

Endbericht

Projekt FA538059

Wissenschaftliche Auswertung und Langzeit-Analyse des Lichtverschmutzungs-Monitorings in Bad Leonfelden (OÖ)

Dr. Stefan Wallner, BSc MSc (Projektleitung)
INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK | UNIVERSITÄT WIEN

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	- 4 -
2 Projektergebnisse Modellierungen	- 5 -
2.1 Modellierung der Lichtverhältnisse	- 5 -
2.2 Erkenntnisse aus den Modellierungen.....	- 8 -
3 Analysen des lokalen Messnetzes	- 12 -
3.1 Installation der Messgeräte	- 12 -
3.2 Erkenntnisse aus den Messungen.....	- 12 -
4 Kontakt und ProjektmitarbeiterInnen	- 25 -

1 | Einleitung

Die zunehmende Lichtverschmutzung stellt eine der bedeutendsten anthropogenen Veränderungen der nächtlichen Umwelt dar und wird von der wissenschaftlichen Gemeinschaft als wachsende Herausforderung für Mensch und Umwelt anerkannt. Die Auswirkungen reichen von der Beeinträchtigung astronomischer Beobachtungen über Störungen im circadianen Rhythmus von Menschen und Tieren bis hin zu weitreichenden ökologischen Konsequenzen.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Vorgängerprojekts FA538052 eine umfassende wissenschaftliche Quantifizierung der Umstellung der öffentlichen Außenbeleuchtung in Bad Leonfelden durchgeführt. Das Projekt fokussierte sich auf die detaillierte Analyse der Auswirkungen dieser Beleuchtungsumstellung auf den Nachthimmel, wobei verschiedene Messsensitivitäten berücksichtigt wurden. Durch den Einsatz modernster Messtechnik und fortschrittlicher Modellierungsansätze wurde eine fundierte wissenschaftliche Basis für die Bewertung der implementierten Maßnahmen geschaffen.

Das Projekt verfolgt dabei einen strukturierten wissenschaftlichen Ansatz mit drei Hauptkomponenten:

Erstens werden Computersimulationen durchgeführt, die verschiedene Aspekte untersuchen: die Auswirkungen unterschiedlicher Lichtspektren der Beleuchtungssysteme, den Einfluss der Abschirmung der Lampen auf die Lichtverteilung, die Rolle unterschiedlicher Bewölkung bei der Lichtausbreitung und die Effekte von weiter entfernten dominanten Lichtquellen auf die lokale Umgebung.

Zweitens werden eindimensionale Messungen der Nachthimmelhelligkeit im Zenit (direkt über dem Beobachtungspunkt) durchgeführt, um die Auswirkungen der Beleuchtungsänderungen zu dokumentieren.

Drittens kommen zweidimensionale Messungen zum Einsatz, die den gesamten sichtbaren Himmel erfassen. Diese ermöglichen es, typische Helligkeitsmuster am Nachthimmel zu erkennen und den Einfluss zusätzlicher Lichtquellen in der Umgebung abzuschätzen.

Der vorliegende Bericht knüpft an diese umfangreichen Vorarbeiten an und erweitert die bisherigen Erkenntnisse durch die systematische Auswertung der seit der Implementierung des Messnetzes gewonnenen Daten. Diese Langzeitanalyse ermöglicht theoretisch erstmals eine empirische Bewertung der tatsächlichen Auswirkungen der umgesetzten Beleuchtungsänderungen über einen ausgedehnten Zeitraum.

2 | Projektresultate Modellierungen

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit einem Gemeinschaftsprojekt mit der Stadtgemeinde Bad Leonfelden in Oberösterreich zur Umsetzung von energiesparenden Maßnahmen durch die Umrüstung der Straßenbeleuchtung. Das aktuelle Beleuchtungsnetz der Stadt besteht aus einer Mischung von Halogen- und Dampflampen sowie LED-Technologie. Die älteren Leuchtmittel sollen größtenteils durch moderne LED-Systeme ersetzt werden, wodurch der Anteil an LED-Beleuchtung deutlich steigen wird. Genauere Details zu dieser Umstellung werden im nächsten Kapitel erläutert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Frage, wie genau sich die Veränderung der Himmelselligkeit (auch "Skyglow" genannt) vorhersagen lässt. Diese Vorhersagefähigkeit ermöglicht später einen Vergleich mit den tatsächlich gemessenen Werten nach Abschluss der Umstellung. Hierfür wird das Computerprogramm "SkyGlow" nach Kocifaj (2007) als Modellierungswerkzeug eingesetzt.

Für die Bewertung der Projektergebnisse ist es wichtig, ein Modell zu entwickeln, das die künftige Lichtverschmutzung in Bad Leonfelden prognostiziert. Der Vergleich zwischen den Modellvorhersagen und den tatsächlichen Messungen kann wertvolle Erkenntnisse liefern, die auch anderen Städten mit ähnlichen Umstellungsplänen zugutekommen. Diese vergleichende Analyse kann als wissenschaftliche Grundlage für Entscheidungsprozesse und nachhaltige Beleuchtungsinitiativen dienen.

Bad Leonfelden weist dabei besondere Merkmale auf, die bei der Bewertung der Auswirkungen berücksichtigt werden müssen. Dazu gehören die geografische Lage, die Topographie, die Bevölkerungsdichte, die Flächennutzung und die bestehende Beleuchtungsinfrastruktur. All diese Faktoren fließen in das Modell ein und ermöglichen ein umfassenderes Verständnis der zu erwartenden Veränderungen.

Die Studie orientiert sich an vergleichbaren Projekten, bei denen wissenschaftliche Methoden zur Untersuchung von Beleuchtungsumstellungen eingesetzt wurden, beispielsweise in Tucson (Arizona) und Mexiko-Stadt. Es gibt auch rückblickende Studien wie jene in Madrid, wo die Umstellung bereits abgeschlossen ist. Solche Untersuchungen existieren bisher allerdings hauptsächlich für städtische Gebiete.

2.1 | Modellierung der Lichtverhältnisse

Die erste Phase des Projekts konzentrierte sich auf die Entwicklung detaillierter Modelle zur Simulation der Lichtverschmutzung in Bad Leonfelden. Diese Modelle berücksichtigen verschiedene komplexe Faktoren wie die geografische Lage, die Verteilung der Lichtquellen und atmosphärische Bedingungen. Die Gemeinde Bad Leonfelden, gelegen im oberösterreichischen Mühlviertel, bietet durch ihre topografische Lage und die klare Abgrenzung des Siedlungsgebiets ideale Voraussetzungen für eine solche Modellierung.

Ein zentraler Aspekt der Modellierung war die Erfassung und Kategorisierung sämtlicher relevanter Lichtquellen im Gemeindegebiet. Dabei wurden nicht nur die öffentliche Straßenbeleuchtung, sondern auch private und gewerbliche Beleuchtungsanlagen berücksichtigt. Die Charakterisierung dieser Lichtquellen erfolgte hinsichtlich ihrer spektralen Eigenschaften, ihrer räumlichen Verteilung und ihrer zeitlichen Nutzungsmuster. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei der Umstellung von konventionellen Leuchtmitteln auf moderne LED-Technologie gewidmet.

Die atmosphärischen Modelle berücksichtigten verschiedene Wetterszenarien und deren Einfluss auf die Lichtausbreitung. Dabei wurden Parameter wie Luftfeuchtigkeit, Aerosolkonzentration und Bewölkungsgrad in die Berechnungen einbezogen. Diese komplexen Modelle ermöglichten eine präzise Vorhersage der zu erwartenden Himmelselligkeit unter verschiedenen Bedingungen.

Ein besonderer Fokus lag auf der Untersuchung des "Skyglow" - der allgemeinen Aufhellung des Nachthimmels durch künstliche Beleuchtung. Dieses Phänomen entsteht durch die Streuung künstlichen Lichts in der

Atmosphäre und ist ein wichtiger Indikator für das Ausmaß der Lichtverschmutzung. Die durchgeführten Simulationen zeigten, dass die Art und Ausrichtung der Beleuchtung einen entscheidenden Einfluss auf die Intensität des Skyglow hat.

Die Modellrechnungen berücksichtigten dabei verschiedene Faktoren wie den Abstrahlwinkel der Leuchten, die spektrale Zusammensetzung des emittierten Lichts und die Reflexionseigenschaften der Umgebung. Es zeigte sich, dass besonders die Umstellung auf moderne LED-Beleuchtung mit präziser Lichtlenkung zu einer signifikanten Reduktion des Skyglow führen kann, wenn sie korrekt implementiert wird.

Ein besonderer Fokus liegt auf der sorgfältigen Analyse des Umstiegs auf LED-Beleuchtung. Dabei werden sowohl der Austausch bestehender 4000 Kelvin LEDs als auch die vorwiegende Nutzung von 3000 Kelvin LEDs untersucht. Diese Bewertung ist wichtig für eine mögliche Zertifizierung nach anerkannten Standards zur Reduzierung der Lichtverschmutzung. Der geplante Umbau der öffentlichen Beleuchtung auf LED-Technologie berücksichtigt dabei ausdrücklich die Auswirkungen auf die nächtliche Umwelt.

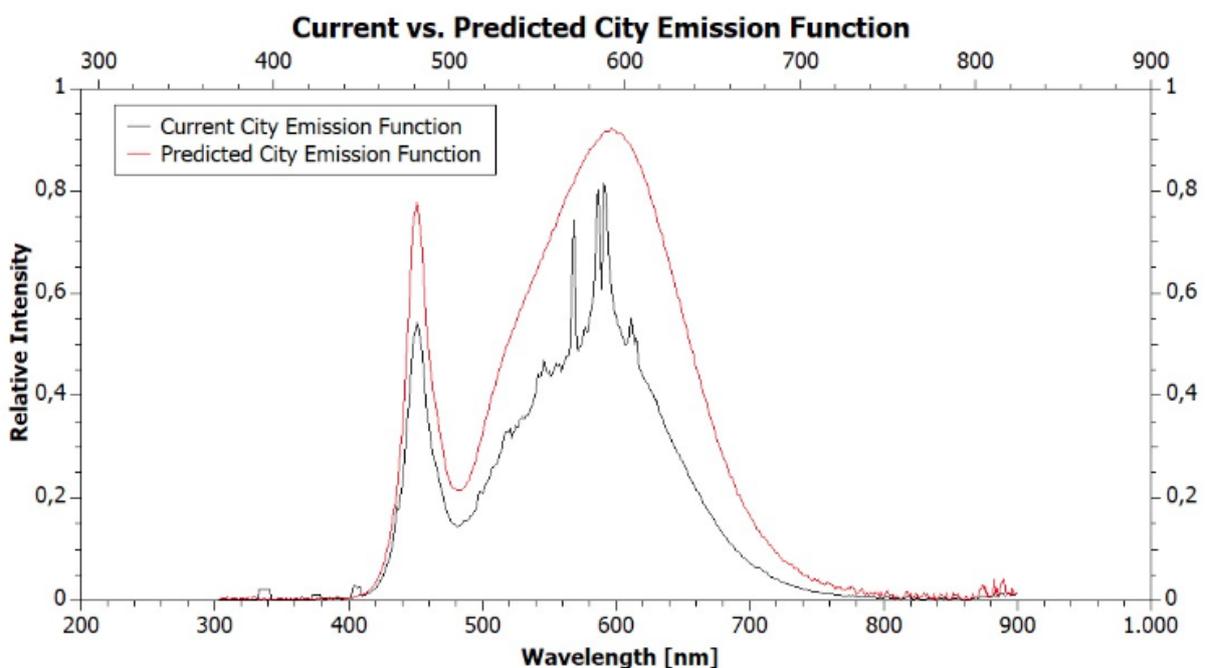


Abbildung 1 – Vergleich des Emissionsspektrums von Bad Leonfelden vor (Current – schwarz) sowie theoretisch nach Umstellung aller Leuchten (die nicht bereits auf LEDs umgerüstet wurden) auf 3000K LEDs.

