

Licht über Wien VI

Lichtgehalt der Nacht über Wien von 2011 bis 2018
und Relationen zu Luftgüteindikatoren

Günther Wuchterl, Markus Reithofer (Verein Kuffner Sternwarte)

Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22

Wien, Dezember 2018

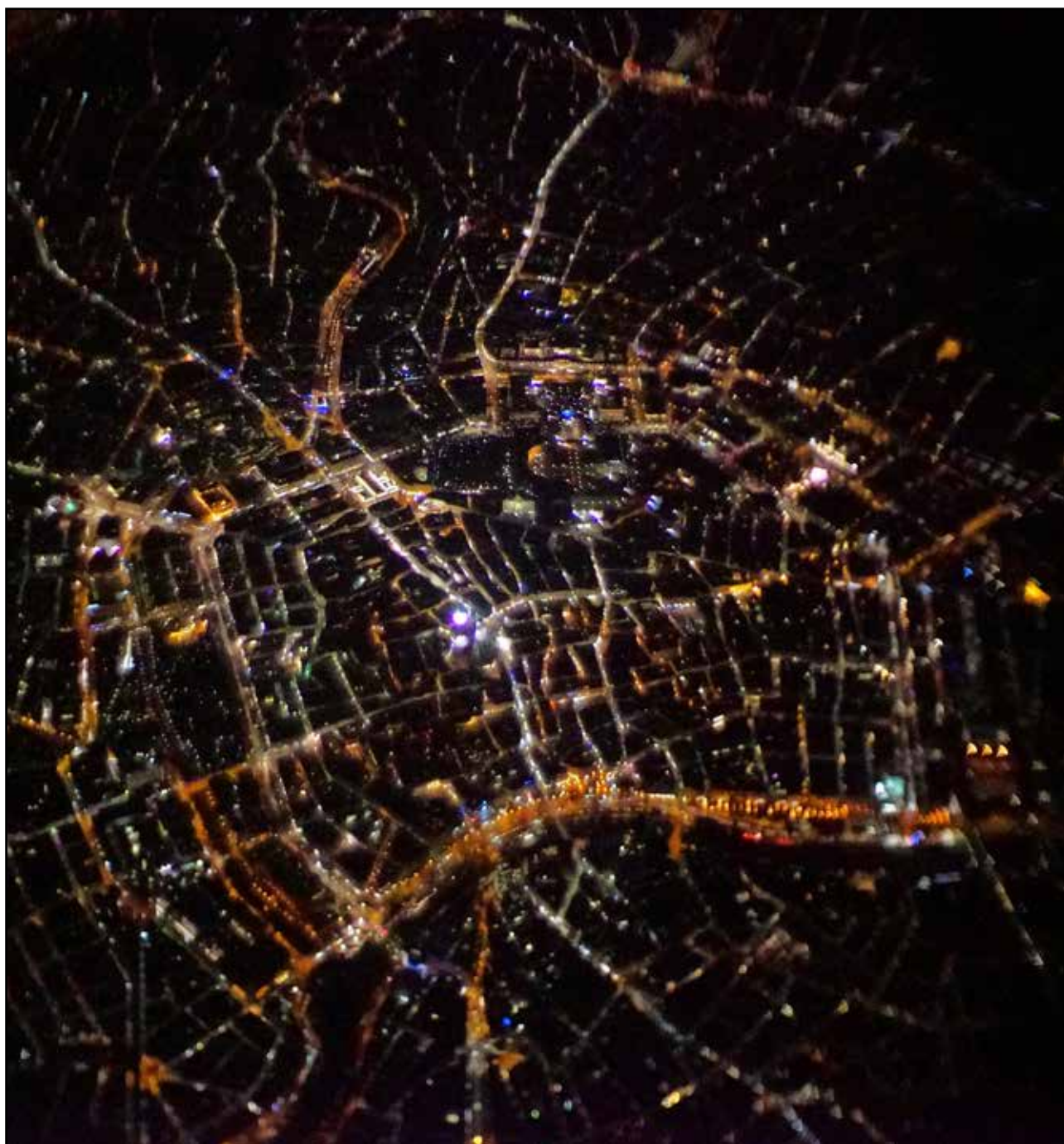


Abb. 1: Nachtaufnahme des 1. Wiener Gemeindebezirks während einer Befliegung im Oktober 2018. Erste Effekte durch die Umrüstung der öffentlichen Beleuchtung konnten bereits identifiziert werden.

INHALT

Auf einen Blick	3
1. Motivation	4
2. Einführung	5
3. Wiener Licht-Messnetz	8
3.1 Messinstrumente	8
3.2 Kalibration	8
3.3 Standorte	8
4. Energieinhalt der Wiener Lichtglocke	10
4.1 Ausdehnung der Wiener Lichtglocke	10
4.2 Messwerte	11
5. Globalstrahlung des Nachthimmels	15
5.1 Tabellarische Darstellung der Jahresmediane	15
5.2 Vergleich der Jahresmediane der Globalstrahlungen	16
5.3 Vergleich der Jahresmediane aller und klarer mondloser Nächte	20
5.4 Lineare Extrapolation der Jahresmediane und Prognosen	21
5.5 Darstellung der Datenvielfalt	27
6. Korrelationen mit Luftgütedaten der MA 22	33
7. Literatur und Quellen	34
8. Zusammenfassung der Ergebnisse	35
Definition der in den Diagrammen und Tabellen verwendeten Begriffe	37
Anhang A: Tabellarische Auflistung der Mediane	38
Anhang B: Zeitlicher Verlauf von Globalstrahlung und Luftgütedaten	54
Anhang C: Darstellung der Korrelationen von Globalstrahlung und Luftgütedaten	67



Abb. 2: Nachtlandschaft beim UNESCO-Welterbe und Wildnisgebiet Dürrenstein. Die dort installierte Messstation befindet sich unter einem natürlichen Nachthimmel und außerhalb des Einflussbereichs der Wiener Lichtglocke.

