



# **DIPLOMARBEIT**

**Lichtimmission - Ab welchem Ausmaß ist Licht schädlich?**

zur Erlangung des  
akademischen Grades

**Diplom-Ingenieur für Elektrotechnik (FH)**

eingereicht von:

**Meyer, Tim**

geb. am 06. März 2000

Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Matthias Würfel

Auftraggeber (Firma): Dresdner Elektro-Ingenieurbüro GmbH

Betreuer (Firma): Kay Steige

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>1</b>
<b>Verzeichnis der Bilder .....</b>	<b>3</b>
<b>Verzeichnis der Tabellen .....</b>	<b>6</b>
<b>Kurzzeichenverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>10</b>
<b>Einleitung .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Grundlagen .....</b>	<b>12</b>
1.1 Begriff Immission .....	12
1.2 Lichtimmission .....	12
1.3 Lichttechnische Parameter .....	13
1.4 Normen und Richtwerte in Deutschland .....	16
1.4.1 Richtwerte der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz ....	16
1.4.2 Richtwerte der DIN EN 12464-2 .....	18
1.4.3 Richtwerte der Internationalen Beleuchtungskommission .....	19
1.4.4 Eigeninitiative: Die Sternenstadt Fulda .....	20
<b>2 Folgen von Lichtimmission .....</b>	<b>23</b>
2.1 Folgen für den Menschen .....	23
2.2 Folgen für Flora und Fauna .....	24
2.3 Folgen für die Astronomie .....	26
<b>3 Maßnahmen gegen Lichtimmission .....</b>	<b>29</b>
3.1 Die richtige Lichtverteilung .....	30
3.2 Adaptive Beleuchtung .....	32
<b>4 Simulative Planung einer Anlage .....</b>	<b>34</b>
4.1 Die Software DIALux evo .....	34
4.1.1 DIALux-Modul „Straßenbeleuchtung“ .....	34

4.1.2 DIALux-Modul „Außen- und Gebäudeplanung“ .....	35
4.2 Planungsprojekt „Blaues Band Geberbach“ in <i>DIALux evo</i> .....	36
4.2.1 Gegebenheiten/Planungsvorgaben .....	36
4.2.2 Leuchtmittel .....	38
4.2.3 Vorplanung im Modul „Straßenbeleuchtung“ .....	39
4.2.4 Nachteile der Planung im Modul „Straßenbeleuchtung“ .....	40
4.2.5 Detailplanung im Modul „Außen- und Gebäudeplanung“ .....	41
<b>5 Messung der Himmelshelligkeit .....</b>	<b>47</b>
5.1 Qualitative Messung der Himmelshelligkeit .....	47
5.2 Quantitative Messung der Himmelshelligkeit .....	47
5.2.1 Die Grenzhelligkeit.....	47
5.2.2 Visuelle Messung der Grenzhelligkeit.....	48
5.2.3 Das <i>Unihedron Sky Quality Meter (SQM)</i> .....	49
5.2.4 Lichtverschmutzungskarten .....	50
5.3 Praxisexperiment: Messungen mit dem <i>Sky Quality Meter (SQM)</i> .....	51
5.3.1 Hinführung .....	51
5.3.2 Messablauf .....	51
5.3.3 Messstandorte .....	52
5.3.4 Messbedingungen und Auffälligkeiten .....	53
5.3.5 Messergebnisse und Vergleichswerte mit Lichtverschmutzungskarte .....	54
5.3.6 Auswertung der Messergebnisse.....	57
<b>6 Umfrage .....</b>	<b>61</b>
6.1 Umfragemethoden .....	61
6.2 Umfrageablauf .....	61
6.3 Auswertung der Umfrage .....	62
<b>Zusammenfassung/Fazit.....</b>	<b>72</b>
<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>74</b>

# Verzeichnis der Bilder

<b>Abbildung 1:</b>	<i>Abhängigkeit der natürlichen Himmeshelligkeit vom aktuellen Sternenhimmel am Beispiel des 17.06.2026: Galaktisches Zentrum der Milchstraße im Zenit sichtbar in Windhoek, Namibia (links); Milchstraße nicht im Zenit sichtbar in Zwickau (rechts) [5]</i> .....	14
<b>Abbildung 2:</b>	<i>Zu sehen ist, dass der mittlere Baum, welcher nachts direkt von einem Boden-Strahler beleuchtet wird, seine Blätter nicht verloren hat. Auch eine Färbung ist zum Aufnahmezeitpunkt (09.11.2020) kaum aufgetreten. Die nebenstehenden, nicht beleuchteten Bäume haben bereits den Großteil ihrer Blätter verloren. [22]</i> .....	25
<b>Abbildung 3:</b>	<i>Sky Glow, fotografiert vom Messstandort Etzdorf (siehe Kapitel 5) in Richtung Böhrigen. Die Aufhellung des Himmels im linken Teil des Bildes wird durch das Gewerbegebiet Striegistal in Berbersdorf erzeugt. Die beiden Standorte sind etwa 5 km (Luftlinie) voneinander entfernt. [eigene Aufnahme]</i> .....	27
<b>Abbildung 4:</b>	<i>Der weiße Ring oberhalb des eigentlichen Leuchtenkörpers der Selux Beta sendet ein zusätzliches Licht aus, welches ohne jegliche Abschirmung in den Himmel leuchtet. [62, Ausschnitt]</i> .....	31
<b>Abbildung 5:</b>	<i>Die Architekturbeleuchtung der Kirche in Seifersbach strahlt über ihr Ziel hinaus. Die Strahlen sind vor allem bei Wolken noch weit über dem Bauwerk sichtbar und hellen den Nachthimmel auf. [eigene Aufnahme]</i> .....	31
<b>Abbildung 6:</b>	<i>Kommunikationsmodul (oben) und Sensormodul (unten) auf Zhaga-Sockeln [63]</i> .....	32
<b>Abbildung 7:</b>	<i>Ermittlung der Beleuchtungsklasse anhand der Anforderungen nach DIN 13201-1 [44, S.27, Tabelle 9, ausgefüllt]</i> .....	38
<b>Abbildung 8:</b>	<i>Leipziger Leuchten Alfons I DA LED [64, Ausschnitt]</i> .....	39
<b>Abbildung 9.1:</b>	<i>„optimierte“ Leuchtenparameter in DIALux evo [Screenshot aus DIALux evo, Ausschnitt]</i> .....	39
<b>Abbildung 9.2:</b>	<i>Berechnungsergebnisse der Leuchtenparameter aus Abbildung 9.1 in DIALux evo [Screenshot aus DIALux evo, Ausschnitt]</i> .....	39
<b>Abbildung 10.1:</b>	<i>verbesserte Leuchtenparameter in DIALux evo [Screenshot aus DIALux evo, Ausschnitt]</i> .....	40

<b>Abbildung 10.2:</b>	<i>Berechnungsergebnisse der Leuchtenparameter aus Abbildung 10.1 in DIALux evo, Ausschnitt].....</i>	<i>40</i>
<b>Abbildung 11:</b>	<i>Darstellung des Radwegverlaufs in DIALux evo [erstellt mit DIALux evo Raytracer] .....</i>	<i>42</i>
<b>Abbildung 12:</b>	<i>Darstellung des Smartphone-Displays in Rottönen, um Dunkeladaption der Augen nicht zu gefährden [eigene Aufnahme, verwendete App: Skyguide, 5] .....</i>	<i>49</i>
<b>Abbildung 13:</b>	<i>Messaufbau einer SQM-Messung [eigene Aufnahme].....</i>	<i>52</i>
<b>Abbildung 14:</b>	<i>Die Beleuchtung von Gewächshäusern kann ohne geeignete Abschirmung zu einer starken Himmelsaufhellung führen. [65].....</i>	<i>55</i>
<b>Abbildung 15:</b>	<i>Die Region um Naaldwijk (Westland) dargestellt im Light Pollution Atlas. Je heller die Darstellung, desto niedriger ist der SQM-Wert an dieser Stelle. [57] .....</i>	<i>56</i>
<b>Abbildung 16:</b>	<i>Mit Hilfe der zahlreichen Teleskope auf dem Roque de los Muchachos auf La Palma können Wissenschaftler unter nahezu idealen Bedingungen in die Weiten des Universums schauen. [eigene Aufnahme] .....</i>	<i>56</i>
<b>Abbildung 17:</b>	<i>Im Light Pollution Atlas ist erkennbar, dass die SQM-Werte auf La Palma wesentlich niedriger sind, da es kaum helle Bereiche wie in Abbildung 15 gibt. [57] .....</i>	<i>57</i>
<b>Abbildung 18:</b>	<i>Blick vom Mirador el Tíme über Los Llanos de Aridane (La Palma) [65] .....</i>	<i>59</i>
<b>Abbildung 19:</b>	<i>Dashboard von LamaPoll [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll] .....</i>	<i>62</i>
<b>Abbildung 20:</b>	<i>Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 2 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll] .....</i>	<i>64</i>
<b>Abbildung 21:</b>	<i>Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 3 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll] .....</i>	<i>64</i>
<b>Abbildung 22:</b>	<i>Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 4 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll] .....</i>	<i>65</i>
<b>Abbildung 23:</b>	<i>Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 4 mit Bedingung, dass Frage 3 auch mit „Ja“ beantwortet wurde [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll] .....</i>	<i>65</i>
<b>Abbildung 24:</b>	<i>Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 5 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll] .....</i>	<i>67</i>
<b>Abbildung 25:</b>	<i>Ergebnisdarstellung (gestapelt) von Frage 6 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll] .....</i>	<i>68</i>

<b>Abbildung 26:</b>	<i>Ergebnisdarstellung (Tabelle) von Frage 6 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]</i> .....	68
<b>Abbildung 27:</b>	<i>Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 7 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]</i> .....	69
<b>Abbildung 28:</b>	<i>Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 8 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]</i> .....	70
<b>Abbildung 29:</b>	<i>Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 9 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]</i> .....	70

## Verzeichnis der Tabellen

<b>Tabelle 1</b>	<i>Abhängigkeit der Immissions- und Energiewerte von der Lichtpunkthöhe .....</i>	<b>44</b>
<b>Tabelle 2</b>	<i>Ergebnisse der SQM-Messungen / Vergleichswerte / Auswertung.....</i>	<b>55</b>

## Kurzzeichenverzeichnis

BauNVO	-	Baunutzungsverordnung
BImSchG	-	Bundesimmissionsschutzgesetz
CIE	-	Commission Internationale de l'Éclairage (Internationale Beleuchtungskommission)
DALI	-	Digital Addressable Lighting Interface
DEIB	-	Dresdner Elektro-Ingenieurbüro GmbH
ESO	-	European Southern Observatory
IES	-	Dateityp für Lichtverteilungskurven
$F_{LPA/nat}$	-	Verhältnis der im Light Pollution Atlas ermittelten Himmels- helligkeit zur natürlichen Himmelshelligkeit, berechnet aus $\Delta SQM_{nat/LPA}$ mit Formel (8), dimensionslos
$F_{mess/nat}$	-	Verhältnis der gemessenen Himmelshelligkeit zur natürlichen Himmelshelligkeit, berechnet aus $\Delta SQM_{nat/LPA}$ mit Formel (8), dimensionslos
$h_{LP}$	-	Lichtpunkthöhe, Angabe in m
INNA	-	Integrated Energy Infrastructure Project for the Generation of Hydrogen and Green Ammonia
IoT	-	Internet of Things
JWST	-	James Webb Space Telescope
$k_S$	-	Blendmaß, dimensionslos
LAI	-	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz
LDT	-	Dateityp für Lichtverteilungskurven
$L_H$	-	Himmelshelligkeit, Angabe in mag/arcsec <sup>2</sup>
$L_{LPA}$	-	Leuchtdichte des Himmels, berechnet aus $SQM_{LPA}$ mit Formel (9), Angabe in cd/m <sup>2</sup>
$L_m$	-	Fahrbahnleuchtdichte, Angabe in cd/m <sup>2</sup>
$L_{mess}$	-	Leuchtdichte des Himmels, berechnet aus $SQM_{mess}$ mit Formel (9), Angabe in cd/m <sup>2</sup>

$L_S$	-	Leuchtdichte einer Blendquelle, Angabe in $\text{cd}/\text{m}^2$
$L_v$	-	Schleierleuchtdichte, Angabe in $\text{cd}/\text{m}^2$
LPI	-	Light Pollution Index, dimensionslos
$m_{\text{gr}}$	-	Grenzhelligkeit, Angabe in mag oder dimensionslos
NOAA	-	National Oceanic and Atmospheric Administration
$R_G$	-	Glare Rating (Blendungswert), dimensionslos
$R_{\text{UG}}$	-	Unified Glare Rating, dimensionslos
SQM	-	Sky Quality Meter
$SQM_{\text{LPA}}$	-	Himmelshelligkeit gemäß Light Pollution Atlas, Angabe in $\text{mag}/\text{arcsec}^2$
$SQM_{\text{mess}}$	-	gemessene Himmelshelligkeit (Messgröße des Sky Quality Meters), Angabe in $\text{mag}/\text{arcsec}^2$
$SQM_{\text{nat}}$	-	natürliche Himmelshelligkeit, Angabe in $\text{mag}/\text{arcsec}^2$
SQM-L	-	Sky Quality Meter mit Linse
TI	-	Threshold Increment, Angabe in %
$U_0$	-	Gesamtgleichmäßigkeit der Leuchtdichte, dimensionslos
$U_L$	-	Längsgleichmäßigkeit der Leuchtdichte, dimensionslos
ULOR	-	Upward Light Output Ratio, Angabe in %
$ULR / R_{\text{UL}}$	-	Upward Light Ratio, Angabe in %
$UFR / R_{\text{UF}}$	-	Upward Flux Ratio, Angabe in %
VLT	-	Very Large Telescope
VIIRS	-	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
$\Delta E_{\text{el,ges}}^{4\text{m}}$	-	Differenz der elektrischen Energie im Vergleich zur elektrischen Energie, die beim Einsatz einer Lichtpunkthöhe von 4 Metern nötig ist, Angabe in %
$\Delta F_{\text{mess/LPA}}$	-	relative Abweichung von $F_{\text{LPA/nat}}$ und $F_{\text{mess/nat}}$ , Angabe in %
$\Delta SQM_{\text{LPA/mess-abs}}$	-	absolute Abweichung von $SQM_{\text{LPA}}$ und $SQM_{\text{mess}}$ , Angabe in $\text{mag}/\text{arcsec}^2$
$\Delta SQM_{\text{LPA/mess-rel}}$	-	relative Abweichung von $SQM_{\text{LPA}}$ und $SQM_{\text{mess}}$ , Angabe in %

- $\Delta SQM_{\text{nat/LPA}}$  - Differenz aus  $SQM_{\text{nat}}$  und  $SQM_{\text{LPA}}$ , Angabe in mag/arcsec<sup>2</sup>
- $\Delta SQM_{\text{nat/mess}}$  - Differenz aus  $SQM_{\text{nat}}$  und  $SQM_{\text{mess}}$ , Angabe in mag/arcsec<sup>2</sup>
- $\Phi_{\text{Lampe}}$  - Lampenlichtstrom, Angabe in lm
- $\Phi_{\text{Leuchte}}$  - Leuchtenlichtstrom, Angabe in lm

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit sowie während meiner gesamten Studienlaufbahn unterstützt und motiviert haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Würfel, der von Beginn an Interesse am Thema meiner Diplomarbeit zeigte und mir damit die Möglichkeit eröffnete, meine Leidenschaft für die Astrofotografie mit dem Diplomstudiengang Elektrotechnik zu verbinden.

Weiterhin danke ich meinem Praxispartner, dem Dresdner Elektro-Ingenieurbüro, für die Bereitstellung des Praxisprojekts im Bereich der Beleuchtungsplanung sowie für die kontinuierliche Unterstützung und den wertvollen fachlichen Austausch während der Bearbeitung.

Ein besonderer Dank gilt außerdem meinen Kommilitonen, die mich während des Studiums durch fachlichen Austausch, gemeinsame Projektarbeiten sowie gegenseitige Motivation begleitet und unterstützt haben. Der Zusammenhalt und die konstruktive Zusammenarbeit haben wesentlich zu einem erfolgreichen und angenehmen Studienverlauf beigetragen.

Abschließend möchte ich mich ganz besonders bei meinen Eltern sowie meiner Freundin bedanken. Ihre stetige Unterstützung, ihr Vertrauen und ihre Motivation haben mich durch das gesamte Studium begleitet und mir in allen Phasen Rückhalt gegeben.

# Einleitung

Seit jeher spielt Licht eine essentielle Rolle im Alltag des Menschen – sei es als lebenswichtige Energiequelle, als unverzichtbares Sicherheitsmerkmal oder als Ausdrucksmittel in Kunst und Kultur. Doch gerade diese vielseitige Bedeutung droht durch die kontinuierlich zunehmende, oft unreflektierte Nutzung von künstlichem Licht zu verblassen, mit weitreichenden Folgen für die Natur, unser Wohlbefinden und die Wahrnehmung unseres galaktischen Umfeldes.

Infolge des anhaltenden Bevölkerungswachstums und der damit einhergehenden fortschreitenden Urbanisierung rückt die Problematik der Lichtimmission zunehmend in den Fokus. Im Vergleich zu anderen Umweltbelastungen wie Schadstoff- oder Lärmimmission wird sie bislang jedoch häufig noch vernachlässigt betrachtet. In den letzten Jahren ist allerdings ein wachsendes Interesse daran zu beobachten, der unnötigen Verschwendung von Licht entgegenzuwirken – nicht zuletzt aus ökologischen, wirtschaftlichen und energetischen Gründen.

In dieser Diplomarbeit wird das Ziel verfolgt, die Auswirkungen von Lichtimmission zu erläutern und mögliche Lösungsansätze für eine nachhaltigere Anwendung künstlicher Beleuchtung zu diskutieren. Neben der Analyse bestehender Technologien zur Reduzierung von Lichtimmission erfolgt die simulative Planung einer Liegenschaft mit dem Schwerpunkt der Beleuchtungsoptimierung. Hierfür wurde ein Radwegprojekt der Landeshauptstadt Dresden ausgewählt, welches aufgrund seines Verlaufes durch ein Gebiet mit hohen ökologischen Ansprüchen besondere Anforderungen an die Lichtqualität benötigt. Zusätzlich soll mithilfe einer Umfrage evaluiert werden, inwiefern der Umwelteinfluss Lichtimmission bekannt ist, welche Einflüsse er auf die Befragten hat und wie relevant seine Eindämmung empfunden wird.

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel und orientiert sich an den unterschiedlichen Wirkungsbereichen von Lichtimmission. Im theoretischen Teil wird zunächst der Begriff der Lichtimmission definiert und in Relation zu bestehenden Normen und Richtwerten gesetzt. Anschließend werden die Auswirkungen auf den Menschen, auf Flora und Fauna sowie auf die astronomische Beobachtung dargestellt. Kapitel drei widmet sich Maßnahmen zur Reduzierung von Lichtimmission. Darauf aufbauend wird die Beleuchtungsplanung eines Teilbereichs des Radwegprojekts *Blaues Band Geberbach* mithilfe der Software *DIALux evo* simuliert und ausgewertet. Ergänzend zur Simulation wird eine Messreihe zur Ermittlung der Himmelshelligkeit an verschiedenen Standorten durchgeführt und mit der natürlichen Himmelshelligkeit verglichen. Den Abschluss bildet die Auswertung der durchgeführten Umfrage.

# 1 Grundlagen

## 1.1 Begriff Immission

Eine Immission (lat. immissio = das Hineinlassen) beschreibt die Wirkung eines an die Umwelt abgegebenen Einflusses (Emission – lat. emissio = das Heraussenden; z.B. Luftverunreinigung, Licht, Lärm) auf Systeme (z.B. Umwelt, Mensch). [1, §3 Abs. 2]

Immissionsschutz beschreibt hierbei die Wahrung bzw. das Erreichen eines bestimmten Systemzustandes durch Vermeidung oder Begrenzung der dazugehörigen Emission.

Beispielsweise ist die Begrenzung von CO<sub>2</sub>-Immission einerseits durch das Reduzieren der CO<sub>2</sub>-Emission, andererseits auch durch den natürlichen Prozess der Photosynthese, welche den ursprünglichen Emissionsstoff in andere Bestandteile umwandelt, möglich.

Immission ist also an verschiedenen Punkten eines Systems regulierbar, jedoch sind oft mehrere parallele Schutzmaßnahmen notwendig, um die Immission ausreichend einzudämmen.

## 1.2 Lichtimmission

Gemäß des Bundes-Immissionsschutzgesetzes ist Licht ein auf „Menschen, Wild- und Nutztiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre, das Klima sowie Kultur- und sonstige Sachgüter einwirkende[r]“ [1, §3 Abs. 2] Umwelteinfluss. Lichtimmission, auch bekannt als Lichtverschmutzung, ist die Einwirkung von natürlicher oder künstlicher Beleuchtung auf ein solches System. Dabei lassen sich verschiedene Wirkungsbereiche (z.B. Verkehrssicherheit, Architektur, Sport) mit unterschiedlichen Anforderungen an die Lichtqualität und -quantität aufstellen. Im Allgemeinen beschreibt sie den überschüssigen Lichtanteil, welcher meist negative Auswirkungen zur Folge hat.

Es existieren vier Arten von Lichtimmission, die verschiedene Folgen herbeiführen, welche unabhängig voneinander betrachtet werden müssen und deren Vermeidung je nach Standort mehr oder weniger Priorität haben kann.

Viele Menschen bekommen in Vollmondnächten kein Auge zu. Andere haben dieses Problem jede Nacht, wenn ihr Schlafzimmer ungewollt durch Außenbeleuchtungsanlagen erhellt wird. Man spricht hier von *Light Trespass* (engl. für Lichteinfall). Aber nicht nur wir Menschen leiden unter diesem Einfluss. Auch Pflanzen und Tiere sind von ungewollt einfallendem Licht betroffen und können somit in ihrer Aktivität gestört werden.

Eine weitere Art der Lichtverschmutzung ist die Blendung (engl. *Glare*). Blendung wird durch zu hohe Lichtströme, mangelhaft abgeschirmte Leuchten oder Inhomogenität verursacht. Folgen können eine eingeschränkte Sicht oder temporäre Blindheit sein.

*Unstetige Beleuchtung, Lichtchaos* oder *Flimmern* sind Begriffe, die als Synonym für das englische Wort *Light Clutter* genutzt werden. Damit sind helle, unstetige und/oder flimmernde Anordnungen von vielen einzelnen Leuchten gemeint, die überfordernd, ablenkend oder chaotisch wirken können [2, S: 69], z.B. eine ungleichmäßige Straßenbeleuchtung oder eine Vielzahl von leuchtenden Werbetafeln, wie am Time Square in New York.

Zuletzt steht die Himmelsaufhellung (engl. *Sky Glow*) für eine „Lichtglocke“ über besonders hellen Gebieten, wie Großstädten oder Industriegebieten. Diese Aufhellung mindert die astronomischen Beobachtungsbedingungen am Emissionsort, oft aber auch mehrere Dutzend Kilometer davon entfernt. Ursache hierfür sind meist nicht abgeschirmte Leuchten, die direkt in Richtung des Nachthimmels strahlen, oder zu stark beleuchtete Flächen, die dann wiederum einen erheblichen Teil in den Nachthimmel reflektieren.

### 1.3 Lichttechnische Parameter

Um die Beleuchtung eines Systems zu beschreiben sind einige Parameter, die miteinander im Einklang stehen, von Bedeutung. Diese Beleuchtungsparameter können Eigenschaften einer Lichtquelle sein oder die Wirkung dieser beschreiben.

*Der Lichtstrom  $\Phi$*  gibt die Leistung an, welche eine Lichtquelle in alle Richtungen emittiert und wird in Lumen (lm) gemessen. Er beschreibt den Teil der elektrischen Leistung, welcher in Licht umgesetzt wird. So beläuft sich der Lichtstrom einer Glühlampe mit einer Nennleistung von 100 W auf etwa 1000 bis 1500 lm. [3, S. 42, Tabelle 1.3.1]

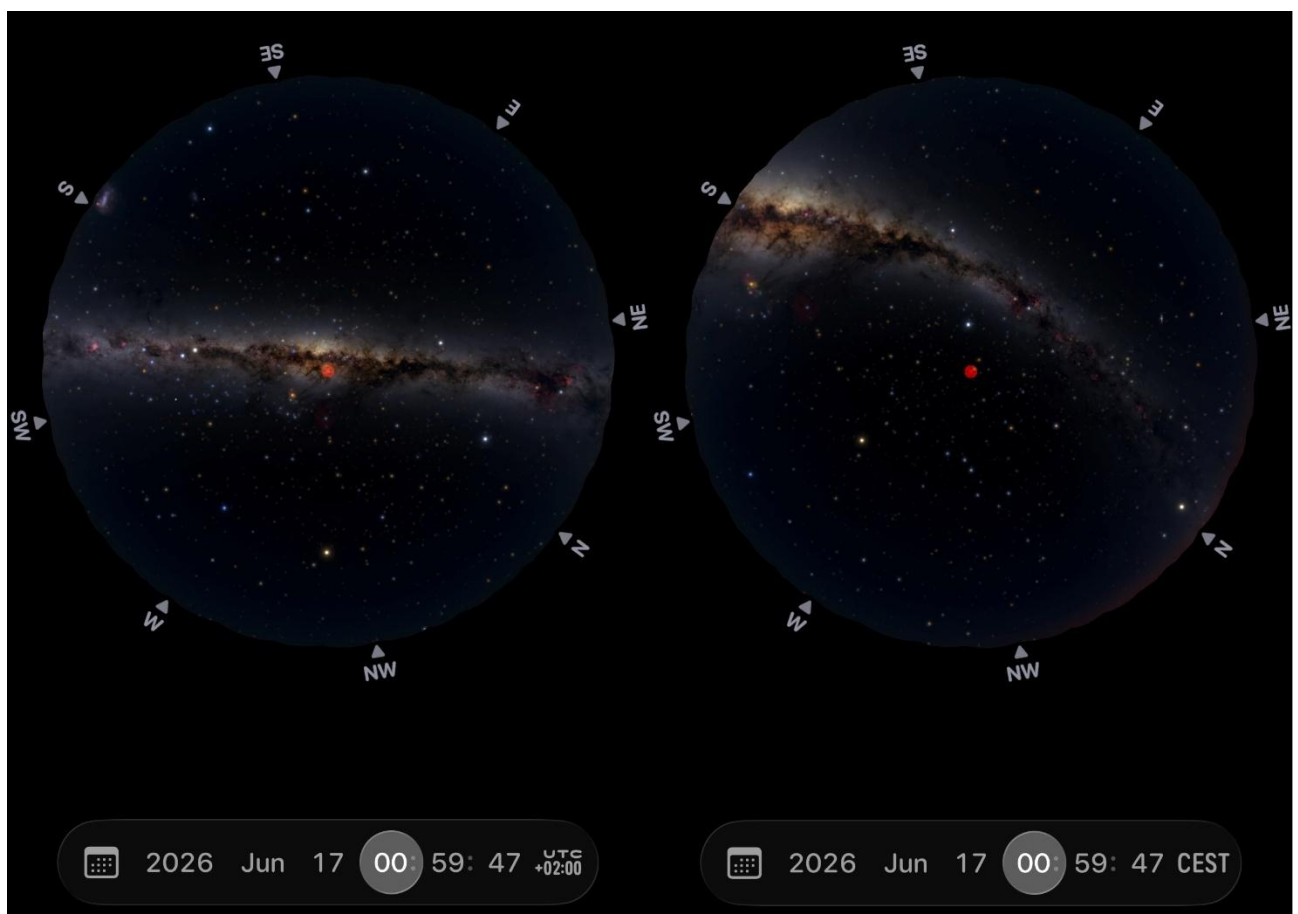
*Die Lichtausbeute  $\eta$*  beschreibt den Wirkungsgrad eines Leuchtmittels als Verhältnis aus Lichtstrom zu elektrischer Leistung und wird in Lumen pro Watt (lm/W) angegeben. Bei Glühlampen beträgt die Lichtausbeute etwa 10 lm/W bis 15 lm/W, bei modernen LEDs sind Werte über 200 lm/W möglich. [3, S. 42, Tabelle 1.3.1]

*Die Lichtstärke  $I$*  beschreibt den Teil des Lichtstromes  $\Phi$ , der in eine bestimmte Richtung abgestrahlt wird, angegeben in Candela (cd). Sie ergibt sich aus dem Verhältnis vom Lichtstrom ( $\Phi$ ) zum Raumwinkel ( $\Omega$ ) und wird zudem benötigt, um Lichtverteilungskurven zu erstellen [3, S. 29].

