden, dass die Beleuchtungsindustrie aus einer Vielzahl miteinander verschränkter technologischer Beiträge besteht. Obwohl direkte synergetische Effekte durchaus erwartbar sind, sowohl in Bezug zu anderen beleuchtungsspezifischen Bereichen als auch Industrien, die aus den beschriebenen Herausforderungen resultieren, erweisen sich grundsätzlich auch gegenläufige Betrachtungen als erforderlich um eine umfassende Darstellung potenzieller Übertragungseffekte zu erreichen. Eine dementsprechende Erarbeitung war jedoch nicht Inhalt des Projekts.

Abschlussbemerkungen

Die Adressierung bestehender Herausforderungen benötigt eine interdisziplinäre Handlungsweise, welche technologische Innovationen mit planerischem Verständnis und ökologischen Überlegungen verbindet.

Der vorliegende Bericht zielte darauf ab, die technologischen Potenziale moderner Außenraumbelichtungen umfassend zu untersuchen. Obwohl bei der Erarbeitung der Inhalte vermehrt auf die Inklusion aller relevanten Themenbereiche und auf Außenräume bezogene Einflussfaktoren geachtet wurde, lag der Fokus der Arbeit auf der Analyse von Zukunftspotenzialen zur Förderung des Umweltschutzes und der Reduktion darauf bezogener Belastungsfaktoren. Insbesondere wurde dabei der LED-Technologie und deren Anwendungsmöglichkeiten für intelligente und adaptive Beleuchtungslösungen Aufmerksamkeit geschenkt. Es konnte gezeigt werden, dass moderne Systeme deutlich in der Lage sind, Energieeffizienz zu steigern, Lichtverschmutzung zu reduzieren und durch gezielte Anpassungen an Umwelt- und Verkehrsbedingungen zusätzliche Vorteile zu bieten.

Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich technologische Potenziale erfasst und bewertet wurden. Darüber hinaus bestehen weitere relevante Faktoren, die insbesondere durch professionelle Lichtplanungen adressiert werden können. Der Fokus auf technologische Aspekte sollte dementsprechend nicht als Missachtung des wertvollen Beitrags professioneller Planungsdienstleister zur Reduktion umweltbezogener Belastungsfaktoren verstanden werden. Die Disziplin der Beleuchtung erforderte seit jeher eine interdisziplinäre Herangehensweise, die technologische Innovationen mit planerischem Verständnis und ökologischen Überlegungen verbindet. Nachhaltige Verbesserungen können dabei nur unter Aufrechterhaltung diverser Ansätze und dem verschiedenen Sachverständnis aller Beteiligten erarbeitet werden.

Wir haben versucht diesem Umstand durch die Befragung aller Interessensgruppen Rechnung zu tragen. In diesem Sinne wollen wir all jenen danken, welche sich die Zeit genommen haben sich daran zu beteiligen und uns in zahlreichen Gesprächen ihre professionellen Meinungen, Strategien und Philosophien mitteilten. Wir hoffen sie im vorliegenden Bericht ausreichend berücksichtigt zu haben, um ein solides Fundament für zukünftige Überlegungen zu bieten.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Darstellung des in NOBEL angesetzten übergeordneten Projektablaufs in einem PERT-Chart mit Arbeitspaketen und Sub-Tasks.	9
Abbildung 2 Darstellung der Umfrageteilnahme nach Interessensgruppe inkl. verwertbarer und nicht verwertbarer Teilnahmen normalisiert auf die Gesamtmenge an Umfrageaufrufen und absteigend gereiht nach prozentualer Verwertbarkeit; Seitenaufrufe, welche nicht einer dezidierten Interessensgruppe zugeordnet werden konnten, wurden in die dargestellten Werte nicht miteinbezogen.	13
Abbildung 3 Einschätzung des Einflusses von bestehenden Masterplänen auf beleuchtungsrelevante Zielkriterien sortiert nach dem mittleren Einflussgrad.....	15
Abbildung 4 Bewertung planungsphilosophischer Einflussfaktoren der befragten beleuchtungsbezogenen Fachplaner sortiert nach dem Grad des Zutreffens	18
Abbildung 5 Bewertung des Bezugs der produzierenden Industrie zu inhaltlichen Tätigkeitsbereichen sortiert nach dem Beschäftigungsgrad.....	19
Abbildung 6 Bewertung des Standes aktueller Normen zu verschiedenen beleuchtungsrelevanten Zielkriterien sortiert nach dem Grad der Angemessenheit	21
Abbildung 7 Beurteilung der gesellschaftlichen Relevanz der Themenbereiche	23
Abbildung 8 Einschätzung der österreichischen Klimaschutzpolitik.....	24
Abbildung 9 Verantwortungsgrade zur Erreichung von Umweltschutzaspekten.....	25
Abbildung 10 Vertrauen in den Beitrag zu Klima- und Umweltschutzbestrebungen.....	26
Abbildung 11 Bewusstsein der Interessensgruppen für Problemstellungen im Bereich Verkehrssicherheit, Sicherheitsempfinden und urbane Attraktivität.....	31
Abbildung 12 Einschätzung der Entwicklung der Wichtigkeit des Bereich Verkehrssicherheit, Sicherheitsempfinden und urbane Attraktivität.....	31
Abbildung 13 Bewusstsein der Interessensgruppen für Problemstellungen im Bereich Licht und Gesundheit	35
Abbildung 14 Einschätzung der Entwicklung der Wichtigkeit des Bereich Licht und Gesundheit	36
Abbildung 15 Bewusstsein der Interessensgruppen für Problemstellungen im Bereich Umweltverträglichkeit und Biodiversität	40
Abbildung 16 Einschätzung der Entwicklung der Wichtigkeit des Bereich Umweltverträglichkeit und Biodiversität	41
Abbildung 17 Bewusstsein der Interessensgruppen für Problemstellungen im Bereich Energieeffizienz und Ressourcenschonung.....	45
Abbildung 18 Einschätzung der Entwicklung der Wichtigkeit des Bereich Energieeffizienz und Ressourcenschonung	45

