

Licht über Wien VIII - Untersuchungen des Vereins Kuffner-Sternwarte

Wiener Straßenbeleuchtung die Nachtwirkung des Tausches

Günther Wuchterl, Verein Kuffner-Sternwarte, Kuffner-Sternwarte.at,

Wien-Ottakring, 2025-12-04

Zweck und Hauptergebnisse

Ziel der Studie ist die Aktualisierung der direkten Messung des Anteils der städtischen öffentlichen Beleuchtung an der Nachthelligkeit, entsprechend der, seitens des Vereins Kuffner-Sternwarte erstellten und verfügbar gemachten „Roadmap“¹ zu Licht über Wien bis 2028.

Die Bestimmung des „Stadt-Wien-Anteils“ an der Nachthelligkeit erfolgt anhand von bekannten Mustern, sogenannten „Stufen“ in den Zeitserien der horizontalen Bestrahlungsstärke². Diese Muster korrelieren mit der Schaltung und der Regelung der öffentlich Straßenbeleuchtung, auch bekannt als Teilnachtschaltungen. Die Messwerte dafür erfasst das Monitoring Netz des Vereins Kuffner-Sternwarte.

Hier präsentieren wir, für drei Mess-Stationen in unterschiedlichem Abstand vom Stadtzentrum und mit unterschiedlichen Anteilen der Nutzungsklassen der umgeben Lichtquellen, sowie die Jahre 2015 bis 2024³ die erste Analyse der zeitlichen Entwicklung der daraus abgeleiteten Nachterhellungs-Anteile, die der öffentlichen Straßenbeleuchtung der Stadt Wien zugeordnet werden können.

Hauptresultat ist ein starker Rückgang dieser Anteile auf rund ein Viertel der Werte von 2015, also zu Beginn der Umstellung. Der Rückgang verläuft entsprechend dem Fortschritt der Installation, gemessen an den kumulierten Installationszahlen der neuen Leuchtentypen.

Für 2025 bis 2026 ist, bei weiterem Fortschreiten des Tausches mit den aktuellen Installationsraten und unter der Annahme dass der überwiegende Teil der Leuchten über die Nacht mit reduzierter Lichtabgabe betrieben wird, ein Verschwinden der Beiträge der öffentlichen Straßenbeleuchtung der Stadt Wien zur Aufhellung der Nacht, unter die aktuelle Nachweisgrenze von rund 1% der Nachthelligkeit zu erwarten

Ausgangspunkt – Wiener Licht 2011/2012

In der ersten Studie zum „Licht über Wien“⁴ wurde, vor rund vierzehn Jahren die Nachweisbarkeit von urbanen Teilnachtschaltungsmustern im Rahmen des Lichtmonitorings des Vereins Kuffner-

¹Version vom 25. April 2024, siehe S. 28

²Bei Tage entspricht die horizontale Beleuchtungsstärke unter freiem Himmel der Globalstrahlung (total radiation).

³Komplexen Veränderungen zu Beginn des Leuchtentausches, inklusive Schaltzeitwechsel von 23h auf 22h, und de der CoViD-19-Pandemie erforderten eine Verlängerung des Studienzeitraums von (2019-2024) auf eine Dekade (2014-2024) um ein ausreichend gutes „Anlaufstück“ für den „Vorher“ Zustand zu erhalten.

⁴Chwatal, A., Kopper, M., Linhardt F., Posch, T., Reithofer, M., Wuchterl, G.: Licht über Wien, Energieaufwand und Quellen. Studie im Auftrag der Wiener Umwelthanwaltschaft. Wien, 2012. <http://wua-wien.at/images/stories/publikationen/lichtverschmutzung-lichtkataster.pdf>

Sternwarte erstmals demonstriert, vergl., Abbildung 1. In drei nächtlichen Lichtverläufen sind um 20h, 21h und 22h UTC (22h, 23h und 24h MESZ) anhaltende Verminderungen erkennbar – die sogenannten „Lichtstufen“. Innerhalb weniger Sekunden fallen die Messwerte sehr rasch auf ein neues Niveau. Die hohe Empfindlichkeit der verwendeten Lightmeter⁵ erlaubt die zeitlich genau definierte Erfassung der sehr *kurzzeitigen* Schaltvorgänge und so die Möglichkeit einer guten Trennung von anderen, natürlichen und künstlichen Veränderungen, auf *längeren Zeitskalen*. Teilweise sind die Verminderungsrampen bei den Ein Hertz [1 Hz] Kadenzen der Messreihen zeitlich nicht vollständig aufgelöst und die Kurven in dem Sekundenintervall zwischen den Messungen, in Abbildung 1 sogar erkennbar, „unterbrochen“. Aus dem Vergleich der bekannten Leistung von 1,96 MW (14 % der öffentlichen Lichtleistung) für die gemessene Halbschaltungsstufenhöhe um 21h UTC (23 MESZ) konnte damit, im oben zitierten Bericht von 2012 die Gesamt-Außenlicht-Leistung Wiens über einen Faktor aus der Boden-Ablichtleistung errechnet werden.

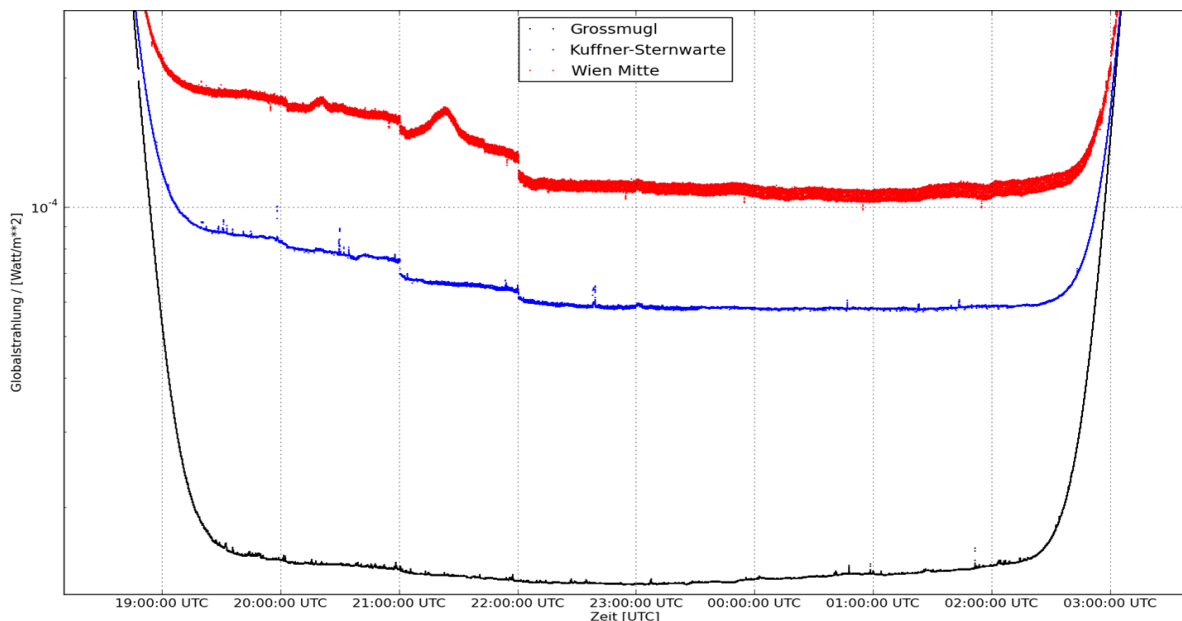
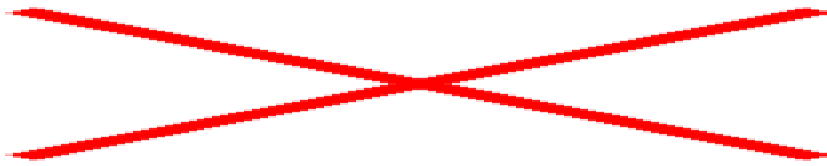


Abbildung 1: Verlauf der horizontalen Bestrahlungsstärke in der Nacht vom 28. auf 29. August 2011, dargestellt auf logarithmischer Skala. Daten aus dem Wiener Lichtbericht 2012 für die Messstationen „Wien Mitte“ (rot), Kuffner-Sternwarte (blau) und Großmugl (schwarz).

In den Zeitserien der horizontalen Bestrahlungsstärke, der drei Lightmeter, am Stubenring („Wien Mitte“), auf der Kuffner-Sternwarte und in Großmugl, zeichneten sich die bekannten Schaltzeiten Wiens ab, Abbildung 1, (von oben nach unten in Rot, Blau und Schwarz). Damit ergibt sich die Möglichkeit der Bestimmung der Anteile der städtischen Straßenbeleuchtung an der künstlichen Aufhellung der Nacht (pauschal auch als „Lichtverschmutzung“ bewertet).

⁵Mehr dazu Lightmeter.at

Aus den 2011er Monitoringdaten (aufgenommen mit drei Lightmeter Mark 2.31 und 1 Hz Kadenz) wurden, zur quantitativen Bestimmung, drei Nächte einer stabilen Schönwetterlage ausgewählt, Die Stufenhöhen errechnete das Autor:innen-Team aus den Unterschieden in den Mittelwerten, der zehn Minuten vor bzw. nach dem jeweiligen Stundenwert. Zu jedem Unterschied vorher/nachher tragen so 1200 Einzelmesswerte bei. Die Mediane, Mittelwerte und Standardabweichungen in den drei

 *Tabelle 1: Relative Höhe der 23h-„Lichtstufen“ vom 18., 19. und 20. August 2011, für die Stationen des Lightmeter-Lichtmessnetzes des Vereins Kuffner-Sternwarte, angegeben in % des Ausgangswertes („vorher“). „Wien Mitte“, Kuffner-Sternwarte und Großmugl. 23h MESZ = 21h UTC*

Nächten, für die relative Änderung um 23h MESZ (21h UTC) sind in Tabelle 1, in Prozent des „vorher Wertes“ der horizontalen Bestrahlungsstärke wiedergegeben. Die Standardabweichungen quantifizieren die Änderungen von Nacht zu Nacht. Die jeweiligen Stufenhöhen für ein *bestimmtes Datum* sind deutlich genauer bestimmt. Die Standardabweichungen müssen deshalb von anderen Faktoren wesentlich mit-bestimmt sein, die sich von Tag zu Tag ändern. Der wichtigste Faktor ist am wahrscheinlichsten der Zustand Atmosphäre.

Die *relativen* Stufenhöhen sind an den verschiedenen Orten unterschiedlich, was selbst bei konstantem „Schaltlicht“ aufgrund der lokal unterschiedlichen Werte und Verläufe der horizontalen Bestrahlungsstärke zu erwarten ist. Für die Station Großmugl war die 23h MESZ Stufe (21h UTC) für die 2011 ausgewählten Spätsommernächte nur an einem Abend signifikant nachweisbar.

Plausible Ursachen für die unterschiedlichen Anteile an den verschiedenen Orten sind neben den unterschiedlichen Absolutwerten der Bestrahlungsstärke und den relativen Naturlichtbeiträgen (~0,1% in Wien Zentrum, ~1% auf der Kuffner-Sternwarte, ~50% in Großmugl, jeweils zu mondlosen astronomischen Nachtzeiten), die lokal wechselnden Beiträge verschiedener Quellenklassen⁶ sowie Effekte der Lichtausbreitung (Transparenz und Streueigenschaften der Atmosphäre). Im Falle Großmugls, etwa, muss das Licht der öffentlichen Wiener Beleuchtung rund 30 km direkte Strecke überbrücken, und das mit typischerweise zwei Streueignissen an Aerosolen.

Methoden

Die Lichtmenge an einem Ort wird mittels der Messung der horizontalen Bestrahlungsstärke erfasst. Registriert wird alles Licht das von oberhalb des Horizontes auf eine horizontale Einheitsfläche auftrifft. Um für einen möglichst großen Bereich charakteristisch zu sein, und von Einzelquellen möglichst unabhängig, wird oberhalb aller lokalen Quellen gemessen, typischerweise auf Dächern oder Messtürmen. Damit wird die gesamte, aus der oberen Hemisphäre („vom Himmel“) kommende Strahlung erfasst und gleichzeitig die direkte Strahlung lokaler Quellen vermieden - letztere liegen unter dem „Messhorizont“ der hoch montierten Sensoren.

⁶Etwa Geschäftsbeleuchtung, Werbebeleuchtung, Parkplatzbeleuchtung, Repräsentationsbeleuchtung wie sie in unterschiedlichen Teilen der Stadt und ihrer Umgebung nach Häufigkeit und Anteil variieren. Dazu kommen natürlich auch normierte Empfehlungen unterschiedlicher Lichtniveaus, die sich an Nutzungsklassen, Uhrzeiten und Verkehrsdichten orientieren (Wohngebiet vs. Gewerbegebiet, Verkehrsspitze vs. Ruhezeiten).

Die Messungen erfolgen bei Tag und Nacht mit IYA-Lightmetern⁷. Die Messwerte werden sekundlich erfasst, also mit einer Messrate von 1 Hz.

Bei Tag entsprechen die Messungen der horizontalen Bestrahlungsstärke jener der Globalstrahlung⁸, also der Summe aus direkter und diffuser Einstrahlung von oben. Die Globalstrahlung wird dominiert vom Sonnenlicht. Das eröffnet auch eine sehr einfache Anschauung: der Messwert der horizontalen Bestrahlungsstärke gibt die Leistung der Einstrahlung auf eine Einheitsfläche, also die Energie die pro Zeit die auf die horizontale Fläche, etwa den Boden oder ein auf dem Boden liegendes Solarmodul, fällt. Die Einheit der horizontalen Bestrahlungsstärke ist die einer Leistungsdichte, also Watt pro Quadratmeter, kurz $[Wm^{-2}]$. Die damit verbundene Energie ist die der Summe jener der auf die Fläche einfallenden Photonen, die in einem Zeitintervall ankommen dessen Größe vom Messprozess bestimmt wird. Im Falle des Lightmeters ist auch eine Sekundenauflösung für die Erfassung des Lichts von Einzelsternen problemlos möglich, umso leichter für das Leuchten des mondlosen Himmels der astronomischen Nacht. Letzteres entspricht dem mehr als Tausendfachen eines Sterns, vermehrt um die Beiträge etwaiger künstlichen Aufhellungen.

Die Tagesmessungen der Lightmeter werden zur Kontrolle der Lightmeter-Metrologie an Strahlungsmessstandorten mit jenen der hochgenauen Instrumentierung, des Österreichischen Strahlungsmessnetzes (ARAD) und zur Kalibration verglichen⁹.

