Potentiale moderner Beleuchtungssysteme - Eine Technologie-Roadmap für eine nachhaltige Beleuchtung des öffentlichen Raums

Dipl. Ing. Johannes Weninger
Bartenbach GmbH
Lindenstraße 1, 6112 Wattens, Österreich

Zusammenfassung

Beleuchtungssysteme im öffentlichen Raum stehen vor immer komplexer werdenden Anforderungen. Neben allgemeinen Nachhaltigkeitszielen, wie erhöhter Energieeffizienz und reduziertem Ressourcenverbrauch, wird die Wiederverwertbarkeit von Komponenten und die Reduzierung der Systemkomplexität zur Aufrechterhaltung der Technologiesouveränität immer wichtiger. Zudem sollen Beleuchtungen wesentlich zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität im öffentlichen Raum beigetragen und negative Umwelteinflüsse, wie Lichtverschmutzung und die Beeinträchtigung der urbanen Biodiversität, reduziert werden.

Um die Erreichbarkeit nationaler und internationaler Nachhaltigkeitsbestrebungen zu fördern, erarbeitete Bartenbach im Auftrag des österreichischen Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) eine Technologie-Roadmap für Beleuchtungssysteme im öffentlichen Raum. Die Ergebnisse basieren dabei auf einer groß angelegten Stakeholder-Befragung, welche nicht nur dazu diente technologische Potenziale, sondern auch umsetzungsrelevante Einschränkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu identifizieren. Im Folgenden werden die Vorgehensweise, die Ergebnisse der Umfrage sowie die abgeleiteten Handlungsempfehlungen vorgestellt.

1 Einführung

Der weltweite Stromverbrauch für öffentliche Beleuchtung entspricht in etwa dem jährlichen Stromverbrauch Deutschlands [1]. Der Großteil der öffentlichen Beleuchtung verortet sich dabei im städtischen Umfeld, wo sie bis zu 65 % des kommunalen Strombudgets ausmachen kann [1]. Angesichts der fortschreitenden Urbanisierung und der daraus resultierenden Prognose, dass bis 2050 etwa 60 % der Weltbevölkerung in Städten leben werden [2], steigen der Bedarf an öffentlicher Beleuchtung sowie die damit verbundenen Kosten und Umweltbelastungen derzeit kontinuierlich.

Obwohl der Energieverbrauch durch künstliche Beleuchtungssysteme aufgrund der zunehmenden Nutzung von LED-Technologien derzeit insgesamt rückläufig ist [3], bleibt die Verbesserung der Energieeffizienz der Beleuchtung ein zentraler Aspekt zur Reduktion des globalen Energieverbrauchs. Um jedoch sowohl klima- als auch umweltpolitische Ziele zu

erreichen, ist ein umfassender, ganzheitlicher Ansatz für Beleuchtungssysteme erforderlich [4], der von der technologiebezogenen Ressourcennutzung [5] und dem Systembetrieb [6] bis hin zu planerischen Aspekten reicht, die auf die Reduktion negativer Umweltauswirkungen abzielen [7]. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, ist es entscheidend, dass zukünftig verfolgte Ansätze die Anforderungen aller Akteur:innen entlang der gesamten Wertschöpfungskette einbeziehen.

Die zunehmend breitere Verfügbarkeit zukunftsorientierter Technologien wie sensorbasierter Methoden oder IoT-basierter Lösungen [8] ist tendenziell in vielen Bereichen vorteilhaft, stellt jedoch gleichzeitig neue Anforderungen an die Systeme, da sich insbesondere bei Steuerungskomponenten die Lebensdauer im Vergleich zu LED-Technologien häufig als deutlich kürzer erweist. Darüber hinaus gewinnen für eine gesamthaft ressourceneffiziente Umsetzung stark standardisierte Schnittstellen und eine erweiterte, herstellerunabhängige Komponentenmodularität zur Sicherstellung der Systemfunktionalität und zur Wahrung der technologischen Souveränität zunehmend an Bedeutung. Öffentliche Beleuchtung im Außenraum muss zudem anwendungsspezifische Anforderungen erfüllen, die sowohl visuelle Aspekte [9] als auch individuelle psychologische Bedürfnisse wie beispielsweise ein subjektives Sicherheitsgefühl [10] oder Orientierungshilfen [11] berücksichtigen. Nicht zuletzt setzt die langfristige Sicherung der Akzeptanz der Nutzer:innen voraus, dass sowohl geschlechterspezifische Unterschiede [12] als auch physiologische Kriterien berücksichtigt werden, insbesondere auch im Hinblick auf langfristige gesundheitliche Auswirkungen durch die störende Wirkung nächtlicher Beleuchtung auf die zirkadiane Rhythmik [13].