Abbildung 19 Bewusstsein der Interessensgruppen für Problemstellungen im Bereich Interoperabilität und Technologiesouveränität.....	48
Abbildung 20 Einschätzung der Entwicklung der Wichtigkeit des Bereich Interoperabilität und Technologiesouveränität.....	49
Abbildung 21 Potenziale und Limitationen von Tunable White Technologien.....	54
Abbildung 22 Potenziale und Limitationen vom Einsatz applikationsspezifischer Spektren	56
Abbildung 23 Potenziale und Limitationen vom Einsatz adaptiver Lichtverteilungen	60
Abbildung 24 Potenziale und Limitationen vom Einsatz nanobasierter Optikkomponenten	63
Abbildung 25 Potenziale und Limitationen vom Einsatz nächtlicher Komplettabschaltungen	67
Abbildung 26 Potenziale und Limitationen vom Einsatz PIR-basierter Abschaltungen.....	69
Abbildung 27 Potenziale und Limitationen vom Einsatz Radar-basierter Abschaltungen ..	70
Abbildung 28 Potenziale und Limitationen vom Einsatz erweiterter Systemvernetzungen	74
Abbildung 29 Potenziale und Limitationen vom Einsatz bildgebender Sensorik.....	78
Abbildung 30 Potenziale und Limitationen vom Einsatz maschinellen Lernens.....	80
Abbildung 31 Technology Roadmap für den Bereich Energieeffizienz und Ressourcenschonung.....	84
Abbildung 32 Technology Roadmap für den Bereich Umweltverträglichkeit und Biodiversität.....	90
Abbildung 33 Technology Roadmap für den Bereich Interoperabilität und Technologiesouveränität.....	92
Abbildung 34 Übergeordnete Darstellung der abgeleiteten Technology Roadmap unter Einschluss der Bereiche Energieeffizienz und Ressourcenschonung, Umweltverträglichkeit und Biodiversität und Interoperabilität und Technologiesouveränität	95

Literaturverzeichnis

Abinaya, B., Gurupriya, S. & Pooja, M. (2017, February). IoT based smart and adaptive lighting in street lights. In *2017 2nd International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCCT)* (pp. 195-198). IEEE.

Agbaria, S., Haim, A., Fares, F. & Zubidat, A. E. (2019). Epigenetic modification in 4T1 mouse breast cancer model by artificial light at night and melatonin—the role of DNA-methyltransferase. *Chronobiology International*, 36(5), 629-643.

AMA (2016). *AMA adopts guidance to reduce harm from high intensity street lights*. <https://www.ama-assn.org/press-center/press-releases/ama-adopts-guidance-reduce-harm-high-intensity-street-lights> [Zugriff am 26.09.2024].

Archibugi, D. & Mariella, V. (2021). Is a European recovery possible without high-tech public corporations?. *Intereconomics*, 56(3), 160-166.

Baron, J. (2011). *Leeds street lighting hours could be reduced*. <http://www.guardian.co.uk/leeds/2011/apr/04/leeds-streetlighting-hours-could-be-reduced> [Zugriff am 29.09.2024].

Baxter, M. & Ray, D. W. (2020). Circadian rhythms in innate immunity and stress responses. *Immunology*, 161(4), 261-267.

Bayon, V., Leger, D., Gomez-Merino, D., Vecchierini, M. F. & Chennaoui, M. (2014). Sleep debt and obesity. *Annals of medicine*, 46(5), 264-272.

Beccali, M., Bonomolo, M., Brano, V. L., Ciulla, G., Di Dio, V., Massaro, F. & Favuzza, S. (2019). Energy saving and user satisfaction for a new advanced public lighting system. *Energy Conversion and Management*, 195, 943-957.

Beccali, M., Bonomolo, M., Ciulla, G., Galatioto, A. & Brano, V. L. (2015). Improvement of energy efficiency and quality of street lighting in South Italy as an action of Sustainable Energy Action Plans. The case study of Comiso (RG). *Energy*, 92, 394-408.

Benhamou, B. (2018). *Digital Sovereignty and European Data Regulation – Prospects of the GDPR in the Aftermath of the Cambridge Analytica Crisis*.

<http://www.netgouvernance.org/DigitalSovereigntyandEuropeanDataRegulation.pdf>

[Zugriff am 29 09 2024].

Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D. & Gaston, K. J. (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology*, 104(3), 611-620.

Bhosale, S., Gaware, K., Phalke, P., Wadekar, D. & Ahire, P. (2017). IoT based dynamic control of street lights for smart city. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(5).

Birren, F. (1983). Color and human response. *Color Research & Application*, 8(2), 75-81.

Blask, D. E., Dauchy, R. T., Dauchy, E. M., Mao, L., Hill, S. M., Greene, M. W., ... & Davidson, L. (2014). Light exposure at night disrupts host/cancer circadian regulatory dynamics: impact on the Warburg effect, lipid signaling and tumor growth prevention. *PLoS One*, 9(8), e102776.

Blümel, M., Dally, N. & Jung, C. (2015). Flowering time regulation in crops—what did we learn from Arabidopsis?. *Current opinion in biotechnology*, 32, 121-129.

BMK (2024). *Wie ist der Stromverbrauch?*. <https://energie.gv.at/verbrauch/wie-ist-der-stromverbrauch> [Zugriff am 29 09 2024].

Bonenfant, M. (2018). *Trust – the foundation of Europe’s digital sovereignty*.

<https://www.stormshield.com/news/trust-the-foundation-of-europes-digital-sovereignty>

[Zugriff am 29 09 2024].

Boom, M. P., Spoelstra, K., Biere, A., Knop, E. & Visser, M. E. (2020). Pollination and fruit infestation under artificial light at night: light colour matters. *Scientific reports*, 10(1), 18389.

Boomsma, C. & Steg, L. (2014). Feeling safe in the dark: Examining the effect of entrapment, lighting levels, and gender on feelings of safety and lighting policy acceptability. *Environment and Behavior*, 46(2), 193-212.

Boomsma, C. & Steg, L. (2014). The effect of information and values on acceptability of reduced street lighting. *Journal of Environmental Psychology*, 39, 22-31.