Die Kalibrationen der Instrumente an den einzelnen Standorten werden mittels

1. vor Ort Kalibrationen des Instrumentes an natürlichen Quellen wie Sonne und Mond,
2. eines Master-Instrumentes das vor Strahlung geschützt aufbewahrt wird, und
3. mit anderen Messinstrumenten in überlappenden Messbereichen (des ARAD, Luxmeter)

kontrolliert.

Im Falle der Naturlichtmessungen für diese Untersuchung wurden erstmals auch zusätzlich Messungen mit den neuen Mark 4 Alpin Lightmeter¹⁰ durchgeführt, die auch eine werkseitige Laborkalibration für einen Vergleich verfügbar machen.

Bei Stationskonfigurationen deren Uhren nicht via GNSS¹¹ synchronisiert sind, sondern via Internet von Zeitservern abgerufen, oder bei den Wartungsbesuchen gestellt werden, sind etwaige Uhrendriften über den Tag-Nacht-Lichtwechsel kontrolliert. Die Uhren der Stationen Großmugl, Wien Zentrum und Kuffner-Sternwarte sind so korrigiert.

Bei Wien Zentrum wurden Uhrendriften in den Jahren 2016 sowie 2022 bis 2024 korrigiert, auf der Kuffner-Sternwarte, typischerweise wochenweise Driften (Internet-Probleme) in den Jahren 2019, Mitte 2021 bis Mitte 2023 und sporadisch 2024, im Falle von Großmugl in den Jahren 2014, 2016, 2017 und 2018. Die Korrekturen sind auf Sekundengenauigkeit ausgerichtet, im Falle von langanhaltenden Schlechtwetter Perioden können Abweichungen bis 20s auftreten.

⁷Lightmeter.at

⁸Auch *total radiation* oder *total solar irradiance* genannt

⁹Gemeinsam mit GeoSphere Austria (Sonnblick) und dem Sonnenobservatorium auf der Kanzelhöhe

¹⁰Zur Verfügung gestellt von k2wlights.de

¹¹Global Navigation Satellite System, darunter GPS und Galileo

Kunstlicht

Als Kunstlicht wird hier alles betrachtet was über das natürlich zu erwartende Licht hinausgeht. Die Abgrenzung zum Naturlicht erfolgt über die Berechnung der bekannten natürlichen Quellen, wie Sonne, Dämmerung, Mond, Zodiaklicht, Milchstraße usw., sowie die Messung der örtlich und zeitlich nicht langfristig vorhersagbaren, variablen natürlichen Quellen, vor allem des Nachthimmelsleuchtens (airglow). Letzteres ist nach Sonne und Mond die größte natürliche Lichtquelle.

Am einfachsten ist die Trennung zwischen Kunstlicht und Naturlicht für klare, mondlose Bedingungen¹² der astronomischen Nacht, da dort die Modellierung die wenigsten Zusatzinformationen erfordert. Wir betrachten hier ausschließlich diese Bedingungen.

In dieser Studie nutzen wir zur Identifikation von Kunstlicht auch bekannte zeitliche Verläufe zur Unterscheidung und zur Zuordnung einer Quellenklasse. Im Zentrum steht hier natürlich die *Öffentliche Straßenbeleuchtung der Stadt Wien*¹³, und ihr Verlauf während des großen Leuchtentausches, der von der MA 33 – Wien leuchtet durchgeführt wird.

Naturlicht

Die genaueste Methode das Naturlicht vom Kunstlicht zu trennen ist es letzteres zu vermeiden.

Geht das nicht müssen die Naturlicht-Beiträge quantifiziert werden. Am einfachsten geht das bei den Hauptquellen: unter *Nachtbedingungen*, also zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang vermeiden wir Beiträge der *direkten* Sonneneinstrahlung, während der *astronomischen Nachtbedingungen* auch das von der Atmosphäre *gestreute* Dämmerungslicht. Zusammen mit der Forderung dass der Mond mindestens vier Grad unter dem Horizont steht kann die Sonne auch nicht mehr über die Beleuchtung des Mondes und dessen atmosphärischen Streuereignissen wirksam werden.

Alle weiteren Beiträge müssen modelliert oder gemessen werden, das geht am einfachsten für klare, wolkenlose Bedingungen.

Da bleiben dann die natürlichen Lichtquellen der klaren, mondlosen astronomischen Nacht wie Nachthimmelsleuchten, die Quellen des Sonnensystems, und, noch geringer, der Milchstraße. Für diese Studie werden sie an Orten ohne Kunstlicht gemessen und dann bei passenden Bedingungen von den urbanen Messwerten des Gesamtlichtes, also der horizontalen Beleuchtungsstärke an den Messstationen abgezogen.

Konkret wurde das herrschende Naturlichtniveau, genau die typische horizontale Bestrahlungsstärke, in klaren mondlosen Nächten an den Messstationen Legsteinhütte, im *Wildnisgebiet Dürrenstein-Lassingtal*, auf der Hohen Dirn südlich des Nationalparks Kalkalpen, und auf der Wildalm bei Pusterwald, in den Wölzer Tauern gemessen. Die Werte von der Hohen Dirn reichen an die Grenze für künstliche Aufhellung. Auf eine Trennung der Naturwerte der Hohen

¹²Vor allem Wolken müssten dann nicht berücksichtigt werden, die allerdings oft zu besonders hellen Bedingungen führen.

¹³In Wien beleuchten die Stadt Wien, der „Bund“, Gesellschaften des Bundes, wie die ASFINAG und Private Straßen und andere Verkehrsflächen. Wie bezeichnen hier mit der *Öffentliche Straßenbeleuchtung der Stadt Wien* jene die von Wien Leuchtet direkt betrieben werden. Das beinhaltet *nicht* die Beleuchtung der Gemeindebauten und ihrer Flächen die Wiener Wohnen verantwortet und auch *nicht* die Stadtgärten (zu unterscheiden von den Gärten des Bundes in der Stadt Wien). Das nicht ist als „nicht notwendigerweise“ zu lesen da vielfach Kooperationen bestehen.

Dirn von den Einstrahlungen aus der Region Linz-Wels-Steyr musste hier verzichtet werden. Jene der Wildalm bestätigen die Werte der wesentlich längeren Zeitserien aus dem Wildnisgebiet.

Hier legen wir daher die Naturlicht-Werte aus dem Wildnisgebiet, von Ende 2024¹⁴ zu Grunde und verwenden einen Wert von $8 \mu\text{Wm}^{-2}$: was eine *horizontalen Beleuchtungsstärke* von rund 0,8 mlx entspricht. Das liegt etwas über den niedrigsten Werten der Monatsmediane der letzten 12 Jahre, im Wildnisgebiet, aber im Rahmen der zu erwartenden natürlichen Schwankungen, zumal wir 2024 nahe am Maximum der Sonnenaktivität lagen (Stichwort Nordlicht in Wien). Für diese Studie ist der höhere Wert für das Naturlicht eine vorsichtige Annahme, da er, nach Abzug von den gemessenen „Stadt“-Werten, zu etwas niedrigeren Werten für das Kunstlicht führt, und damit letztendlich zu etwas höheren Werten für die Anteile des „Stadtlichts“.

Quellenzuordnung

Zur Helligkeit der Nacht in Wien und damit zur horizontalen Bestrahlungsstärke tragen alle Lichtquellen bei, deren Strahlung, direkt oder gestreut, in die von Wien aus sichtbare Atmosphäre und von dort weiter Richtung Stadtgebiet gelangen. Jene dieser Quellen die stärker in die Richtungen über dem Horizont strahlen, tragen mehr bei als schwächere, nähere mehr als fernere. Eine Zuordnung der Beiträge kann entweder direkt durch Vermessung der Lichtemission aller dieser Quellen in alle Richtungen nach oben erfolgen („Befliegung“) oder anhand von zeitlichen Modulationen der Quellen bzw. Quellengruppen, oder ihrer spektralen Eigenschaften (etwa Anteil der Natrium-Niederdruckquellen, usw).

Hier wurden die Messwerte der horizontalen Bestrahlungsstärke vor und nach den Stundengrenzen verglichen um die Quellen- und Quellenklassen zuzuordnen.

Das erfolgte für alle ganzen Stunden also, 1h, 2h, ..., 24h, jeweils nach gesetzlicher Zeit, also Mitteleuropäischer Zeit (MEZ), bzw. Mitteleuropäischer Sommerzeit (MESZ). Die gesetzlich festgelegten Zeit-Schaltregeln der jeweiligen Jahre wurden angewandt.

Diese Vorgehensweise ermöglicht die einfachere Interpretation der Ergebnisse und die Stundengrenzen werden deshalb durchgehend nach gesetzlicher Zeit angesprochen.

Die dadurch verursachten paradoxen Zeitfaltungen (fehlende und doppelte Stunden an den Grenzen von MEZ und MESZ) treten in weniger als 1% der Fälle ($< 2 / 365 / 12$) auf und könnten sich nur als seltene Ausreißer bemerkbar machen, je nach der genauen Implementierung der Regeln in den Schaltprotokollen der Quellen. Die für die Diskussion in dieser Arbeit veröffentlichten Ergebnisse für 5h, 22h, 23h, 24h gesetzlicher Zeit sind davon gar nicht betroffen.

Die Zuordnung der städtischen Straßenbeleuchtung erfolgt mittels der 22h und 23h Stundengrenzen. Zur Kontrolle wird die 5h Schaltung ebenfalls der „Wien Leuchtet“ zugeordnet.

Andere Quellen können Beispielsweise der 24h Schaltung zugeordnet werden wie sie auch für Repräsentations- und Werbebeleuchtung oft auftritt.

¹⁴Monatsmediane der horizontalen Bestrahlungsstärke für klare, mondlose astronomische Nachtbedingungen an der Station Legsteinhütte: 2024-10: $9,10 \mu\text{Wm}^{-2} \sim 0,948 \text{ mlx}$, 2024-11: $9,48 \mu\text{Wm}^{-2} \sim 0,987 \text{ mlx}$, 2024-12: $7,92 \mu\text{Wm}^{-2} \sim 0,824 \text{ mlx}$, 2025-01: $7,86 \mu\text{Wm}^{-2} \sim 0,818 \text{ mlx}$, gemessen mit Lightmeter Mark 4 Alpin, S/N: D045.

Quellenanteile an der horizontalen Bestrahlungsstärke

Für jede Station wurden die Quellenanteile anhand der Verläufe der horizontalen Bestrahlungsstärke, kurz E_{horiz} , vor und nach den Stundengrenzen zugeordnet.

Dabei wird die gemessene horizontale Bestrahlungsstärke, E_{horiz} mit hoher zeitlicher Auflösung, konkret mit Messraten von 0,1 bis 1 Hz, analysiert um die erwarteten Muster in den Verläufen gut erkennbar zu machen.

Erwartet wurden die schon oft gefunden sprungähnlichen Stufenformen in den zeitlichen Verläufen, also $E_{horiz}(t)$. Die aktuelle Analyse hat jedoch gezeigt, dass die genauen Formen recht komplex sind. Fünf unterschiedliche Analyseverfahren wurden implementiert und getestet. Das letztlich zur Quantifizierung verwendete wird in der Folge beschrieben.

Exemplarische Detail-Untersuchungen von rund hundert Schaltmustern mit Sekundenauflösung haben gezeigt, dass die Variationen an den Stundengrenzen nach rund vierzig Sekunden verschwinden, also dann kleiner sind als die erforderlichen Schwankungsgrenzen. Die Amplituden dieser „Nachläufe“ sind dann kleiner als das „Rauschen“ oder andere systematischen Schwankungen, und nicht mehr erkennbar.

Die komplexe Form kann viele Ursachen haben, etwa ein Abklingen des oder der Leuchtmittel, Abschalttrampen der Steuerung, eine zeitliche Verteilung der Schaltzeitpunkte innerhalb einer Klasse, und, nicht zuletzt „Mitschalter“, also nahezu simultan geschaltete Quellen anderer Klassen, mit ihren eigenen Schalt- und Abklingeigenschaften.

Diese neuen gefundenen Eigenschaften der Schaltmuster sind natürlich eine Gelegenheit die Quellen genauer zu identifizieren, erfordern aber auch eine genaue Charakterisierung für jede Quellenklasse.

Um von diesen Details unabhängige Aussagen treffen zu können, werden die Anteile vor und nach einer nicht betrachteten „Übergangsphase“, die symmetrisch um die Stundengrenze gelegt wird, verglichen. So werden die Quellenanteile ausschließlich anhand stabiler, lange anhaltender, gut definierter Niveaus festgelegt, um möglichst von Schaltdetails, also der genauen Stufenform unabhängig zu sein.

Quantifizierung der „Stufen“

Dazu werden an allen Stundengrenzen, S_i zunächst die „Wolkenindikatoren“ oder „Stabilitätsindikatoren“ berechnet. Das erfolgt über die Bestimmung der relativen Standardabweichung des Verlaufs der horizontalen Beleuchtungsstärke in einem Intervall von rund zehn Minuten vor der Stundengrenze. Allen Stundengrenzen mit einer derart ermittelten, relativen Standardabweichung, σ_{vor} , die kleiner ist als eine obere Schranke, werden als wolkenlos, klar und ohne wesentliche sporadische Ereignisse¹⁵ zur Stufenanalyse zugelassen. Der Wert der horizontalen Bestrahlungsstärke ist dann ausreichend definiert um den Vergleich an der, auf des Intervall folgenden Stundengrenze durchzuführen.

¹⁵Etwa „Blitze“ oder kurzzeitige Störsignale, typischerweise aus der Nachbarschaft, auch zu Terminen mit „Skybeamern“ oder ähnlichen „Shows“ wie sie bei sportlichen oder kulturellen Ereignissen auftreten. So bestrahlen beispielsweise die Probeleuchtungen des „Sommernachtskonzertes“ im Schlosspark Schönbrunn regelmäßig den Luft und Lichtraum über der Kuffner-Sternwarte.

Die Bestimmung von σ_{vor} erfolgt für ein Zeitintervall, I_{vor} : $S_i - \tau_{\text{Stufe}} - \delta\tau/2 < t < S_i - \delta\tau/2$ der Zeit t , und der „Stufenbreite“, τ_{Stufe} für die Stundengrenze, S_i . Das Intervall $S_i - \delta\tau/2 \leq t \leq S_i + \delta\tau/2$, das symmetrisch um die jeweilige Stundengrenze, S_i liegt, wird von der Analyse ausgenommen – es soll die Details des Schaltprozesses, in einem Zeitintervall mit Dauer $\delta\tau$ 16 meiden. Damit sind $\delta\tau/2$ Sekunden vor *und* nach der Stundengrenze ausgenommen. Die Messwerte in diese Intervall sollen die „Rampe“, bzw. Stufensteigung und die Variationen der Stufenform vollständig enthalten. Sie würden sonst die Streuung in den „vorher“ und „nachher“ Werten erhöhen, und so die Genauigkeit der Stufenbestimmung mindern.