Vor dem Hintergrund all dieser Faktoren ist nachvollziehbar, dass Beleuchtungskonzepte für den komplexen öffentlichen Außenraum schwer zu entwickeln sind. Vor allem auch deshalb, weil sich die Anforderungen der Einzelaspekte häufig widersprechen. So können etwa Lichtniveaus, die ein allgemeines nächtliches Sicherheitsgefühl vermitteln sollen, gleichzeitig negative Auswirkungen auf gesundheitliche Zielsetzungen haben, bei unsachgemäßem Technikeinsatz zu schlechtem visuellem Komfort führen und die Energiebilanz des Gesamtsystems negativ beeinflussen. Energiepositive Lichtsituationen mit niedrigen Beleuchtungsstärken hingegen erfüllen häufig die visuellen Anforderungen nicht in ausreichendem Maß. Nachhaltigkeitsziele sind daher in der Regel kontextabhängig und können nur im übergeordneten Zusammenhang sinnvoll bewertet werden.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) hat Bartenbach bestehende und zukünftige technologische Ansätze umfassend im Hinblick auf ihr Potenzial auf ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Ebene bewertet. Dieses Ziel erforderte nicht nur eine kontextuelle Einordnung technologischer Potenziale in ein breites Anforderungsspektrum, sondern auch eine hinreichende Berücksichtigung potenzieller Limitationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Als Ergebnis wurde ein spezifischer Handlungsleitfaden für die öffentliche Hand formuliert, um sicherzustellen, dass technologische Beiträge zur Reduktion von Umweltauswirkungen bis 2035 möglichst umfassend berücksichtigt werden können.

2 Methoden

Die Erarbeitung der technologischen Potenziale, marktbezogenen Hindernisfaktoren und der darauf aufbauenden Technologie-Roadmap erfolgte in vier spezifischen und aufeinander aufbauenden Teilschritten. Im Rahmen einer (1) technologischen und wissenschaftlichen Ist-Stands Analyse wurden Ansätze zur aktuellen Marktlage und zukunftsorientierten Forschung abgebildet, welche anschließend in (2) zentrale Kerntechnologien überführt wurden, die im Abgleich zu Themenfeldern mit erhöhter Relevanz für Außenraumbeleuchtungen eine vertiefte Evaluierung erfuhren. Anschließend wurde eine (3) Online-Befragung unter Einschluss aller an der Umsetzung beteiligten Interessensgruppen durchgeführt, welche das Ziel verfolgte, sowohl technologische Potenziale als auch beschränkende Faktoren zu identifizieren. Abschließend wurden die erfassten Daten im Rahmen einer (4) Potenzialanalyse bewertet und in einen dezidierten Handlungsleitfaden überführt.

2.1 Erhebung des aktuellen technologischen und wissenschaftlichen Standes

Zur Erhebung des aktuellen marktbezogenen und wissenschaftlichen Standes von Beleuchtungstechnologien in öffentlichen Räumen wurde ein multimodaler Ansatz aus Projektevaluierungen, Literaturrecherchen und bilateralen Gesprächen zur produzierenden Industrie verfolgt.

Die bestehenden technologischen Ansätze für Beleuchtungen im öffentlichen Raum wurden dabei mittels einer systematischen Analyse von Produktportfolios verschiedener Hersteller von Außenraumbeleuchtung identifiziert. Es wurden dabei sowohl Hersteller aus dem Bereich architektonisch-dekorativer als auch technischer Beleuchtung berücksichtigt. Im Analyseprozess wurden alle angebotenen und auf die Beleuchtung von Außenräumen bezogenen Produkte einem qualitativen und multidimensionalen Klassifikationsprozess zugeführt, in welchem die in den Portfolios angebotenen Funktionalitäten in den Aspekten Optiktechnologie, Lichtqualität, Interoperabilität, Wartungsfreundlichkeit, Konnektivität, Produktionsmethode und Umweltauswirkung bewertet wurden (Tabelle 1).

Die so erfassten Informationen wurden anschließend auf Basis der Verfügbarkeit in den Produktportfolios in ihrer Verbreitung bewertet. Zudem wurden die aktuellen Ansätze auf Basis internen Planungswissens sowohl technologisch als auch in Bezug zu ihrer Anwendbarkeit evaluiert. Hierzu wurden beispielhaft verschiedene öffentlich abrufbare lichtbezogene Masterpläne (z.B. der Städte Wien und Berlin) herangezogen, um die projektbezogene Relevanz der technischen Aspekte abzuschätzen.

Abschließend wurden die Ergebnisse der qualitativen Analysen im Rahmen von bilateralen Gesprächen mit Vertretern der produzierenden Industrie abgeglichen, um einerseits die abgeleiteten Einschätzungen mittels Branchenvertretern abzusichern und andererseits zukunftsorientierte und eventuell in den Produktportfolios nicht direkt beinhaltete technologische Entwicklungen in den grundlagenorientierten Erfassungsprozess mitaufzunehmen.