Für die Erstellung eines präzisen Modells der Lichtverschmutzungssituation wurden folgende Besonderheiten berücksichtigt: Die Grenzen des untersuchten Gebiets orientieren sich nicht an den politischen Grenzen der Stadt, sondern an der tatsächlichen Ausbreitung der Lichtverschmutzung. Es wurden alle öffentlichen Lampen in der Kleinstadt erfasst und kategorisiert, was als Grundlage für die Modellierung der Lichtverschmutzung dient. Dabei ist zu beachten, dass nur die öffentliche Beleuchtung umgestellt wird.

Die Analyse der bestehenden und der geplanten Beleuchtung zeigt interessante Unterschiede in deren Eigenschaften. Beide Beleuchtungsarten weisen zwar eine höhere Intensität im blauen Bereich des Lichtspektrums auf, jedoch wird durch die Umstellung auf 3000 Kelvin LED-Lampen eine Verschiebung zu wärmeren Farbtönen erreicht. Dies bedeutet konkret eine relative Abnahme des Blaulichts zugunsten mittlerer Wellenlängen, was zu einem angenehmeren, wärmeren Licht führt.

Für die Untersuchung wurden verschiedene Simulationen durchgeführt, die unterschiedliche Faktoren berücksichtigen:

- Den Vergleich zwischen aktueller und zukünftiger Beleuchtung

- Verschiedene Standorte in und um Bad Leonfelden
- Bewölkte und klare Wetterbedingungen
- Den Einfluss der Stadt Linz
- Die spezifischen Eigenschaften der Messgeräte (Sky Quality Meter - SQM)

Die Messungen wurden an strategisch wichtigen Punkten durchgeführt:

- An den Standorten bestehender Messgeräte, um die Modelle mit tatsächlichen Messwerten vergleichen zu können
- In verschiedenen Entfernungen von der Stadt (bis zu 50 km)
- Unter Berücksichtigung des Einflusses der Stadt Linz

Insgesamt wurden 20 Modellierungen mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt:

Nr.	loc.	coordinates		cloudy	cloudless	with Linz	SQM sens.
1	SQM1	48,522036	14,295168		x		
1a	SQM1	48,522036	14,295168		x	x	
2	SQM4	48,495469	14,280142		x		
3	SQM4	48,495469	14,280142	x			
4	BL	48,52245	14,293438	x			
5	BL	48,52245	14,293438		x		
6	BL+5	48,476038	14,297683	x			
7	BL+10	48,43177	14,29527	x			
8	BL+15	48,3869	14,29679	x			
9	BL+20	48,342463	14,293198	x			
10	BL+25	48,297299	14,290769	x			
11	BL+30	48,252314	14,296364	x			
12	BL+35	48,207312	14,296409	x			
13	BL+40	48,162315	14,28864	x			
14	BL+45	48,117603	14,286698	x			
15	BL+50	48,072528	14,282814	x			
16	BL+50	48,072528	14,282814		x		
17	SQM4	48,495469	14,280142	x		x	
18	SQM4	48,495469	14,280142		x	x	
19	SQM1	48,522036	14,295168		x	x	x
20	SQM4	48,495469	14,280142		x	x	x

Abbildung 2 – Tabelle, die die unterschiedlichen Modellierungen und Parameter für diese auflistet. Loc. = Standort der Modellierung (SQM = Standort eines installierten SQMs, SQM1 = Innenstadt, SQM4 = Feuerwehr Dietrichschlag), coordinates = Koordinaten (Längengrad, Breitengrad), cloudy = bewölkter Himmel, cloudless = klarer Himmel, with Linz = Inklusion von Linz in die Modellierung, SQM sens. = Inklusion der SQM-Sensitivität in die Modellierung

Die Resultate und Erkenntnisse der Modellierungen werden in den folgenden Kapitel dargestellt. Die Modellierungen bzw. deren genutzte Parameter werden durch die Nr. M1 – M20 definiert, wie in der Tabelle in Abbildung 2 dargestellt.

2.2 | Erkenntnisse aus den Modellierungen

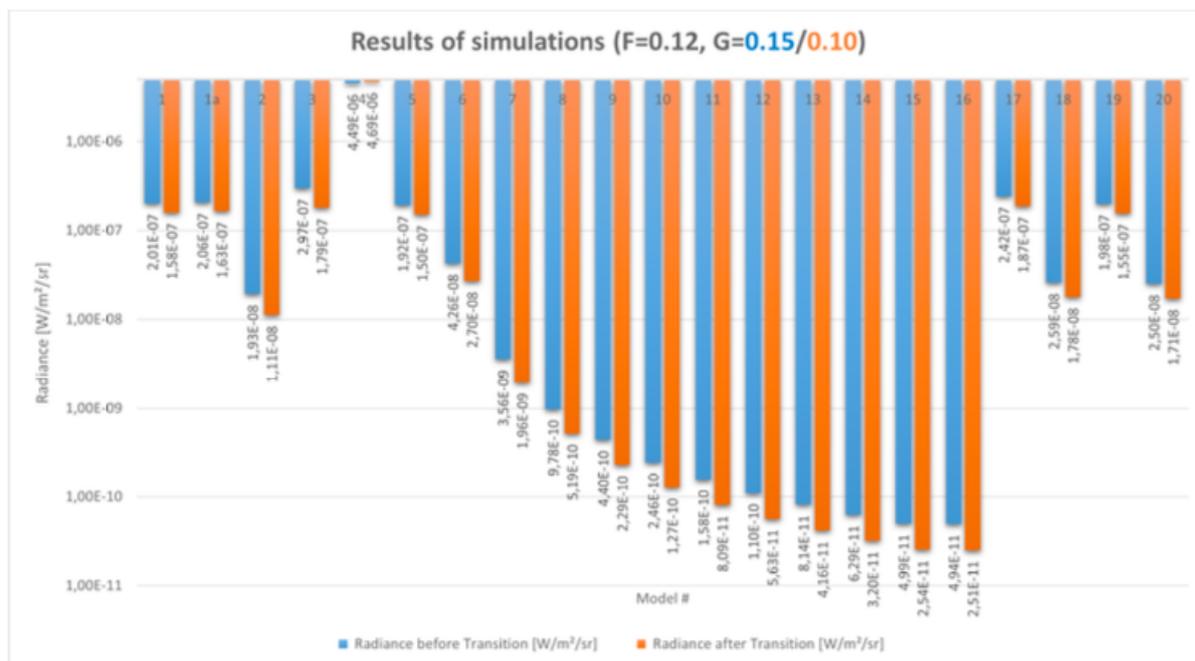


Abbildung 3 - Zusammenfassung der Strahlendichte des Nachthimmels im Zenith vor (blau) bzw. nach der Umstellung (orange) für die jeweiligen Modellierungen 1-20.

Die modellierten Helligkeitswerte zeigen eine deutliche Abhängigkeit von den Bewölkungsverhältnissen. Während die Modelle 1, 1a und 2 Simulationen bei klarem Himmel darstellen, zeigt die einzige Simulation unter bewölkten Bedingungen höhere Helligkeitswerte, obwohl der Messpunkt weiter von der Stadt entfernt liegt. Der Unterschied zwischen den Modellen 1 und 1a ist dabei minimal, was allerdings nur für unbewölkte Bedingungen gilt. Daraus lässt sich schließen, dass der Einfluss der Stadt Linz in nur geringem Ausmaß erkennbar sein sollte.

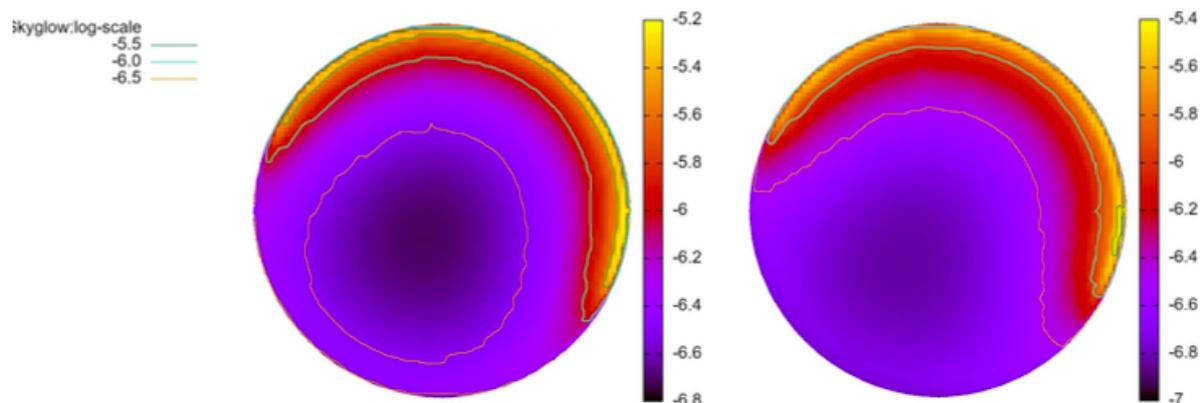


Abbildung 4 - M1 vor (links) bzw. nach (rechts) der simulierten Umstellung: In beiden Bildern – vorher und nachher – erscheint der dunkelste Fleck nahe der Mitte. Anders verhält es sich jedoch in Horizontnähe: Im rechten Bild erstreckt sich der dunkle Bereich bis ganz an den Rand. Ähnlich verhält es sich auch am gegenüberliegenden Rand (oberer Teil), denn auch dort wird es dunkler. Zu beachten ist die (durch die Software unveränderbare) leicht veränderte Legende (siehe Werte).

Bei einem Vergleich der Werte mit der veränderten Abstrahlcharakteristik zeigen sich interessante Merkmale. In allen Fällen ist eine Abnahme der Helligkeit erkennbar. Die Modelle 1 und 1a weisen dabei einen identischen Rückgang von 21 Prozent auf. Bemerkenswert ist, dass Modell 2 mit 42 Prozent einen deutlich stärkeren Rückgang verzeichnet. Ähnlich verhält es sich bei Modell 3, das einen vergleichbaren Rückgang von etwa 40 Prozent aufweist. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Helligkeit besonders in größeren Entfernungen deutlich abnimmt. Bei bewölkten Bedingungen fällt die Helligkeitsreduktion allerdings etwas geringer aus, wie die Modelle zeigen.

Der beobachtete Trend der Helligkeitsabnahme bleibt auch bei der veränderten Abstrahlcharakteristik bestehen, jedoch zeigen sich bei geringen Entfernungen leichte Unterschiede. Hierbei ist eine wichtige Einschränkung des Modells zu beachten: Ab einer bestimmten Entfernung werden Mehrfachstreuungsprozesse dominant, die das Modell nicht berücksichtigt. Die ermittelten Daten können daher nur als Näherungswerte dienen. Die geringen Schwankungen, die im Entfernungsbereich von 15 bis 50 Kilometern auftreten, lassen sich zumindest teilweise auf diese modellbedingte Ungenauigkeit zurückführen.