Der „vorher“-Wert, $E_{\text{horiz}}^{\text{vor}}$ wird durch den Median der Messungen der horizontalen Beleuchtungsstärke für das gleiche Zeitintervall, I_{vor} bestimmt, wie σ_{vor} .

Für den „nachher“-Wert, $E_{\text{horiz}}^{\text{nach}}$ gilt entsprechendes, für ein symmetrisch zu I_{vor} um die Stundengrenze gelegtes Intervall, I_{nach} . Der entsprechende Wert der horizontalen Beleuchtungsstärke ergibt sich zu $E_{\text{horiz}}^{\text{nach}} = \text{Median}_{S_i + \delta\tau < t < S_i + \tau_{\text{Stufe}} + \delta\tau} E_{\text{horiz}}(t)$ mit S aus S_i , wobei $i = 1h, 2h, \dots, 24h$, die Stundengrenzen angeben.

Die Bestimmung von $E_{\text{horiz}}^{\text{vor}}$ und $E_{\text{horiz}}^{\text{nach}}$ erfolgt für jedes Datum und alle Stundengrenzen S_i der Messserie jeder Station.

Zur weiteren Quantifizierung wird das Verhältnis, V_S der „nachher“ zu den „vorher“ Bestrahlungsstärken gebildet, also $V_S = E_{\text{horiz}}^{\text{nach}} / E_{\text{horiz}}^{\text{vor}}$.

Für die abnehmenden „Abendstufen“, wie sie bis inklusive Mitternacht zu erwarten sind wird dieses Verhältnis kleiner als Eins sein, für die morgendlichen „Einschaltstufen“ größer als Eins. Falls keine Schaltung erfolgt oder diese nicht nachweisbar ist, wird das Verhältnis bei Eins liegen.

Nun werden zur Darstellung des Langzeitverlaufes – wir untersuchen die Dekade von 2015 bis 2024 – charakteristische Werte der Stufenhöhen für jede Stunde über Monate und Jahre betrachtet. Die monatlichen Ergebnisse enthalten jahreszeitliche Informationen und eine genauere Darstellung des Tausches der Straßenbeleuchtung. Ihre Diskussion sprengt aber den Rahmen dieser Untersuchungen.

Wir beschränken uns deshalb auf die *Jahresmediane* der wie oben definierten Stufenverhältnisse, V_{S_i} mit den Stundengrenzen, S_i von 5h, 20h, 22h und 24h gesetzlicher Zeit.

Dabei charakterisiert beispielsweise der Jahresmedian der 24h Stundengrenze für 2015 die Schaltstufe Wiens vor 17 der Umrüstung, der Jahresmedian jener von 23h, gesetzlicher Zeit desselben Jahres die Hauptschaltstufe der öffentlichen Wiener Straßenbeleuchtung die um 2009/2010/18 von 24h dorthin verlegt wurde.

¹⁶Diese zeitliche Lücke der Dauer $\delta\tau$, der oft von Schalteffekten betroffenen Messwerte direkt an den Stundengrenzen, also zwischen den mit hoher Genauigkeit konstanten „vorher“ und „nachher“ Niveaus, ist zu unterscheiden vom Zeitintervall, δt zwischen den betrachteten Einzelmessungen der Zeitserien, also z.B. $\delta t = 10s$ bei 0,1 Hz Messrate.

¹⁷2015 wurden, nach Informationen der MA 33, 653 neue Leuchten installiert, das sind rund 0,5% des Tauschzieles

¹⁸Geschätzt nach dem Termin für das Europäische Symposium für den Schutz des Nachthimmels, vom 22. bis 24. August 2008, auf der Kuffner-Sternwarte, dass den Beginn der Kooperation des Vereins Kuffner-Sternwarte mit Stadt Wien MA 33, MA22, MA 39 Wiener Umweltnatwaltschaft *Birdlife Austria* ganz gut datiert.

Stufenentwicklung

Die Umrüstung der Straßenbeleuchtung der Stadt Wien ging 2017 in ihre Haupt-Implementierungsphase, nach Ankündigung von *LED it SCHEIN*¹⁹, und der offiziellen Vorstellung der neuen Wiener Standardleuchte, am 19. September 2017. Derzeit sind sind 108.000 der rund 133.000 Leuchten auf LED²⁰ umgerüstet²¹.

Bereits davor, als Teil der Planungsphase, fand im April 2016 die erste vollständige Erfassung der Aussenlichtquellen Wiens mittels einer Helikopter-Befliegung statt²².

Um den gesamten Zeitraum, inklusive des Zustandes vor der Befliegung von 2016 bis heuer (2025) zu überdecken werden alle Lichtmonitoring-Daten der drei oben beschriebenen Stationen von 2015 bis 2024 analysiert, sowie jene die für 2025, nach Stand der Abholungen von den jeweiligen Stationen vorliegen.

Bis 2024 sind die Analysen vollständig. Für 2025 werden eventuell vorhandene Daten zur Generierung eines Ausblicks hinzugefügt. Die Werte für 2025 sind also nicht vollständig, die Ergebnisse beziehen sich auf die ersten Monate.

Als *Lichtstufen*, oder kurz Stufen bezeichnen wir auch hier die typischerweise zu Stundenbeginn auftretenden Muster in der zeitlichen Entwicklung der horizontalen Bestrahlungsstärke, an einem Ort. Diese Muster zeichnen sich durch zwei, nahezu konstante Stücke, im allgemeinen mit unterschiedlichen Werten der Konstanten aus, die zu einem bestimmten Zeitpunkt am Stundenanfang, S_i aneinandergrenzen.

Aus technischen Gründen (siehe Methoden) fordern wir ein kurzes Zeitintervall zwischen den beiden konstanten Stücken, von typischerweise einer Minute Dauer (30s Halbwertbreite), zur Vermeidung von Effekten der Schaltdetails. Zur Quantifizierung verwenden wir das beschriebene Verhältnis des Nachher-Wertes zum Vorher-Wert $V_S = E_{horiz}^{nach} / E_{horiz}^{vor}$ der horizontalen Beleuchtungsstärke, E (vergl. vorhergehender Abschnitt). Ist dieses Verhältnis kleiner als Eins, weist die Stufe nach unten, der neue konstante Wert ist kleiner als der alte, die Schaltung reduziert die horizontale Beleuchtungsstärke.

Der Übersichtlichkeit halber und zum direkten Vergleich der Wiener städtischen Straßenbeleuchtung an der Nachthelligkeit, werden in der Folge die Vorher-Nachher-Verhältnisse der Stufen, für die gesetzlichen Zeiten 5h, 22h, 23h, 24h, also MEZ oder MESZ dargestellt.

Die 22h Stufe charakterisiert dabei die erste Reduktionsphase für die neuen LED-Leuchten.

Die 23h Stufe vertritt die „alte Halbschaltung“ einer der zwei Leuchtstoffröhren in den beschalteten Leuchten des „alten“ Typs. Vor 1. Februar 2007 fand diese Teilnachtschaltung um 24h statt²³. Enden tut sie bis heute um 5h früh.

Die 24h Stufe betrifft die zweite Reduktionsphase der neuen Leuchten, allerdings auch eine Reihe weiterer Quellen.

¹⁹Wien leuchtet 2030 in LED (G. Wötzl, Wien Leuchtet), S. 11ff.

²⁰Light Emitting Diode (Leuchtdioden)

²¹Rathauskorrespondenz vom 31.10.2025

²²*Licht über Wien IV: Wiener Licht aus allen Richtungen*, Ersterfassung der richtungsabhängigen Leuchtdichte mit Ausschöpfung von mehr als zwei Dritteln des effizienz- und umweltrelevanten Streuvolumens bei hohen Nadirwinkeln, Dr. Günter Wuchterl, Naturhistorisches Museum Wien und Verein Kuffner-Sternwarte, 2016

²³Wien wird eine Stunde früher dunkler (orf.at, 06.04.2007)

Um 5h früh werden die alten und die neuen städtischen Straßenleuchten wieder eingeschalten bzw. hinauf geregelt, falls die tatsächlichen Lichtbedingungen die Anforderungen dafür erfüllen. Letzteres tritt im Hochsommer in der Regel nicht ein: es ist dann schon hell genug, mit dem Licht der Sonne alleine. Ein Grund dafür ist, dass die Sommerzeit die Naturlicht-Entwicklung, wie sie für 6h Normalzeit auftritt, relativ zum Schaltmuster auf 5h gesetzlicher Zeit verlagert, und das bis weit in den Herbst, bis zum Ende der Sommerzeit, Ende Oktober

Die Entwicklung der Lichtstufen wird nun anhand der Vorher-Nachher Verhältnisse der horizontalen Bestrahlungsstärke an den Stundengrenzen, kurz den „Stundenverhältnissen“ diskutiert. Das erfolgt vom Standzentrum ausgehend, über die Kuffner-Sternwarte am Stadtrand (rund 6,5 km vom Zentrum) bis zu den Messungen in Großmugl in der Umgebung Wiens, rund 33 km vom Zentrum in Richtung der raschesten (oder einer der raschesten) radialen Abnahme der nächtlichen horizontalen Bestrahlungsstärke.

Die Reihenfolge der Stationen reflektiert neben der Abnahme der typischen Nachtlicht-Niveaus auch eine Reihenfolge zunehmenden Naturlicht Anteils. Wie bereits in den letzte Studien beschrieben spielt das Naturlicht im Zentrum Wiens bei Nacht praktisch keine Rolle mehr. An der Kuffner-Sternwarte dominiert das nächtliche Naturlicht sobald genügend Mondschein auftritt (das ist für Beleuchtungsstärken der Fall, die etwas weniger als jener eines Halbmondes im Zenit entsprechen). Der natürliche Lichtanteil in klaren mondlosen Nächten liegt höchstens bei 10%. Einzig in Großmugl sind Kunstlicht und Naturlicht in mondlosen Nächten vergleichbar, dort sind auch die Naturlicht-Korrekturen wesentlich.

Entwicklung der Lichtverhältnisse - Wien Zentrum

Die Lightmeter-Messstation *Wien Zentrum*²⁴ (*vormals Wien Mitte*) befindet sich am Dach eines Bundesgebäudes am Stubenring, schräg gegenüber (NW-lich) der Universität für angewandte Kunst.

Die Lichtverhältnisse unter klaren mondlosen Bedingungen charakterisieren Jahresmediane²⁵ der horizontalen Bestrahlungsstärke („nächtliche Globalstrahlung“) um $0,25 \text{ mWm}^{-2}$ ($\sim 0,03 \text{ lx}$), wobei dieser Wert als eine Art „Sättigungswert“ der zeitlichen Entwicklung über die letzten beiden Jahrzehnte betrachtet werden kann, vielleicht sogar als Marke für den „Peak Light“²⁶, den historischen Lichthöchststand für Wien.

²⁴Eine genauere Beschreibung der Stationen findet sich in Licht über Wien VII (ob.cit.) und auf Lightmeter.at

²⁵Licht über Wien VI, Lichtgehalt der Nacht über Wien von 2011 bis 2018 und Relationen zu Luftgüteindikatoren G. Wuchterl, M. Reithofer (Verein Kuffner Sternwarte), Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22 Wien, Dezember 2018

²⁶„Zuwachs der Globalstrahlung ist abgeflacht und könnte gestoppt sein“, Licht über Wien VII: Lichtgehalt der Nacht über Wien von 2009 bis 2019 Energiegehalt des Kunstlichthalos über Wien, Relationen von nächtlichem Lichtgehalt und Luftgütedaten Normierung von Lichtmessungen mit Luftgütedaten Dr. Günther Wuchterl, Markus Reithofer (Verein Kuffner-Sternwarte) Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22 Wien, April 2020

Die Entwicklung der Jahresmediane der Licht-Verhältnisse an Stundengrenzen für *Wien Zentrum* ist in Abbildung 2 erstmals dargestellt. Die Abszisse reicht von 0,85 bis über 1,1. Ein Verhältnis von 0,85 entspricht einer Reduktion der Strahlung über die Stufe um 15% des Vorher Wertes, eines von 1,1 einer Zunahme um 10%

Da die Licht-Bedingungen an der Station Wien Zentrum auch bei klaren, mondlosen Bedingungen von Kunstlicht dominiert sind finden sich entsprechend schaltbedingte Variationen über die ganze