MIT DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG ZUR AUSLEUCHTUNG DES WIENER NACHTHIMMELS KÖNNTEN MEHR ALS 25.000 HAUSHALTE VERSORGT WERDEN

Auf einen Blick

Im Zentrum Wiens sättigt die Erhellung der Nacht, am Stadtrand sinken die jährlichen Zuwächse, während im Abstand von 36 Kilometern (Großmugl) die Nächte um 10 % pro Jahr heller werden.

Der Gesamtaufwand der Wiener Lichtglocke liegt 2018 bei 37 MW. Der Verlauf von 2011 bis 2018 zeigt ein deutliches Lichtmaximum um 2014 und 2015. Danach stellen wir einen allmählichen Rückgang fest.

Der Verlauf der Lichtglocke und noch deutlicher jener der Einzelstationen zeigt signifikante Schwankungen von Jahr zu Jahr. Zur Aufklärung der Ursachen, die weder astronomisch noch meteorologisch sind, wurden monatliche Analysen des Lichtmessnetzes mit Daten des Luftmessnetzes der Wiener MA 22 kombiniert. Die natürliche Variation über das Jahr wurde genutzt, um Zusammenhänge zwischen den Monatsmedianen von Luftfeuchtigkeit und Feinstaub mit jenen der Globalstrahlungsdaten zu suchen.

Von 2016 bis 2018 korrelieren die Globalstrahlungswerte mit der relativen Luftfeuchtigkeit und den Feinstaubwerten (PM₁₀ und PM_{2,5}). Die engste Beziehung besteht auf der Kuffner-Sternwarte, wo eine Verdoppelung der Luftfeuchtigkeit statistisch von einer Verzehnfachung der Globalstrahlung begleitet wird. Die gefundenen Relationen sind über einen Faktor 100 in der Globalstrahlung äußerst robust und die Koeffizienten der Relationen sind an allen Stationen sehr homogen.

Damit stehen gut bestimmte Zusammenhänge zwischen der Luftgüte und dem Zustand der klaren Atmosphäre zur Verfügung. Das wird es erlauben, Lichtmessnetze auf Standardatmosphären zu beziehen und damit eine wesentlich bessere Vergleichbarkeit der Daten zu unterschiedlichen Zeitpunkten herzustellen.

- 130 Gigawattstunden Jahresaufwand für die Wiener Lichtglocke
- 8 Jahre Vermessung der Lichtglocke zeigen Ansätze eines Rückgangs der Lichtflut
- Mehr Feinstaub bewirkt überproportional mehr Lichtverschmutzung



Abb. 3: Die 2018 von Wien ausgehende Lichtverschmutzung verbrauchte so viel Energie wie vom 2017 um 70 Mio. Euro errichteten Windpark Andlersdorf/Orth (NÖ) erzeugt wird.

1. Motivation

Der noch vor 20 Jahren nur von damit befassten Spezialisten verwendete Begriff Lichtverschmutzung ist zu einem allgemein akzeptierten Anteil in der Diskussion um Umweltschutz und Nachhaltigkeit geworden. Einer der Motoren dieser Entwicklung ist die erhöhte Sensibilität in Bezug auf den Klimawandel und die Forderung zur Einsparung von CO₂-Äquivalenten und anderen Emissionen. Im Zusammenhang mit Lichtverschmutzung ist der unmittelbar sichtbare Repräsentant dieser Überlegungen die nachts auch aus großer Entfernung über Städten sichtbare Lichtglocke. Diese ist im Fall von Wien auch aus Abständen von 100 km noch wahrnehmbar. Die Vermessung des Energieinhalts und der zeitlichen Entwicklung der Ausdehnung dieser Lichtglocke sind daher Gegenstände dieser Studie.

Vor diesem Hintergrund erfährt die zunächst lediglich auf technischem Fortschritt beruhende Umstellung auf LED-Technik einen zusätzlichen Impuls.

Die im Vergleich mit konventioneller Beleuchtung damit erzielbare Energieeinsparung von bis zu 95 Prozent erweist sich vor allem im öffentlichen Bereich als starker Motivator und bewirkt eine überaus rasch erfolgende Umrüstung auf diese neue Technologie.

Während die in Wien für die öffentliche Beleuchtung zuständige MA 33 mit einer selbst entwickelten „Standardleuchte“ ein einheitliches und in Bezug auf die Vermeidung von Lichtverschmutzung hochwertiges Konzept umsetzt, sind der kommerzielle und der private Bereich noch weitgehend unsystematisch und kaum von Effizienz und Suffizienz oder Immissionsvermeidung geprägt. Da die Erzeugung von Licht nun erheblich kostengünstiger ist und zahlreiche neue Möglichkeiten bietet (Farbe, Dimmbarkeit, sehr kurze Ein-/Ausschaltzyklen, etc.), reagiert die Industrie mit Beleuchtungsprodukten, die vor der Einführung der LED-Technik nicht realisierbar waren.

Als Folge bietet der Markt eine wesentlich größere Vielfalt lichtemittierender Produkte, wobei deren durchschnittlicher Lichtstrom drastisch höher ausfällt als es mit konventioneller Technologie der Fall wäre. Hier spannt sich ein neuartiger Bogen vor allem privat genutzter Lichtquellen, bei deren Vermarktung Farbtemperatur und energiesparende Eigenschaften als vorteilhaft angepriesen werden. Dabei werden jedoch hohe Blauanteile in Kauf genommen, die der Umwelt schaden und der menschlichen Wahrnehmung nur wenig Zusatznutzen bringen.