*Die Beleuchtungsstärke  $E$*  gibt den Lichtstrom an, der auf eine bestimmte Fläche fällt und wird in Lux (lx) gemessen. Die Beleuchtungsstärke ist invers quadratisch abhängig von der Entfernung der Lichtquelle [3, S. 30-35.].

*Die Leuchtdichte  $L$*  beschreibt den Helligkeitseindruck, der dem Auge durch eine leuchtende Fläche vermittelt wird [3, S. 36]. Sie berücksichtigt den Reflexionsgrad der betrachteten Fläche. Angegeben wird die Leuchtdichte in  $\text{cd/m}^2$  [3, S. 35-36].

Die *Himmelshelligkeit (im Zenit)*  $L_H$  ist eine auf den Himmel übertragene Leuchtdichte, welche gewöhnlich in Größenklasse pro Quadratbogensekunde ( $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ ) angegeben wird, da sie zum Vergleich mit der Helligkeit von Sternen herangezogen wird. Im Gegensatz zur Leuchtdichte in  $\text{cd}/\text{m}^2$  ist die Skalierung umgekehrt logarithmisch [4, S.41]. Je höher also der ermittelte Wert, desto dunkler ist der Himmel. Sie ist zudem von vielen Faktoren abhängig. Bewölkung, Nebel oder Luftverschmutzung, aber auch der Mond und atmosphärische Phänomene, wie Polarlichter oder leuchtende Nachtwolken, beeinflussen die Messergebnisse direkt. Aufgrund dessen sollten Messungen zur Himmelshelligkeit in mond- und wolkenlosen Nächten durchgeführt werden [4, S.41]. Ein Vergleich der genannten Auswirkungen durch eben genannte Einflüsse findet in Kapitel 5 statt. Zusätzlich ist die Himmelshelligkeit vom aktuellen Sternenhimmel abhängig. Beispielsweise ist in Windhoek (Namibia) am 17. Juni das galaktische Zentrum der Milchstraße direkt im Zenit zu sehen [5]. In Zwickau hingegen ist dieses nur am Horizont sichtbar, im Zenit befindet sich ein Bereich der Milchstraße, welcher wesentlich ausgeblancheter erscheint. Folglich kann die natürliche Himmelshelligkeit in Namibia in geringem Maße heller sein, als sie es in Zwickau ist. In Abbildung 1 ist der Unterschied sichtbar.



**Abbildung 1:** Abhängigkeit der natürlichen Himmelshelligkeit vom aktuellen Sternenhimmel am Beispiel des 17.06.2026: Galaktisches Zentrum der Milchstraße im Zenit sichtbar in Windhoek, Namibia (links); Milchstraße nicht im Zenit sichtbar in Zwickau (rechts) [5]

*Die Farbtemperatur  $T$*  dient der quantitativen Beschreibung der Farbwirkung einer Lichtquelle. Die Maßeinheit hierfür ist Kelvin (K). Dabei deutet ein hoher Wert (z.B. 5000 K) auf einen kälteren Farbton als ein niedrigerer Wert (z.B. 2700 K). Grundlage für diese Skala ist ein Experiment, bei dem ein schwarzer Körper, welcher 100 % des Lichtes absorbiert, erhitzt wird. Ab einer bestimmten Temperatur beginnt dieser zu leuchten. Die Farbe ändert sich dabei mit zunehmender Temperatur von Rot über Weiß zu Blau. Die jeweilige Farbe wird der Temperaturänderung damit einem Wert in der Einheit Kelvin zugeordnet [3, S. 44-45].

*Das Glare Rating  $R_G$*  (Blendungswert) ist ein Maß zur Beurteilung der psychologischen Blendung durch Außenbeleuchtung. Je höher der Wert, desto störender wird die Blendung einer Leuchte in der Regel empfunden. Diese Betrachtung ist besonders dann wichtig, wenn die Sehaufgabe nicht horizontal, sondern auch vertikal erfolgen kann, z.B. Montagearbeiten über dem Kopf oder bei Sportarten wie Volleyball. Die Werte (dimensionslos) bewegen sich in einem Bereich von  $<10$  bis  $>90$ , wobei ein Wert von 50 in der Regel nicht überschritten werden sollte [8, S. 16-17]. Eine genaue messtechnische Feststellung ist nicht möglich, da die Wahrnehmung psychologischer Blendung subjektiv ist.

*Das Blendmaß  $k_s$*  gibt Auskunft über die psychologische Blendwirkung einer Lichtquelle, indem es anzeigt, wie viel heller eine Lichtinstallation im Vergleich zu ihrer Umgebung wirkt [6].

*Die Schleierleuchtdichte  $L_v$*  beschreibt ein Phänomen, bei dem Streulicht im Auge wie ein Schleier wirkt und den Sehkontrast negativ beeinflusst [3, S. 65]. Dies kann zur temporären Sehschwierigkeit bei der Erkennung von Objekten führen. Mit zunehmendem Alter kann die Auswirkung wesentlich stärker werden, da die Lichtstreuung zunimmt [3, S.66; 4, S. 135].

*Die prozentuale Schwellenwerterhöhung (Threshold Increment)  $TI$*  gibt Auskunft über die Erhöhung der Sehschwelle, bei welcher Objekte mit abweichender Leuchtdichte noch erkannt werden können. Ist diese zu hoch, können selbst kontrastreiche Objekte, wie ein Fußgänger, der die Straße überquert, nicht oder nur zu spät erkannt werden. Ausgelöst wird dieser zu hohe Leuchtdichteunterschied durch eine zu hohe Schleierleuchtdichte oder eine zu geringe Hintergrundhelligkeit [3, S.367]

*Die Upward Light Ratio  $R_{UL}/ULR$*  beschreibt den Anteil des Lichtstroms, welcher oberhalb der Leuchte abgestrahlt wird. Sie ist ein Maß zur Quantifizierung von Himmelsaufhellung und wird von den meisten Leuchtenherstellern im Datenblatt angegeben. Diese Angabe setzt allerdings voraus, dass die Leuchte nicht geneigt wird [4, S.131].

*Die Upward Flux Ratio  $R_{UF}/UFR$*  beschreibt die Summe der Upward Light Ratio  $ULR$  und des nach oben reflektierten Anteils des Lichtes [4, S. 102]. Sie wird simulativ ermittelt und kann nicht gemessen werden. Im Vergleich zur Upward Light Ratio ermöglicht sie eine genauere Quantifizierung der Himmelsaufhellung.

## 1.4 Normen und Richtwerte in Deutschland

In Deutschland beschäftigen sich insbesondere die DIN EN-Norm 12464-2, die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) und die Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) mit Lichtimmission. Ein deutschlandweites Gesetz, welches die Eindämmung von Lichtimmission zum Ziel hat, gibt es aktuell nicht. Aufgrund dessen ist es für Beleuchtungsplaner schwierig, eine allgemein gültige Verfahrensweise zur Einhaltung von möglichst niedriger Lichtimmission zu entwickeln. Dies ist vermutlich auch ein Grund dafür, warum das Thema größtenteils nur oberflächlich betrachtet wird. Einige Städte und Regionen, z.B. die „Sternenstadt“ Fulda, haben sich deswegen entschieden, eigene Maßnahmen zu treffen sowie selbstständig, in Zusammenarbeit mit Experten, Grenzwerte festzulegen.

### 1.4.1 Richtwerte der *Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz*

Die Publikation „Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen“ der *Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI)* zählt „Anlagen zur Beleuchtung des öffentlichen Straßenraumes, Beleuchtungsanlagen von Kraftfahrzeugen und dem Verkehr zugeordnete Signalleuchten“ [7, S.3] auf Grundlage des §3 Abs. 5 BImSchG (Bundesimmissionsschutzgesetz) nicht zum Anwendungsbereich. Vielmehr wird die Beleuchtung von gewerblich und kulturell genutzten Anlagen thematisiert. Dabei schließt das Bundes-Immissionsschutzgesetz die nicht betrachteten Anlagen mit dem Punkt „Betriebsstätten und sonstige ortsfeste Einrichtungen“ [1, §3 Abs. 5 BImSchG] jedoch nicht explizit aus.

Das LAI-Dokument legt Richtwerte für die Raumaufhellung und Blendung fest. Dabei wird das Ausmaß der geforderten Werte anhand verschiedener Gebiete (nach Baunutzungsverordnung) und zu verschiedenen Zeitpunkten kategorisiert. So haben Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten die niedrigsten, Kern-, Gewerbe- und Industriegebiete die höchsten Grenzwerte. Mit steigender Umgebungshelligkeit steigt auch die maximal zulässige Raumaufhellung. Ausdrücklich erwähnt wird zudem, dass bei Überschreiten der Immissionsrichtwerte trotz bereits getroffener, verhältnismäßiger Emissionsminderungs- und Immissionsschutzmaßnahmen, eine Einordnung in die nächstschlechtere Klasse erfolgen sollte. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn Wohngebiete sehr nah an stark lichtemittierende Anlagen, wie z.B. Sport-Stadien oder Industriegebiete gebaut wurden. In solchen Fällen ist eine störende Wirkung zwangsläufig gegeben [7, S.3].

Die Beurteilung der Raumaufhellung erfolgt anhand der mittleren Beleuchtungsstärke am Immissionsort  $\bar{E}_F$  (in lx), direkt am Fenster. [7, Seite 5, Tabelle 1] Diese Auswirkung lässt sich bereits in einer Beleuchtungssimulation mit einer senkrechten Berechnungsfläche überprüfen.

Zudem wird in konstant abstrahlendes Licht (Änderung des Betriebszustandes aller 5 Minuten oder seltener) und Wechsellicht (Änderung des Betriebszustandes innerhalb von 5 Minuten, z.B. blinkende Leuchtreklame) unterschieden, da zweiteres in der Regel als störender empfunden wird. Bei Wechsellicht ergibt sich je nach Periodendauer bzw. Frequenz ein Faktor [7, S. 6, Tabelle 1a], welcher mit der vorher real oder simulativ ermittelten mittleren Beleuchtungsstärke  $\bar{E}_F$  multipliziert wird. Bei einer Periodendauer von 1,5 s bis 2 s darf die mittlere Beleuchtungsstärke  $\bar{E}_F$  also beispielsweise nur noch ein Drittel des in Tabelle 1a gegebenen Wertes betragen [7, S. 6, Tabelle 1a]. Bei intensiv farbigem Licht gilt ein Faktor von 2. Die Faktoren werden jedoch nicht multipliziert, der jeweils höhere Wert ist zu verwenden [7, S.6].

Der Blendungsrichtwert beschreibt die „maximal tolerable mittlere Leuchtdichte“ [7, S.8]  $\bar{L}_{\max}$  einer blendenden Lichtquelle und ist abhängig von der Umgebungsleuchtdichte  $L_U$ , dem Raumwinkel  $\Omega_S$  und einem Proportionalitätsfaktor  $k$ , welcher den vorgegebenen Richtwert, ebenfalls wie die mittlere Beleuchtungsstärke zeit- und gebietsabhängig, abbildet. Dies berechnet sich mit Formel (1) [7, S.8, Formel (2)]:

$$\bar{L}_{\max} = k \cdot \sqrt{\frac{L_U}{\Omega_S}} \quad (1)$$

Nach  $k$  umgestellt ergibt sich Formel (2) für das Blendmaß  $k_S$  [7, S.8, Formel (3)]:

$$k_S = \bar{L}_S \cdot \sqrt{\frac{\Omega_S}{L_U}} \quad (2)$$

$L_S$  beschreibt hier die Leuchtdichte der Blendlichtquelle und berechnet sich folgendermaßen [7, S.11, Formel (5)]:

$$\bar{L}_S = \frac{I}{F_P} \quad (3)$$

$I$  ist dabei die Lichtstärke und  $F_P$  ist die Lichtaustrittsfläche. Die Lichtstärke  $I$  ist das Verhältnis aus Lichtstrom  $\Phi$  und Raumwinkel  $\Omega$  gemäß Formel (4) [3, S. 29]:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (4)$$

Somit ergibt sich Formel (5) für das Blendmaß  $k_S$  aus Formel (2), (3) und (4):

$$k_S = \frac{\Phi}{\Omega \cdot F_P} \cdot \sqrt{\frac{\Omega_S}{L_U}} \quad (5)$$

In Beleuchtungssimulations-Softwares, wie *DIALux evo*, kann dieser Wert automatisch ermittelt werden.

Außer diesen zwei Bewertungskriterien gibt es keine weitere Betrachtung, was für eine Beurteilung der auftretenden Lichtimmission ungenügend ist.

#### 1.4.2 Richtwerte der *DIN EN 12464-2*

Die *DIN EN 12464-2* legt maximale zulässige Störlichtwerte für fünf verschiedene Umweltzonen (E0 bis E4) fest. E0 beschreibt natürlich dunkle Gebiete, wie Sterneparks der International Dark Sky Association oder große Observatorien, z.B. das Roque de los Muchachos Observatory auf der kanarischen Insel La Palma oder die Winklmoosalm in den bayrischen Alpen. Die Zone E1 beinhaltet Nationalparks sowie Schutzgebiete, etwa die Sächsische Schweiz. Die Zonen E2 bis E4 verlaufen von Wohn- und Industriegebieten in ländlichen Regionen (E2) über jene in urbaneren Gebieten (E3) bis hin zur Großstadt (E4) [8, Abschnitt 5.5, Tabelle 4]. Mit steigender Nummer wird die Anforderung an die Lichtimmissionswerte weniger streng. Tabelle 4 der Norm gibt Grenzwerte für die vertikale Beleuchtungsstärke  $E_V$ , Lichtstärke  $I$ , oberen Lichtstromanteil  $R_{UL}$  (engl. *upward light ratio*) sowie Leuchtdichte an Gebäudefassaden  $L_b$  und von arbeitsbezogenen bzw. Hinweisschildern  $L_S$  vor, wie etwa Notausgangszeichen oder Warnschilder.

Bei  $E_V$  und  $I$  wird zusätzlich in „vor Geltungszeit“ und „nach Geltungszeit“ unterschieden. Mit „Geltungszeit“ ist hierbei der Zeitpunkt gemeint, ab dem die strengeren Regeln gelten, etwa bei einer Umrüstung der Anlage oder nach einer behördlich definierten Zeit. [8, Abschnitt 3.3] Beide Werte erfahren nach der Geltungszeit eine deutliche Einschränkung, was positiv zu bewerten ist [8, Abschnitt 5.5, Tabelle 4].

Der obere Lichtstromanteil  $R_{UL}$  gibt Auskunft über den Anteil an Lichtstrom, welcher oberhalb der Horizontalen abgestrahlt, und somit verschwendet wird. [8, Abschnitt 5.5, Tabelle 4] Dies wird durch ungenügende Abschirmung oder zu starke Neigung der Lichtquelle verursacht. Die Beschränkung dieses Wertes ist besonders zur Eindämmung von *Sky Glow* („Lichtlocken“ über großen Städten/Industriegebieten) wichtig. Das Ziel sollte sein, in allen Umweltzonen eine  $R_{UL}$  von 0% zu erreichen, da diese ausschließlich den von der Leuchte ausgehenden Lichtstrom beschreibt. Problematisch wird dies jedoch bei der Verwendung von elektronischen Werbetafeln, da diese zur Seite und nicht direkt nach unten leuchten,

sowie *Skybeamern*, welche direkt in den Himmel strahlen. Infolgedessen ist eine vollständige Abschirmung oberhalb der Horizontalen schwierig bis kaum umzusetzen [9], wenn diese Lichtinstallationen weiterhin verwendet werden.

Die (mittlere) Leuchtdichte der Fassade  $L_b$  grenzt das Auftreten von Raumaufhellung ein. Es wird vermieden, dass Fassaden zu viel Licht abbekommen und somit Anwohner durch einfallendes Licht gestört werden.

Die (mittlere) Leuchtdichte von Schildern ist in allen Zonen, außer der Zone E0 im Vergleich zur Leuchtdichte der Fassade ziemlich hoch angesetzt. Dies lässt sich damit erklären, dass hier ein Sicherheitsaspekt verfolgt wird. Die Abwendung von Gefahren besitzt stets die höchste Priorität.

Anhang C der *DIN EN 12464-2* weist darauf hin, dass in Deutschland, anstatt der Umweltzonen (E0 bis E4), eine Einteilung nach der Baunutzungsverordnung (*BauNVO*) erfolgt. Die mittlere Beleuchtungsstärke weicht ab, es wird jedoch nicht angegeben, nach welcher Norm sich in diesem Fall gerichtet wird. Zudem existiert ein eigenes Blendungs-Bewertungsverfahren, welches die Lichtstärke von Tabelle 4 [8, Abschnitt 5.5, Tabelle 4] ersetzt [8, Anhang C, A-Abweichungen]. Die *BauNVO* gibt insgesamt zwölf Gebiete vor [10, §1, Abs. 2].

### 1.4.3 Richtwerte der Internationalen Beleuchtungskommission

Der Technische Report *Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations, 2<sup>nd</sup> Edition*, auch bekannt als *CIE150:2017*, ist ein Leitfaden der Internationalen Beleuchtungskommission (*CIE – Commission Internationale d’Eclairage*). Ihr gehören mehr als 30 Länder an, so auch Deutschland. [11] Das 56-seitige Dokument hat das Ziel, die Auswirkungen von mangelhafter Beleuchtung zu thematisieren und einzudämmen. Hierfür empfiehlt die *CIE* Richtwerte, welche nach Umweltzonen und Nutzungszeiten definiert werden.

Ähnlich wie die *DIN EN 12464-2* gibt die *CIE150* fünf Umweltzonen, *E0* bis *E4*, vor, die ähnlich eingeteilt sind. Gebiete der Zone *E0* sind beispielsweise *Dark Sky Parks* der Organisation *DarkSky International* oder Observatorien, *E1* bis *E4* kategorisiert Gebiete anhand zunehmender Bevölkerungsdichte, *E4* steht dabei generell für Großstädte und Industriegebiete. Neben dieser Einordnung wird zum Schutz von (optischen) Beobachtungen in Observatorien ein zusätzlicher Radius um diese ebenfalls als gleiche Umweltzone gesehen. Befindet sich ein wissenschaftliches Observatorium also beispielsweise im ländlichen Raum und wird der Zone *E0* zugeordnet, sollten alle Standorte innerhalb von 100 km Entfernung ebenfalls die Anforderungen der Umweltzone *E0* erfüllen, egal, ob es sich dabei um kleine Orte, Großstädte oder Industriegebiete handelt. Für kleinere Observatorien, die in

urbaneren Gebieten errichtet wurden, genügt die Einhaltung der Werte von Zone E2 in einem Umkreis von 30 km [12, S.8].

Es wird meist in zwei Anwendungszeiten unterschieden: *pre-curfew* und *post-curfew*. Dies bedeutet, dass es Richtwerte für die Beleuchtung bis zu einer bestimmten „Schwell“-Uhrzeit (z.B. 22 Uhr) und danach gibt. Dabei wird stets eine Absenkung der Beleuchtungsintensität und der damit verbundenen Emissionen nach der Schwelle (*post curfew*) angestrebt. Die genaue Schwelle ist anhand von Nutzungszeiten der zu beleuchtenden Sehaufgabenbereiche festzulegen.

Tabelle 2 der *CIE150* gibt Grenzwerte für die vertikale Beleuchtungsstärke  $E_v$  an Gebäuden vor. Dies soll vor allem den Eintritt von Licht durch Fenster eindämmen. Während Gebäude der Umweltzone *E0* zu keiner Zeit beleuchtet sein sollten, liegt das Limit in Zone *E1* vor der Schwellzeit bei 2 Lux, danach sollte es jedoch kleiner als 0,1 lx sein, also maximal ein Zwanzigstel des *Pre-Curfew-Wertes*. In allen anderen Umweltzonen beträgt dieses Verhältnis eins zu fünf (*E2*: 5 lx → 1 lx; *E3*: 10 lx → 2 lx; *E4*: 25 lx → 5 lx) [12, S.8, Table 2].

Abschnitt 3.6.5.2 regelt die maximale Lichtstärke von Leuchten im Sichtfeld in Abhängigkeit zur Entfernung (Lichtquelle → Beobachter) und Lichtaustrittsfläche (bzw. Projektionsfläche, engl. *projected area*) der Leuchte, auch wieder unterteilt in die fünf Umweltzonen. Das Ziel dieses Wertes ist die Begrenzung von Blendung, welche durch zu helle Leuchtmittel verursacht wird [12, S. 8]. Hierbei geht es allerdings nicht um kurzfristige, sondern längerfristige Einstrahlung, welche bei Anwohnern angrenzender Wohngrundstücke zu Unbehagen führen kann. Strahlen helle Lichtquellen ohne Abschirmung, besteht die Gefahr einer ungewollten Aufhellung von Nachbarschaft und Natur (*Light Trespass*). Zudem können besonders hell beleuchtete Stellen die Wahrnehmbarkeit dunklerer Stellen durch eine Erhöhung der Schleierleuchtdichte  $L_v$  (physiologische Blendung) verringern und so potenzielle Gefahrenbereiche unsichtbar machen [13, S. 8-9]. Die Blendung kann zudem das Zukneifen der Augen hervorrufen und somit vor allem die Verkehrssicherheit gefährden, da die räumliche Wahrnehmung möglicherweise eingeschränkt wird, was zu einer mangelhaften Detektion der Straßenverläufe oder Kollisionsunfällen führen kann.

Die *CIE150* ist eine freiwillig anwendbare Richtlinie und keine festgelegte Norm in Deutschland.

#### **1.4.4 Eigeninitiative: Die Sternenstadt Fulda**

Die Stadt Fulda setzt sich seit einigen Jahren gegen Lichtverschmutzung ein und wurde 2019 durch die Organisation *DarkSky International* als erste *Sternenstadt* Deutschlands ernannt [14]. Neben sieben weiteren Orten, wie dem Nationalpark Eifel oder dem Naturpark

Westhavelland, ist sie weiterhin die einzige Stadt in Deutschland, die von *DarkSky International* als *Dark Sky Community* anerkannt wurde [15].

Dies liegt daran, dass sich Verantwortliche der hessischen Stadt ein Konzept überlegt haben, um Lichtmissionen in der eigenen Stadt und im angrenzenden Mittelgebirge Rhön, welches zudem ein *International Dark Sky Reserve* ist [15] möglichst niedrig zu halten.

Es wurde eine Richtlinie erstellt, welche sowohl Vorgaben für funktionale Beleuchtung (z.B. Beleuchtung von Verkehrsflächen oder Industrieanlagen) als auch gestalterische Beleuchtung (z.B. Fassaden- oder Schaufensterbeleuchtung) festlegt [16, S.4]. Dabei wird darauf verwiesen, dass „alle gültigen Vorschriften, Normen und Arbeitsstättenrichtlinien als Planungsgrundlage einzuhalten [sind]“ [16, S.4]. Das Ziel ist also nicht, die Beleuchtung einfach dunkler einzustellen und somit Gefahren, wie verringerte Verkehrssicherheit, hervorzurufen. Vielmehr soll Beleuchtung gezielt und ausschließlich dort eingesetzt werden, wo sie tatsächlich benötigt wird, nur dann und in dem Ausmaß, wie es erforderlich ist und vorzugsweise in warmen Farbtönen ( $T \leq 3000$  K) leuchten [16, S4-5]. Dies sind auch genau die fünf Punkte, die *DarkSky International* als „Fünf Prinzipien für verantwortungsvolle Außenbeleuchtung“ (engl. „Five Principles for Responsible Outdoor Lighting“) festlegt [17].

In Hinsicht auf die Richtung des Lichtes wird eine  $R_{UL}$  (*upward light ratio*) von 0% angestrebt. Freistrahkende Leuchten und Leuchten, die in den oberen Halbraum (oberhalb der Leuchte) strahlen sind nicht zulässig [16, S.5]. Folglich sind auch direkt in den Himmel strahlende Leuchten, wie *Skybeamer* nicht erlaubt. [16, S.8]. Dekorative Beleuchtung, z.B. das Anstrahlen von Wahrzeichen muss stets so erfolgen, dass nur der gewünschte Bereich beleuchtet wird. Ist dies nicht möglich, ist das Anstrahlen ausschließlich von oberhalb des Objektes erlaubt [16, S.7].

Die Lichtmenge orientiert sich an den genormten Werten (z.B. *DIN 13201* für Straßenbeleuchtung), stellt aber auch gleichzeitig den maximal gewünschten Wert dar [16, S.5]. Oftmals werden deutlich höhere Werte für Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte in Kauf genommen, um an einer anderen Stelle den geforderten Wert einzuhalten. Die Folge können beispielsweise die Blendung von Verkehrsteilnehmern sowie unnötige Aufhellung des Nachthimmels sein. Mit Hilfe einer durchdachten und gründlichen Planung lässt sich dies allerdings verhindern.

Die Beleuchtung von Verkehrsflächen in nicht bebauten Randbereichen soll möglichst vermieden werden [16, S.5]. Problematisch wird dies allerdings in mancherlei Hinsicht beim Einhalten der Normen für Verkehrsbereiche wie Fahrradwege. Aufgrund dessen wurden bestimmte Fahrradwege mit einer adaptiven Beleuchtung ausgestattet. Man spricht hierbei auch von *Light on Demand* oder *adaptiver Beleuchtung*. Die Lichtquellen können gedimmt oder ausgeschaltet sein und erhöhen ihre Helligkeit mittels Steuerungs- oder Regelungstechnik auf einen voreingestellten Wert (idealerweise den geforderten Normwert), indem

Sensoren (z.B. *Zhaga Standard* [18]) ankommende Verkehrsteilnehmer erkennen und nach und nach (abhängig von Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung) den Lichtstrom der einzelnen Leuchten erhöhen. Im Anschluss werden die Leuchten wieder gedimmt [19].

Zwischen 22:30 Uhr und 05:30 Uhr wird die Straßenbeleuchtung gedimmt. In diesen Zeiten ist außerdem das Betreiben von gestalterischem Licht untersagt. [16, S.6/7]

Als Lichtfarbe legt die Stadt Fulda einen Bereich von 2000 K bis 3000 K fest, um die Anteile von blauem und ultraviolettem Licht zu reduzieren [16, S.5].

Zusätzlich wurden Regeln für Werbeanlagen, wie etwa elektronische Werbetafeln, aufgestellt, um die Problematik aus Kapitel 1.4.2 einzudämmen. Die Leuchtdichte soll sich bei kommerziell genutzten Werbetafeln gemäß der Richtlinie auf  $100 \text{ cd/m}^2$  beschränken. Bei jenen, die dem öffentlichen Interesse dienen, sind maximal  $200 \text{ cd/m}^2$  erlaubt [16, S. 8]. Zudem sollte der größte Anteil der Darstellung dunkel sein. Im Gegensatz zu den meisten elektronischen Werbetafeln, welche einen hellen Hintergrund, bunte Farben und schwarze Schrift zeigen, soll hier (ähnlich dem *Dark Mode* von Bildschirmgeräten) vorzugsweise helle bzw. weiße Schrift auf einem dunklen Hintergrund abgebildet werden [16, S.8]. So wird neben der Himmelsaufhellung gleichzeitig die mögliche Blendung reduziert, da weniger grelles Licht ausgestrahlt wird.

Es ist vorstellbar, dass viele deutsche Städte sich Fulda als Vorbild nehmen, da die Umsetzung der Maßnahmen weder kostspielig noch aufwendig ist. Im Gegenteil: Durch die Energieeinsparung lassen sich sogar erhebliche Kosten einsparen.