Boyce, P. R. (2014). *Human factors in lighting*. Boca Raton: CRC Press.

Boyce, P. R. (2019). The benefits of light at night. *Building and Environment*, 151, 356-367.

Boyce, P. R. (2022). Light, lighting and human health. *Lighting Research & Technology*, 54(2), 101-144.

Boyce, P. R. & Gutkowski, J. M. (1995). The if, why and what of street lighting and street crime: A review. *International Journal of Lighting Research and Technology*, 27(2), 103-112.

Cambridgeshire County Council (2011). *Street lighting policy*.

http://www.cambridgeshire.gov.uk/NR/rdonlyres/BA68632E-B37D-49F1-8B3ED936CBCD8102/0/Street_Lighting_Policy04dec.pdf [Zugriff am 29 09 2024].

Carli, R. & Dotoli, M. (2020). A dynamic programming approach for the decentralized control of energy retrofit in large-scale street lighting systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(3), 1140-1157.

Carli, R., Dotoli, M. & Cianci, E. (2017). An optimization tool for energy efficiency of street lighting systems in smart cities. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14460-14464.

CEN (2015). *EN 13201-2: Road lighting - Part 2: Performance*. Brüssel: European Committee for Standardization.

Chalfin, A., Hansen, B., Lerner, J. & Parker, L. (2022). Reducing crime through environmental design: Evidence from a randomized experiment of street lighting in New York City. *Journal of Quantitative Criminology*, 1-31.

Chang, H. & Pao, C. (2014). *Flip Light Emitting Diode Chip and Method of Fabricating the Same*. USA, Patentnr. 8,735,189.

Chatterjee, S., Kar, A. K. & Gupta, M. P. (2018). Success of IoT in smart cities of India: An empirical analysis. *Government Information Quarterly*, 35(3), 349-361.

Chaves, J. (2017). *Introduction to Nonimaging Optics*. London: Taylor & Francis.

Chen, C. L., Su, Y. H., Liu, C. J. & Lee, Y. C. (2009). Effect of night illumination on growth and yield of soybean. *Journal of Taiwan Agricultural Research*, 58(2), 146-154.

Chen, W., Fan, J., Qi, G., Sun, C., Yang, W. & Cao, S. (2019, November). Optical and thermal designs of LED matrix module used in automotive headlamps. In *2019 16th China International Forum on Solid State Lighting & 2019 International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS)* (pp. 220-224). IEEE.

CIE (1978). *CIE 15 supp 2 - Recommendations on uniform colour spaces, colour-difference equations, psychometric colour terms*. Wien: International Commission on Illumination.

CIE (1979). *CIE 47: Road lighting for wet conditions*. Wien: International Commission on Illumination.

CIE (1995). *Discomfort glare in interior lighting*. Wien: International Commission on Illumination.

CIE (2010). *CIE 115 - Lighting of roads for motor and pedestrian*. Wien: International Commission on Illumination.

CIE (2018). *CIE S 026: CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light*. Wien: International Commission on Illumination.

CIE (2019). *Lighting for pedestrians: a summary of empirical data*. Wien: International Commission on Illumination.

Cleve, K. (1964). Der Anflug der Schmetterlinge an künstliche Lichtquellen. *Mitteilungen der Deutschen Entomologischen Gesellschaft*, 23, 66-76.

Climate Group (2024). *LED*. <https://www.theclimategroup.org/led> [Zugriff am 29.09.2024].

da Silva, A. A., de Mello, R. G. B., Schaan, C. W., Fuchs, F. D., Redline, S. & Fuchs, S. C. (2016). Sleep duration and mortality in the elderly: a systematic review with meta-analysis. *BMJ open*, 6(2), e008119.

Dananay, K. L. & Benard, M. F. (2018). 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.

Davies, M. W. & Farrington, D. P. (2020). An examination of the effects on crime of switching off street lighting. *Criminology & Criminal Justice*, 20(3), 339-357.

De Paz, J. F., Bajo, J., Rodríguez, S., Villarrubia, G. & Corchado, J. M. (2016). Intelligent system for lighting control in smart cities. *Information Sciences*, 372, 241-255.

Deichmann, J. L., Ampudia Gatty, C., Andía Navarro, J. M., Alonso, A., Linares-Palomino, R. & Longcore, T. (2021). Reducing the blue spectrum of artificial light at night minimises insect attraction in a tropical lowland forest. *Insect Conservation and Diversity*, 14(2), 247-259.

Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LiTG) (2023). *Außenbeleuchtung und Umweltaspekte*. [https://www.litg.de/media/31374.Publ.49 Außenbeleuchtung und Umweltaspekte](https://www.litg.de/media/31374.Publ.49_Au%20%20Au%20%20Umweltaspekte) [Zugriff am 29 09 2024]

DigitalGipfel (2018). *Digitale Souveränität und Künstliche Intelligenz – Voraussetzungen, Verantwortlichkeiten und Handlungsempfehlungen*. <https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Digital-Gipfel/Download/2018/p2-digitale-souveraenitaet-und-kuenstliche-intelligenz.pdf> [Zugriff am 29 09 2024].

DIN (2016). *DIN EN 13201-2: Straßenbeleuchtung - Teil 2: Gütemerkmale; Deutsche Fassung EN 13201-2:2015*. Berlin: Deutsches Institut für Normung.

Ditmer, M. A., Stoner, D. C. & Carter, N. H. (2021). Estimating the loss and fragmentation of dark environments in mammal ranges from light pollution. *Biological Conservation*, 257, 109135.

Dizon, E. & Pranggono, B. (2022). Smart streetlights in Smart City: a case study of Sheffield. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-16.

Domonoske, C., 2016. *Bright, Bluish-White LED Streetlamps Disrupt Sleep Cycles, AMA Says*. <https://www.npr.org/sections/thetwo-way/2016/06/21/482936520/bright-bluish-white-led-streetlamps-bad-for-our-health-ama-says> [Zugriff am 26 09 2024].

