

Endbericht

Projekt FA538059

Wissenschaftliche Auswertung, Langzeit-
Analyse und messtechnische Umstellung
des oberösterreichischen Lichtmessnetzes

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

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation	- 4 -
2 Beschreibung der Messinstrumente	- 5 -
2.1 Sky Quality Meter (SQM-LE)	- 5 -
2.1.1 Aufbau und Messprinzip.....	- 5 -
2.1.2 Mögliche Installationen einer SQM-Station	- 6 -
2.1.3 Beispieldaten und Analysen	- 7 -
2.2 Telescope Encoder and Sky Sensor (TESS-W)	- 8 -
2.2.1 Aufbau und Messprinzip.....	- 8 -
2.2.2 Mögliche Installationen einer TESS-Station	- 9 -
2.2.3 Beispieldaten und Analysen	- 10 -
2.3 Vergleich der spektralen Sensitivitäten.....	- 11 -
3 Analyse der gesammelten Daten	- 13 -
4 Pro- und Contraliste der beiden Messinstrumente.....	- 16 -
4.1 SQM.....	- 16 -
4.2 TESS-W.....	- 16 -
4.3 Vergleich	- 16 -
5 Conclusio.....	- 18 -
6 Kontakt und ProjektmitarbeiterInnen	- 19 -

1 | Motivation

Die systematische Transformation der nächtlichen Beleuchtung durch den Umstieg auf LED-Technologie stellt sowohl Herausforderung als auch Chance für den Schutz der natürlichen Nachtumgebung dar. Während LEDs durch ihre hohe Energieeffizienz das Potential zur Reduktion des Stromverbrauchs bieten, birgt ihre Implementierung auch das Risiko einer Zunahme der Lichtemissionen. Dies könnte die wenigen verbliebenen Gebiete Europas mit natürlichem Tag-Nacht-Rhythmus und beeindruckendem Sternenhimmel weiter reduzieren.

Das oberösterreichische Lichtmessnetz dokumentiert seit über einem Jahrzehnt die Entwicklung der nächtlichen Himmelselligkeit an verschiedenen Standorten. Um diese wichtige Langzeitdokumentation auch in Zukunft in höchster Qualität fortführen zu können, ist eine Evaluierung und potentielle Modernisierung der eingesetzten Messtechnik erforderlich. Dabei gilt es insbesondere die Veränderungen im Spektrum der künstlichen Beleuchtung durch die zunehmende Verwendung von LEDs zu berücksichtigen.

Eine wissenschaftlich fundierte Analyse der bisher gesammelten Daten sowie ein systematischer Vergleich verschiedener Messinstrumente soll die Basis für diese Modernisierung bilden. Ziel ist es, die optimale Messtechnik für die künftige Erfassung der Nachthimmelselligkeit zu identifizieren und gleichzeitig die Kontinuität der wertvollen Langzeitmessreihen zu gewährleisten.

Dieses Projekt leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Qualitätssicherung der Lichtverschmutzungsmessung in Oberösterreich und unterstützt das übergeordnete Ziel, die nächtliche Umwelt nachhaltig zu schützen und die Energieeffizienz der öffentlichen Beleuchtung zu optimieren.

2 | Beschreibung der Messinstrumente

2.1 | Sky Quality Meter (SQM-LE)

Das Sky Quality Meter LE ist ein spezialisiertes Messgerät zur kontinuierlichen Erfassung der Nachthimmelshelligkeit. Es wurde entwickelt, um die Qualität des Nachthimmels objektiv und automatisiert zu quantifizieren. Das Instrument ermöglicht es, die natürliche und künstliche Aufhellung des Nachthimmels präzise zu dokumentieren. Dies ist besonders bedeutsam für die Untersuchung der Lichtverschmutzung - also der unerwünschten und übermäßigen Aufhellung des Nachthimmels durch künstliche Beleuchtung. Durch die automatische und kontinuierliche Messung können sowohl kurzfristige Schwankungen als auch langfristige Trends in der Himmelselligkeit erfasst werden.

Das SQM-LE ist eine Weiterentwicklung des manuellen SQM-L, das für den dauerhaften, automatisierten Einsatz konzipiert wurde. Das Gerät wird fest installiert und über ein LAN-Kabel mit einem Netzwerk verbunden. Ein hochempfindlicher Lichtsensor misst minütlich die einfallende Strahlung aus dem Himmelsbereich. Die Messwerte werden dabei automatisch erfasst und über die Netzwerkverbindung an einen Computer übertragen. Dort können die Daten gespeichert und ausgewertet werden.

Die Messergebnisse werden in der astronomischen Einheit "Magnitude pro Quadratbogensekunde" ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$) ausgegeben. Diese logarithmische Skala ist so aufgebaut, dass höhere Werte einen dunkleren Himmel anzeigen. Ein natürlich dunkler Nachthimmel erreicht dabei Werte um $21,8 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$. In städtischen Gebieten mit starker Lichtverschmutzung werden hingegen oft nur Werte um $16-17 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ gemessen. Die automatische, minütliche Erfassung ermöglicht es, den tageszeitlichen und jahreszeitlichen Verlauf der Himmelshelligkeit detailliert zu dokumentieren.

2.1.1 | Aufbau und Messprinzip

Das Gerät basiert auf einem hochempfindlichen Lichtsensor (TSL237), der einfallendes Licht in ein Frequenzsignal umwandelt. Je heller der Himmel, desto höher ist die Ausgangsfrequenz des Sensors (bis zu 500 kHz). Bei zunehmender Dunkelheit sinkt die Frequenz entsprechend ab. Das Gerät verfügt über zwei Messmodi:

- Frequenzmodus für helle Bedingungen: Hier wird die hohe Ausgangsfrequenz des Sensors direkt gemessen
- Periodenmodus für dunkle Bedingungen: Hier wird die Zeitdauer zwischen einzelnen Sensorimpulsen gemessen

Der Umschaltzeitpunkt zwischen beiden Modi liegt bei etwa 679 Hz. Ein integrierter Temperatursensor ermöglicht die Kompensation von temperaturbedingten Messabweichungen.

Messgenauigkeit und technische Spezifikationen:

- Messgenauigkeit: $\pm 10\%$ (entspricht $\pm 0,1$ Magnitudes/Quadratbogensekunde)
- Messbereich: 0 bis etwa 22 Magnitudes/Quadratbogensekunde
- Betriebstemperaturbereich: -40°C bis $+85^\circ\text{C}$



Abbildung 1 - SQM-L von Unihedron

- Netzwerkanbindung: 10/100 MBit Ethernet
- Stromversorgung: 5-6V DC, 300mA

Das SQM-LE erfasst einen präzise definierten Himmelsausschnitt. Der Messbereich entspricht einem Kegel mit einem Öffnungswinkel von 20 Grad (FWHM - Full Width at Half Maximum). Dies bedeutet, dass hauptsächlich Licht aus dem Zenit-Bereich gemessen wird, während störende Einflüsse vom Horizont weitgehend ausgeblendet werden.

