

Nächtliche Befliegung Wiens zum Zweck einer Qualitätssicherung der aktuellen Umrüstung der öffentlichen Beleuchtung in Bezug auf Lichtverschmutzung

*Markus Reithofer, Verein Kuffner-Sternwarte
Wien, Juni 2023*



INHALT

Allgemeine Einführung	3
Wohin leuchtet die Wiener Standardleuchte?	5
Hintergründe des Begriffs Lichtverschmutzung	6
Überlegungen zur Messmethodik	8
CO₂-Fußabdruck der Studie. Verhältnismäßigkeit.	10
Organisation der Studiendurchführung	11
Messmethodik	15
Auswertung	19
Ergebnisse	20
Literatur	36

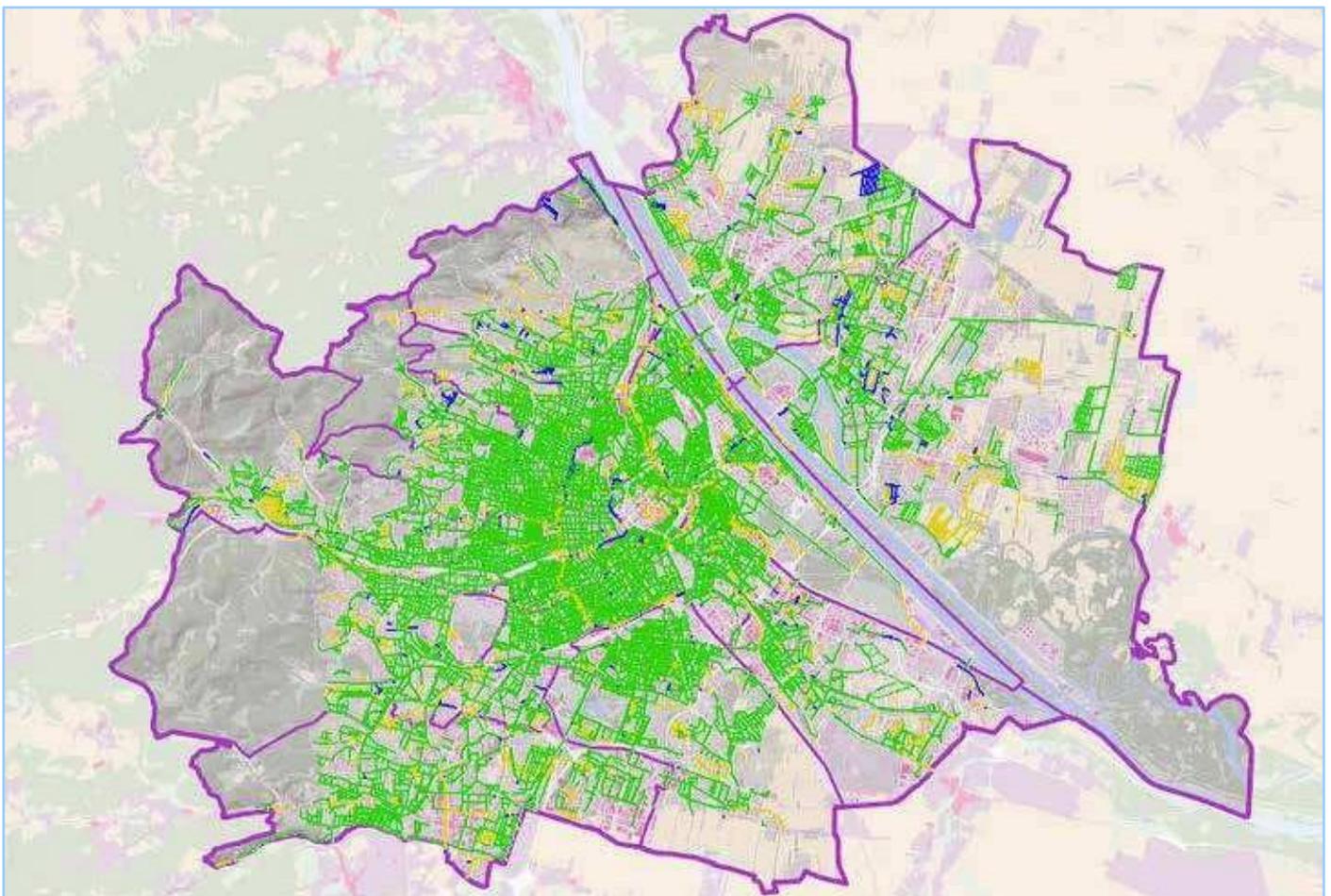


Abb. 1: Umrüstung auf die Wiener Standardleuchte, Stand Juni 2023. Grüne Bereiche sind bereits umgerüstet.

Allgemeine Einführung

Die öffentliche Beleuchtung im Wiener Gemeindegebiet wird seit dem Jahr 2017 großflächig modernisiert und im Zuge dessen auf ein energiesparendes und umweltfreundlicheres Beleuchtungssystem umgerüstet (www.led-it-schein.wien).

Die dabei zum Einsatz kommende „Wiener Standardleuchte“ repräsentiert eine von der MA33-„Wien leuchtet“ selbst entwickelte Straßenleuchtenfamilie und ist technisch derart ausgelegt, dass sie höchste Anforderungen in Bezug auf Sicherheit, Energieeffizienz, Wartungsfreundlichkeit und ökologische Einflüsse erfüllt. Da die öffentliche Beleuchtung unterschiedlichste Fachgebiete tangiert, wurde zur Erreichung dieser Ziele bereits beim Start der Entwicklung ein interdisziplinärer Ansatz verfolgt. Eine wesentliche Rolle bei der Konzeptionierung und Evaluierung der neuen Standardleuchte nahm deshalb der Wissensaustausch mit anderen Dienststellen der Gemeinde Wien und mit Expert:innen ein, deren Fachgebiete von der öffentlichen Beleuchtung betroffen sind.

Besonderes Augenmerk wurde auf das komplexe und zuvor noch wenig erforschte Gebiet Ablicht – ein aus den Begriffen Abfall und Licht zusammengesetztes Kunstwort – gelegt. Ablicht umfasst als Überbegriff auch den bekannteren Begriff Lichtverschmutzung, berücksichtigt aber neben der unmittelbaren Umweltbeeinträchtigung durch künstliche Beleuchtung auch ihren vollständigen ökologischen und ökonomischen Fußabdruck. Kunstlicht, das entweder völlig ungenutzt oder während seiner Nutzung ohne weitere Maßnahmen in die Umwelt entweicht, kann wie konventioneller Abfall betrachtet werden: Für seine Produktion sind Ressourcen in Form von Rohstoffen, technischen Anlagen und Energie erforderlich und es verursacht auch nach seiner Nutzung durch den Kontakt mit

der Umwelt spezifische Beeinträchtigungen. Möglichst geringes Ablicht ist ebenso anzustreben wie die Reduktion von Abfall. Nach Möglichkeit setzt man daher auch hier nicht bei der Entsorgung, sondern bei der Vermeidung an.

Unter dieser Prämisse wurde die Wiener Standardleuchte entwickelt (Abb. 2, 3). Ein bedeutsamer Schritt dabei ist der Einsatz neuer Leuchtmittel auf Basis von LED, die pro Watt aufgewendeter elektrischer Leistung wesentlich mehr Licht erzeugen als die zuvor das Wiener Straßenbild bestimmenden Leuchtstoffröhren. LED-Lampen sind außerdem dimmbar, zeigen eine höhere Lebensdauer, sind mit unterschiedlichsten Farbtemperaturen lieferbar und offerieren eine deutliche Verbesserung in Bezug auf die Wartungsintervalle und die allgemeine Wartungsfreundlichkeit der Leuchten.

Die Wiener Standardleuchte ist in Regionen wie beispielsweise Parkanlagen mit Leuchtmitteln einer „wärmeren“ Farbtemperatur von 3000 K ausgestattet, während im Straßenverkehr 4000 K zum Einsatz kommen, die eine bessere Farbwahrnehmung und eine um 3 bis 5 Prozent günstigere Energieeffizienz ermöglichen. Wesentlich ist zudem die präzisere Lichtlenkung, was etwa zu einer geringeren Aufhellung der an die Straßen angrenzenden Hausfassaden führt.



Abb. 2: Die Wiener Standardleuchte, hier als Seilhängevariante ausgeführt.

Um die Ablicht-Problematik gering zu halten, wurde die Standardleuchte als Full-Cutoff-Design ausgeführt. Das bedeutet, dass kein von den LED-Leuchtmitteln erzeugtes Licht direkt über die Horizontalebene der Leuchte strahlen soll. Darüber hinaus ist die Abstrahlcharakteristik der Leuchte in Hinblick auf eine möglichst optimale Anstrahlung der zu beleuchtenden Flächen ausgelegt, wodurch ihr direkt erzeugter Ablicht-Anteil sehr gering ist.

An sensiblen Aufstellungsorten werden die Leuchten zusätzlich mit so genannten Blendschuten ausgerüstet. Diese Vorrichtung sorgt dafür, dass noch weniger Streulicht in die Umgebung abgegeben wird. Besonders in Bezug auf dieses Design unterscheidet sich die neue Standardleuchte signifikant von den zuvor verwendeten Leuchtentypen. Diese strahlten einen hohen Prozentsatz ihres Lichts direkt in Richtung Himmel, im Fall von Kugelleuchten sogar mehr als 50 Prozent.

Die Wiener Standardleuchte ersetzt seit dem Jahr 2017 schrittweise die zuvor eingesetzten Leuchten. Zunächst wurden 50.000 Seilhängeleuchten umgerüstet. Diesen folgen bis zum 3. Quartal 2023 33608 Ansatzleuchten, deren vollständige Umrüstung bis zum Ende des Jahres 2026 abgeschlossen sein soll (Abb. 1).

Fortschritte bei der Umrüstung auf die neue Wiener Standardleuchte:

Seilhängeleuchten

Zeitraum	Anzahl
Q4/2017	3.060
Q1/2018	3.920
Q2/2018	4.534
Q3/2018	3.971
Q4/2018	3.247
Q1/2019	3.918
Q2/2019	4.534
Q3/2019	3.918
Q4/2019	3.302
Q1/2020	4.515
Q2/2020	4.515
Q3/2020	4.515
Q4/2020	2.051
Summe	50.000

Ansatzleuchten

Zeitraum	Anzahl
Q1/2021	2.464
Q2/2021	0
Q3/2021	4.744
Q4/2021	4.128
Q1/2022	3.912
Q2/2022	3.912
Q3/2022	2.064
Q4/2022	2.680
Q1/2023	3.296
Q2/2023	2.680
Q3/2023	3.728
Summe	33608



Abb. 3: Vergleich der Horizontalsicht auf die Wiener Standardleuchte (links) und eine der zuvor typischen, mit Leuchtstoffröhren ausgestattete Leuchte (rechts). Die Lichtlenkung der Standardleuchte ist erheblich präziser.

Wohin leuchtet die Wiener Standardleuchte?

Die Effektivität dieses Full-Cutoff-Designs unter den tatsächlichen Einsatzbedingungen, also nach erfolgter Installation im Stadtgebiet, zu evaluieren, ist die Hauptanstrengung dieser Studie. Konkret sollte verifiziert werden, ob tatsächlich kein Licht über die Horizontale der Leuchten abgestrahlt wird (Abb. 3, 7). Um einen direkten Vergleich des Zustands vor und nach der Umrüstung zu ermöglichen, wurden die Messungen zunächst im Jahr 2016 durchgeführt und anschließend von 2022 bis 2023 mit der identischen Messausrüstung an denselben Messpunkten wiederholt.

Darüber hinaus wurde auch jener Anteil des von Wien ausgehenden Kunstlichts erfasst, der vom Stadtgebiet direkt in Richtung Weltall entweicht. Aus früheren, von der Wiener MA22 beauftragten Studien war bereits bekannt, wieviel Licht vom Stadtgebiet nach oben emittiert wird und dort noch innerhalb der Erdatmosphäre gestreut und als so genannte künstliche Nachthimmelsaufhellung („Lichtglocke“) auch vom Boden aus sichtbar ist (Abb. 4, 5, 6).

Der nicht wieder zurück nach unten gestreute Anteil des zuvor nach oben emittierten Lichts ist jedoch vom Boden aus nicht messbar und kann daher nur mit Messgeräten oberhalb der Stadt erfasst werden.



Abb. 4: Das nachts von Wolken zum Boden zurück reflektierte Licht über dem Zentrum von Wien.



Abb. 5: Auch bei klarem Himmel ist das Wiener Ablicht noch aus großer Entfernung als Lichtglocke sichtbar.



Abb. 6: Ein von Lichtverschmutzung nahezu unbeeinträchtiger Blick zum Himmel ist von Europa aus nur mehr in sehr wenigen Regionen - hier ist das Wildnisgebiet Dürrenstein in Niederösterreich abgebildet - möglich.

Darstellung der vorliegenden Studien vor dem Hintergrund der Entwicklung der internationalen Forschung zur Lichtverschmutzung

Bevor auf die Einzelheiten der Messungen und auf konkrete Ergebnisse eingegangen wird, erfolgt eine Einführung in dieses Gebiet und eine Einordnung dieser Studie in den Kontext der Erforschung von Lichtverschmutzung und Nachthimmelsaufhellung sowie den ökologischen und ökonomischen Zusammenhängen.

1. Schrittweise Zunahme der künstlichen Nachthimmelsaufhellung („Lichtverschmutzung“)

Bemühungen zur messtechnischen Erfassung und Reduktion lokaler Phänomene der Lichtverschmutzung werden vor allem in Industrieländern bereits seit mehreren Jahrzehnten gesetzt. Die Initiative dafür ging ursprünglich von Astronomen aus, da sie jenen wissenschaftlichen Bereich vertreten, der schon bei einer vergleichsweise geringen Belastung durch künstliche Nachthimmelsaufhellung eine massive Beeinträchtigung seiner Forschungsmöglichkeiten erfährt. Das allmähliche „Verschwinden des Sternenhimmels“ betrifft die Astronomie bereits seit der Elektrifizierung der ersten Großstädte und verdrängte Observatorien in zunehmend größere Entfernungen von menschlichen Ansiedlungen.

Ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nahm das Ablicht von Städten nicht nur durch einen massiven Ausbau der öffentlichen Beleuchtung drastisch zu. Neue Lichtquellen rund um Industrie und Handel, viele davon im Zusammenhang mit Werbebeleuchtung, erfuhren deutliche Zuwächse, was sich etwa ab den 1980er-Jahren in den immer größeren Volumina der über Städten sichtbaren „Lichtglocken“ zeigte. Heute kann beispielsweise die vom Wiener Stadtgebiet ausgehende Lichtglocke noch aus einer Entfernung von 100 Kilometern gesehen werden. Eine der zahlreichen

Folgen dieser Nachthimmelsaufhellung ist der Umstand, dass im Zentrum von Wien mit freiem Auge statt 6000 Sternen nur mehr rund 30 Sterne sichtbar sind. Durch die Ausweitung des urbanen Raums überlappen die Lichtglocken von kleinen und größeren Städten quer über die global von Menschen besiedelten Gebiete und lassen dazwischen nur mehr wenig Platz für Bereiche mit einer naturnahen Nachtlandschaft.

2. Erste Erkenntnisse über die Folgen von Lichtverschmutzung

Wie facettenreich die Folgen dieser über viele Jahrzehnte allmählich zunehmenden und daher individuell kaum wahrnehmbaren Zunahme der Nachthelligkeit sind, wurde erst ab den 1990er-Jahren auch interdisziplinär erforscht. Der Einfluss zu heller Nächten auf das Blüh- und Wachstumsverhalten von Pflanzen, das Bewegungs-, Fress- und Fortpflanzungsverhalten von Tieren und beispielsweise auf die Chronobiologie des Menschen, wurde seither eingehend untersucht. Heute ist Lichtverschmutzung als maßgeblicher Umweltstörfaktor anerkannt, wobei dessen subtile Auswirkungen auf die Biodiversität erst am Anfang der Erforschung stehen.

3. Start nationaler und internationaler Regularien

Zunächst führten von privaten Umweltinitiativen eingeleitete Kampagnen in einigen Staaten zu legislativen Schritten, die eine Reduktion der Lichtverschmutzung zum Ziel hatten. Vorreiter innerhalb der EU ist Slowenien, wo im Jahr 2007 ein entsprechendes Gesetz inkraft getreten ist [Deutscher Volltext: https://wua-wien.at/images/stories/naturschutz_stadtoekologie/slowenisches-lichtverschmutzungsgesetz.pdf].