Problematisch ist das abgesehen von maßgeblichen

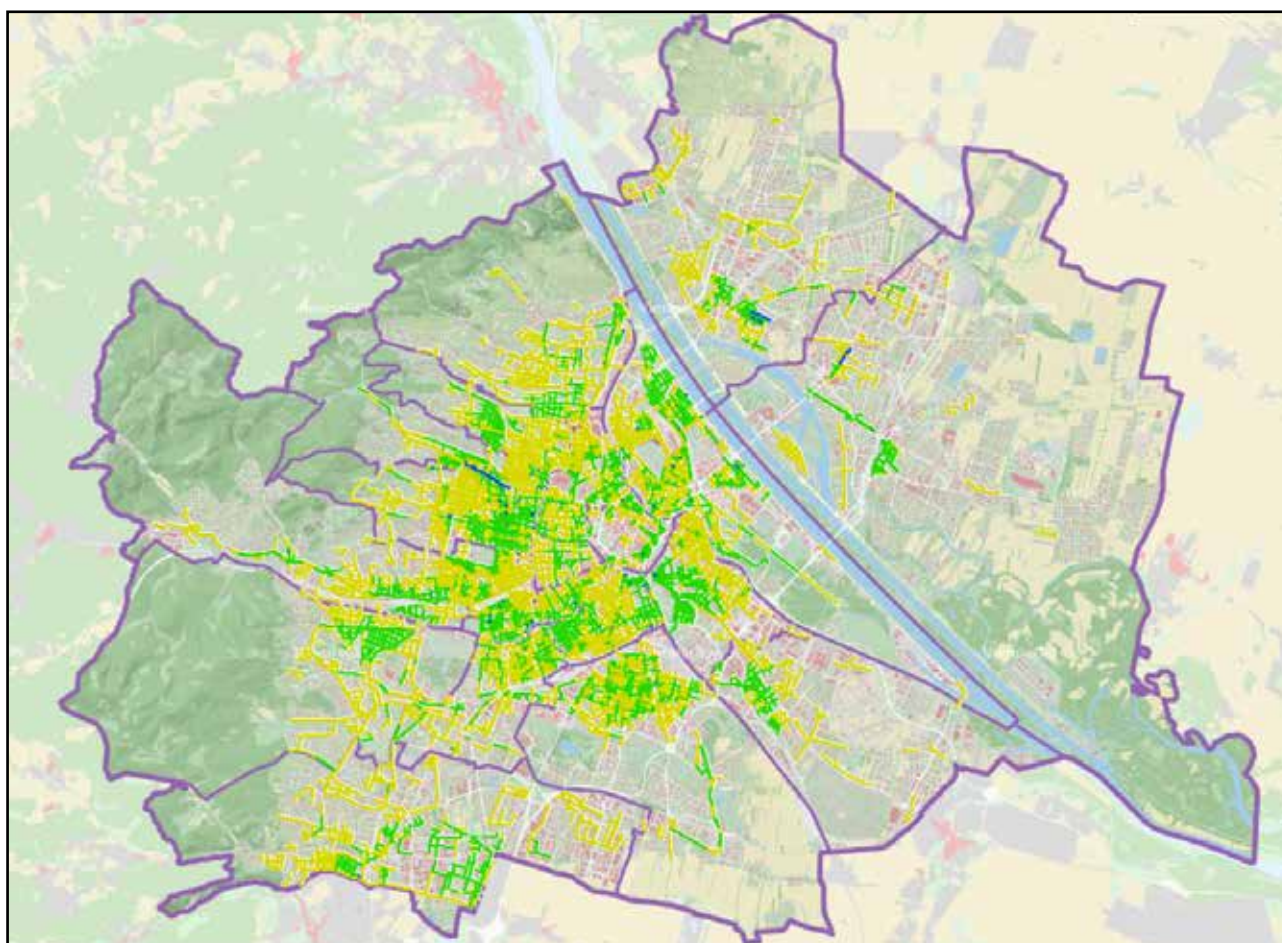


Abb. 4: Karte der Umrüstung von Seilhängeleuchten auf die neue Standardleuchte der Wiener MA 33. Grüne Bereiche sind bereits umgerüstet, gelbe sollen bis Ende 2020 fertiggestellt werden. Stand Dezember 2018.



Abb. 5: Die neue Standardleuchte der Wiener MA 33. Gut erkennbar ist die am Rand montierte Blendschute.

biologischen Störeinflüssen durch den erheblich höheren Streueffekt in der Atmosphäre. Hier muss daher ein ausgewogenes Mittel aus Energieeinsparung und schädlichen Blauanteilen der Lichtquelle angestrebt werden. Der positive Umwelteffekt einer energieeffizienten Beleuchtungstechnologie kann sonst durch eine deutliche Erhöhung der Lichtverschmutzung überkompensiert werden.

Im öffentlichen Bereich rüstet die Wiener MA 33 derzeit rund 50.000 Seilhängeleuchten um, was einem Drittel aller von ihr verwalteten Beleuchtungskörper in Wien entspricht. Dieses Vorhaben ist die umfangreichste Modernisierung der Straßenbeleuchtung seit mehr als einem halben Jahrhundert.

Das bei unseren Messungen früherer Jahre charakteristische Bild der anteiligen Verantwortung für die künstliche Aufhellung des Nachthimmels wird sich dadurch mit hoher Wahrscheinlichkeit verändern. Bisher steuerte die öffentliche Beleuchtung rund ein Drittel der Lichtglocke über Wien bei, während sich die restlichen Anteile auf private und kommerzielle Beleuchtung sowie direkt zum Himmel gerichtetes Licht verteilt haben. Die im Vergleich zu den Vorgängerleuchten nahezu völlig eliminierte Abstrahlung über die Horizontale (also Richtung Himmel) wird die von öffentlicher Beleuchtung ausgehende Lichtverschmutzung voraussichtlich reduzieren. Unsere im Zuge einer Befliegung im Herbst 2018 durchgeführten Messungen liefern erste Hinweise auf diesen wegweisenden Umbruch, der neben einer Reduktion der Nachthimmelsaufhellung wesentliche Einsparungen von CO₂-Äquivalenten verspricht.