Die Empfindlichkeit für Lichtquellen außerhalb der optischen Achse nimmt stark ab:

- Bei 19° Abweichung von der optischen Achse ist die Empfindlichkeit bereits um Faktor 10 reduziert
- Bei 20° Abweichung werden Lichtquellen um 3 Magnituden schwächer erfasst
- Bei 40° Abweichung beträgt die Abschwächung bereits 5 Magnituden

Diese fokussierte Messung hat Vor- und Nachteile: Einerseits ermöglicht sie sehr präzise Messungen der Himmelhelligkeit in einer definierten Richtung, was besonders für wissenschaftliche Untersuchungen wichtig ist. Andererseits bedeutet es auch, dass mit einem einzelnen Gerät kein vollständiges Bild der Himmelhelligkeit erstellt werden kann. Für ein umfassendes Monitoring der Lichtverschmutzung werden daher oft mehrere Geräte an verschiedenen Standorten eingesetzt.

Eine wichtige praktische Einschränkung ist, dass sehr helle Lichtquellen wie Straßenlaternen oder Scheinwerfer in einem Umkreis von 60-70 Grad die Messung beeinflussen können, auch wenn sie nicht direkt im Hauptmessbereich liegen. Bei der Installation des Geräts muss daher sorgfältig darauf geachtet werden, dass sich keine störenden Lichtquellen in der Nähe befinden oder diese entsprechend abgeschirmt werden.

Eine wichtige messtechnische Besonderheit ist die spektrale Empfindlichkeit des Sensors. Das Gerät ist besonders sensitiv im blauen und grünen Spektralbereich, während es rotes Licht weniger gut erfasst. Dies muss bei der Interpretation der Messwerte berücksichtigt werden, besonders wenn verschiedene Arten künstlicher Beleuchtung verglichen werden sollen.

Wissenschaftliche Analysen haben einen „Ageing-Effekt“ beim Instrument entdeckt, d.h. eine kontinuierlich auftretende Verschlechterung der Optik. Dies resultiert in jährlich immer stärker auftretenden Verdunkelungen der gemessenen Daten, abhängig von der Stärke der Sonneneinstrahlung bei Tag (d.h. Sonnenhöhe durch geographische Position). Für Wien (durch die geographische Lage daher auch gültig für Linz) wurde eine Verschlechterung bzw. Verdunkelung der Daten um $0.053 \text{ mag/arcsec}^2$ pro Jahr quantifiziert.

2.1.2 | Mögliche Installationen einer SQM-Station

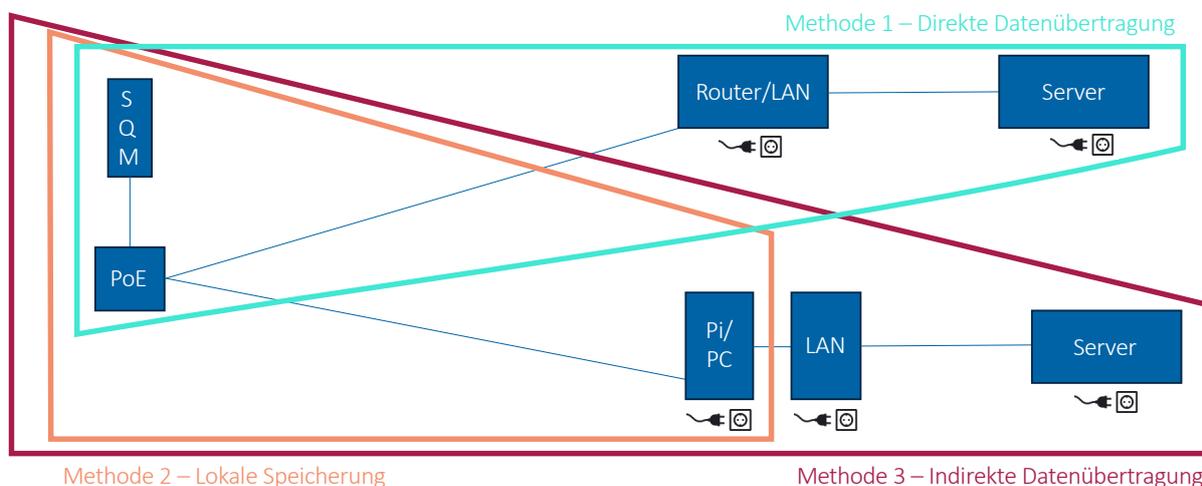


Abbildung 2 – Skizzenhafte Darstellung dreier möglicher Installationsmöglichkeiten des SQM. Stromsymbole kennzeichnen, an welchen Stellen eine Stromzufuhr notwendig ist.

Möglichkeit 1: Direkte Datenübertragung

Das SQM wird durch eine LAN-Verbindung und einem Power over Ethernet-Adapter (PoE) verbunden, um Netzwerkverbindung sowie Stromzufuhr sicherzustellen. Über das LAN bzw. einem Router wird eine Internetverbindung hergestellt, wobei die Daten direkt an einen Server übertragen werden können. Diese Möglichkeit stellt die SQM-Installation des aktuellen öö. Lichtmessnetzes dar.

Möglichkeit 2: Lokale Speicherung

Bei dieser Möglichkeit ist keine Internetverbindung vorhanden, sondern nur eine LAN-Verbindung zu einem lokal installierten PC bzw. RaspberryPi. Unihedron bietet zu jedem SQM eine Software an, welche eine lokale Speicherung der Daten möglich macht, für Linux-Systeme sind zugehörige Python-Skripte vorhanden.

Möglichkeit 3: Indirekte Datenübertragung

Bei dieser Installation wird, wie in Möglichkeit 2, ein lokaler PC installiert, wobei dieser eine Netzwerkverbindung (durch z.B. LAN) mit einem Server herstellt. Diese Methode lässt offen, eine lokale Speicherung zusätzlich zur Datenübertragung durchzuführen bzw. die Daten bereits lokal einer möglichen Reduktion zuzuführen (Skript).