Einzelne Regionen in Italien und ein die Werbebeleuchtung betreffendes Gesetz in Frankreich folgten. Regionale Bemühungen gab es etwa auch in den Vereinigten Staaten. Österreich zählt zu den Ländern, die noch

keine bundesweiten gesetzlichen Maßnahmen zur Reduktion von Lichtverschmutzung und Ablicht beschlossen haben. Erste Schritte geschehen hier bereits auf Landesebene, konkret in Oberösterreich.

Ein Wendepunkt war die Erklärung der internationalen La-Palma-Deklaration im Jahr 2007. Sie enthält erstmals auf Ebene der UNESCO eine Erklärung zum Schutz des Nachthimmels und des Rechts auf Sternlicht mit klaren Vorgaben und Zielen. 2009 definierte die UNESCO zudem den Himmel als gemeinsames und universales Erbe und einen integralen Bestandteil der durch die Menschheit wahrgenommenen Umwelt.

Seither rückte der Umgang mit künstlicher Beleuchtung zunehmend in den Fokus der öffentlichen und medialen Wahrnehmung, wobei der wesentlichste Treiber zunächst nicht die ökologische Problematik der Lichtverschmutzung, sondern der ökonomische Faktor des Ablichts war. Tatsächlich ist auch heute noch der Hauptmotivator einer Modernisierung und Umrüstung von Beleuchtungseinrichtungen eine damit einher gehende Energieeinsparung. Ausgelöst wurde dieser Trend nicht durch eine im Prinzip schon immer mögliche Reduktion der Beleuchtungsstärken, sondern durch die Einführung von LED-Beleuchtungstechnik. Durch sie lässt sich bereits seit rund 15 Jahren mit dem gleichen Energieaufwand erheblich mehr Licht erzeugen, das zudem in einem für die menschliche Wahrnehmung vorteilhafteren Farbspektrum

(„weiß“) abgegeben wird, als beispielsweise die energetisch ebenfalls günstigen, aber oranges Licht abstrahlenden Natriumdampflampen.

4. Abwägung von Sicherheit, Energieeinsparung und CO₂-Fußabdruck

Die Umrüstung öffentlicher Beleuchtung ist aus stadtplanerischer Perspektive ein besonders langfristig angesetztes Unterfangen, das nur etwa alle 50 bis 60 Jahre durchgeführt wird. Das liegt nicht nur an der ehemals geringen Innovationsgeschwindigkeit bei der Entwicklung neuer Beleuchtungstechnologie, sondern bei Städten von der Größe Wiens auch an der hohen Zahl auszutauschender Lichtquellen. Wien leuchtet verwaltet rund 164.000 solche Quellen, womit ihr Tausch eine entsprechend große Investition darstellt, die mit höchsten Qualitätsstandards langfristig abgesichert werden muss. Obwohl die Stadt Wien täglich 50 bis 70 Leuchten umrüstet, nimmt der Austausch damit rund 10 Jahre in Anspruch – was im internationalen Vergleich außergewöhnlich rasch ist. Gleichzeitig sind oft gegenläufige Interessen abzuwägen. An oberster Stelle steht die Verkehrssicherheit durch ausreichend hell und gleichmäßig ausgeleuchtete Straßen mit einer guten Farbwiedergabe und unter Erfüllung aller maßgeblichen Normen. Jedoch sollen auch die Energiekosten, der Wartungsaufwand, die Haltbarkeit der Leuchtmittel und die Lichtverschmutzung adäquate Berücksichtigung finden.

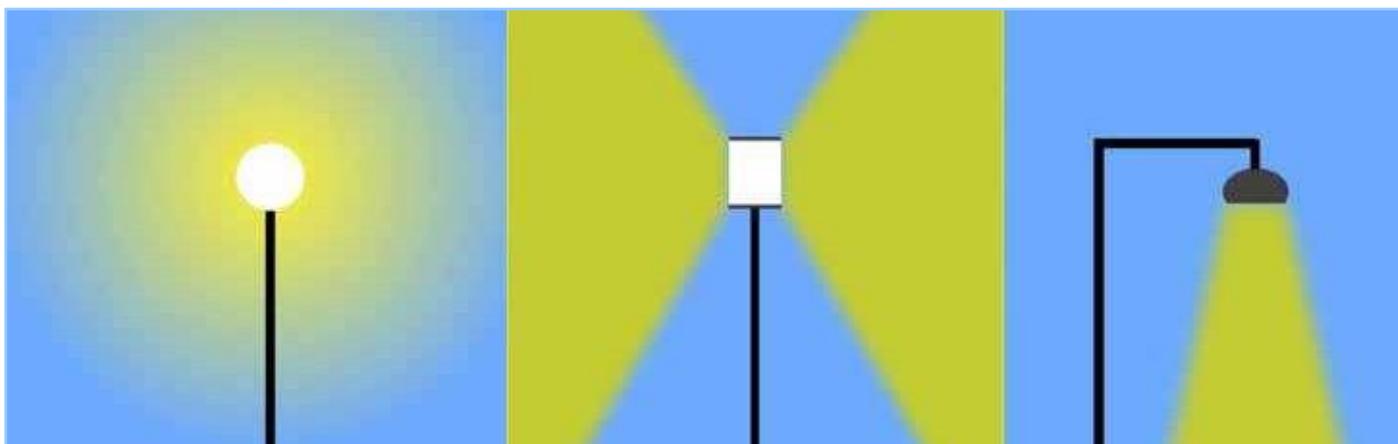


Abb. 7: Vergleich der unterschiedlichen Lichtlenkung verschiedener Lampendesigns (rechts: Full-Cutoff).

Überlegungen zur Messmethodik

Erfassung von nach oben gestrahltem Licht

Damit das über der Horizontale maßgebliche Abstrahlverhalten von im urbanen Raum im Einsatz befindlichen Leuchten unter realen Bedingungen gemessen werden kann, müssen diese oberhalb ihrer Horizontebene aus allen Richtungen und unter unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden.

Das ist notwendig, weil die meisten Lichtquellen nicht in alle Richtungen gleich viel Licht abstrahlen (Abb. 8, 9). Das Messergebnis von oben hängt also davon ab, unter welchem Höhenwinkel und aus welcher Richtung die Messung erfolgt. Wieviel Licht von einer einzelnen Lichtquelle in alle Raumrichtungen nach oben abgestrahlt wird, kann daher nur dann vollständig erfasst werden, wenn sie aus allen Raumrichtungen vermessen wird.

Ein ideales Mess-Szenario wäre daher eine gedachte Halbkugel oberhalb des Stadtgebiets, an deren Oberfläche ein Messgerät an möglichst vielen Punkten in Richtung des Stadtzentrums misst. Das Messgerät muss also physisch in entsprechende Positionen oberhalb des Stadtgebiets gebracht werden. Da sich aus dieser Forderung zahlreiche praktische Einschränkungen ergeben, wurde nicht die vollständige Oberfläche

der Halbkugel vermessen, sondern entlang von mehreren konzentrischen Kreisen, die sich in verschiedenen Höhen über dem Boden befinden (Abb. 10). Durch die unterschiedlichen Kreisradien und -höhen ergeben sich zahlreiche Blickwinkel auf das Stadtzentrum. Die einzelnen Kreise wurden derart in Sektoren aufgeteilt, dass zwischen den einzelnen Messpunkten ein möglichst kleiner Winkelabstand liegt. Daraus ergeben sich mehrere hundert Messpunkte.

Zur Minimierung des Aufwandes und aus Kostengründen wurden die Messpunkte so ausgewählt, dass mehr als 85 % der umweltwirksamen Lichtimmission bei minimalen Flugzeiten für alle Quellen erfasst werden können. Die dabei nicht erfassten Richtungen liegen zudem im Nadirwinkelbereich, welcher mit Satellitenmessungen zumindest in Teilen des Lichtspektrums zugänglich ist. Dieser nicht gemessene – „steil nach oben“ gestrahlte – Anteil bewirkt auch den geringsten Umwelt-Impakt und wurde daher für diese Studie nicht berücksichtigt.

Um einen möglichst großen dynamischen Bereich der zu messenden Helligkeiten abzudecken (schwach erleuchtete Flächen ebenso wie den direkten Blick in den Strahl eines „Skybeamers“), müssen an jedem Messpunkt möglichst viele Einzelmessungen mit jeweils unterschiedlicher Lichtempfindlichkeit durchgeführt werden.



Abb. 8 und 9: Richtungsabhängigkeit von nicht sphärisch nach oben gestrahltem Licht.

Eine unverzichtbare Randbedingung für die Messung sind die erforderlichen Umgebungsbedingungen während des Messvorgangs:

Da die Messwerte frei von Störfaktoren und reproduzierbar sein müssen (Vergleichsmessungen nach erfolgter Leuchtenumrüstung), wurde ein Katalog an Grunderfordernissen erstellt, die vollständig erfüllt sein müssen, um den Messvorgang starten zu können.

Um die Messgeräte zu den Messpunkten zu transportieren und sie dort bedienen zu können, wurden verschiedene Möglichkeiten evaluiert:

1) Nächtliche Satellitenaufnahmen sind für diesen Zweck ungeeignet, weil sie das Stadtgebiet nur entlang eines schmalen Streifens aus großer Höhe zeigen und daher nur sehr wenige Raumwinkel mit Messungen abdecken (Abb. 11).

Ein Vorteil von Satellitenaufnahmen ist die Möglichkeit, innerhalb kurzer Zeit ein

globales Bild von senkrecht nach oben gestrahltem Licht zu erhalten. Die so erhaltenen Bilder repräsentieren dennoch nur Momentaufnahmen zu einem Zeitpunkt, an dem der Satellit über dem entsprechenden Ort steht. Verwertbar sind zudem nur solche Aufnahmen, die unter optimalen atmosphärischen Bedingungen gewonnen wurden, was die Anzahl der auswertbaren Aufnahmen weiter einschränkt. Als erhebliches Problem hat sich die Kalibrierung der an Bord der Satelliten befindlichen Messgeräte erwiesen, da diese nicht für eine Übertragung der Messdaten in die für Lichtverschmutzung maßgeblichen Spektralbereiche und Definition von Beleuchtungsstärken konzipiert sind.

Der Hintergrund dieser Beschränkungen sind die auf Messungen bei Tageslicht optimierten Instrumente. Falls nächtliche Beobachtungen vorgesehen sind, finden diese vor allem im Infrarot-Bereich statt. Die größte Einschränkung bleibt jedoch die sehr geringe Auswahl an verfügbaren Blickrichtungen.

2) Mit Flächenflugzeugen durchgeführte topographische Rasterbefliegungen ergeben ähnliche Ergebnisse wie

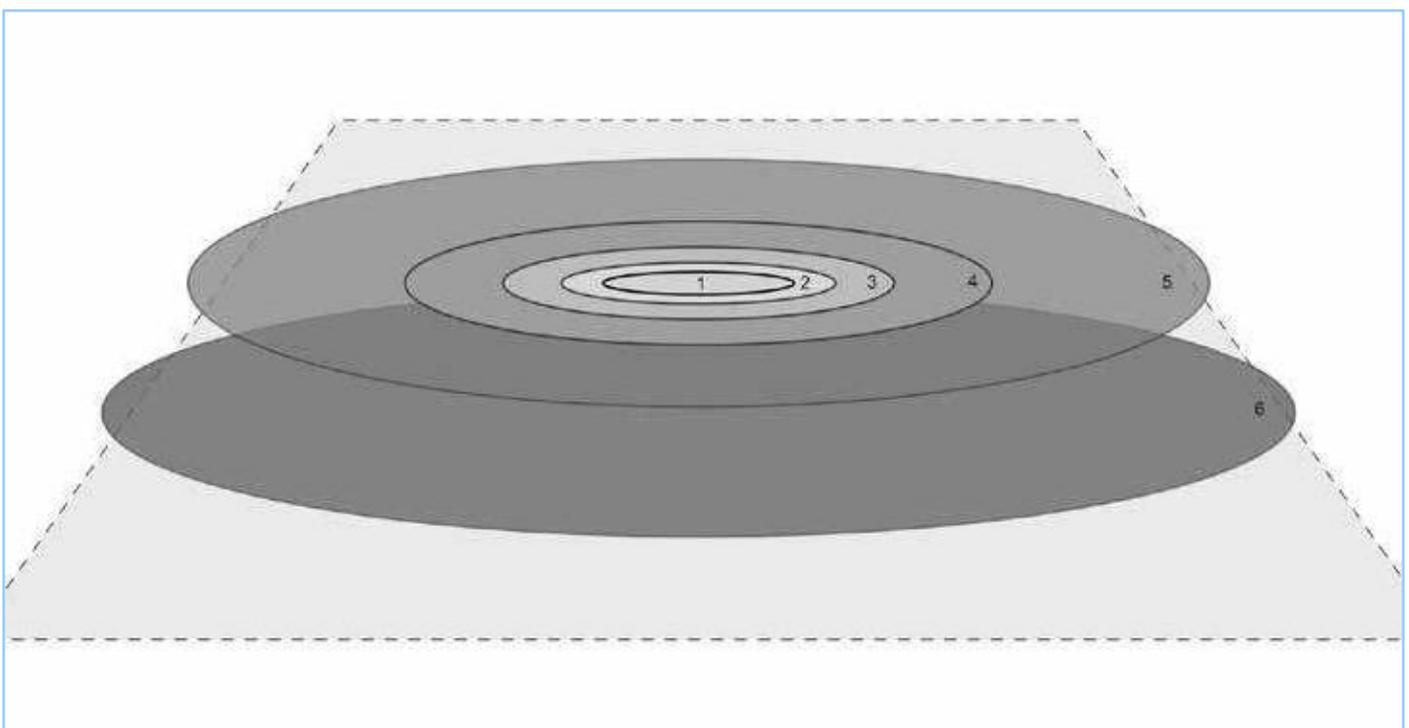


Abb. 10: Schematische Darstellung der über das Wiener Stadtgebiet gelegten Befliegungskreise.

Satellitenbilder: Sie zeigen für jeden Ort lediglich das in Richtung Zenit abgestrahlte Licht (Abb. 12). Grundsätzlich können auch Flächenflugzeuge entlang von Kreisen unterschiedlicher Höhe Messungen durchführen. In der Praxis ergeben sich jedoch je nach Bauart des Flugzeuges zahlreiche Schwierigkeiten in Bezug auf die Montage und Bedienung der Messgeräte sowie aufgrund der hohen Mindestfluggeschwindigkeit, die zu Bewegungsunschärfe bei langen Integrationszeiten führt.

3) Drohnen schieden für dieses Projekt aufgrund technischer Grenzen (Flughöhe, Flugdauer, Steuerung der Messgeräte) und legislativer Beschränkungen (Verbot von Nachtflügen über besiedeltem Gebiet) aus.

Versuche mit nächtlichen Drohnenbefliegungen zur Erfassung des nach oben gerichteten Anteils künstlicher

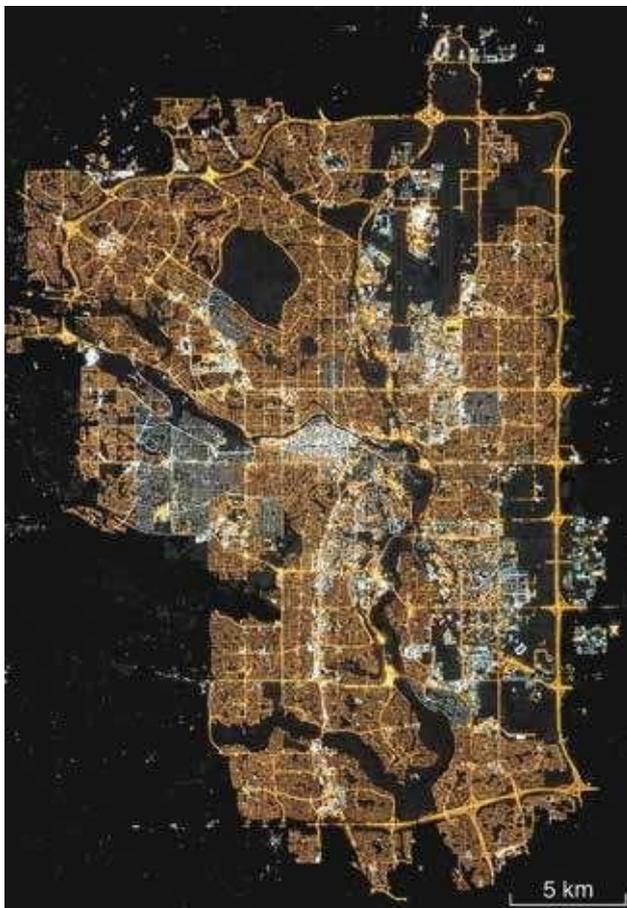


Abb. 11: Satellitenaufnahme der Stadt Calgary/Canada aus einer Höhe von rund 400 km.