Tab. 1: Kategorien und Unterkategorien, welche zur qualitativen Bewertung der Produktportfolios herangezogen wurden.

Kategorie	**Unterkategorie**
Leuchtentyp	Funktion der Leuchte; Spezialitäten
Optiktechnologie	optische Technologie; optische Effizienz; Modularität des Systems; Ausblendung; LED-Typ; Systemkonzept; Verfügbare Accessoires; Power by Cluster/Array
Lichtqualität	Dynamische LVK; Array Effekte; Farbeffekte; Farbwiedergabe; Optimiertes Spektrum
Interoperabilität	Standardisierung; Kompatibilität
Wartungsfreundlichkeit	Werkzeuglose Wartung; Sanierungseinsätze
Konnektivität	Sensorik; Multifunktionalität; Verkabelungsaufwand; Fernwartung
Produktionsmethode	Ressourcen; Materialien; Nachhaltigkeit; Zirkulare Wirtschaft
Umweltauswirkung	Lichtverschmutzung; Energetische Einsparmethoden

Der wissenschaftliche Stand wurde mittels klassischer Literaturrecherchen abgeleitet, welche sich vorrangig in Bezug zu den fünf Themenkomplexen (1) Verkehrssicherheit, Sicherheitsempfinden und urbane Attraktivität, (2) Licht und Gesundheit, (3) Interoperabilität und Technologiesouveränität, (4) Energieeffizienz und Ressourcenschonung, sowie (5) Umweltverträglichkeit und Biodiversität verorteten.

Für jeden der thematischen Bereiche wurde dabei im Abgleich zu aktuellen Normen, Richtlinien und Empfehlungen der wissenschaftliche Erkenntnisstand mittels aktueller Publikationen erfasst. Veröffentlichungen von Institutionen wie der Deutschen und Österreichischen Lichttechnischen Gesellschaft, der International Dark Sky Association oder der Österreichischen Umweltanwaltschaft wurde in diesem Prozess gesonderte Aufmerksamkeit beigemessen. Die wissenschaftliche Recherche von aktuellen Publikationen, welche im Analyseprozess eingeschlossen wurden, erfolgte vorrangig unter Nutzung der freien Suchmaschine Google Scholar. Angewandte Suchkriterien wurden dabei vorrangig unter Nutzung applikationsbezogenen Wissens formuliert. Aufgrund des übergeordneten Umfangs der inhaltlichen Fragestellungen wurde kein systematischer Erhebungsprozess in der Literatursuche angewandt.

Im Rahmen des Analyseprozesses wurden alle erfassten Publikationen qualitativ in ihrer Aussage bewertet. Die Ergebnisse zu den Einzelpublikationen wurden anschließend systematisch und themenbezogen gelistet, gegenseitig abgeglichen und auf Basis von bestehenden Erfahrungswerten konsolidiert.

LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT ÖSTERREICHS

2.2 Ableitung potenzieller Kerntechnologien

Im Abgleich der Einzelergebnisse mit Bezug auf den jeweiligen aktuellen marktbezogenen und wissenschaftlichen Stand wurden anschließend systematisch maßgebende Kerntechnologien abgeleitet, welche ein möglicherweise erhöhtes Potenzial zur Adressierung von Problemstellungen eines oder mehrerer Themenfelder aufwiesen. Hierfür wurden die für Außenraumbeleuchtungen relevanten Themenbereiche auf gegenläufige Anforderungen untersucht, darauf basierende Spannungsfelder im Abgleich zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand abgeleitet und mögliche Zukunftspotenziale und Limitationen formuliert.

Auf Basis der erzielten Beschreibungen konnten anschließend in Bezug zur vorhergehenden Marktrecherche sechs Kerntechnologien identifiziert werden, welche die Themenkomplexe sowohl hinsichtlich von Potenzialen als auch Limitationen adressieren (Tabelle 2). Die identifizierten Kerntechnologien beschränken sich dabei nicht auf einzelne Themenkomplexe, sondern stehen als technologische Maßnahme im Abgleich zu mehreren potenziellen Problembereichen, in welchen sie zukunftsorientiert eine Wirksamkeit aufzeigen können.

Tab. 2: Potenziell im Außenraum adressierbare Themenbereiche und bestehende Komplexitäten der identifizierten Kerntechnologien.