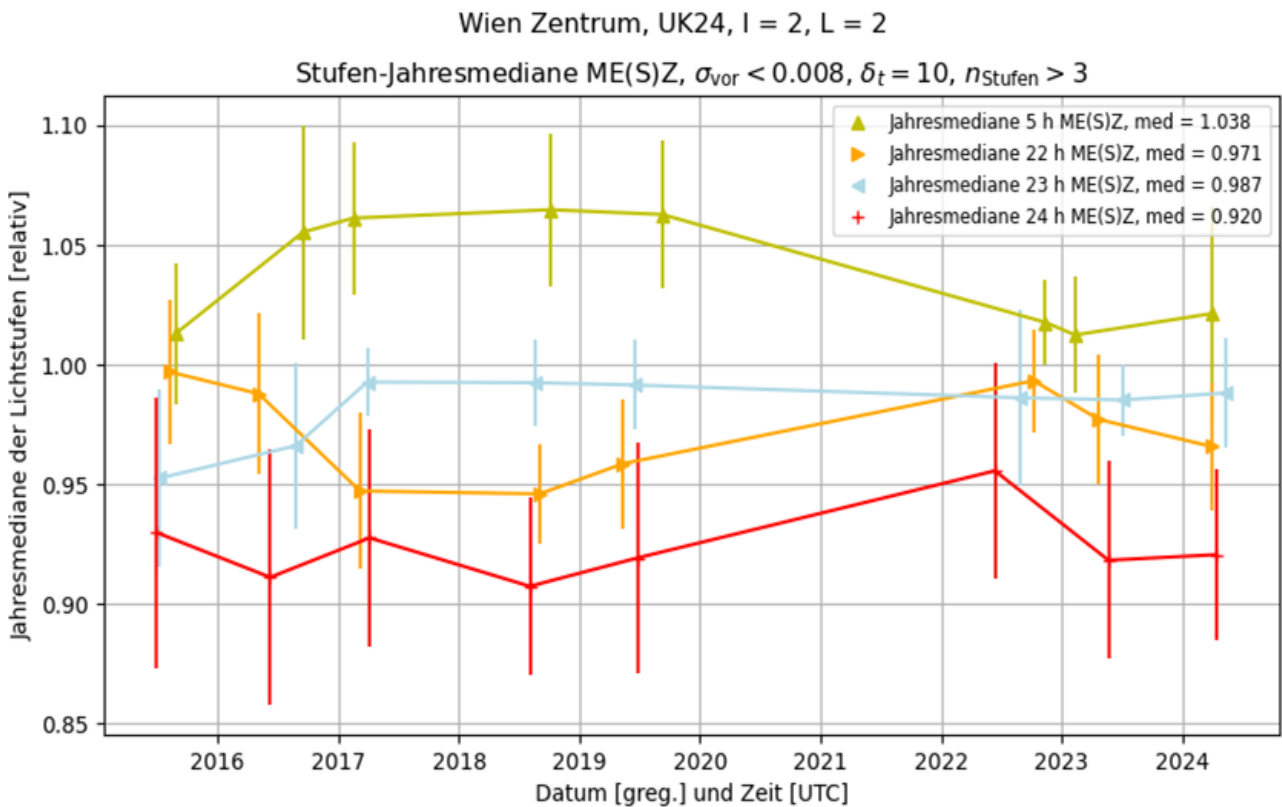


Abbildung 2: Wien Zentrum: Entwicklung der Lichtverhältnisse an ausgewählten Stundengrenzen. Die Jahresmediane aller nach-zu-vor-Verhältnisse der horizontalen Beleuchtungsstärken (Symbole) sind gemeinsam mit den Standardabweichungen der Variationen innerhalb des Jahres (vertikale Balken) dargestellt. Gezeigt werden Ergebnisse für stabile, klare Bedingungen, $\sigma_{\text{vor}} < 1\%$. Die Verhältnisse sind als Funktion der Zeit (markiert sind Jahre) dargestellt. Die Ergebnisse für die Stundengrenze um 24h sind in Rot mit „+“-Symbolen dargestellt, jene für 23h in Hellblau mit Dreiecken, Spitze links, 22h in Orange mit Dreiecken, Spitze rechts und jene für 5h gesetzlicher Zeit (MEZ/MESZ) in Hellgrün, mit Dreiecken mit Spitze nach oben. Die Jahresmediane sind an den jeweiligen Zeitmedianen der, die Kriterien (klar, mondlos, astronomische Nacht) erfüllenden Messungen eingetragen. Die Medianwerte über alle Jahre sind in der Legende vermerkt. Kadenz 0,1 Hz, $\delta t = 10s$. Der den 23h Messungen entsprechende Wert, $V_{S,23h}$ aus den Augusttagen 2012 läge bei 0.95 (-5,1%), vergl. Tabelle 1.

Nacht, also auch abseits der Stundengrenzen. Die hier gestellte Forderungen nach nahezu konstanten Lichtbedingungen vor der Stundengrenze, mit $\sigma_{\text{vor}} < 0,01$ bedeutet hier ganz wesentlich auch dass die Lichtschaltlage stabil war und nicht nur die Wettersituation, genauer die atmosphärische Modulation des Lichts, etwa durch Bewölkung. Die Forderung begrenzt also auch die Schaltereignisse vor den Stundengrenzen so dass für alle analysierten Fälle die Standardabweichung des Lichtniveaus unter 1% des Werte der horizontalen Bestrahlungsstärke bleibt. Beiträge, etwa von modulierten Effektbeleuchtungen, bespielten Bildwänden oder

Hausfassaden werden damit begrenzt, die Stufen gut definiert und die Verhältnisse, V_S genau bestimmt.

Betrachten wir zunächst die Entwicklung an der Stundengrenze um 5h früh (hellgrüne Linien und Symbole). Der Jahresmedian des entsprechenden Verhältnisses, kurz $med_a V_{S,5h}(2015)$, liegt nahe bei $\sim 1,02$ (hellgrünes Dreieck, am linken Rand). Die Medianwerte aller V_S , werden jeweils am zeitlichen Median, der Zeitpunkte der beitragenden Messwerte (der Verhältnisse der einzelnen Nächte) eingetragen. Im Jahr 2015 liegt dieser Zeitmedian der beitragenden Nächte bei $\sim 2015,4$.

Von 2015 an ist ein Anstieg auf über 1,05 bis 2016 und 2017 zu erkennen, der sich bis 2019 abflacht wo dann das Maximum bei einem Jahresmedian der Stufenverhältnisse von rund 1,06 erreicht wird. Danach gehen die Verhältnisse bis 2022 zurück und liegen dann nahe bei Eins. 2022 überlappen die Schwankungen (die vertikalen Balken geben die Standardabweichung der Stufenhöhen aller Einzelnächte an) mit Eins. Richtung 2023 und 2024 steigen die Verhältnisse um 22h, 24h und 5h wieder leicht an, jenes von 23h bleibt sehr nahe an Null. Das heißt nicht unbedingt, dass eine Schaltung um 23h im Zentrum nicht mehr stattfindet, sie ist aber für Lichtniveaus nicht mehr relevant. Der geschaltete Anteil der öffentlichen Straßenbeleuchtung Wiens, um 22h liegt 2024 mit einem Nach-zu-Vor Verhältnis von $\sim 0,96$ bei 4% Reduktion, der um 5h früh mit einem Verhältnis von 1,03 bei einer Zunahme von $\sim 3\%$.

Im Jahre 2015, also zu Beginn des in Abbildung 2 dargestellten Zeitraumes, liegt das nächstniedrigere Licht-Verhältnis an einer der Schaltstufen, bei 22h gesetzlicher Zeit. Der Jahresmedian liegt mit $\sim 0,99$ nahe bei Eins und ist innerhalb der Schwankungen von Nacht zu Nacht (oranger Balken) nicht von Eins zu unterscheiden. Das bleibt auch 2016 trotz kleinerem Wert so. Erst 2017 ist ein von Eins verschiedenes Verhältnis deutlich abgesetzt von den Schwankungen von Nacht zu Nacht. Es liegt etwas unter 0,95, das entspricht einer Verminderung von $\sim 5\%$ für die Stundengrenze von 22h gesetzlicher Zeit. Im zeitlichen Verlauf (orange Line in Abbildung 2) ist damit erstmals eine Lichtstufe zu dieser Zeit deutlich. Bis 2022 steigt das Verhältnis auf nahe Eins. Die 22h Stufe ist dann wieder verschwunden. Schließlich folgt eine Verminderung des Verhältnisse in den Jahren 2023 und 2024 auf 0,97, also -3% .

Die Kurve mit dem nächstniedrigen Startwert für das Lichtverhältnis, in Abbildung 2 ist die hellblaue, für die 23h Stundengrenze. Sie startet bei 0,95 (hellblaues Dreieck mit Spitze links, am linken Rand der Abbildung 2), also bei einer Reduktion über die 23h-Stundengrenze von 5%. Dieser 23h Wert liegt damit sehr nahe jener Werte aus den drei Augustnächten von 2012, mit $-5,1 \pm 0,8\%$, vergl. Tabelle 1. Die gute Übereinstimmung ist ein deutlicher Hinweis darauf dass der Wert über diesen Zeitraum stabil blieb und von der neuen Analyse, für wesentlich mehr Nächte, und den Median für das gesamte Jahr, reproduziert wird. Das ist die „klassische“ „Halbschaltungsstufe“ der öffentlichen Wiener Straßenbeleuchtung, die seit 2007 (ob. zit.) dort liegt. Davor lag sie bei 24h.

Die Entwicklung des 23h-Verhältnisses ist von einem Anstieg auf nahe Eins, innerhalb von drei Jahren gekennzeichnet (in zwei Jahresschritten). Ab 2017 liegt der Jahresmedian des Verhältnisses (hellblaue Dreiecke mit Spitze links) nahe Eins. Die Schwankungen während des Jahres (eine Standardabweichung der Einzelnachtverhältnisse wird mittels der hellblauen vertikalen Linien in Abbildung 2 dargestellt) zeigen, dass das Verhältnis ab diesem Zeitpunkt, und bis zum Ende des betrachteten Zeitraumes, in der Regel nicht mehr sicher von Eins unterscheidbar ist. Jahreszeitlich oder bei besonderen (etwa außerordentlich klaren) atmosphärischen Bedingungen mag dies noch

möglich sein. Über das Jahr betrachtet ist die 23h-Stufe jedenfalls ab 2017 de facto verschwunden. Das bleibt auch so, und zwar bis zum Ende des betrachteten Zeitraums, also Ende 2024.

Bemerkenswert ist auch der „komplementäre“ Verlauf der 22h- und 23h-Verhältnisse von 2015 bis 2017. Das 23h Verhältnis geht steil gegen Null, das 22h Verhältnis sinkt gegenläufig ebenso steil gegen den ursprünglichen 23h Wert. Das ist mit einer Verlagerung der Schaltung der öffentlichen städtischen Straßenbeleuchtung von 22h auf der 23h verträglich und entspricht auch dem Schaltschema der *Wien Leuchtet*²⁷.

In dem Zusammenhang lohnt sich auch der Hinweis auf die größeren Schwankungen (vertikale Balken), die 2016 gefunden werden. Das ist auch aufgrund der Umstellung von 23h auf 22h während des Jahres zu erwarten. Die, zu verschiedenen Zeitpunkten (Monaten) unterschiedlichen Schaltmuster, kommen als zusätzlicher Schwankungsbeitrag zu den Jahresschwankungen beider Stundengrenzen hinzu.

Das kleinste Verhältnis und damit die stärkste Reduktion zeigt im Jahre 2015 das 24h-Verhältnis (rotes „+“, am linken Rand der Abbildung 2). Es liegt zu Beginn bei $\sim 0,93$, was einer Lichtreduktion an der 24h-Stundengrenze von 7% entspricht. Auch die Schwankungen sind, im Vergleich zu den anderen Stunden am größten, was aus Gründen der Diversität von Schaltstrategien, Schaltpraxis und Lichttyp zu erwarten ist. Die Entwicklung der Jahresmediane zeigt bis 2019 lediglich einen schwachen Aufwärtstrend (rote „+“ und Linien) mit den größten aller hier beschriebenen Schwankungen (vertikal rote Striche). Über das Jahr 2022 liegt der Jahresmedian dann bei 0,96, 2023 und 2024 bei 0,92. Die Schaltungen werden also im Vergleich zu 2022 wieder stärker.

Das Fehlen der Einträge in den Jahren 2020 und 2021, in Abbildung 2 weist auf Lücken in der Messserie hin die aus der Wartungslage und deren nochmaliger Verschärfung während der Pandemie (Zugänglichkeit eines Bundesministeriums) resultierten.

Insgesamt scheint die Gesamtschaltung (also die 22h und die 0h Schaltung) der öffentlichen Beleuchtung möglicherweise von gleichem Betrag zu sein wie die 23h Schaltung im Jahre 2015. Da die 24h Schaltungen wahrscheinlich nicht von der „Wien Leuchtet“-Straßenbeleuchtung dominiert ist, kann als bester Vergleich zur ursprünglichen „Stadtschaltung“, am Beginn des Zeitraums, die Gesamtschaltung um 5h dienen. Das Verhältnis liegt 2024 bei 1,02 also 2%. Der Ausgangswert, die 23h Schaltung lag 2025 bei 0,95, also -5%.

Damit zeigt die „Einschaltung“, 2024 im Vergleich zur „Ausschaltung“, 2015 eine Reduktion um einen Faktor zwei. Also entsprechend weniger Beitrag zur Erhellung des Himmels – immer unter der Annahme, dass um 5h wieder auf volle Leistung geschaltet wird.

²⁷MMag. Gerald Wötzl, *Wien Leuchtet*, pers. Mitteilung auf Anfrage im Rahmen der Studie nach der Auswertung.

Entwicklung der Lichtverhältnisse - Kuffner-Sternwarte

Die Lightmeter-Station auf der Kuffner-Sternwarte²⁸ befindet sich auf rund 300m Seehöhe, rund 6 km westlich des Wiener Stadtzentrums, und 1km östlich des Wienerwaldrandes. Der Lichtsensor ist nördlich der Hauptkuppel über dem Dach des Vertikalkreisraumes am Wettermast montiert. Die Jahresmediane der Nach-zu-Vor-Verhältnisse der horizontalen Bestrahlungsstärke, $med_a V_{S,h_i}(J_i)$ sind in Abbildung 3 für die Jahre J_i von 2015 bis 2024 dargestellt. Bis 2023 aufgetauchte

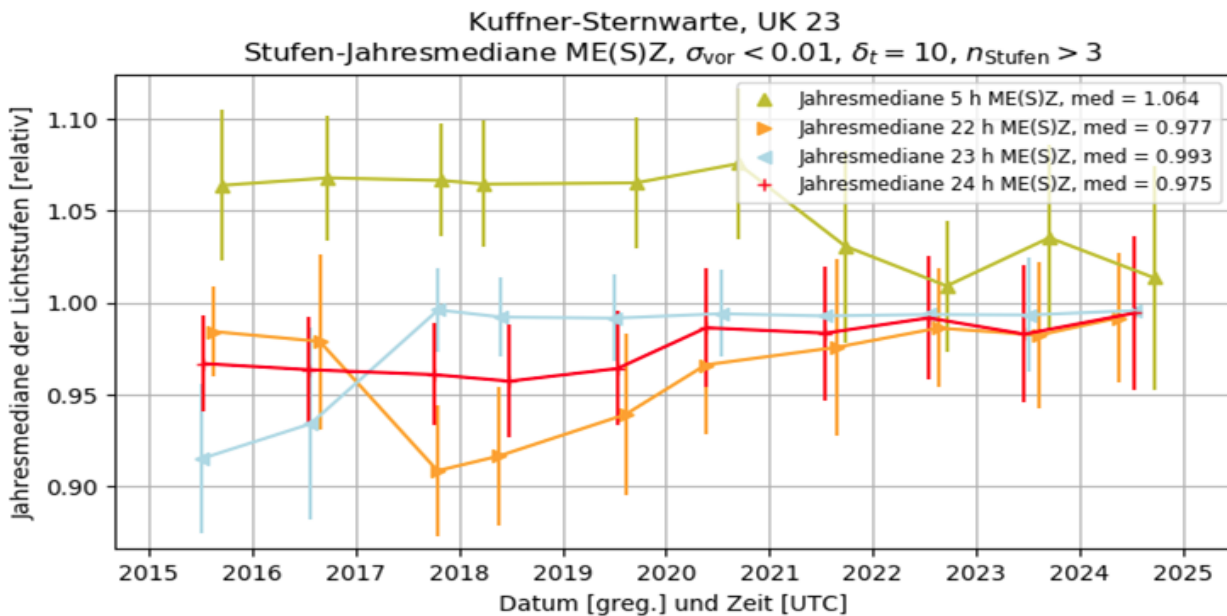


Abbildung 3: Kuffner-Sternwarte, Entwicklung der Lichtverhältnisse an Stundengrenzen, 2015-2024. Die Jahresmediane, der an der Lightmeter Station gemessenen horizontalen Bestrahlungsstärken sind als Funktion der Zeitmediane ausgewählter Stundengrenzen, mit klaren mondlosen, stabilen Lichtbedingungen ($\sigma_{vor} < 1\%$) der astronomischen Nacht aufgetragen. Gezeigt sind die Mediane (Symbole) und Standardabweichungen (Balken) der Einzelnachtverhältnisse des jeweiligen Jahres. Gelbgrün, Orange, Hellblau und Rot für 5h, 22h, 23h und 24h gesetzlicher Zeit (MEZ bzw. MESZ).