CO₂-Fußabdruck der Studie. Verhältnismäßigkeit.

Da es sich bei diesem Projekt im weiteren Sinn um eine Studie zu Umweltbeeinträchtigungen handelt, wurde auch der durch die Studie selbst verursachte CO₂-Fußabdruck in seiner Größenordnung erfasst und in Relation zum CO₂-Fußabdruck ihres Untersuchungsgegenstands gebracht.

Die im Zuge der Messungen erhaltenen Daten beinhalten aufgrund der eingesetzten Messmethode neben einer Evaluierung der Wiener Standardleuchte auch die Gesamtheit des vom Wiener Stadtgebiet nach oben abgestrahlten Lichts sowie die Möglichkeit, es nach Gruppen aufzuschlüsseln und sogar individuell zuzuordnen. Darauf aufbauend können verschiedene Strategien für eine Reduktion des Wiener Ablichts und der damit einhergehenden Energieverschwendung und Umweltbelastung ausgearbeitet werden.

Um das Licht der über dem Wiener Stadtgebiet befindlichen Lichtglocke zu erzeugen, ist jährlich eine elektrische Energie von zumindest 500 GWh – das entspricht dem elektrischen Energiebedarf von rund 100.000 Haushalten – erforderlich. Mit dem österreichischen Energiemix entspricht das einem CO₂-Äquivalent von rund 100.000 Tonnen.

Für die Messungen gehen wir von rund 8 Flugstunden mit Helikoptern aus, die für ihren Betrieb etwa 180 kg Kerosin (570 kg CO₂) pro Stunde verbrauchen. Zusätzlich kalkulieren wir eine Größenordnung von insgesamt 2000 gefahrenen Kilometern mit PKW (Projektteam, Piloten) und einen Durchschnitt von 0,15 kg CO₂ pro PKW-Kilometer. Damit ergibt sich aus der Summe der Emissionen von Helikopter plus PKW eine Größenordnung von weniger als 5 Tonnen CO₂.

Beleuchtung wurden bereits publiziert, beschränken sich aber auf Gebiete mit sehr geringer Fläche und niedrigen Höhen (Abb. 13). Für die Vermessung einzelner Gebäude oder kleiner Wohnanlagen können Drohnen jedoch eine kostengünstige Alternative darstellen.

4) Sowohl zum Zeitpunkt der Erstvermessung im Jahr 2016, als auch bei den Folgebefliegungen in den Jahren 2022 und 2023 erwiesen sich Helikopter als die einzige praktikable Möglichkeit zur Erfüllung aller Parameter für die Messungen. Sie können durch ihre Flugeigenschaften alle maßgeblichen Raumwinkel abdecken, ermöglichen sehr geringe Fluggeschwindigkeiten (dadurch längere Integrationszeiten ohne Beeinträchtigung der Abbildungsqualität) und eine angesichts der Größe des Wiener Stadtgebietes hinreichende Flugdauer. Ein wesentlicher Vorteil ist zudem die vergleichsweise einfache Montage, beziehungsweise Mitnahme der Messgeräte.

Organisation der Studiendurchführung

1) Auswahl des Helikopters

Da diese Studie die erste ihrer Art für eine Großstadt wie Wien ist, mussten zahlreiche Parameter erstmalig konzipiert werden. Nachdem die theoretischen Grundlagen für das Messverfahren ausgearbeitet waren, beanspruchte die Auswahl eines geeigneten Fluggeräts einen hohen Aufwand. Ein aufgrund der oben genannten Überlegungen ausgewählter Helikopter musste mehrere Bedingungen erfüllen, um für die Messflüge geeignet zu sein (Abb. 14).

Ein zunächst als ideal erachteter Außen-Gimbal (außen am Helikopter angebrachte Kameraplattform mit kardanischer Aufhängung und Bewegungsausgleich) mit einer Fernsteuerung aus dem Inneren des Helikopters stellte sich als nicht praktikabel heraus, weil er ohne aufwändige Umbaumaßnahmen nur für die Aufnahme einer



Abb. 12: Fotomosaik der Stadt Berlin aus einer Flächenbefliegung mit einem Flugzeug aus rund 3 km Höhe.

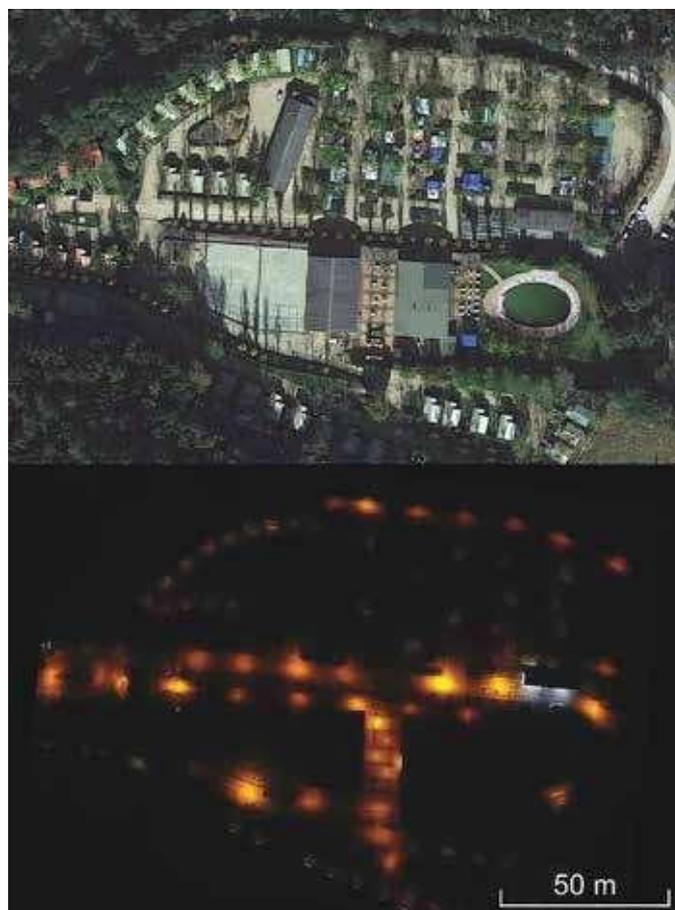


Abb. 13: Drohnenbefliegung: Vergleich einer Campinganlage in Spanien bei Tag und Nacht aus 100 m Höhe.



Abb. 14: Der für einen der Flüge 2023 eingesetzte Helikopter vor dem Abflug bei idealen Wetterbedingungen.

einzelnen Kamera geeignet ist. Wichtig war zudem die zeitlich kurzfristige Verfügbarkeit, weil der Helikopter mit dem montierten Gimbal nicht für andere Zwecke eingesetzt werden kann. Durch die erforderlichen Wetterbedingungen war der Starttermin nur sehr zeitnah vorhersagbar, was eine kurzfristige Verfügbarkeit des Helikopters inklusive des montierten Gimbals erforderlich gemacht hätte.

Die Konfiguration der ersten Messkampagne unterscheidet sich in der verwendeten Plattform für die Kamera und der Lightmeter-Systeme, da die Trägertechnik dafür bei der zweiten Kampagne nicht mehr verfügbar war.

Als bedeutsame Schwierigkeit bei der Organisation eines geeigneten Helikopters hat sich das Vorhandensein eines so genannten Fotofensters herausgestellt (Abb. 15). Die Messgeräte müssen freie Sicht auf die Stadt haben und dürfen daher nicht durch ein Fenster beeinträchtigt werden.

Ein Öffnen der Helikoptertüre scheidet aus, da sie während des gesamten Messfluges (jeweils bis zu 2 Stunden) geöffnet bleiben müsste. Allgemeine Sicherheitsbedenken, Windturbulenzen an den Messgeräten und nicht zuletzt die je nach Jahreszeit problematische Temperatur schließen das aus. Bei einem Fotofenster handelt es sich um eine mit einer Plexiglasscheibe verschließbare Öffnung in einem Seitenfenster des Helikopters, die ausreichende Abmessungen für die Messoptiken bietet. Da zwei unabhängige Messgeräte eingesetzt wurden, waren zwei Fotofenster auf der selben Seite des Helikopters erforderlich. Derartige Fenster zählen nicht zur Standardausrüstung im Charterbetrieb, was die Auswahl der für die Messflüge real verfügbarer Helikopter erheblich einschränkte.

Als noch größere Herausforderung erwies sich die konkrete Organisation der Flugtermine für die zweite Messkampagne. Die Verhandlungen über ihre Durchführung starteten im Oktober 2019, der Abschluss

der dafür erforderlichen Flüge fand erst im März 2023 statt. Die ungewöhnliche Länge dieser Zeitspanne beruht auf mehreren Faktoren.

Helikopter werden üblicherweise zu festgesetzten Terminen gechartert und sind daher nicht permanent kurzfristig verfügbar. Aufgrund der Ungenauigkeiten der jeweils aktuellen Wettermodelle für den Großraum Wien und der für die Messungen erforderlichen, eng gesetzten Wetterbedingungen sind die Flugtermine bestenfalls mit einer Vorwarnzeit von 48 Stunden und mit einer definitiven Zusage von 24 Stunden vor Abflug festlegbar – ausgenommen lediglich eher seltene Fälle mit einer sehr stabilen Wettersituation über Europa. Innerhalb dieser Zeit mussten der mit Fotofenstern ausgestattete Helikopter, ein zuvor auf den Messflug eingeschulter Pilot sowie das gesamte, aus drei Personen bestehende Mess-Team inklusive der kompletten Ausrüstung im Großraum Wien abrufbereit sein. Der Passus „Großraum Wien“ stellte sich in der Praxis als zusätzliches

Beschränkungskriterium heraus. Helikopter von Charterbetrieben weisen üblicherweise flexible Standorte aus, sind also nicht über einen längeren Zeitraum beispielsweise in der Nähe von Wien stationiert. Dadurch wäre in mehreren Fällen eine kurzfristige Überstellung – etwa aus Tirol, Salzburg oder München – erforderlich gewesen, was neben der schwierigen Organisation erhebliche Zusatzkosten verursacht hätte.

Nach der Organisation eines geeigneten Helikopters über ein Charterunternehmen kam es zunächst aufgrund der ersten Covid-19-Welle im März 2020 zu einer Stilllegung des regulären Flugbetriebs und einer entsprechenden Verschiebung. In weiterer Folge konnte das Charterunternehmen in mehreren Fällen die Verfügbarkeit des Helikopters nicht aufrecht erhalten und nahm insgesamt drei Mal einen Wechsel des ausführenden Piloten vor. Durch die technischen Besonderheiten dieser Mess-Flüge musste jeder neue Pilot zunächst instruiert werden, wobei es zu Unstimmigkeiten über die Ausführung



Abb. 15: Die für dieses Projekt eingebauten Fotofenster sind als schwarze Rechtecke in den Seitenfenstern erkennbar.

des Flugplans und weiteren Verzögerungen kam. Die faktische Verfügbarkeit des Helikopters für diese Studie lag bis November 2021 bei rund 10 %, was zusammen mit der notwendigen Erfüllung der Wetterspezifikationen der erforderlichen Messflüge verhindert hat. Im Dezember 2021 wurde dieser Helikopter schließlich verkauft und stand nicht mehr zur Verfügung. Als Ersatz wurde vom Charterunternehmen für den Jänner 2022 ein leistungsfähigeres, aber im Flugbetrieb auch deutlich kostenintensiveres Helikopter-Modell angeboten. Aus Finanzierungsgründen wurde dieses Angebot jedoch nicht angenommen. Im Februar 2022 erfolgte daher ein Rücktritt von dem Vertrag mit diesem Charterunternehmen, was erneut die schwierige Beschaffung eines neuen Partners für diese Messflüge erforderlich machte.

Zuletzt ergab sich nach einer langen und aufwändigen Suche auf Vermittlung von Wien leuchtet eine Kooperation mit dem ÖAMTC, der zwar dezidiert nicht als Charterbetrieb auftritt, sich aber für dieses besondere wissenschaftliche Projekt dazu bereit erklärte, einen geeigneten Helikopter mit Fotofenstern zusammen mit einem Piloten langfristig verfügbar zu halten.

Nachforderungen für die Navigations-Hardware, die seitens des Verein Kuffner-Sternwarte finanziell übernommen wurden, sowie eine dadurch erforderlich gewordene Adaptierung des Navigationsprotokolls haben weitere Verzögerungen bis Ende Mai bewirkt. Die erste Befliegung dieser zweiten Kampagne erfolgte schlussendlich am 19. Juli 2022 während einer der Jahreszeit in diesen Breitengraden entsprechend kurzen Nacht, wodurch ein Abschluss zu diesem Zeitpunkt nicht möglich war.

Für die danach folgenden Befliegungen gab es eine Nachforderung seitens der Flugaufsichtsbehörde (Austrocontrol) bezüglich einer nächtlichen

Flugverbotszone, wodurch die ursprüngliche Route umgeplant werden musste. Einzelne Ausfälle von wetterbedingt grundsätzlich möglichen Flugterminen beruhten auch auf einer Nichtverfügbarkeit des Piloten und einer Sperre des Luftraums über Wien aufgrund einer internationalen politischen Konferenz.

Die am 9. Februar 2023 durchgeführte zweite Befliegung der zweiten Kampagne wurde durch eine „Holding“ seitens der Austrocontrol unterbrochen und konnte daher nicht fertiggestellt werden. Dies gelang erst mit einer dritten Befliegung am 16. März 2023.

Nach dem Abschluss dieser Mess-Kampagne soll für allfällige Wiederholungen, beziehungsweise für die Übertragung auf andere Stadtgebiete hier noch einmal darauf hingewiesen werden, dass vor allem seitens des Helikopters und des Piloten auf eine garantierte flexible Verfügbarkeit (innerhalb 24 Stunden abrufbereit) über einen möglichst langen Zeitraum geachtet werden muss, auch weil eine hinreichende Vorhersagbarkeit aller relevanten meteorologischen Parameter nur in Ausnahmefällen weiter in die Zukunft reicht. Zu beachten ist auch die Kürze der Nächte in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Im konkreten Fall stand dadurch in mehreren Fällen zu wenig nutzbare Messzeit zur Verfügung.



Abb. 16: Messzelle eines Lightmeters.

2) Auswahl der Messgeräte

Das durch die Messungen gewonnene Datenmaterial muss für diese Aufgabe zumindest eine relative Photometrie einzelner Standardleuchten aus Entfernungen in der Größenordnung von 2 bis 20 Kilometern ermöglichen. „Relativ“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass nicht notwendigerweise absolute Werte – etwa die Lichtstärke in Candela – bestimmt werden müssen.

2D-CMOS-Sensoren für die Photometrie von Einzelquellen – „digitale Fotografie“

Als am besten dafür geeignete Sensorsysteme erwiesen sich zwei Stück Digitalkameras mit jeweils unterschiedlicher ISO-Empfindlichkeit und unterschiedlichen Objektiv-Brennweiten und –Öffnungsverhältnissen, die auf die Pixelauflösung der jeweiligen Kamera abgestimmt sind. Mit einer entsprechenden Kalibrierung ist damit auch eine absolute Photometrie der einzelnen Lichtquellen möglich.

Die tatsächliche Position der Aufnahmen wurde mittels GNSS aufgezeichnet.

Lightmeter: Hochempfindliche Messgeräte zur Erfassung der Beleuchtungsstärke

Lightmeter sind speziell für die Erfassung der Beleuchtungsstärke des gesamten Himmels entwickelte Instrumente. Sie wandeln das auf die besonders große, aus nur einem einzigen „Pixel“ bestehende Sensorfläche fallende Licht in ein elektrisches Signal um, das anschließend verstärkt und mit einer Frequenz von 10 Hz digital aufgezeichnet wird (Abb. 16).

Insgesamt kamen drei Stück zum Einsatz, die an der linken und rechten Seite des Helikopters sowie schräg nach unten die jeweils dort vorhandene Beleuchtungsstärke während des gesamten Fluges erfasst haben. Mit diesen Daten kann beispielsweise aus der Differenz zwischen der linken (in Richtung

Stadtzentrum messenden) und rechten (in die Gegenrichtung messenden) Seite der Anteil der Beleuchtungsstärke des vom Stadtgebiet ausgehenden Lichts abzüglich der Hintergrundbeleuchtung bestimmt werden. Diese Messungen repräsentieren ein optional auswertbares Datenprodukt, das nicht unmittelbarer Inhalt dieses Projekts ist, aber für zukünftige Fragestellungen herangezogen werden kann.