## 2 Folgen von Lichtimmission

### 2.1 Folgen für den Menschen

Der Mensch kommt im Alltag immer wieder in Berührung mit Lichtimmission. Auf dem Weg zur Arbeit, bei der abendlichen Gassi-Runde mit dem Hund oder beim Einschlafen – die Folgen können sowohl physiologischer als auch psychologischer Natur sein. Drei der in Kapitel 1.2 genannten Arten von Lichtverschmutzung haben einen direkten Einfluss auf unser Wohlbefinden.

Im Straßenverkehr kann *Light Clutter*, also eine Unstetigkeit von Licht, zu Problemen führen, wenn Verkehrsteilnehmer von hellen Lichtquellen, wie Werbetafeln oder imposanten Architekturbeleuchtungen abgelenkt oder durch Gruppen von hellen Lichtpunkten gestört werden. Schnell können so durch kleine Unaufmerksamkeiten schwere Unfälle passieren. Ein weiterer Gefahrenfaktor ist die physiologische Blendung (*Glare*). Wird ein Autofahrer von einer ungenügend abgeschirmten oder falsch ausgerichteten Leuchte geblendet, entsteht eine erhöhte Schleierleuchtdichte, welche den Netzhautkontrast senkt. Dies kann dazu führen, dass andere Verkehrsteilnehmer, wie etwa kreuzende Fußgänger, nicht erkannt werden. Auch in diesem Fall können schwere Verkehrsunfälle die Folge sein. Dieses Problem kann auch durch andere Verkehrsteilnehmer entstehen, wie Fahrzeuge mit falsch eingestellten oder aufgeblendeten Scheinwerfern. Zudem muss Blendung nicht zwingend durch einen Blick in die Lichtquelle wahrgenommen werden, sondern kann auch durch Reflexionen entstehen, z.B. Spiegelung auf einer nassen Fahrbahn [4, S.89-90].

Blendung kann außerdem psychologische Auswirkungen hervorrufen. Von psychologischer Blendung spricht man generell bei einer störenden Wahrnehmung [4, S.89-90]. Eine schlecht ausgerichtete Innenbeleuchtung führt schnell zu Unwohlbefinden oder Konzentrationsschwäche. Dies kann durch einfallendes Licht einer Außenbeleuchtungsanlage (*Light Trespass*) verstärkt werden.

Der ungewollte Einfall von Licht kann aber auch weitreichendere Folgen haben. So enthält ein Teil der sogenannten Ganglienzellen der Retina ein lichtempfindliches Pigment namens Melanopsin, welches im Körper für die Unterscheidung zwischen Tag und Nacht verantwortlich und für Wellenlängen im Bereich von 460 bis 490 nm (blau bis cyan) sensitiv ist [2, S.75-76]. Bei Detektion von Licht dieser Wellenlängen begrenzt oder verzögert es die Ausschüttung des Schlafhormons Melatonin, was neben der Einflussnahme auf den Schlafrhythmus weitere Körperabläufe, z.B. Wachstums- und Genesungsprozesse, beeinflusst. Zudem gilt Melatonin als krebshemmendes Antioxidans [2, S.77].

## 2.2 Folgen für Flora und Fauna

Für Pflanzen und Tiere hat eine schlecht abgeschirmte Beleuchtung, welche in den Lebensraum strahlt (*Light Trespass*), einen großen Einfluss auf das Verhalten und wichtige biologische Prozesse. So kann die nächtliche Beleuchtung eines Biotops fälschlicherweise für eine andere Tageszeit gehalten werden und beispielsweise Ruheprozesse verhindern [2, S.89]. Wenn durch die Auswirkungen künstlicher Beleuchtungen Populationen nachtaktiver Arten verringert werden, kann dies auch indirekt, etwa durch Beuteknappheit, andere Arten schädigen [2, S.86]. Somit sind nicht ausschließlich licht-sensitive Lebewesen von Lichtimmission betroffen, sondern aufgrund von Räuber-Beute-Beziehungen ganze Ökosysteme. Wichtig ist, dass die Farbtemperatur oft einen großen Effekt auf die Wirkung haben kann.

Die Beleuchtung von Pflanzen wird weltweit in Gewächshäusern verwendet, um Wachstumsprozesse bestimmter Pflanzen zu optimieren [2, S. 87]. Dem Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag zufolge reagieren Pflanzen auf Lichtreize und passen dementsprechend wichtige Prozesse, wie Blütezeiten oder Laubabwurf, an das Vorhandensein von Licht an. In der Natur sind allerdings andere klimatische Bedingungen als in Gewächshäusern gegeben. Sabine Frank vom Sternenpark Rhön beobachtete am Campus der Hochschule Fulda, dass einige Bäume mit unmittelbarer Nähe zu Bodenstrahlern ihre Blätter im Herbst nicht abwarfen und teilweise nicht einmal eine Laubfärbung eintrat (siehe Abbildung 2), während benachbarte Bäume, welche nicht beleuchtet wurden, bereits das gesamte Laub verloren hatten [20]. Eine Folge davon kann sein, dass die betroffenen Bäume im Winter aufgrund von Wassermangel vertrocknen, da das Laub unter anderem der Verdunstung von Wasser dient und dieses somit nach und nach entzogen wird [21]. Außerdem kann die Verdunstung über die Blätter zu einem Frostschaden führen, wenn Gefrieremperaturen auftreten [20]. Laut dem Büro für Technikfolgen-Abschätzung des Bundestages wurden Beobachtungen der „Verzögerung des Laubabwurfs durch Straßenbeleuchtung“ [2, S. 87] bereits in den 1930er Jahren dokumentiert, es ist also auch kein neues Phänomen.



**Abbildung 2:** Zu sehen ist, dass der mittlere Baum, welcher nachts direkt von einem Bodenstrahler beleuchtet wird, seine Blätter nicht verloren hat. Auch eine Färbung ist zum Aufnahmezeitpunkt (09.11.2020) kaum aufgetreten. Die nebenstehenden, nicht beleuchteten Bäume haben bereits den Großteil ihrer Blätter verloren. [22]

Auf Tiere kann der Einfluss nächtlicher künstlicher Beleuchtung sowohl negative als auch positive Folgen haben. Auf bestimmte Arten wirkt Licht anziehend, auf andere abschreckend. So können manche Arten die zusätzliche Beleuchtung als Jagd- oder Verteidigungsvorteil nutzen, anderen Arten erschwert sie hingegen die Orientierung oder führt zu veränderten Tag-Nacht-Zyklen, was sich einerseits schleichend auf die Fitness auswirken, andererseits aber auch Zeiträume für die Nahrungssuche erweitern kann [2, S. 89-106]. Teilweise machen sich bereits kleinste Beleuchtungsstärkeunterschiede bemerkbar [2, S. 95]. So konnte während des Polarlichtereignisses am 10. Mai 2024, welches an vielen Orten in Europa leuchtete und teilweise sogar in Afrika nachweisbar war, beobachtet werden, dass Vögel mitten in der Nacht, augenscheinlich aufgrund der hellen Polarlichter, zu Singen begannen [23, eigene Beobachtung]. Dabei waren die Polarlichter deutlich visuell zu sehen, aber es war nicht so hell, wie etwa zur Dämmerung. Lichtsensible Tiere können zudem erheblich in ihrem Lebensraum eingeschränkt werden und weniger Beute fangen, wenn diese vorwiegend durch Licht angezogen wird, z.B. Beziehung Fledermaus (lichtsensibel) → Insekten (Anziehung durch Licht). Die Einflüsse können von unterschiedlichen Tierarten auch sehr verschieden wahrgenommen werden. Während Fische oder Säugetiere eher Auswirkungen, wie veränderte Biorhythmen erfahren oder ihren Lebensraum an die Lichtsituation anpassen [2, S. 99-101], kommt es bei Vögeln, Amphibien und Insekten zusätzlich oft zu

Orientierungsproblemen, die weitreichende Folgen produzieren. Das wären etwa Kollisionen von Vögeln mit Gebäuden, Ablenkung von Vogelzug-Routen [2, S. 95], wandernde Kröten, welche bei dem Überqueren der Straße durch Fahrzeuge geblendet werden, dadurch sitzen bleiben und anschließend oft überfahren werden [2, S. 100] oder die Anziehung von Insekten durch helle Lichtquellen [2, S. 90]. Der Anziehungseffekt ist dabei oft, neben der Lichtintensität, von der Farbtemperatur der Beleuchtung abhängig. Die meisten Arten, vor allem Insekten, werden am wenigsten durch warmweißes Licht beeinflusst [24; 2, S.92, Tabelle 3.2], da dieses geringere Blau- und UV-Lichtanteile aufweist, als kaltweißes [2, S. 90-91]. Viele Insekten sind für diese beiden Spektralanteile besonders anfällig, da sie sich am, für den Mensch unsichtbaren, UV-Licht sowie am Mondlicht orientieren. Aufgrund dessen können sie künstliche Lichtquellen oft nicht von ihren eigentlichen Attraktoren unterscheiden und verirren sich in Lampengehäusen oder sterben an Erschöpfung beim dauerhaften Umkreisen der Leuchte [2, S. 90].

### 2.3 Folgen für die Astronomie

In der Astronomie, genauer gesagt in der optischen Astronomie, ist ein dunkler Nachthimmel das ausschlaggebende Kriterium für gute Beobachtungen, um einen möglichst hohen Kontrast darstellen zu können. Die stetig steigende Beleuchtungsintensität sorgt zunehmend für immer weniger Gebiete, welche nicht mehr von der Himmelsaufhellung (*Sky Glow*) betroffen sind. In Europa betrifft das gerade mal etwa 1% der Landfläche [25, S. 92]. Etwa 60% der EU-Bevölkerung lebt in Gebieten, in denen die Milchstraße nie sichtbar ist und etwa 21% leben in solch hellen Gebieten, dass nicht einmal eine Dunkeladaption der Augen möglich ist [25, S. 64]. Aus diesem Grund riefen viele Bewohner Los Angeles am 17. Januar 1994 die Polizei, da sie auf einmal eine „gigantische, silberne Wolke“ [26] am Nachthimmel sahen. An diesem Tag gab es ein Erdbeben, welches für flächendeckende Stromausfälle und ein damit einhergehendes Phänomen sorgte, welches die Bewohner dieser Millionenstadt aufgrund eines dauerhaft stark lichtverschmutzten Nachthimmels noch nie gesehen hatten – die Milchstraße.

Städte wie Los Angeles, Berlin oder Tokyo sind aber nicht nur für die Himmelsaufhellung in ihrer unmittelbaren Umgebung verantwortlich, sondern können auch in hunderten von Kilometern noch einen erheblichen Einfluss auf die Beobachtungsqualität haben [4, S. 54]. Professionelle Astronomie verlagert sich daher immer weiter in abgelegene Gebiete, wie die Kanareninsel La Palma oder die Atacama-Wüste in Chile. Doch zunehmend sind auch solche schützenswerten Gebiete von Lichtimmission gefährdet. Ein Bericht des *European Southern Observatory (ESO)* von März 2025 wies darauf hin, dass die Errichtung des geplanten INNA-Industriekomplexes (INNA: Abkürzung für *Integrated Energy Infrastructure Project for the Generation of Hydrogen and Green Ammonia* – [27]) in der Atacama-Wüste,

etwa 11 km vom *Very Large Telescope (VLT)* des *Paranal-Observatoriums* entfernt, zu erheblichen Einbußen in der Himmelsqualität sorgen könnte [28]. Das Megaprojekt soll der Herstellung von „grünem Wasserstoff und Ammoniak“ [29] dienen, könnte dabei allerdings einige der weltbesten Teleskope unter dem „dunkelsten und klarsten Himmel der Welt“ [30] erheblich in ihrer Qualität beeinflussen. Solche Entwicklungen sind der Auslöser für zunehmende astronomische Beobachtungen aus dem Weltall, beispielsweise durch das *James Webb Space Telescope (JWST)*, welches etwa am *Lagrange-Punkt 2 (L2)*, in einer Entfernung von ca. 1,5 Millionen Kilometern zur Erde, fernab irdischer Lichtimmission Daten über das Universum sammeln kann [31].

Für Hobbyastronomen, wie Astrofotografen, schwinden in dicht besiedelten Gebieten, wie Europa, ebenso immer mehr die Chancen auf einen natürlich dunklen Himmel. Zwar gibt es dunkle Gebiete, wie die Alpen oder etwa den Sternenpark Westhavelland in Brandenburg, doch ist das Ausmaß der Himmelsaufhellung so stark, dass fast überall Rückstände, vor allem „Lichtglocken“ (siehe Abbildung 3) am Horizont sichtbar bleiben [2, S. 13]. Der einzige Ausweg, um wirklich natürliche Nächte zu erleben, ist der *Astrotourismus* in Gebiete, wie die Kalahari-Wüste in Namibia oder den Roque de los Muchachos auf La Palma, die kaum bis gar nicht von Lichtimmission betroffen sind. Problematisch für den Schutz der nächtlichen Dunkelheit ist hierbei, dass ein Großteil der Menschen noch nie einen wirklichen störfreien Nachthimmel erlebt hat, da dieser sehr rar geworden ist, und sich somit keine Vorstellung darüber machen kann, welche wissenschaftlichen, kulturellen und gesellschaftlichen Vorteile eine Minderung von Lichtimmissionen bedeuten könnte [2, S.93].



**Abbildung 3:** *Sky Glow*, fotografiert vom Messstandort Etzdorf (siehe Kapitel 5) in Richtung Böhrgen. Die Aufhellung des Himmels im linken Teil des Bildes wird durch das Gewerbegebiet Striegistal in Berbersdorf erzeugt. Die beiden Standorte sind etwa 5 km (Luftlinie) voneinander entfernt. [eigene Aufnahme]

Auch bei dieser Form der Lichtimmission liegt eine starke Abhängigkeit der Lichtfarbe vor. Dies liegt an der sogenannten Rayleigh-Streuung, welche auch für den Eindruck des blauen Himmels verantwortlich ist [32]. Gemäß Formel (6) [32, S. 5, Formel (1)] ist die Rayleigh-Streuung an Molekülen in der Atmosphäre stark von der Wellenlänge der emittierenden Lichtquelle abhängig:

$$\sigma_R \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (6)$$

Dies bedeutet, dass kühleres Licht einen stärkeren Beitrag zur Lichtstreuung und damit zu den Lichtimmissionen am Himmel leistet, da es einen höheren Anteil kurzwelligeren, blauen Lichts enthält [3, S.48, Bild 1.4.4].

Zudem kommt es vor, dass Lichtimmission aufgrund teilweise bunter Farben mit natürlichen Himmelsphänomenen wie Polarlichtern verwechselt wird. So erhielt die *Freie Presse* Leserfotos, welche Polarlichter zeigen sollten. Es stellte sich hierbei heraus, dass der pink leuchtende Himmel vermutlich durch eine nahegelegene Gärtnerei erhellt wurde, welche ihre Pflanzen farbig anstrahlten, um das Wachstum zu verbessern (siehe Kapitel 2.2). Ein weiterer Fall, welcher deutschlandweit für Aufmerksamkeit sorgte, war ein Bericht von *heute Xpress* des *ZDF*. In diesem wurde ebenfalls über „Polarlichter über Stuttgart“ berichtet [59]. Nachdem der Beitrag gesendet wurde und einige Zuschauer anzweifelten, dass es sich bei diesem Leuchten um Polarlichter handelte, konnte festgestellt werden, dass die Ursache die Rasenanlage des *VfB Stuttgart* war [60]. Gemäß *Tagesschau*-Informationen sorgt die Anlage für ein verbessertes Rasenwachstum und wird täglich benutzt. Bei niedriger Bewölkung oder Nebel macht sich dieses Leuchten als farbiger *Sky Glow* bemerkbar.

### 3 Maßnahmen gegen Lichtimmission

Gemäß *DarkSky International* (früher: *International DarkSky Association*) gibt es fünf „Prinzipien für verantwortungsvolle Außenbeleuchtung“ [17], welche die Ausbreitung künstlicher Lichtimmission eindämmen sollen. Als Anerkennung für die Einhaltung zeichnet die Organisation Städte, Gemeinden und ganze Regionen als *DarkSky Place* aus (Ort mit besonders dunklem Nachthimmel) und fördert damit das Interesse an nachhaltigem Tourismus und macht auf das Problem der Lichtimmission aufmerksam.

Der erste Schritt zu einer verantwortungsvollen Beleuchtung wird gegangen, indem Beleuchtungsanlagen nur installiert bzw. betrieben werden, wenn eine klare Notwendigkeit gegeben ist und dieser eine höhere Priorität als der Immissionsschutz hat [17]. Je nach Umweltzone (siehe DIN EN 12464-2 oder CIE150) kann dies unterschiedliche Prioritäten bedeuten. In Umweltzone *E0* sollte künstliche Beleuchtung prinzipiell vermieden werden, also auch jene, die der Orientierung dient, wie Straßenbeleuchtung. In weniger strengen Zonen, wie *E4*, kann dagegen auch Beleuchtung für Freizeit- und Sportaktivitäten oder zum Anstrahlen von Gebäuden zweckmäßig sein [12, S. 9-10]. Zusätzlich können Beleuchtungstypen ohne kritische Funktion, wie etwa Werbebeleuchtung, temporär ihre Zweckmäßigkeit verlieren [2, S. 143]. Sie sollten beispielsweise in Zeiten mit wenig Aktivität (z.B. 22 bis 6 Uhr) abgeschaltet werden.

Außerdem sollte eine umweltgerechte Beleuchtung laut *DarkSky International* stets nur dahin strahlen, wo sie wirklich benötigt wird und nicht in Bereiche, welche negativ davon beeinflusst werden könnten. Hierfür ist es wichtig, dass die Beleuchtungsberechnung mit der genauen Geometrie, z.B. anhand eines Lageplanes, durchgeführt wird. Eventuell betroffene Bereiche sollten separat mit eigenen Berechnungsobjekten betrachtet werden, um unzulässige Immissionen einzudämmen. Mehr dazu in Kapitel 3.1.

Daran anknüpfend fordert *DarkSky International* ein möglichst niedriges Beleuchtungsniveau. Der berechnete Wert der Beleuchtungsstärke bzw. Leuchtdichte sollte also möglichst nahe am Norm-Wert der berechneten Fläche liegen und diesen nicht außergewöhnlich stark überschreiten, da sonst das Risiko besteht, dass ein erheblicher Teil des Lichtes in den Himmel reflektiert wird, ohne einen Nutzen zu haben. Der Grenzwert liegt bei einer Überschreitung von 25 % über dem geforderten Beleuchtungsniveau [33, S.4]. Mehr dazu in Kapitel 4.2.5.

Zudem sieht *DarkSky International* die Steuer- oder Regelbarkeit von Beleuchtung (auch *adaptive Beleuchtung* genannt) als wichtigen Punkt an, denn es sollte nur dann Kunstlicht verursacht werden, wenn es gebraucht wird. Oft wird Beleuchtung in der Nacht bereits auf einen niedrigen Wert gedimmt. Mittels moderner Automationstechnik sind aber noch wesentlich mehr Optimierungen möglich. Mehr dazu folgt in Kapitel 3.2.

Zuletzt ist auch für *DarkSky International*, ähnlich wie in Kapitel 2 bereits erörtert, die Lichtfarbe ein entscheidendes Kriterium für gute Außenbeleuchtung. Die Organisation empfiehlt den Einsatz von warmen Farbtemperaturen und beschränkt dabei die Auswahl auf ein Maximum von 3000 K [33, S.4].

### 3.1 Die richtige Lichtverteilung

Die meisten Hersteller bieten ihre modernen LED-Leuchten mit vielen verschiedenen Lichtstärkeverteilungen an, um eine Leuchte für eine Vielzahl an Anwendungen nutzen zu können. Möglich ist dies durch den Einsatz von Linsenelementen oder Reflektoren im Gehäuse, welche das Licht nach Belieben richten können [34]. So lassen sich beim Hersteller *Leipziger Leuchten* 14 verschiedene Licht-Optiken finden, welche speziell für Straßen, Radwege, Gehwege oder Plätze konzipiert sind [35]. Mit diesen Auswahlmöglichkeiten können Lichtplaner eine genaue Ausleuchtung bewirken. Beispielsweise bietet die Optik *DA058 LED Gen5 K* eine sehr homogene, nahezu quadratisch strahlende Lichtverteilung, um eine große Fläche, wie einen Marktplatz, gleichmäßig ausleuchten zu können [35]. Hingegen sind andere, wie Radweg- oder Straßenoptiken, dafür ausgelegt, einen engen Bereich links, mittig und rechts der Leuchte auszuleuchten und dabei kaum in die Bereiche neben dem Weg zu strahlen [35].

Neben der Lichtstärkeverteilung der Leuchte ist auch die Masthöhe entscheidend dafür, wie viel Licht in ungewünschte Bereiche eintritt. Generell empfiehlt es sich, mehr Lichtpunkte mit jeweils weniger Leistung und geringerem Lichtpunktabstand zu errichten, als nur einige wenige, hohe Lichtpunkte mit hohen Abständen zueinander, da so eine genauere Ausleuchtung mit weniger ungewollter Immission möglich ist. Mehr dazu folgt in Kapitel 4.

Wichtig ist zudem, dass möglichst kein Licht in den oberen Halbraum der Leuchte abgestrahlt wird, da dies für Himmelsaufhellung und zusätzliche Attraktion von Insekten sorgt. Das wird dadurch verhindert, dass Leuchten mit einem indirekten Lichtanteil, also ohne Abschirmung nach oben und zu den Seiten, nicht verwendet werden. Hersteller geben hierfür meistens den ULOR-Wert an (ULOR: Abkürzung für *Upward Light Output Ratio*, deutsch: Verhältnis des nach oben gerichteten Lichtstroms einer Leuchte zum Gesamtleuchtenlichtstrom [2, S.147]). Eine Voraussetzung für die Wirkung dieser Maßnahme ist allerdings, dass die Leuchte nicht geneigt werden darf, da so der Austritt nach oben oder zur Seite trotzdem wieder ermöglicht wird [2, S.146-147]. In der Praxis gibt es sogenannte *Full-Cut-Off-Leuchten*, welche auch bis zu  $10^\circ$  unterhalb der Horizontalen abgeschirmt sind [2, S. 148]. Diese beschränken zusätzlich die indirekte Blendung von Verkehrsteilnehmern.

Außerdem muss auf zusätzliche Leuchtenelemente außerhalb des Gehäuses verzichtet werden, da diese ungestört in alle Richtungen strahlen und auch für weitere Reflexionen sorgen können. Beispielsweise besitzt die Leuchte *Beta* vom Hersteller *Selux* einen

„satinierten Streuring“ [36], welcher das Leuchtengehäuse von oben zusätzlich mit einem weichen Licht bestrahlt (siehe Abbildung 4). Dadurch kann die Leuchte einen anderen Charakter erhalten, trägt aber nicht zur Vermeidung von Lichtimmission bei.



**Abbildung 4:** Der weiße Ring oberhalb des eigentlichen Leuchtenkörpers der Selux Beta sendet ein zusätzliches Licht aus, welches ohne jegliche Abschirmung in den Himmel leuchtet. [62, Ausschnitt]

Für die Architekturbeleuchtung bieten sich spezielle Leuchten an, welche mit Hilfe von „Reflektoren, Abblendklappen, Gitterblenden“ [2, S.149] und Fassadenschablonen die Beleuchtung ausschließlich auf das Objekt konzentrieren und die Beleuchtung der Umgebung vermeiden. Ohne solche Vorrichtungen kann ein hoher Anteil des gerichteten Lichts in den Himmel strahlen. (Abbildung 5)



**Abbildung 5:** Die Architekturbeleuchtung der Kirche in Seifersbach strahlt über ihr Ziel hinaus. Die Strahlen sind vor allem bei Wolken noch weit über dem Bauwerk sichtbar und hellen den Nachthimmel auf. [eigene Aufnahme]

## 3.2 Adaptive Beleuchtung

Mit Hilfe von adaptiver Beleuchtung können Parameter, wie Lichtfarbe, Lichtstrom oder Lichtverteilung an die Umgebungsbedingungen angepasst werden. Dies ist vor allem für Orte interessant, welche nachts weniger frequentiert sind.

Ein großer Fortschritt ließ sich durch die Einführung drahtloser Kommunikationsmethoden, wie dem *Zhaga*-Standard erzielen. Das *Zhaga Consortium* ist ein globaler Zusammenschluss aus Beleuchtungstechnik-Unternehmen, welche sich mit dem *Zhaga Book 18* das Ziel gesetzt haben, öffentliche Beleuchtung und *Smart City* mit Hilfe des *IoT* zu vereinen. Das *Zhaga Book 18* beschreibt einen Standard für die Zusammenarbeit von Außenbeleuchtung mit Sensor- und Kommunikationsmodulen [39]. Leuchten, die diesen Standard unterstützen, besitzen eine oder zwei Schnittstellen (meist oberhalb und/oder unterhalb des Leuchtengehäuses – siehe Abbildung 6) für ein Modul zur Funkkommunikation (untereinander und mit einer zentralen Automatisierungsanlage) und für ein Sensormodul, welches beispielsweise ein Radar-Bewegungsmelder sein kann. Mittlerweile existieren auch Kombi-Module, welche Funk- und Sensormodul vereinen [40, S. 7]. Zudem können auch Bestandsleuchten leicht nachgerüstet werden.



**Abbildung 6:** Kommunikationsmodul (oben) und Sensormodul (unten) auf Zhaga-Sockeln [63]

So ist es möglich, eine Beleuchtungsinstallation in einer bestimmten Zeitspanne (z.B. 22 bis 6 Uhr) auf einen niedrigen Wert, beispielsweise 10 %, zu dimmen und diesen nur auf 100 % hochzufahren, wenn eine Bewegung erkannt wird. Damit lässt sich auch ein sogenanntes *mitlaufendes Licht* umsetzen. Das Prinzip dabei ist, dass der Bewegungsmelder einer Leuchte immer direkt die nächste Leuchte hochdimmt, sodass das Licht der Bewegung eines Verkehrsteilnehmers folgt. Durch Einfügen einer Haltezeit von etwa drei bis fünf Minuten

wird verhindert, dass die Beleuchtung zu schnell wieder auf die eingestellten 10 % heruntergedimmt wird [40, S.11]. Dabei ist es wichtig, möglichst viele Leuchten mit einem Sensor auszustatten, um alle Bewegungsrichtungen erkennen zu können [40, S.11].

Außerdem bietet dieses System in Kombination mit sogenannten *Color-Switch-Leuchten* die Möglichkeit, nicht nur die Lichtintensität, sondern auch die Lichtfarbe bei einer Bewegungserkennung zu verändern [40, S.8]. Dies bietet sich vor allem bei Parkplätzen an, da diese oft sehr hell beleuchtet werden müssen. Bei Inaktivität kann dementsprechend der Lichtstrom auf 10 % gedimmt und gleichzeitig eine warme Farbtemperatur, wie etwa 2000 K eingestellt werden. Dies ist zur Orientierung ausreichend und hält die Lichtimmission der Umgebung niedrig. Sobald eine Bewegung erkannt wird, kann die Anlage für eine bestimmte Zeit auf 100 % gedimmt werden und mit einer kühleren Farbtemperatur betrieben werden.