Uhrengangfehler - sie stammen aus größeren, aufgrund von Internet-Verbindungs-lücken auf der Sternwarte, eine bis einige Wochen lange, während und nach der Pandemie aufgetauchten Zeitsynchronisationsintervallen, und sind korrigiert („UK 23“).

Der auffälligste Trend in den Lichtentwicklungen auf der Kuffner-Sternwarte betrifft die Schaltungen, um 5h gesetzlicher Zeit (gelbgrüne nach oben weisende Dreiecke, und Linien in Abbildung 3). Deutlich ist die systematische Abnahme der Jahresmediane von $med_a V_{S,h_i}(J_i)$ auf $\sim 1,02$ erkennbar. Die Jahresmediane der horizontalen Beleuchtungsstärke fallen von 1,09, also 9% Zunahme um 5h gesetzlicher Zeit im Jahre 2015, auf $\sim 1,02$, (+2%), für 2024.

Die kleinsten Verhältnisse - also die stärksten Lichtreduktionen an einer der gezeigten Stundengrenzen - finden sich für das Jahr 2015, an der „klassischen“ 23h Stundengrenze (hellblaue Linie und Symbole in Abbildung 3) mit 0,9 also rund 10% Reduktion. Wie im Stadtzentrum wächst das Verhältnis bis 2017 auf nahezu Eins ($\sim 0,98$) und bleibt bis zum Ende des analysierten Zeitraums, 2024 dort. Innerhalb der Schwankungen von Nacht zu Nacht ist letzteres

²⁸Eine genauere Beschreibung der Stationen findet sich in Licht über Wien VII (ob.cit.) und auf Lightmeter.at

kaum von Eins unterscheidbar. Die 23h-Stufe ist also, wie im Zentrum, ab 2017 de facto verschwunden.

Sowohl die Schaltskala (die relative Reduktion) als auch die Schwankungen sind vergleichsweise etwa doppelt so groß. Am Ort der Kuffner-Sternwarte, nahe des Randes des verbauten Gebietes ist der Anteil der öffentlichen Beleuchtung deutlich größer. Aus früheren Studien sind die Verhältnisse der *Lichtniveaus* zwischen Zentrum und Sternwarte bekannt: sie liegen bei rund Zwei²⁹. Das heißt die Stufen sind auf der Kuffner-Sternwarte, relativ betrachtet, doppelt so hoch wie im Zentrum da die „Hintergrund“-Lichtniveaus an letzterem Ort höher sind. Da es über der Station *Wien Zentrum* grob doppelt so hell ist, sind die *absoluten* Stufenhöhen demnach auf der Sternwarte und im Zentrum sehr ähnlich, die Bestrahlungsstärke-*Differenzen* ähneln sich.

Die betragsmäßig kleinsten relativen Lichtstufen, also die Verhältnisse am nächsten zu Eins, zeigen, zu Beginn des untersuchten Zeitraums, 2015 die 22h und 24h Stundengrenzen (in Orange bzw. Rot in Abbildung 3), mit $\sim 0,96$, also jeweils 4% Reduktion. Wie im Zentrum verkleinern sind die Jahresmediane des Verhältnis, $med_a V_{S,22h}(J_i)$, der 22h Schaltung (Orange), ab 2016. Der Wert, genauer das Verhältnis nähert sich an jenes an, das 2015 für 23h zu finden war. Auch hier lässt sich also der Wechsel des Schaltmusters – 23h auf 22h – im zeitlichen Verlauf gut verfolgen. Die 5h Schaltung zeigt den Verlauf wie er für nahezu konstante Schaltung zu erwarten ist.

Bemerkenswert ist das Verhältnis an der 24h Stundengrenze (rote Linie und „+“-Symbole in Abbildung 3). Es liegt 2015 bei 0,96 und steigt systematisch und nahezu monoton auf 0,99 an. Die 24h Schaltung reduziert im Jahre 2015 die horizontale Bestrahlungsstärke um rund 5%, neun Jahre später, 2024 nur mehr um rund 1%, das ist wesentlich geringer als im Zentrum, trotz niedrigerem Lichtniveau. Die 0h Schaltung nähert sich an der Kuffner-Sternwarte in der Amplitude an die öffentliche 22h Schaltung an. Das ist besonders deutlich an dem sehr ähnlichen Verlauf der roten und orangen Kurven, ab 2017, also dem Beginn der aktuellen Schaltmuster und ist bis 2024 erkennbar, ebenfalls in Abbildung 3. Die hellblaue Linie liefert ab 2017 die „Nulllinie“, da um 23h keine „öffentlichen“ Schaltungen mehr bekannt sind. Insgesamt ein deutlicher Hinweis, dass das Licht über der Kuffner-Sternwarte, jedenfalls das geschaltete, größtenteils aus der öffentlichen Straßenbeleuchtung stammt und, vor allem dass dieser Anteil, seit 2016 im wesentlichen linear schwindet.

Vergleich der Entwicklung mit jener im Stadtzentrum

Grob folgt die Entwicklung der Lichtverhältnisse, hier konkretisiert durch die Verhältnisse der horizontalen Bestrahlungsstärke nach zu vor den Stundengrenzen, auch auf der Kuffner-Sternwarte jener im Zentrum Wiens.

Der Anfangswert (2015) des Anteils der „klassischen Hauptschaltung“ um 23h verdoppelt sich von 5% ($V_{zentrum,23h}(2015) \sim 0,95$) auf 10% ($V_{kuffner,23h}(2015) \sim 0,9$) auf der Sternwarte. Diese Verdoppelung des Anteils der geschalteten öffentlichen Beleuchtung im Vergleich zum Zentrum bleibt auch insgesamt eine nützliche Vergleichsskala. Auf der Sternwarte gibt es relativ mehr öffentliches Licht, (Ge)Werbe- und Repräsentationsbeleuchtung sind in der Nähe des Sternwartegebäudes wesentlich seltener als im Zentrum der Stadt, der öffentliche Anteil ist daher größer zu erwarten, wie das auch die Messungen zeigen.

²⁹Für klare mondlose Bedingungen während der astronomischen Nacht, Vergleiche etwa Licht über Wien VI

Die „Kreuzung“ der 22h und 23h Entwicklungen von 2016 auf 2017 wird in den Messungen der beiden Stationen sehr gut reproduziert. Die Übereinstimmung folgt auch gut dem oben beschriebenen Skalenunterschied.

Bemerkenswert sind die, an beiden Stationen im Jahre 2022 vergleichsweise nahe Eins liegenden Verhältnisse. Bei *Wien Zentrum* gilt das auch für den nahe am Jahresbeginn liegenden Median von 2023.

Eine Grafik mit dem Vergleich der Entwicklungen aller drei Stationen, übereinander findet sich in Abbildung 5, auf Seite 19.

Großmugl

Großmugl liegt rund 33 km, vom Stadtzentrum Wiens entfernt, Richtung NNW. Der Ort wurde als sogenannte *Sternlichtoase*³⁰ ausgewählt und zeichnet sich durch besonders gute Abschirmung des direkten Lichts von Wien aus. Die Station liefert daher die Lichtsituation des Wiener Lichthalos, weit weg von den Einzelquellen Wiens, und repräsentiert die Stadt insgesamt, unabhängig von den lokalen Einflüssen innerhalb des Stadtgebietes, mit denen bei den Stationen Wien Zentrum und Kuffner-Sternwarte zu rechnen ist. Die Entfernung von 33 km entspricht etwa der halben radialen Ausdehnung des Wiener Lichthalos. Die typische horizontale Bestrahlungsstärke für die klare, mondlose, astronomische Nacht liegt etwa einen Faktor Zwei über den Naturlichtbedingungen, und rund einen Faktor 20 unter den Werten für das Stadtzentrum Wiens.

Für die Bestimmung der Entwicklung der Lichtverhältnisse, anhand der „Stufen“ für Großmugl (Abbildung 4) werden die Messungen von zwei Lightmeter-Stationen kombiniert, die der Stationen *Großmugl*³¹ und *Geitzendorf*. Das ermöglicht eine praktisch lückenlose Überdeckung des gesamten hier betrachteten Zeitraums von 2015 bis 2024. Die Station in Geitzendorf befindet sich rund 2 km W-lich von jener in Großmugl und wurde zur Untersuchung kleinräumiger (~1 km) Unterschiede von Ort zu Ort installiert, großräumig (>10 km) erfasst sie den praktisch gleichen Einflussbereich wie die Hauptstation, ermöglicht aber die vollständigere Überdeckung. Bei Geitzendorf traten keine Pandemie-Lücken auf. Die Aufzeichnungen der Station reichen aber nur rund fünf Jahre in die Vergangenheit³², weshalb die Kombination mit Großmugl erforderlich ist um alle Jahresmediane von 2015 bis 2024 gut zu bestimmen.

Ansonsten ist die Vorgehensweise wie bei *Wien Zentrum* und der *Kuffner-Sternwarte*. Mit einer Ausnahme, die Grenze für den Stabilitätsindikator, σ_{vor} wird von 0,01 auf 0,04 erhöht um in allen Jahren und Monaten genügend Stufen in die Analyse einzubeziehen. Das hat zwei Gründe: 1.) sind die Lichtniveaus in Großmugl nahe an den natürlichen und damit zehn bis fünfzig Mal niedriger als auf der Kuffner-Sternwarte, entsprechend restriktiver ist die Forderung der *relativen* Standardabweichung in den betrachteten Zeitintervallen vor der Stufe, und, 2.) hat der erste Sensor in Großmugl gegen Ende seiner Lebensdauer erhöhtes Rauschen gezeigt bevor er durch den aktuellen ersetzt werden konnte. Eine Forderung von $\sigma_{\text{vor}} < 0,01$ würde Teile der Entwicklung von der Analyse ausschließen da die Bedingung in zu wenigen Nächten der Jahre erfüllt sind.

³⁰Starlight Reserve Document der Fundación Starlight zur Förderung der La Palma Deklaration des Rechts auf Sternlicht und der Verteidigung des Nachthimmels.

³¹Für Großmugl sind das die Messkonfigurationen at_groszmugl_2 und, nach Sensorwechsel, at_groszmugl_3; für Geitzendorf at_Geitzendorf_1, siehe Lightmeter.at

³²Messungen seit 2. Mai 2019, siehe Lightmeter.at

Die Jahresmediane der Nach-zu-Vor-Verhältnisse der horizontalen Bestrahlungsstärke, $med_a V_{S,h_i}(J_j)$ für die Jahre, $J_j=2015, 2016, \dots, 2024$, und die Stundengrenzen gesetzlicher Zeit, $S_{h_i}=5h, 22h, 23h, 24h$ sind für Großmugl in Abbildung 4 dargestellt. Wie bei den anderen Stationen, erfolgt die Darstellung in Relation zu den entsprechenden Jahresmedianen der Zeiten jener Verhältnisse, die die Forderungen nach Lichtstabilität (klar und ohne Restschaltungen) sowie mondlosen, astronomischen Nachtbedingungen (keine Mondlicht oder Dämmerungsbeiträge) erfüllen.

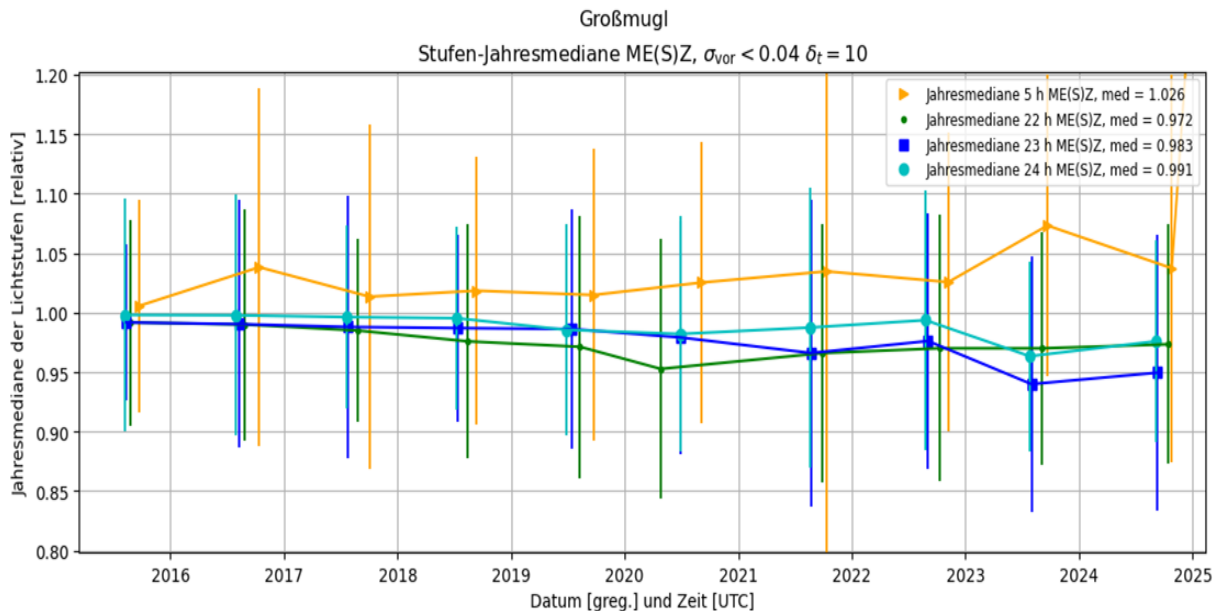


Abbildung 4: Großmugl - Entwicklung der Lichtstufen. Die Jahresmediane der Nach-zu-Vor-Verhältnisse der horizontalen Beleuchtungsstärke an ausgewählten Stundengrenzen ist in Abhängigkeit der Jahresmediane der Zeitpunkte der jeweils ausgewählten klaren, mondlosen lichtstabilen, Bedingungen während der astronomischen Nacht dargestellt. Die Stundengrenzen gesetzlicher Zeit sind farbmarkiert: 5h: gelbe Dreiecke, 22h: grüne Punkte, 23h: blaue Quadrate, und 24h: türkise Scheibchen. Die vertikalen Linien geben die Standardabweichungen der Verhältnisse innerhalb der Jahresstichproben an. Sie zeigen Variationen an, etwa jahreszeitliche, oder wochentagsabhängige oder solche aufgrund unterschiedlicher Transparenz der Atmosphäre.