Drent, M., 2018. *European strategic autonomy: Going it alone?*.
https://www.clingendael.org/sites/default/files/2018-08/PB_European_Strategic_Autonomy.pdf [Zugriff am 29 09 2024].

Eisenbeis, G. & Eick, K. (2011). Studie zur Anziehung nachtaktiver Insekten an die Straßenbeleuchtung unter Einbeziehung von LEDs. *Natur und Landschaft*, 86(7).

Eisenbeis, G. & Hassel, F. (2000). Zur Anziehung nachtaktiver Insekten durch Strassenlaternen. *Natur und Landschaft*, 75(4), 145-156.

Eisenbeis, G., Rich, C. & Longcore, T. (2006). Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. *Ecological consequences of artificial night lighting*, 2, 191-198.

Elijošiūtė, E., Balciukevičiūtė, J. & Denafas, G. (2012). Life cycle assessment of compact fluorescent and incandescent lamps: comparative analysis. *Environmental Research, Engineering and Management*, 61(3), 65-72.

Energy Innovation Austria (2020). *Neue Technologien für energieeffiziente Beleuchtungssysteme*. <https://www.energy-innovation-austria.at/article/neue-technologien-3/> [Zugriff am 29 09 2024].

Esmailian, B., Wang, B., Lewis, K., Duarte, F., Ratti, C. & Behdad, S. (2018). The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper. *Waste management*, 81, 177-195.

Evans, J. A. & Davidson, A. J. (2013). Health consequences of circadian disruption in humans and animal models. *Progress in molecular biology and translational science*, 119, 283-323.

Favero, G., Franceschetti, L., Bonomini, F., Rodella, L. F. & Rezzani, R. (2017). Melatonin as an anti-inflammatory agent modulating inflammasome activation. *International journal of endocrinology*, 2017(1), 1835195.

Fisher, B. S. & Nasar, J. L. (1992). Fear of crime in relation to three exterior site features: Prospect, refuge, and escape. *Environment and behavior*, 24(1), 35-65.

FMIBC (2019). *BMI intensiviert Aktivitäten zur Stärkung der digitalen Souveränität in der öffentlichen Verwaltung*. <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/pressemitteilungen/DE/2019/09/digitale-souveraenitaet-oeff-verwltg.html> [Zugriff am 29.09.2024].

Fotios, S., Cheal, C. & Boyce, P. R. (2005). Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: A review. *Lighting Research & Technology*, 37(4), 271-291.

Fotios, S., Monteiro, A. L. & Uttley, J. (2019). Evaluation of pedestrian reassurance gained by higher illuminances in residential streets using the day–dark approach. *Lighting Research & Technology*, 51(4), 557-575.

Fotios, S., Unwin, J. & Farrall, S. (2015). Road lighting and pedestrian reassurance after dark: A review. *Lighting Research & Technology*, 47(4), 449-469.

Gade, D. S. (2021). ICT Driven Smart Lighting Solution “iLIGHT” for Smart Cities: A Conceptual Framework. *International Journal of Applied Engineering and Management Letters (IJAEML)*, 5(2), 78-95.

Galindo, S. P., Borge-Diez, D. & Icaza, D. (2022). Novel control system applied in the modernization of public lighting systems in heritage cities: Case study of the City of Cuenca. *Energy Reports*, 8, 10478-10491.

García, C. G., Meana-Llorián, D., G-Bustelo, B. C. P., Lovelle, J. M. C. & Garcia-Fernandez, N. (2017). Midgar: Detection of people through computer vision in the Internet of Things scenarios to improve the security in Smart Cities, Smart Towns, and Smart Homes. *Future Generation Computer Systems*, 76, 301-313.

Gaston, K. J., Bennie, J., Davies, T. W. & Hopkins, J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews*, 88(4), 912-927.

Gharaibeh, A., Salahuddin, M. A., Hussini, S. J., Khreishah, A., Khalil, I., Guizani, M. & Al-Fuqaha, A. (2017). Smart cities: A survey on data management, security, and enabling technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2456-2501.

Gibbons, R. B., Guo, F., Medina, A., Du, J., Terry, T., Lutkevich, P. & Li, Q. (2015). Approaches to adaptive lighting on roadways. *Transportation Research Record*, 2485(1), 26-32.

Gordic, D., Vukasinovic, V., Kovacevic, Z., Josijevic, M. & Zivkovic, D. (2021). Assessing the techno-economic effects of replacing energy-inefficient street lighting with LED corn bulbs. *Energies*, 14(13), 3755.

Goujard, C. (2018). *France is ditching Google to reclaim its online independence*. <https://www.wired.com/story/google-france-silicon-valley/> [Zugriff am 29 09 2024].

Goulson, D., Lye, G. & Darvill, B. (2008). Decline and Conservation of Bumble Bees. *Annual Review of Entomology*, 53(1), 191-208.

Greffier, F., Boucher, V., Muzet, V. & Dronneau, R. (2022). Design of an Adaptive Road Lighting Installation Taking into Account the Evolution of Pavement Reflection Properties According to the Weather Conditions. In *Proceedings of the 14th European Lighting Conference (LuxEuropa)* (pp. 46-53).

Grubisic, M., Haim, A., Bhusal, P., Dominoni, D. M., Gabriel, K. M., Jechow, A., ... & Hölker, F. (2019). Light pollution, circadian photoreception, and melatonin in vertebrates. *Sustainability*, 11(22), 6400.

Grubisic, M., van Grunsven, R. H., Kyba, C. C., Manfrin, A. & Hölker, F. (2018). Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter?. *Annals of applied biology*, 173(2), 180-189.

Gueham, F. (2017). *Digital Sovereignty – Steps towards a new system of internet governance*. <https://euagenda.eu/upload/publications/untitled-77045-ea.pdf> [Zugriff am 29 09 2024].

Haans, A. & De Kort, Y. A. (2012). Light distribution in dynamic street lighting: Two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment, and escape. *Journal of Environmental Psychology*, 32(4), 342-352.

Haim, A. & Zubidat, A. E. (2015). 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.