Einen ökonomischen Vorteil hat diese Art der Beleuchtungsregelung außerdem, da die Leistungspeaks nur bei Bedarf abgerufen werden und die Lichtausbeute beim Dimmen nahezu gleichbleibend ist [40, S.3]. Dementsprechend wird die Leuchte über den Großteil der Nacht nur mit einem Bruchteil und über kurze Zeitintervalle mit der Maximalleistung betrieben.

$$\Delta E = P \cdot \Delta t \quad (7)$$

Mit Hilfe der Formel der Energie anhand der Leistung (7) ergibt sich bei einer elektrischen Leistung von 100 W, einer durchschnittlichen Nachtlänge von 11 Stunden und Betrieb ohne Reduzierung eine Energie bzw. Arbeit von 401,5 kWh pro Leuchte. Bei einer Nachtabenkung auf 50 % oder dem Betreiben jeder zweiten Leuchte, was vielerorts mit sogenannten *Halbnachtschaltungen* praktiziert wird, stellen sich 200,75 kWh pro Leuchte ein. Dabei ist das Problem, dass dunkle Bereiche entstehen können, welche wiederum mögliche Auslöser für Unfälle sind [2, S.146]. Mit der Variante der adaptiven Beleuchtung und einer Annahme, dass über die Nacht verteilt 50 Personen unabhängig voneinander den Bereich betreten und die Beleuchtung für jeweils 3 Minuten auf 100 % hochgefahren wird, ergeben sich nur noch 122,25 kWh (91,25 kWh für Maximalbeleuchtung und 31 kWh für gedimmten Betrieb).

Vor der Anwendung adaptiver Beleuchtung sollte untersucht werden, wie hoch der Verkehrsfluss an der jeweiligen Stelle ist. Bei hohem Verkehrsfluss, z.B. einem stark frequentierten Fußweg in einer Großstadt, der auch nachts oft benutzt wird, ist diese Art der Beleuchtungssteuerung nicht empfehlenswert, da ein häufiger Hell-Dunkel-Wechsel stattfinden würde, welcher wiederum störend oder ablenkend wirken kann. Außerdem kann der Kostenvorteil in diesem Fall wegfallen und die Investition unrentabel machen, da keine großartige Energieeinsparungen zu erwarten sind.

## 4 Simulative Planung einer Anlage

### 4.1 Die Software *DIALux evo*

*DIALux evo* ist ein Programm für die Planung von Beleuchtungsanlagen, entwickelt von der DIAL GmbH mit Sitz in Lüdenscheid. Es wird von über 750000 Lichtplanern weltweit eingesetzt und unterstützt diese bei der Einhaltung der gültigen Normen. Dabei kann auf die Leuchtendaten von über 400 Herstellern zugegriffen werden [41]. Die Software weist einen modularen Aufbau auf. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher der Begriff *Modul* verwendet. Die Module heißen „Straßenbeleuchtung“ sowie „Außen- und Gebäudeplanung“.

#### 4.1.1 *DIALux*-Modul „Straßenbeleuchtung“

Im Modul „Straßenbeleuchtung“ erfolgt die Berechnung anhand der Straßengeometrie. Diese setzt sich zusammen aus Fahrbahnen, Gehwegen, Radwegen, Parkstreifen, Grünstreifen, Notfallspuren und Mittelstreifen, welche individuell hinzugefügt und angepasst werden können. Bei Fahrbahnen sowie Rad- und Gehwegen muss zusätzlich die Beleuchtungsklasse nach *DIN 13201-1* („Straßenbeleuchtung – Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen“) ausgewählt werden. Außerdem sind Fahrbahnbelag und (mittlerer) Leuchtdichtekoeffizient  $q_0$  anpassbar. Diese beiden Werte werden meist vom Auftraggeber vorgegeben. Alternativ wird in der Regel die Klasse C2 in Verbindung mit einem  $q_0$  von  $0,07 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  angewandt [42, S. 66].

Im Anschluss können Lichtverteilungsdaten einzelner Leuchten (z.B. als IES- oder LDT-Datei) importiert werden. Diese werden von den Leuchtenherstellern zur Verfügung gestellt, um die exakte Darstellung der Lichtverteilung zu ermöglichen.

Im nächsten Schritt wird festgelegt, in welcher Geometrie die Leuchten zueinander angeordnet werden sollen. Hierbei ist zu entscheiden, ob die Leuchten einseitig, beidseitig oder beidseitig versetzt angeordnet werden sollen. Zudem können Parameter, wie Mastabstand, Lichtpunkthöhe, Auslegerneigung und die Anzahl der Leuchten pro Mast festgelegt werden. Die Berechnungsergebnisse werden sofort angezeigt und mit den Grenzwerten der Beleuchtungsklassen verglichen. Zudem besteht die Möglichkeit, die gewählten Parameter automatisch zu optimieren, beispielsweise, wenn kein bestimmter Mastabstand vom Auftraggeber gefordert ist. In diesem Fall schlägt *DIALux evo* verschiedene Varianten vor, welche die Normwerte (möglichst) erreichen.

Bei Bewertungsfeldern der M-Beleuchtungsklassen (*motorisierter Verkehr mit mittleren bis hohen Geschwindigkeiten*) [42, S. 25] werden Ergebnisse für die Gütemerkmale mittlere Fahrbahnleuchtdichte  $L_m$ , Gesamtgleichmäßigkeit der Leuchtdichte  $U_0$ , Längsgleichmäßigkeit der Leuchtdichte  $U_L$ , Schwellenwerterhöhung (*Threshold Increment*)  $TI$  (zur Bewertung

von physiologischer Blendung) und Randbeleuchtungsstärkeverhältnis  $R_{EI}$  ermittelt [42, S. 44].

Die minimal erforderlichen Werte für Beleuchtungsklasse P (*motorisierter Verkehr bis 50 km/h, Fuß- und/oder Radwege*) [42, S. 26] sind die mittlere  $E_m$  und minimale Beleuchtungsstärke  $E_{min}$ . Neben diesen können zusätzlich noch die Schwellenwerterhöhung  $TI$  sowie die minimale vertikale  $E_{v,min}$  (z.B. zur Erkennung von Verkehrsschildern ohne externe Beleuchtung durch motorisierten Verkehr) und minimale halbzylindrische Beleuchtungsstärke  $E_{sc,min}$  (z.B. zur Gesichtserkennung) betrachtet werden.

Bei Beleuchtungsklasse C (*Konfliktbereiche, z.B. Fußgängerüberwege, Kreuzungen, Kreisverkehrsanlagen; kurviger Straßenverlauf; schnell wechselnde Fahrbahnoberflächen*) [42, S. 26, S.42] werden ausschließlich die mittlere Beleuchtungsstärke  $E_m$  und die Gesamtgleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke  $U_0$  ermittelt.

Die Darstellung ist zwei- und dreidimensional möglich. Hierbei wird die Straße mit all ihren Spuren, sowie einigen Leuchten dargestellt. Das Berechnungsergebnis als Darstellung der Leuchtdichte (M-Beleuchtungsklassen) oder Beleuchtungsstärke (P- und C-Beleuchtungsklassen) in Falschfarben erfolgt hierbei ausschließlich für die Distanz zwischen zwei Leuchten, die sich auf derselben Seite befinden. Dies ist insofern ausreichend, da die Ergebnisse an allen anderen Stellen ohnehin unverändert bleiben würden, da Straßengeometrie sowie Leuchtenparameter über die gesamte Länge nicht verändert werden. Problematisch ist dies allerdings für Straßen oder Wege, welche nicht ausschließlich geradeaus verlaufen oder unterschiedliche Breiten aufweisen. In diesem Fall ist die Berechnung im Modul „Außen- und Gebäudeplanung“ unerlässlich, wenn eine Lichtimmissions-Bewertung durchgeführt werden soll.

#### **4.1.2 DIALux-Modul „Außen- und Gebäudeplanung“**

Wenn Ungleichmäßigkeiten, wie Kurven oder variierende Fahrbahnbreite, eine detailliertere Planung erfordern, kann mit dieser *DIALux*-Komponente eine ganze Liegenschaft dreidimensional nachgebaut werden. Zudem können so mögliche Abschattungsobjekte, wie Gebäude, mitberücksichtigt werden. Außerdem kann durch Verschiebung oder Rotation einzelner Leuchten- oder Leuchtengruppen eine viel präzisere Ausleuchtung erreicht werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass nicht jeder Verkehrsweg separat betrachtet wird, sondern alle in einer Darstellung auftauchen. Dies ermöglicht zudem das Detektieren gegenseitiger Einflüsse von Leuchten auf unterschiedlichen Straßen oder Wegen. Es kann somit verhindert werden, dass sich die Beleuchtungsstärke einzelner Lichtpunkte zu einer unnötig hohen Gesamt-Beleuchtungsstärke addiert. Weiterhin ist es möglich, die Lichtpunkte und weitere Elemente direkt als DWG-Datei zu exportieren, um sie beispielsweise mit einem CAD-Programm direkt im Lageplan zu platzieren.

Neben der Außenbeleuchtung kann in diesem Modul Innenbeleuchtung und sogar Notbeleuchtung geplant werden. All dies ist in Kombination miteinander möglich. Auch wenn diese Arten von Beleuchtung gewissermaßen zu Lichtimmission beitragen können, sollen sie hier nicht weiter behandelt werden.

Berechnungsobjekte bieten hierbei neben verschiedenen Beleuchtungsstärkevariationen (z.B. senkrecht – Einhaltung Normwerte der Beleuchtungsklasse; zylindrisch – für spezielle Sehaufgaben, wie Erkennen von Personen oder Objekten am Fahrbahnrand) das sogenannte *Glare Rating*  $R_G$  sowie das *Unified Glare Rating*  $R_{UG}$  zur Berechnung an. Beide geben Auskunft über die Blendungsbewertung,  $R_{UG}$  ist allerdings ausschließlich für Innenräume vorgesehen.  $R_G$  beschreibt hingegen, wie störend die Blendung von Außenbeleuchtung (von Arbeits- und Sportstätten) für das menschliche Auge ist (psychologische Blendung). Neben einem einstellbaren Höhenoffset, lassen sich Neigungswinkel, Schrittweite und ein Winkelbereich einstellen. Damit lässt sich festlegen, in welche Blickrichtung das *Glare Rating* betrachtet werden soll. Der *TI-Wert* (*Threshold Increment*) als Maß der physiologischen Blendung ist hier nicht vorhanden, es sollte also trotzdem im Vorhinein eine Berechnung in *Straßenbeleuchtung* erfolgen, um die Einhaltung dieses Wertes zu gewährleisten. Das *Glare-Rating* ist für die Einschätzung der physiologischen Blendung ungeeignet. Alternativ dafür lässt sich das Blendmaß  $k_s$  verwenden, welches ermittelt, wie viel heller die Lichtinstallation im Vergleich zu ihrer Umgebung wirkt.

Außerdem besteht die Möglichkeit, ausgewählte Leuchten einer Störlichtszene bzw. einem Störlicht-Berechnungsobjekt hinzuzufügen. Damit können *Glare Rating*, Blendmaß, *Upward Light Ratio*, *Upward Flux Ratio*, Schleierleuchtdichte, sowie vertikale Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte separat betrachtet werden.

Die *Upward Light Ratio* wird anhand der Lichtverteilungskurve bestimmt. Sie sollte im Optimalfall bei 0% liegen. Dies bedeutet, dass kein Licht oberhalb der Lichtpunkthöhe abgestrahlt wird.

Die *Upward Flux Ratio* hingegen wird mit Hilfe der Soll-Beleuchtungsstärke und des Reflexionsgrades berechnet. Dabei wird anhand dieser Werte und des Flächeninhaltes der Berechnungsfläche ein optimaler Lichtstrom errechnet, um genau die voreingestellte Beleuchtungsstärke zu erreichen. Das Verhältnis aus realem und idealem Wert, abzüglich 100% ist die *Upward Flux Ratio*.

## 4.2 Planungsprojekt „Blaues Band Geberbach“ in *DIALux evo*

### 4.2.1 Gegebenheiten/Planungsvorgaben

Die Maßnahme umfasst die abschnittsweise Beleuchtungsplanung eines Radweges, welcher teilweise auch als Rad- und Gehweg benutzt wird. Der Abschnitt, welcher hier

behandelt werden soll, befindet sich im Dresdner Osten und verläuft vom Seidnitzer Weg, südöstlich entlang der Pferderennbahn, bis zur Kreuzung Breitscheidstraße/An der Rennbahn. Die Maßnahme wurde durch die Landeshauptstadt Dresden beauftragt und erfordert eine Bewertung des dazugehörigen Umweltamtes. Dieses stellte am 08.04.2025 *Artenschutzrechtliche Auflagen und artenschutzfachliche Hinweise zur Beleuchtung des Radweges* zur Verfügung. Aufgrund des Radwegverlaufes durch einen Waldabschnitt und der geplanten Offenlegung des Geberbaches sind diese Anforderungen von besonderer Bedeutung, da das Gebiet Habitats streng geschützter Tierarten (z.B. Zauneidechse und Wendehals) kreuzt.

Als ersten Punkt bewilligt das Umweltamt eine adaptive Beleuchtung im Zeitraum vom 01. Dezember bis 28. Februar. Zudem sind Beleuchtungsniveau sowie Lichtpunkthöhe möglichst niedrig zu halten und eine Abstrahlung in nicht intendierte Bereiche zu vermeiden. Damit soll auch das „Anleuchten von Gehölzen, Wiesen, Saumstrukturen, Gewässern“ [43, S.2] vermieden werden. Außerdem sind schmalbandige Leuchtmittel mit einer maximalen Farbtemperatur von 2400 K zu verwenden, um die Anlock- und Störfunktion für sensible Tierarten zu vermeiden. Zuletzt wird gefordert, dass die Beleuchtung zwischen 01. März und 30. November im betroffenen Bereich komplett ausgeschaltet bleibt. Dazu kann eine zusätzliche teilweise Abschaltung außerhalb dieses Zeitraumes erfolgen, wenn eine Lebensraumveränderung, welche potentiell durch die Beleuchtung bedroht ist, durch das Umweltamt oder die untere Naturschutzbehörde verzeichnet wird. Als Lichtpunkthöhe gibt die Landeshauptstadt Dresden 5 Meter vor.

Im Voraus wurde mit Hilfe von Tabelle 9 (Radwege für P-Klassen) der *DIN 13201-1* [44, S. 27, Tabelle 9] Beleuchtungsklasse P5 für den Zeitpunkt  $t_0$  (Vorgabe Dresden: 06:00 Uhr bis 08:00 Uhr und 16:00 Uhr bis 20:00 Uhr) und P6 für den Zeitpunkt  $t_1$  (Vorgabe Dresden: 20:00 Uhr bis 06:00 Uhr) (siehe Abbildung 7) ermittelt.

Nach der *CIE150* ist dieser Stadtteil von Dresden zwischen den Umweltzonen E3 („*Medium district brightness - Well inhabited rural and urban settlements*“) und E4 („*High district brightness - Town and city centres and other commercial areas*“) [12, S. 8, Tabelle 1] einzuordnen, jedoch mit Tendenz zu E3, da er relativ abgelegen ist und Dresden im Vergleich zu Städten, wie London, Rotterdam oder Chicago wesentlich dunkler ist [45].

Auswahlparameter	Optionen/ Auswahlmöglichkeit	Wichtungswert Vw	Gewählte Wichtungswerte	
Betriebsart	Zweirichtungsverkehr	1	1	
	Einrichtungsverkehr	0		
Lagebezug zu angrenzenden Verkehrsflächen	sonstige	1	0	
	bauliche Abgrenzung oder räumlich getrennt 1	0		
Zwischenwert			1	
Variable Parameter für die adaptive Beleuchtung	Optionen / Auswahlmöglichkeit	Wichtungswert Vw	Zeitpunkt	
			t0	t1
Radverkehrsfluss	normal	0	0	-1
	gering	-1		
Verkehrsart / Zusammensetzung	Radfahrer und Fußgänger	1	1	1
	reiner Radverkehr	0		
Leuchtdichte der Umgebung	hoch	1	-1	-1
	mittel	0		
	gering	-1		
Erhöhte Anforderungen	vorhanden	1	0	0
	nicht vorhanden	0		
Summe der Wichtungswerte Vws			1	0
Beleuchtungsklasse P=6-Vws			P5	P6

**Abbildung 7:** Ermittlung der Beleuchtungsklasse anhand der Anforderungen nach DIN 13201-1 [44, S.27, Tabelle 9, ausgefüllt]

#### 4.2.2 Leuchtmittel

Als Leuchtmittel wurde durch den Auftraggeber der Typ *Alfons I DA LED* vom Hersteller *Leipziger Leuchten* (siehe Abbildung 8) ausgewählt. Diese Leuchte kann mit LED-Modulen betrieben werden, welche je nach Konfiguration maximale Lichtströme von 750 lm bis 8250 lm ermöglichen.

Sie leuchtet mit einer Farbtemperatur von 1800 K, erfüllt also die Anforderung des Dresdner Umweltamtes.

Zudem kann sie per *DALI* oder *CLEVER LIGHT* (Einsatz von Sensoren – Einstellung lokal oder aus der Ferne per *Zhaga*-Sockel – siehe Kapitel 3.2) gedimmt werden.

Die Leuchte kann mit unterschiedlichen Optiken ausgestattet werden. Optik 268 wurde während der Bearbeitung aufgrund ihrer gezielt gerichteten, breitstrahlenden Charakteristik ausgewählt und ist speziell für Radwege ausgelegt.



Abbildung 8: Leipziger Leuchten Alfons I DA LED [64, Ausschnitt]

#### 4.2.3 Vorplanung im Modul „Straßenbeleuchtung“

Der Radweg wurde nach Messung im Lageplan mit einer Breite von 4 m und jeweils einem Seitenstreifen von 0,5 m pro Seite angelegt.

Das optimale Berechnungsergebnis wurde laut *DIALux evo* bei einem Mastabstand von 45 m und Verwendung der *Alfons*-Leuchte mit 2150 lm ermittelt (siehe Abbildung 9.1/9.2). Auf einen geneigten Ausleger soll aus Immissionsgründen verzichtet werden. Die mittlere Beleuchtungsstärke  $E_m$  beträgt in diesem Fall 4,22 lx. Das ist eine Abweichung von +40,67 % zum geforderten Mindestwert der DIN 13201-2 für die Beleuchtungsklasse P5 (3 lx) [46, S. 12]. Gemäß *DarkySky International* sollte die Abweichung maximal 25 % betragen (s. Kapitel 3) [33, S.4]. Die minimale Beleuchtungsstärke  $E_{min}$  weicht mit 0,64 lx um +6,67 % vom Normwert (0,6 lx) ab [46, S. 12].

Leuchtenanordnung 1	ALFONS I DA LED (Optik 268) (9.136.8124.26)
Bestückung	1 x DA LED 20W/2.150lm/1.800K
Mastabstand [m]	45.000
Lichtpunkthöhe [m]	5.000
Auslegerneigung [°]	0.0

Abbildung 9.1: „optimierte“ Leuchtenparameter in *DIALux evo* [Screenshot aus *DIALux evo*, Ausschnitt]

Bewertungsfeld (P5)	Radweg an der Rennbahn P5
$E_m$ [lx]	✓ $\geq$ 3.00 $\leq$ 4.50 4.22 ✓
$E_{min}$ [lx]	✓ $\geq$ 0.60 0.64 ✓

Abbildung 9.2: Berechnungsergebnisse der Leuchtenparameter aus Abbildung 9.1 in *DIALux evo* [Screenshot aus *DIALux evo*, Ausschnitt]

Durch Betrachten der weiteren Ergebnisse lässt sich feststellen, dass es besser geeignete Varianten gibt, die ebenso die DIN-Norm erfüllen (siehe Abbildung 10.1/10.2). So ergeben sich bei Verwendung der *Alfons*-Leuchte mit 1450 lm Lichtstrom, einem Lichtpunktastand von 41 m und einer Lichtpunkthöhe von 5 m eine mittlere Beleuchtungsstärke  $E_m$  von 3,13 lx (Abweichung von +4,33 %) und eine minimale Beleuchtungsstärke  $E_{min}$  von 0,63 lx (Abweichung von +5,00 %), was den geforderten Minimalwerten deutlich näherkommt und sich deshalb besser zur Vermeidung von Lichtimmission eignet.

Leuchtenanordnung 1	ALFONS I DA LED (Optik 268) (9.136.8115.26)
Bestückung	1 x DA LED 12W/1.450lm/1.800K
Mastabstand [m]	41.000
Lichtpunkthöhe [m]	5.000
Auslegerneigung [°]	0.0

Abbildung 10.1: verbesserte Leuchtenparameter in DIALux evo [Screenshot aus DIALux evo, Ausschnitt]

Bewertungsfeld (P5)	Radweg an der Rennbahn P5						
$E_m$ [lx]	<input checked="" type="checkbox"/>	$\geq$	3.00	$\leq$	4.50	3.13	<input checked="" type="checkbox"/>
$E_{min}$ [lx]	<input checked="" type="checkbox"/>	$\geq$	0.60			0.63	<input checked="" type="checkbox"/>

Abbildung 10.2: Berechnungsergebnisse der Leuchtenparameter aus Abbildung 10.1 in DIALux evo [Screenshot aus DIALux evo, Ausschnitt]

DIALux evo akzeptiert für die mittlere Beleuchtungsstärke  $E_m$  bei Beleuchtungsklasse P5 Werte zwischen 3 lx und 4,5 lx. Der Maximalwert entspricht mit einer Abweichung von +50 % dem Doppelten der Empfehlung von *DarkSky International* und hat seinen Ursprung vermutlich in Tabelle 3 der DIN 13201-2. Anmerkung a besagt: "Um Gleichmäßigkeit sicherzustellen, darf der tatsächliche Wert des Wertes der mittleren Beleuchtungsstärke das 1,5-fache des für die Klasse vorgesehenen Mindestwertes  $\bar{E}$  nicht überschreiten." [46, S. 12].

Das obere Ergebnis wurde von DIALux evo bevorzugt, da die Ergebnisse standardmäßig nach absteigendem Lichtpunktastand sortiert werden. In der Regel werden in der Planung allerdings nicht alle Ergebnisse miteinander verglichen, sondern das von DIALux evo „optimierte“ ausgewählt, da für detailliertere Betrachtungen meist die Zeit fehlt. Aus diesem Grund soll im Anschluss mit dem ersten Ergebnis weitergerechnet werden.

#### 4.2.4 Nachteile der Planung im Modul „Straßenbeleuchtung“

Im Normalfall werden Außenbeleuchtungs-Projekte bei DEIB ausschließlich mit der Herangehensweise „Straßenbeleuchtung“ geplant. Jedoch besitzt das Modul „Außen- und Gebäudeplanung“ Vorteile, welche im Modul „Straßenbeleuchtung“ nicht umsetzbar sind.

Zum einen kann eine variierende Straßengeometrie zu immensen Unterschieden der realen Lichtverteilung führen. Der Radweg im Planungsbeispiel verläuft zum größten Teil kurvig.

Dies kann kürzere bzw. unterschiedliche Lichtpunktabstände erfordern, um die normgerechte Gleichmäßigkeit und Beleuchtungsstärke sicherzustellen. Diese Abweichungen können in „Straßenbeleuchtung“ nicht berücksichtigt werden, da hier immer nur die Strecke zwischen zwei Lichtpunkten auf einer geraden Straße betrachtet wird.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Dimmbarkeit. Die Lichtstromwerte können nicht manuell angepasst werden, was die genaue Berechnung einschränkt. Es kann also ausschließlich mit den maximalen Lichtströmen der Leuchten gerechnet werden.

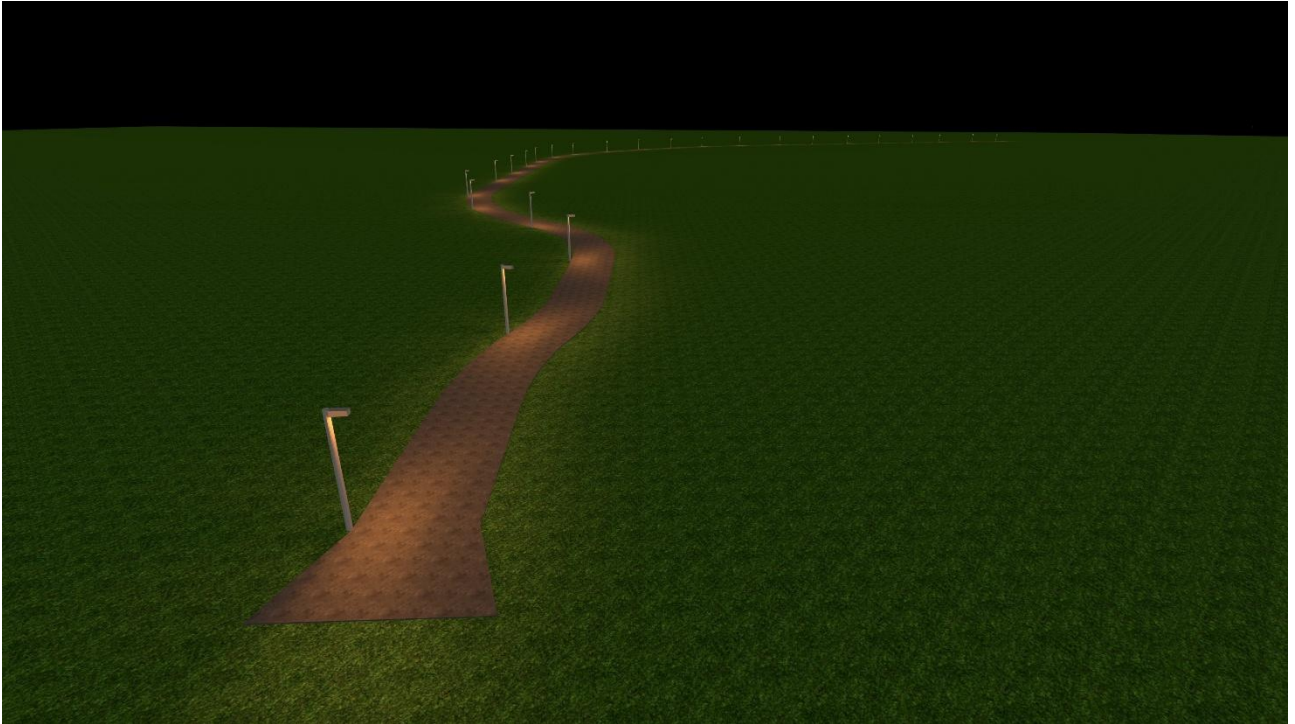
Zusätzlich ist die Einschätzung von Lichtimmissionen stark begrenzt, da hier lediglich der *Threshold-Increment*-Wert (bei M-Beleuchtungsklassen) und die *Upward Light Ratio (ULR)* angegeben werden. Es kann zudem keine Einschätzung über die Beleuchtung von Flächen erfolgen, welche von der Beleuchtung abgeschirmt werden sollen.

Ein letzter, in diesem Projekt allerdings irrelevanter Punkt ist die Varianz von Lichtpunkthöhen. In größeren Liegenschaften mit unterschiedlichen Anforderungen können diese nicht angepasst werden. Jede Straße oder jeder Weg muss somit als eigene Berechnungsfläche angelegt werden und darf auch in sich keine Unterschiede in der Lichtpunkthöhe aufweisen, da diese im Modul „Straßenbeleuchtung“ immer gleichbleibend ist.

Oft wird die Planung im Modul „Straßenbeleuchtung“ bevorzugt, da die Berechnung wesentlich schneller erfolgen kann, weil nicht die gesamte Geometrie des Projektes nachgebildet werden muss. Dieser zusätzliche Aufwand ist in der Regel finanziell nicht tragbar.

#### **4.2.5 Detailplanung im Modul „Außen- und Gebäudeplanung“**

Zuerst wurde die Fahrbahngeometrie mit Hilfe des Lageplans nachgebaut. Für die Berechnungsfläche wurde zusätzlich ein polygonales Bodenelement erzeugt, um den Radweg darzustellen (siehe Abbildung 11). Als Textur wurde Asphalt mit einem Reflexionsgrad von 12 % ausgewählt. Leider ist es nötig, die Darstellung auf einem geringen Maß an Detailtreue zu belassen, da das Hinzufügen von 3D-Objekten wie Bäumen den Rechenprozess enorm verlangsamt und teilweise auch *DIALux evo* zum Abstürzen bringt.