Für jede Befliegung waren insgesamt vier Personen innerhalb des Helikopters erforderlich:

- 1 Pilot (2002/23 zur Verfügung gestellt vom ÖAMTC)
- 2 Personen für die Installation und die Bedienung der Messgeräte
- 1 Person für die Navigation

Um eine möglichst hohe Flexibilität zu gewährleisten und das nur selten eintretende Zusammenspiel aller erforderlichen meteorologischen und astronomischen Parameter nutzen zu können, wurde vom Verein Kuffner-Sternwarte eine vollständige Ersatzcrew organisiert, die zu jedem Zeitpunkt bis zu drei Crew-Mitglieder ersetzen hätte können (Abb. 17). Lediglich für den für diese sehr spezielle Befliegungsaufgabe instruierten Piloten gab es keinen Ersatz.

Messmethodik

1) Datenbasis

Als Grundlage für die Beurteilung der neuen Wiener Standardleuchte im Vergleich mit den zuvor in Wien montierten Leuchten dienen im Jahr 2016 – also vor der Umrüstung – und in den Jahren 2022 und 2023 – nach dem Abschluss der Umrüstung der Seilhängeleuchten und einer weit fortgeschrittenen Umrüstung der Ansatzleuchten – an den jeweils selben Koordinaten über Wien aufgenommene Serien digitaler



Abb. 17: Der für die Messkampagne im April 2016 genutzte Helikopter kurz vor dem Start am Flughafen Schwechat.



Abb. 18: Drei von insgesamt vier Mitgliedern des Teams der Befliegung im Februar 2023, kurz vor dem Abflug: Niels Walter (Navigation, Verein Kuffner-Sternwarte), Robert Gallmayer (Pilot, ÖAMTC), Dr. Günther Wuchterl (Projektleitung, Verein Kuffner-Sternwarte), (v.l.n.r.).

Luftbilder mit den gleichen Messgeräten. Die projektierten Befliegungskreise entsprechen einem Kompromiss, der sich aufgrund der für diese Bedingungen technisch realisierbaren Flughöhe der verfügbaren Helikopter und der problematischen Genehmigungsverfahren für größere Höhen ergeben hat.

Entlang von mehreren, in unterschiedlichen Höhen und Radien vom Zentrum Wiens befindlichen Kreisen, wurden in engen Winkelabständen mit zwei unterschiedlich lichtempfindlichen Kamerasystemen jeweils zahlreiche Aufnahmen als Belichtungsserie angefertigt.

Die beiden Kamerasysteme wurden derart konfiguriert, dass das weniger lichtempfindliche System die helleren Lichtquellen abbildet und das lichtempfindlichere direkt

an dessen Grenze anschließt und den Bereich der wesentlich leuchtschwächeren Quellen übernimmt.

Damit steht der Auswertung grundsätzlich ein größerer Dynamikumfang zur Verfügung, als er für die Beurteilung der Wiener Standardleuchte erforderlich ist. Dieser Weg wurde gewählt, weil die Gewinnung dieser Daten nur wenig zusätzlichen Aufwand erforderte, sie aber für eine Vielzahl vergleichbarer Fragestellungen rund um die Quantifizierung und Herkunft von zum Himmel gerichteten Lichts herangezogen werden können. Durch den hohen dynamischen Bereich sind in diesen Daten Lichtquellen von der Helligkeit stärker Gebäudeanstrahlungen (z.B. Wiener Stephansdom) bis hinab zu einzelnen Kerzen auf Friedhöfen photometrisch erfasst.



Abb. 19: Hoher Kontrastumfang im Wiener Zentrum: Die helle Fläche links ist ein Eislaufplatz vor dem Rathaus, rechts daneben der nahezu dunkle Volksgarten und darüber ein den Turm der Minoritenkirche verfehlender Strahler. Der dunkle Bereich der Gärten ist jedoch von einer "Perlenkette" nach oben strahlender Vintage-Leuchten umgeben.



Abb. 20: Blick durch die Frontscheibe des Helikopters kurz nach dem Start in Wiener Neustadt beim Anflug Richtung Wien. Die Wiener Lichtglocke ist trotz der perfekten atmosphärischen Bedingungen und entsprechend geringer Lichtstreuung in der Atmosphäre bereits gut in der Bildmitte erkennbar. Die Entfernung zum Wiener Zentrum beträgt 27 km.

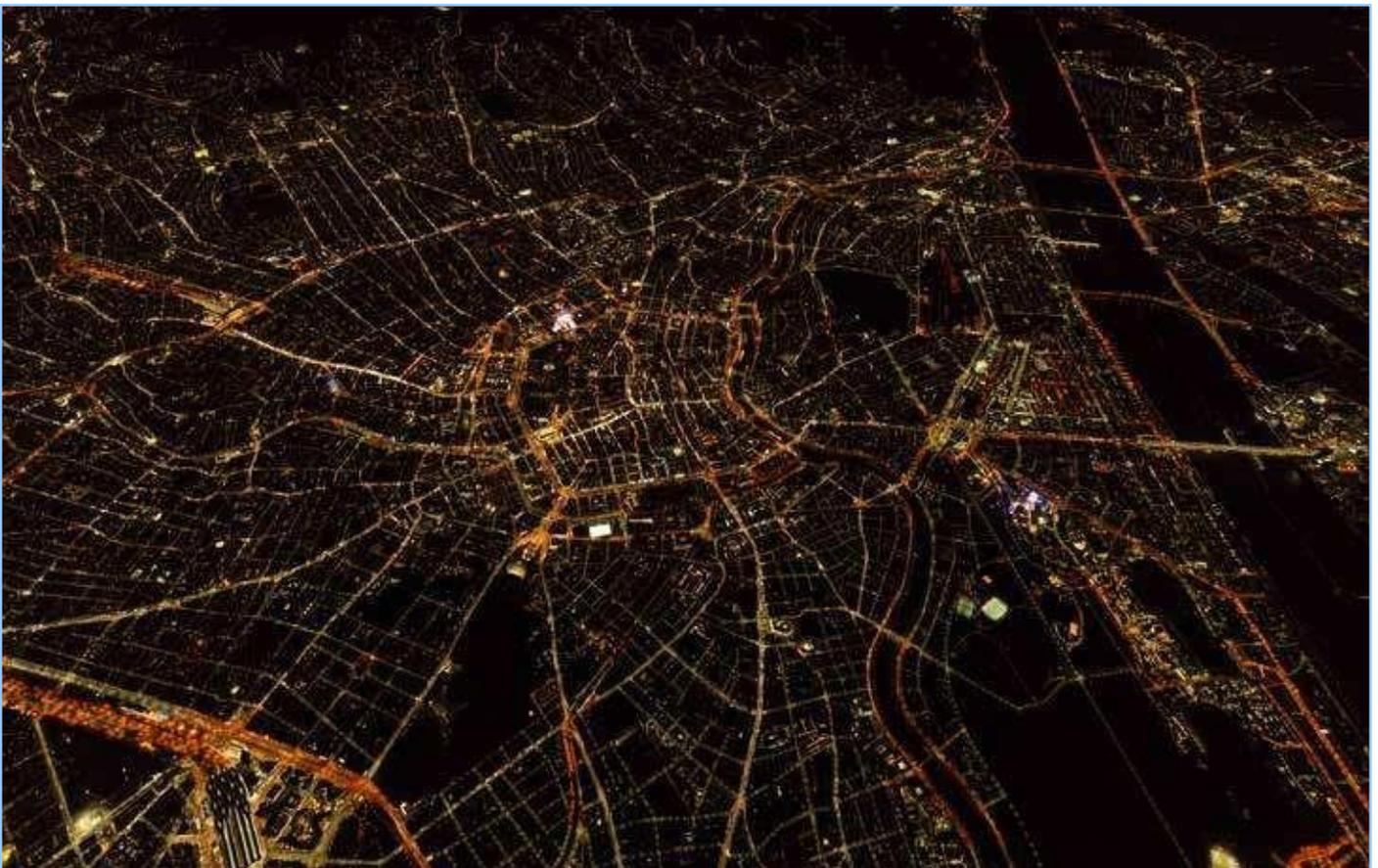


Abb. 21: Beispiel für eines der ausgewerteten Bilder, erstellt am 09.02.2023, 19:55 MEZ. In der Bildmitte ist das Stadtzentrum mit der Ringstraße zu sehen, links unten der Hauptbahnhof und rechts das dunkle Band der Donau.



Abb. 22: Beispiel für eine Ansicht aus einem flachen Winkel auf die Außenbezirke im Westen Wiens im Jahr 2016.

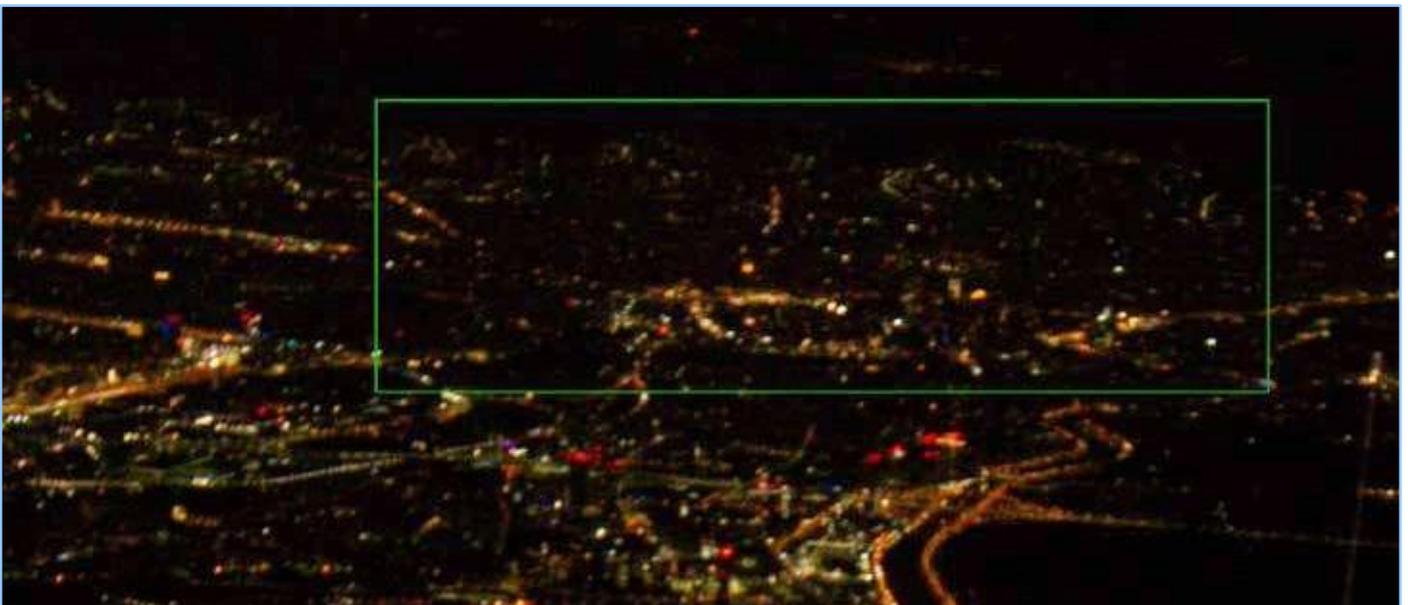


Abb. 23: Beispiel für eine Ansicht aus einem flachen Winkel auf die Außenbezirke im Westen Wiens im Jahr 2023.

2) Auswertung

Da in Abhängigkeit von der Blickrichtung und -höhe aufgrund von Abschattungen durch Gebäude und teilweisen Überlappungen nicht alle Standardleuchten auf allen digitalen Aufnahmen mit hinreichender Sicherheit identifiziert und vermessen werden konnten, wurden für die Beurteilung solche Leuchtenstandorte ausgesucht, die aus möglichst vielen Richtungen/Höhen sichtbar sind.

Nach der Auswahl geeigneter Leuchten auf den Aufnahmen (Abb. 24 bis 28) wurden sie aus mehreren verfügbaren Blickwinkeln vermessen und die Messwerte der

Aufnahmen aus dem Jahr 2016 mit jenen aus dem Jahren 2022 und 2023 verglichen. Dazu wurden die im RAW-Format vorliegenden Bilddaten mit einer digitalen Messblende (Größe 3 x 3 Pixel) abgetastet und der innerhalb der Blende gemessene Mittelwert des L-Wertes des im Lab-Farbsystem dargestellten Bildes notiert (siehe Tabellen 1 bis 6). Es wurde also der jeweils hellste Bereich auf der Straße unterhalb der Leuchte vermessen. Laut Auskunft von Wien leuchtet ist dieser aufgrund der gleichmäßigeren Ausleuchtung der Standardleuchte weniger hell ausgeprägt als unter den Leuchtstoffröhren im Jahr 2016. Für den Vergleich wurden 26 Lichtquellen einander gegenüber gestellt.



Abb. 24: Überblick über die für die Vergleichsmessungen herangezogenen Straßenzüge rund um das Wiener Zentrum (Aufnahme vom 09.02.2023, 19:55 MEZ). Die grünen Rechtecke markieren die Messbereiche.

Ergebnisse

1) Abstrahlverhalten der Wiener Standardleuchte über die Horizontalebene

Eine der herausragenden Eigenschaften der neuen Wiener Standardleuchte ist ihr Full-Cutoff-Design. Ihr Abstrahlverhalten ist derart ausgelegt, dass das von ihr abgegebene Licht auf direktem Weg (also ohne Reflexion an anderen Objekten) möglichst nur die zu beleuchtenden Flächen erreicht. Außerdem soll eine direkte Abstrahlung über die Horizontalebene der Leuchte („Richtung Himmel“) vollständig ausgeschlossen sein.

Letzteres ist gegeben, wenn aus dem Helikopter betrachtet auch unter sehr flachen Blickwinkeln kein direktes Licht an den Stand- bzw. Aufhängeorten von Standardleuchten feststellbar ist. Aus der bei

den Befliegungen üblichen Entfernungen von mehreren Kilometern würden über die Horizontalebene strahlende Leuchten als diskrete Lichtpunkte auffallen (Abb. 22, 23). Der kleinste bei den Helikopter-Befliegungen realisierte Blickwinkel auf das Wiener Zentrum beträgt nur wenige Grad. Bei einer Durchmusterung der unter diesem extrem flachen Winkel aufgenommenen Bilder waren keine derartigen Lichtpunkte feststellbar. Auch Kontrolldurchmusterungen aus steileren Winkeln haben ergeben, dass die Standardleuchte von oben nicht direkt sichtbar ist.

Aus solchen steileren Blickwinkeln erzeugte Aufnahmen wurden für direkte Vergleichsmessungen zwischen der ersten Messkampagne von 2016 und der zweiten von 2022/2023 herangezogen. Diese zeigen aufgrund des Full-Cutoff-Designs der Standardleuchte jedoch nicht direkt den



Abb. 25: Messfeld Dianagasse und Krieglergasse in 1030 Wien.



Abb. 26: Messfeld Ölzeltgasse in 1030 Wien. Links das helle Feld des Wiener Eislauf-Vereins.



Abb. 27: Messfeld Schwendtgasse in 1040 Wien. Der erste Lichtfleck oben zeigt einen Fahrzeugscheinwerfer und wurde in dieser Aufnahme daher nicht vermessen.



Abb. 28: Messfeld Breite Gasse in 1070 Wien. Rechts daneben ist das Museumsquartier mit zahlreichen, nach oben strahlenden Gebäudestrahlern gut sichtbar.

Leuchtkörper (die Lampe) selbst, sondern den durch Reflexion von der Straße und angrenzenden Gebäuden nach oben gestrahlten Anteil ihres Lichts.

Um ein hohes Maß der Vergleichbarkeit zu erzielen, wurden die dafür verwendeten Straßenzüge zunächst auf den Aufnahmen selbst auf mögliche Störquellen hin untersucht. Dazu zählen etwa Fahrzeuge auf den Straßen (unterschiedliche Reflektivität ihrer Oberflächen), Vegetation und das Vorhandensein von zusätzlichen Lichtquellen wie beispielsweise beleuchtete Werbeschilder und vor allem Auslagenfenster aus dem Geschäftsbereich. Die in die engere Wahl gezogenen Straßenzüge wurden anschließend durch eine Vorort-Überprüfung bei Tageslicht auf störungsfreie Beleuchtungsverhältnisse hin überprüft

und dementsprechend entweder aussortiert oder anschließend vermessen.