Die vergleichende Analyse der Messungen unter bewölkten und unbewölkten Bedingungen wurde sowohl im Stadtzentrum (Modelle 4 und 5) als auch in 50 Kilometer Entfernung (Modelle 15 und 16) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen dabei zwei deutlich unterschiedliche Entwicklungen.

Unter bewölkten Bedingungen wurden durchweg höhere Helligkeitswerte gemessen. Der Übergang von bewölkten zu klaren Bedingungen führt im Stadtzentrum zu einer erheblichen Reduktion der Helligkeit um 96 Prozent, während in 50 Kilometer Entfernung nur eine minimale Abnahme von einem Prozent zu verzeichnen ist.

Besonders interessant sind die Ergebnisse mit der neuen Abstrahlcharakteristik der Beleuchtung. Das Modell zeigt, dass unter bewölkten Bedingungen im Stadtzentrum die neue Beleuchtung zu einer leichten Zunahme der Helligkeit um 4 Prozent führt. Jedoch in bereits geringer Distanz zum Stadtzentrum bishin zu einer Entfernung von 50 Kilometern kehrt sich dieser Trend um, und es wird eine deutliche Abnahme um 49 Prozent prognostiziert. Die Zunahme im Stadtzentrum ist nicht überraschend, da hier einerseits eine Rückstreuung der Wolken in Addition zu einer Reflexion der Full-Cutoff-Leuchten dies erreichen kann. Bei klarem Himmel zeigt sich an beiden Standorten eine Reduzierung der Helligkeit, wobei im Zentrum ein Rückgang um 22 Prozent und in 50 Kilometer Entfernung eine Abnahme um 49 Prozent zu erwarten ist. Diese unterschiedlichen Effekte lassen sich dadurch erklären, dass in größerer Entfernung bereits ein erheblicher Teil des Lichts durch Streuung verloren geht. Im Stadtzentrum ist dies noch nicht der Fall, insbesondere da das rötlichere Licht der neuen Beleuchtung weniger stark gestreut wird.

Die Modelle 17 bis 20 berücksichtigen alle den Einfluss der Stadt Linz auf die Lichtverschmutzung. Eine detaillierte Analyse der Modelle 17 und 18, die beide am Standort SQM4 erstellt wurden, zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher Wetterbedingungen. Der einzige Unterschied zwischen diesen Modellen liegt in den Bewölkungsverhältnissen, wobei zu beachten ist, dass nur die Abstrahlcharakteristik von Bad Leonfelden verändert wurde, nicht aber die von Linz. Die Simulationen bei klarem Himmel ergeben deutlich geringere Helligkeitswerte mit einer Reduktion um 89 Prozent. Mit der neuen Abstrahlcharakteristik zeigt sich sowohl bei bewölkten als auch bei klaren Bedingungen eine Abnahme der Helligkeit, wobei der Effekt bei klarem Himmel mit 31 Prozent stärker ausfällt als bei Bewölkung mit 23 Prozent. Dies bestätigt die bisherigen Erkenntnisse über den Einfluss der Bewölkung auf die Lichtverteilung. Im Vergleich zeigt sich bei bewölktem Himmel eine Reduktion um 89 Prozent, während bei klarem Himmel ein Rückgang um 90 Prozent zu verzeichnen ist.

Die Beobachtungen vom Standort SQM4 (Feuerwehr Dietrichschlag) liefern weitere aufschlussreiche Erkenntnisse. Die Analysen bei bewölkten und klaren Bedingungen zeigen in beiden Fällen eine leichte Abnahme der Helligkeit, die besonders im Zenith und dessen Umgebung deutlich wird. Die Stadt Linz ist in allen vier Aufnahmen deutlich im Süden zu erkennen. Erwartungsgemäß bleibt der Einfluss von Linz

konstant, da dessen Beleuchtungscharakteristik nicht verändert wurde. Interessanterweise ist die von Linz ausgehende Helligkeit bei klarem Himmel etwas höher, da unter diesen Bedingungen mehr Licht gestreut wird.

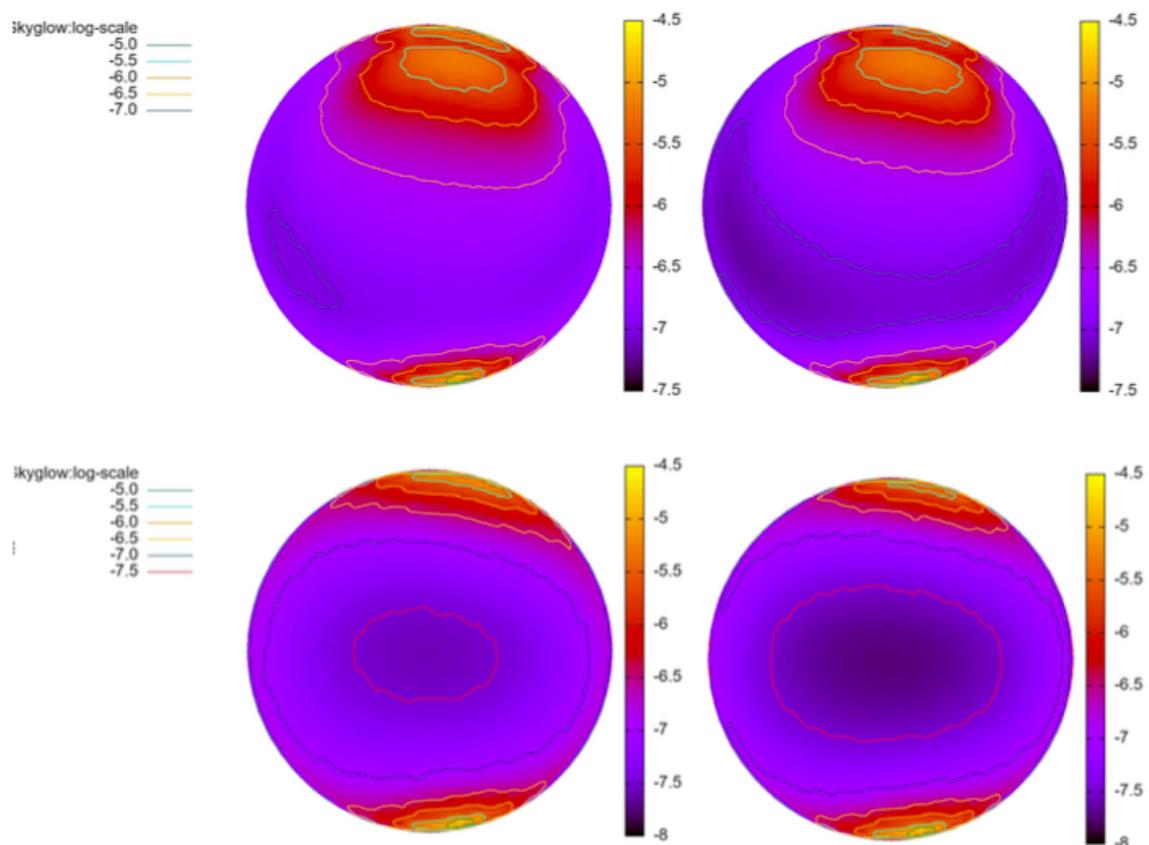


Abbildung 5 – Ganzhimmelsansichten der Modellierungsergebnisse aus Nr. 17 und 18. Oben: Ergebnisse der Modellierung M17 (Standort Feuerwehr Dietrichschlag inkl. Inklusion von Linz) vor (links) bzw. nach (rechts) der Umstellung bei bewölktem Himmel. Unten: Dieselben Modellierungen für klaren Himmel.

Obwohl Linz mit seiner Schwerindustrie eine bedeutende Quelle der Lichtverschmutzung darstellt und das Himmelleuchten in Bad Leonfelden in allen Konfigurationen beeinflusst, zeigt das Modell, dass die Auswirkungen der Beleuchtungsumstellung in Bad Leonfelden trotzdem eindeutig nachweisbar sind. Auch wenn Linz in den resultierenden Modellierungsergebnissen als deutliche Quelle der Lichtverschmutzung erkennbar ist, beeinträchtigt dies nicht die Aussagekraft der Ergebnisse über die Veränderungen des Lichtschleiers über Bad Leonfelden.

Die Modelle 19 und 20 entsprechen in ihrer Konfiguration dem Modell 18, wurden jedoch an zwei verschiedenen Standorten durchgeführt und berücksichtigen zusätzlich die spezifische spektrale Empfindlichkeit des Sky Quality Meters (SQM). Diese Modelle simulieren somit, wie das SQM-Messgerät den Nachthimmel wahrnimmt.

Modell 19 lässt sich direkt mit Modell 1a vergleichen, da der einzige Unterschied in der Berücksichtigung der spektralen Empfindlichkeit liegt. Wie erwartet zeigt sich bei der Messung im Zenit eine etwas geringere Helligkeit, wenn die SQM-Sensitivität berücksichtigt wird, verglichen mit der Erfassung aller Wellenlängen. Ein wichtiger technischer Aspekt dabei ist, dass die verwendete Software "Skyglow" die Abstrahlcharakteristik auf den Maximalwert skaliert. Dies führt dazu, dass trotz der Zunahme von Licht im langwelligen Bereich eine Abnahme der gemessenen Helligkeit zu beobachten ist, da das SQM für diese Wellenlängen weniger empfindlich ist.

Ein ähnlicher Effekt zeigt sich auch in Modell 20, das Messungen in größerer Entfernung am Standort SQM3 simuliert. Hier ist sowohl in Modell 18 (ohne SQM-Sensitivität) als auch in Modell 20 (mit SQM-Sensitivität) eine Abnahme der Helligkeit zu verzeichnen, wobei dieser Effekt in Modell 20 noch etwas deutlicher ausgeprägt ist.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der messtechnischen Eigenschaften bei der Bewertung der Beleuchtungsumstellung und zeigen, dass die erwarteten positiven Effekte auch mit standardisierten Messverfahren nachweisbar sind, selbst wenn diese eine spezifische spektrale Empfindlichkeit aufweisen.

3 | Analysen des lokalen Messnetzes

3.1 | Installation der Messgeräte

Zur Begleitung zu den theoretischen Modellen wurde ein permanentes Messnetz eingerichtet. Dieses basiert auf eindimensionale photometrische Sensoren, Sky Quality Metern (SQM), die an strategisch wichtigen Punkten im Gemeindegebiet installiert wurden. Die SQMs messen kontinuierlich die Himmelselligkeit in der Einheit Magnitude pro Quadratbogensekunde ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$) und ermöglichen damit eine objektive Quantifizierung der Lichtverschmutzung.

Die Standortwahl für die Messgeräte erfolgte nach einer sorgfältigen Analyse der lokalen Gegebenheiten. Dabei wurden verschiedene Faktoren berücksichtigt, wie etwa die Nähe zu bedeutenden Lichtquellen, die topografische Situation und die Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten. Das Messnetz wurde so konzipiert, dass sowohl zentrale Bereiche der Gemeinde als auch Randgebiete erfasst werden, um ein möglichst umfassendes Bild der Lichtsituation zu erhalten.

Die Installation der Messgeräte erfolgte nach wissenschaftlichen Kriterien, um hochwertige und vergleichbare Daten zu gewährleisten. Jedes SQM wurde präzise ausgerichtet und vom Hersteller kalibriert. Die Messgeräte wurden mit Wetterschutzgehäusen ausgestattet und an das Datennetzwerk angeschlossen, um eine kontinuierliche Datenerfassung zu ermöglichen.