Hänel, A., Doulos, L., Schroer, S., Gălățanu, C. D. & Topalis, F. (2016, March). Sustainable outdoor lighting for reducing energy and light waste. In *Proceedings of the 9th International Conference Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings and Smart Communities (IEECB & SC)* (pp. 16-18). Frankfurt, Germany.

Hegedüs, J., Hantos, G. & Poppe, A. (2016). Embedded multi-domain LED model for adaptive dimming of streetlighting luminaires. In *22nd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)* (pp. 208-212). New Jersey: IEEE.

Higuchi, Y. (2018). Florigen and anti-florigen: flowering regulation in horticultural crops. *Breeding science*, 68(1), 109-118.

Hölker, F., Wolter, C., Perkin, E. K. & Tockner, K. (2010). Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(12), 681-682.

Hu, K., Li, W., Zhang, Y., Chen, H., Bai, C., Yang, Z., ... & Yao, Y. (2022). Association between outdoor artificial light at night and sleep duration among older adults in China: a cross-sectional study. *Environmental Research*, 212, 113343.

Hurley, S., Goldberg, D., Nelson, D., Hertz, A., Horn-Ross, P. L., Bernstein, L. & Reynolds, P. (2014). Light at night and breast cancer risk among California teachers. *Epidemiology*, 25(5), 697-706.

International Energy Agency (2022). *Lighting Tracking Report*. <https://www.iea.org/reports/lighting> [Zugriff am 29 09 2024]

Jägerbrand, A. K. & Bouroussis, C. A. (2021). Ecological impact of artificial light at night: effective strategies and measures to deal with protected species and habitats. *Sustainability*, 13(11), 5991.

James, P., Bertrand, K. A., Hart, J. E., Schernhammer, E. S., Tamimi, R. M. & Laden, F. (2017). Outdoor light at night and breast cancer incidence in the Nurses' Health Study II. *Environmental health perspectives*, 125(8), 087010.

Janani, R. P., Renuka, K. & Aruna, A. (2021). IoT in smart cities: A contemporary survey. *Global Transitions Proceedings*, 2(2), 187-193.

Januchta-Szostak, A. (2010). The Role of Public Visual Art in Urban Space Recognition. In *Cognitive Maps*. IntechOpen.

Jin, D., Hannon, C., Li, Z., Cortes, P., Ramaraju, S., Burgess, P., ... & Shahidehpour, M. (2016). Smart street lighting system: A platform for innovative smart city applications and a new frontier for cyber-security. *The Electricity Journal*, 29(10), 28-35.

Juntunen, E., Sarjanoja, E. M., Eskeli, J., Pihlajaniemi, H., & Österlund, T. (2018). Smart and dynamic route lighting control based on movement tracking. *Building and Environment*, 142, 472-483.

Khan, A., Aslam, S., Aurangzeb, K., Alhusein, M., & Javaid, N. (2022). Multiscale modeling in smart cities: A survey on applications, current trends, and challenges. *Sustainable cities and society*, 78, 103517.

Khemakhem, S. & Krichen, L. (2024). A comprehensive survey on an IoT-based smart public street lighting system application for smart cities. *Franklin Open*, 100142.

Kostic, A., Kremic, M., Djokic, L. & Kostic, M. (2013). Light-emitting diodes in street and roadway lighting—A case study involving mesopic effects. *Lighting Research & Technology*, 45, 217–229.

Kubatka, P., Zubor, P., Busselberg, D., Kwon, T. K., Adamek, M., Petrovic, D., ... & Kruzliak, P. (2018). Melatonin and breast cancer: Evidences from preclinical and human studies. *Critical reviews in oncology/hematology*, 122, 133-143.

Laing, D., Park, C. & Wang, P. (2005). A Modified Harris-Todaro Model of Rural-Urban Migration For China. In *Critical Issues in China's Growth and Development* (pp. 245-264). London: Routledge.

Lamers, F., Milaneschi, Y., Smit, J. H., Schoevers, R. A., Wittenberg, G. & Penninx, B. W. (2019). Longitudinal association between depression and inflammatory markers: results from the Netherlands study of depression and anxiety. *Biological psychiatry*, 85(10), 829-837.

Lasance, C. & Poppe, A. (2014). Thermal Management for LED Applications. In: *Solid State Lighting Technology and Application Series*. New York: Springer Science Business Media.

Lau, S. P., Merrett, G. V., Weddell, A. S. & White, N. M. (2015). A traffic-aware street lighting scheme for Smart Cities using autonomous networked sensors. *Computers & Electrical Engineering*, 45, 192-207.

Lewy, A. J., Wehr, T. A., Goodwin, F. K., Newsome, D. A. & Markey, S. P. (1980). Light suppresses melatonin secretion in humans. *Science*, 210(4475), 1267-1269.

Lippert, B., Ondarza, N. & Perthes, V. (2019). *European Strategic Autonomy Actors, Issues, Conflicts of Interests*. https://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/research_papers/2019RP04_lpt_orz_prt_web.pdf [Zugriff am 29.09.2024].

Liu, Z., Liu, S., Wang, K. & Luo, X. (2009). Status and prospects for phosphor-based white LED packaging. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2, 119-140.

Longcore, T., Aldern, H. L., Eggers, J. F., Flores, S., Franco, L., Hirshfield-Yamanishi, E., ... & Barroso, A. M. (2015). Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1667), 20140125.

Longcore, T. & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), 191-198.

Longcore, T., Rodríguez, A., Witherington, B., Penniman, J. F., Herf, L. & Herf, M. (2018). 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.

Lorenc, T., Clayton, S., Neary, D., Whitehead, M., Petticrew, M., Thomson, H., ... & Renton, A. (2012). Crime, fear of crime, environment, and mental health and wellbeing: mapping review of theories and causal pathways. *Health & place*, 18(4), 757-765.

Luo, P., Miao, Y. & Zhao, J. (2021). Effects of auditory-visual combinations on students' perceived safety of urban green spaces during the evening. *Urban forestry & urban greening*, 58, 126904.

Macgregor, C., Pocock, M., Fox, R. & Evans, D. (2015). Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: A review. *Ecological entomology*, 40(3), 187-198.