Kerntechnologie	Adressierte Themen	Komplexitäten
Adaptive spektrale Kompositionen	Licht und Gesundheit, Biodiversität	erhöhte Produktanforderungen, Planungskomplexität, abweichende spektrale Empfindlichkeiten, Kosten
Adaptive Lichtverteilungskurven	Sicherheitsfaktoren, Lichtimmission	technologische Komplexität, Kosten, Ressourceneffizienz
Nanotechnologie-basierte Optikkomponenten	Urbane Attraktivität und Lichtqualität, Energieeffizienz	technologische Komplexität, Kosten, Ressourceneffizienz, fehlende Herstellungsprozesse
Sensorik und bedarfsgerechte Beleuchtung	Biodiversität, Lichtemission, Energieeffizienz	erhöhte Systemkomplexität, Interoperabilität, Kosten
Erweiterte Systemvernetzung	Urbane Attraktivität, Energieeffizienz	erhöhte Systemkomplexität, Planungskomplexität, Interoperabilität
Maschinelles Lernen	Sicherheitsfaktoren, Energieeffizienz, Lichtimmission	Datenintensivität, ethische und rechtliche Aspekte, starke Abhängigkeit zu Sensorik, Interoperabilität

2.3 Identifikation einschränkender Einflussfaktoren

Im Abgleich zu den Anforderungen der erarbeiteten Themenkomplexe wurde anschließend mit Bezug auf die abgeleiteten Kerntechnologien ein Fragenkatalog abgeleitet, welcher im Zuge einer Online-Befragung zur Quantifizierung von sowohl technologischen Potenzialen als auch umsetzungsrelevanten limitierenden Faktoren entlang der Wertschöpfungskette herangezogen wurde.

Die Zielgruppen der Befragung erstreckten sich von Gebietskörperschaften, über Lichtplanung und die herstellende Industrie bis zu Einrichtungen für Planungsempfehlungen und Normierung, welche in Abhängigkeit zur jeweiligen Gruppe sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene adressiert wurden. In Bezug zur Zielgruppe der Gebietskörperschaften wurde die Umfrageteilnahme auf Länder mit vergleichbaren normativen Grundlagen beschränkt.

Übergeordnet fokussierte die Befragung auf die Quantifizierung des aktuellen Ist-Stands bei der Adressierung der für Außenbeleuchtungen relevanten Themenfelder, der Potenzialbewertung der erarbeiteten Kerntechnologien, sowie der Einschätzung maßgeblicher gruppeninterner Hinderungsfaktoren. Trotz dieser auf übergeordneter Ebene für alle befragten Gruppen gleichen Zieldefinition erfolgte die Befragung unter spezieller Beachtung der Anforderungen und Aufgabenbereiche der einzelnen Zielgruppen. Insgesamt wurden zur Befragung pro Gruppe ca. 70 Einzelfragen formuliert, welche in 6 dezidierte Frageblöcke kategorisiert wurden. Die vollständige Beantwortung aller Fragen nahm durchschnittlich ca. 25 Minuten in Anspruch.

2.4 Potenzialanalyse

Im Zuge der Potenzialanalyse wurden alle erfassten Kerntechnologien abschließend auf Basis der durch die Online-Befragung erhobenen Einschätzungen sowohl im Hinblick auf ihr Umsetzungspotenzial als auch den erwarteten Einfluss auf soziale, wirtschaftliche und umweltbezogene Nachhaltigkeitsaspekte bewertet und in eine Technology-Roadmap überführt. Ziel war es, die zu erwartenden technologischen und umweltbezogenen Potenziale sowohl qualitativ als auch quantitativ zu beachten. Hierfür wurden vorrangig zwei maßgebliche Faktoren zur Bewertung herangezogen.

Einerseits wurden die Kerntechnologien hinsichtlich der zu erwartenden positiven Beiträge zur Förderung von Nachhaltigkeitsaspekten in verschiedenen Applikationsbereichen bewertet. Neben einer Betrachtung des öffentlichen Raumes fokussierte die Bewertung dabei insbesondere auch auf übertragbare Effekte auf potenzielle weitere Anwendungsfelder. Andererseits wurden die Kerntechnologien unter Beachtung der abgeleiteten marktbezogenen Beschränkungsfaktoren hinsichtlich ihres potenziellen Einflusses auf Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeitsaspekte evaluiert. Die Bewertung erfolgte dabei sowohl Bezug auf den erwarteten produktbezogenen ökologischen Fußabdruck als auch im Hinblick auf die Reduktion von negativen Umwelteinflüssen.

3 Befragungsergebnisse

Insgesamt konnten im Rahmen der Online-Befragung 1.264 Personen erreicht werden. Davon gestalteten sich nach qualitativer Prüfung der erhaltenen Rückmeldungen 246 Datensätze als verwertbar (19,5% der erreichten Personen). 119 Datensätze waren vollständig (9,5% der erreichten Personen), 127 Datensätze (10,0% der erreichten Personen) teilweise verwertbar.