Die Datenübertragung erfolgte automatisiert in Echtzeit, wodurch eine lückenlose Dokumentation der Lichtverhältnisse gewährleistet ist. Die Messwerte wurden in einer zentralen Datenbank gespeichert und stehen für weitere Analysen zur Verfügung.

Für die Datenerfassung wurden die folgenden vorhandenen SQM-Messstationen verwendet:

1. Veranstaltungszentrum Hauptplatz
(Daten: „SQMLE @ SQMTEST“)
Messbeginn: 14.03.2022
Messende: 31.12.2023
2. Kindergarten Bad Leonfelden
(Daten: „SQMLE @ BL2KG“)
Messbeginn: 15.03.2022
Messende: 14.12.2022
3. Feuerwehr Dietrichschlag
(Daten: „SQMLE @ BL3FW“)
Messbeginn: 03.04.2022
Messende: 31.12.2023
4. Siedlungsgebiet Haid
(Daten: „SQMLE @ BL4HA“)
Messbeginn: 31.03.2022
Messende: 31.12.2023

3.2 | Erkenntnisse aus den Messungen

Die Analyse der Sky Quality Meter (SQM)-Messungen stellt sich als komplexe Herausforderung dar, da sie detaillierte Kenntnisse verschiedener Einflussfaktoren erfordert. Für eine präzise Bewertung wäre ein

umfassendes Verständnis der meteorologischen Bedingungen und der atmosphärischen Zusammensetzung erforderlich. Auch Veränderungen in der Abstrahlcharakteristik der Stadt, etwa durch die Energiekrise in Europa, müssten berücksichtigt werden.

Aufgrund dieser Einschränkungen ist es schwierig, allein auf Basis der SQM-Messungen einen übergreifenden Trend abzuleiten. Die aus den Näherungen gewonnenen Trends geben lediglich Aufschluss über die Veränderung der allgemeinen Beleuchtungssituation. Der spezifische Einfluss der Umstellung lässt sich dabei nicht eindeutig isolieren. Diese methodischen Einschränkungen müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, um zu einer ausgewogenen Bewertung der Beleuchtungsumstellung zu gelangen.

Die gewonnenen Daten von 2022 und 2023 von Bad Leonfelden werden miteinander verglichen und in verschiedenen Plots repräsentativ dargestellt. Diese sind zu sehen in Abbildung 6 - Abbildung 29. Die Darstellung der Daten erfolgt auf vier verschiedenen Arten:

- Mean Night Sky Brightness (NSB) histograms (<NSB> - Histograms)
- Regularity of the circular <NSB> - variation
- "Sanduhren" Diagramme ("Hourglass" Plots)
- "Quallen" Diagramme (Density plots / "Jellyfish" plots)

Jede dieser verschiedenen Grafiken Typen wird zuerst erklärt und danach werden die Ergebnisse so präsentiert, dass ein Vergleich zwischen den beiden Jahren und denselben Stationen vorliegt.

Mean Night Sky Brightness (NSB) histograms (<NSB> - Histograms)

Um die Dunkelheit oder die Lichtverschmutzung eines Standortes zu charakterisieren, können sogenannte NSB-Histogramme verwendet werden. Dafür werden die NSB-Werte in gleich große Intervalle eingeteilt und für jedes Intervall wird die Anzahl der Datenpunkte auf der y-Achse dargestellt. Die Gesamthäufigkeit wird auf der linken y-Achse angezeigt. Zusätzlich ist die normalisierte Häufigkeit der NSB-Werte bis zu jedem Magnituden Intervall als dunkelgrüne Kurve dargestellt. Diese sind in Abbildung 6 - Abbildung 11 einzusehen.

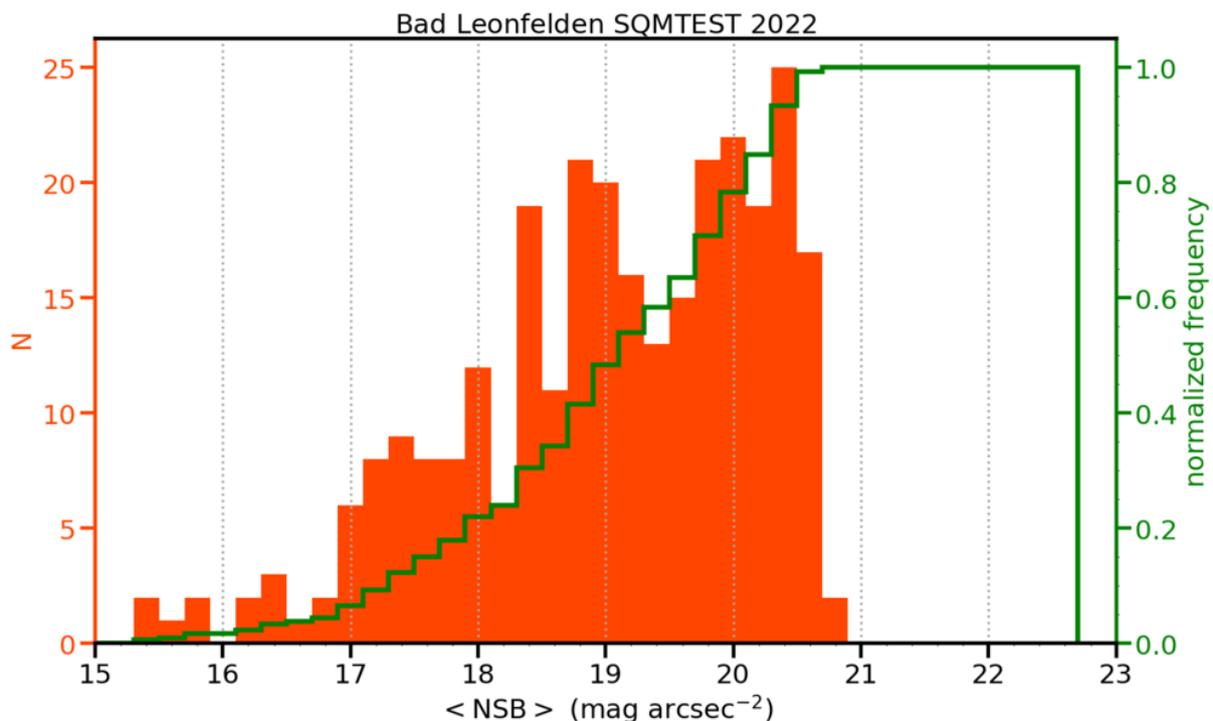


Abbildung 6 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als <NSB> Histogramm der SQM Station SQMTEST vom Jahr 2022

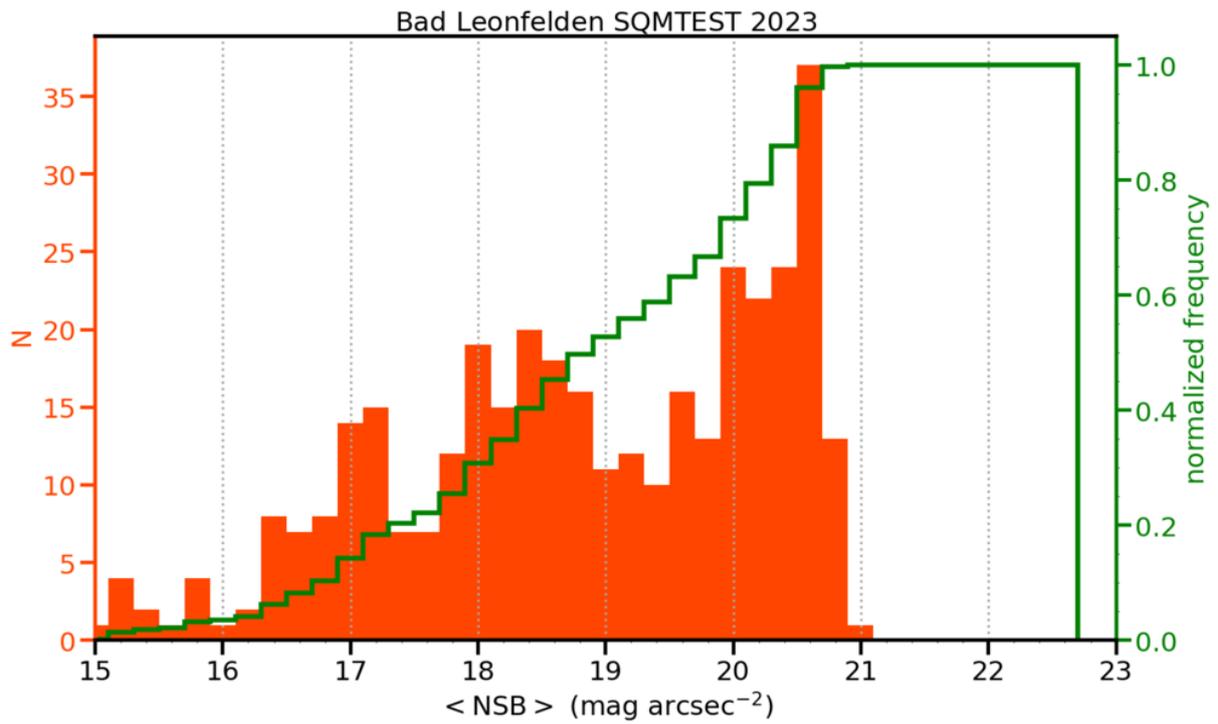


Abbildung 7 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als <NSB> Histogramm der SQM Station SQMTEST vom Jahr 2023

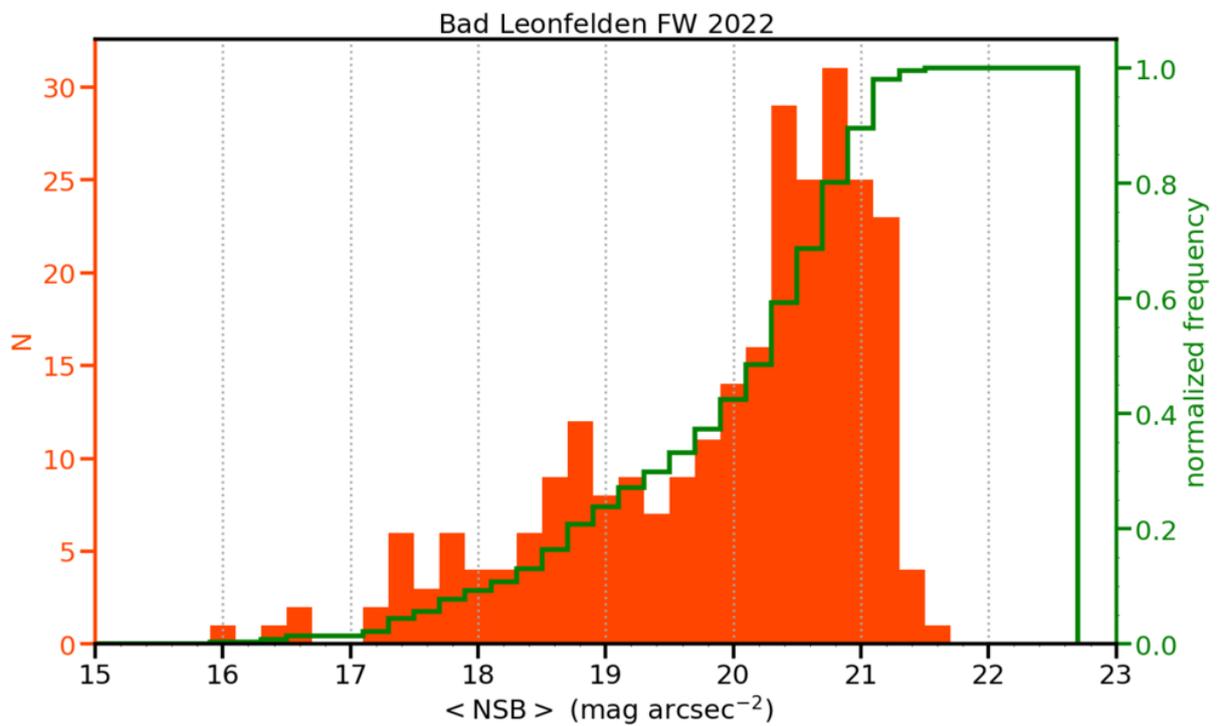


Abbildung 8 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als <NSB> Histogramm der SQM Station BL3FW vom Jahr 2022