2. Einführung

Die vorliegende Studie umfasst eine Auswertung von Messdaten der durch künstliche Beleuchtung verursachten Aufhellung des Nachthimmels („Lichtglocke“) über Wien sowie erstmals einen Vergleich mit Messdaten von Feinstaub-Konzentrationen und Luftfeuchtigkeit („Luftgütedaten“). Der dabei erfasste Zeitraum reicht für die Lichtglocke von 2011 bis 2018 und bei den Luftgütedaten von 2016 bis 2018. In der aktuellen Studie sind in allen Tabellen und Diagrammen jeweils die Messwerte für alle Nächte (Sonne mind. 18 Grad unter dem Horizont) sowie klare mondlose Nächte (zusätzlich wolkenlos und Mond mind. 4 Grad unter dem Horizont) angeführt. Die in den Studien der vergangenen Jahre zusätzlich dargestellte Auftrennung der Messwerte nach eisfreien (Temperatur über 2° C), mondlosen (aber bewölkten) und allen Daten (inklusive Tageslichtmessungen) wurde aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit diesmal nicht verwendet.

Neben einer direkten Fortsetzung der Studie 2017 und einer mit zahlreichen neuen Daten begründeten Analyse der bis dahin festgestellten Trends hat vor allem der Vergleich mit den Luftgütedaten zu bemerkenswerten Ergebnissen geführt. Die hier gezeigten Analysen repräsentieren die international erste Publikation, die sich mit der Entwicklung der Lichtglocke einer Großstadt in Relation zu Feinstaub-Konzentrationen und Luftfeuchtigkeit auseinandersetzt. Daraus kann ein besseres Verständnis der physikalischen Vorgänge rund um die zeitliche Variation von Lichtglocken über Städten abgeleitet werden. Die Interpretation der nächtlichen Globalstrahlungsdaten erhält aufgrund dieser neuen Erkenntnisse zusätzliche Einordnungsparameter, die sich im Fall von Wien gut mit den Luftgütemessstationen der MA22 erfassen lassen. Aufgrund atmosphärenphysikalischer Überlegungen wurden dabei die Feinstaubwerte der Station Lobau und die Luftfeuchtigkeitswerte der Station Hermannskogel für den Vergleich herangezogen (Details siehe Kapitel 6).

Ebenfalls neu in dieser Studie ist die Berechnung des Energieinhalts der Wiener Lichtglocke bis zu ihrem äußersten Rand inklusive ihrer Variationen im Jahresverlauf. Erstmals wurden dabei sämtliche Anteile bis zum Übergang überwiegend natürlicher Nachthimmelshelligkeit bei einem Radius von 70 Kilometer mit einkalkuliert. Möglich ist das durch die Einbeziehung unserer Messstation im Wildnisgebiet Dürrenstein und der dortigen Vermessung des natürlichen Himmelshintergrunds.

*DER ANTEIL **ÖFFENTLICHER BELEUCHTUNG** AN DER WIENER NACHTHIMMELSAUFHELLUNG WIRD WEITERHIN **ABNEHMEN***

Publikationen zur langfristigen Entwicklung der Nachthimmelshelligkeit über Städten sind auch international noch äußerst selten. Wien legt seit dem Jahr 2011 Studien über die Aufhellung der Nacht vor und verfügt im globalen Vergleich über das am weitesten zurück reichende und sowohl in Bezug auf die Menge als auch auf die Qualität der Daten umfangreichste Archiv. Messungen auf der Kuffner-Sternwarte werden seit 2003 durchgeführt und erfolgen seit 2008 vollautomatisch.

Darüber hinaus existiert in Österreich ein seit 2014 kontinuierlich erweitertes Netzwerk von Lichtmessgeräten zur Überwachung der Nachthimmelshelligkeit. Es wird vom Land Oberösterreich betrieben und konzentriert sich dementsprechend auf urbane und ländliche Regionen dieses Bundeslandes. Die Ende 2017 erschienene Studie „Langzeitmessungen der Nachthimmelshelligkeit und Möglichkeiten für Nachthimmels-Schutzgebiete in Oberösterreich“ von Binder, Posch und Wuchterl [6] bietet eine erste Auswertung der insgesamt 23 Messstationen dieses Netzwerks.

Neben einer Konzentration von Messstationen im und rund um den Großraum Linz wurden mehrere Messgeräte auch in besonders dünn besiedelten und mit entsprechend geringer Nachthimmelshelligkeit charakterisierten Gebieten installiert. Eines der beabsichtigten

Ziele dieser Messungen ist die Errichtung von Schutzgebieten zur Erhaltung eines naturnahen Nachthimmels. Die Autoren berichten für die Jahre 2016 und 2017 keine signifikante Zu- oder Abnahme der gemessenen Nachthimmelshelligkeit. Für die Jahre davor liegen keine Analysen vor. In der Studie wird ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Feinstaubkonzentration PM₁₀ und der in der Nähe gemessenen Nachthimmelshelligkeit (siehe Beispiel Vöcklabruck in Abb. 8) genannt.

Das grundsätzliche Verhalten der Korrelation dieser beiden Größen sowie mit anderen Luftgütefaktoren wird auch im Wiener Lichtbericht 2018 bestätigt (siehe Kapitel 6. Korrelationen mit Luftgütedaten).

Bei den Messgeräten handelt es sich um so genannte Sky-Quality-Meter („SQM“), die sich bezüglich ihres Aufbaus und der ausgegebenen Messwerte grundlegend von den in Wien verwendeten Lightmetern unterscheiden. Eine vergleichende Studie der aktuell weltweit gebräuchlichen Messmethoden zur Erfassung der Nachthimmelshelligkeit wurde 2017 veröffentlicht. Sie ist unter <https://arxiv.org/abs/1709.09558> [1] abrufbar.