Da sich die adressierten Zielgruppen maßgeblich in ihrem potenziellen Stichprobenumfang unterschieden, wurden für die einzelnen Gruppen unterschiedliche Annahmen zur Bewertung der Repräsentativität getroffen. Für die Interessensgruppe der Netzbetreiber konnte keine repräsentative Stichprobe erzielt werden. Bei den restlichen Gruppen stellten die Gebietskörperschaften die meisten Rückmeldungen (126 Datensätze, 52,7%), gefolgt von der Lichtplanung (70 Datensätze, 29,3%), produzierenden Industrie (27 Datensätze, 11,3%) und Einrichtungen für Planungsempfehlungen und Normierung (16 Datensätze, 6,7%). 70,7% der Rückmeldungen erfolgten durch männliche Umfrageteilnehmer.

3.1 Themenbezogene Einschätzungen

Die voraussichtliche Entwicklung der Wichtigkeit der für Außenbeleuchtungen relevanten Themenbereiche innerhalb der nächsten 10 Jahre wurde von den Umfrageteilnehmer:innen im Allgemeinen als deutlich wichtiger werdend eingestuft. Speziell die Themen Umweltverträglichkeit und Biodiversität sowie Energieeffizienz und Ressourcenschonung erfuhren dabei jedoch eine stärkere Einstufung (60-70% der Einschätzungen als wichtiger bzw. deutlich wichtiger werdend) als die restlichen Bereiche. Gepaart mit anderen Teilfragen zeigte sich diese Einschätzung vor allem mit fehlenden Regulativen und Planungsunsicherheiten verknüpft. Die Erzielung einer adäquaten Adressierung wurde dementsprechend auch deutlich im Bereich der Bundesregierung bzw. Gesetzgebung verortet (Abbildung 1).

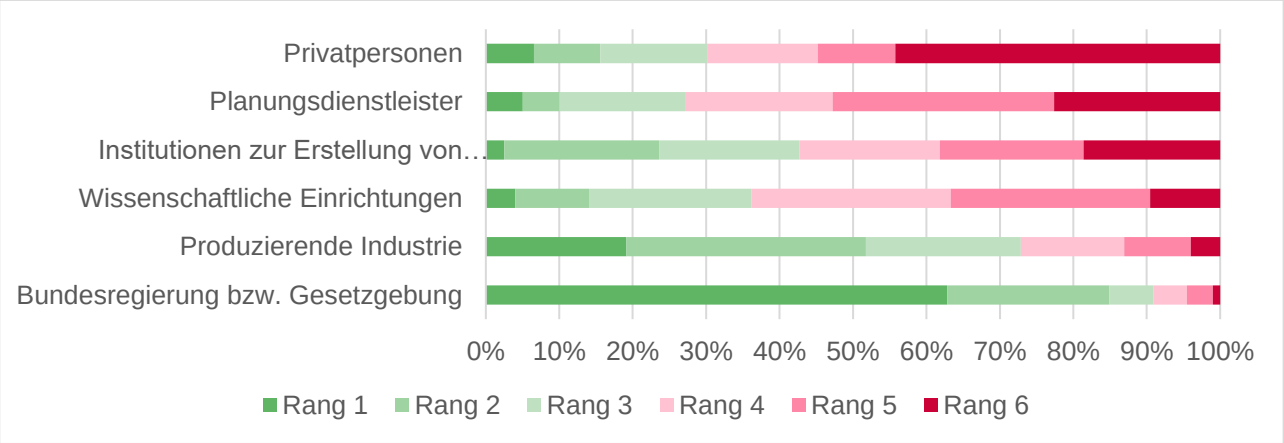

Abb. 1: Im Rahmen der Umfrage zugewiesene Verantwortungsgrade zur adäquaten Adressierung von Umweltschutzaspekten (Reihungsaufgabe)

LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT ÖSTERREICHS

3.2 Technologische Potenzialbewertung

Die Einschätzungen des Einflusses aller identifizierten Kerntechnologien erfolgte in den Aspekten Umwelt (Lichtverschmutzung und Energieverbrauch), endnutzerspezifische Faktoren (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, 4 – kein Einfluss, 7 – sehr positiver Einfluss) abgegeben.

Um im Hinblick auf den differenzierten Hintergrund und das unterschiedliche Vorwissen der Umfrageteilnehmer:innen die erweiterte Vergleichbarkeit der abgegebenen Antworten sicherzustellen, 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.

Das Ergebnis der Bewertungen der einzelnen Technologien zeigte ein sehr deutliches Bild (Abbildung 2). Obwohl grundsätzlich allen technologischen Ansätzen ein positiver Umwelteinfluss zugeschrieben wurde, erweisen sich Technologien, welche bereits bekannt oder am Markt verfügbar sind, in ihrer Komplexitätsbewertung deutlich reduziert. Die höher erwartete Komplexität von Zukunftstechnologien wie erweiterter Vernetzung, adaptiver Lichtverteilungen oder auch maschinellem Lernen resultiert dabei vor allem aus Ungewissheiten zur Anwendung, welche sich auch in den Potenzialbewertungen widerspiegelt, welche sich zurückhaltend und zu bestehenden Technologien als gleichwertig positionieren.