Einen Überblick der für die Messung herangezogenen Straßenzüge zeigt Abbildung 24, Details die Abbildungen 25 bis 28. Die Messwerte für die fünf ausgewerteten Straßenzüge sind für jeweils vier Azimutrichtungen in den Tabellen 1 bis 6 angegeben, ergänzend dazu die Mittelwerte, Standardabweichungen und prozentuellen Standardabweichungen. Insgesamt sind hier die Werte für 26 Standardleuchten, beziehungsweise deren Vorgänger aus dem Jahr 2016 angeführt. Die Aufnahmen aus dem Jahr 2016 wurden jedoch nach 22 Uhr MESZ – also nach erfolgter „Halbnachtschaltung“ – gewonnen, während die Aufnahmen von 2023 vor 18:35 MEZ entstanden, und damit noch vor den nächtlichen

Schwendtgasse	Azimut 220		Azimut 210		Azimut 200/180		Azimut 190/170	
	2016	2023	2016	2023	2016	2023	2016	2023
	-	28	14	31	12	20	-	21
	14	35	11	32	19	21	-	22
	29	28	7	31	12	27	-	30
	13	29	-	36	0	35	-	32
	20	28	12	30	12	18	-	16
	11	40	20	30	26	26	-	22
	18	30	22	33	26	21	-	24
Mittelwert	17,5	31,1	14,3	31,9	15,3	24,0	-	23,9
Stdabw	7,3	5,0	5,7	2,1	9,2	5,8	-	5,5
%-Stdabw	42 %	16 %	40 %	7 %	60 %	24 %	-	23 %

Tab. 1: Messwerte Schwendtgasse aus vier Azimutrichtungen, jeweils mit Mittelwert, Standardabweichung und prozentueller Standardabweichung für 2016 und 2023. Nicht alle Richtungen waren vermessbar.

Krieglergasse	Azimut 220		Azimut 210		Azimut 200/180		Azimut 190/170	
	2016	2023	2016	2023	2016	2023	2016	2023
	34	38	24	32	8	22	8	16
	25	32	12	21	30	19	30	23
	32	22	15	22	13	22	11	31
	26	24	16	21	7	20	12	24
Mittelwert	29,3	29,0	16,8	24,0	14,5	20,8	15,3	23,5
Stdabw	4,4	7,4	5,1	5,4	10,7	1,5	10,0	6,1
%-Stdabw	15 %	25 %	31 %	22 %	74 %	7 %	65 %	26 %

Tab. 2: Messwerte Krieglergasse aus vier Azimutrichtungen, jeweils mit Mittelwert, Standardabweichung und prozentueller Standardabweichung für 2016 und 2023.

Ölzeltgasse	Azimut 220		Azimut 210		Azimut 200/180		Azimut 190/170	
	2016	2023	2016	2023	2016	2023	2016	2023
	15	31	16	32	16	25	14	23
	21	29	20	28	17	25	20	31
	17	28	16	31	14	25	19	27
	23	39	-	40	27	34	26	23
	20	33	16	34	13	37	16	25
	17	39	19	38	21	35	17	40
	11	39	15	35	16	34	19	34
Mittelwert	17,7	34,0	17,0	34,0	17,7	30,7	18,7	29,0
Stdabw	4,0	4,9	2,0	4,1	4,8	5,4	3,8	6,4
%-Stdabw	23 %	15 %	12 %	12 %	27 %	18 %	20 %	22 %

Tab. 3: Messwerte Ölzeltgasse aus vier Azimutrichtungen, jeweils mit Mittelwert, Standardabweichung und prozentueller Standardabweichung für 2016 und 2023.

Breite Gasse	Azimut 220		Azimut 210		Azimut 200/180		Azimut 190/170	
	2016	2023	2016	2023	2016	2023	2016	2023
	41	44	39	50	51	51	52	47
	39	43	44	38	57	21	59	43
	36	41	33	38	48	55	53	42
	34	39	38	40	46	45	50	23
Mittelwert	37,5	41,8	38,5	41,5	50,5	43,0	53,5	38,8
Stdabw	3,1	2,2	4,5	5,7	4,8	15,2	3,9	10,7
%-Stdabw	8 %	5 %	12 %	14 %	9 %	35 %	7 %	28 %

Tab. 4: Messwerte Breite Gasse aus vier Azimutrichtungen, jeweils mit Mittelwert, Standardabweichung und prozentueller Standardabweichung für 2016 und 2023.

Dianagasse	Azimut 220		Azimut 210		Azimut 200/180		Azimut 190/170	
	2016	2023	2016	2023	2016	2023	2016	2023
	11	33	10	28	11	21	10	19
	18	17	14	19	18	21	16	19
	21	28	18	27	23	17	16	27
	22	21	19	18	26	18	22	18
Mittelwert	18,0	24,8	15,3	23,0	19,5	19,3	16,0	20,8
Stdabw	5,0	7,1	4,1	5,2	6,6	2,1	4,9	4,2
%-Stdabw	28 %	29 %	27 %	23 %	34 %	11 %	31 %	20 %

Tab. 5: Messwerte Dianagasse aus vier Azimutrichtungen, jeweils mit Mittelwert, Standardabweichung und prozentueller Standardabweichung für 2016 und 2023.

	Dianagasse		Krieglergasse		Ölzeltgasse		Schwendtgasse		Breite Gasse	
	direkt	Halb	direkt	Halb	direkt	Halb	direkt	Halb	direkt	Halb
	38 %	-31 %	-1 %	-50 %	92 %	-4 %	78 %	-11 %	11 %	-44 %
	51 %	-25 %	43 %	-28 %	100 %	0 %	122 %	11 %	8 %	-46 %
	-1 %	-51 %	43 %	-28 %	73 %	-13 %	57 %	-21 %	-15 %	-57 %
	30 %	-35 %	54 %	-23 %	55 %	-23 %	-	-	-28 %	-64 %
Mittel	29 %	-35 %	35 %	-33 %	80 %	-10 %	86 %	-7 %	-6 %	-53 %

Tab. 6: Prozentuelle Differenzen der Mittelwerte der Messungen in den jeweiligen Straßenzügen zwischen den Jahren 2016 und 2023. In der untersten Zeile ist der Mittelwert dieser Differenzen angegeben. Alle Werte sind jeweils für den direkten Vergleich der Messwerte (“direkt”) und unter Berücksichtigung der tatsächlich vorliegenden Halbnachtschaltung von 50 % im Jahr 2016 (“Halb”) angegeben.

Helligkeitsreduktionen (25 Prozent um 22 Uhr und um insgesamt 50 Prozent um 24 Uhr). Aufgrund der bei den Aufnahmen des Jahres 2016 vorliegenden Dimmung um 50 Prozent wegen der damaligen „Halbnachtschaltung“ ergeben sich die in Tabelle 6 gezeigten Werte für die relativen Differenzen der Messwerte zwischen den Jahren 2016 und 2023.

Bildet man den Durchschnitt dieser Differenzen aller vermessenen Straßenzüge

aus allen dafür herangezogenen Blickwinkeln, ergibt sich für den direkten Vergleich der Aufnahmen ein Wert von +45 Prozent, **während unter der Annahme einer bei den Aufnahmen im Jahr 2016 vorliegenden 50 %igen Halbnachtschaltung ein Wert von -28 Prozent vorliegt, also eine Abnahme des an den hellsten Stellen auf den Straßen nach oben reflektierten Lichts um mehr als ein Viertel.**

2) Untersuchung der neuen „Wiener Kugel“ auf der Reichsbrücke und Vergleich mit der vorhergehenden Lösung

Die Reichsbrücke zählt zu jenen Objekten im Wiener Stadtraum, die aufgrund ihrer historischen Bedeutung mit Sonderlösungen beleuchtet werden. Diese so genannten Vintage-Leuchten werden gezielt für die individuellen Erfordernisse der jeweiligen Objekte im Sinne von Altstadterhaltung und Denkmalschutz entworfen.

Entscheidende Faktoren sind das äußere Erscheinungsbild wie die Formgebung, Farben und verwendete Materialien, aber auch die Farbtemperatur des abgestrahlten Lichts spielt eine Rolle. Auch Vintage-Leuchten setzen auf möglichst Energie sparende LED-Technik, können jedoch in den meisten Fällen nicht in Full-Cutoff-Bauweise ausgeführt werden, da dies ihr Erscheinungsbild zu

stark beeinflussen würde. An der Reichsbrücke befand sich ursprünglich eine besondere Art der Kugelleuchte, die zwei verschiedene Leuchtmittel mit unterschiedlicher Farbtemperatur aufnahm. Die Fahrbahn wurde mit nach unten gerichteten Natriumdampflampen orange beleuchtet, während der obere Teil der Kugel mit weißem Licht in die der Brücke abgewandte Seite der Kugel und die darüber liegende Hemisphäre strahlte, also eine rein repräsentative Wirkung erzielen sollte.

Diese Kugelleuchte wurde durch eine modernisierte Vintage-Variante ersetzt, wobei auch für die Beleuchtung der Fahrbahn eine weiße LED-Lampe eingesetzt wird. Da die entsprechende Umrüstung zwischen den beiden Befliegungskampagnen 2016 und 2022/23 durchgeführt wurde, ist ein Vergleich der beiden Lösungen möglich.

Die Änderung der Farbtemperatur der für

Auffahrt Brücke	Azimut 220		Azimut 210		Azimut 200/180		Azimut 190/170	
	2016	2023	2016	2023	2016	2023	2016	2023
	64	75	64	87	76	92	80	91
	78	72	79	84	87	91	92	91
	73	74	73	87	79	89	88	85
	74	75	75	84	82	89	88	89
	75	73	77	88	88	90	90	88
	64	72	64	84	73	89	81	89
	63	75	62	87	79	91	86	85
Mittelwert	70,1	73,7	70,6	85,9	80,6	90,1	86,4	88,3
Stdabw	6,3	1,4	7,0	1,8	5,5	1,2	4,5	2,5
%-Stdabw	9 %	2 %	10 %	2 %	7 %	1 %	5 %	3 %

Tab. 7: Messwerte der „Wiener Kugel“ an der östlichen Auffahrt von der Donauinsel zur Reichsbrücke aus vier Azimutrichtungen, jeweils mit Mittelwert, Standardabweichung und prozentueller Standardabweichung.

Reichsbrücke	Azimut 220		Azimut 210		Azimut 200/180		Azimut 190/170	
	2016	2023	2016	2023	2016	2023	2016	2023
	76	78	79	91	80	93	85	92
	78	77	80	91	83	94	86	93
	80	83	82	92	84	93	89	93
	77	81	77	91	81	93	86	93
Mittelwert	77,8	79,8	79,5	91,3	82,0	93,3	86,5	92,8
Stdabw	1,7	2,8	2,1	0,5	1,8	0,5	1,7	0,5
%-Stdabw	2 %	3 %	3 %	1 %	2 %	1 %	2 %	1 %

Tab. 8: Messwerte der „Wiener Kugel“ auf der Reichsbrücke aus vier Azimutrichtungen, jeweils mit Mittelwert, Standardabweichung und prozentueller Standardabweichung für 2016 und 2023.



Abb. 29: Die Reichsbrücke im April 2016. Die ursprünglichen Kugelleuchten bestrahlten die Fahrbahn mit Natriumdampflampen orange und die darüber liegende Hemisphäre mit weißem Licht.



Abb. 30: Die Reichsbrücke im Februar 2023. Die neue Wiener Kugel bestrahlt die Fahrbahn ebenso wie die darüber liegende Hemisphäre mit LED-Lampen weiß (das Bild ist aufgrund besserer Aufnahme-Bedingungen schärfer als 2016).

die Beleuchtung der Fahrbahn eingesetzten Leuchtmittel ist besonders augenscheinlich und wird auch von Messungen bestätigt (Abb. 24, 25). Das von der Fahrbahn in Richtung Messgeräte reflektierte Licht ist durch die Umrüstung innerhalb der Messgenauigkeit jedoch unverändert. Durch den im Vergleich mit den orange strahlenden Natriumdampf-Lampen deutlich größeren Anteil an kurzweiligem Licht (höhere Farbtemperatur) wird dieses Licht allerdings stärker gestreut und verursacht einen entsprechend stärkeren Impakt auf die von der Brücke ausgehende Lichtverschmutzung. Auch die von oben messbare Helligkeit der Kugelleuchten ist im Rahmen der Messgenauigkeit nach der Umrüstung unverändert geblieben (siehe Tabelle 7 und 8).

Als mit rund 150 Kugelleuchten ausgestattetes Gesamtobjekt und durch ihre besonders exponierte Lage stellt die Reichsbrücke auch nach der Umrüstung eines der am stärksten zur Aufhellung des Wiener Nachthimmels beitragenden Bauwerke dar. Gleichzeitig trägt die durch Umrüstung erzielte Energieeinsparung laut Auskunft von Wien leuchtet mehr als 80 Prozent. Im Gegensatz zur alten Bestückung wird nunmehr auch die Reichsbrückenbeleuchtung um 22 und 24 Uhr reduziert beleuchtet.

3) Seestadt Aspern: Ausbau und Veränderungen zwischen 2016 und 2023

Seit dem Baubeginn im Jahr 2011 wird das Stadtentwicklungsgebiet Seestadt Aspern im Osten Wiens schrittweise erweitert. Eine Fertigstellung ist für das Jahr 2030 avisiert. Parallel zur Errichtung der neuen Gebäude und Straßenzüge wird die öffentliche Beleuchtung mit der Wiener Standardleuchte ausgerüstet. Die Seestadt Aspern zählt damit zu den ersten Einsatzgebieten der Standardleuchte und aus Sicht der zweiten Messkampagne im Jahr 2022/23 zu den Installationen mit der bis dahin längsten Betriebszeit. Damit können anhand

dieser Messdaten allfällige Veränderungen oder Alterungseffekte festgestellt werden, die sich im Verlauf von sieben Jahren ergeben haben.

Ein Blick auf die Vergleichsaufnahmen (April 2016 und März 2023) zeigt eine Farbänderung des von der Straße zu den Messgeräten reflektierten Lichts der Standardleuchten von „warm-weiß“ in Richtung „gelb-grün“ (Abb. 26, 27). Die Auswertung einer Stichprobe der Vergleichsdaten weist zudem auf eine Abnahme der von der Straßenoberfläche nach oben reflektierten Lichtmenge in diesem Zeitraum hin. Um dies zu quantifizieren, wäre eine präzisere Auswertung erforderlich, wir empfehlen zur Klärung dieser Frage jedoch eine Messung direkt vor Ort unterhalb der Leuchten.

4) Direkte und indirekte Abstrahlung in Richtung Himmel

Durch den hohen dynamischen Bereich der Messdaten kann auf die Anteile des direkt, respektive indirekt durch Reflexion an Straßen- und Gebäudeoberflächen in Richtung Himmel gestrahlten Lichts geschlossen werden. Auch eine Quantifizierung dieser Anteile ist möglich, erfordert aber den Aufbau von Datenstrukturen und die Entwicklung entsprechender Algorithmen zur Auswertung des Datenmaterials, was im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt werden konnte.