**Abbildung 11:** Darstellung des Radwegverlaufs in DIALux evo [erstellt mit DIALux evo Raytracer]

Im Anschluss wurde die erste Variante aus Kapitel 4.2.3 (Lichtpunktabstand: 45 m, Lichtpunkthöhe: 5 m, Leipziger Leuchten Alfons I DA LED mit 2150 lm – hier: Variante 4) eingefügt. Über die gesamte Strecke des Planungsprojektes ergab sich eine Anzahl von 13 Leuchten. Aufgrund der ungleichmäßig verlaufenden Fahrbahn war bereits zu erwarten, dass die Ergebnisse Abweichungen aufweisen. Die mittlere Beleuchtungsstärke  $E_m$  wurde mit 3,74 lx bereits eingehalten (Mindestwert für Beleuchtungsklasse P5 nach DIN 13201-2: 3 lx). Die minimale Beleuchtungsstärke  $E_{min}$  wurde mit 0,48 lx allerdings um 20% unterschritten (Mindestwert für Beleuchtungsklasse P5 nach DIN 13201-2: 0,6 lx) [46, S. 12].

Dies liegt daran, dass Leuchtenhersteller oft den Lampenlichtstrom  $\Phi_{Lampe}$  und nicht den Leuchtenlichtstrom  $\Phi_{Leuchte}$  angeben. Der Lampenlichtstrom fällt dabei höher aus, da er die gesamte Lichtmenge beschreibt, die das Leuchtmittel emittiert. Beim Leuchtenlichtstrom wird der Betriebswirkungsgrad der Leuchte berücksichtigt, welcher optische und thermische Verluste der Leuchte einbezieht.

Aufgrund dessen war es nötig, die *Alfons*-Leuchte mit 2750 lm auszuwählen und diese manuell auf 1825 lm zu dimmen. Die Leuchte, welche laut Datenblatt einen Lampenlichtstrom  $\Phi_{Lampe}$  von 2150 lm liefert, kommt laut der Angabe *Lichttechnische Daten* in *DIALux evo* auf einen maximalen Leuchtenlichtstrom  $\Phi_{Leuchte}$  von 1802 lm und erfüllt damit knapp nicht die Anforderungen. Die minimale Beleuchtungsstärke  $E_{min}$  erreichte im Anschluss genau die geforderten 0,6 lx, die mittlere Beleuchtungsstärke  $E_m$  lag allerdings mit 4,71 lx 57 % über dem Mindestwert und disqualifiziert sich dafür sowohl nach Empfehlung von *DarkSky International*, als auch nach der Vorgabe der DIN 13201-2. Zudem war die Gleichmäßigkeit mit

0,13 auch ungenügend gering (Mindestwert für Beleuchtungsklasse P5 nach DIN 13201-2: 0,2), da die entferntesten Bereiche zwischen den Leuchten genau diese dunklen Stellen waren.

Um die Gleichmäßigkeit zu verbessern, bietet es sich jedoch nicht an, jede Leuchte individuell zu dimmen, da dies auch zu Blendung führen kann. Deswegen wurde als nächster Schritt eine Verringerung der Lichtpunktabstände bei gleichzeitiger Leistungsreduzierung durchgeführt. Dazu wurde immer eine weitere Leuchte zwischen zwei bereits existierende gesetzt. Die neue Lichtpunktanzahl betrug anschließend 25. Allerdings konnte der Lichtstrom dadurch auf 600 lm gesenkt werden (Variante 2). Bei einer groben Verdopplung der Lichtpunkte wurde der Gesamtlichtstrom also um 67 % gesenkt. Dabei senkte sich der Wert für die mittlere Beleuchtungsstärke  $E_m$  auf genau 3 lx, wie es laut der DIN 13201-2 erforderlich ist. Die minimale Beleuchtungsstärke  $E_{min}$  überschritt den Normwert mit 0,72 lx auch nur um 20 %. Die Gleichmäßigkeit verbesserte sich auf einen Wert von 0,24 und war damit auch in Ordnung.

Anschließend wurde noch untersucht, zu welchen Auswirkungen eine Veränderung der Lichtpunkthöhe führen würde. Dafür wurde dieselbe Berechnung zusätzlich mit einer Lichtpunkthöhe von 4 Metern (Variante 1) und 6 Metern (Variante 6) durchgeführt. Die Ergebnisse bezüglich Lichtimmission und Energieeinsparung folgen im Anschluss in Tabelle 1. Die Ermittlung der elektrischen Leistung erfolgt unter der Annahme, dass die Lichtausbeute  $\eta$  der Leuchte mit einem Lampenlichtstrom  $\Phi_{Lampe}$  von 750 lm konstant 69,9 lm/W und die der Leuchte mit 2750 lm konstant 69,8 lm/W beträgt (Angabe in *DIALux evo* unter Licht → Leuchten → Lichttechnische Daten). Es ist außerdem zu erwarten, dass die Lichtausbeute  $\eta$  beim Dimmen aufgrund geringer werdender Verlustleistungen steigt, jedoch wird hier der Einfachheit halber mit einem konstanten Wert gerechnet. Für die Variante mit einer Lichtpunkthöhe von 6 Metern muss die nächstgrößere Leuchte gewählt werden, da der Leuchtenlichtstrom  $\Phi_{Leuchte}$  der anderen Leuchte maximal 629 lm beträgt. Die Lichtausbeute  $\eta$  dieser Leuchte (*Leipziger Leuchten Alfons I DA LED 9.136.8110.268-18* mit einem Lampenlichtstrom  $\Phi_{Lampe}$  von 900 lm laut Datenblatt) beträgt 75,4 lm/W. Die Energieangaben wurden unter Annahme einer jährlichen Nutzungsdauer von 1500 h berechnet, da die Anlage gemäß des Dresdner Umweltamtes (siehe Kapitel 4.2.1) nur in den Wintermonaten zwischen 01. Dezember und 28. Februar in Betrieb sein soll.

**Tabelle 1** Abhängigkeit der Immissions- und Energiewerte von der Lichtpunkthöhe

Variante	1	2	3	4
$h_{LP}$ [m]	4	5	6	5
$\Phi_{Leuchte-max}$ [lm]	750	750	900	2750
$\Phi_{Lampe-eingestellt}$ [lm]	530	600	690	1825
$E_m$ [lx]	3,14	3	3,01	4,71
$E_{min}$ [lx]	0,6	0,72	0,83	0,6
$E_{max}$ [lx]	10,3	7,65	6,39	21,8
$U_0$	0,19	0,25	0,28	0,13
$R_{UL}$ [%]	0	0	0	0
$R_{UF}$ [%]	2,1	2,3	2,7	3,7
$R_G$	48	43	39	50
$k_S$	33,8	51,3	120	156
$n_{Leuchten}$	25	25	25	13
$\Phi_{Gesamt}$ [lm]	13250	15000	17250	23725
$\eta$ [lm/W]	69,9	69,9	75,4	69,8
$P_{el,ges}$ [W]	189,56	214,59	228,78	339,90
$E_{el,ges}$ [kWh]	284,34	321,89	343,17	509,85
$\Delta E_{el,ges}^{4m}$ [%]	0	13,21	20,69	79,31

Grün markiert: günstigster Wert  
 Rot markiert: ungünstigster Wert

Die nachfolgenden Erkenntnisse entstammen den Ergebnissen aus Tabelle 1 (S. 44). Es wird ersichtlich, dass die Variante mit einer Lichtpunkthöhe  $h_{LP}$  von 4 Metern die geringsten ökologischen Auswirkungen hat. Die Upward Light Ratio  $R_{UL}$  bleibt bei allen Leuchten konstant auf 0 %. Dies ist dadurch geschuldet, dass die  $R_{UL}$  ein gerätespezifischer Parameter ist und bedeutet, dass die Leuchten kein Licht in den oberen Halbraum abstrahlen.

Neben der  $R_{UL}$  weist die *Upward Flux Ratio*  $R_{UF}$  zwischen den optimierten Leuchten die geringsten Unterschiede auf. Während sie bei der geringsten Lichtpunkthöhe 2,1 % beträgt, steigt sie bei der maximalen Höhe nur um 0,6 % an. Hingegen beträgt sie bei der ursprünglichen Leuchte mit 45 Metern Lichtpunktabstand und einer Lichtpunkthöhe von 5 Metern 3,7 % und weicht damit um 1,6 % ab. Da der Anlagenort, wie in 4.2.1 beschrieben, Umweltzone E3 nach *CIE150* zuzuordnen ist, sind alle Varianten in Ordnung, da der  $R_{UF}$  in dieser Umweltzone maximal 8 % betragen darf [CIE 150, Tabelle 6]. Trotzdem ist es wünschenswert, diesen Wert möglichst minimal zu halten. In Anbetracht der Tatsache, dass es sich hier um ein ökologisch besonders schützenswertes Teilgebiet handelt und auch eine Vogelart (Wendenhals) [43, S.1] explizit genannt wurde, könnte man hier auch Umweltzone E2 („*Low District Brightness - Sparsely inhabited rural areas*“) [12, Tabelle 1] als geeigneten Maßstab ansetzen. In diesem Fall darf die *Upward Flux Ratio* einen Wert von 5 % nicht überschreiten [12, Tabelle 6].

Das *Glare Rating*  $R_G$  hat sein Minimum bei Variante 3 und sein Maximum bei Variante 4. Generell steigt der Wert mit abnehmender Lichtpunkthöhe. Dies ist damit zu erklären, dass die Lichtquelle beim Passieren durch einen Verkehrsteilnehmer stärker im vertikalen Sichtfeld zur Geltung kommt, wenn sie niedriger ist. Ist die Lichtquelle höher installiert, besteht die Möglichkeit, dass sie aus dem Sichtfeld verschwindet, was eine Blendung minimiert. Zudem lässt sich durch die unterschiedlichen Werte von Variante 2 und 4, welche beide eine Lichtpunkthöhe von 5 Metern aufweisen, feststellen, dass auch der ausgesandte Lichtstrom einen Einfluss auf das *Glare Rating* hat. Da alle Varianten ein *Glare Rating*  $\leq 50$  aufweisen, gibt es dahingehend keine Probleme, da dies laut *DIN EN 12464-2* [8, S. 26-44, Tabelle 7-25] in den meisten Fällen der Grenzwert ist.

Das *Blendmaß*  $k_s$  hingegen steigt mit zunehmender Lichtpunkthöhe sowie zunehmendem Lichtstrom. Die Berechnungsfläche wurde einer Gebäudefassade nachempfunden, da sich das *Blendmaß* auf die psychologische Blendung beschränkt. Im Projektfall findet es keine Verwendung, da keine Bebauung in unmittelbarer Nähe zum Radweg existiert.

Aufgrund des geringen Gesamtlichtstromes von Variante 1, ergibt sich auch die geringste elektrische Leistung mit gerade einmal 189,56 W. Mit zunehmender Lichtpunkthöhe und des damit verbundenen Lichtstromanstiegs, erreicht Variante 4 mit 339,9 W die höchste elektrische Leistung. Auch Variante 3, welche 5,5 lm/W mehr an Lichtausbeute zur Verfügung stellt, kann nicht mit Variante 2 und 1 mithalten. Jährlich ergibt sich somit im Vergleich zu

Variante 1 ein zusätzlicher Energiebedarf von 13,21 % bei Variante 2, über 20 % bei Variante 3 und fast 80 % bei Variante 4.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass niedrige Lichtpunkthöhen in Kombination mit geringen Lichtströmen eine genauere Ausleuchtung, weniger Lichtimmission und Energieeinsparungen ermöglichen. Zusätzlich empfiehlt sich der Einsatz einer Lichtsteuerung (adaptive Beleuchtung), um die Beleuchtung ausschließlich bei Bedarf zu betreiben. Um Immissionsbetrachtungen ausreichend durchführen zu können, ist es zudem unerlässlich, die gesamte Beleuchtungsanlage zu simulieren anstatt nur Teilstücke zu berücksichtigen. Bei der Kosteneinschätzung ist zu berücksichtigen, dass bei geringeren Lichtpunktabständen, mehr Leuchten und eventuelles Zubehör benötigt werden. Diese zusätzlichen Aufwendungen stehen den eingesparten Energiekosten gegenüber.

## 5 Messung der Himmelhelligkeit

Himmelhelligkeit (*Sky Glow*) ist sowohl qualitativ, als auch quantitativ messbar. Dabei ist die genaue Ermittlung von vielen äußeren Einflüssen abhängig.

### 5.1 Qualitative Messung der Himmelhelligkeit

Qualitativ kann die Himmelhelligkeit verschiedener Orte mit Hilfe einer Kamera verglichen werden. Die Kamera muss nur wenige Bedingungen erfüllen: Es sollte die Möglichkeit geben, manuelle Anpassungen an Belichtungszeit, Blende und Lichtempfindlichkeit (ISO) vorzunehmen und die Kamera sollte auf einem Stativ bedient werden, da bei Dunkelheit höhere Belichtungszeiten (eine Sekunde und mehr) benötigt werden, welche aus der Hand nicht ohne Verwacklung aufgenommen werden können. Außerdem ist es empfehlenswert, einen Fernauslöser oder eine interne Auslösungsverzögerung zu nutzen, um zusätzlich Verwacklungen zu vermeiden.

Es sollte ein großer Teil einer Landschaft (z.B. städtisches Gebiet), idealerweise als breites Panorama- oder Weitwinkelfoto, dargestellt werden. Wird dies für mehrere Orte mit gleichbleibenden Kameraeinstellungen durchgeführt, lassen sich Vergleiche in der Aufhellung des Himmels ziehen. Zudem können mit dieser Methode besonders helle Bereiche und unter Umständen deren Ursache erkannt werden. Auch lassen sich mit dieser Methode Entwicklungen einer Beleuchtung (z.B. Umrüstung der Straßenbeleuchtung von Natriumdampflampen auf LED; Leistungsreduzierung in der Nacht) dokumentieren [4, S. 48].

Um einen möglichst genauen Vergleich weiterhin zu gewährleisten, ist es unabdingbar, die Aufnahmen unter den gleichen atmosphärischen Bedingungen und etwa zur selben Jahreszeit anzufertigen. So können Einflüsse wie Nässe, Schnee, Wolken, Mond, Polarlichter oder beispielsweise auch Brände das Ergebnis verfälschen, da sie entweder zusätzliche Lichtquellen sind oder das vorhandene Licht anders verteilen.

### 5.2 Quantitative Messung der Himmelhelligkeit

#### 5.2.1 Die Grenzhelligkeit

Die Grenzhelligkeit  $m_{gr}$  (Einheit: mag bzw. Größenklassen) ist die scheinbare Helligkeit eines Sternes, welcher mit dem bloßen Auge gerade so noch sichtbar ist [47]. Dabei stehen niedrige bis negative Werte für hellere Sterne. Ein Stern mit einer Helligkeit von +4 mag ist also heller als ein Stern mit +5 mag. Nachdem die Grenzhelligkeit ermittelt wurde, kann mit Hilfe des *Tycho-Katalogs* ermittelt werden, wie viele Sterne insgesamt unter den gegebenen Voraussetzungen beobachtbar sind [48, S. 8]. In *Millennium Star Atlas: An All-Sky Atlas Comprising One Million Stars to Visual Magnitude Eleven from the Hipparcos and Tycho*

*Catalogues and Ten Thousand Nonstellar Objects* wird der *Tycho-Katalog* tabellarisch unterteilt. Die Tabelle besteht aus 4 Spalten: *Magnitude Class* (Helligkeit/Größenklasse), *Range Included* (Gibt an, welcher Helligkeitsbereich zu der jeweiligen Größenklasse gehört), *Number by Magnitude* (Anzahl Sterne/Objekte, welche zur jeweiligen Größenklasse gehören), *Cumulative Total* (*Number by Magnitude* + alle Objekte der helleren Größenklassen) [49, S VII, Table 1]. Es ist festzustellen, dass es viel mehr scheinbar dunkle Objekte am Nachthimmel gibt, als helle. So gehören gerade einmal 2 Objekte *Magnitude Class* -1 an und 452.516 *Magnitude Class* +11 [49, S VII, Table 1]. Dementsprechend verschieden fällt der Blick in den Himmel selbst bei einem Unterschied von nur einer Größenklasse der Grenzhelligkeit aus. Während bei *Magnitude Class* +4 893 Objekte gefunden werden können, sind es bei +5 schon 2.822 [49, S VII, Table 1].

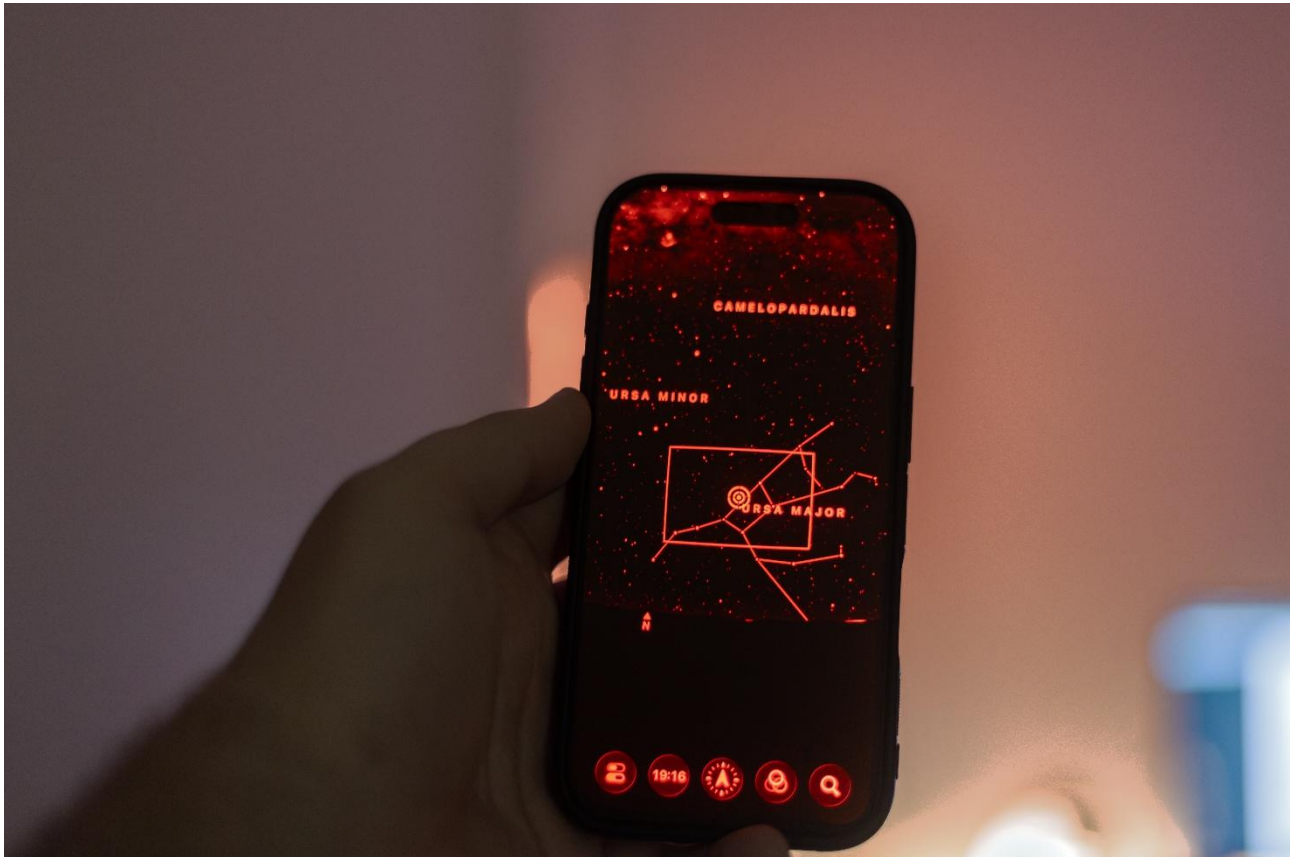
### 5.2.2 Visuelle Messung der Grenzhelligkeit

Mit dieser Methode kann die Messung der Himmelshelligkeit an jedem Ort der Erde von jeder Person ohne ein externes Messgerät durchgeführt werden. Ziel dabei ist es festzustellen, welche Grenzhelligkeit vom aktuellen Standpunkt maximal mit dem bloßen Auge sichtbar ist. Für die Feststellung der Grenzhelligkeit gibt es sogenannte Grenzgrößenkarten, welche für verschiedene Sternzeichen existieren. Auf ihnen ist für jeden Stern der Konstellation die scheinbare Helligkeit vermerkt. Die Aufgabe der messenden Person ist es, herauszufinden, welchen Stern sie gerade so erkennt, um dann mit Hilfe der Grenzgrößenkarte zu ermitteln, welchen Helligkeitswert dieser besitzt und somit maximal sichtbar ist [48, S.8]. Alternativ zur Verwendung von Grenzgrößenkarten, können auch Smartphone-Apps zur Ermittlung der Grenzhelligkeit verwendet werden. Dabei schlägt die App verschiedene Objekte vor und gibt eventuelle Hilfestellungen (z.B. *Augmented Reality*), um sie am Nachthimmel aufzufinden [48, S. 9]. Der Benutzer muss lediglich auswählen, ob das jeweilige Objekt sichtbar ist. Anhand dieser Daten ermittelt die App, welche Größenklasse maximal sichtbar ist und gibt die entsprechende Anzahl sichtbarer Himmelsobjekte gemäß des *Tycho-Kataloges* an. Problematisch ist hierbei, dass der kleinste Blick auf das Smartphone-Display bei Dunkelheit sehr schnell zum Verlust der Dunkeladaption führt, was die Fähigkeit, schwach leuchtende Objekte wie dunkle Sterne oder Galaxien wahrzunehmen, enorm einschränkt. Um dies zu vermeiden, besteht bei den meisten Telefonen die Möglichkeit, ein Farbfilter zu aktivieren. Der Bildschirm wird dabei in abgestuften Rottönen dargestellt (siehe Abbildung 12) und emittiert kaum noch Blauanteile [48, S.10]. Unter Umständen kann es aber sein, dass gewisse Details wie klein dargestellte Sterne nur noch schwach auf dem Display erkennbar sind, da durch das Rotfilter ein geringerer Kontrast abgebildet wird.

Eine weitere Alternative ist die umgekehrte Herangehensweise, indem Sterne gezählt werden. Dies kann allerdings in dunklen Gebieten mit vielen sichtbaren Sterne (z.B.

Grenzhelligkeit von +6 mag  $\rightarrow$  8768 Sterne [49, S VII]) sehr zeitintensiv bis nicht realisierbar werden und ist daher nur für helle Standorte wie Großstädte mit vereinzelt sichtbaren Sternen zu empfehlen [48, S. 7-8].

Generell ist die Fehlerquote bei der visuellen Messung hoch anzunehmen, da neben den atmosphärischen Bedingungen auch die optischen Fähigkeiten der messenden Personen einen hohen Einfluss haben.



**Abbildung 12:** Darstellung des Smartphone-Displays in Rottönen, um Dunkeladaption der Augen nicht zu gefährden [eigene Aufnahme, verwendete App: SkyGuide, 5]

### 5.2.3 Das Unihedron Sky Quality Meter (SQM)

Das *Sky Quality Meter (SQM)* ist ein Gerät der kanadischen Firma *Unihedron*, welches der Messung von Himmelhelligkeit bzw. Flächenhelligkeit dient. Dabei wird das sichtbare Licht im Zenit mit Hilfe einer Fotodiode gemessen. Der Messwinkel hängt dabei von der Variante ab. Das *SQM-Classical* misst über einen Winkel von ca.  $80^\circ$ , umfasst also einen großen Bereich des Himmels, ist damit gleichzeitig aber auch störanfälliger gegen seitlich einfallendes Licht oder erhöhte Werte durch teilweise Bewölkung [50, S. 1]. Das *SQM-L* besitzt eine Linse, was den Messbereich auf etwa  $20^\circ$  einschränkt. Dadurch kann die Messung präziser werden [51, S. 1].

Die Messwerte (Formelzeichen:  $SQM$ ) werden in  $\text{mag}/\text{arcsec}^2$  (Größenklasse pro Quadratbogensekunde) ausgegeben. Diese ist eine logarithmische Größe und wird mit Formel (8) [50, S.1] auf die Anzahl der erfassten Photonen umgerechnet.

$$F_{\text{nat/mess}} = 100^{(SQM_{\text{nat}} - SQM_{\text{mess}})/5} \quad (8)$$

Somit kann der Helligkeitsunterschied zwischen dem aktuellen Himmel und einem natürlich dunklen Nachthimmel quantitativ bestimmt werden.  $SQM_{\text{nat}}$  beschreibt den Wert, den der Nachthimmel ohne künstliche Lichtquellen liefern würde. In der Regel nimmt man hierfür  $22 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$  an [52]. Misst man nun also einen  $SQM$ -Wert von  $17 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ , bedeutet das eine Differenz von  $5 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$  zum natürlichen Wert. Dies ergibt durch Einsetzen in Formel (8) einen Faktor von 100. Ein Nachthimmel, bei dem ein  $SQM$   $17 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$  anzeigt, ist also 100x heller als ein natürlich dunkler Nachthimmel. Zusätzlich liefert *Unihedron* eine Formel (9) [50, S. 2] zur Konvertierung der  $SQM$ -Werte in die Leuchtdichte-Einheit  $\text{cd}/\text{m}^2$ , um eine bessere Vorstellung zu ermöglichen.

$$L [\text{cd}/\text{m}^2] = 10,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{0,4 \cdot SQM [\text{mag}/\text{arcsec}^2]} \quad (9)$$

Als absolute Genauigkeit gibt *Unihedron*  $\pm 10\%$  ( $\pm 0,1 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ ) an [50, S.1].

Preislich starten die Geräte bei  $163,00 \text{ €}$  (*SQM-Classic*) [53] und  $189,00 \text{ €}$  (*SQM-L*) [54]. Durch zusätzliche Features wie USB-, Ethernet- oder RS232-Schnittstelle kann der Preis bis auf etwa  $350 \text{ €}$  steigen.

#### 5.2.4 Lichtverschmutzungskarten

Im Internet gibt es mehrere Webseitenbetreiber, welche sogenannte *Light Pollution Maps* (Lichtverschmutzungskarten) anbieten. Auf diesen Karten, kann für jeden Ort der Welt ein  $SQM$ -Wert abgerufen werden. Die bekannteste Seite ist dabei *lightpollutionmap.info*. Hier wird hauptsächlich mit dem *World Atlas of the Artificial Night Sky Brightness* von 2015 gearbeitet. Weiterhin sind die Daten des *VIIRS*-Satelliten (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) der *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)* für andere Jahre verfügbar. Dieser Satellit liefert allerdings nur Daten in der Einheit  $\text{nW}/\text{cm}^2/\text{sr}$ , was sich ohne Weiteres nicht in  $\text{mag}/\text{arcsec}^2$  umrechnen lässt [55]. Diesem Problem hat sich David Lorenz angenommen und gemäß dem originalen Atlas nachgerechnet. Hierzu wird ein Modell verwendet, welches berechnet, wie viel künstliches Licht (Rohdaten von *VIIRS*) durch

Luftmoleküle und Aerosole zurück zur Erde gestreut wird [56]. Auf seiner Webseite *djlorenz.github.io* stellt er die Daten als Weltkarten-Overlay für 2016, 2020, 2022, 2023 und 2024 sowie eine Trendanzeige von 2013 bis 2024 zur Verfügung [57].

## 5.3 Praxisexperiment: Messungen mit dem *Sky Quality Meter (SQM)*

### 5.3.1 Hinführung

Mit Hilfe des in Kapitel 5.2.3 vorgestellten *Unihedron Sky Quality Meter* (Variante *Classic*, also ohne Linse) sollen an unterschiedlichen Orten Messreihen erstellt, analysiert und mit externen Daten einer *Light Pollution Map* (Lichtverschmutzungskarte) verglichen werden. Dabei sollen neben den Auswirkungen unterschiedlicher Beleuchtungssituationen auch die Einflüsse einzelner Umweltparameter untersucht werden. Die Messungen erfolgten alle im Dezember 2025.