Zunächst fällt auf dass die Schwankungen zwischen den Nächten (vertikale Balken) wesentlich größer sind als im Stadtzentrum und an der Stadtrand-nahen Kuffner-Sternwarte. Die morgendlichen Schwankungen (5h gesetzlicher Zeit, gelbe vertikale Linien) sind außerdem deutlich größer als jene vor und bis zur gesetzlichen Mitternacht (grün, blau und türkis, für 22h, 23h und 24h). Für naturnahe Nachtbedingungen ist das in unseren Breiten zu erwarten.

Der auffälligste Verlauf ist jener der Jahresmediane der Verhältnisse der horizontalen Bestrahlungsstärke an der 5h Stundengrenze, $med_a V_{S,h_i}(J_j)$ (wie hier immer gesetzlicher Zeit, also MEZ/MESZ). Im Gegensatz zu den Stadtverläufen ist hier über Jahre ein systematischer Anstieg erkennbar (von einem Wert nahe Eins) auf 1,04 im Jahre 2024. Letzteres entspricht einer Erhöhung der Lichtniveaus um 4% beim morgendlichen Einschalten, genauer „Erhellen“ um 5h früh.

Ähnlich verhält es sich mit den abendlichen Reduktionen an den Stundengrenzen von 22h, 23h und 24h. Da sinken die Verhältnisse von sehr nahe, aber etwas unter Eins auf 0,95, für die 23h Stufe und auf ~0,98 für 22h und 24h.

Insgesamt ergibt sich in Abbildung 4 ein „Auffächern“ der Verhältnisse über die Zehn Jahre. Die Schaltungen werden relativ zum herrschenden Lichtniveau größer.

An dieser Stellen ist es wichtig die Bedeutung der Schwankungen zu erklären. Die Standardabweichungen der Verhältnisse innerhalb eines Jahres sind als vertikale Linien für alle Jahre und Stundengrenzen mit den dazu passenden Farben angegeben (Gelb, Grün, Blau und Türkis, für 5h, 22h, 23h und 24h). Das sind systematische Unterschiede von Nacht zu Nacht, keine Messfehler. Sie sind eine Konsequenz der jeweiligen Nebenbedingungen der Nacht (Transparenz, Luftfeuchtigkeit, und, besonders in Großmugl natürliche Variationen). Werden die Verteilungen dieser unterschiedlichen Stufenverhältnisse innerhalb eines Monats für Großmugl betrachtet wird ihre bimodale Struktur deutlich, typischer Weise mit einer spitzen und einer breiten Komponente. Eine Analyse und Diskussion dieser Verteilungen kann Gegenstand einer getrennten Untersuchung sein. ihre Stabilität, also Konstanz der Form der Verteilungen, reicht hier aus um die Entwicklung in Großmugl auch innerhalb dieser Schwankungen zu diskutieren.³³

Da das auch die 23h Schaltung betrifft, die in den Jahresmedianen der beiden Wiener Stationen 2017 verschwindet, vergleiche Abb. 2, 3 und den Übereinander-Vergleich in Abbildung 5, kann die Ursache für diese Entwicklung nicht aus der öffentlichen Wiener Straßenbeleuchtung stammen.

Mögliche Ursachen für diese Entwicklung der Schaltverhältnisse in Großmugl sind:

1. eine systematische Reduktion der Lichtniveaus in Großmugl, sodass ein ähnlicher Schaltbetrag größere relative Änderungen und damit Verhältnisse von Nach zu Vor der Stundengrenze bedingt die weiter von Eins entfernt liegen, also betragsmäßig größere prozentuelle Änderungen zeigen;
2. die Schaltprotokolle der ab 2019 in Großmugl neu installierten und nun modulierten öffentlichen Straßenbeleuchtung;
3. eine Wiener Komponente die zwar geschaltet wird, aber nicht so wie die öffentliche Straßenbeleuchtung der Stadt Wien.

Dem nächtlichen Augenschein vor Ort nach, hat die neue öffentlichen Beleuchtung in Großmugl zu einer drastischen Verbesserung der Nachtbedingungen geführt, und zu einer deutlichen Reduktion der lokalen Beiträge zu den nächtlichen Lichtniveaus. Deshalb ist Punkt 1., die derzeit favorisierte Erklärung. Eine Bestätigung und eine quantitative Erfassung der Restbeiträge Wiens kann erst nach Berücksichtigung der Großmugler Schaltmuster erfolgen.

Was die erfassten Lichtverhältnisse an den Stundengrenzen in Großmugl betrifft ist derzeit klar dass die Beiträge der öffentlichen Wiener Beleuchtung unter jahrestypischen Bedingungen nicht mehr nachweisbar sind, das zeigen die 23h Ergebnisse. Etwaige Wiener Anteile an den übrigen Schaltungen können erst nach Identifikation und Abzug der Großmugler Schalt-Beiträge quantifiziert werden.

³³Ein guter Vergleich ist die Entwicklung der globalen Temperaturmittel – sowohl ortsabhängig, nach Breite etc. als auch über das Jahr sind die jahreszeitlichen Schwankungen erheblich, Mittelwert und Median aber trotzdem gut definiert.

Entwicklungen der Lichtverhältnisse 2015-2024 im Überblick

Die Lichtverhältnisentwicklung aller drei Stationen, übereinander positioniert, zeigt Abbildung 5. Einige Muster zeigen sich in mehr als einer Station. Dazu gehört etwa der „Platztausch“ der 22 und 23h Verhältnisse von 2016 auf 2017, das „Verschwinden“ der 23h Stufen und die Reduktionen der

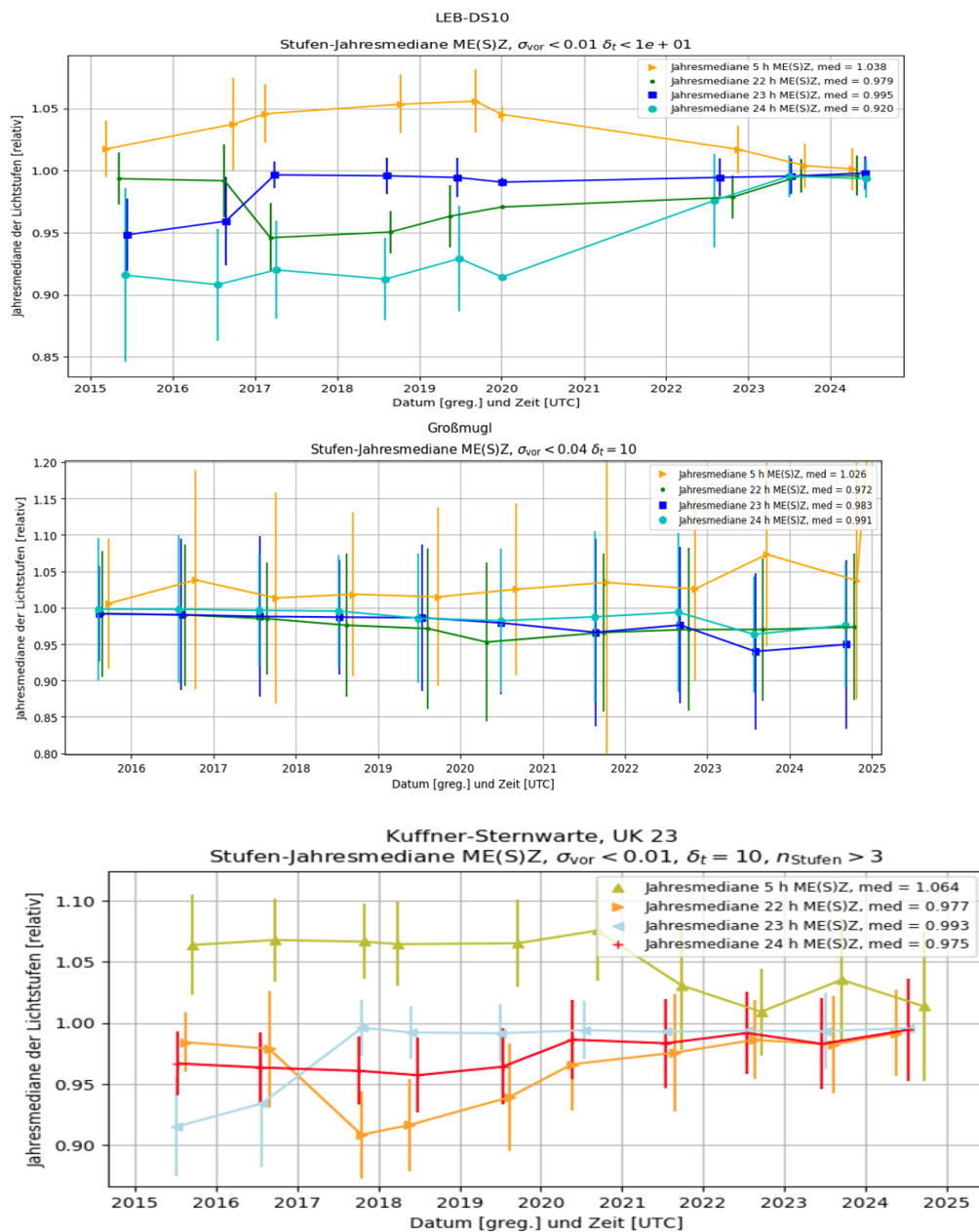


Abbildung 5:

Ein Jahrzehnt Wiener Licht aus der Perspektive der Modulationen (Teilnachtschaltungen) an den Stundengrenzen gesetzlicher Zeit: Die drei Licht-Entwicklungen 2015-2024 im Vergleich: Jahresmediane der Verhältnisse der horizontalen Beleuchtungsstärke an Stundengrenzen gesetzlicher Zeit (MEZ/MESZ), von oben nach unten für die Lightmeter-Stationen: Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl.

22h Stufe ab 2017. Zahlreiche Ansätze deuten sich aus den Vergleichen an. Hier sei nochmals auf die „Skalenfolge“ hingewiesen. Die betragsmäßig größten Verhältnisse also die größten Anteile der städtischen Wiener Schaltungen am „Licht über Wien“, finden wir auf der Kuffner-Sternwarte, gefolgt von Wien Zentrum, während in Großmugl (in 33 km Entfernung vom Wiener Stadtzentrum) wie zu erwarten die geringsten Skalen für die Verhältnisse zu finden sind.

Einen Nachtverlauf der horizontalen Beleuchtungsstärke für die Station *Wien Zentrum*, gegen Ende des betrachteten Zeitraums zeigt Abbildung 6. Drei „Hauptstufen“ fallen sofort ins Auge: 20h , 22h

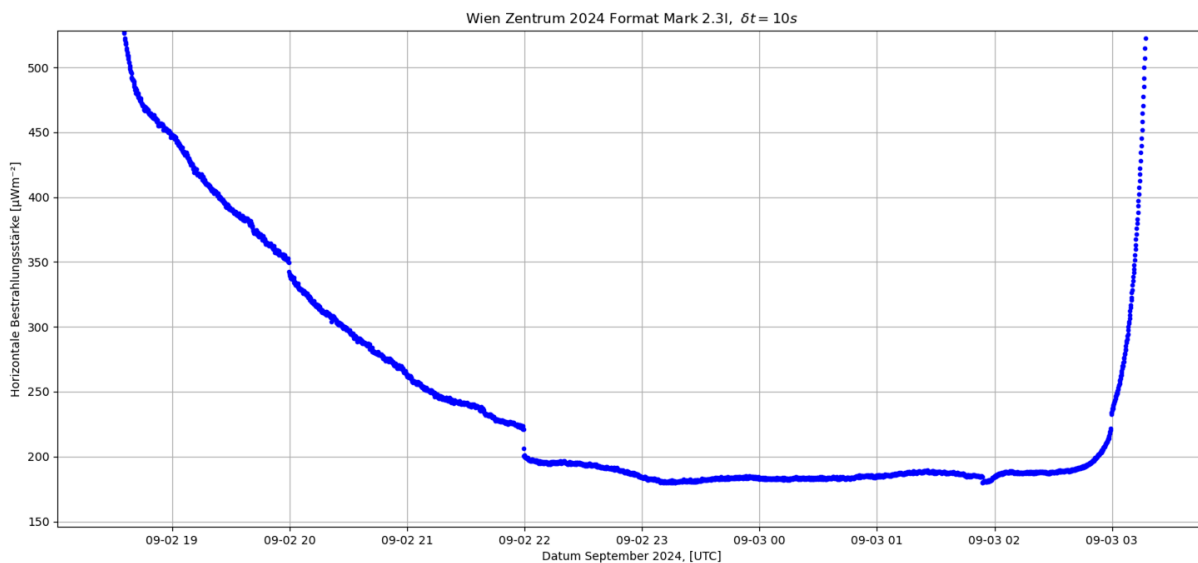


Abbildung 6: *Wien Zentrum*: Verlauf der horizontalen Bestrahlungsstärke [μWm^{-2}] in der Nacht vom 2. auf 3. September 2024 (blaue Punkte). Die Schaltungen an den Stundengrenzen (hier Weltzeit [UTC]) sind, bei der gewählten zeitlichen Auflösung von zehn Sekunden als Lücken in der Linie erkennbar. Auffällig sind die „Stufen“ um 0h gesetzlicher Zeit (hier MESZ entsprechend 22h UTC), 22h MESZ (20h UTC) und 5h MESZ (3h UTC). Ein Vergleich der Sprunghöhen um 20 UTC und 22 UTC („09-02 22“) zeigen direkten den Unterschied der Teilnachtschaltung von „*Wien Leuchtet*“ um 22h MESZ und der „allgemeinen“ Schaltung um 24h MESZ. Die 5h MESZ Schaltung zeigt, relativ zur letzteren, den Vergleich mit der gesamten geschalteten städtischen Wiener Straßenbeleuchtung direkt.

und 3h UTC auf der Abszisse. Das entspricht in gesetzlicher Zeit, in diesem Falle im September, MESZ. Nach Stufenhöhe geordnet lauten die Stundengrenzen 22h, 3h, 20h UTC. Die Höhe der Stufen entspricht hier der Differenz der horizontalen Bestrahlungsstärke entsprechend der Licht-Achse mit ihrer linearen μWm^{-2} Skala (sonst im Text werden die Stufenhöhen in %, also relativ angegeben).