Qualitativ zeigt das Wiener Stadtgebiet von oben betrachtet einige sehr helle Punktlichtquellen und in Ausnahmefällen noch hellere Flächen. Bei den erstgenannten handelt es sich zumeist um fehlgeleitete Gebäudeanstrahlungen, also um Leuchten, deren Licht einen Teil der zu beleuchteten Fassade verfehlt. Besonders deutlich fällt das bei der Beleuchtung von hohen Türmen auf, von denen der Wiener Stephansdom auch nach der Umrüstung der auf den

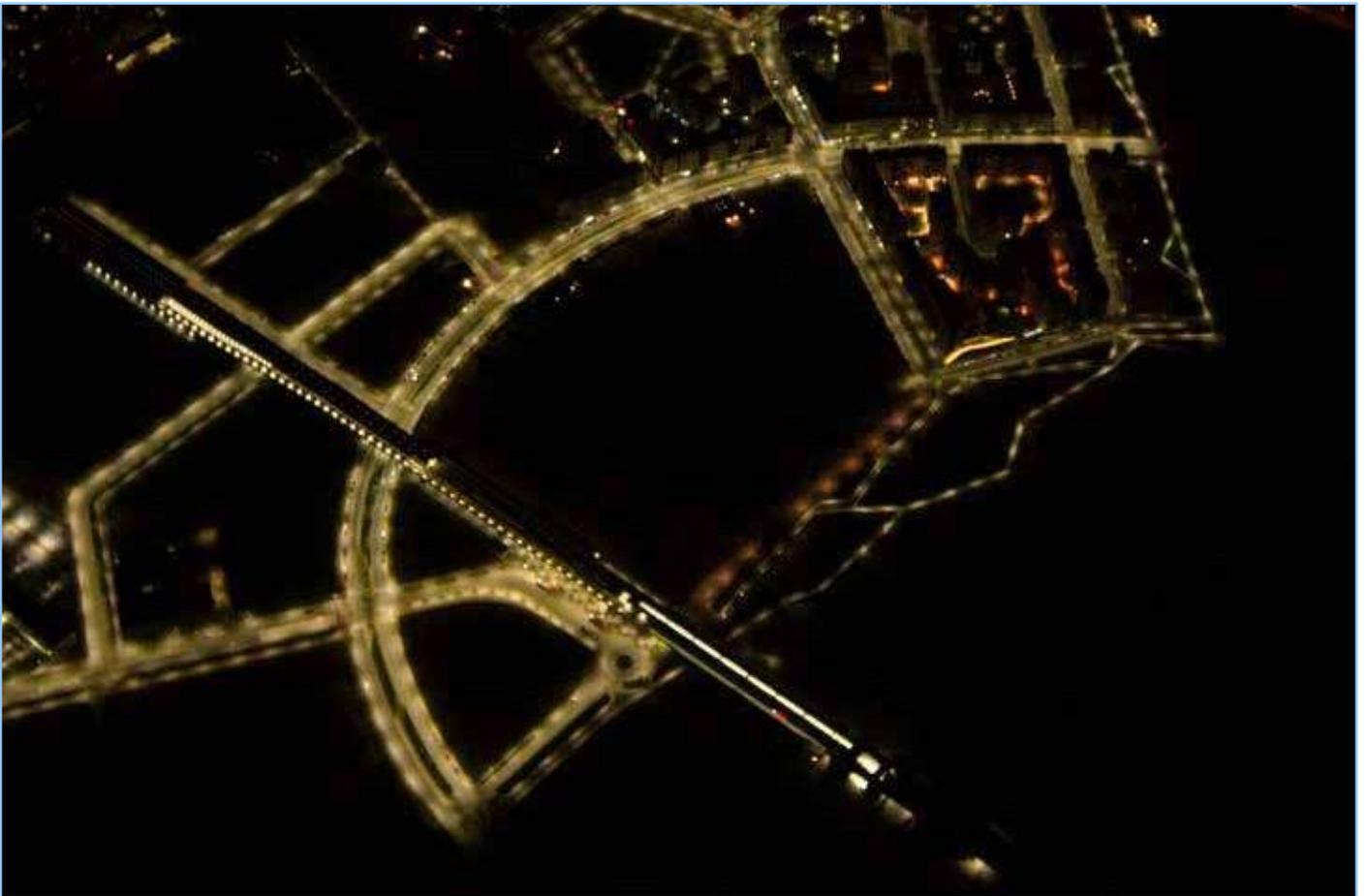


Abb. 31: Seestadt Aspern, 2016.



Abb. 32: Seestadt Aspern, 2023. Deutlich ist die Veränderung der Farbe des von der Fahrbahn reflektierten Lichts der Standardleuchten erkennbar.



Abb. 33: Wien, Ringstraße, 30. Juni 2022, 22:04 Uhr MESZ. Die Vintage-Leuchten strahlen zwar auch direkt nach oben, das von der Straße in Richtung Himmel reflektierte Licht macht aber einen größeren Anteil aus.

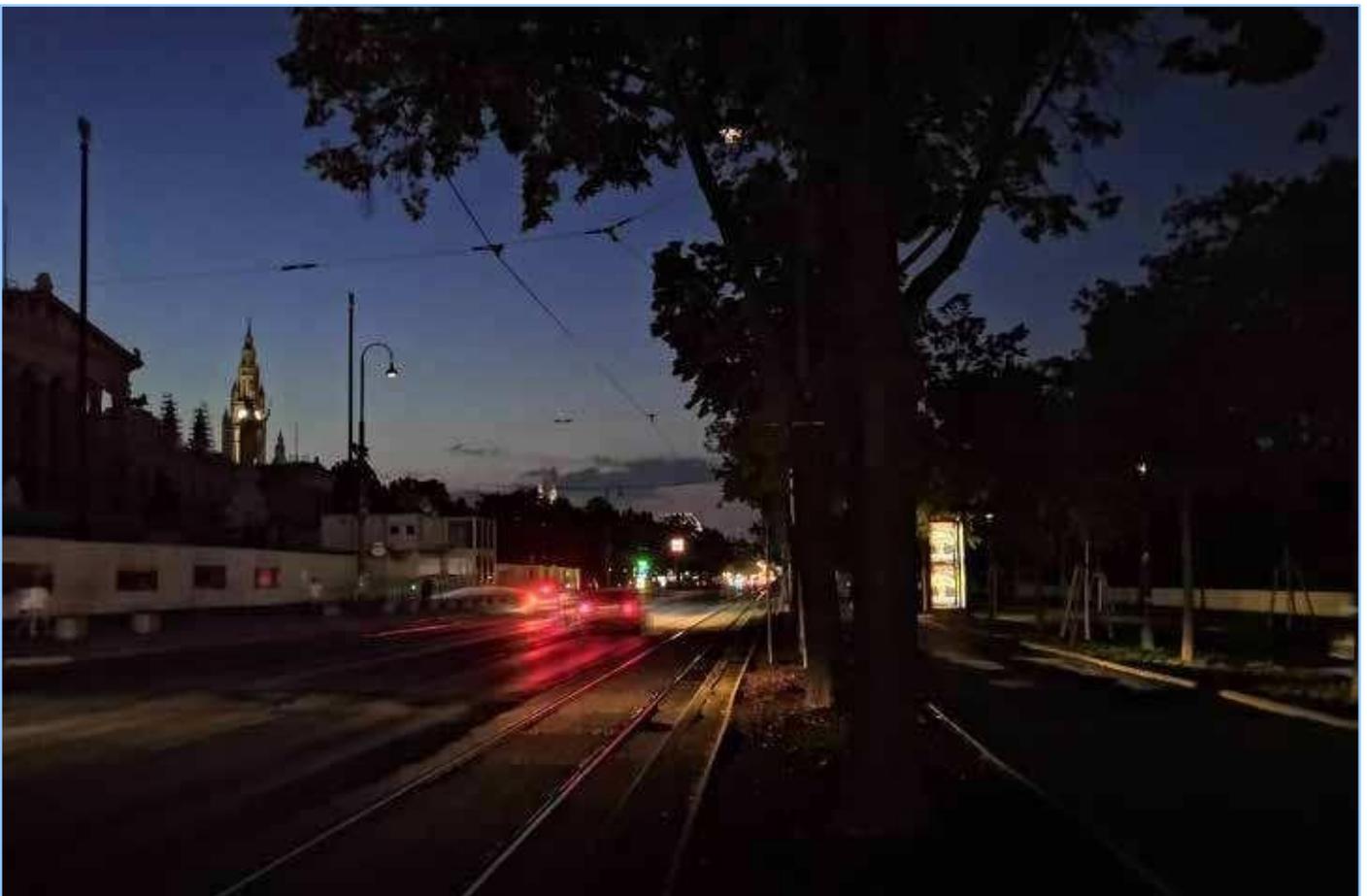


Abb. 34: Wien, Ringstraße, 30. Juni 2022, 22:03 Uhr MESZ. Ein kurzer Ausfall der öffentlichen Beleuchtung machte diesen Vergleich möglich. Nicht nur die Leuchten selbst, sondern vor allem die Straßen zeigen sich drastisch dunkler.

Dächern der umliegenden Häuser befindlichen Strahler die größte Helligkeit zeigt.

Eine temporäre Ausnahmeerscheinung sind Eislaufplätze, die im Zuge der zweiten Mess-Kampagne bei einer Befliegung am 9. Februar 2023 die hellsten nach oben strahlenden Einzelobjekte waren. Auf Abbildung 42 sind diese mit „A“ und „D“ markiert. Die zugrunde liegende Aufnahme wurde im Gegensatz mit den zuvor gezeigten Abbildungen mit einer Belichtungszeit von 1/250, statt 1/30 Sekunden erstellt, zeigt also alle Bereiche um 88 Prozent dunkler. Die markierten Objekte wären sonst überbelichtet.

Auf dieser Abbildung sind auch sehr helle, das ganze Jahr über zum Himmel strahlende Lichtquellen sichtbar: „B“ zeigt einen der Anstrahlungsleuchten für den Stephansdom, „C“ die Dachbeleuchtung der Wiener Staatsoper, gleich darüber ist die Linie der Kärntnerstraße zu sehen.

5) Extrem helle Bereiche in direkter Nachbarschaft zu außergewöhnlich dunklen Flächen

Das in Bezug auf seine Fläche sehr kleine Wiener Zentrum zeigt sich wider Erwarten als ein Ort hoher Kontraste, wenn man den Blick auf nach oben gestrahltes Licht lenkt. Neben den aus der Luft betrachtet hellsten Einzellichtquellen Wiens (Abb. 36) finden sich dort auch solche Regionen, die erstaunlich wenig Licht zum Himmel strahlen. Dazu zählen beispielsweise der Volksgarten, der Burggarten, aber auch große Teile des Heldenplatzes – im Volksgarten großteils sogar unterhalb der Messgrenze der bei dieser Studie zur Anwendung kommenden Methode. Kontrastiert wird dieses Bild jedoch durch eine dieses dunkle Areal umzäunende Kette von nach oben strahlenden Vintage-Leuchten (Abb. 36).

Es wird darauf hingewiesen, dass sich der sehr dunkle Eindruck der genannten Orte lediglich auf das von unten nach oben



Abb. 35: Wien, Bellariastraße, 30. Juni 2022, 21:59 Uhr MESZ. Die mit Strahlern von unten beleuchtete Rückseite des Naturhistorischen Museums während eines kurzen Ausfalls der öffentlichen Straßenbeleuchtung.

gestrahlte, beziehungsweise reflektierte Licht bezieht. Befindet man sich im Volksgarten und lenkt den Blick zum Himmel, ist die künstliche Nachthimmelsaufhellung dort nicht geringer als beispielsweise am gegenüber gelegenen Rathausplatz: Auch bei einem nur theoretisch freien Rundumblick bis zum Horizont sind dort in einer klaren und mondlosen Nacht nur 0,5 Prozent der Sterne zu sehen, die unter einem Himmel ohne Nachthimmelsaufhellung mit freiem Auge wahrnehmbar sind.

Als innerhalb der Messgrenzen „dunkel“ können auch die Dächer nahezu aller Häuser Wiens bezeichnet werden, so sie nicht zu den auch im Jahr 2023 noch sehr seltenen Fällen zählen, in denen eine Dachbeleuchtung oder eine leuchtende Werbetafel eine Rolle spielen.

Dunkle Dächer sind jedoch nur in völlig wolkenlosen, klaren Nächten ohne Mondlicht gegeben, da sie sonst vom Licht der

künstlich beleuchteten Wolken, beziehungsweise vom Mond erhellt werden. Alle hier gezeigten Luftaufnahmen wurden bei wolkenlosem Himmel angefertigt.

6) Einkaufsstraßen

Die klassischen Wiener Einkaufsstraßen nehmen bezüglich des von ihnen emittierten Lichts eine Sonderstellung ein. Die öffentliche Beleuchtung macht dort nur einen sehr geringen Anteil des insgesamt in die Umwelt abgegebenen Lichts aus. Vom Boden aus durchgeführte Messkampagnen haben gezeigt, dass Werbebeleuchtung und insbesondere beleuchtete Auslagenfenster den weitaus überwiegenden Anteil der künstlichen Beleuchtung ausmachen.

So ist etwa für Passanten in der Kärntnerstraße das Licht der dort installierten Vintage-Leuchten nicht mehr bewusst



Abb. 36: Kontraste im Wiener Zentrum: Die grüne Markierung am oberen Rand zeigt den Stephansdom und zwei seiner Anstrahlungsleuchten, wobei von der weiter links gelegenen trotz sehr klarer Luft sogar ein Streulichtanteil erkennbar ist. Auf dieser Aufnahme sind diese Anstrahlungsleuchten ebenso wie der links unten befindliche Eislaufplatz auf dem Wiener Rathausplatz überbelichtet dargestellt. Gänzlich anders der innerhalb der großen Markierung befindliche Volksgarten und der Burggarten: Sie sind in weiten Teilen so dunkel wie sonst nur die Dächer der Häuser.



Abb. 37: Geschäftsstraßen: Die Mariahilferstraße am 22. April 2016 um 01:38 Uhr MEZ, also bereits nach Geschäftsschluss und nach erfolgter Halbschaltung der öffentlichen Beleuchtung.

wahrnehmbar, weil es auch lange nach Geschäftsschluss vom Licht der Auslagenfenster und Werbetafeln überstrahlt wird.

Das gilt auch bei einem Blick aus der Luft zum Boden in Richtung der großen Geschäftsstraßen. Aus einem nicht zu steilen Winkel betrachtet, zeigen sich die Auslagenfenster wie eine grell erleuchtete, kaum unterbrochene Perlenkette, während die öffentliche Beleuchtung nicht direkt wahrnehmbar ist und allenfalls für eine etwas gleichmäßigere Ausleuchtung des Bodens sorgt (Abb. 30, 31). Aus allen Blickwinkeln – ausgenommen bei sehr flachen, wo Häuser den Blick zum Boden verdecken – zählen die „Bänder“ der Wiener Einkaufsstraßen unabhängig von der Uhrzeit, also auch lange nach Geschäftsschluss, zu jenen zusammengehörenden Einrichtungen, die die größte Lichtmenge in Richtung Himmel emittieren. Die touristisch relevanten Straßen Kärntnerstraße, Graben, Rotenturmstraße und

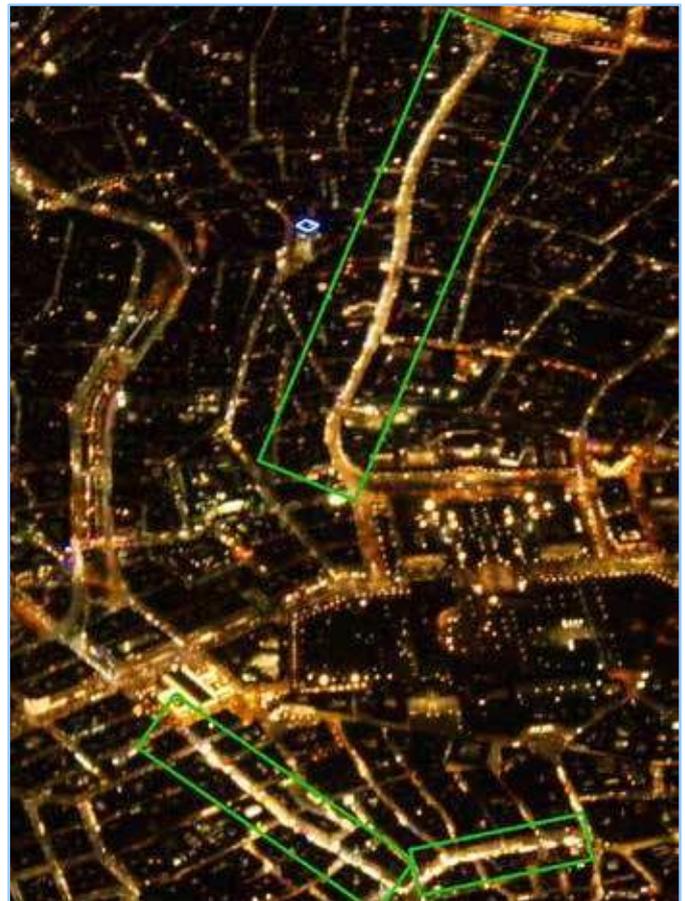


Abb. 38: Geschäftsstraßen: Oben die Mariahilferstraße, links die Kärntnerstraße, rechts der Graben, am 9. Februar 2023 um 18:23 Uhr MEZ. Das helle blaue Quadrat befindet sich auf dem Dach des Haus des Meeres.

Mariahilferstraße dominieren dabei erwartungsgemäß das Geschehen. Die Mariahilferstraße nimmt auf beiden Aufnahmen eine Sonderstellung ein, da die dortige Beleuchtung zu diesen Zeitpunkten nicht dimmbar war. Die Umrüstung auf die Wiener Standardleuchte ist jedoch in Planung.