2.1.3 | Beispieldaten und Analysen

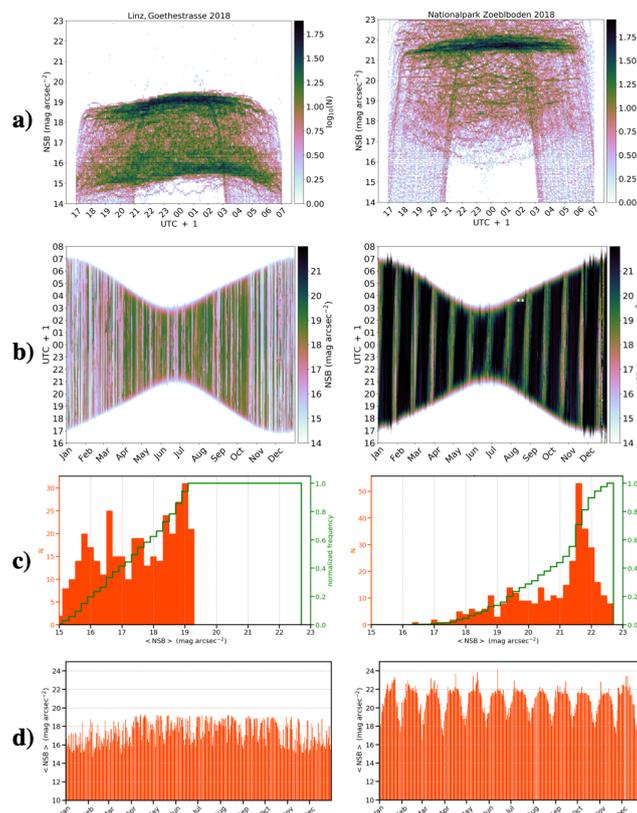


Abbildung 3 – Möglichkeiten von jährlichen Datenaufbereitungen: a) Quallenfisch-Darstellung sämtlicher Nächte mit Quantifizierung von Dichteansammlungen gemessener Nachthimmelshelligkeitswerte, b) Sanduhren-Darstellung sämtlicher Nächte mit Quantifizierung der gemessenen Nachthimmelshelligkeitswerte, c) Histogramme zur Darstellung der Mengen an gemessenen nächtlichen Durchschnitten von Nachthimmelshelligkeitswerten, d) Circlunare-Trends zur Darstellung von nächtlichen Durchschnitten von Nachthimmelshelligkeitswerten im Vergleich mit dem Mondrhythmus

Beispieldaten des SQM-Netzwerk des Landes OÖ sind online verfügbar:

<https://www2.land-oberoesterreich.gv.at/imm/Start.jsp?SessionID=SID-D27E73E6-9AB446F9&xmlid=Seiten%2F159659.htm&forward=IMM2013LuftgueteAktuellDetail&controllerKategorie=Lichtmessnetz&showLichtmessnetz=true>

Auswertungen aus dem öö. Lichtmessnetz sind online verfügbar:
<https://nightsky.univie.ac.at> (Jährliche Datenaufbereitungen)

Wissenschaftliche Arbeiten über Daten und Langzeittrends aus dem öö. Lichtmessnetz sind online verfügbar:

<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.03.010> (Analyse und Aufbereitung von jährlichen Datensammlungen)

<https://doi.org/10.1093/mnras/staa4019> (Ageing-Effekt)

<https://doi.org/10.1093/mnras/stac3003> (Korrektur von Langzeit-Trends mit Atmosphäre und Topologie)

2.2 | Telescope Encoder and Sky Sensor (TESS-W)

Das TESS-W (Telescope Encoder and Sky Sensor) ist ein wissenschaftliches Messgerät zur kontinuierlichen Erfassung der Nachthimmelshelligkeit von einem festen Standort aus. Es wurde entwickelt, um die langfristige Entwicklung der Himmelshelligkeit zu überwachen und damit die Lichtverschmutzung zu quantifizieren. Neben der Helligkeitsmessung erfasst das Gerät auch die Bewölkung über einen eingebauten Infrarotsensor, was für die korrekte Interpretation der Messwerte wichtig ist.



2.2.1 | Aufbau und Messprinzip

Das TESS-W basiert wie das SQM auf einem TSL237 Photosensor, der einfallendes Licht in ein Frequenzsignal umwandelt. Der wesentliche Unterschied liegt in der optischen Filterung: Während das SQM einen HOYA CM-500 (BG39) Filter verwendet, kommt beim TESS-W ein dichromatischer Filter zum Einsatz. Dieser erweitert die spektrale Empfindlichkeit deutlich in den roten Wellenlängenbereich bis etwa 800 nm, wodurch insbesondere das Licht von Natriumdampflampen (590 nm) besser erfasst werden kann.

Erfassungsbereich und Optik Das Instrument erfasst einen Himmelsausschnitt mit einem Öffnungswinkel von 17 Grad (FWHM). Die Empfindlichkeit folgt dabei einer Gaußschen Verteilung. Bei 19 Grad Abweichung von der optischen Achse ist die Empfindlichkeit bereits um Faktor 10 reduziert. Diese eng begrenzte Messcharakteristik ermöglicht präzise Zenitmessungen bei gleichzeitiger Minimierung störender Einflüsse vom Horizont.

Messgenauigkeit und Kalibrierung Jedes TESS-W wird im LICA-UCM Labor (Laboratorio de Instrumentación Científica Avanzada) individuell kalibriert. Die absolute Genauigkeit der Helligkeitsmessung liegt bei etwa $\pm 10\%$ ($\pm 0,1 \text{ mag/arcsec}^2$). Durch die Integration eines Temperatursensors können temperaturbedingte Messabweichungen kompensiert werden. In verschmutzten Stadtgebieten zeigt das TESS-W aufgrund seiner erweiterten Rotempfindlichkeit typischerweise um etwa 0,5 Magnituden höhere Werte als ein SQM.

Technische Ausstattung und Betrieb Das TESS-W verfügt über:

- Einen integrierten WLAN-Modul zur automatischen Datenübertragung
- Einen Infrarotsensor zur Bewölkungserfassung
- Eine regelbare Heizung zur Vermeidung von Kondensation/Vereisung
- Ein wetterfestes Gehäuse (80x55x35 mm)
- USB-Stromversorgung (5V DC)

Der Stromverbrauch variiert temperaturabhängig:

- 50-100 mA bei $T > 10^\circ\text{C}$ (normale Messung)

- 500-600 mA bei $T < 10^{\circ}\text{C}$ (Heizung aktiv) Dies entspricht einer Leistungsaufnahme zwischen 0,25W und 3W.

Datenerfassung und -übertragung Das TESS-W führt automatisch minütliche Messungen durch und überträgt diese per WLAN an einen zentralen Server. Die Messwerte umfassen:

- Himmelshelligkeit in $\text{mag}/\text{arcsec}^2$
- Interne Gerätetemperatur
- Bewölkungsgrad (über IR-Sensor)
- Diagnosedaten wie WLAN-Signalstärke

Die Daten werden in einem öffentlich zugänglichen Repository gespeichert und können über verschiedene Webschnittstellen abgerufen werden. Dies ermöglicht sowohl die Echtzeitüberwachung als auch die nachträgliche Analyse längerer Zeitreihen. Eine automatisierte Erstellung von Messanalysen durch das Online-Tool Grafana ermöglicht ein einfaches Ablesen aktueller Daten und bereits erstellter Langzeit-Trends. Korrekturen wie Atmosphäre oder Topologie werden nicht berücksichtigt, jedoch sind Analysen aller gesammelter Daten oder nur von klaren Nächten ohne gemessener Wolkenbedeckung möglich.