Das SQM verfügt über eine vergleichsweise kleine Sensorfläche und empfängt im Gegensatz zum Lightmeter nicht das Licht der gesamten Himmelshalbkugel,

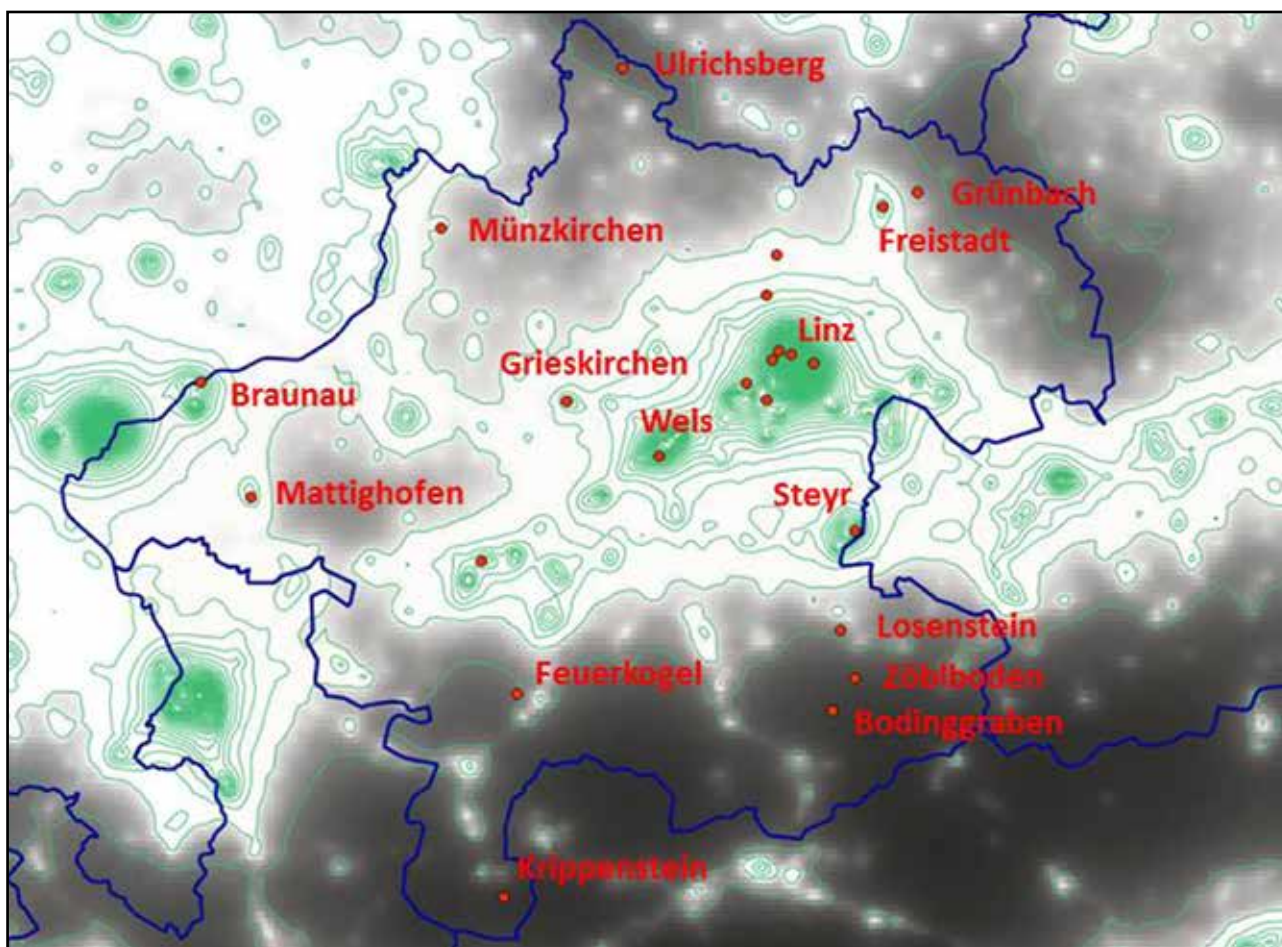


Abb. 6: Karte der Stationsorte des Himmels-hintergrund-magnituden-Messnetzwerks des Landes Oberösterreich. Hinterlegt ist eine Satellitenkarte der vom Weltraum aus ermittelten Nachthimmelshelligkeit.

sondern beschränkt sich auf einen Kegel mit einem Öffnungswinkel von rund 30 Grad. Dementsprechend wird ausschließlich das aus dieser Richtung einstrahlende Licht registriert. Die daraus ermittelte Lichtstärke muss daher als repräsentativ für die Gesamtsituation der vollständigen Himmelshalbkugel angenommen werden. Deutliche Änderungen aus anderen Richtungen werden nur so weit registriert, wie sie in den Messkegel des SQM hinein streuen.

Aufgrund der geringen Sensorgröße des SQM muss bei niedrigeren Lichtwerten direkt im Messgerät länger aufintegriert und über mehrere Einzelmessungen gemittelt werden, um bei dunklen Umgebungsbedingungen ein hinreichend genaues Ergebnis zu erhalten. Die Autoren der oberösterreichischen Studie berichten von einer Messfrequenz von 1/60 Hz. Sie liegt damit um einen Faktor 60 niedriger als jene des Wiener Lichtmessnetzwerks. Instrumentell könnten die für Wien verwendeten Lightmeter auch mit 100 Hz messen, worauf jedoch zur Reduktion des Datenvolumens verzichtet wird.

Ein wesentlicher Unterschied zum Wiener Messnetzwerks ist das Fehlen eines zuverlässigen Bewölkungs-Indikators. Eine provisorische Methode zur Erfassung der Bewölkung wurde in einer anderen Publikation zwar genannt, kam in der oberösterreichischen Studie jedoch nicht zur Anwendung. Die Studienautoren verwendeten zur Einschätzung des Bewölkungseinflusses die von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik publizierten „Okta-Bewölkungen“. Diese standen den Autoren allerdings nur für die Stadt Linz für jeden einzelnen Tag zur Verfügung, während für alle anderen Stationen teilweise monatliche Bewölkungsdaten verwendet wurden.