Vergleich mit dem Installationsfortschritt

Wenn die gemessenen Lichtverhältnisse an den Stundengrenzen vom Lichttausch hauptbedingt sind, sollte sich der Verlauf mit jenem der Leuchteninstallation vergleichen lassen. Am besten sollte das über den Lichtstrom erfolgen, dessen Zielwerte aber in der Endphase der Studie nicht leicht verfügbar waren. So wird die Leuchtenzahl als Entwicklungsparameter angenommen, mit einem Zielwert von ~130 000 Leuchten nach Abschluss des „Lichtwechsels“.

Nimmt man die seitens der *Wien Leuchtet* aus den Datenbanken nach Jahr und Leuchtentyp generierten, kumulierten, jährlichen Installationszahlen, siehe Abbildung 7, ist es möglich die erwartete Entwicklung der hier diskutierten Verhältnisse an den Stundengrenzen aus ihrem gemessenen Startwert für den gesamten zehn Jahres Zeitraum auszurechnen.

Aus Gründen der Einfachheit wird als Ausgangswerte jener des Verhältnisses der horizontalen Bestrahlungsstärke, nach-zu-vor der 23h Stundengrenze betrachtet. Diese Schaltung ist 2015

besonders charakteristisch für die „Wien Leuchtet“. Der Wert an der Kuffner-Sternwarte für 2015 liegt bei $med_a V_{Kuffner,23h}(2015) = 0,92$, entsprechend einer 8%-Reduktion.

Die, nach den Installationszahlen, genauer dem Anteil der installierten Leuchten am Installationsziel zu erwartete Entwicklung dieses Verhältnisse mit dem Fortschritt des Tausches ist in Abbildung 8

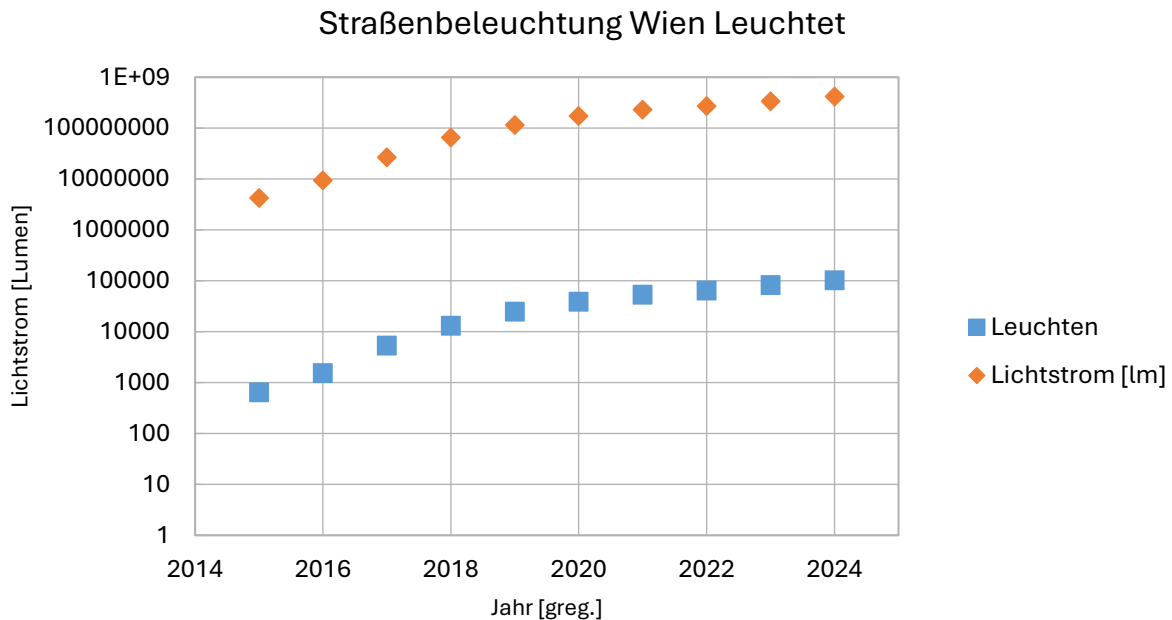


Abbildung 7: Fortschritt des Leuchtentausches der Stadt Wien. Anzahl der installierten Leuchten (aller Typen) und ihr Gesamtlichtstrom (Lumen) über die Jahre.

dargestellt. Der Vergleich mit den gemessenen Entwicklungen in Abbildung 3 (23h und 22h Stundengrenzen) zeigt eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung, wenn etwa der steile Anstieg von 2018 bis 2022 betrachtet wird. Der letzte Punkt läge nach Installationsstand 2024 hochgerechnet bei 0,984 praktisch nicht zu unterscheiden vom gemessenen Jahresmedian, der in Abbildung 3 dargestellt ist (oranges, nach rechts weisendes Dreieck, für 2024, ganz rechts).

Natürlich sollte die feinere Analyse über Lumen und Leuchtentypen erfolgen, aber dieser einfache Test zeigt deutlich dass die Messergebnisse im Rahmen des zu erwartenden Fortschrittes liegen.

Erwartetes Lichtverhältnis nach Installationsfortschritt

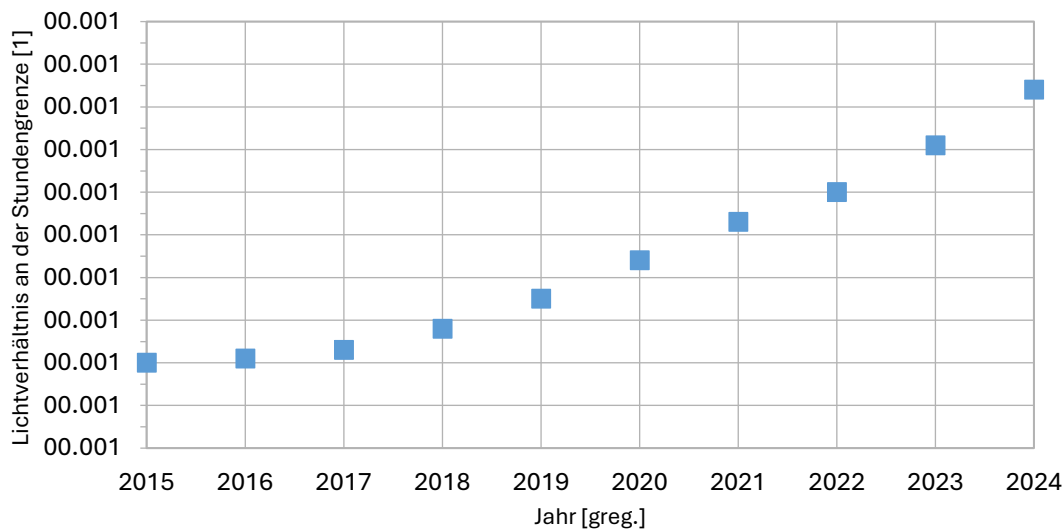


Abbildung 8: Erwartete Entwicklung des Lichtverhältnisses zur Hauptschaltstunde, an der Kuffner-Sternwarte, berechnet aus dem Messwert 2015 und den Installationszahlen der „Wien Leuchtet“, unter der Annahme eines Installationszieles von insgesamt 130 000 Leuchten. Zu vergleichen ist dieser berechnete Verlauf mit den gemessenen blauen (2015) und orangen (2017 – 2024) Entwicklungen der 23h- und dann der 22h-Stundengrenze in Abbildung 3.

Wird noch über das Jahr 2024 hinaus, auf die vollständige Installation hochgerechnet, wird im Endausbau der Beitrag der öffentlichen Beleuchtung an den Stundengrenzen unter 1% liegen. Dieser kleiner Wert wäre derzeit, und ohne weiteres auch dann nicht mehr nachweisbar. Der Effekt der öffentlichen Straßenbeleuchtung Wiens auf die Erhellung der Nacht wird verschwunden sein, bzw. so klein dass er keine wesentlichen Beiträge mehr liefert.

Zusammenfassung und Diskussion

Nach Daten der *Wien Leuchtet*³⁴ wurden im Rahmen des *Tausches der Straßenbeleuchtung*, der Stadt Wien, in den Zehn Jahren von 2015 bis 2024 mehr als 100 000 Leuchten erneuert. Das sind rund 80% des Tauschzieles³⁵ für die „allgemeinen Fälle“³⁶ der Straßenbeleuchtung.

Die neuen Standardleuchten strahlen Licht nur in einen Raumwinkel deutlich unterhalb der Horizontalen. Deshalb ist eine deutliche Reduktion des nach oben gerichteten, von der öffentlichen Straßenbeleuchtung der Stadt Wien ausgehenden Lichts zu erwarten.

Bereits im ersten Wiener Lichtbericht von 2012³⁷ wurde die 23h Teilnachtschaltung benutzt um den Anteil des zum Himmel gerichteten Lichts für die „alten“ Leuchten zu bestimmen. Damals erfolgte das an einzelnen Abenden, mit einem Ergebnis um 8%.

³⁴Datenzusammenstellung Fenninger Miriam und Mag. Gerald Wötzl, pers. Mitteilung

³⁵Rund 130 000 Leuchten, MMag, Gerald Wötzl, MA 33 -Wien Leuchtet, pers. Mitt.

³⁶Dazu kommen noch Spezialfälle wie z.B. Altstadtleuchten etc..

³⁷ob. zit.

Hier wurden die Schaltungen bzw. Reduktionen des Lichtstroms über die zehn Jahre des „Tausches“ anhand der Daten von drei kontinuierlich messenden Lichtstationen, in und in der Nähe Wiens analysiert.

Die Dekade, und damit die Messreihen überdecken die ersten paar hundert „exemplarischen“ Installationen, im Jahr 2015, bis zu den 21000 installierten neuen Leuchten im Jahr 2024 und dem Erreichen von 80% Vollständigkeit des großen „Tausches“.

Hier wurden die Ergebnisse für die Jahresmediane der Verhältnisse der horizontalen Beleuchtungsstärke *nach* der Stundengrenze (dem Stundenanfang) zu *vor* der Stundengrenze für 5h, 22h, 23h und 24h gesetzlicher Zeit erstmals präsentiert. Die Werte für die Verhältnisse wurden aus Zeitreihen mit 0,1 Hz Kadenz abgeleitet, aus Gründen der Recheneffizienz, und mit 1 Hz Stichproben-Analysen überprüft. Um von den komplexen Formen der „Lichtstufen“ selbst abzusehen, mussten, um die exakte Stundengrenze herum Intervalle von ein bis zwei Minuten ausgelassen werden, was auch Uhrenfehler (beim Schalten und beim Messen) vermeidet oder reduziert.

Der Wechsel der 23h Schaltung auf die 22h Schaltung wurde anhand der Verhältnisse demonstriert (blind und ohne vorab Informationen). Ab 2017 demonstriert die dann abwesende 23h Schaltung die „Nulllinie“ des Verfahrens.

Die Lightmeter-Stationen *Wien Zentrum* und *Kuffner-Sternwarte* zeigen einen Rückgang der Schaltverhältnisse von 8% (2015) auf 1% und 2% für 22h bzw. 5h früh gesetzlicher Zeit. Die Werte liegen für beide Stationen gegen Ende des betrachteten Zeitraumes so nahe an der „23h-Nulllinie“ dass sie praktisch nicht mehr davon zu unterscheiden sind (Abbildung 2 und Abbildung 3).

Der Anteil der (geschalteten) öffentlichen Straßenbeleuchtung an der Aufhellung der Nacht ist damit bereits 2024 nur mehr im ein oder zwei Prozentbereich.

Die, vom Nutzungsziel her betrachtet wahrscheinlich wichtigste Gruppe, des Außenlichts trägt damit nicht mehr wesentlich zur Aufhellung der Nacht in Wien bei.

Die Station *Großmugl* zeigt einen schwächeren umgekehrten Trend in den Verhältnissen. Mögliche Ursachen wurde diskutiert, werden aber bis zur Klärung der Schaltkonzepte der seit 2019/2020 erneuerten Großmugler öffentlichen Beleuchtung nicht ausgearbeitet werden können. Bei der Analyse hat sich gezeigt, dass die Wiener Lichtstufen nur unter besonderen Bedingungen in Großmugl nachweisbar sind. Die Verhältnisverteilungen an den Stundengrenzen für Monate und Jahre sind komplex (multimodal), was einen wesentlich aufwendigeren Analyseansatz notwendig machte als hier verfügbar war. Was aus den Großmugl-Ergebnissen sicher abzuleiten ist, ist dass unter typischen Bedingungen (Jahresmediane) die Schaltungen und damit ein Einfluss der Wiener öffentlichen Beleuchtung nicht (mehr) nachweisbar sind.

Nimmt man die Entwicklung der Werte der Jahresmediane der Verhältnisse und der daraus folgenden Anteile direkt, lässt sich für die Stadt-Stationen die weitere Entwicklung zu noch niedrigeren Niveaus abschätzen.

Nach den auf der *Kuffner-Sternwarte* gemessenen Trends sollten die 5h Schaltungen ab 2026 nicht mehr von Null unterscheidbar sein, im Zentrum Wiens, mit seinen doppelt so hohen Lichtniveaus, und höherem Anteil der „anderen“ Beleuchtungstypen (Werbung, Repräsentation, usw.) sowie

mehr Schaltaktivität, ist das bei aktuellem Stand der Untersuchungen schwerer nachweisbar aber wahrscheinlich ähnlich.

Je nach Extrapolation wäre bei den gefundenen Trends im Jahre 2025 oder 2026 mit dem Erreichen der Nulllinie zu rechnen. Das Licht auf der Sternwarte stammte dann zu keinem so nachweisbaren, und in jeden Fall sehr geringen Anteil von der öffentlichen Straßenbeleuchtung.

Ein Vergleich mit der Statistik der Leuchteninstallationen zeigt außerdem dass der gemessene Verlauf gut dem erwarteten entspricht, wenn von den 2015er Mess-Werten ausgegangen wird, und dann die Tauschanteile unter der Annahme der Null-Aufwärts-Immission hochgerechnet werden. Die Hochrechnung nach Installationszahlen der Leuchten ergibt 1,6%, die Messwerte auf der Kuffner-Sternwarte für die 5h Stundengrenze ergeben 1-2%, beides für 2024.

Die Wiener Straßenbeleuchtung ist damit nachtneutral, und das entsprechend der Planung des Tausches. Natürlich bleiben Licht-Immissionen der Straßenbeleuchtung, aber die sind weit unter jene aller anderen Gruppen hinuntergedrückt.