Einsatzgebiete und Besonderheiten Das TESS-W wurde speziell für den Dauereinsatz in Messnetzen entwickelt. Durch die erweiterte Rotempfindlichkeit eignet es sich besonders gut für:

- Überwachung urbaner Gebiete mit hohem Anteil an Natriumdampfbeleuchtung
- Langzeitstudien zur Entwicklung der Lichtverschmutzung
- Validierung von Satellitendaten zur Lichtverschmutzung
- Citizen-Science-Projekte aufgrund der einfachen Installation und Wartung

Die Kombination aus einer durchaus präzisen Messtechnik, automatisierter Datenübertragung (und Analyse!) und robuster Bauweise macht das TESS-W zu einem idealen Instrument für das großflächige Monitoring der Nachthimmelshelligkeit. Die standardisierte Kalibrierung gewährleistet dabei die Vergleichbarkeit der Messungen verschiedener Geräte im Netzwerk.

2.2.2 | Mögliche Installationen einer TESS-Station

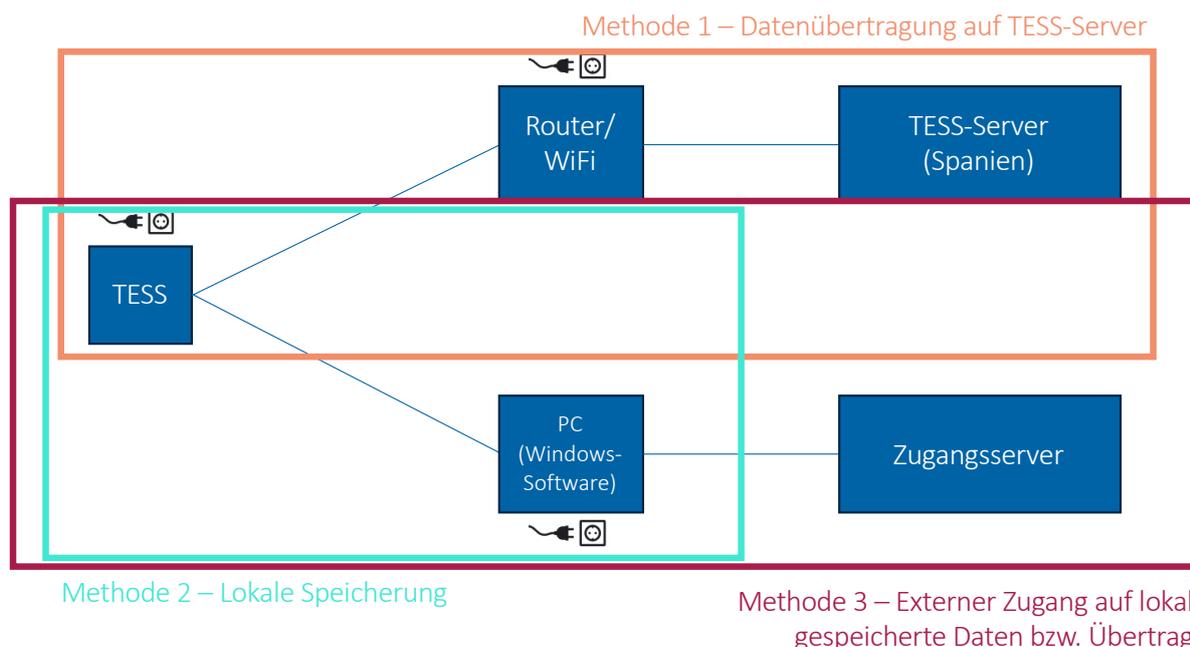


Abbildung 4 - Skizzenhafte Darstellung dreier möglicher Installationsmöglichkeiten des TESS-W. Stromsymbole kennzeichnen, an welchen Stellen eine Stromzufuhr notwendig ist.

Möglichkeit 1: Datenübertragung auf TESS-Server

Das TESS-W verfügt über die Möglichkeit eine WLAN-Verbindung mit einem lokalen Netzwerk herzustellen. In diesem Fall können, nach erfolgreicher Verbindung, die Daten automatisiert auf den TESS-Server der Universidad Complutense Madrid übertragen werden. Die Daten werden einerseits in einer Online-Cloud gespeichert (im internationalen IAU-Format), andererseits können Datenanalysen automatisiert im Online-Tool Grafana abgelesen werden.

Möglichkeit 2: Lokale Speicherung

Wie auch beim SQM existiert die Möglichkeit eine lokale Speicherung mit einem PC herzustellen. Eine zugehörige Software für Windows ist existent, jedoch nicht für andere Betriebssysteme. Wichtig in diesem Fall ist die Tatsache, dass – auch wenn eine USB-Verbindung mit dem PC hergestellt wird – eine WLAN-Verbindung mit dem TESS-eigenen WiFi notwendig ist.

Möglichkeit 3: Externer Zugang auf lokal gespeicherte Daten bzw. Übertrag

Dies erweitert die Möglichkeit 2, indem der lokale PC einer Netzwerkverbindung zugeführt wird. In diesem Fall ist es möglich die Daten entweder durch einen externen Zugang auf das Gerät abzurufen bzw. zu downloaden oder eine automatisierte Datenübertragung auf einen externen Server durchzuführen.

2.2.3 | Beispieldaten und Analysen

Sämtliche Daten von online verbundenen TESS-Instrumente sind online vorhanden:

<https://fta-cloud.fis.ucm.es/index.php/s/Gr9DAbfIX8Pdm86>

Sämtliche Datenaufbereitungen durch das Online-Tool Grafana sind online vorhanden:

<https://tess.dashboards.stars4all.eu/>



Abbildung 5 – Daten der TESS-Messstation im Nationalpark Gesäuse (Weidendom) von Mitte Juni bis Mitte Oktober 2024. Grün = Magnitude der Himmeshelligkeit, gelb = Umgebungstemperatur, blau = Himmelstemperatur (zur Berechnung der Wolkenbedeckung)