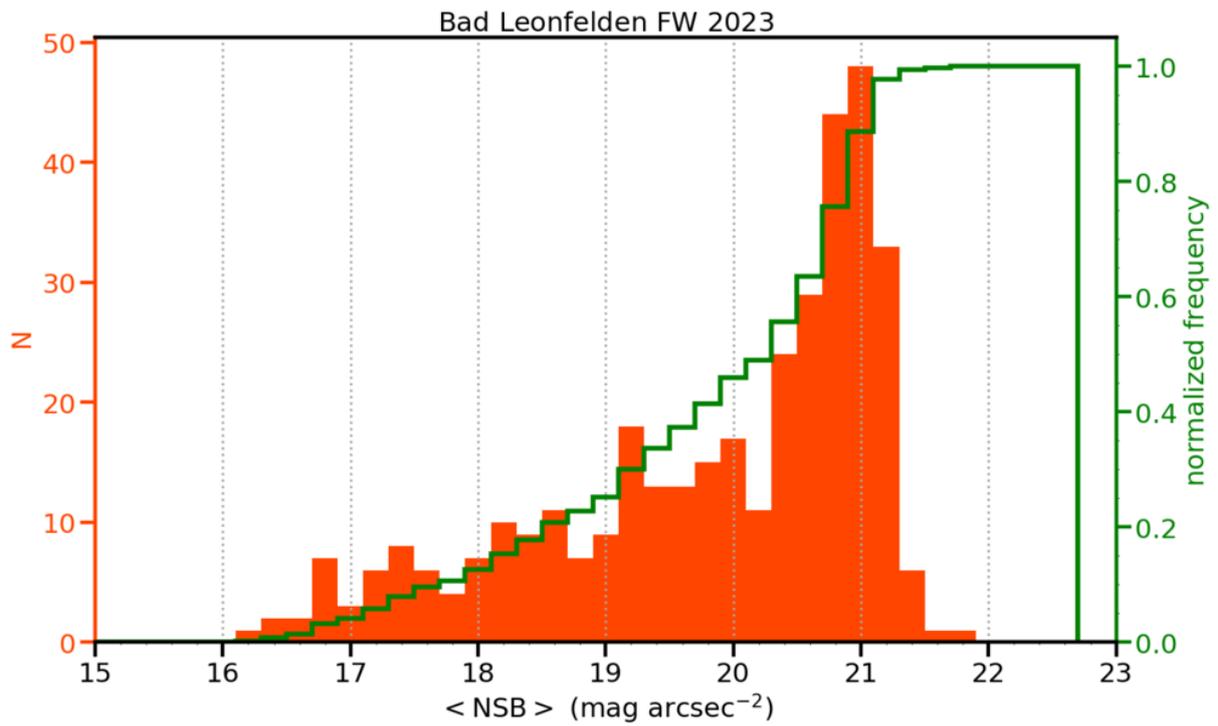


Abbildung 9 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als <NSB> Histogramm der SQM Station BL3FW vom Jahr 2023

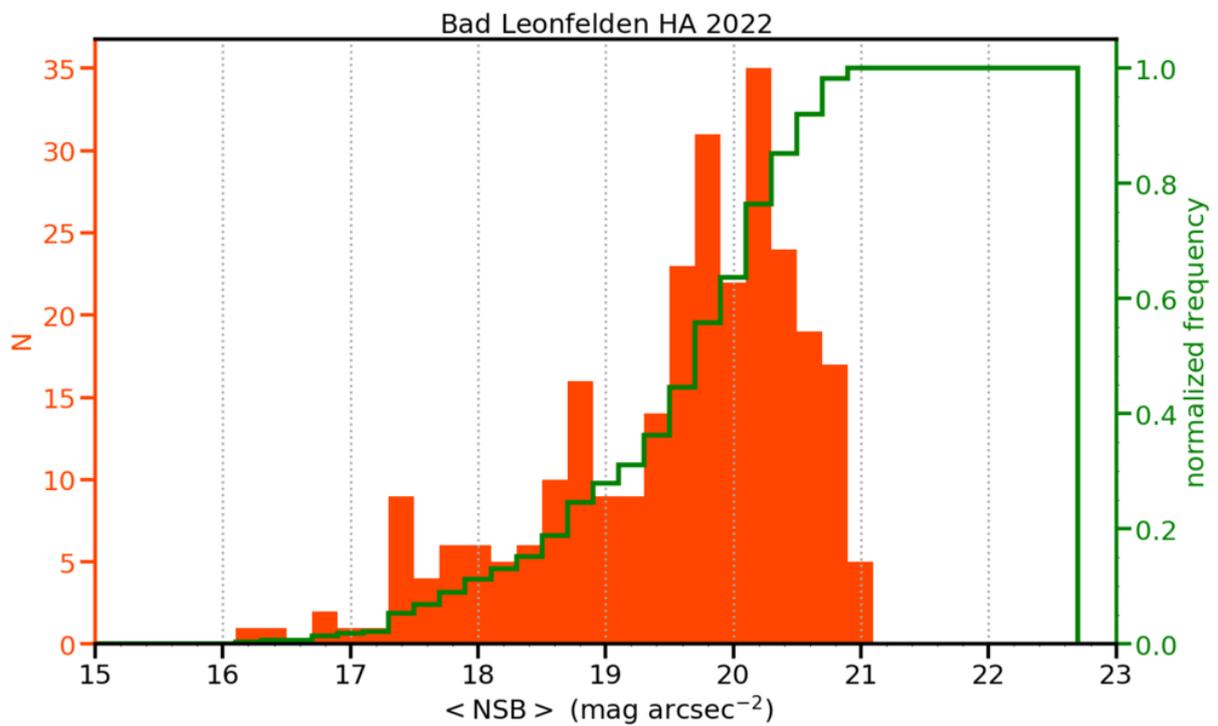


Abbildung 10 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als <NSB> Histogramm der SQM Station BL4HA vom Jahr 2022

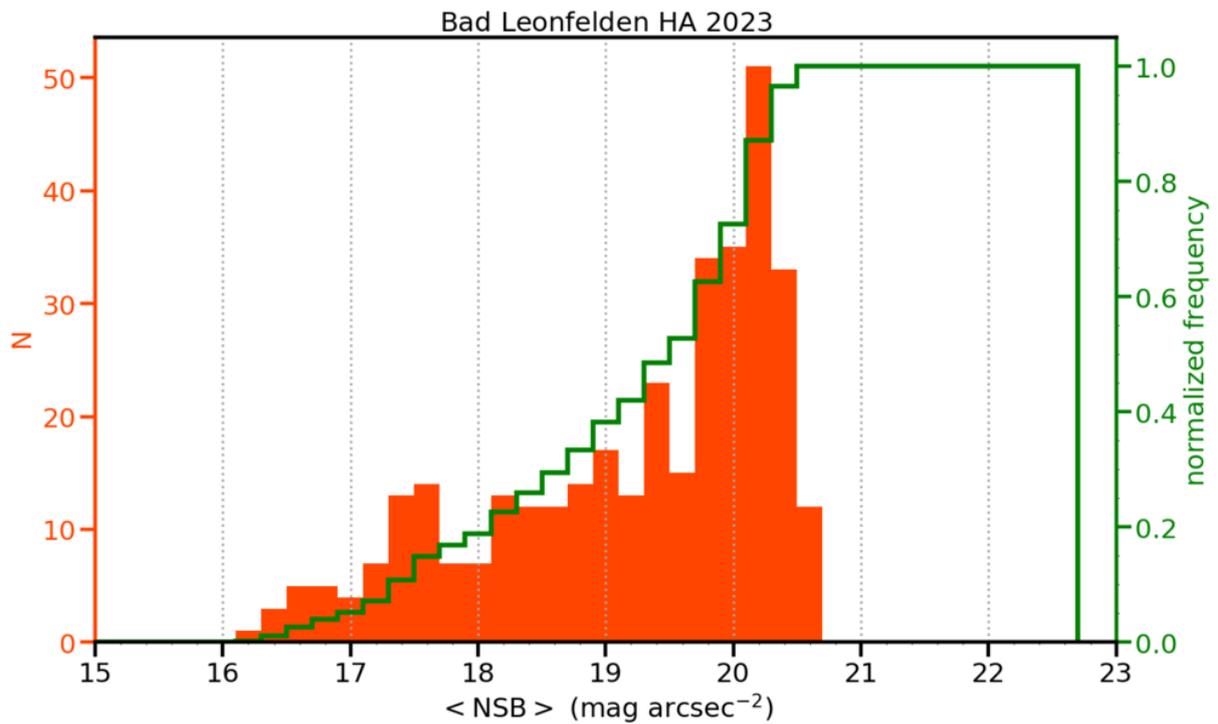
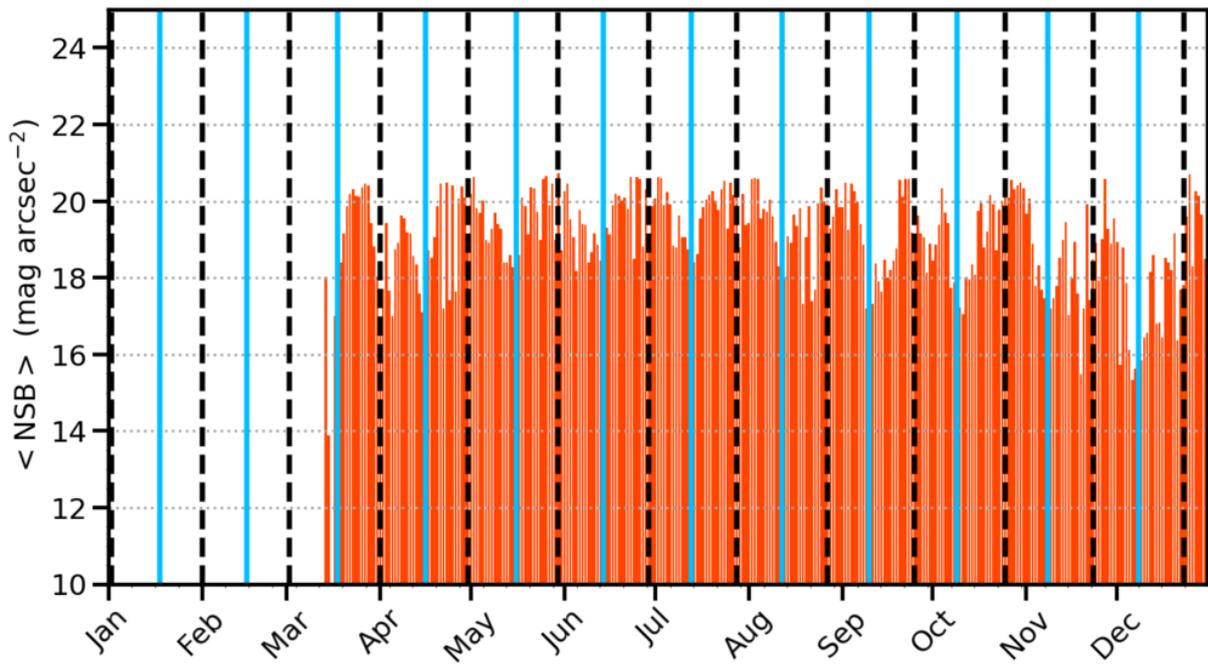