### 5.3.2 Messablauf

Zuerst sollte ein Standort gesucht werden, welcher möglichst nicht direkt von künstlicher Beleuchtung umgeben ist. Es sollte vermieden werden, dass Leuchten von oben auf das Gerät strahlen. Besondere Vorsicht ist bei dem ausgewählten Messgerät gegeben, da es im Vergleich zum *SQM-L* nicht einen Erfassungswinkel von  $20^\circ$ , sondern ca.  $80^\circ$  besitzt [50, S. 1].

Nachdem ein passender Standort gefunden wurde, sollten die Umgebungsbedingungen notiert werden. Als Minimum sind Datum und Uhrzeit zu vermerken. Diese werden später benötigt, um den Einfluss des Mondes zu berücksichtigen. Zusätzlich sollten die aktuellen Wetterbedingungen vermerkt werden. Um ein unverfälschtes Ergebnis über die echte Himmelselligkeit zu bekommen, sollte der Himmel zum Zeitpunkt der Messung komplett frei von Bewölkung sein. Außerdem sollte der Mond nicht sichtbar sein oder sich in der Neumondphase befinden. Das Messgerät wird im Anschluss mit einer Smartphone-Klemme, welche an der Unterseite über ein  $\frac{1}{4}$ "-Gewinde verfügt, auf einem Fotostativ befestigt. Somit wird sichergestellt, dass der zu messende Himmelsbereich während der gesamten Messreihe konstant bleibt. Das Gerät muss dabei so ausgerichtet sein, dass Display und Sensor genau nach oben in Richtung Zenit zeigen (siehe Abbildung 13).

Durch Betätigung des roten Knopfes wird eine Messung begonnen und ein Dezimal-Wert auf dem Display wiedergegeben. Zusätzlich dazu ertönt ein Piepton. Laut *Unihedron* kann es vorkommen, dass Messungen unter einem dunklen Himmel bis zu einer Minute dauern können [50, S.1]. Dieser Wert wird auf einem Zettel oder in der Notizen-App des Smartphones notiert. Dieser Ablauf wird für das gesamte Messintervall (in diesem Experiment jeweils

zehn Messwerte) wiederholt. Die Anfertigung einer Messreihe mit 10 Messwerten dauert etwa fünf bis zehn Minuten inklusive Dokumentation.

Sobald ein Messwert angezeigt wird, kann durch langes Drücken auf die Taste zwischen der Anzeige der Gerätetemperatur, zuerst in °C, dann in °F, und der Seriennummer umgeschaltet werden.

Nachdem die Messung beendet ist, schaltet sich das Messdirekt selbst ab.



**Abbildung 13:** Messaufbau einer SQM-Messung [eigene Aufnahme]

### 5.3.3 Messstandorte

Gemessen wurde ausschließlich an Standorten in Sachsen, genauer gesagt: 09661 Schönborn-Dreiwerden (innerorts), 09661 Etzdorf (außerorts), 09661 Berbersdorf (Gewerbegebiet).

Zusätzlich wäre eine Messreihe auf der kanarischen Insel La Palma im Sommer 2025 interessant gewesen, um einen Vergleich zu einem sehr natürlichen Nachthimmel ziehen zu können. Leider stand zu diesem Zeitpunkt noch nicht fest, ob diese Arbeit stattfinden wird. Dementsprechend lag auch noch kein *Sky Quality Meter* vor.

### 5.3.4 Messbedingungen und Auffälligkeiten

Am Messstandort Etzdorf wurde eine Messreihe am 12.12.2025 um 22:10 Uhr bei klarem Himmel erstellt. Das SQM zeigte zu diesem Zeitpunkt eine Gerätetemperatur von 13°C an. Der Mond war zu diesem Zeitpunkt zu 39 % beleuchtet und 26° unter dem Horizont. Der erste Messwert wurde negativ durch einen Feuerwerkskörper, welcher im Ort gezündet wurde, beeinflusst und wich dadurch um 0,19 mag/arcsec<sup>2</sup> vom Mittelwert (20,72 mag/arcsec<sup>2</sup>) ab. Nach 35 Minuten wurde eine weitere Messung durchgeführt, um die Temperaturabhängigkeit zu überprüfen. Da der Wert bei einer nun angezeigten Temperatur von -1°C mit 20,78 mag/arcsec<sup>2</sup> nur leicht abwich, lässt sich eine Temperaturabhängigkeit des SQM ausschließen. Weitere 15 Minuten später sollte dies erneut überprüft werden. Nun zeigte das SQM allerdings 20,88 mag/arcsec<sup>2</sup> an. Nach einer kurzen Sichtprüfung konnte festgestellt werden, dass sich Tau gebildet hatte, welches weniger Licht auf den Sensor ließ. Nach einer kurzen Säuberung wurde die Messung erneut durchgeführt. Nun zeigte das SQM wieder 20,76 mag/arcsec<sup>2</sup> an. *Unihedron* gibt dazu an, dass der SQM-Messwert temperaturabhängig ist, der Temperatursensor diesen Effekt allerdings kompensiert und somit den wahren Wert anzeigt [52].

Der Messstandort im *Gewerbegebiet Striegistal* in Berbersdorf wurde ausgewählt, da sich hier in den letzten Jahren zwei große Gewerbekomplexe bildeten, welche augenscheinlich zu einem hohen Maß an Lichtimmission beigetragen haben. Die Messung erfolgte am 13.12.2025 um 01:25 in Nähe zum neugebauten Lager von *Transgourmet Deutschland GmbH & Co. OHG* bei klarem Himmel. Das SQM zeigte zu diesem Zeitpunkt eine Gerätetemperatur von 2°C an. Der Mond war zu diesem Zeitpunkt zu 38 % beleuchtet und 1° über dem Horizont. Unter diesen Bedingungen hatte der Mond jedoch kaum Einfluss auf die Himmelselligkeit, da er noch sehr tief am Horizont stand und sein Licht aufgrund der *Rayleigh-Streuung* in den dichten Atmosphärenschichten stark gedämpft erschien. Es war zu beobachten, dass die einzelnen Messwerte untereinander stärker vom Mittelwert (19,43 mag/arcsec<sup>2</sup>) abwichen (Standardabweichung von 10,34 %). Auffällig war an diesem Standort, dass die Außenbeleuchtung weit über die Grenzen des gewerblich genutzten Bereiches strahlte und somit naheliegende Fassaden und Felder ausleuchtete.

Am Standort in Schönborn-Dreiwerden wurden insgesamt drei Messreihen durchgeführt, um den Einfluss der Bewölkung zu berücksichtigen.

Die erste Messung fand am 12.12.2025 um 19:30 bei leicht bewölktem Himmel statt. Das SQM zeigte zu diesem Zeitpunkt eine Gerätetemperatur von 22°C an. Der Mond war zu diesem Zeitpunkt zu 41 % beleuchtet und 40° unter dem Horizont. Der Mittelwert der Messreihe lag bei 19,61 mag/arcsec<sup>2</sup>.

Am 15.12.2025 um 0:35 wurde die zweite Messung bei klarem Himmel erstellt. Zu diesem Zeitpunkt lag die Temperatur des *Sky Quality Meters* bei 23°C und der Mond stand 26° unter

dem Horizont bei einer Beleuchtung von 21 %. Der SQM-Wert lag mit  $20,57 \text{ mag/arcsec}^2$  fast  $1 \text{ mag/arcsec}^2$  über dem Wert, welcher bei leichter Bewölkung festgestellt wurde. Nach Formel (8) (siehe S. 50) bedeutet das einen 2,5-mal dunkleren Himmel als bei leichter Bewölkung.

Bei der letzten Messung am 22.12.2025 um 22:16 Uhr war der Mond nur noch zu 7 % beleuchtet und  $35^\circ$  unter dem Horizont. Der Himmel war zum Messzeitpunkt bedeckt. Die Temperatur des SQM betrug erneut  $23^\circ\text{C}$ . Bei diesen Bedingungen sank der Messwert des *Sky Quality Meters* auf  $19,12 \text{ mag/arcsec}^2$ , war damit gemäß Formel (8) 3,8-mal heller als bei klarem Himmel und überstieg damit sogar den Wert des Gewerbegebietes in Berbersdorf (unter klaren Bedingungen).

Dies verdeutlicht, warum SQM-Messungen ausschließlich in klaren Nächten angefertigt werden sollten. Messergebnisse können durch leichte Abweichungen der atmosphärischen Bedingungen schnell verfälscht werden.

### 5.3.5 Messergebnisse und Vergleichswerte mit Lichtverschmutzungskarte

Neben den in Kapitel 5.3.3 und 5.3.4 vorgestellten Orten, an denen Messungen stattfanden, wurde zur besseren Einordnung je ein sehr heller und ein sehr dunkler Ort hinzugefügt, welche ausschließlich per Lichtverschmutzungskarte ausgewertet wurde.

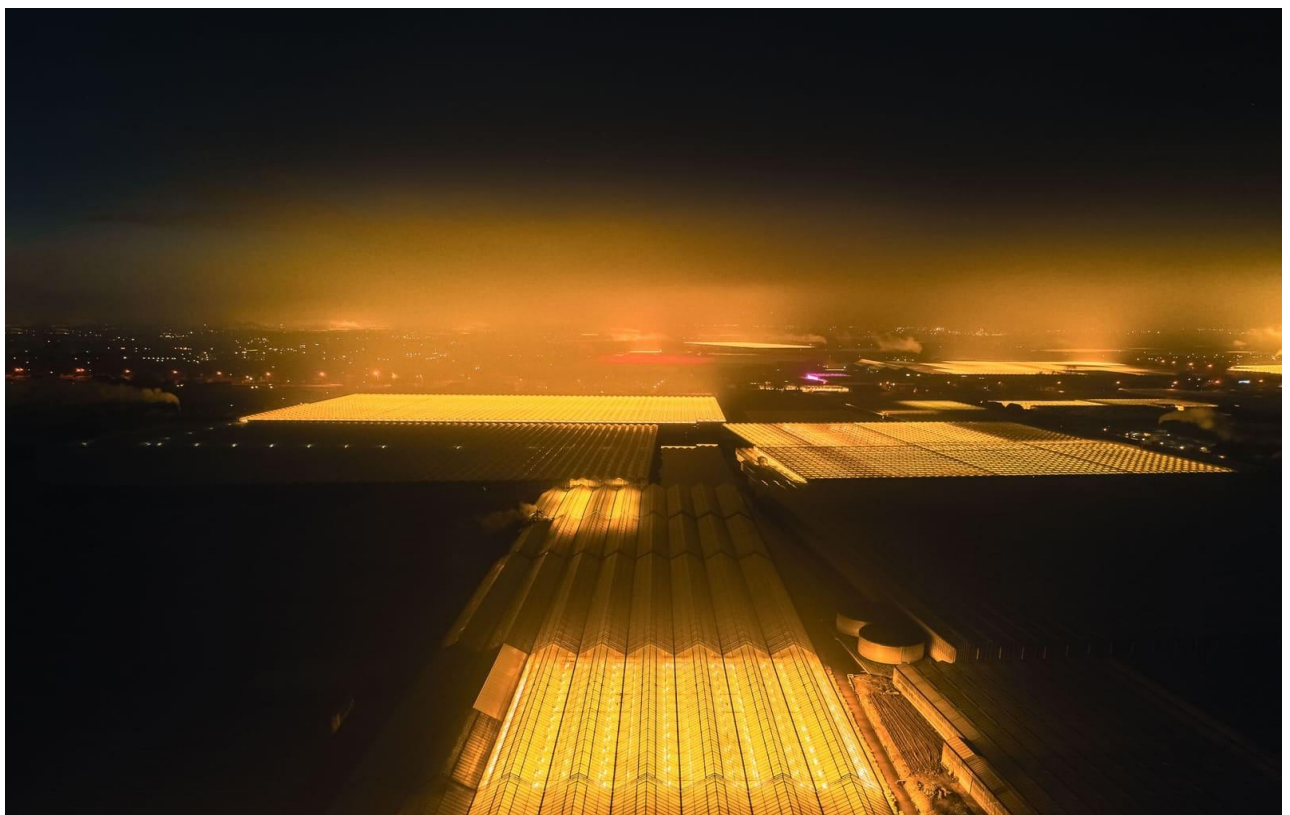
Als heller Ort wurde Naaldwijk ausgewählt. Dieser befindet sich in der Gemeinde Westland (zwischen den Städten Rotterdam und Den Haag), einem Gebiet mit einer Vielzahl an Gewächshäusern, welche nachts beleuchtet werden, um das Pflanzenwachstum zu verbessern (siehe Abbildung 14). Dies führt zu einer starken Aufhellung des Nachthimmels (siehe Abbildung 15).

Als dunkler Ort wurde das *Roque de los Muchachos Observatory* auf der Kanareninsel La Palma verwendet (siehe Abbildung 16). Da das Observatorium auf einer Höhe von über 2000 Metern über dem Meeresspiegel gelegen ist und La Palma aufgrund des seit 1988 existierenden *Ley del Cielo* [61] schon lange die Aufhellung des Himmels eindämmt, herrschen hier nahezu optimale Bedingungen für astronomische Beobachtungen (siehe Abbildung 17).

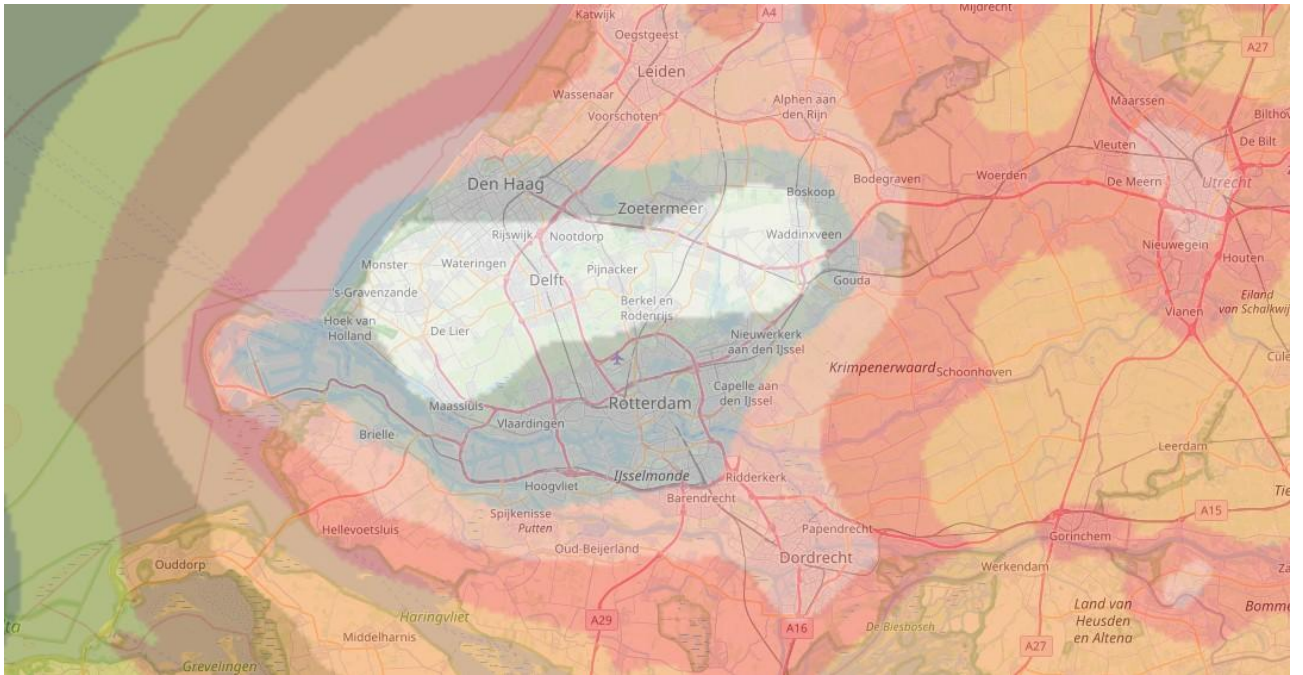
Alle Angaben der Lichtverschmutzungskarte von David Lorenz [57] sind dem 2024er Kartenoverlay entnommen. Die Abkürzung *LPA* steht jeweils für *Light Pollution Atlas*. Dieser Begriff wird auch von Lorenz für seine Lichtverschmutzungskarte verwendet [56].

**Tabelle 2 Ergebnisse der SQM-Messungen / Vergleichswerte / Auswertung**

Ort	Schönborn-Dreiwerden			Etzdorf	Berbersdorf	Naaldwijk (NL)	La Palma (ES)
	klar	leicht bewölkt	bedeckt				
Bewölkung	klar	leicht bewölkt	bedeckt	klar	klar	-	-
$SQM_{LPA}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	20,76			20,88	20,78	16	21,87
$SQM_{mess}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	20,57	19,63	19,12	20,72	19,43	-	-
$\Delta SQM_{LPA/mess-abs}$	0,19	1,13	1,64	0,16	1,35	-	-
$\Delta SQM_{LPA/mess-rel}$	-0,92%	-5,76%	-8,58%	-0,77%	-6,95%	-	-
$L_{LPA}$ [mcd/m <sup>2</sup> ]	0,54			0,48	0,53	43,00	0,19
$L_{mess}$ [mcd/m <sup>2</sup> ]	0,64	1,52	2,43	0,56	1,83	-	-
$\Delta SQM_{nat/LPA}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	1,24			1,12	1,22	6	0,13
$\Delta SQM_{nat/mess}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	1,43	2,37	2,88	1,28	2,57	-	-
$F_{LPA/nat}$	3,13			2,81	3,08	251,19	1,13
$F_{mess/nat}$	3,73	8,87	14,19	3,25	10,67	-	-
$\Delta F_{mess/LPA}$	19,12%	183,14%	352,90%	15,88%	246,74%	-	-



**Abbildung 14:** Die Beleuchtung von Gewächshäusern kann ohne geeignete Abschirmung zu einer starken Himmelsaufhellung führen. [65]



**Abbildung 15:** Die Region um Naaldwijk (Westland) dargestellt im Light Pollution Atlas. Je heller die Darstellung, desto niedriger ist der SQM-Wert an dieser Stelle. [57]



**Abbildung 16:** Mit Hilfe der zahlreichen Teleskope auf dem Roque de los Muchachos auf La Palma können Wissenschaftler unter nahezu idealen Bedingungen in die Weiten des Universums schauen. [eigene Aufnahme]



**Abbildung 17:** Im Light Pollution Atlas ist bereits erkennbar, dass die SQM-Werte auf La Palma wesentlich niedriger sind, da es kaum helle Bereiche wie in Abbildung 15 gibt. [57]

### 5.3.6 Auswertung der Messergebnisse

Die einzelnen Werte aus Tabelle 2 (siehe S. 55) werden anschließend ausgewertet.

$SQM_{LPA}$  ist der Wert, welchen der *Light Pollution Atlas* (2024) am jeweiligen Standort anzeigt. Es wird ersichtlich, dass Schönborn-Dreiwerden mit  $20,76 \text{ mag/arcsec}^2$  und das Gewerbegebiet in Berbersdorf mit  $20,78 \text{ mag/arcsec}^2$  ein ziemlich ähnliches Helligkeitsniveau aufweisen. Etzdorf ist mit  $20,88 \text{ mag/arcsec}^2$  etwas dunkler. Naaldwijk in den Niederlanden weist mit  $16 \text{ mag/arcsec}^2$  den niedrigsten Wert auf und ist dadurch mit Abstand am Hellsten. Das *Roque de los Muchachos Observatory* auf La Palma ist mit  $21,87 \text{ mag/arcsec}^2$  am dunkelsten und sehr nah an den  $22 \text{ mag/arcsec}^2$  eines Nachthimmels, der nicht von Lichtimmission betroffen ist.

$SQM_{\text{mess}}$  beschreibt den Mittelwert der einzelnen Messreihen, welche mit dem *Sky Quality Meter* angefertigt wurden. Da in Schönborn-Dreiwerden unter drei verschiedenen Bedingungen gemessen wurde, können die Werte hier auch stark variieren. Unter klarem Himmel zeigte das Messgerät im Mittel einen Wert von  $20,57 \text{ mag/arcsec}^2$  an. Dieser Wert weicht nur um  $0,19 \text{ mag/arcsec}^2$  ( $\Delta SQM_{LPA/\text{mess-abs}}$ ) bzw.  $0,92 \%$  ( $\Delta SQM_{LPA/\text{mess-rel}}$ ) vom  $SQM_{LPA}$  ab. Bei leichter Bewölkung erhöhte sich diese Abweichung auf  $1,13 \text{ mag/arcsec}^2$  bzw.  $5,76 \%$ , bei bedecktem Himmel sogar auf  $1,64 \text{ mag/arcsec}^2$  oder  $8,58 \%$ . Dabei wird deutlich, dass die Bewölkung einen großen Einfluss auf die Helligkeit hat, da durch die Wolken mehr Licht gestreut wird. Auch wenn die Abweichung des Wertes bei klarem Himmel

nur gering ist, kann sie verschiedene Ursachen haben. Zum einen ist es möglich, dass zwischen der Messung des VIIRS-Satelliten und der SQM-Messung ein Zuwachs der lokalen Helligkeit stattgefunden hat. Andererseits besteht die Möglichkeit, dass zum Zeitpunkt der Messung doch eine sehr dünne Wolkendecke vorlag, welche jedoch nicht mit dem bloßen Auge sichtbar war. Alternativ kann auch ein Messfehler (siehe Kapitel 5.2.3) vorliegen. Es kann ausgeschlossen werden, dass künstliche Lichtquellen direkt auf das Messgerät gestrahlt haben. Am Standort in Etzdorf wich  $SQM_{\text{mess}}$  mit  $20,72 \text{ mag/arcsec}^2$  um  $0,16 \text{ mag/arcsec}^2$  und damit ebenfalls nur  $0,77 \%$  ab. In Berbersdorf betrug die Abweichung jedoch  $1,35 \text{ mag/arcsec}^2$  und lag somit  $6,95 \%$  unter dem Wert des *Light Pollution Atlas*. Dies liegt mit einer großen Wahrscheinlichkeit daran, dass die Lichtimmissionswerte am Messort im *Light Pollution Atlas 2024* nicht enthalten sind, da sich das Gebäude (*Transgourmet Deutschland GmbH & Co. OHG*), welches für sie verantwortlich ist, zu diesem Zeitpunkt noch im Bau befand und erst Ende 2024/Anfang 2025 mit einer Beleuchtung ausgestattet wurde. Aus diesem Grund bietet sich dieser Ort für die weitere Betrachtung an, da so der Lichtzuwachs zu einem späteren Zeitpunkt (siehe Auswertung  $\Delta F_{\text{mess/LPA}}$ ) analysiert werden kann.

Als nächstes wurden die Werte  $SQM_{\text{LPA}}$  und  $SQM_{\text{mess}}$  mit Formel (9) (siehe S. 50) in die Leuchtdichtewerte  $L_{\text{LPA}}$  und  $L_{\text{mess}}$  konvertiert. Um übersichtlichere Werte zu erhalten, wurden die Ergebnisse mit dem Faktor 1000 multipliziert, sodass die Werte nicht in  $\text{cd/m}^2$ , sondern in  $\text{mcd/m}^2$  erhalten werden. Für den Standort Schönborn-Dreiwerden bedeutete dies eine Abweichung von  $0,1 \text{ mcd/m}^2$  beim Vergleich des  $SQM_{\text{LPA}}$  ( $0,54 \text{ mcd/m}^2$ ) mit  $SQM_{\text{mess}}$  ( $0,64 \text{ mcd/m}^2$ ) bei klarem Himmel. Bei leicht bewölktem und bedecktem Himmel war die Abweichung mit  $0,98$  bzw.  $1,89 \text{ mcd/m}^2$  auf  $1,52$  und  $2,43 \text{ mcd/m}^2$  bereits wesentlich spürbarer. Noch geringer war hingegen die Abweichung in Etzdorf – hier war der Himmel nur  $0,08 \text{ mcd/m}^2$  heller ( $0,56 \text{ mcd/m}^2$ ) als 2024 ( $0,48 \text{ mcd/m}^2$ ). In Berbersdorf stieg die Leuchtdichte auch ohne Einfluss von Bewölkung um  $1,3 \text{ mcd/m}^2$  auf  $1,83 \text{ mcd/m}^2$  ( $L_{\text{LPA}} = 0,53 \text{ mcd/m}^2$ ). Deutliche Unterschiede bei der Leuchtdichte weisen die niederländische Stadt Naaldwijk mit ganzen  $43 \text{ mcd/m}^2$  und das Observatorium auf La Palma mit gerade einmal  $0,19 \text{ mcd/m}^2$  auf.

Im Anschluss wurden alle  $SQM_{\text{LPA}}$  und  $SQM_{\text{mess}}$  vom natürlichen SQM-Wert ( $22 \text{ mag/arcsec}^2$ ) subtrahiert, um die Differenzen in Formel (8) (siehe Seite 50) weiterzuverwenden. Mit diesen neuen Werten  $F_{\text{LPA/nat}}$  und  $F_{\text{mess/nat}}$  kann nun ermittelt werden, wie viel heller der beobachtete Nachthimmel im Gegensatz zum natürlichen Nachthimmel ist. Dieser Wert kann auch mit dem *Light Pollution Atlas* von David Lorenz überprüft werden. Sein Wert *Light Pollution Index (LPI)* gibt an, wie viel heller der Himmel im Vergleich zu einem natürlich dunklen Himmel ist [58]. Bei klarem Himmel ist der Himmel über Schönborn-Dreiwerden also  $3,73$ -mal so hell wie ein lichtimmissionsfreier. Dies ist  $19 \%$  heller als der Faktor, der mit den Angaben des *Light Pollution Atlas* errechnet wurde. Bei leicht bewölktem Himmel steigt diese Abweichung auf  $+183,13 \%$  (Faktor 8), bei bedecktem Himmel sogar auf  $352,90 \%$

(Faktor 14,19). Der Etdorfer Himmel ist 3,25-mal so hell wie ein Himmel ohne Lichtimmissionen. Hier ist der Faktor, welcher dem Messwert entspringt 15,88 % größer, als jener, der aus dem *Light Pollution Atlas* abgeleitet wurde. Im Gewerbegebiet Striegistal in Berbersdorf ist der Himmel gemäß dem *Light Pollution Atlas* 3,08-mal, laut der Messung allerdings 10,67-mal so hell wie ein natürlicher Nachthimmel ohne Lichtverschmutzung. Dies ergibt ein  $\Delta F_{\text{mess/LPA}}$  von 246,74 % und entspricht damit fast dem 2,5-fachen des Immissionspotentials von 2024. Dadurch wird erst deutlich, was für einen Einfluss die Erweiterung des Gewerbegebietes auf die Aufhellung des Nachthimmels in der Gemeinde Striegistal besitzt. Bei Betrachtung des Parameters bei den beiden Extremen in Naaldwijk und La Palma fällt auf, dass der Unterschied kaum größer sein könnte. Naaldwijk kommt auf ein  $\Delta F_{\text{mess/LPA}}$  von 251,19, hat also einen ca. 250-mal helleren Himmel als La Palma, da der Himmel dort gerade einmal 1,13-mal so hell ist wie unter komplett lichtimmissionsfreien Bedingungen. Die öffentliche Beleuchtung ist dort so gut optimiert, dass die Milchstraße selbst oberhalb der bevölkerungsreichsten Stadt der Insel, Los Llanos de Aridane, sehr strukturiert sichtbar ist (siehe Abbildung 18).



**Abbildung 18:** Blick vom Mirador el Time über Los Llanos de Aridane (La Palma) [65]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Messung mit einem *Sky Quality Meter* zuerst zu verwirrenden Ergebnissen führen kann, welche ohne weitere Berechnungen nicht sehr aussagekräftig sind. Bei einer genauen Betrachtung ist festzustellen, dass die Himmelselligkeit sehr starke Schwankungen aufweisen kann, welche direkte Auswirkungen auf die

Beobachtungsqualität haben. Aus den Messungen sowie den Daten der Lichtverschmutzungskarte wird ersichtlich, dass vielerorts starke Einschränkungen für astronomische Beobachtungen auftreten. Dies wird oftmals durch zu helle oder mangelhaft ausgerichtete Beleuchtungsanlagen hervorgerufen. Besonders in ländlichen Gewerbegebieten sollte auf eine bewusster Beleuchtung gesetzt werden, bestenfalls mit Steuerungstechnik, welche Leuchten nur bei Bedarf einschaltet oder auf das gewünschte Niveau dimmt. Aus Sicherheitsgründen sollten solche adaptiven Beleuchtungsinstallationen jedoch nicht als Straßenbeleuchtung eingesetzt werden, da dies im Fehlerfall zu Unfällen führen kann.