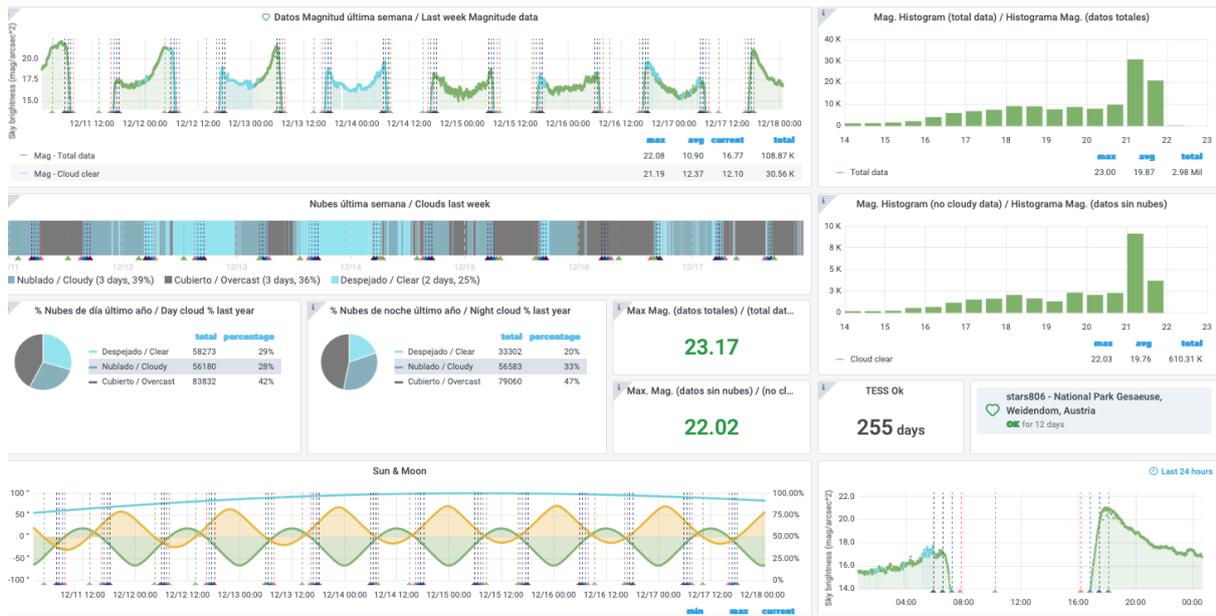


Abbildung 6 – Auswertungen durch Grafana (online) der Messstation im Nationalpark Gesäuse (Weidendom). Links oben: Gemessene Nachthimmelswerte der letzten 7 Nächte inkl. Wolkenbedeckung (klar, teilweise bewölkt und bewölkt). Rechts oben: Histogramm-Auswertungen gesammelter Daten, einmal sämtlicher Daten, einmal unter Einbeziehung nur klarer Nächte. Rechts: Status des TESS-Instruments inkl. Status der WLAN-Verbindung. Links unten: Daten zu Höhen und Phasen von Sonne und Mond. Rechts unten: Daten der letzten 24 Stunden.

2.3 | Vergleich der spektralen Sensitivitäten

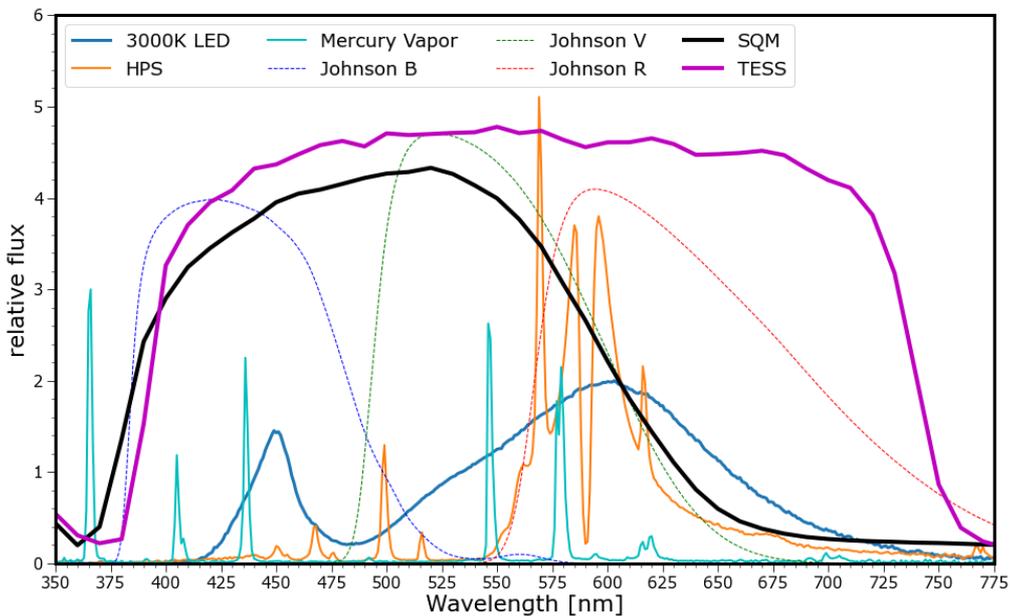


Abbildung 7 – Vergleich der spektralen Sensitivitäten von SQM und TESS mit typischen Lichtquellen und Filtern

Die spektrale Empfindlichkeit ist ein entscheidender Parameter für die Messung der Nachthimmelshelligkeit, da sie bestimmt, welche Lichtquellen wie stark in das Messergebnis einfließen. Obwohl beide Instrumente denselben Grundsensor (TSL237) verwenden, unterscheiden sie sich deutlich in ihrer spektralen Charakteristik. Der TSL237-Sensor selbst zeigt eine breite spektrale Empfindlichkeit von etwa 300 nm bis 1100 nm, mit einem Maximum bei circa 750 nm. Um die Messungen astronomisch relevanter zu gestalten,

wird diese native Empfindlichkeit durch optische Filter modifiziert. Das SQM verwendet einen HOYA CM-500 (BG39) Filter, während das TESS-W mit einem dichromatischen Filter ausgestattet ist.

Das SQM zeigt durch seinen Filter eine spektrale Empfindlichkeit, die sich weitgehend auf den blauen und grünen Spektralbereich konzentriert. Die Empfindlichkeit steigt ab etwa 350 nm an, erreicht ihr Maximum bei etwa 500 nm und fällt dann relativ steil ab, sodass oberhalb von 600 nm nur noch eine geringe Empfindlichkeit besteht. Diese Charakteristik ähnelt dem Johnson-B-Band der astronomischen Photometrie.

Das TESS-W weist durch seinen dichromatischen Filter eine deutlich erweiterte spektrale Empfindlichkeit auf. Zwar liegt auch hier der Schwerpunkt im blauen und grünen Bereich, jedoch erstreckt sich die Empfindlichkeit wesentlich weiter in den roten Spektralbereich bis etwa 800 nm. Besonders wichtig ist dabei die erhöhte Empfindlichkeit im Bereich um 590 nm, wo die charakteristischen Emissionslinien von Natriumdampflampen liegen.

Diese unterschiedlichen spektralen Charakteristiken führen zu messbaren Unterschieden in der Praxis: In urbanen Gebieten, wo Natriumdampflampen häufig sind, misst das TESS-W typischerweise Werte, die um etwa 0,5 Magnituden höher liegen können als beim SQM. Dies ist keine Ungenauigkeit, sondern spiegelt die tatsächlich vorhandene rote Komponente des Himmelsleuchtens wider, die vom SQM teilweise unterschätzt wird.

Mit der zunehmenden Umstellung auf LED-Beleuchtung gewinnt diese erweiterte spektrale Empfindlichkeit zusätzlich an Bedeutung, da moderne LEDs oft ein breiteres Spektrum aufweisen als traditionelle Beleuchtungstechnologien. Die erweiterte spektrale Empfindlichkeit des TESS-W ermöglicht daher eine umfassendere Erfassung der tatsächlichen Nachthimmelshelligkeit, insbesondere in urban geprägten Gebieten. Allerdings bedeutet dies auch, dass Messreihen von SQM und TESS-W nicht direkt vergleichbar sind - für wissenschaftliche Langzeitstudien sollte daher immer der verwendete Gerätetyp dokumentiert und berücksichtigt werden.