Ma, H. K., Hsieh, C. H. & Liao, S. K. (2017, March). Study of an innovative multiple fan system with one piezoelectric actuator embedded in a circular heat sink. In *2017 33rd Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM)* (pp. 6-12). IEEE.

Mahoor, M., Hosseini, Z. S., Khodaei, A., Paaso, A. & Kushner, D. (2020). State-of-the-art in smart streetlight systems: a review. *IET Smart Cities*, 2(1), 24-33.

Marino, F., Leccese, F. & Pizzuti, S. (2017). Adaptive street lighting predictive control. *Energy Procedia*, 111, 790-799.

Mazzucato, M. (2016). From Market Fixing to Market-Creating: A new framework for innovation policy. *Industry and Innovation*, 23, 140–156.

McFadden, E., Jones, M. E., Schoemaker, M. J., Ashworth, A., & Swerdlow, A. J. (2014). The relationship between obesity and exposure to light at night: cross-sectional analyses of over 100,000 women in the Breakthrough Generations Study. *American journal of epidemiology*, 180(3), 245-250.

Mehmood, Y., Ahmad, F., Yaqoob, I., Adnane, A., Imran, M. & Guizani, S. (2017). Internet-of-things-based smart cities: Recent advances and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 16-24.

Menzel, R. & Greggers, U. (1985). Natural phototaxis and its relationship to colour vision in honeybees. *Journal of Comparative Physiology A*, 157(3), 311-321.

Middlebrook, H. (2016). *To improve health, cities are changing their streetlights.* <https://edition.cnn.com/2016/09/29/health/streetlights-improve-health/index.html> [Zugriff am 26.09.2024].

Min, J. Y. & Min, K. B. (2018). 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*, Band 227, pp. 199-205.

Mukherjee, S. (2016). *Visibility of Color over Angle for Gaussian Luminance Profiles*.

Municipality of Den Haag (2007). *Lighting policy 2009-2018*.

<http://zbs.denhaag.nl/risdoc/2010/RIS168048B.PDF> [Zugriff am 29 09 2024].

Municipality of Heerenveen (2007). *Lighting policy 2008-2011 On/Off*.

<http://www.lightchallenge.nl/upload/files/2011/Lichtbeleid%202008%20-%202011.pdf>

[Zugriff am 29 09 2024].

Muzet, V., Greffier, F., Nicolai, A., Taron, A. & Verny, P. (2019). Evaluation of the performance of an optimized road surface/lighting combination. *Lighting Research & Technology*, 51(4), 576-591.

Muzet, V., Liandrat, S., Bour, V., Dehon, J. & Christory, J. P. (2023). Is it possible to achieve quality lighting without considering the photometry of the pavements?. *Lighting Research & Technology*, 55(4-5), 345-365.

Nasar, J. L. & Jones, K. M. (1997). Landscapes of fear and stress. *Environment and behavior*, 29(3), 291-323.

Nikunen, H. & Korpela, K. M. (2012). The effects of scene contents and focus of light on perceived restorativeness, fear and preference in nightscapes. *Journal of Environmental Planning and Management*, 55(4), 453-468.

Oberösterreichische Umweltschutzbehörde (2017). *Österreichischer Leitfaden*

Außenbeleuchtung. www.ooe-umweltschutz.at/Mediendateien/Leitfaden.pdf

[Zugriff am 29 09 2024].

Omar, A., AlMaeni, S., Attia, H., Takruri, M., Altunaiji, A., Sanduleanu, M., ... & Al Hebsi, G. (2022). Smart city: Recent advances in intelligent street lighting systems based on IoT. *Journal of Sensors*, 2022(1), 5249187.

Onorati, M., & Vignoli, L. (2017). The darker the night, the brighter the stars: consequences of nocturnal brightness on amphibian reproduction. *Biological Journal of the Linnean Society*, 120(4), 961-976.

Owens, A. C., Cochard, P., Durrant, J., Farnworth, B., Perkin, E. K., & Seymoure, B. (2020). Light pollution is a driver of insect declines. *Biological Conservation*, 241, 108259.

Paksarian, D., Rudolph, K. E., Stapp, E. K., Dunster, G. P., He, J., Mennitt, D., ... & Merikangas, K. R. (2020). Association of outdoor artificial light at night with mental disorders and sleep patterns among US adolescents. *Jama Psychiatry*, 77(12), 1266-1275.

Pandharipande, A. & Newsham, G. (2018). Lighting controls: Evolution and revolution. *Lighting Research & Technology*, 50, 115–128.

Pardini, K., Rodrigues, J. J., Kozlov, S. A., Kumar, N., & Furtado, V. (2019). IoT-based solid waste management solutions: a survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 8(1), 5.

Pardo-Bosch, F., Blanco, A., Sesé, E., Ezcurra, F. & Pujadas, P. (2022). Sustainable strategy for the implementation of energy efficient smart public lighting in urban areas: case study in San Sebastian. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103454.

Patel, P. C. (2019). Light pollution and insufficient sleep: Evidence from the United States. *American journal of human biology*, 31(6), e23300.

Patrício-Roberto, G. & Campos, M. (2014). Aspects of Landscape and Pollinators—What is Important to Bee Conservation?. *Diversity*, 6, 158–175.

Pattison, M., Hansen, M., Bardsley, N., Elliott, C., Lee, K., Pattison, L. & Tsao, J. (2020). *2019 lighting R&D opportunities* (No. DOE/EE-2008). Solid State Lighting Solutions (SSLS) Inc., Santa Barbara, CA (United States).

Peña-García, A., Hurtado, A. & Aguilar-Luzón, M. C. (2015). Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being. *Safety Science*, 78, 142-148.

Penning, J., Stober, K., Taylor, V. & Yamada, M. (2016). *Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications*. Washington, DC: U.S. Department of Energy.

Perry, G., Buchanan, B. W., Fisher, R. N., Salmon, M. & Wise, S. E. (2008). Effects of artificial night lighting on amphibians and reptiles in urban environments. *Urban herpetology*, 3, 239-256.