7) Effekte von in Richtung Himmel reflektierten Licht

Licht, das im Außenraum zur Beleuchtung von Flächen oder Objekten eingesetzt wird, erreicht je nach dem Design der Leuchten, ihrer Aufstellungsart sowie den Eigenschaften und der Umgebung dieser Objekte in mehr oder weniger abgeschwächter Form auch die darüber befindliche Hemisphäre. Während bei frei aufgestellten Kugelleuchten die obere Hälfte der Leuchte direkt zum Himmel strahlt, gibt eine korrekt montierte Wiener Standardleuchte kein messbares Licht über die Horizontalebene ab.



Abb. 39: Stadtautobahnen: Autobahnkreuz A23/A4 am 22. April 2016. Natriumdampf-Lampen waren hier das ausschließlich verwendete Leuchtmittel.

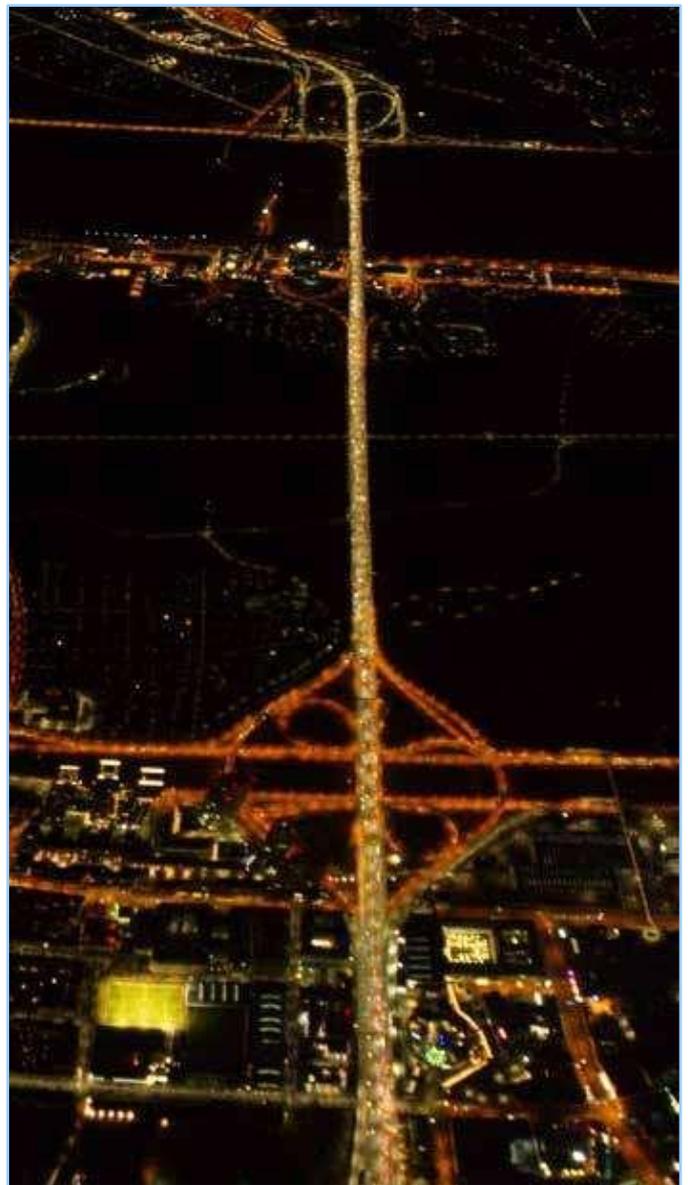


Abb. 40: Stadtautobahnen: Autobahnkreuz A23/A4 am 9. Februar 2023. Die A23 war hier bereits auf LED-Leuchtmittel umgerüstet.

Im urbanen Umfeld erreicht ihr Licht zunächst auf den Straßen befindliche Objekte und Personen, die Straßenoberfläche sowie Teile von Hausfassaden oder auch Vegetation. Von dort wird das Licht in Abhängigkeit von den Oberflächeneigenschaften reflektiert und gestreut. Ein Teil des Lichts wird von den Oberflächen absorbiert, der Rest wird über einmalige Reflexion oder über Umwege in die Umwelt abgegeben und ist damit einer Vermessung von oben zugänglich. Generell ist zu beachten, dass die Absorptionseigenschaften von Straßen und Gebäudeoberflächen für sichtbares Licht eher gering sind, wobei der in Wien für den Straßenbau

dominierende Asphalt deutlich mehr Licht absorbiert als Beton (Abb. 32, 33). Doch nicht nur die Straßen spielen dabei eine Rolle. Die Fertigstellung der Renovierung der ehemals rußgeschwärzten Wiener Altbaufassaden bewirkt eine massive Reduktion ihrer Absorptionseigenschaften (Abb. 34). Die Summe der in Wien vorhandenen Hausfassaden ist somit wesentlich heller als noch im 20. Jahrhundert, wodurch sie maßgeblich dazu beitragen, dass heute aus den Straßenzügen Wiens mehr Licht nach oben entweicht, als wenn die Wiener Standardleuchte beispielsweise in den 1970er-Jahren zur Beleuchtung von Straßen verwendet worden wäre.

Die Verwendung eines Full-Cutoff-Designs für die Beleuchtung von Straßen lässt das zum Himmel gelenkte Licht daher nicht verschwinden, sondern bewirkt zunächst, dass das vom Leuchtmittel erzeugte Licht möglichst zielgenau und gleichmäßig die zu beleuchteten Flächen erreicht. Daher ist beispielsweise die beim Altbestand der Leuchten übliche Aufhellung von Hausfasaden bis hinauf zu den obersten Stockwerken bei der Standardleuchte nicht mehr gegeben; sie leuchtet nur mehr bis zirka zum ersten Stockwerk der Gebäude.

Die effektive Reduktion des insgesamt – also direkt und indirekt – von einer Leuchte nach oben gestrahlten Lichts ist deshalb auch davon abhängig, ob die Helligkeit des Leuchtmittels verändert wird. Auch die spektralen Eigenschaften des Leuchtmittels (Farbtemperatur) spielen eine Rolle, weil Absorption und Streuung an Oberflächen und in der Luft von der Wellenlänge des Lichts abhängig sind. Vergleicht man eine Kugelleuchte mit einer Wiener Standardleuchte, die beide mit der gleichen Beleuchtungsstärke die Fahrbahn erhellen,

so wird die Kugelleuchte in Summe (direkt und indirekt über Reflexion auf der Fahrbahn) wesentlich mehr Licht nach oben strahlen, als die lediglich indirekt über die Fahrbahn Licht nach oben reflektierende Standardleuchte. In geringerem Ausmaß gilt das auch für die vor der Umrüstung weit verbreitete Wannenform von Leuchten, die zwar nicht senkrecht nach oben, aber doch deutlich über die Horizontalebene geleuchtet haben.

Tatsächlich wurde die Beleuchtungsstärke der neu installierten Wiener Standardleuchte im Vergleich mit den zuvor üblichen Leuchtstoffröhren und Natriumdampf-Lampen angehoben, wobei sie im Vergleich mit den letztgenannten eine wesentlich höhere Farbtemperatur und damit eine stärkere Streuung in der Atmosphäre zeigen (Abb. 35, 36).

Die höhere Beleuchtungsstärke beruht laut Auskunft von Wien leuchtet einerseits auf dem teilweise hohen Alter des Altbestands und andererseits auf der vorausplanenden Einhaltung der entsprechenden Normen. Auch LED-Leuchtmittel verlieren im Verlauf ihrer (vergleichsweise sehr langen)



Abb. 41: Wien, Stephansplatz und Stephansdom, 22. April 2016, 02:40 Uhr MESZ. Auch in den frühen Morgenstunden wird von hier sehr viel Licht direkt in Richtung Himmel gestrahlt.

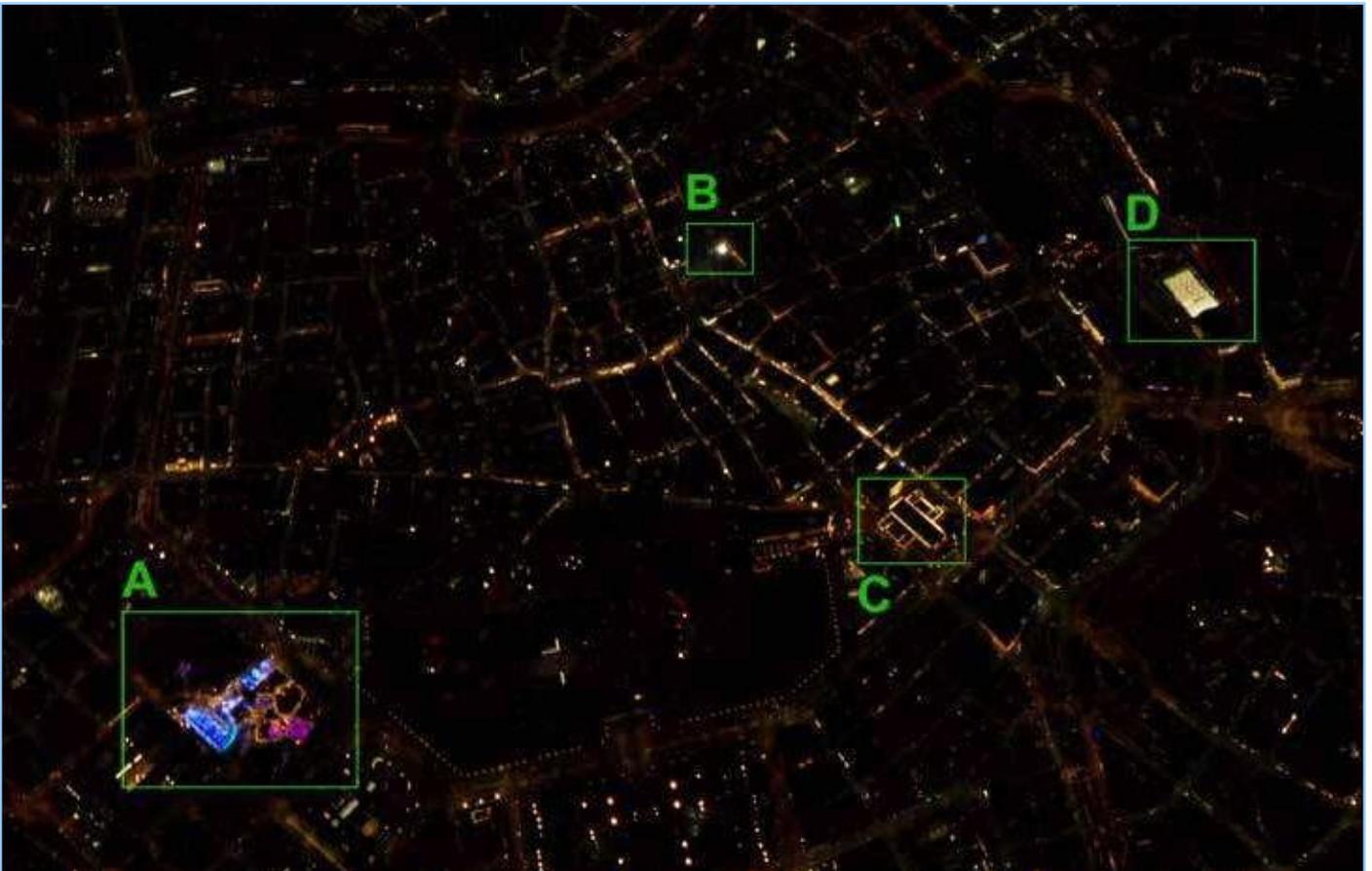


Abb. 42: Besonders viel Licht in Richtung Himmel strahlende Einzelobjekte finden sich im Wiener Zentrum. Die hier gezeigte Aufnahme wurde im Gegensatz zu den Abbildungen zuvor mit 1/250, statt mit 1/30 Sekunde belichtet.

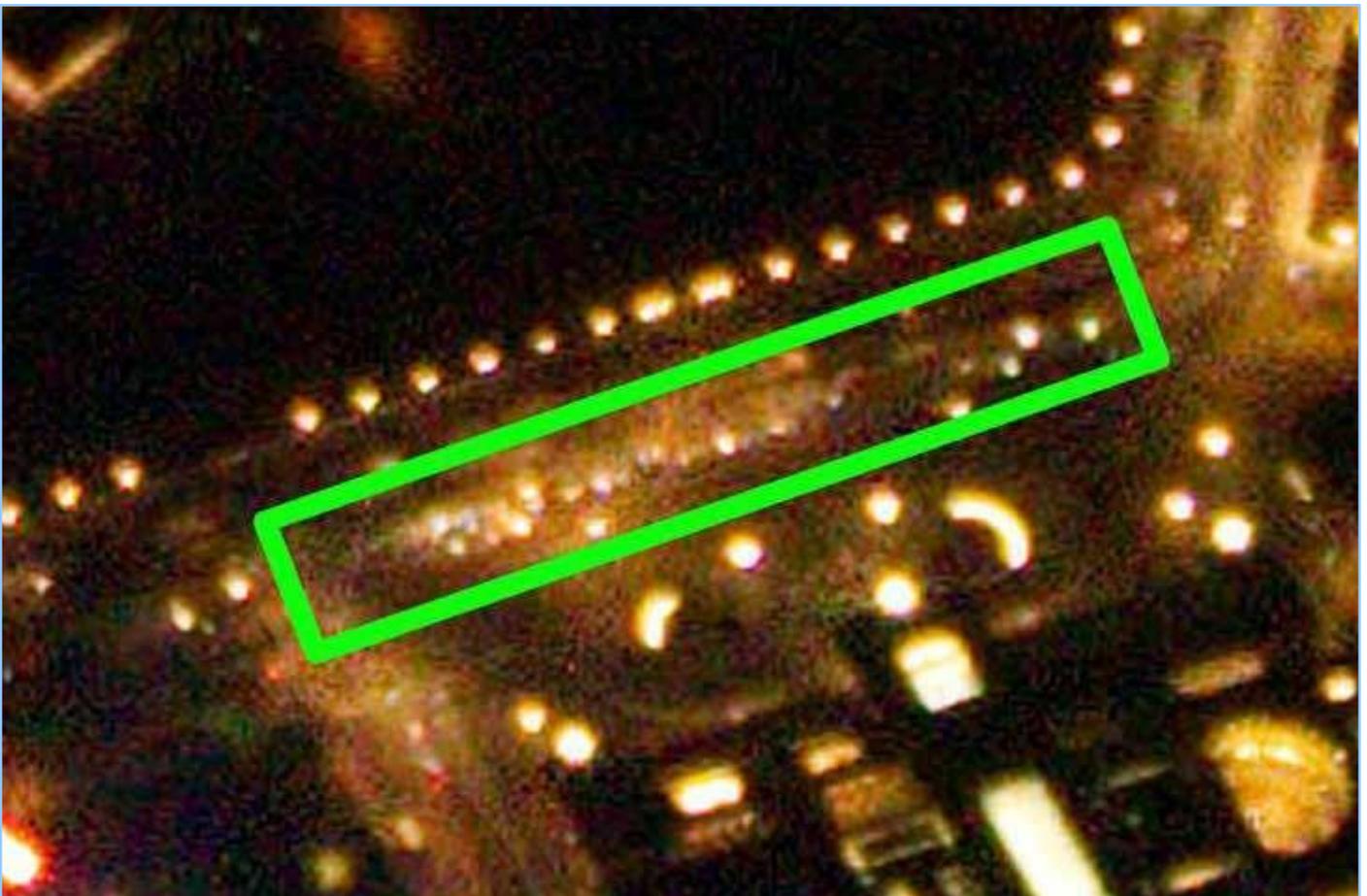


Abb. 43: Fahrzeuge (grünes Rechteck) vor dem Parlament auf der Wiener Ringstraße. Darüber sind die vergleichbar hellen Leuchtpunkte der Vintage-Leuchten an der Grenze zum Volksgarten sichtbar. 09. Februar 2023, 18:29 MEZ.

Nutzungsdauer an Lichtstärke, weshalb diese bei der Montage so gewählt wird, dass sie auch zum Ende ihrer Lebenszeit die Normen erfüllt.

Daraus ergibt sich beim direkten Vergleich der Befliegungsbilder aus dem Jahr 2016 mit jenen der zweiten Kampagne aus 2022/23 der Eindruck einer Zunahme der insgesamt von den Wiener Straßen nach oben abgegebenen Lichtmenge. Auch hierfür ist mit dem vorhandenen Datenmaterial grundsätzlich eine Quantifizierung möglich, die jedoch die Entwicklung entsprechender Datenstrukturen und Algorithmen erfordert (siehe Punkt 4).