3 | Analyse der gesammelten Daten

Um eine Datenanalyse, speziell aufgrund der abweichenden spektralen Sensitivitäten der beiden Instrumente, durchzuführen, wurden an mehreren Standorten in Oberösterreich SQM- sowie TESS-Instrumente installiert und die Daten lokal gespeichert.

Aufgrund technischer Probleme war es nicht möglich im Projektzeitraum kohärente Daten beider Instrumente lokal zu sammeln, insbesondere die notwendige USB- sowie WLAN-Verbindung des TESS in Verbindung mit der LAN-Verbindung des SQM brachte die lokal installierten PCs in Schwierigkeiten. Jedoch konnten über einen Zeitraum von mehreren Wochen TESS-Daten an zwei Standorten gesammelt werden, an denen SQM des öö. Lichtmessnetzes installiert sind und daher eine genaueren Analyse möglich machen. Diese Stationen sind Linz-Goethestraße sowie Losenstein-Hohe Dirn. In Linz waren zwei Zeiträume mit mehreren Nächten auslesbar, an der Messstation Hohe Dirn über mehrere Wochen.

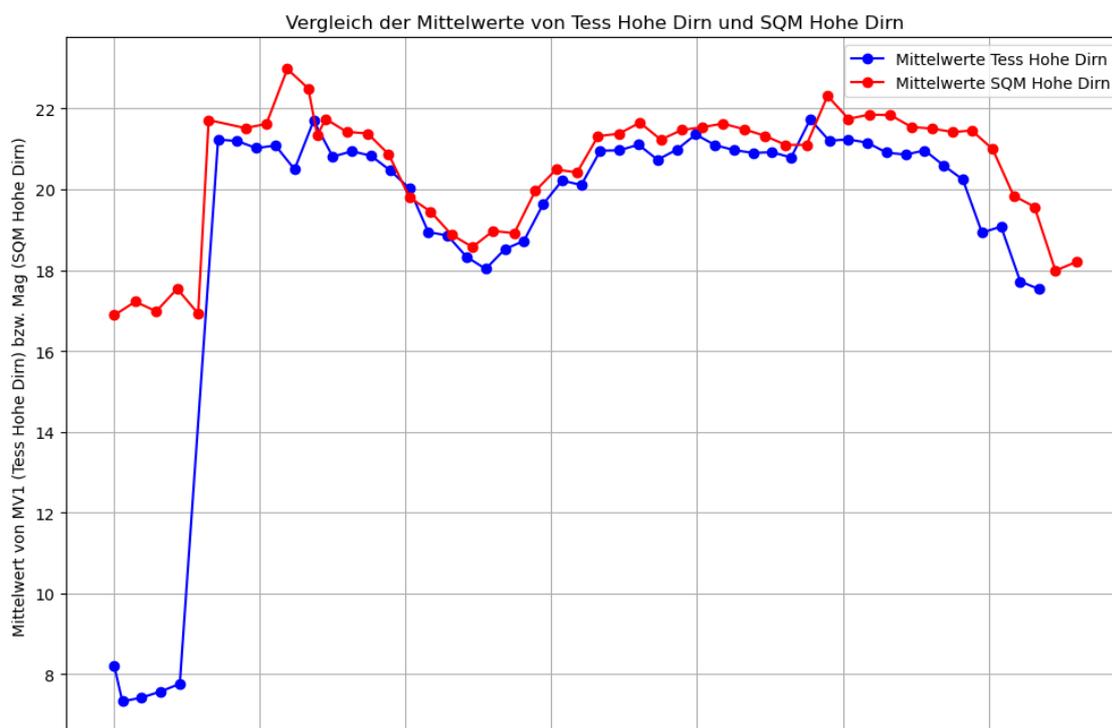


Abbildung 8 – Vergleich von SQM- sowie TESS-Daten (Nachthimmelmittelwerte) an der Station Losenstein-Hohe Dirn.

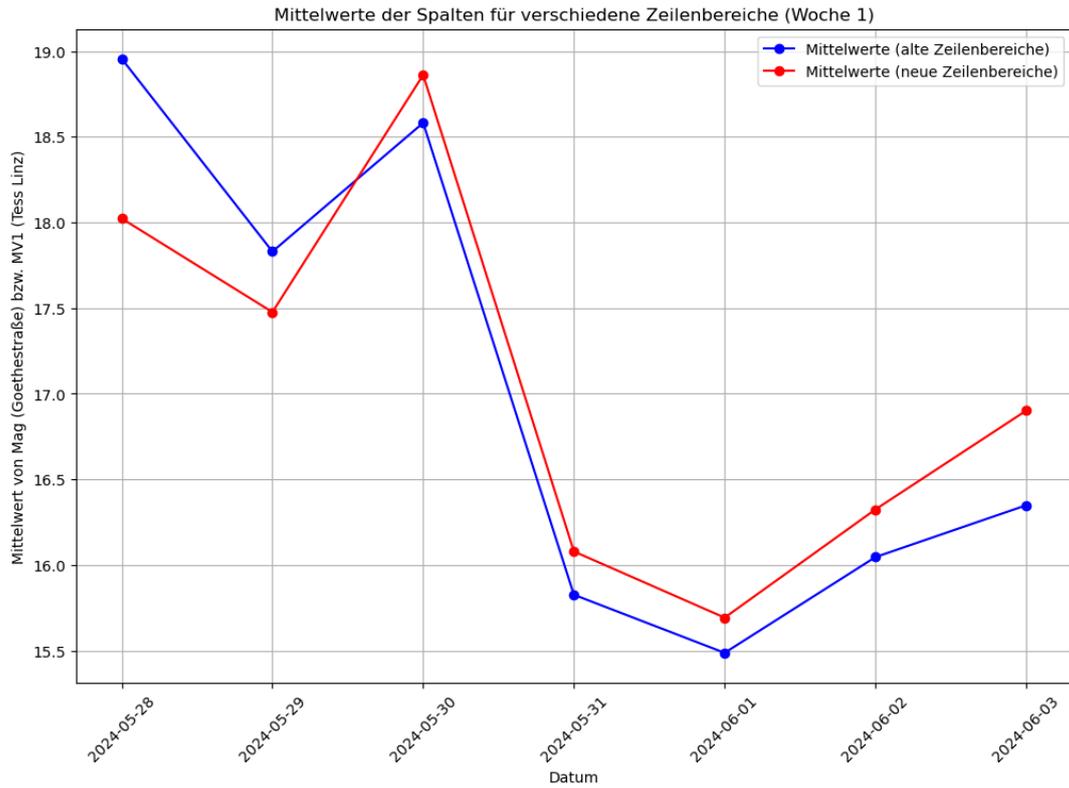


Abbildung 9 - Vergleich von SQM- sowie TESS-Daten (Nachhimmelmittelwerte) an der Station Linz-Goethestraße im ersten auslesbaren Zeitraum. Rot = SQM-Werte, blau = TESS-Werte