Die deutliche Auswirkung von Bewölkung auf die Messergebnisse zeigen unsere Vergleichsdiagramme zwischen allen und klaren mondlosen Nächten auf Seite 20. Die möglichst eindeutige und auf einem physikalisch begründeten und reproduzierbaren Verfahren erfolgende Unterscheidung nach zumindest diesen beiden Wettersituationen halten wir für einen unverzichtbaren Faktor für die quantitative Bewertung von Veränderungen in Langzeitstudien.

Die Definition der Nachtlänge - und damit der für die Auswertung der Nachthimmelshelligkeit relevanten Daten - unterscheidet sich von jener des Wiener Lichtberichts. Für die oberösterreichischen Daten wurde die nautische Dämmerung (Sonne mehr als 12 Grad unter dem Horizont) als hinreichend angenommen, um keine Dämmerungseffekte in die Messungen einzubeziehen. Dies kann angesichts des engen Messwinkels und der Ausrichtung des SQM auf 10 Grad nördlich des Zenits ausreichen, wenn die Helligkeit des zu messenden



Abb. 7: Eine Messstation des Lichtmessnetzwerks des Landes Oberösterreich. Station Zöbelboden.

Nachthimmels entsprechend hoch ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zum Ende der nautischen Dämmerung die natürliche Gesamtbeleuchtungsstärke des Nachthimmels wegen des eingestreuten Sonnenlichts um einen Faktor 5 höher ist als zu Beginn der astronomischen Nacht, die hier zugrunde gelegt wird.

Da die Lightmeter in und um Wien die vollständige Himmelshalbkugel und damit das gesamte Licht von oben erfassen, verwenden wir die strengste Nachtdefinition (Sonne mehr als 18 Grad unter dem Horizont), welche die Abwesenheit von Sonnenlicht garantiert. Für den „mondlosen Himmel“ definieren wir eine Mondposition von mehr als 4 Grad unter dem Horizont. Dieser Ansatz reduziert zwar die auswertbare Datenmenge, gestaltet sie aber homogener und macht sie weniger anfällig gegenüber systematischen Fehlern.

Maßgeblich für die Qualitätssicherung der Daten sind die Kalibrationsmöglichkeiten des Messinstruments. Im Gegensatz zum SQM kann das Lightmeter jederzeit direkt vor Ort auf Basis bekannter Quellen wie Sonne und Mond kalibriert und bei Tag mit Globalstrahlungsmessungen direkt verglichen werden.

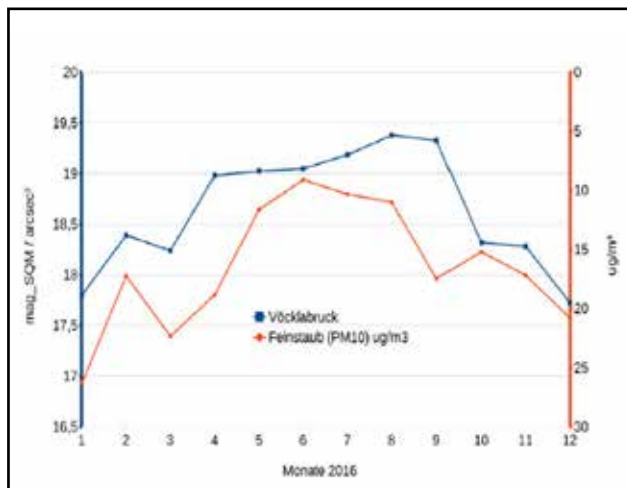


Abb. 8: Verlauf der Nachthimmelshelligkeit in Vöcklabruck und der dort gemessenen PM10-Werte im Jahr 2016.

3. Wiener Licht-Messnetz

3.1. Licht-Messinstrumente

Für sämtliche Messungen dieser Studie wurden Lightmeter der Firma k2wlights des Bautyps Mark 2.3l eingesetzt. Dieses für die präzise und hochfrequente Erfassung von sehr geringen Lichtmengen konzipierte Instrument wurde in einer Kooperation des Vereins Kuffner-Sternwarte und der Thüringer Landessternwarte entwickelt. Es ist weltweit im Einsatz und wird aufgrund seiner herausragenden Qualität u.A. von der Europäischen Südsternwarte (ESO) für das Site-Testing der leistungsfähigsten Teleskope der Welt eingesetzt. Um die Lichtglocke zu quantifizieren, wurden ausgehend vom Wiener Stadtzentrum bis weit über die Stadtgrenze hinaus Lightmeter auf topographisch günstig gelegenen (keine Abschattungs- oder Störlichteffekte) Dächern von Häusern sowie auf einer Berghütte (Wildnisgebiet Dürrenstein) montiert. Das Lightmeter ist zudem mit einem Temperatursensor ausgestattet, u.A. um eine allfällige Vereisung zu erfassen.

3.2. Kalibration der Licht-Messinstrumente

Aufgrund des formulativ bekannten Messverhaltens der Lightmeter wird die Kalibrierung anhand der Vermessung des zeitlichen Verlaufs der Himmelselligkeit bei wolkenlosem Himmel durchgeführt. Aus dem Vergleich dieser Daten mit einem meteorologischen Globalstrahlungsmodell werden für jedes Gerät sechs Koeffizienten ermittelt, die eine direkte Rückrechnung des Messwertes auf die reale Bestrahlungsstärke ermöglichen. Diese entspricht einer Energiestromdichte in $[W/m^2]$. Technische Details unter: http://hms.sternhell.at/lightwiki/index.php?title=Calibration_example_Linz.



Abb. 9: Sensor eines für die Lichtmessungen verwendeten Lightmeters. Die Sensorfläche beträgt rund 50 cm^2 , woraus sich die hohe Lichtempfindlichkeit dieses Geräts ableitet.