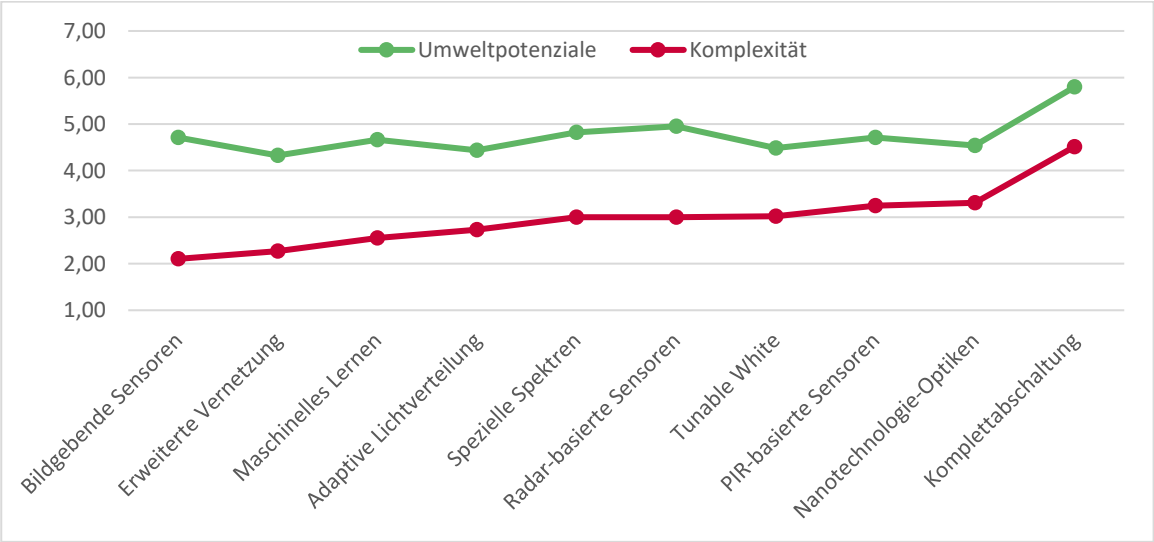

Abb. 2: Mittlere Bewertungen der Einflüsse auf umwelt- und komplexitätsbezogene Faktoren der abgefragten Technologien auf einer 7-stufigen Likert-Skala.

4 Handlungsempfehlungen

Um diesen Bewertungen Rechnung zu tragen, wurden die in drei übergeordnete Gruppen eingeteilten Handlungsempfehlungen (Abbildung 3) in Relation zur aktuellen Marktnähe des technologischen Ansatzes formuliert. Je nach Gruppe finden sich dementsprechend sowohl Empfehlungen, welche eine direkte Adressierbarkeit von Nachhaltigkeitszielen ermöglichen, als auch Ansätze zur Förderung verschiedener Entwicklungs- und Forschungsmaßnahmen, um eine langfristige Ausschöpfung von Potenzialen zu gewährleisten.

4.1 Energieeffizienz und Ressourcenschonung

Die Handlungsmaßnahmen dieser Gruppe fokussieren vorrangig auf konkrete Maßnahmen zur Reduktion aktueller Treibhausgasemissionen. Obwohl sich hierfür auch Maßnahmen in Herstellung und Entsorgung von Beleuchtungsprodukten eignen, fokussieren die Empfehlungen aufgrund der dominanten Nutzungsphase, welche sich für mindestens 99% der bestehenden Treibhausgasemissionen verantwortet, eindeutig auf Maßnahmen zur Verbesserung der energetischen Effizienz.

Im Handlungsleitfaden werden diesbezüglich vor allem Maßnahmen in Bezug zu (1) erweiterter LED-Umrüstung, (2) nächtlichen Komplettabschaltungen, (3) der Etablierung bedarfsorientierter Systeme, (4) adaptiver Lichtverteilungen, (5) nanobasierten Fertigungsverfahren und (6) biogenen Materialien beschrieben. Bei vollständiger Umsetzung aller angeführten Empfehlungen in den nächsten 10 Jahren wurde eine potenzielle Reduktion des energetischen Verbrauchs von ca. 0,35 TWh jährlich oder ca. 60.000 Tonnen CO2-Äquivalent errechnet. Die Abschätzungen beziehen sich dabei auf Außenraumbeleuchtungen, welche aktuell noch mit herkömmlichen Leuchtmitteln betrieben werden und setzen eine vollständige LED-Umrüstung aller Systeme voraus. Gegenüber dem aktuellen Verbrauch der gesamten österreichischen Außenraumbeleuchtung ergibt sich daraus eine Reduktion um ca. 30%. Der erforderliche Investitionsrahmen wurde mit rund 300 – 500 Millionen € ermittelt, welcher eine Amortisationszeit von ca. 5 bis 10 Jahren aufweisen würde.