Abbildung 11 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als <NSB> Histogramm der SQM Station BL4HA vom Jahr 2023

Regularity of the circular <NSB> - variation

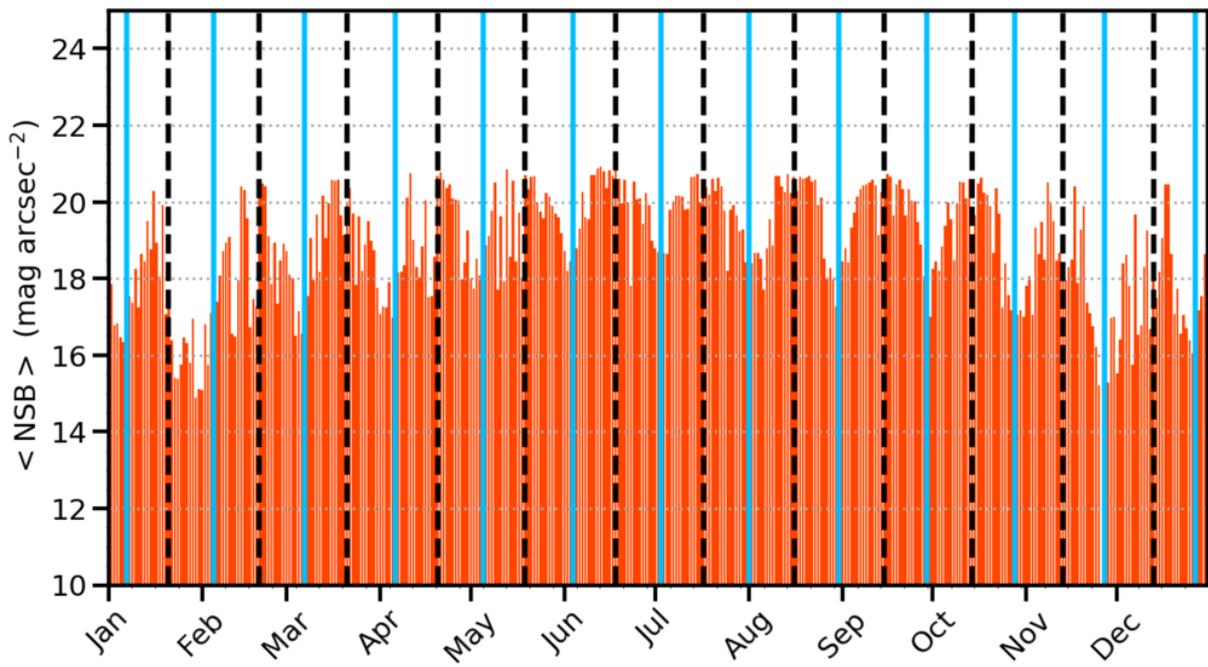
Eine andere Variante der Darstellung der Analyse von Lichtverschmutzung besteht darin, Diagramme der zirkularen Variation der mittleren NSB zu erstellen. Je naturbelassener der Himmel ist, desto stärker ist die Korrelation zwischen der NSB und der Mondphase.

In den erstellten Diagrammen (Abbildung 12 - Abbildung 17) sind Vollmondnächte durch durchgezogene (hellblaue) vertikale Linien gekennzeichnet, während die Zeiten des Neumondes durch gestrichelte (schwarze) vertikale Linien markiert sind. Die Dunkelheit jeder Nacht wird durch die Höhe der vielen schmalen roten vertikalen Linien charakterisiert, die verschiedene Werte erreichen.



Bad Leonfelden SQMTEST 2022

Abbildung 12 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als zirkulares <NSB> Histogramm der SQM Station SQMTEST vom Jahr 2022



Bad Leonfelden SQMTEST 2023

Abbildung 13 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als zirkulares <NSB> Histogramm der SQM Station SQMTEST vom Jahr 2023

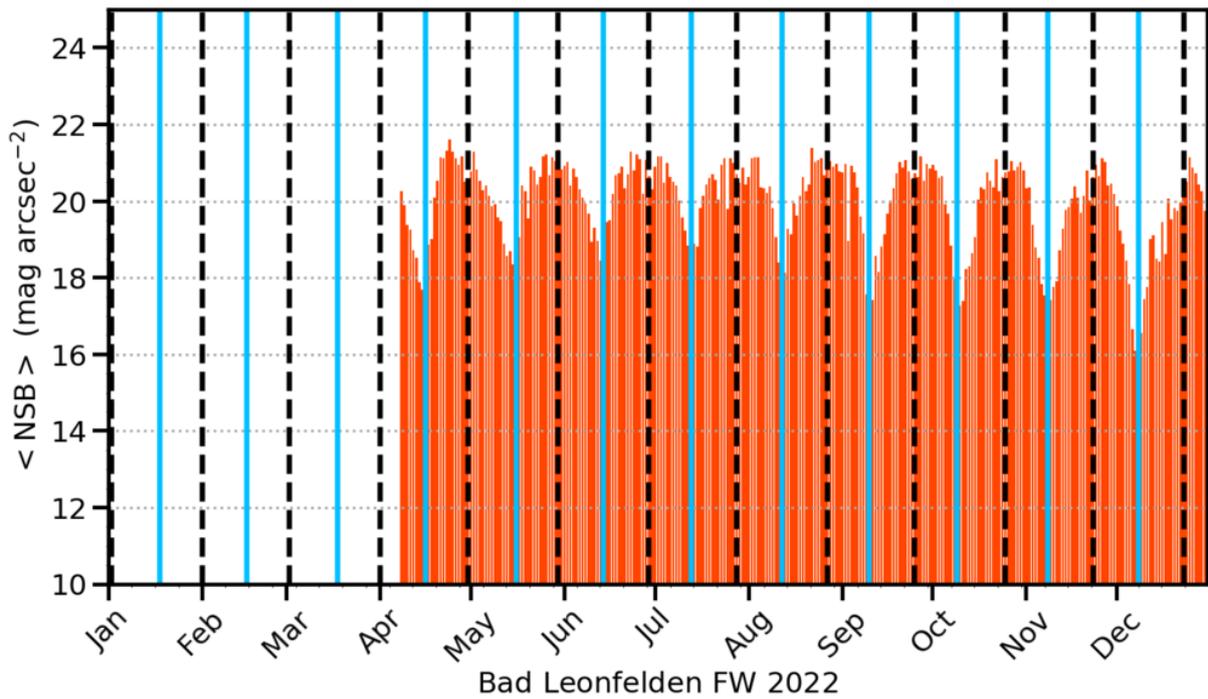


Abbildung 14 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als zirkulares $\langle NSB \rangle$ Histogramm der SQM Station BL3WF vom Jahr 2022

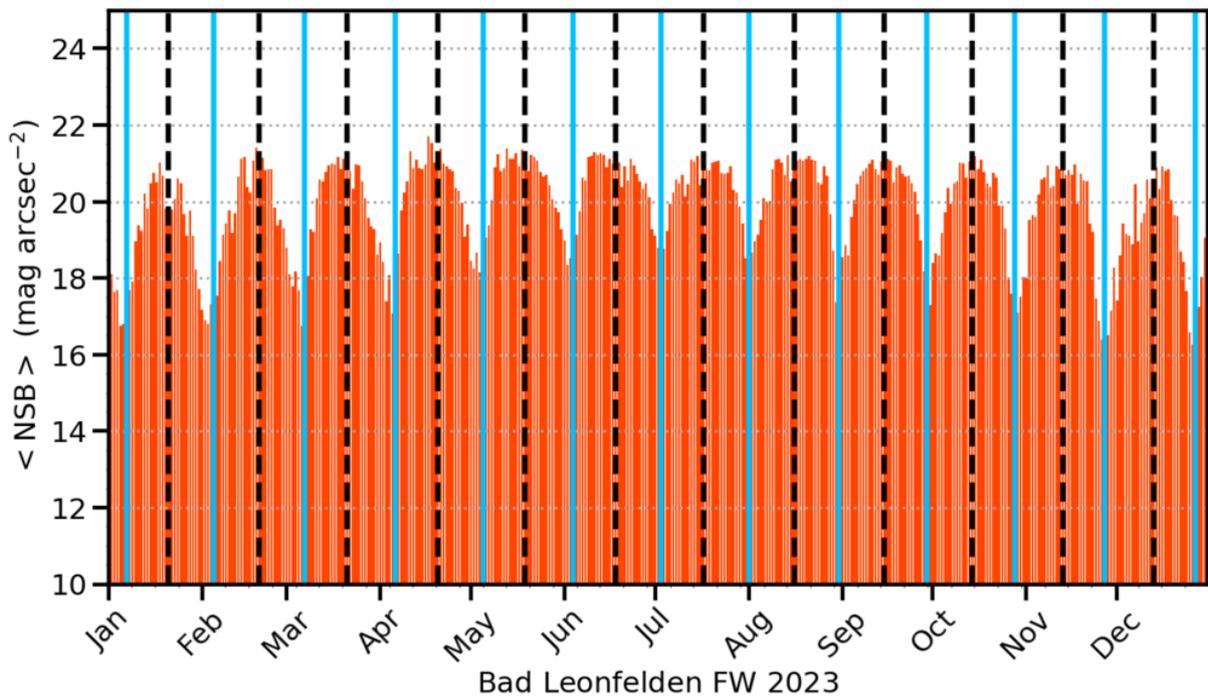


Abbildung 15 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als zirkulares $\langle NSB \rangle$ Histogramm der SQM Station BL3WF vom Jahr 2023