Weiterhin lässt sich mit einer einzelnen *SQM*-Messreihe wenig über die gesamte Beobachtungsqualität eines Standortes aussagen, da das *SQM* lediglich die Himmelselligkeit im Zenit misst. Oftmals ist die Beobachtungsqualität im Zenit in dunkleren Gebieten (z.B. außerorts ländlich) sehr gut. Problematisch sind hingegen oft die „Lichtglocken“ umliegender Städte oder Gewerbegebiete, welche den Himmel in diese Richtung erheblich aufhellen. Solche Aufhellungen sind rein subjektiv beurteilbar, können jedoch auch noch in weiter Entfernung zu einer Minderung der Beobachtungsqualität führen.

Beleuchtungsplaner können *Sky Quality Meter* nutzen, um den Einfluss bereits installierter Anlagen zu untersuchen und damit zukünftige Beleuchtungsplanungen bei Bedarf bewusster auslegen. Im Fall einer dimmbaren Beleuchtung ist der Lichtstrom auch im Nachhinein einstellbar, was eine Anlage auch nach der Installation noch umweltverträglicher werden lassen kann. In solchen Fällen sollte allerdings zusätzlich die normgerechte Beleuchtung (z.B. nach DIN EN 12464-2) nachgewiesen werden, um keine Sicherheitseinbußen zuzulassen.

## 6 Umfrage

Um Erkenntnisse über die Bekanntheit von Lichtimmission in der Gesellschaft zu erlangen, soll im Anschluss die Auswertung einer Umfrage erfolgen, welche vom 11.12.2025 bis 31.12.2025 beantwortet werden konnte. Dabei ist das Ziel, einordnen zu können, ob die Problematik der Lichtimmission Beachtung erhält und inwiefern ein gesellschaftliches Interesse besteht, diese einzudämmen.

### 6.1 Umfragemethoden

Die Umfrage wurde mit Hilfe des deutschen Umfragehosts *LamaPoll* erstellt und besteht aus acht Umfrageelementen. Diese sind fast ausschließlich qualitativer Natur, mit Ausnahme einer Frage, welche neben vorgegebenen Auswahlmöglichkeiten ein Freitextfeld für zusätzliche Antworten bietet. Bestimmte Fragen werden nur dann angezeigt, wenn eine Bedingung (bestimmte Antwort bei anderer Frage) erfüllt ist. Es ist also möglich, dass nicht jede teilnehmende Person die gleiche Anzahl an Fragen erhält. Alle Fragen, mit Ausnahme der Bedingten, sind Pflichtfragen.

### 6.2 Umfrageablauf

Zuerst erfolgt eine kleine Einleitung, in welcher die beantwortende Person mit der Umfrage vertraut gemacht wird. Diese enthält auch eine grobe Einschätzung der benötigten Zeit zur Beantwortung der Umfrage, einen Hinweis auf die Teilnahmefrist sowie die Versicherung, dass die Umfrage anonym ist.

Als nächstes muss die Datenschutzerklärung, welche selbständig erstellt wurde, akzeptiert werden. Dies ist die Voraussetzung für die Teilnahme an der Umfrage.

Auf der nächsten Seite folgt eine kurze theoretische Einweisung in die Problematik der Lichtimmission, um auch Personen, welche nicht mit dem Thema vertraut sind, einen Einblick in die Folgen von Lichtimmission sowie den entsprechenden Gegenmaßnahmen zu ermöglichen.

Danach folgt die eigentliche Umfrage. Auf diese wird im anschließenden Kapitel detaillierter eingegangen.

Nachdem die Fragen beantwortet wurden, folgt eine weitere Seite, auf welcher eine kurze Danksagung erfolgt. Zudem wurde eine Kontakt-E-Mail-Adresse hinterlegt, welche Teilnehmende kontaktieren können, wenn sie an den Ergebnissen der Umfrage interessiert sind.

## 6.3 Auswertung der Umfrage

Das Teilnehmerziel der Umfrage sollten 50 Personen sein. Um Teilnehmer zu gewinnen, wurde die Umfrage auf sozialen Medien mit Familie und Freunden geteilt, welche wiederum die Möglichkeiten hatten, den Link ebenfalls weiterzuleiten. Somit konnte ein breites Publikum angesprochen werden. Schlussendlich nahmen 102 Personen an der Umfrage teil, wovon 87 diese auch erfolgreich abschlossen. Die 15 verbleibenden Personen haben die Umfrage laut *LamaPoll* zumeist auf Seite 4 abgebrochen, welche die Fragen beinhaltet (siehe Abbildung 19). Zweimal wurde dabei berichtet, dass auf dieser Seite kein Weiter-Knopf existierte und die Umfrage somit nicht abgeschlossen werden konnte. Diesen Teilnehmern wurde empfohlen, die Umfrage zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal durchzuführen, woraufhin es funktionierte. Trotz der relativ hohen Abbruchrate wurde das Teilnehmerziel erreicht. Die durchschnittliche Beantwortungsdauer lag bei etwas über sieben Minuten und damit gut im Mittel der vorhergesagten Zeit von fünf bis zehn Minuten. Auch hier gab es einige Rückfragen von Teilnehmern, welche die Umfrage bereits nach etwa drei Minuten fertig beantwortet hatten. Diese Personen waren vermutlich bereits mit dem Thema vertraut und konnten die Umfrage daher besonders schnell abschließen. Die Umfrage wurde größtenteils in der ersten Woche nach Veröffentlichung beantwortet. Den Höhepunkt stellte hierbei der 15.12.2025 mit 56 Rückläufen dar (siehe Abbildung 19).

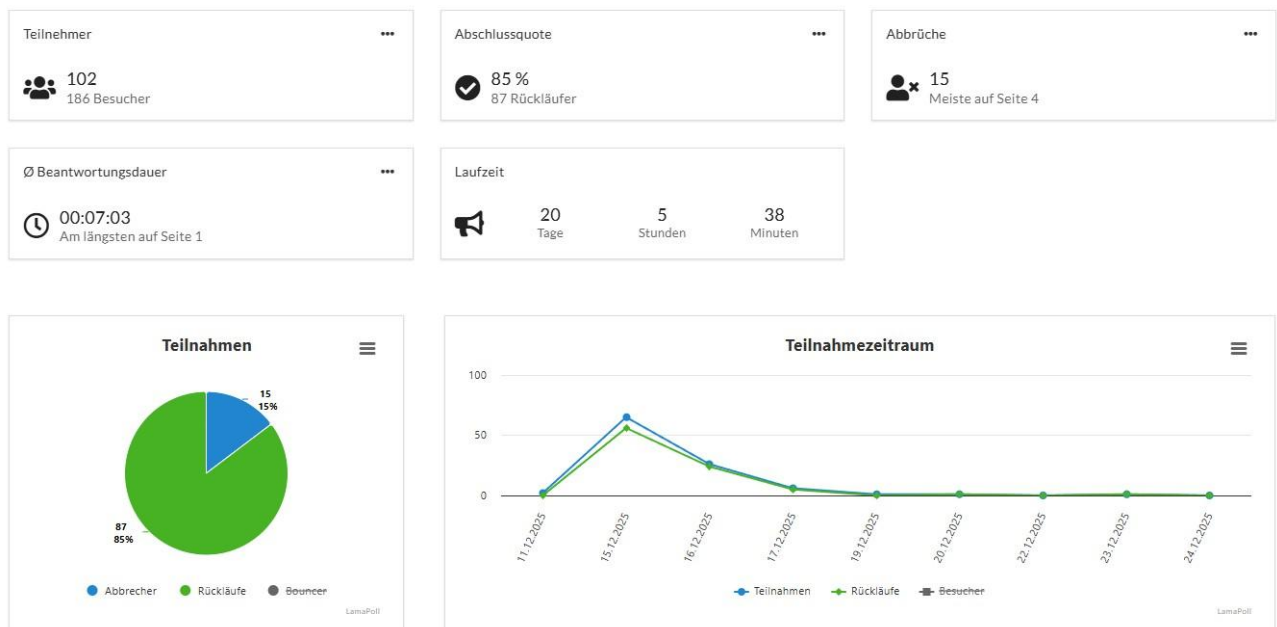


Abbildung 19: Dashboard von LamaPoll [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Fragen nacheinander ausgewertet. Frage 1 wird hierbei nicht berücksichtigt, da dies lediglich die Bestätigung der Datenschutzerklärung darstellte. Jeder Teilnehmer, der die Umfrage komplett abgeschlossen hat und hier berücksichtigt wird, musste also ohnehin *ja* auswählen, da die Beantwortung sonst nicht gestartet werden konnte.

**Frage 2: „Bitte geben Sie Ihre Altersgruppe an:“**

**Auswahlmöglichkeiten: *unter 18 Jahre***

***18-24 Jahre***

***25-34 Jahre***

***35-44 Jahre***

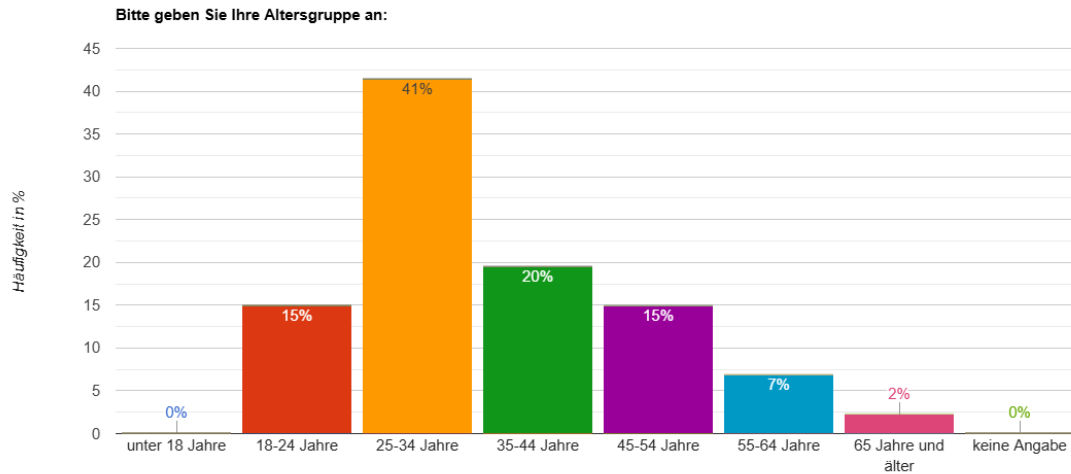
***45-54 Jahre***

***55-64 Jahre***

***65 Jahre und älter***

***Keine Angabe***

Hiermit soll ermittelt werden, welche Altersgruppen hauptsächlich in den Ergebnissen repräsentiert werden. Es ergab sich eine annähernde gaußsche Normalverteilung, wobei keine Person angab, *unter 18 Jahre* alt zu sein oder *keine Angabe* machen zu wollen. An nächster Stelle folgten die Altersgruppen *65 Jahre und älter* mit 2 Personen (2 %) und *55-64 Jahre* mit 6 Personen (7%). Danach folgten die Gruppen *18-24 Jahre* und *45-54 Jahre* mit jeweils 13 Personen (15 %). Platz 2 nahm die Gruppe *35-44 Jahre* mit 17 Personen (20 %) ein. Die meisten Personen, nämlich ganze 36 (41 %) waren jedoch *zwischen 25 und 34 Jahren* alt (siehe Abbildung 20). Möchte man die Ergebnisse also demographisch einordnen, sind sie in dieser Altersgruppe besonders aussagekräftig.



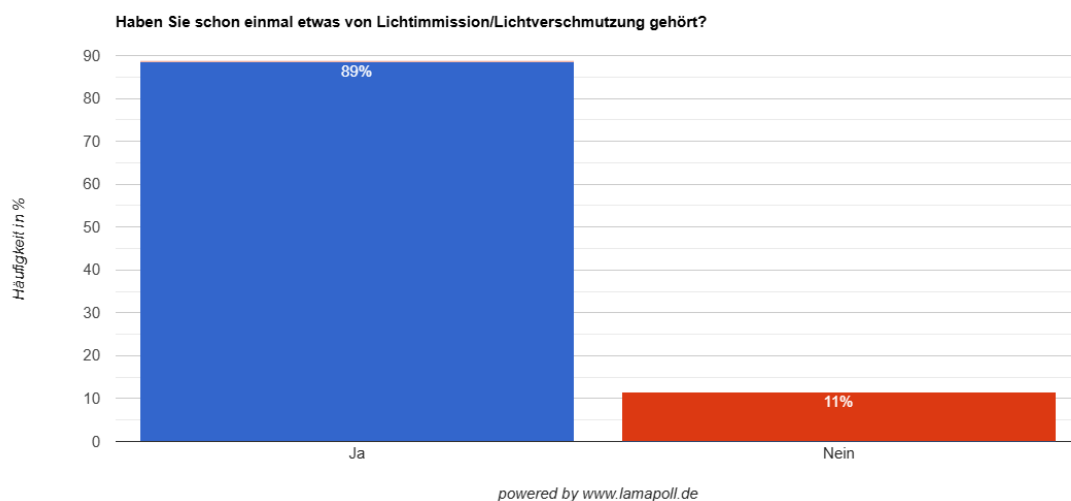
**Abbildung 20:** Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 2 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]

**Frage 3:** „Haben Sie schon einmal etwas von Lichtimmission/Lichtverschmutzung gehört?“

**Auswahlmöglichkeiten:** Ja

Nein

Bei dieser Frage stimmten 89 % (77 Personen) für *Ja* und nur 11 % (10 Personen) für *Nein* (siehe Abbildung 21), was verdeutlicht, dass Lichtimmission kein neues und unbekanntes Phänomen darstellt.



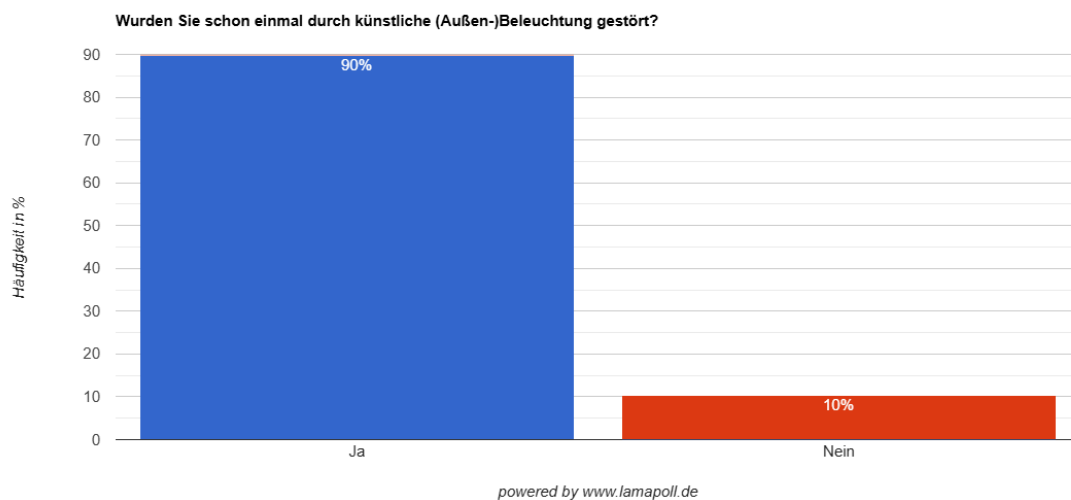
**Abbildung 21:** Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 3 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]

#### Frage 4: „Wurden Sie schon einmal durch künstliche (Außen-)Beleuchtung gestört?“

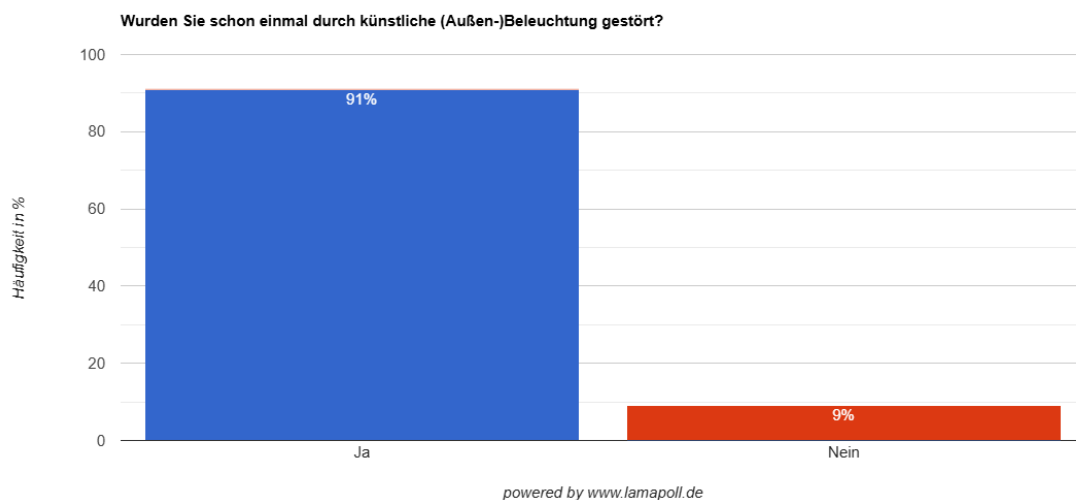
**Auswahlmöglichkeiten: Ja**

**Nein**

Hier unterschied sich der Ja-Nein-Anteil nur minimal. 90 % (78 Personen) gaben an, dass sie bereits von Lichtimmission betroffen waren, 10 % (9 Personen) nicht (siehe Abbildung 22). Durch Setzen eines Filters lässt sich feststellen, dass 70 der 77 Personen (91 %), die schon einmal etwas von Lichtimmission gehört haben, auch bereits gestört wurden (siehe Abbildung 23). Demzufolge haben die restlichen 8 von 78 Personen (ca. 9 %), welche bei der aktuellen Frage für *Ja* gestimmt haben, damit also bereits eine Einschränkung hatten, vorher noch nie etwas über Lichtimmission gehört.



**Abbildung 22:** Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 4 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]



**Abbildung 23:** Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 4 mit Bedingung, dass Frage 3 auch mit „Ja“ beantwortet wurde [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]

Frage 5 ist eine weiterführende Frage von Antwort 4 und wurde nur angezeigt, wenn diese mit *Ja* beantwortet wurde.

**Frage 5: „Wie wurden Sie beeinträchtigt?“**

**Auswahlmöglichkeiten: A – Ich wurde geblendet.**

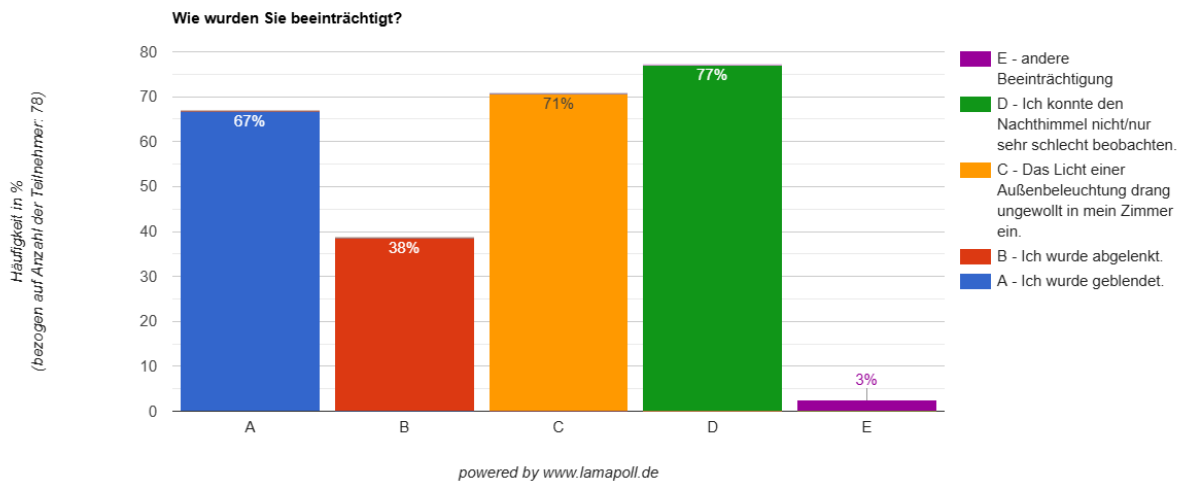
**B – Ich wurde abgelenkt.**

**C – Das Licht einer Außenbeleuchtung drang ungewollt in mein Zimmer ein.**

**D – Ich konnte den Nachthimmel nicht/nur sehr schlecht beobachten.**

**E – andere Beeinträchtigung**

Bei dieser Frage war die Mehrfachauswahl möglich. Die Wahrscheinlichkeiten beziehen sich also darauf, wie oft jede Antwort im Vergleich ausgewählt wurde und addieren sich somit nicht zu 100 %. Die wenigsten Teilnehmer (2 Teilnehmer – 3 %) wählten die individuelle Antwortmöglichkeit *E*. Einer der beiden Teilnehmer ließ das Freifeld frei. Dementsprechend hat diese Auswahl keine Auswirkungen auf die Antworten. Der andere Teilnehmer gab als Beeinträchtigung „Erschwerte Arbeit im Hobby der Astrofotografie“ an. Diese Antwort lässt sich Antwortmöglichkeit *D* zuordnen, da es das gleiche Problem, nämlich einen zu hellen Nachthimmel, beschreibt. Da beide Teilnehmer zusätzlich auch für Antwortmöglichkeit *D* gestimmt haben, hat auch diese Stimme keine weitere Auswirkung auf die Antworten. Weiterhin gaben 30 Teilnehmer (38 %) an, von Außenbeleuchtung abgelenkt worden zu sein. Höher war hingegen der Anteil an Personen, welche Antwort *A*, *C* und *D* ausgewählt haben. Platz 3 erzielte Antwort *A* mit 52 Stimmen (67 %), dicht gefolgt von Antwort *C* mit 55 Stimmen (71 %). 60 Teilnehmer (77 %) entschieden sich jedoch für Antwort *D*. Es lässt sich also feststellen, dass die meisten Leute Probleme hatten, den Sternenhimmel zu beobachten. Weiterhin klagte ein Großteil über mangelhafte Beleuchtung, welche entweder ungewollt in eigene Zimmer strahlte oder für Blendung sorgte (siehe Abbildung 24).



**Abbildung 24:** Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 5 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]

**Frage 6:** „Bitte geben Sie an, welche der folgenden Bereiche Sie am schützenswertesten erachten, indem Sie diese nach Priorität ordnen.“

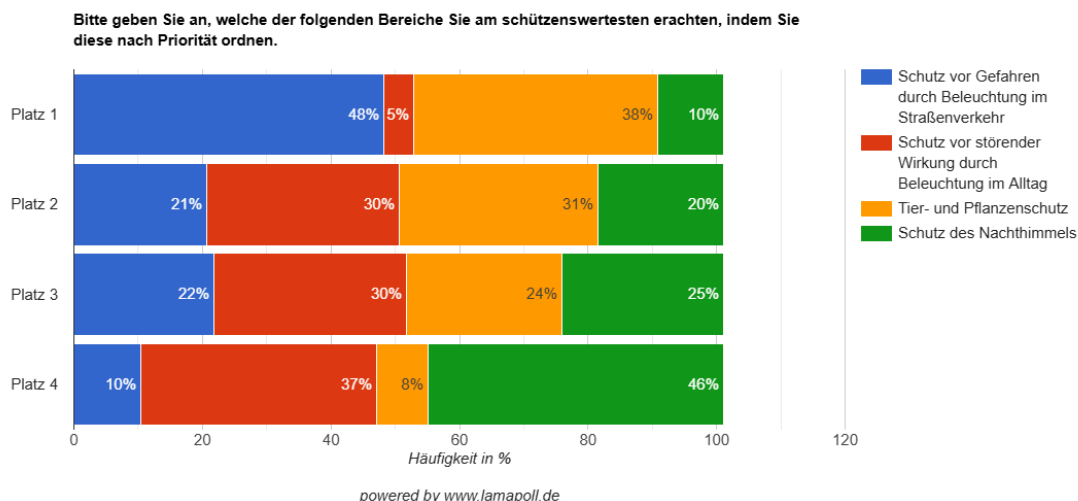
**Auswahlmöglichkeiten:** *Schutz vor Gefahren durch Beleuchtung im Straßenverkehr*

*Schutz vor störender Wirkung durch Beleuchtung im Alltag*

*Tier- und Pflanzenschutz*

*Schutz des Nachthimmels*

Mit diesem Umfrageelement soll ermittelt werden, welcher Auswirkungsbereich Priorität bei den Befragten besitzt. Die Ausgabe von *LamaPoll* gibt dabei an, wie oft die einzelnen Antworten jeweils auf Platz 1 bis 4 gelandet sind (siehe Abbildung 25). Mit Hilfe der Tabellenansicht (siehe Abbildung 26) lässt sich die durchschnittliche Platzierung einfacher ermitteln. Dabei landete *Schutz des Nachthimmels* mit einem Durchschnittsrang von 3,057 auf Platz 4, knapp gefolgt von *Schutz vor störender Wirkung durch Beleuchtung im Alltag* mit einem Durchschnittsrang von 2,977. Auch die ersten beiden Plätze liegen nah beieinander, haben jedoch einen deutlicheren Abstand zu den Plätzen 3 und 4. Platz 2 belegt *Tier- und Pflanzenschutz* mit einem Durchschnittsrang von 2,023. Die höchste Priorität hat bei den Befragten der *Schutz vor Gefahren im Straßenverkehr* mit einem Durchschnittsrang von 1,943. Aus diesen Daten ist erkennbar, dass die Befragten den Schutz vor physiologischer Blendung sowie die Unversehrtheit von Flora und Fauna priorisieren. Mit deutlichem Abstand dazu schätzen die Befragten die psychologische Blendung als Gefahr ein. Die Wahrung einer natürlichen Nacht spielt eine eher untergeordnete Rolle.



**Abbildung 25:** Ergebnisdarstellung (gestapelt) von Frage 6 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]

Position	Element ▲	Rang - Durchschnitt
4	Schutz des Nachthimmels	3.057
1	Schutz vor Gefahren durch Beleuchtung im Straßenverkehr	1.943
3	Schutz vor störender Wirkung durch Beleuchtung im Alltag	2.977
2	Tier- und Pflanzenschutz	2.023

**Abbildung 26:** Ergebnisdarstellung (Tabelle) von Frage 6 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]

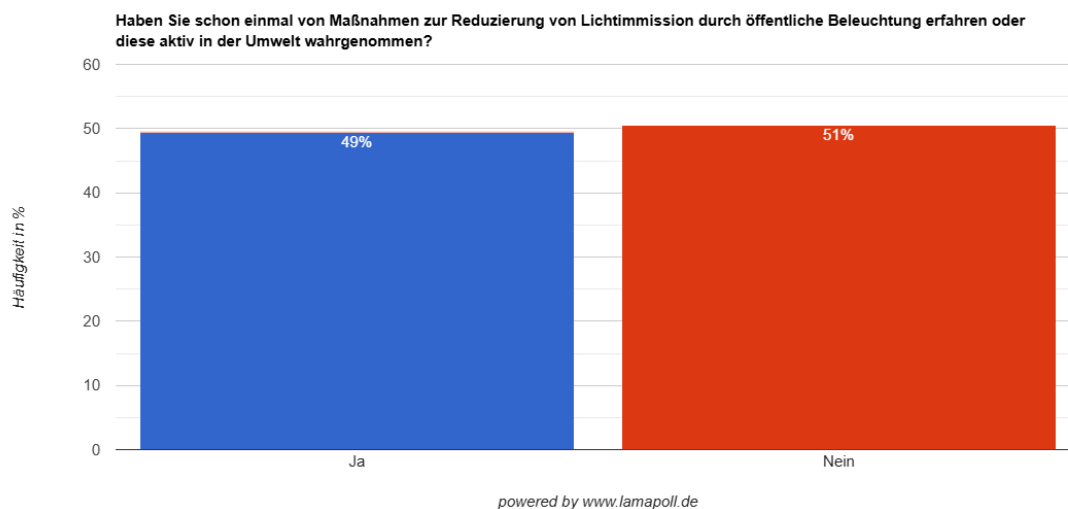
**Frage 7:** „Haben Sie schon einmal von Maßnahmen zur Reduzierung von Lichtimmission durch öffentliche Beleuchtung erfahren oder diese aktiv in der Umwelt wahrgenommen?“

**Auswahlmöglichkeiten:** Ja

**Nein**

Bei dieser Frage glitten die Antworten auseinander, denn 43 Personen (49 %) beantworteten die Antwort mit Ja und 44 Personen (51 %) mit Nein (siehe Abbildung 27). Hier wird deutlich, dass die Problematik der Lichtimmission mit ihren Auswirkungen zwar oft als störend wahrgenommen wird, meist aber so hingenommen werden muss, da viele Maßnahmen noch nicht flächendeckend umgesetzt werden. Um sich über lichtimmissionsmindernde Maßnahmen wie adaptive Beleuchtung oder den Einfluss der Farbtemperatur zu informieren, sind Eigeninteresse und häufig auch der Zugang zu Fachliteratur erforderlich, da Licht als

Umwelteinfluss in der Öffentlichkeit und in den Medien bei Weitem nicht so präsent ist wie andere Umwelteinflüsse (z. B. CO<sub>2</sub>, Lärm).