4.2 Umweltverträglichkeit und Biodiversität

Da nächtliche Beleuchtungen über den reinen energetischen Verbrauch hinausreichend auch maßgebliche negative Effekte im Hinblick auf Biodiversitätsaspekte aufweisen, fokussieren die Handlungsempfehlungen dieser Gruppe vorrangig auf Maßnahmen zur Förderung der Umweltverträglichkeit. Wissenschaftlich gesehen stehen hierfür heute ausreichend Informationen zu Verfügung, um einen nachhaltigen Transfer in den Markt zu ermöglichen. Hierfür fehlt es heute aber vor allem an zugehörigen Bewertungsverfahren und darauf basierenden normativen Verankerungen. Eine diesbezügliche Erarbeitung der Anforderungen sollte grundsätzlich bis 2035 umsetzbar sein. Eine Abschätzung des positiven Einflusses der Maßnahmen konnte jedoch aufgrund der fehlenden Bewertungsverfahren nicht quantitativ erfolgen.

LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT ÖSTERREICHS

4.3 Interoperabilität und Technologiesouveränität

Die Handlungsmaßnahmen dieser Gruppe wurden vor allem vor dem Hintergrund der zunehmenden Digitalisierung erarbeitet und umfassen sowohl Systemvernetzungen als auch maschinelle Lernansätze. Aufgrund der Komplexität der zugehörigen Systeme und den aktuell fast nicht vorhandenen Umsetzungen in realen Anwendungsfällen verankern sich die Maßnahmen maßgeblich im Forschungsbereich. Eine mögliche Adressierung der Potenziale erweiterter Vernetzungen und maschinellen Lernens erweist sich demensprechend bis 2035 als äußerst unwahrscheinlich.