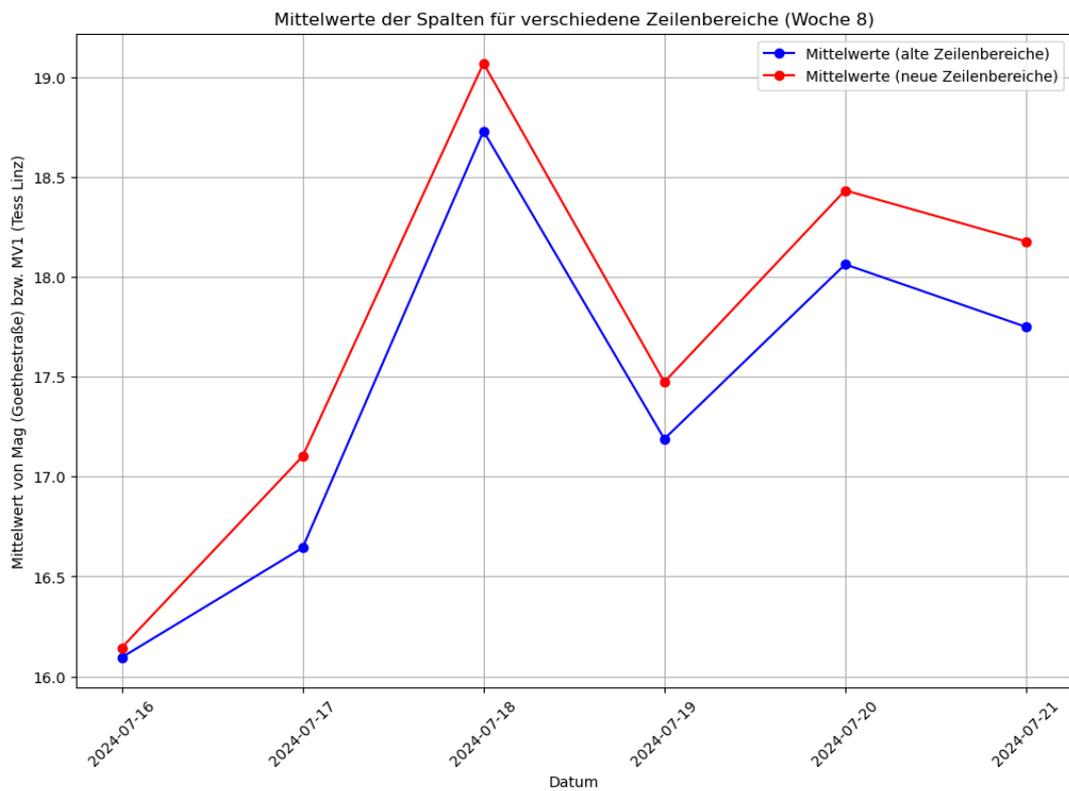


Abbildung 10 - Vergleich von SQM- sowie TESS-Daten (Nachhimmelmittelwerte) an der Station Linz-Goethestraße im zweiten auslesbaren Zeitraum. Rot = SQM-Werte, blau = TESS-Werte

Ein detaillierter Vergleich der Messwerte von SQM und TESS-Photometern an zwei unterschiedlich charakterisierten Standorten in Oberösterreich liefert aufschlussreiche Erkenntnisse über das Zusammenspiel von Lichtverschmutzung, meteorologischen Bedingungen und spektraler Sensitivität der Instrumente.

Am urbanen Standort Linz zeigten die Messwerte eine ausgeprägte Variabilität in den Differenzen zwischen beiden Instrumenten. Die systematisch dunkleren Messwerte des SQM im Vergleich zum TESS - eine erwartbare Konsequenz der unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeit - schwankten hier zwischen 0,3 und 1,0 Magnituden. Diese erhöhte Variabilität lässt sich durch die komplexe Wechselwirkung zwischen städtischer Lichtverschmutzung und atmosphärischen Bedingungen erklären. Insbesondere Wolkenbedeckung kann durch Reflektion und Streuung des künstlichen Lichts die spektralen Unterschiede zwischen den Instrumenten verstärken. Die breitere spektrale Empfindlichkeit des TESS-Photometers, die speziell im roten Wellenlängenbereich ausgeprägter ist, erfasst diese Effekte deutlicher.

Im Kontrast dazu zeigte der rurale Standort Losenstein ein stabileres Verhalten in den Messwertdifferenzen. In dieser von Lichtverschmutzung weniger beeinflussten Umgebung lagen die typischen Differenzen zwischen SQM und TESS-Messungen in einem engeren Bereich von 0,3 bis 0,5 Magnituden. Diese höhere Konstanz deutet auf stabilere atmosphärische Verhältnisse und einen geringeren Einfluss künstlicher Beleuchtung hin. Allerdings wurden auch hier gelegentliche Ausreißer mit Differenzen von bis zu 2,0 Magnituden beobachtet. Diese außergewöhnlich hohen Abweichungen bedürfen einer detaillierteren Analyse, um mögliche Einflüsse wie besondere meteorologische Ereignisse, temporäre lokale Lichtquellen oder instrumentelle Faktoren zu identifizieren.

Diese Beobachtungen unterstreichen die Bedeutung des Standorts und der atmosphärischen Bedingungen für die Vergleichbarkeit von Messungen verschiedener Photometertypen. Sie verdeutlichen zudem die Notwendigkeit, bei der Interpretation von Nachthimmelshelligkeit-Messungen sowohl die spezifischen Charakteristika der eingesetzten Instrumente als auch die lokalen Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen.

4 | Pro- und Conraliste der beiden Messinstrumente

4.1 | SQM

PRO

- Messungen sehr stabil, Datenübertragung über LAN ebenfalls sehr stabil
- kein internetfähiges Zusatzgerät zwingend benötigt (Router/Pi/PC)
- Software funktioniert ohne Java, funktioniert auf Windows & Linux, Python-Skript öffentlich
- Nutzung ohne Software möglich (siehe Skript aktuelles Lichtmessnetz)
- Datenanalyse gut bekannt

CONTRA

- Zusatzmaterial für Montage notwendig (PoE, wetterfeste Hülle, Pi?)
- komplexere Montage verglichen mit TESS
- komplexere Einstellungen der Software
- eigenes Datenformat
- spektrale Sensitivität geringer

4.2 | TESS-W

PRO

- einfache Montage, Verbindung über WiFi
- einfachere Bedienung der Software
- keine Notwendigkeit zusätzlicher Hardware (z.B. für Speicherung)
- direkte Darstellung der Messdaten inkl. Sammlung von Zusatzdaten (Wolken, Sonne, Mond, etc.) auf [Grafana](#) [wenn online]
- automatische Analyse der Messdaten, einfache Bedienung individueller Analysen [wenn online]
- stärkere spektrale Sensitivität
- Kosten

CONTRA

- benötigt auch für lokale Speicherung ein internetfähiges Zusatzgerät (WiFi-Verbindung)
- Website [tess.stars4all.org](#) eher instabil mit Fehlern
- Abhängigkeit bei nicht-lokaler Speicherung von Funktionalität des Servers
- bei lokaler Speicherung keine Möglichkeit automatisierter Datendarstellung (Plots)
- WiFi-Signal eher wenig sensibel, starke Router notwendig
- Datenvergleich Lichtmessnetz nicht mehr möglich

4.3 | Vergleich

Technische Stabilität und Datenübertragung

Das SQM zeichnet sich durch eine hervorragende Stabilität sowohl in der Messung als auch in der Datenübertragung über LAN aus. Die direkte Ethernet-Verbindung gewährleistet eine zuverlässige Kommunikation ohne Abhängigkeit von Funksignalstärken. Im Gegensatz dazu basiert das TESS-W auf WLAN-Konnektivität, die zwar eine flexiblere Installation ermöglicht, jedoch eine stärkere Router-Infrastruktur erfordert und anfälliger für Verbindungsabbrüche sein kann.