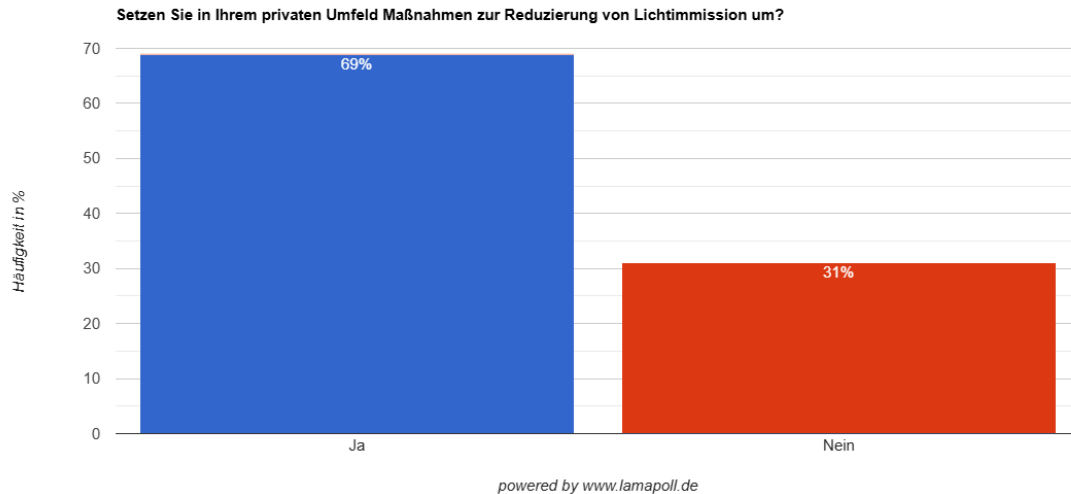
**Abbildung 27:** Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 7 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]

**Frage 8:** „Setzen Sie in Ihrem privaten Umfeld Maßnahmen zur Reduzierung von Lichtimmission um?“

**Auswahlmöglichkeiten:** *Ja*

*Nein*

Zu dieser Frage wurde ein zusätzliches Hinweisfeld eingefügt, um den Teilnehmenden Maßnahmen aufzuzeigen, deren positive Wirkung ihnen gegebenenfalls nicht bekannt war. Folglich stimmten 60 Personen (69 %) für *Ja* und 27 Personen (31 %) für *Nein* (siehe Abbildung 28). Dies ist ein positives Zeichen, da private Beleuchtung oft auch einen großen Einfluss auf Lichtimmission haben kann, da sie keinen Auflagen unterliegt. Oft kommt es daher vor, dass kaltweiße Gartenbeleuchtungen die ganze Nacht ungehindert in alle Richtungen strahlen. Unter Umständen kann es sein, dass die Aussagekraft der *Nein*-Stimmen nicht zu 100 % gegeben ist, da Teilnehmende ohne die Möglichkeit, Maßnahmen umzusetzen (z.B. Wohnung zur Miete ohne Außenanlagen), eventuell auch für *Nein* gestimmt haben. Dies hätte bei der Erstellung der Umfrage berücksichtigt werden sollen.



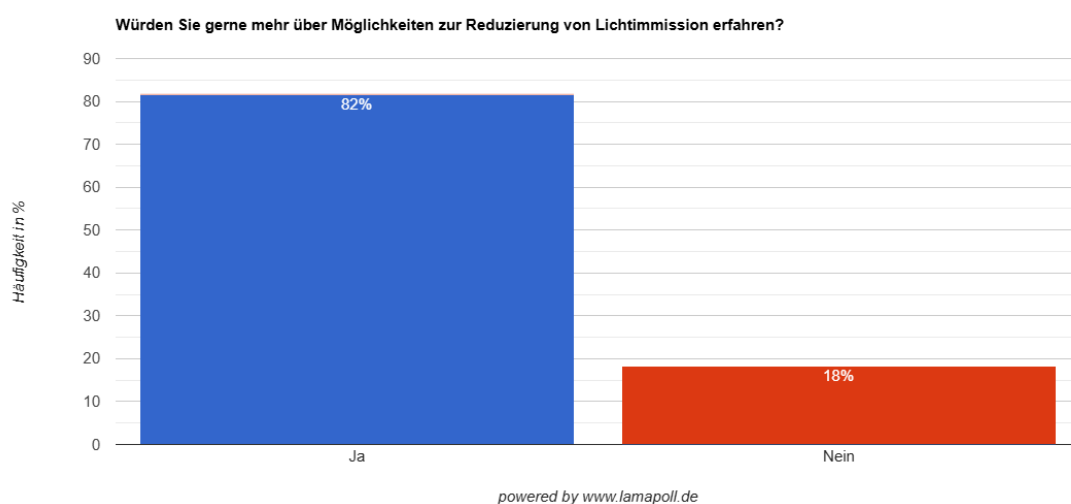
**Abbildung 28:** Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 8 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]

**Frage 9:** „Würden Sie gerne mehr über die Möglichkeit zur Reduzierung von Lichtimmission erfahren?“

**Auswahlmöglichkeiten:** Ja

Nein

Hier stimmten 71 Personen (82 %) dafür und 16 Personen (18 %) dagegen (siehe Abbildung 29). Dies ist ein positives Zeichen für ein Interesse am Schutz der Nacht.



**Abbildung 29:** Ergebnisdarstellung (Säulen) von Frage 9 [eigene Erhebung; Auswertung und Visualisierung mit LamaPoll]

Abschließend lässt sich sagen, dass das Interesse an der Eindämmung von Lichtimmission durchaus gegeben ist. Vorrangig interessieren sich die Befragten besonders für eine Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit und eine Aufwertung des Umweltschutzes. Es ist zudem festzustellen, dass eine Aufklärung der Bevölkerung über das Thema erfolgen sollte, um der Problematik noch mehr Aufmerksamkeit zu widmen, sodass in Zukunft bei der Planung mehr auf die Nachhaltigkeit von (Außen-)Beleuchtungsanlagen geachtet wird. Besonders hinsichtlich des stets wachsenden Umweltbewusstseins ist zu erwarten, dass der Ausbau ökologischer Beleuchtungsanlagen zukünftig stärker von der Bevölkerung gefordert wird, wenn eine Aufklärung über die Auswirkungen von falsch eingesetzter Außenbeleuchtung erfolgt.

Für Beleuchtungsplaner bedeutet dies eine genauere Abstimmung mit Umweltbehörden. Auch wenn keine expliziten Forderungen zur Eindämmung von Lichtimmission gegeben sind, sollte sich die Planung stets an den „Fünf Prinzipien für verantwortungsvolle Außenbeleuchtung“ von *DarkSky International* orientieren [17]. Speziell der Einsatz von adaptiver Beleuchtung sollte in Zusammenarbeit mit Automatisierungstechnikern untersucht werden.

## Zusammenfassung/Fazit

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit dem Phänomen der Lichtimmission, welche oft durch den falschen Einsatz künstlicher Außenbeleuchtung hervorgerufen wird. Ziel der Arbeit ist es, einen praxisnahen Leitfaden für einen verantwortungsvollen und nachhaltigen Umgang mit Außenbeleuchtung zu entwickeln, sowie Möglichkeiten zur Abschwächung von Lichtimmission aufzuzeigen.

Zu Beginn werden grundlegende Begriffe definiert und lichttechnische Parameter erläutert, die für das Verständnis der Arbeit relevant sind. Anschließend erfolgt eine Übersicht zu bestehenden Normen, Richtlinien und Empfehlungen, die sich dem Thema widmen. Darauf aufbauend werden die Folgen von Lichtimmission im Alltag, für Tiere und Pflanzen sowie für die Astronomie untersucht. Dabei zeigt sich, dass künstliches Licht nicht nur das Leben des Menschen bestimmt, sondern auch erhebliche ökologische, gesundheitliche sowie naturwissenschaftliche Auswirkungen haben kann.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Vorstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Reduzierung von Lichtimmission. Hierzu zählen unter anderem eine bedarfsgerechte Lichtverteilung, die Wahl der geeigneten Farbtemperatur sowie der Einsatz steuerbarer Beleuchtungssysteme.

Weiterhin werden anhand eines Radweges in einem ökologisch sensiblen Gebiet unterschiedliche Varianten einer Außenbeleuchtungsanlage mit der Planungs-Software *DIALux evo* simuliert und hinsichtlich der hervorgerufenen Lichtimmission verglichen. Dabei wird insbesondere der Einfluss der Lichtpunkthöhe auf die Lichtverteilung und auf die daraus resultierende Entstehung von Lichtimmission betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass durch gezielte Anpassung der Parameter eine deutliche Reduzierung unerwünschter Lichtabstrahlung erreicht werden kann, ohne die funktionalen Anforderungen an die Beleuchtung zu vernachlässigen.

Ergänzend zur Simulation werden Messungen der Himmelshelligkeit mit einem *Unihedron Sky Quality Meter* durchgeführt. Die Messreihen, welche an mehreren Standorten aufgenommen wurden, verdeutlichen die lokalen Unterschiede der Himmelsaufhellung und zeigen zudem, dass atmosphärische Bedingungen einen erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Der Vergleich mit Lichtverschmutzungskarten ermöglicht eine Einordnung der Messwerte und bestätigt die grundsätzliche Eignung des Messverfahrens bei sorgfältiger Durchführung und Interpretation.

Abschließend wird mit Hilfe einer Umfrage untersucht, inwieweit Lichtimmission in der Bevölkerung wahrgenommen wird und wie problematisch ihr Einfluss eingeschätzt wird. Die Ergebnisse zeigen ein grundsätzliches Bewusstsein für die Problematik sowie ein Interesse an der Eindämmung des Umwelteinflusses.

Insgesamt verdeutlicht die Arbeit, dass Lichtimmission ein relevantes Umweltproblem darstellt, dessen Minderung durch eine bewusste und fachgerechte Beleuchtungsplanung wesentlich unterstützt werden kann. Es ist vorstellbar, dass künstliche Außenbeleuchtung in naher Zukunft bewusster und gezielter eingesetzt wird, da die Folgen von Lichtimmission direkt spürbar sind, die Maßnahmen dagegen teilweise einfach umsetzbar sind und oft auch ökonomische Vorteile bieten.

## Quellenverzeichnis

- [1] **Bundesrepublik Deutschland.** *Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)*. In der jeweils gültigen Fassung.
- [2] **Schröter-Schlaack, Christoph; Schule-Römer, Nona; Revermann, Christoph.** *Ursachen, Ausmaß und Auswirkungen der Lichtverschmutzung*. Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, 2020.
- [3] **Ris, Hans Rudolf.** *Beleuchtungstechnik für Praktiker*. Berlin: VDE Verlag, 2024.
- [4] **Kuechly, H.; Meier, J.; Kyba, C.; Hänel, A.** *Ausmaß der Lichtverschmutzung und Optionen zur Minderung der negativen Auswirkungen*. Potsdam: LUP – Luftbild Umwelt Planung GmbH und Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2018.
- [5] **Fifth Star Labs LLC.** *Skyguide (Version 12.0.8)* [Astronomie-App für iOS (iPhone-App)]
- [6] **DIAL GmbH.** *Neue Berechnungsgrößen für Lichtimmission und Störlicht mit DIALux evo 13*. [Online]  
<https://www.dialux.com/de-DE/news-detail/neue-berechnungsgroessen-fuer-lichtimmission-und-stoerlicht-mit-dialux-evo-13> (Zugriff: 06.01.2026).
- [7] **Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI).** *Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen*. 2012.
- [8] **Technisches Komitee CEN/TC 169 „Licht und Beleuchtung“.** *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 2: Arbeitsplätze im Freien; Deutsche Fassung EN 12464-2:2024*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2025.
- [9] **DarkSky International.** *Electronic Billboards, electronic message centers*. [Online]  
<https://darksky.org/resources/guides-and-how-tos/electronic-billboards/> (Zugriff: 06.01.2026).
- [10] **Bundesrepublik Deutschland.** *Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung - BauNVO)*. 1962.
- [11] **Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).** *National Committees*. [Online]  
<https://www.cie.co.at/about-cie-0/membership/national-committees> (Zugriff: 06.01.2026).
- [12] **Commission Internationale de l'Éclairage.** *Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Installations, 2<sup>nd</sup> Edition*. Wien: Commission Internationale de l'Éclairage, 2017.

- [13] **Adrian, W.; Gerdes H.-R.; Hartmann, E.; Jainski, P.; Pfeffer K.A.; Pusch, R., Range H.D.; Schreiber, G.; Steck, B.** *Methoden zur Bewertung und Bewertung der Blendung in der Straßenbeleuchtung*. Hamburg: LiTG-Fachausschuß „Außenbeleuchtung“ Arbeitsgruppe „Blendung“, 1981.
- [14] **Sternenstadt Fulda.** *Dark Sky Community*. [Online]  
<https://www.sternenstadt-fulda.de/#dark-sky-community> (Zugriff: 06.01.2026).
- [15] **DarkSky International.** *International DarkSky Places*. [Online]:  
<https://darksky.org/what-we-do/international-dark-sky-places/> (Zugriff: 06.01.2026).
- [16] **Sternenstadt Fulda.** *Dark Sky City – Richtlinie der Stadt Fulda zum nachhaltigen Umgang mit funktionalem und gestalterischem Licht im Außenbereich*. [Online]  
[https://www.sternenstadt-fulda.de/d67/beleuchtungs-richtlinie/Web\\_Flyer\\_Lichtrichtlinien.pdf](https://www.sternenstadt-fulda.de/d67/beleuchtungs-richtlinie/Web_Flyer_Lichtrichtlinien.pdf) (Zugriff: 06.01.2026).
- [17] **DarkSky International.** *Five Principles for Responsible Outdoor Lighting*. [Online]  
<https://darksky.org/resources/guides-and-how-tos/lighting-principles/> (Zugriff: 06.01.2026).
- [18] **Zhaga Consortium.** *Smart standards. Smarter lighting*. [Online]  
<https://www.zhagastandard.org> (Zugriff: 06.01.2026).
- [19] **Sternenstadt Fulda.** *Aktives Handeln*. [Online]  
<https://www.sternenstadt-fulda.de/#aktives-handeln> (Zugriff: 06.01.2026).
- [20] **Paten der Nacht.** *Lichtverschmutzung kann Bäumen schaden*. [Online]  
<https://www.paten-der-nacht.de/lichtverschmutzung-schadet-baeumen/> (Zugriff: 06.01.2026).
- [21] **NABU – Naturschutzbund Deutschland.** *Herbstfärbung der Blätter*. [Online]  
<https://www.nabu.de/tiere-und-pflanzen/pflanzen/pflanzenwissen/02724.html> (Zugriff: 06.01.2026).
- [22] **Paten der Nacht.** *Platane, Aufnahme vom 09.11.2020*. (Abbildung, Copyright: Sabine Frank) [Online]  
<https://www.paten-der-nacht.de/wp-content/uploads/2020/11/Platane-02-09112020.jpg> (Zugriff: 06.01.2026).
- [23] **Forum Stellarum.** *Beobachtungs- bzw. Erlebnisbericht vom Polarlicht – 10. auf 11. Mai 2024*. [Online]  
<https://forum-stellarum.de/showthread.php?tid=7679> (Zugriff: 06.01.2026).
- [24] **NABU – Naturschutzbund Deutschland.** *Ökologische Stadtbeleuchtung*. [Online]  
<https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/energieeffizienz-und-gebaeudesanierung/artenschutz/28415.html> (Zugriff: 06.01.2026).

- [25] **Kyba, C., Küster, T., Sánchez de Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C. D., Gaston, K. J., Guanter, L.** *Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent.* Science Advances, 2017.
- [26] **Eastside Audubon Society.** *Lights Out For Birds.* [Online]  
<https://www.eastsideaudubon.org/lights-out> (Zugriff: 06.01.2026).
- [27] **SEA - Servicio de Evaluación Ambiental.** *INNA – Integrated Energy Infrastructure Project for the Generation of Hydrogen and Green Ammonia.* [Online]  
<https://www.sea.gob.cl/en/portal-de-participacion-ciudadana-y-consulta-indigena/proyecto/inna-proyecto-integrado-de> (Zugriff: 06.01.2026).
- [28] **ESO - European Southern Observatory.** *Neue ESO-Analyse bestätigt schwere Beeinträchtigung durch geplanten Industriekomplex in der Nähe des Paranal.* [Online]  
<https://www.eso.org/public/austria/news/eso2506/> (Zugriff: 06.01.2026).
- [29] **Universität Heidelberg.** *LIGHT POLLUTION – A THREAT TO ASTRONOMY IN THE ATACAMA DESERT.* [Online]  
<https://www.uni-heidelberg.de/en/newsroom/light-pollution-a-threat-to-astronomy-in-the-atacama-desert> (Zugriff: 06.01.2026).
- [30] **ESO - European Southern Observatory.** *Light pollution at the world's major astronomical observatories.* [Online]  
<https://www.eso.org/public/images/eso2501b/> (Zugriff: 06.01.2026).
- [31] **NASA – National Aeronautics and Space Administration.** *Webb's Orbit at Sun–Earth Lagrange Point 2 (L2).* [Online]  
<https://science.nasa.gov/asset/webb/webbs-orbit-at-sun-earth-lagrange-point-2-l2/> (Zugriff: 06.01.2026).
- [32] **International Dark-Sky Association (neuer Name: DarkSky International).** *Visibility, Environmental, and Astronomical Issues Associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting.* Tucson (AZ), 2010.
- [33] **DarkSky International.** *DarkSky Recognized Codes and Statutes guidelines.* [Online]  
<https://darksky.org/what-we-do/advancing-responsible-outdoor-lighting/darksky-recognized-codes-and-statutes/darksky-recognized-codes-and-statutes-guidelines/> (Zugriff: 06.01.2026).
- [34] **TRILUX.** *Akzentuierende Beleuchtung.* [Online]  
[https://www.trilux.com/fileadmin/Downloads/Brochures/24\\_21\\_Akzentuierende\\_Beleuchtung\\_Neuaufgabe\\_2024.pdf](https://www.trilux.com/fileadmin/Downloads/Brochures/24_21_Akzentuierende_Beleuchtung_Neuaufgabe_2024.pdf) (Zugriff: 06.01.2026).

- [35] **Leipziger Leuchten.** *ALFONS / DA.* [Online]  
<https://www.leipziger-leuchten.com/produkte/leuchten//alfons/alfons-i/alfons-i-da> (Zugriff: 06.01.2026).
- [36] **Selux.** *Beta.* [Online]  
<https://www.selux.com/ger/de/products/beta> (Zugriff: 06.01.2026).
- [37] nicht vergeben
- [38] nicht vergeben
- [39] **Zhaga Consortium.** *February 2018.* [Online]  
[https://www.zhagastandard.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=340](https://www.zhagastandard.org/index.php?option=com_content&view=article&id=340) (Zugriff: 06.01.2026).
- [40] **Weber, M. (Siteco).** *SITECO<sup>live</sup> Event Von null auf effizient: Bewegungsmelder in der Praxis.* [Seminarunterlagen] Traunreut: Siteco, 2025.
- [41] **DIALux.** *Für dich machen wir Lichtplanung einfach.* [Online]  
<https://www.dialux.com/de-DE/ueber-uns> (Zugriff: 06.01.2026).
- [42] **TRILUX.** *Planungshilfe DIN 13201.* [Online]  
[https://www.trilux.com/fileadmin/Downloads/Manuals/Planungshilfen/23\\_22-D\\_Planungshilfen\\_13201.pdf](https://www.trilux.com/fileadmin/Downloads/Manuals/Planungshilfen/23_22-D_Planungshilfen_13201.pdf)(Zugriff: 06.01.2026).
- [43] **Landeshauptstadt Dresden, Umweltamt.** *Artenschutzrechtliche Auflagen und artenschutzfachliche Hinweise zur Beleuchtung des Radweges.* Dresden, 2025.
- [44] **Technisches Komitee CEN/TC 169 „Licht und Beleuchtung“.** *Straßenbeleuchtung – Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklasse.* Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2021.
- [45] **lightpollutionmap.** [Online]  
<https://www.lightpollutionmap.info> (Zugriff: 06.01.2026).
- [46] **Technisches Komitee CEN/TC 169 „Licht und Beleuchtung“.** *Straßenbeleuchtung – Teil 2: Gütemerkmale; Deutsche Fassung EN 13201-2:2015.* Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2016.
- [47] **Wikipedia.** *Grenzgröße.* [Online]  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Grenzgröße> (Zugriff: 06.01.2026).
- [48] **Kaltenegger, F.** *Wie kann man Lichtverschmutzung messen?* [Diplomarbeit] Graz: Karl-Franzens-Universität Graz, 2018.
- [49] **Sinnott, R. W., Perryman, M.A.C.** *Millennium Star Atlas.* Cambridge (MA): Sky Publishing Corporation, 1997; Noordwijk (NL): European Space Agency, 1997.

- [50] **Unihedron.** *Thank you for purchasing a Sky Quality Meter (SQM) from Unihedron!* [Bedienungsanleitung] [Online]  
[https://www.unihedron.com/projects/darksky/Instruction\\_sheet.pdf](https://www.unihedron.com/projects/darksky/Instruction_sheet.pdf) (Zugriff: 06.01.2026).
- [51] **Unihedron.** *Thank you for purchasing a Sky Quality Meter (SQM-L) from Unihedron!* [Bedienungsanleitung] [Online]  
[https://www.unihedron.com/projects/sqm-l/Instruction\\_sheet.pdf](https://www.unihedron.com/projects/sqm-l/Instruction_sheet.pdf) (Zugriff: 06.01.2026).
- [52] **Unihedron.** *Sky Quality Meter - FAQ.* [Online]  
<https://www.unihedron.com/projects/darksky/faq.php> (Zugriff: 06.01.2026).
- [53] **Astroshop.** *Fotometer Sky Quality Meter.* [Online]  
<https://www.astroshop.de/fotometer/unihedron-fotometer-sky-quality-meter/p,20963> (Zugriff: 06.01.2026).
- [54] **Astroshop.** *Fotometer Sky Quality Meter mit Linse.* [Online]  
<https://www.astroshop.de/fotometer/unihedron-fotometer-sky-quality-meter-mit-linse/p,20964> (Zugriff: 06.01.2026).
- [55] **lightpollutionmap.** *Help using lightpollutionmap.info.* [Online]  
<https://www.lightpollutionmap.info/help.html> (Zugriff: 06.01.2026).
- [56] **Lorenz, D.** *Light Pollution Atlas.* [Online]  
<https://djlorenz.github.io/astronomy/lp/index.html> (Zugriff: 06.01.2026).
- [57] **Lorenz, D.** *Light Pollution Atlas.* [Online]  
<https://djlorenz.github.io/astronomy/lp/overlay/dark.html> (Zugriff: 06.01.2026).
- [58] **Lorenz, D.** *Color Scale.* [Online]  
<https://djlorenz.github.io/astronomy/lp/colors.html> (Zugriff: 06.01.2026).
- [59] **ZDF.** heute Xpress [TV], ausgestrahlt am 23.12.2025.
- [60] **Tagesschau.** *Rätsel um Lichter am Himmel gelöst: Keine Polarlichter über Stuttgart.* [Online]  
<https://www.tagesschau.de/inland/regional/badenwuerttemberg/swr-raetsel-um-lichter-am-himmel-geloest-keine-polarlichter-ueber-stuttgart-100.html> (Zugriff: 06.01.2026).
- [61] **IAC - Instituto de Astrofísica de Canarias.** *Sky Protection.* [Online]  
<https://www.iac.es/en/observatorios-de-canarias/sky-protection> (Zugriff: 06.01.2026).
- [62] **Selux.** *Beta Produktabbildung* (Abbildung, Copyright: Selux). [Online]  
<https://www.selux.com/media/pages/products/beta/0beaa0b5df-1631640232/beta-pendel-leuchte-1024x-q85.jpg> (Zugriff: 06.01.2026).

[63] **Bega**. *Zhaga-Schnittstelle* (Abbildung, Copyright: Bega). [Online]  
[https://cdn.bega.com/cdn-cgi/image/w=1200,fit=cover,gravity=0.00x0,f=auto/https://images.ctfassets.net/w2xcep4i3dcd/5xNw8rW83MwV9tYXc8o-ghk/8dbdea975c2af48f79afdf8c0ad9b8bb/zhaga\\_M016b\\_ausschnitt-2.jpg](https://cdn.bega.com/cdn-cgi/image/w=1200,fit=cover,gravity=0.00x0,f=auto/https://images.ctfassets.net/w2xcep4i3dcd/5xNw8rW83MwV9tYXc8o-ghk/8dbdea975c2af48f79afdf8c0ad9b8bb/zhaga_M016b_ausschnitt-2.jpg) (Zugriff: 06.01.2026).

[64] **Leipziger Leuchten**. *Alfons I DA LED* (Abbildung, Copyright: Leipziger Leuchten). [Online]  
[https://www.leipziger-leuchten.com/fileadmin/\\_processed\\_/files/c/6/csm\\_Alfons\\_I\\_DA\\_LED\\_1\\_Modul\\_aff8c2c024.jpg](https://www.leipziger-leuchten.com/fileadmin/_processed_/files/c/6/csm_Alfons_I_DA_LED_1_Modul_aff8c2c024.jpg) (Zugriff: 06.01.2026).

[65] **Hegen, T.** *The Greenhouse Series*. [Online]  
[https://cdn.prod.website-files.com/5fb173c4176306108ceab3b2/6032a26245544b83c48b1dd8\\_The\\_Greenhouse\\_Series-8-p-1600.jpeg](https://cdn.prod.website-files.com/5fb173c4176306108ceab3b2/6032a26245544b83c48b1dd8_The_Greenhouse_Series-8-p-1600.jpeg) oder <https://www.tomhegen.com/collections/the-greenhouse-series> (Zugriff: 06.01.2026).

## **Einband:**

Logo der Westsächsischen Hochschule Zwickau:

**WHZ**. Corporate Design der WHZ [Online, geschützter Bereich]  
<https://www.whz.de/hochschule/service/corporate-design/>

Design-Vorlage für den Einband:

**druck-deine-bachelorarbeit / Hirsch GmbH...Printmedien**. Hardcover Modern Umschlag-Vorlage downloaden. [Online]  
<https://druck-deine-bachelorarbeit.de/bindungen/hardcover-modern/> (Zugriff: 06.01.2026)

Coverbild:

**eigene Aufnahme**