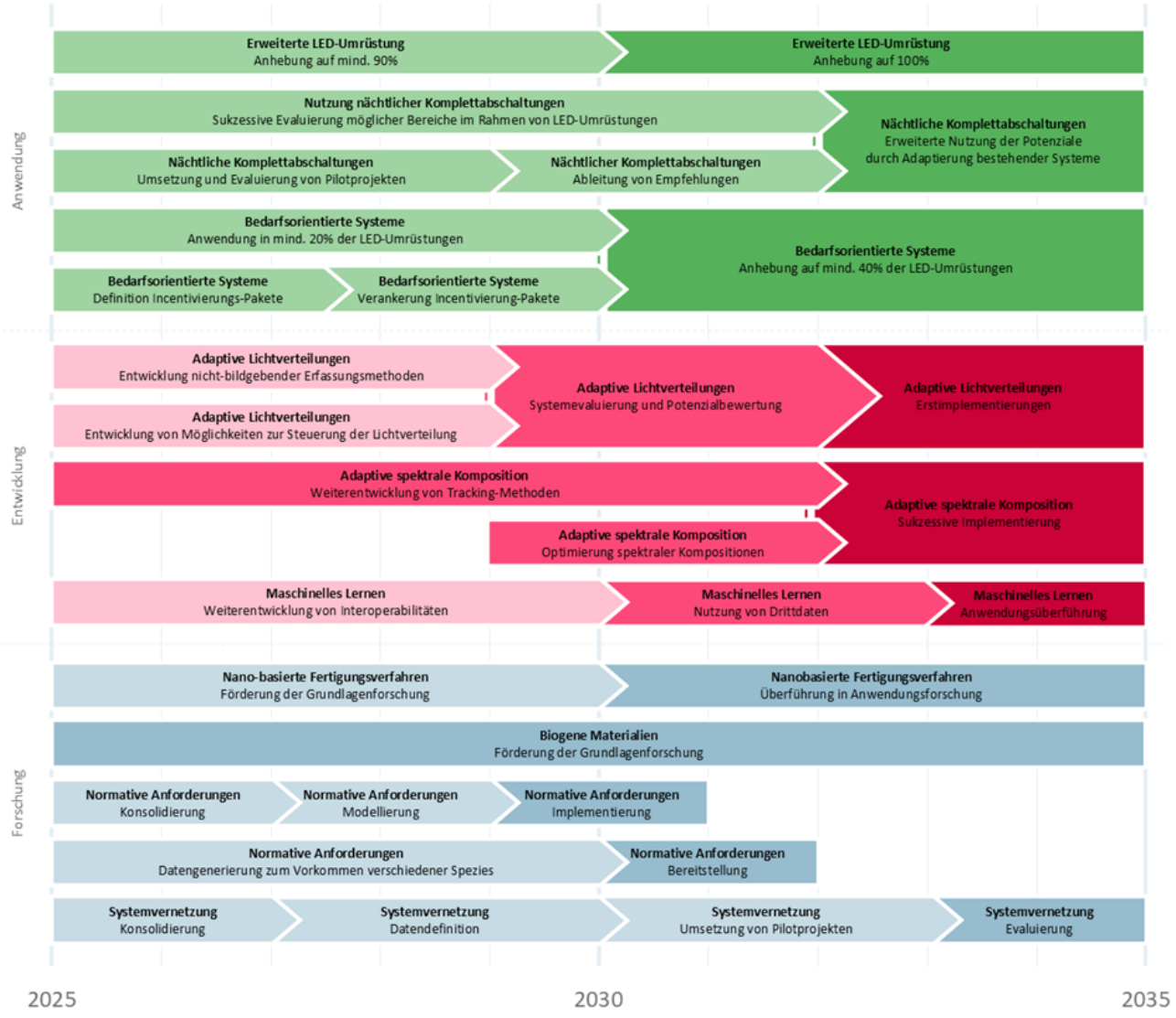

Abb. 3: Übergeordnete Darstellung der abgeleiteten Technology Roadmap unter Einschluss der Bereiche Energieeffizienz und Ressourcenschonung, Umweltverträglichkeit und Biodiversität und Interoperabilität und Technologiesouveränität.

LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT ÖSTERREICHS

5 Fazit

Außenraumbeleuchtungen werden seit jeher von einer Vielzahl verschiedener Anforderungskriterien, Akteur:innen 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 sowie des Ressourcenverbrauchs von zunehmender Wichtigkeit.

Grundsätzlich können viele der gestellten Forderungen durch den gezielten Einsatz technologischer Möglichkeiten adressiert werden. 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.

Die unterliegenden Anforderungskriterien erweisen sich dabei insofern als schlüssig, als dass heute ausreichend Grundlagenforschung betrieben wurde, um eine Überführung möglicher Lösungsansätze 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 die Auswirkungen bestehender Lichtverschmutzungen auf die Tier- und Pflanzenwelt weitestgehend gesichert werden.

Trotz der breiten Kenntnis der Herausforderungen, 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 auf Low-Tech Systemen als verantwortlich.

Darüber hinaus beziehen sich normative und regulatorische Maßnahmen weiterhin auf grundlegende wahrnehmungsbezogene Bewertungsfaktoren, unter denen sich umweltschädliche Effekte nächtlicher Beleuchtung als Zusatzziele formulieren. 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.

Das Ziel der erarbeiteten Handlungsleitfadens ist es dementsprechend, eine positive Entwicklung zu einer nachhaltigen Gestaltung von Außenraumbeleuchtungen auf einer langfristigen Ebene beizutragen. Für eine adäquate Adressierung bestehender Potenziale erweist sich jedoch der Einsatz aller beteiligten Akteur:innen entlang der gesamten Wertschöpfungskette als erforderlich.

LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT ÖSTERREICHS

Anmerkungen

Die dargestellten Ergebnisse wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) im Rahmen der F&E-Dienstleistung NOBEL (FFG-Nr. 904102) im Förderprogramm Green Photonics 2022 erarbeitet.

Der vollständige Ergebnisbericht, welcher auch die Einzelergebnisse der Befragung beinhaltet, befindet sich aktuell in Publikation und kann auch unter bezogen https://www.bartenbach.com/wp-content/uploads/2025/04/Broschuere_BMK_NOBEL.zip werden.

Referenzen

[1] The World Bank (2023). *Lighting Transformation*. The World Bank.

[2] Laing, D., Park, C. & Wang, P. (2005). A modified Harris-Todaro model of rural-urban migration for China. *Critical issues in China's growth and development*, 245-264.

[3] International Energy Agency (2022). *Lighting Tracking Report*. IEA.

[4] 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.

[5] Scholand, M. & Dillon, H. E. (2012). *Life-cycle assessment of energy and environmental impacts of LED lighting products part 2: LED manufacturing and performance*. Richland, WA: Pacific Northwest National Lab (PNNL).

[6] 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.

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

[8] 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 (ICCCT) (pp. 195-198)*. IEEE.

[9] Ylinen, A. M., Tähkämö, L., Puolakka, M. & Halonen, L. (2011). Road lighting quality, energy efficiency, and mesopic design–LED street lighting case study. *Leukos*, 8(1), 9-24.

[10] 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.

[11] Januchta-Szostak, A. (2010). The role of public visual art in urban space recognition. In *Cognitive maps*. IntechOpen.

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

[13] 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.