Petritoli, E., Leccese, F., Pizzuti, S. & Pieroni, F. (2009). Smart lighting as basic building block of smart city: An energy performance. *Measurement*, 136, 466–477.

Pohlmann, N., Sparenberg, M., Siromaschenko, I. & Kilden, K. (2014, October). Secure Communication and Digital Sovereignty in Europe. In *ISSE 2014 Securing Electronic Business Processes: Highlights of the Information Security Solutions Europe 2014 Conference* (pp. 155-169). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Polko, P. & Kimic, K. (2022). Gender as a factor differentiating the perceptions of safety in urban parks. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101608.

Pong-Ryol, J., Tae-Sok, J., Nam-Chol, K., Xing, F. & Kum-Hyok, J. (2016). Laser micro-polishing for metallic surface using UV nano-second pulse laser and CW laser. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 2367-2375.

Portnov, B. A., Saad, R., Trop, T., Kliger, D. & Svechkina, A. (2020). Linking nighttime outdoor lighting attributes to pedestrians' feeling of safety: an interactive survey approach. *PloS one*, 15(11), e0242172.

Pracki, P. & Skarzynski, K. (2020). Multi-Criteria Assessment Procedure for Outdoor Lighting at the Design Stage. *Sustainability*, 12, 1330.

Raven, J. A. & Cockell, C. S. (2006). Influence on photosynthesis of starlight, moonlight, planetlight, and light pollution (reflections on photosynthetically active radiation in the universe). *Astrobiology*, 6(4), 668-675.

Ritonja, J., Mclsaac, M. A., Sanders, E., Kyba, C. C., Grundy, A., Cordina-Duverger, E., ... & Aronson, K. J. (2020). Outdoor light at night at residences and breast cancer risk in Canada. *European Journal of Epidemiology*, 35, 579-589.

Roslyakova, S. V., Chirimisina, D. A. & Lyubakova, Y. S. (2020, October). Possibilities to integrate wearable biomonitors into adaptive lighting systems. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 944, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.

Rossi, F., Bonamente, E., Nicolini, A., Anderini, E. & Cotana, F. (2016). A carbon footprint and energy consumption assessment methodology for UHI-affected lighting systems in built areas. *Energy and Buildings*, 114, 96-103.

Roy, S., Jana, D. K. & Mishra, A. (2024). Linguistic interval type 2 fuzzy logic-based Exigency Vehicle routing: IoT system development for smart city applications with soft computing-based optimization. *Franklin Open*, 6, 100057.

Saif, S., Roy, P., Chowdhury, C., Biswas, S. & Maulik, U. (2022). Smart e-agriculture monitoring systems. In *AI, Edge and IoT-based Smart Agriculture* (pp. 183-203). Academic Press.

Sánchez Sutil, F. & Cano-Ortega, A. (2020). Smart public lighting control and measurement system using LoRa network. *Electronics*, 9, 124.

Sanmartín, P., Vázquez-Nion, D., Arines, J., Cabo-Domínguez, L. & Prieto, B. (2017). Controlling growth and colour of phototrophs by using simple and inexpensive coloured lighting: A preliminary study in the Light4Heritage project towards future strategies for outdoor illumination. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 122, 107-115.

Sarrab, M., Pulparambil, S. & Awadalla, M. (2020). Development of an IoT based real-time traffic monitoring system for city governance. *Global Transitions*, 2, 230-245.

Saunders, J. E., Jarvis, J. R. & Wathes, C. M. (2008). Calculating luminous flux and lighting levels for domesticated mammals and birds. *Animal*, 2(6), 921-932.

Schlagen, L. J. & Price, L. L. (2021). The lighting environment, its metrology, and non-visual responses. *Frontiers in Neurology*, 12, 624861.

Scholand, M. & Dillon, H. E. (2012). *Life-cycle assessment of energy and environmental impacts of LED lighting products part 2: LED manufacturing and performance* (No. PNNL-21443). Pacific Northwest National Lab (PNNL), Richland, WA (United States).

Schweitzer, J. H., Kim, J. W. & Mackin, J. R. (1999). The impact of the built environment on crime and fear of crime in urban neighborhoods. *Journal of urban technology*, 6(3), 59-73.

Seymoure, B. M., Linares, C. & White, J. (2019). Connecting spectral radiometry of anthropogenic light sources to the visual ecology of organisms. *Journal of Zoology*, 308(2), 93-110.

Shahzad, G., Yang, H., Ahmad, A. W. & Lee, C. (2016). Energy-Efficient Intelligent Street Lighting System Using Traffic-Adaptive Control. *IEEE Sensors Journal*, 16(13), 5397-5405.

Shahzad, K., Čuček, L., Sagir, M., Ali, N., Rashid, M. I., Nazir, R., ... & Ismail, I. M. I. (2018). An ecological feasibility study for developing sustainable street lighting system. *Journal of cleaner production*, 175, 683-695.

Sifakis, N., Kalaitzakis, K. & Tsoutsos, T. (2021). Integrating a novel smart control system for outdoor lighting infrastructures in ports. *Energy Conversion and Management*, 246, 114684.

Singhal, R. K., Kumar, M. & Bose, B. (2019). Eco-physiological responses of artificial night light pollution in plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 66, 190-202.

Škvareninová, J., Tuhárska, M., Škvarenina, J., Babálová, D., Slobodníková, L., Slobodník, B., ... & Mindáš, J. (2017). Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. *Moravian geographical reports*, 25(4), 282-290.

Sorensen, T. B., Wilson, R., Gregson, J., Shankar, B., Dangour, A. D. & Kinra, S. (2020). Is night-time light intensity associated with cardiovascular disease risk factors among adults in early-stage urbanisation in South India? A cross-sectional study of the Andhra Pradesh Children and Parents Study. *BMJ open*, 10(11), e036213.

Stefanaki, C., Pervanidou, P., Boschiero, D. & Chrousos, G. P. (2018). Chronic stress and body composition disorders: implications for health and disease. *Hormones*, 17, 33-43.