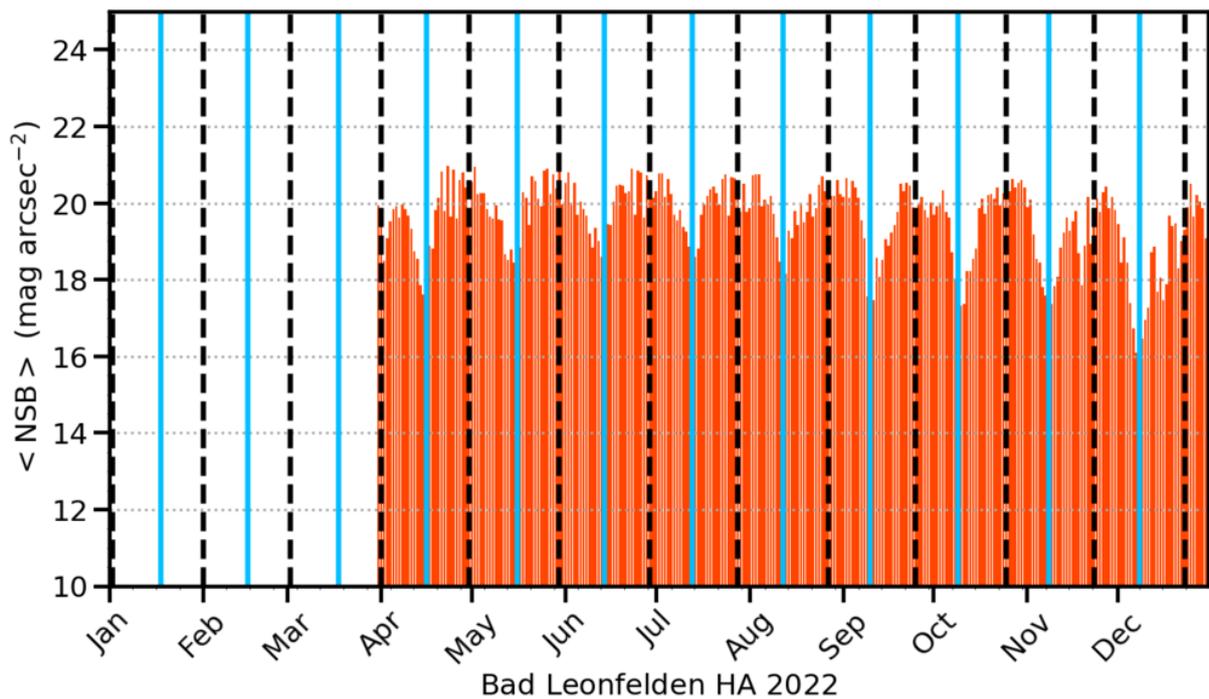


Abbildung 16 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als zirkulares $\langle NSB \rangle$ Histogramm der SQM Station BL4HA vom Jahr 2022

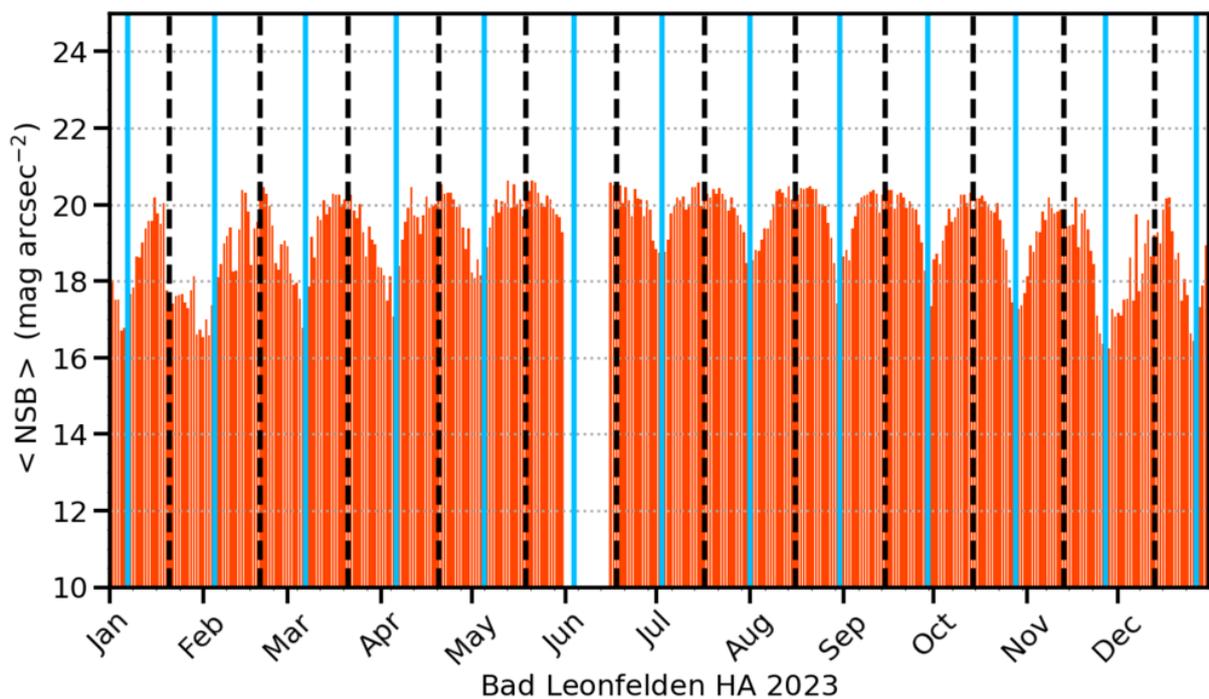


Abbildung 17 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als zirkulares $\langle NSB \rangle$ Histogramm der SQM Station BL4HA vom Jahr 2023

“Sanduhren”-Diagramme (“Hourglass” Plots)

Während die vorherigen Abbildungen und Abschnitte auf der Analyse von mittleren NSB-Werten basierten, gibt es andere Möglichkeiten, die zeitliche (insbesondere zirkulunare) Variation der Nachthimmelshelligkeit darzustellen, ohne die Werte für jede Nacht mitteln zu müssen.

Eine besonders aufschlussreiche Art von Diagramm ist das „Sanduhr“-Diagramm. Die x-Achse ist eine Zeitachse, die die Monate eines vollen Jahres enthält. Die y-Achse ist ebenfalls eine Zeitachse, die Stunden und Stundenbruchteile der einzelnen Nächte abdeckt. Eine Farb- oder Grauskala wird verwendet, um die gemessene NSB zu jedem Zeitpunkt der Nacht und des Jahres darzustellen.

Wieder kann die zirkulnare NSB-Periodizität oder ein Mangel an Periodizität in den resultierenden Diagrammen gut erkannt werden. Zusätzlich werden aber auch andere Merkmale sichtbar, z.B. die natürliche Variation der Nachtlängen, die die „Sanduhr“-Form erzeugt. Die resultierenden „Sanduhr“-Diagramme sind in Abbildung 18 - Abbildung 23 abgebildet.

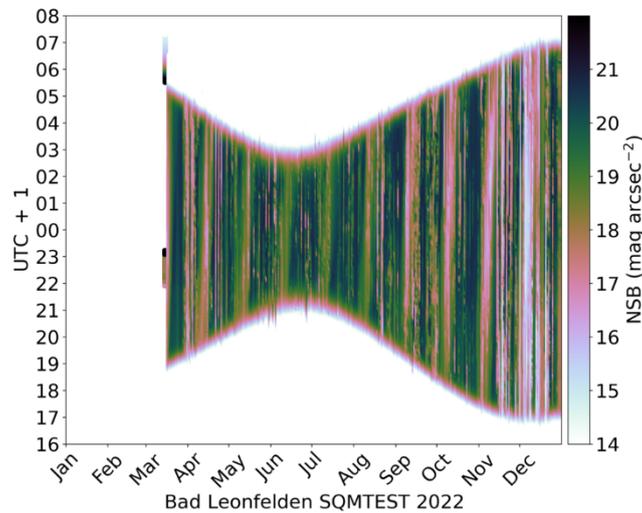


Abbildung 18 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Sanduhr“-Diagramm der SQM Station SQMTEST vom Jahr 2022

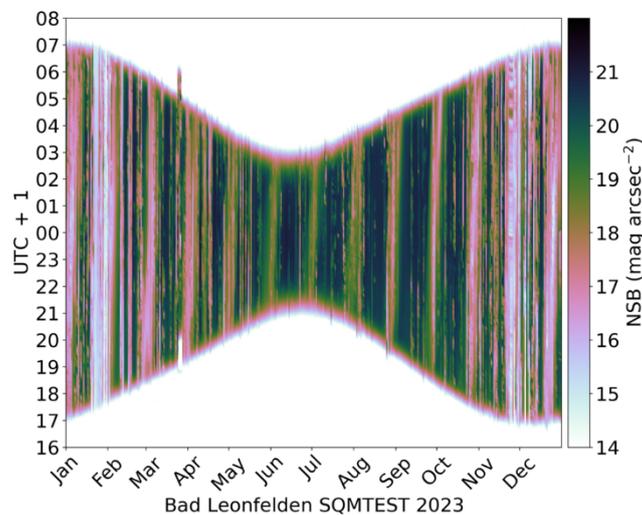


Abbildung 19 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Sanduhr“-Diagramm der SQM Station SQMTEST vom Jahr 2023

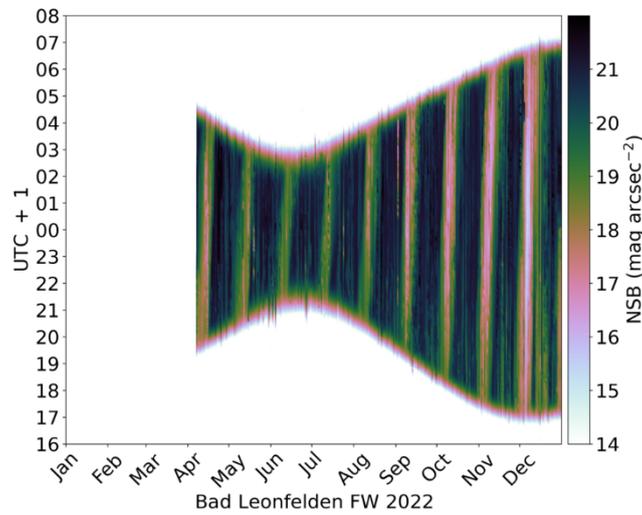


Abbildung 20 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Sanduhr“-Diagramm der SQM Station BL3FW vom Jahr 2022

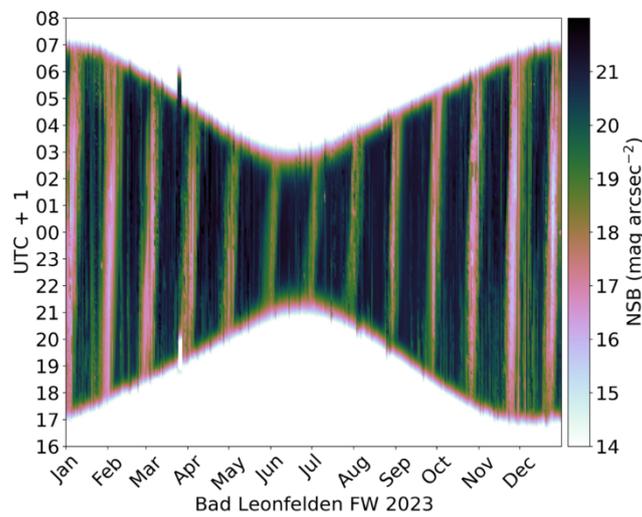


Abbildung 21 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Sanduhr“-Diagramm der SQM Station BL3WF vom Jahr 2023

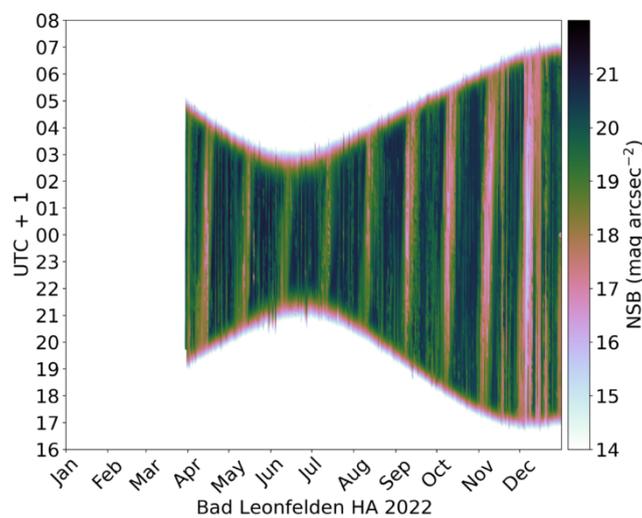


Abbildung 22 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Sanduhr“-Diagramm der SQM Station BL4HA vom Jahr 2022