Von 8% im Jahre 2015 auf der Kuffner-Sternwarte verschwindet ihr Anteil, voraussichtlich innerhalb von 12 Jahren bis 2026, durch den großen *Tausch der Straßenbeleuchtung*.

Die nächsten Schritte

Bedingt durch den verfügbaren Zeitrahmen aus Gründen der Aktualität und Priorität wurde die Analyse auf die einfachste realisierbare Weise durchgeführt.

Fünf verschiedene Verfahren zur Stufendetektion und Vermessung wurden ausprobiert und das robusteste und schnellste für den Zehnjahres-Zeitraum und drei Lichtmess-Stationen des Vereins Kuffner-Sternwarte in und um Wien angewandt, und zwar für vier ausgewählte Stundengrenzen die die erwartete Phänomenologie am sichersten erfassen würden. Das ist gut gelungen, allerdings auch um den Preis von Genauigkeit und Feindiagnostik.

Besonders deutlich werden die Grenzen des Verfahrens, der Preis für die Effizienz, bei den „Null-Linien“ der Stufen, die systematische Abweichungen von Eins bei den Verhältnissen bedingen insbesondere bei 23h gesetzlicher Zeit nach 2017. Die Ursache dafür sind systematische Trends im urbanen Nachtlicht. So ein Trend wird etwa am Abend im Stadtzentrum sehr deutlich, wie Abbildung 6 zeigt. Vor Mitternacht sinkt, auch nach dem Ende der Dämmerung, und ohne wesentliche Naturlicht-Änderung, in einer Art zivilisatorischen „Aktivitätsdämmerung“ das Licht der Nacht bis 23 UTC - 1h MESZ in der dargestellten Septembarnacht. Auch ohne Schaltung sind daher die Werte vor einer Stundengrenze am Abend größer als danach. Die Korrektur ist, wie die 23h-Ergebnisse zeigen im Bereich von 1% zu erwarten. Bei Anwendung würden die Ergebnisse genauer und das Verschwinden des öffentlichen Beitrags könnte dann bis unter 1% Stufen, das heißt bis unter 1/8 des Startwertes verfolgt werden.

Eine weitere Verbesserung liegt in einer Einbeziehung atmosphärischer Indikatoren, etwa der Sichtweite um die Mediane noch besser zu definieren, und etwa jährlich oder monatlich besser vergleichbar zu machen. Dabei kann auch eine Betrachtung der Stufenverteilungen helfen, wie sie bei der Analyse der Großmugl Ergebnisse schon eine Rolle spielte.

Die Nullanalyse wurde aktuell durch Berücksichtigung von aktuellen „Hintergrundwerten“, also Werten des Lichtes für den natürlichen, mondlosen Himmel unter astronomischen Nachtbedingungen aus dem Wildnisgebiet Dürrenstein-Lassingtal und von der Wildalm

berücksichtigt. Das spielt vor allem in Großmugl eine Rolle und kann dort über die *Entwicklung* der typischen Verhältnisse für den Naturhimmel zur genaueren Analyse beitragen, gemeinsam natürlich mit einer Kenntnis der Schaltungen der dortigen Gemeinde.

Lohnen würde es auch die „Stufen“ selbst, genauer die Form der Verläufe des Lichts an den Stundengrenzen zu studieren. Sind die Muster verstanden, können sie bei der Stufenvermessung helfen. Derzeit erschwert die Form die Vermessung und die Auslassung (eine Lücke direkt um die Schaltung) war letztlich die erfolgreiche Strategie für diese Studie. Genauer bestimmt und unabhängige von „Hintergrundverläufen“ durch andere Schaltungen, wie sie für Wien Zentrum charakteristisch sind, werden die Stufenformen die Genauigkeit verbessern und die Schwankungen von Nacht zu Nacht reduzieren.

Zuletzt sei, wie im Vorschlag für diese Studie erwähnt, dass die Zusammenführung der Messung der Stationen, um das Lichthalo zu konstruieren, und das Studium seines Gesamtgehaltes, die Genauigkeit dadurch erhöhen würde, dass, wie beim Energiegehalt des Halos, durch Korrelation der Einzelstationen, lokale Effekte, die nur in einer Station registriert werden, unterdrückt, und dadurch das Signal der Schaltungen besser dargestellt und analysiert werden kann.

Schlussbemerkungen

Im Jahre 2008, beim Europäischen Symposium zum Schutz des Nachthimmels entstand die Idee der Kooperation zwischen den Verantwortlichen des öffentlichen Lichtes Wiens, , vertreten durch Wien leuchtet (MA 33) und dem Verein Kuffner-Sternwarte sowie der Abteilung für Umweltschutz (MA 22), der Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien (MA 39) und der Wiener Umweltschutzanstalt. Das dort erstmals als Prototyp vorgestellte Lightmeter sollte ermöglichen die Verbesserungen durch neue Leuchtengenerationen, die in Wien am Horizont erkennbar waren, erstmals zu messen.

Die Kooperation mündete in eine gemeinsame Begleitung des großen Wiener Lichttausches in mehrfacher Weise. Das Licht über Wien wurde vermessen, die Quellen erfasst die Entwicklung verdeutlicht, in sieben Studien.

War in einer frühen Phase vor Beginn der Implementierung, 2012 die Feststellung des geringen Anteils der „Halbschaltung“ an der Helligkeit der Nacht überraschend, so konnten bald die wechselnden Schaltstrategien dokumentiert werden.

In dieser Studie ist es nun erstmals gelungen die Änderungen in den Schaltmustern über eine Umstellungsphase in einer der größten Städte der EU und für ein besonders innovatives Lichtsystem zu vermessen, und zu zeigen, dass die „Helligkeit der Nacht“, das „Licht über Wien“ quantitativ jenen Installationsverläufen der öffentlichen Straßenbeleuchtung der Stadt Wien folgt die dokumentiert sind.

Das Konzept der Lichtlenkung lässt sich wie geplant am Himmel über Wien nachweisen. Es geht heute viel weniger Licht nach oben. Nachweisbar sind Reduktionen auf ein Viertel des „geschalteten“ Lichts und damit des Großteils der öffentlichen Wiener Straßenbeleuchtung.

Bis 2026 ist ein Rückgang auf weniger als ein Fünftel und das Erreichen der Nachweisgrenze, mit den hier benutzten Verfahren zu erwarten.

Bemerkung: Globalstrahlung oder Horizontale Beleuchtungsstärke?

Bei Tag entspricht die horizontale Beleuchtungsstärke unter freiem Himmel der Globalstrahlung (englisch: total radiation).

In den Erdwissenschaften führt die Nutzung des Begriffs *Globalstrahlung* bei Nacht oft zu Missverständnissen obwohl die Messgröße, etwa im Falle des Mondlichtes physikalisch praktisch identisch ist. Der Messwert für den Mondschein ist allerdings mindestens 400 000 mal geringer.

Um diese Missverständnisse zu vermeiden wird hier durchgehend die Bezeichnung *horizontalen Beleuchtungsstärke*, verwendet. Mit dem Begriff Globalstrahlung in den vorhergehenden „Licht über Wien I bis VII Berichten ist auch bei Nacht gleiches gemeint. Bei Tag besteht sowieso Konsistenz in der Bezeichnung in den verschiedenen Forschungsgebieten.

Referenzen/Literatur

[1]: Andreas Hänel, Thomas Posch, Salvador J. Ribas, Martin Aubé, Dan Duriscoe, Andreas Jechow, Zoltán Kollath, Dorien E. Lolkema, Chadwick Moore, Norbert Schmidt, Henk Spoelstra, Günther Wuchterl, Christopher C. M. Kyba: Measuring night sky brightness: methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Volume 205, January 2018, Pages 278-290

[2]: Bolton, D.: The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Monthly Weather Review*, Vol. 108, S.1046ff

[3]: Löhle, F.: Sichtbeobachtungen vom meteorologischen Standpunkt. Verlag von Julius Springer, Berlin, 1941

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

[5] Wuchterl, G.: Das Licht der Nacht über dem Wildnisgebiet Dürrenstein. *Silva Fera* 6/2017.
www.wildnisgebiet.at/forschung/silva-fera/#

[6] Binder, F., Posch, T., Wuchterl, G.: Langzeitmessungen der Nachthimmelshelligkeit und Möglichkeiten für Nachthimmelschutzgebiete in Oberösterreich.
Endbericht der Studie des Instituts für Astrophysik der Universitätssternwarte Wien. Herausgeber: Land Oberösterreich, Abteilung Umweltschutz. 2017

[7] Chwatal, A., Kopper, M., Linhardt F., Posch, T., Reithofer, M., Wuchterl, G.: Licht über Wien, Energieaufwand und Quellen. Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzbehörde. Wien, 2012.
<http://wua-wien.at/images/stories/publikationen/lichtverschmutzung-lichtkataster.pdf>

[8] Kopper, M., Linhardt F., Reithofer, M., Wuchterl, G.: Licht über Wien II. Kontinuierliche Messungen der nächtlichen Globalstrahlung und Energieaufwand für die Wiener Lichtglocke im Jahr 2012. Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzbehörde. Wien, 2013. http://wua-wien.at/images/stories/publikationen/licht_ueber_wien_allgemeiner_teil_2012.pdf

[9] Kopper, M., Linhardt F., Reithofer, M., Wuchterl, G.: Licht über Wien III. Kontinuierliche Messungen der nächtlichen Globalstrahlung und Energieaufwand für die Wiener Lichtglocke im Jahr 2013. Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzbehörde. Wien, 2014. <http://wua-wien.at/images/stories/publikationen/licht-ueber-wien-2013.pdf>

ANHANG 1 („Roadmap“) -Fassung vom 25. April 2024

Lichtimmissionen und der Wiener Lichtwechsel

Die Lichtimmissionen Wiens, der fünftgrößten Stadt der EU dominieren in Österreich und sind Maßgebend für die Erhellung der Nacht in Ostösterreich.

Damit sind sie auch entscheidend für alle dort liegenden Schutzgebiete bis zu den IUCN Ia und II Gebieten in den Ostalpen. In diesem “Sternlicht Dreieck” herrschen noch Naturlicht-Bedingungen oder Naturlicht-Nahe Bedingungen.

Direkt in die Atmosphäre abstrahlen Licht begleitende Energie- und CO₂-Beitrag des Wiener Lichts ist der größte Österreichs.

Die zentral verwaltete städtischer Wiener Beleuchtung gibt einzigartige Möglichkeiten der Quantifizierung und Zuordnung der Lichtimmissionen zu Quellen und Quellentypen bei gleichzeitiger Früh-Erfassung der Immissionen in die Schutzgebiete.

Die Erfassung erfolgt aus Kombination von Langzeit-Monitoring mit 1Hz und Richtungs- und Flächen-vollständiger Quellenvermessung per Helikopter. Dabei werden die Variationen der Quellen, auch während des Fluges erfasst und so die Aufteilung der Quellenbeiträge auf die jeweils sekundlich aktuelle Gesamtmission Wien möglich.

Die Umrüstung der städtischen öffentlichen Wiener Beleuchtung von 2016 bis 2026 ergibt die einzigartige Möglichkeit eine konkrete Intervention sehr vollständig zu Quantifizieren und in die Quellenentwicklung einzuordnen. Wie weit werden die Verbesserungen der rund 200 000 Wiener Leuchten Gesamtmissionen, Anteile und Energiebedarf verändern?

Stand:

Die Datenerhebung der beiden ersten Flugepochen, 2016 und 2022/23 ist abgeschlossen, die Methode hat sich auch unter erschwerten Bedingungen als gut durchführbar erwiesen.

Plan:

- 1) Review (Vollständigkeits, Qualitätsanalyse, Verbesserungen, Risikoanalyse, Datenqualität)
- 2) Konsolidierung und Verfügbarmachung der Ergebnisse beider Befliegungen in geeigneten Datenstrukturen – räumliche Verteilungen hochdynamischer Intensitätswerte mit zwei Winkelabhängigkeiten und zeitlich Variabel (Schaltungen) - (3 Ortsdimensionen, 2 Winkeldimensionen, Zeit)
- 3) Untersuchung und Austausch von Systemkomponenten (Erneuerung der Monitoring Sensoren nach 10-15 Jahren, Software Aktualisierung vom Stand 2019/20)
- 4) Umweltimpakt gewichtete Analyse nach Interaktionswahrscheinlichkeit – die , Richtung und Zielgebieten (Schutzgebiete, Wohngebiete)
- 3) Vorbereitung der dritten Epoche (nach Ende der Umstellung vorr. März 2026)
- 4) Flug- und Datenerhebungsplanung
- 5) Durchführung der Flüge
- 6) Datenvalidierung und Vervollständigungskampagnen
- 7) Epochenanalyse 2026
- 8) Vergleichende Analyse

9) Zeitabhängig Quellenverteilungen

Hintergrund

2001 wiess dokumentiert der Verein Kuffner-Sternwarte mit “Wieviele Sterne sehen wir noch?”³⁸ die stark erhöhte Helligkeit der Nacht in Österreich <https://sternhell.at>.

2008 titelte “National Geographic” mit “The End of Night” und zeigte die Konsequenzen für die Biosphäre, inklusive Menschen.

2009 wurden im Rahmen eines Aufrufes der Initiative der UNESCO und der Internationalen Astronomischen (IAU) Gebiete mit natürlicher Nacht identifiziert, darunter das “Sternlicht Dreieck” der IUCN Kat., Ia, und II Schutzgebiete im Zentrum des Landes. Beginn des automatischen Licht Monitoring mit 1Hz in und um Wien und in den Ostalpen.

2010 gelang der Nachweis des Bestehens von Naturnacht Bedingungen im Wildnisgebiet Dürrenstein³⁹ und erster Hinweise auf über die IAU Grenzwerte für professionelle Observatorien reichende Lichtwerte im Nationalpark Kalkalpen.

2011 Erste Hinweise auf eine etwa 10% Anteil der Öffentlichen Beleuchtung in Wien – ein erstaulich niedriges und überraschendes Resultat.

2012 schlägt eine “Extended Case Study” im Rahmen der IAU/UNESCO Studien Konzepte für die Inklusion der Nachtlicht-Bedingungen im Rahmen der IAU.

Erfassung der Lichtquellen in Wien entlang von 800 Straßenkilometern zeigt das die nächtliche Globalstrahlung über Wien nach Anzahl und Lichtstrom nicht mit den vom Boden, entlang von Strassen messbaren Quellen erklärbar ist “fehlendes Drittel”. Das könnten von Quellen stammen die direkt in den Himmel strahlen –

2015 stellt sich beim ersten Österreichischen Workshop zu Astronomie und Welterbe gemeinsam mit der

³⁸<https://sternhell.at>

³⁹Jetzt Wildnisgebiet Dürrenstein-Lassingtal