8) Fahrzeuge und ihr Einfluss des aus dem Stadtgebiet nach oben emittierten Lichts

Fahrzeuge, in Wien handelt es sich dabei während der Nachtstunden primär um Pkw, begleiten das zum Himmel strahlende Kunstlicht auf unterschiedliche Arten – aktiv über ihre eigenen Beleuchtungsanlagen und passiv über die Reflexionseigenschaften ihrer Oberflächen.

Der Einfluss von Kfz auf die von Städten ausgehenden Lichtemissionen steht noch am Beginn der Erforschung. Eine Studie aus dem Jahr 2018 [7] weist auf die durch den Umstieg auf LED-Technik steigende Beleuchtungsstärke der Scheinwerferanlagen von Kraftfahrzeugen hin und beziffert sie mit rund 2000 bis 8000 Lux. Problematisch ist demnach die hohe Leuchtdichte der Scheinwerfer, wodurch sie vor allem in biologisch sensiblen Bereichen massive Störungen verursachen können.

Bei den Befliegungen fallen Kfz-Scheinwerfer naturgemäß vor allem bei flachen Blickwinkeln auf und sind dann mit der Helligkeit in der Größenordnung der neuen Kugelleuchten auf der Reichsbrücke vergleichbar. Sie sind jedoch auch aus wesentlich steileren Blickwinkel zum Teil sehr gut erkennbar (Abb. 43, 44). Die Summe der gleichzeitig in Wien nachts fahrenden Kfz

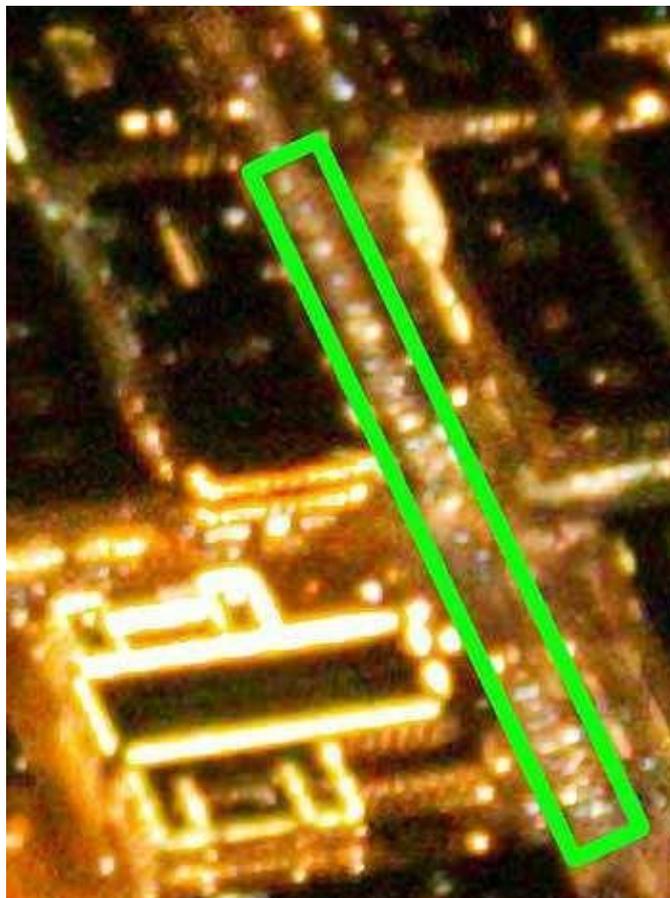


Abb. 44: Fahrzeuge (grünes Rechteck) vor der Oper auf der Wiener Ringstraße. 09. Februar 2023, 18:29 MEZ.

dürfte daher einen durchaus maßgeblichen Anteil am insgesamt nach oben gestrahlten Licht haben. Für eine Quantifizierung wäre neben einer präzisen Messung auch eine entsprechende Verkehrsstatistik für verschiedene Nächte erforderlich.

Der Grund für die Einbeziehung von Kfz in diese Studie zur öffentlichen Beleuchtung ist jedoch ihr passiver Beitrag. Da ein großer Teil der zugelassenen Kfz mit hellen Farben lackiert ist und nahezu alle mit Glanzeffekt ausgestattet sind, ist ihre Reflektivität sehr hoch. Befindet sich ein solches Fahrzeug unterhalb einer weißen LED-Leuchte, reflektiert es deren Licht wesentlich stärker als der darunter befindliche Fahrbahnbelag. Auch dieser Beitrag dürfte in der Summe einen maßgeblichen Beitrag zum insgesamt nach oben emittierten Lichts beitragen, da daran nicht nur fahrende, sondern auch die wesentlich größere Zahl an parkenden Kfz beteiligt sind. Pro Fahrzeug ist dieser passive Reflektions-Effekt allerdings geringer als der aktive Eintrag der Scheinwerfer.

Literatur

Allgemeine Einführungen

[1] Schröter-Schlaack, Christoph et al. "Lichtverschmutzung – Ausmaß, Auswirkungen und Handlungsansätze. TAB-Fokus." (2020). <https://doi.org/10.5445/IR%2F1000121963>

[2] <https://science.apa.at/power-search/18273645275122711558>

[3] F. Falchi et.al.: The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances* 10 Jun 2016: Vol. 2, no. 6, e1600377

[4] C. Kyba et.al.: Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances* 22 Nov 2017: Vol. 3, no. 11, e1701528

[5] G. Wuchterl: Licht über Wien – Eine erste vollständige Perspektive: <https://www.wien.gv.at/verkehr/strassen/einrichtungen/beleuchtung/led-tausch/pdf/licht-ueber-wien.pdf>

Biologie:

[6] Estelle M. Moubarak, A. Sofia David Fernandes, Alan J. A. Stewart, Jeremy E. Niven; Artificial light impairs local attraction to females in male glow-worms. *J Exp Biol* 1 June 2023; 226 (11): jeb245760.

Fahrzeuge und Lichtverschmutzung:

[7] Gaston, KJ, Holt, LA. Nature, extent and ecological implications of night-time light from road vehicles. *J Appl Ecol.* 2018; 55: 2296– 2307. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13157>

Überblick zu Messmethoden der Lichtverschmutzung

[8] Susan Mander, Fakhrul Alam, Ruggiero Lovreglio, Melanie Ooi: How to measure light pollution—A systematic review of methods and applications, *Sustainable Cities and Society*, Volume 92, 2023, 104465, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104465>.

Befliegungen:

[9] Barentine JC. Methods for Assessment and Monitoring of Light Pollution around Ecologically Sensitive Sites. *J Imaging.* 2019 May 18;5(5):54. doi: 10.3390/jimaging5050054. PMID: 34460492; PMCID: PMC8320940. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8320940/>

[10] Tabaka, P. Pilot Measurement of Illuminance in the Context of Light Pollution Performed with an Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sens.* 2020, 12, 2124. <https://doi.org/10.3390/rs12132124>

[11] Kyba, Christopher & Ruhtz, Thomas & Lindemann, Carsten & Hölker, Franz & Luginbuhl, Christian. (2018). Angular distribution of uplight at 10000 ft over Berlin. *Highlights of Astronomy*, Volume 16, XXVI–IIth IAU General Assembly, August 2012.

[12] Kuechly, Helga U; Kyba, Christopher C M; Ruhtz, Thomas; Lindemann, Carsten; Wolter, Christian; Fischer, Jürgen; Hölker, Franz (2012): Mosaic image of the artificial light produced by Berlin on the night of September 11, 2010 observed from an altitude of 10,000 ft. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.785492>

[13] <https://www.adlerplanetarium.org/blog/far-horizons-mission-nitelite-update/>

[14] Massetti, L.; Paterni, M.; Merlino, S. Monitoring Light Pollution with an Unmanned Aerial Vehicle: A Case Study Comparing RGB Images and Night Ground Brightness. *Remote Sens.* 2022, 14, 2052. <https://doi.org/10.3390/rs14092052>

[15] Xi Li, Noam Levin, Jinlong Xie, Deren Li, Monitoring hourly night-time light by an unmanned aerial vehicle and its implications to satellite remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, Volume 247, 2020, 111942, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111942>

Abbildungsnachweis

Cover: Markus Reithofer
1, 2, 3: wien.gv.at
4: Günther Wuchterl
5, 6, 7, 8, 9, 10: Markus Reithofer
11: NASA
12: Kyba, Ruhtz, Lindemann, Hölker,
Luginbuhl
13: J.C. Barentine
14, 15: Markus Reithofer
16: Günther Wuchterl
17 – 45: Markus Reithofer

DANKSAGUNG

Dieses Projekt ist das Ergebnis einer jahrelangen Planung sowie der Zusammenarbeit mehrerer Institutionen und zahlreicher Einzelpersonen.

Die Initiative dafür geht vom Verein Kuffner-Sternwarte und dessen Leiter Dr. Günther Wuchterl aus, der sich seit mehr als zwei Jahrzehnten wissenschaftlich mit der messtechnischen Erfassung und Überwachung der künstlichen Nachthimmelaufhellung beschäftigt.

Die Finanzierung der Studien der Jahre 2016 und 2022/23 erfolgte durch die Stadt Wien über Wien leuchtet.

Dieser Befliegungsstudie gingen ab 2011 zahlreiche bodengebundene Studien („Licht über Wien“) voraus, die unter anderem von der Wiener Umweltschutzbehörde und der Wiener MA 22 (Umweltschutz) beauftragt, sowie von der Wiener MA 39 (Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsstelle) begleitet wurden.

Eines der Ergebnisse dieser Studien ist die Feststellung, dass ein Anteil von ungefähr einem Drittel der vom Wiener Stadtgebiet ausgehenden Lichtimmissionen nicht vom Boden aus vermessen werden kann und daher durch Messungen aus der Luft erfasst werden muss.

Dies führte im Jahr 2016 zur ersten nächtlichen Befliegung Wiens, die von Wien leuchtet (öffentliche Beleuchtung) zusammen mit dem Naturhistorischen Museum beauftragt und vom Verein Kuffner-Sternwarte geplant, organisiert und durchgeführt wurde. Hier gilt besonderer Dank MMag. Gerald Wötzl von Wien leuchtet und dem damaligen Generaldirektor des Naturhistorischen Museums, Univ.-Prof. Dr. Christian Köberl. Auch diese erste Befliegungs-Kampagne wurde von der Wiener MA 39 begleitet und mit Messtechnik unterstützt. Für Letztere bedanken wir uns bei DI. Dr. Rudolf

Hornischer und DI(FH) Horst Pribitzer. Nach Abschluss der ersten Befliegung startete die Umrüstung der Seilhängeleuchten auf die neue Wiener Standardleuchte, weshalb ein Vergleich der im Jahr 2016 gewonnenen Daten mit der neuen Beleuchtungssituation angestrebt wurde.

Die Beauftragung dafür erfolgte neuerlich über Wien leuchtet zusammen mit dem Naturhistorischen Museum, wobei besonderer Dank dessen Generaldirektorin Dr. Katrin Vohland gilt. Auch diese zweite Befliegungs-Kampagne wurde vom Verein Kuffner-Sternwarte realisiert und mit von der MA 39 zur Verfügung gestellten Messtechnik begleitet.

Besonderer Dank gilt auch dem ÖAMTC, der für die zweite Kampagne über einen Zeitraum von neun Monaten einen mit Fotofenstern ausgestatteten Helikopter bereit gehalten hat. An dieser Stelle danken wir dem Piloten Robert Gallmayer für seine professionelle und flexible Unterstützung der Befliegungen.

Der Verein Kuffner-Sternwarte hat dieses Projekt umfassend mit Ausrüstung, Messtechnik und Infrastruktur unterstützt. Auch das Team der mitarbeitenden Personen stammt vom Verein Kuffner-Sternwarte. Hier bedanken wir uns bei Dr. Günther Wuchterl, MMag. Manuela Kopper, Niels Paul Walter, Mag. Sonja Wenig, Eva Weiler MSc, Ruben Tandon MSc und Markus Reithofer. Wesentlich für die Durchführbarkeit des Projekts war die ebenfalls vom Verein Kuffner-Sternwarte organisierte Ersatz-Crew für die Befliegungen. Danke an Simon Pratschner und Hannes Wuchterl für ihre zur Verfügung gestellte Zeit.

Der ZAMG (nunmehr GeoSphere Austria) danken wir für die Bereitstellung einer Aerosolsonde, die zusätzliche Messungen ermöglichen sollte, aber aufgrund der Verzögerungen bei der Flugdurchführung nicht mit an Bord genommen werden konnte. Ein Einsatz bei möglichen ähnlichen Projekten ist jedoch in Planung.

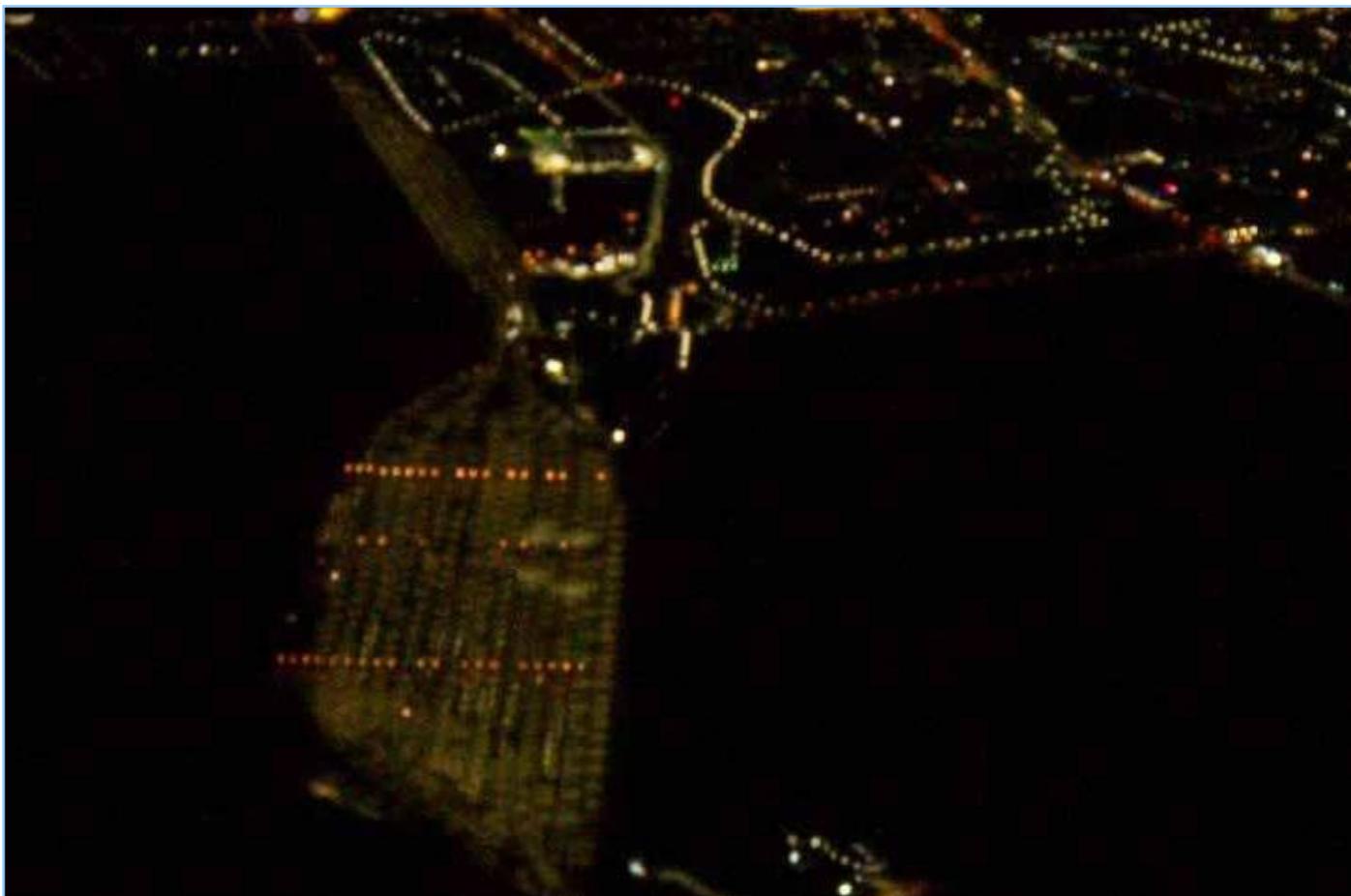


Abb. 45: Auch der Zentralvershub-Bahnhof in Kledering zeigt auch unter einem flachen Betrachtungswinkel lediglich die auf dem Boden befindlichen Lichtflecke von Full-Cutoff-Leuchten. 17. März 2023, 00:32 MEZ.