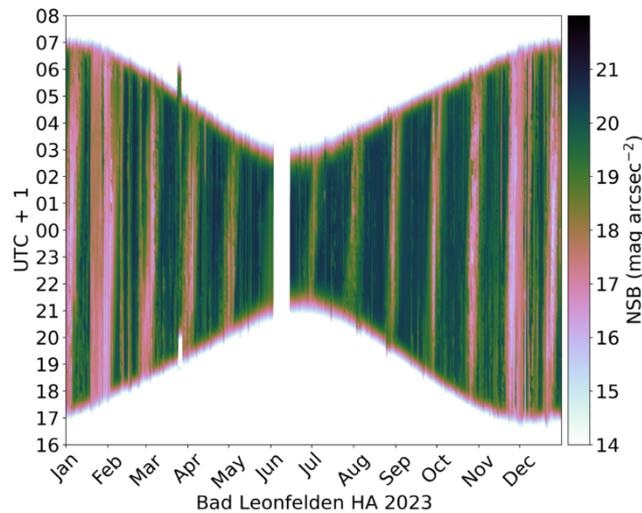


Abbildung 23 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Sanduhr“-Diagramm der SQM Station BL4HA vom Jahr 2023

„Quallen“ Diagramme (Density plots / „Jellyfish“ plots)

Im Folgenden werden Dichteplots repräsentiert, welche der Einfachheit halber aufgrund der entsprechenden Gesamtformen der entstehenden Punktwolken als 'Quallen'-Diagramme bezeichnet werden. Quallen-Diagramme für städtische, lichtverschmutzte Standorte zeigen im Normalfall zwei Cluster-Regionen, die wenig mit den Mondphasen zu tun haben, sondern klaren Nächten mit moderater Himmelsaufhellung einerseits und bedeckten Nächten mit stark verstärkter Streuung des Stadtlichts andererseits entsprechen.

Für den vertikalen Abstand einer Mittellinie durch die Cluster-Region der bedeckten Nächte und der viel stärker komprimierten Cluster-Region der klaren Nächte wird der Begriff „Spreizung“ eingeführt. Während eine große „Spreizung“ in Großstädten auftritt, verschwindet sie praktisch in den resultierenden Grafiken (Abbildung 24 - Abbildung 29). Mit anderen Worten gibt es keine signifikante verstärkte Rückstreuung von künstlichem Licht nahe dem Zenit an den Messstationen, zumindest nicht bis zu dem Punkt, dass ein Cluster bedeckter NSB unterhalb (= zur helleren Seite) des Clusters klarer Himmel NSB entstünde. Allerdings erscheinen verstreute NSB-Werte oberhalb (= zur dunkleren Seite) des Clusters klarer Himmel NSB für kaum lichtverschmutzten Regionen.

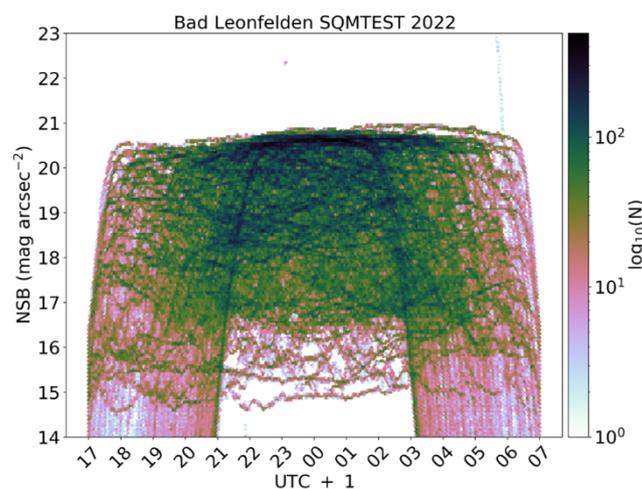


Abbildung 24 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Quallen“-Diagramm der SQM Station SQMTEST vom Jahr 2022

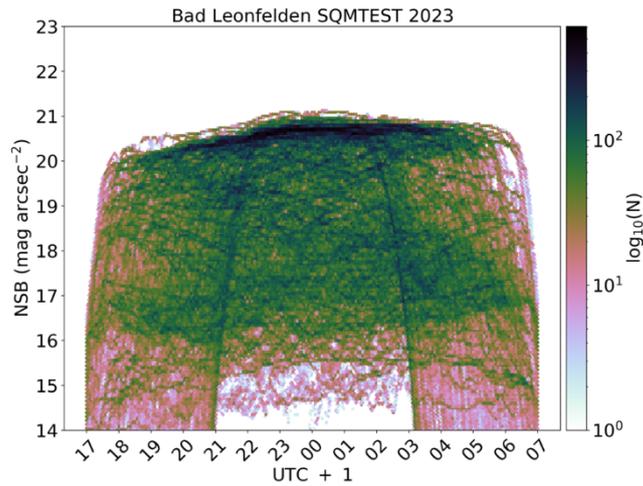


Abbildung 25 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Quallen“-Diagramm der SQM Station SQMTEST vom Jahr 2023

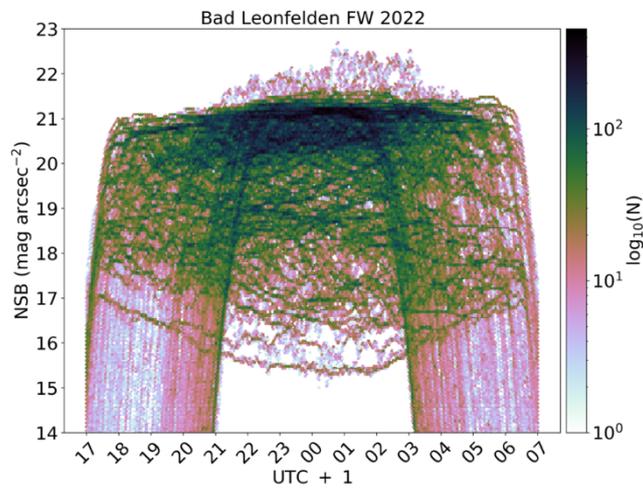


Abbildung 26 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Quallen“-Diagramm der SQM Station BL3FW vom Jahr 2022

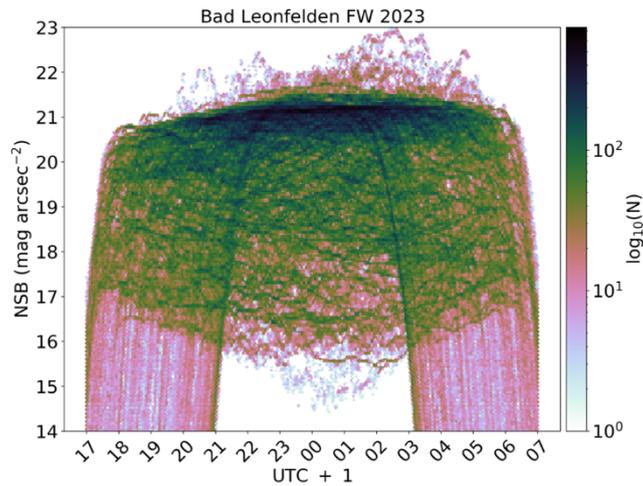


Abbildung 27 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Quallen“-Diagramm der SQM Station BL3FW vom Jahr 2023

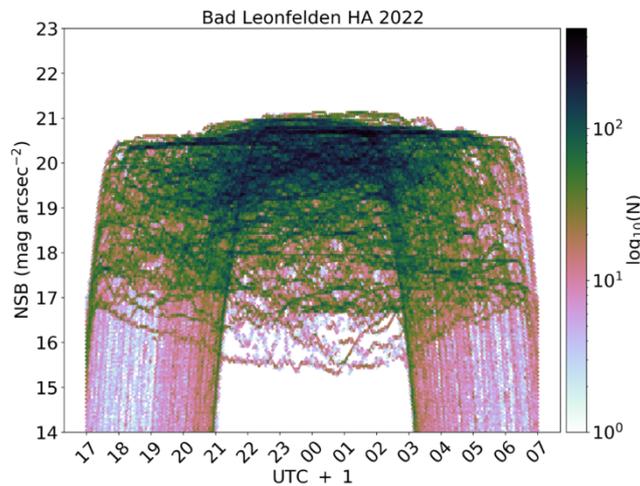


Abbildung 28 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Quallen“-Diagramm der SQM Station BL4HA vom Jahr 2022

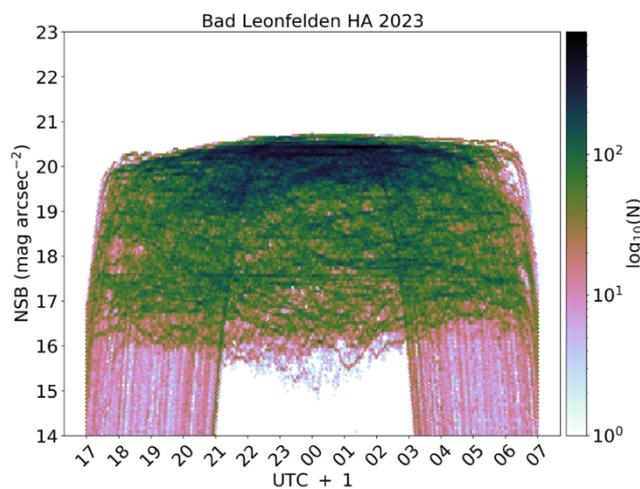


Abbildung 29 - Analyse der gewonnenen SQM-Daten als „Quallen“-Diagramm der SQM Station BL4HA vom Jahr 2023

Conclusio Messresultate

Die Analyse der Messdaten zeigt eine deutliche Entwicklung der Nachthimmelhelligkeit im Jahresvergleich 2022/2023. In nahezu allen Darstellungen und Messreihen lässt sich nach der Umstellung der Straßenbeleuchtung im Jahr 2023 eine Reduktion der Nachthimmelhelligkeit nachweisen. Diese positiven Veränderungen spiegeln sich in dunkleren Nachtwerten wider, was grundsätzlich den Zielen des Umstellungsprojekts entspricht.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse muss jedoch ein wichtiger externer Faktor berücksichtigt werden: Im Herbst 2022 hat die Gemeinde Bad Leonfelden als Reaktion auf die europaweite Energiekrise beschlossen, einzelne Beleuchtungspunkte in den Außenbereichen zeitweise abzuschalten. Diese Maßnahme zur Energieeinsparung hatte bereits vor der eigentlichen Umstellung der Beleuchtungsanlagen einen reduzierenden Effekt auf die Nachthimmelhelligkeit. Daher lässt sich die beobachtete Verbesserung der Messwerte nicht ausschließlich auf die technische Modernisierung der Straßenbeleuchtung zurückführen.

Dennoch zeigt der Vergleich der Jahre 2022 und 2023 eine konsistente und nachweisbare Verbesserung der Nachthimmelwerte. Diese positive Entwicklung deutet darauf hin, dass sowohl die energiesparenden Maßnahmen als auch die technische Modernisierung der Beleuchtungsanlagen in ihrer Kombination zu einer effektiven Reduktion der Lichtverschmutzung beigetragen haben.

4 | Kontakt und ProjektmitarbeiterInnen

Projektleitung

Dr. Stefan Wallner, BSc MSc
Türkenschanzstraße 17
1180 Wien
stefan.wallner@univie.ac.at

ProjektmitarbeiterInnen

Georg Binder, MA
Dr. Johannes Puschnig
Raphael Selber, BSc