3.3. Standorte der Licht-Messinstrumente

Für die Erfassung der Wiener Lichtglocke wurde seit 2009 ein Messnetzwerk aufgebaut, das sieben Stationen umfasst. An der Station Kuffner Sternwarte sind zwecks gegenseitiger Kontrolle zwei Lightmeter aktiv, zusammen waren also acht Lightmeter an den hier präsentierten Messungen beteiligt. Diese Instrumente messen die Gesamthelligkeit des Himmels mit einer Frequenz von 1 Hz, wodurch jedes Lightmeter pro Jahr mehr als 31 Millionen Einzelmessungen durchführt. Zu den vier Stationen, die in Lichtbericht 1, Kapitel II.2 und II.4 beschrieben sind [4], wurde im Dezember 2012 die Station Wien Liesing in Betrieb genommen. Im Oktober 2013 kam die Station Alte Donau hinzu. Zudem betreiben wir seit 2010 eine Messstation im Wildnisgebiet Dürrenstein (NÖ), das einen der natur nächsten Nachthimmel Mitteleuropas bietet.

Die Stationen Alte Donau, Wien Liesing und Klosterneuburg/Höflein konnten aus technischen Gründen nicht in die Datenerhebung des Jahres 2018 mit einbezogen werden. Die dortigen Messgeräte wurden bisher von Freiwilligen auf ehrenamtlicher Basis ohne einfachen Wartungszugang für den Verein Kuffner-Sternwarte betreut, wodurch sowohl die Wartung als auch eine regelmäßige Überprüfung und allfällige Erneuerung der Hardware nicht im erforderlichen Ausmaß durchgeführt werden konnten. Die Stationen sind infolge zu unterschiedlichen Zeitpunkten ausgefallen und konnten nicht zeitgerecht wieder in Betrieb genommen werden. Gemeinsam mit dem Institut für Astronomie in Wien wurde eine Station am L. Figl Observatorium aufgebaut. Diese wird aufgrund der Schneelage erst 2019 in Betrieb genommen und dann vom Verein Kuffner-Sternwarte betreut.

Die zeitliche Überdeckung der dargestellten Daten ist aufgrund der zuletzt durchgängigeren Funktion der Stationen Wien Zentrum, Kuffner Sternwarte, Großmugl und Dürrenstein dennoch höher als bei den im Lichtbericht 2017 herangezogenen Daten. Insbesondere die zur Berechnung der zur Aufrechterhaltung der Wiener Lichtglocke notwendigen Leistung beruht auf identen und zeithomogenen Stichproben. Maßgeblich für die hohe Aussagekraft der Lichtglockenberechnungen ist auch die reproduzierbare Filterung der Daten nach den jeweiligen Wettersituationen, die direkt aus den hochfrequenten Messungen abgeleitet werden.

Aufgrund der nunmehr verbesserten Finanzierungssituation können auch die Stationen Alte Donau, Wien Liesing, Klosterneuburg/Höflein und Hochbärneck mit Beginn des Jahres 2019 durch Reparaturmaßnahmen und Ankäufe technischer Ausrüstung wieder in das Wiener Lichtmessnetz integriert werden. Der Lichtbericht für das Jahr 2019 wird daher auch auf den Daten dieser zusätzlichen Messstationen beruhen.