Steg, L., Dreijerink, L. & Abrahamse, W. (2005). Factors influencing the acceptability of energy policies: A test of VBN theory. *Journal of environmental psychology*, 24(4), 415-425.

Steg, L., Dreijerink, L. & Abrahamse, W. (2006). Why are energy policies acceptable and effective?. *Environment and behavior*, 38(1), 92-111.

Stevens, R. G. (2006). Artificial lighting in the industrialized world: circadian disruption and breast cancer. *Cancer Causes & Control*, 17(4), 501-507.

Swindall, J., Ober, H., Lamont, M. & Carthy, R. (2019). Informing sea turtle outreach efforts to maximize effectiveness. *Wildlife Society Bulletin*, 43(3), 436-446.

Syed, A. S., Sierra-Sosa, D., Kumar, A. & Elmaghraby, A. (2021). IoT in smart cities: A survey of technologies, practices and challenges. *Smart Cities*, 4(2), 429-475.

Tähkämö, L., Bazzana, M., Zisis, G., Puolakka, M. & Halonen, L. (2014). Life cycle assessment of a fluorescent lamp luminaire used in industry—a case study. *Lighting Research & Technology*, 46(4), 453-464.

Tai, N. C. & Inanici, M. (2010). Lighting in real and pictorial spaces: A computational framework to investigate the scene based lighting distributions and their impact on depth perception. In *15th International Conference on Computer-Aided Architectural Design in Asia (CAADRIA 2010)* (pp. 501-510).

Talari, S., Shafie-Khah, M., Siano, P., Loia, V., Tommasetti, A. & Catalão, J. P. (2017). A review of smart cities based on the internet of things concept. *Energies*, 10(4), 421.

The World Bank (2023). *Lighting Transformation*. <https://www.esmap.org/node/56868> [Zugriff am 29 09 2024].

Trondheim SmartCity (2009). *Energy efficiency*. http://trondheimsmartcity.no/en/?page_id=1358 [Zugriff am 29 09 2024].

UN (2020). *The Sustainable Development Goals Report 2020*. Rom: United Nations.

ur Rahman, T., Raza, S., Saeed, M. & Jameel, S. (2019). An Emerging White LED Technology and associated Thermal Issues—A Review. *Journal of Applied and Emerging Sciences*, 9(2), 106.

Van Bommel, W. (2015). *Road light: fundamentals, technology and application*. New York: Springer.

van Grunsven, R. H., Donners, M., Boekee, K., Tichelaar, I., Van Geffen, K. G., Groenendijk, D., ... & Veenendaal, E. M. (2014). Spectral composition of light sources and

insect phototaxis, with an evaluation of existing spectral response models. *Journal of insect conservation*, 18, 225-231.

Wai, K. P., Chia, M. Y., Koo, C. H., Huang, Y. F. & Chong, W. C. (2022). Applications of deep learning in water quality management: A state-of-the-art review. *Journal of Hydrology*, 613, 128332.

Wang, Y., Alonso, J. & Ruan, X. (2017). A Review of LED Drivers and Related Technologies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(7), 5754-5765.

Wilson, C. (2022). *Streetlights in Europe are getting bluer – that may be bad for health.* <https://www.newscientist.com/article/2338055-streetlights-in-europe-are-getting-bluer-that-may-be-bad-for-health/> [Zugriff am 26 09 2024].

Witherington, B. E. & Bjorndal, K. A. (1991). Influences of wavelength and intensity on hatchling sea turtle phototaxis: implications for sea-finding behavior. *Copeia*, 1060-1069.

Xie, Y., Jin, Z., Huang, H., Li, S., Dong, G., Liu, Y., ... & Guo, Y. (2022). Outdoor light at night and autism spectrum disorder in Shanghai, China: A matched case-control study. *Science of The Total Environment*, 811, 152340.

Ylinen, A.-M., Tähkämo, L., Puolakka, M. & Halonen, L. (2013). Road Lighting Quality, Energy Efficiency, and Mesopic Design – LED Street Lighting Case Study. *LEUKOS*, 8(1), 9-24.

Yu, Z., Hu, N., Du, Y., Wang, H., Pu, L., Zhang, X., ... & Li, J. (2022). Association of outdoor artificial light at night with mental health among China adults: a prospective ecology study. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 82286-82296.

Zhang, D., Jones, R. R., Powell-Wiley, T. M., Jia, P., James, P. & Xiao, Q. (2020). A large prospective investigation of outdoor light at night and obesity in the NIH-AARP Diet and Health Study. *Environmental Health*, 19, 1-8.

Zhang, H., Burr, J. & Zhao, F. (2017). A comparative life cycle assessment (LCA) of lighting technologies for greenhouse crop production. *Journal of cleaner production*, 140, 705-713.

Zhao, J., Dai, Y. & Liu, Q. (2022). Effects of color in Lighting on aesthetic preference and perceived safety during the evening. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 21(8).

Zhao, J., Feng, Y. & Yang, C. (2021). Intelligent control and energy saving evaluation of highway tunnel lighting: Based on three-dimensional simulation and long short-term memory optimization algorithm. *Tunnelling and underground space technology*, 109, 103768.

Zhong, Y., Qin, Z., Alqhatani, A., Metwally, A. S. M., Dutta, A. K. & Rodrigues, J. J. (2023). Sustainable Environmental Design Using Green IOT with Hybrid Deep Learning and Building Algorithm for Smart City. *Journal of Grid Computing*, 21(4), 72.

Zhu, S., Chen, G., Liu, Y., Dong, G. H., Yang, B. Y., Wang, L., ... & Guo, Y. (2024). Outdoor light at night and depressive symptoms in male veterans: a multicenter cross-sectional study in China. *International Journal of Environmental Health Research*, 34(3), 1615-1626.

Zubidat, A. E., Fares, B., Fares, F. & Haim, A. (2018). Artificial light at night of different spectral compositions differentially affects tumor growth in mice: interaction with melatonin and epigenetic pathways. *Cancer Control*, 25(1), 1073274818812908.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 (0) 800 21 53 59

servicebuero@bmk.gv.at

bmk.gv.at