Hardware-Anforderungen und Installation

Die Montage des SQM gestaltet sich technisch anspruchsvoller und erfordert zusätzliche Komponenten wie Power-over-Ethernet-Adapter und wetterfeste Gehäuse. Das TESS-W punktet hier mit einem integrierten wetterfesten Design und einfacherer Montage. Allerdings benötigt das TESS-W zwingend eine WLAN-Verbindung, auch für lokale Speicherung, während das SQM flexibler in der Netzwerkanbindung ist.

Software und Datenverarbeitung

Die SQM-Software überzeugt durch plattformübergreifende Kompatibilität und die Möglichkeit zur direkten Nutzung via Python-Skript, ohne Java-Abhängigkeit. Die Konfiguration ist zwar komplexer, bietet aber mehr Flexibilität. Das TESS-W besticht durch eine intuitivere Bedienoberfläche und umfangreiche Online-Analysemöglichkeiten, ist dabei jedoch von der Stabilität der STARS4ALL-Plattform abhängig.

Datenanalyse und Integration

Das SQM verwendet ein proprietäres Datenformat, das sich in bestehenden Lichtverschmutzungs-Messnetzen etabliert hat. Die langjährige Nutzung hat zu einem umfassenden Verständnis der Datenanalyse geführt. Das TESS-W bietet bei Online-Nutzung automatisierte Analysen und Integration von Zusatzdaten wie Bevölkerung und astronomischen Parametern, verliert jedoch diese Funktionalität bei lokaler Speicherung.

Spektrale Eigenschaften und Kosteneffizienz

Die erweiterte spektrale Sensitivität des TESS-W, besonders im roten Wellenlängenbereich, ermöglicht eine umfassendere Erfassung der Nachthimmelshelligkeit. In Kombination mit den geringeren Anschaffungskosten macht dies das TESS-W zu einer attraktiven Option für neue Installationen. Das SQM bietet zwar eine geringere spektrale Bandbreite, gewährleistet aber durch seine etablierte Position die Vergleichbarkeit mit bestehenden Messreihen.

Zusammenfassende Bewertung

Die Wahl zwischen beiden Systemen sollte primär von den spezifischen Einsatzanforderungen abhängen. Das SQM eignet sich besonders für Standorte mit hohen Anforderungen an Datenverfügbarkeit und Integration in bestehende Messnetze. Das TESS-W bietet Vorteile bei Neuinstallationen mit guter WLAN-Infrastruktur, wo die erweiterte spektrale Sensitivität und die automatisierten Online-Analysemöglichkeiten von Bedeutung sind. Die geringeren Kosten und einfachere Installation machen es besonders attraktiv für Citizen-Science-Projekte und kleinere Forschungseinrichtungen.

5 | Conclusio

Die detaillierte Analyse und der praktische Vergleich der beiden Photometersysteme SQM und TESS-W zur Messung der Nachthimmelshelligkeit offenbart sowohl ihre spezifischen Stärken als auch die jeweiligen Einsatzgrenzen. Die Untersuchungen an den Standorten Linz und Losenstein haben dabei besonders wertvolle Erkenntnisse über das Zusammenspiel von technischen Eigenschaften, Umgebungsbedingungen und Messergebnissen geliefert.

Das SQM zeichnet sich durch seine ausgereifte Technologie und hohe Betriebsstabilität aus. Die LAN-basierte Datenübertragung gewährleistet eine zuverlässige Kommunikation, während die etablierte Software-Infrastruktur eine reibungslose Integration in bestehende Messnetze ermöglicht. Diese Eigenschaften machen das SQM zur bevorzugten Wahl für professionelle Langzeitmessungen und wissenschaftliche Anwendungen, bei denen Datenkontinuität und -vergleichbarkeit im Vordergrund stehen.

Das TESS-W hingegen überzeugt durch seine erweiterte spektrale Empfindlichkeit, insbesondere im roten Wellenlängenbereich, was eine umfassendere Erfassung der tatsächlichen Nachthimmelshelligkeit ermöglicht. Die WLAN-basierte Konnektivität und das integrierte wetterfeste Design vereinfachen die Installation, während die automatisierten Online-Analysemöglichkeiten einen schnellen Zugriff auf aufbereitete Messdaten ermöglichen. Diese Eigenschaften, kombiniert mit den geringeren Anschaffungskosten, machen das TESS-W besonders attraktiv für neue Messprojekte und Citizen-Science-Initiativen.

Die Messungen an beiden Standorten haben gezeigt, dass die Differenzen zwischen den Instrumenten stark von den lokalen Bedingungen abhängen. In urbanen Gebieten wie Linz führt die komplexe Wechselwirkung zwischen künstlicher Beleuchtung und atmosphärischen Bedingungen zu größeren und variableren Messunterschieden (0,3 bis 1,0 Magnituden), während in ruralen Gebieten wie Losenstein stabilere Differenzen (typischerweise 0,3 bis 0,5 Magnituden) beobachtet wurden.

Für zukünftige Installationen empfiehlt sich eine sorgfältige Abwägung der spezifischen Anforderungen: Wo Langzeitvergleichbarkeit und Integration in bestehende Messnetze prioritär sind, bleibt das SQM erste Wahl. Für neue, unabhängige Messprojekte, besonders in urbanen Gebieten oder im Rahmen von Citizen-Science-Initiativen, bietet das TESS-W durch seine erweiterte spektrale Empfindlichkeit und benutzerfreundliche Auslegung deutliche Vorteile. Bei der Interpretation der Messdaten ist in jedem Fall die unterschiedliche spektrale Charakteristik der Instrumente zu berücksichtigen, um eine korrekte wissenschaftliche Bewertung der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die gewonnenen Erkenntnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer standardisierten Dokumentation der eingesetzten Messtechnik und der lokalen Umgebungsbedingungen, um die Vergleichbarkeit und wissenschaftliche Verwertbarkeit der Daten langfristig sicherzustellen.

6 | Kontakt und ProjektmitarbeiterInnen

Projektleitung

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

ProjektmitarbeiterInnen

Paul Pacher
Raphael Selber, BSc