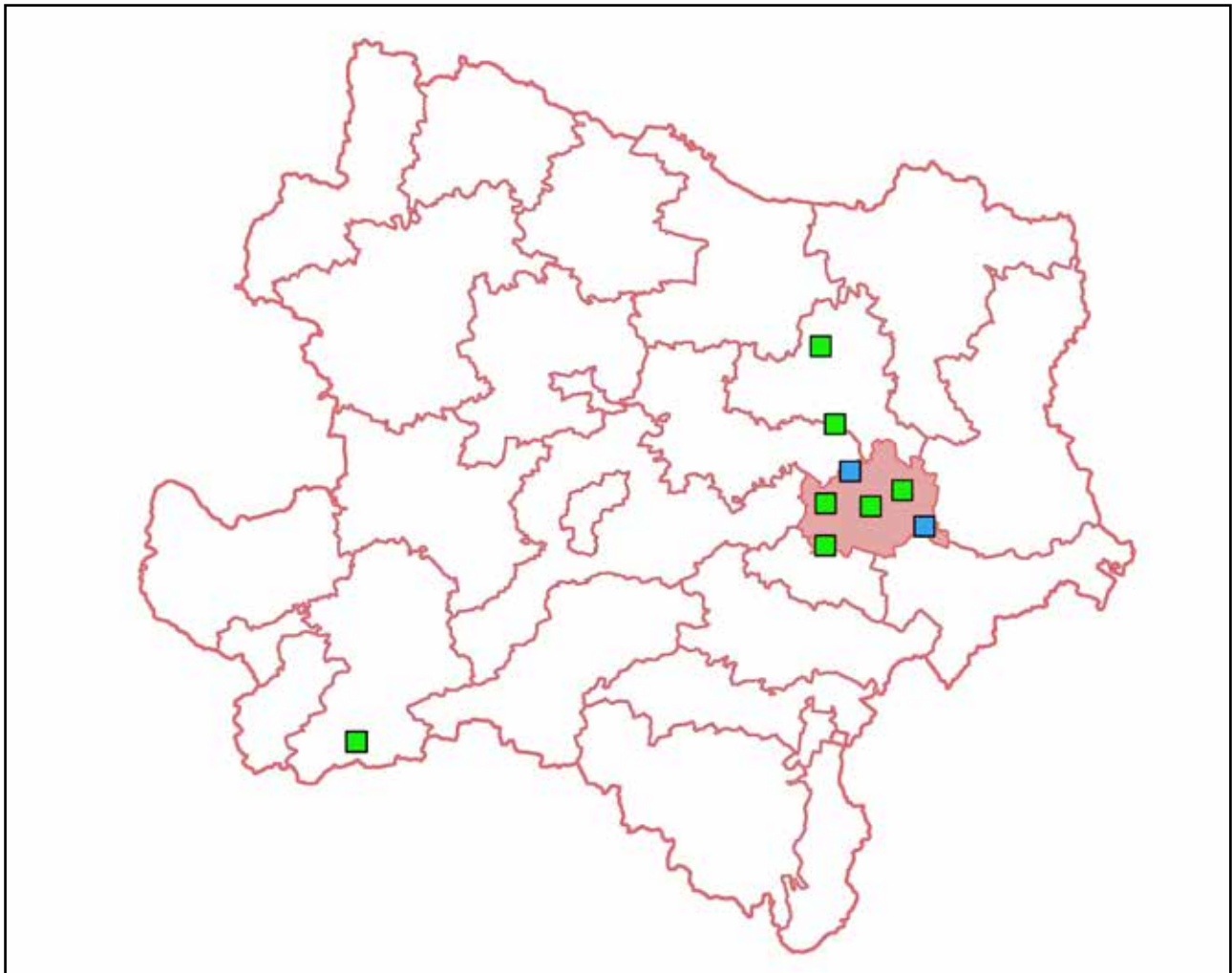


Abb. 10: Lage der für diese Studie verwendeten Lichtmessstationen des Verein Kuffner Sternwarte (grün) und der für den Vergleich mit den Umweltdaten genutzten Umweltmessstationen der MA 22 (blau). Die am weitesten entfernte Station (Dürrenstein) befindet sich in 111 km Luftlinie von Wien-Zentrum. Karte der Bezirksgrenzen Niederösterreichs.

Lichtmessstation	geogr. Breite	geogr. Länge	Höhe [m]	Abstand Zentrum [km]
Wien Zentrum	48° 12' 33,35" N	16° 22' 54,32" O	209	-
Kuffner Sternwarte	48° 12' 46,13" N	16° 17' 28,75" O	280	6,7
Alte Donau	48° 13' 58,00" N	16° 26' 00,80" O	160	4,7
Wien Liesing	48° 08' 16,70" N	16° 17' 08,97" O	220	10,4
Klosterneuburg/Höflein	48° 21' 05,12" N	16° 15' 49,58" O	180	18,2
Großmugl	48° 29' 17,50" N	16° 13' 22,80" O	217	35,7
Dürrenstein	47° 48' 03,61" N	15° 02' 34,34" O	1456	111

Tab. 1: Licht-Messnetz Wien und Umgebung: Geographische Positionen der stationären Messgeräte. Die Abstände von der Station Wien Zentrum ergeben sich zu 4,7 km (Alte Donau); 6,7 km (Kuffner-Sternwarte); 10,4 km (Liesing); 18,2 km (Klosterneuburg/Höflein), 35,7 km für Großmugl und 111 km (Dürrenstein).

Umweltmessstation	geogr. Breite	geogr. Länge	Höhe [m]	Abst. Zentr. [km]	Nächst., Peil.
Hermannskogel	48° 16' 12,57" N	16° 17' 50,15" O	488	9,2	6,4 km, 184°
Lobau	48° 09' 43,45" N	16° 31' 32,21" O	155	11,9	11,9 km, 296°

Tab. 2: Umweltdaten: Bezeichnung und Lage der für die Umweltdaten (Feinstaub und Luftfeuchtigkeit) herangezogenen Umweltmessstationen der MA 22. In der letzten Spalte sind Abstand und Peilung zur nächsten Lichtmessstation angegeben.

4. Energieinhalt der Wiener Lichtglocke

Mit dieser Studie wird erstmals der vollständige Energieinhalt der durch die künstliche Nachthimmelaufhellung über Wien verursachten Lichtglocke bis hin zu ihren äußersten Flanken auf der Basis von Messungen an mehreren Orten bestimmt.

4.1. Ausdehnung der Wiener Lichtglocke

Mithilfe von mehreren Hundert Millionen Einzelmessungen der Station im Wildnisgebiet Dürrenstein verfügen wir über eine Referenz der natürlichen HimmelsHELLIGKEIT über den gesamten Zeitraum [5]. Auch bei absolut wolkenlosen Bedingungen und unter dem Horizont stehendem Mond ist die Gesamthelligkeit des natürlichen (von künstlicher Aufhellung unbeflussten) Nachthimmels nicht zu jedem Zeitpunkt gleich. Als Verursacher natürlicher Variationen bei klarem mondlosem Nachthimmel sind vor allem die Milchstraße, das Zodiakallicht und auf noch kleineren Skalen der Gegenschein und der Airglow zu nennen. Auf Basis dieser Effekte kann sich die natürliche NachthimmelsHELLIGKEIT bereits innerhalb einer Nacht mehrfach verändern. Durch den parallelen Betrieb dieser „Hintergrund“-Station mit den Stationen im unmittelbaren

Einflussgebiet Wiens kann dort für jeden Zeitpunkt der typische Hintergrundwert abgezogen werden. Die Differenz ergibt den tatsächlich durch künstliche Aufhellung verursachten Anteil an der Gesamthelligkeit.

Anhand der bekannten geographischen Positionen aller Lichtmessstationen kann mit den dort gemessenen Helligkeiten ein Modell der Lichtglocke berechnet werden. Deren Grenzen ergeben sich aus dem Abstand vom Wiener Stadtzentrum, ab dem sie nicht mehr zur künstlichen Aufhellung des Gesamthimmels über dem Beobachtungsort beiträgt. Das Volumen der Lichtglocke wird durch gestapelte Kegelstümpfe mit einem Kegel für die Spitze im Zentrum dargestellt.

Dadurch ist eine Berechnung des gesamten Energiestroms der Lichtglocke durchführbar. Mit Hilfe des bekannten Energieaufwands für die Halbschaltung eines definierten Teils der öffentlichen Beleuchtung kann daraus die zur Erzeugung der Lichtglocke notwendige Leistung in Megawatt berechnet werden (siehe dazu auch [7], Kap. III, S. 9). Sobald diese Halbschaltung um 22:00 Uhr (in früheren Jahren 23:00 Uhr) erfolgt, zeigt sich eine entsprechende Reduktion der von den Lichtmessstationen empfangenen Helligkeit. Da die dabei eingesparte elektrische Leistung für den Betrieb dieser Beleuchtungskörper angebar

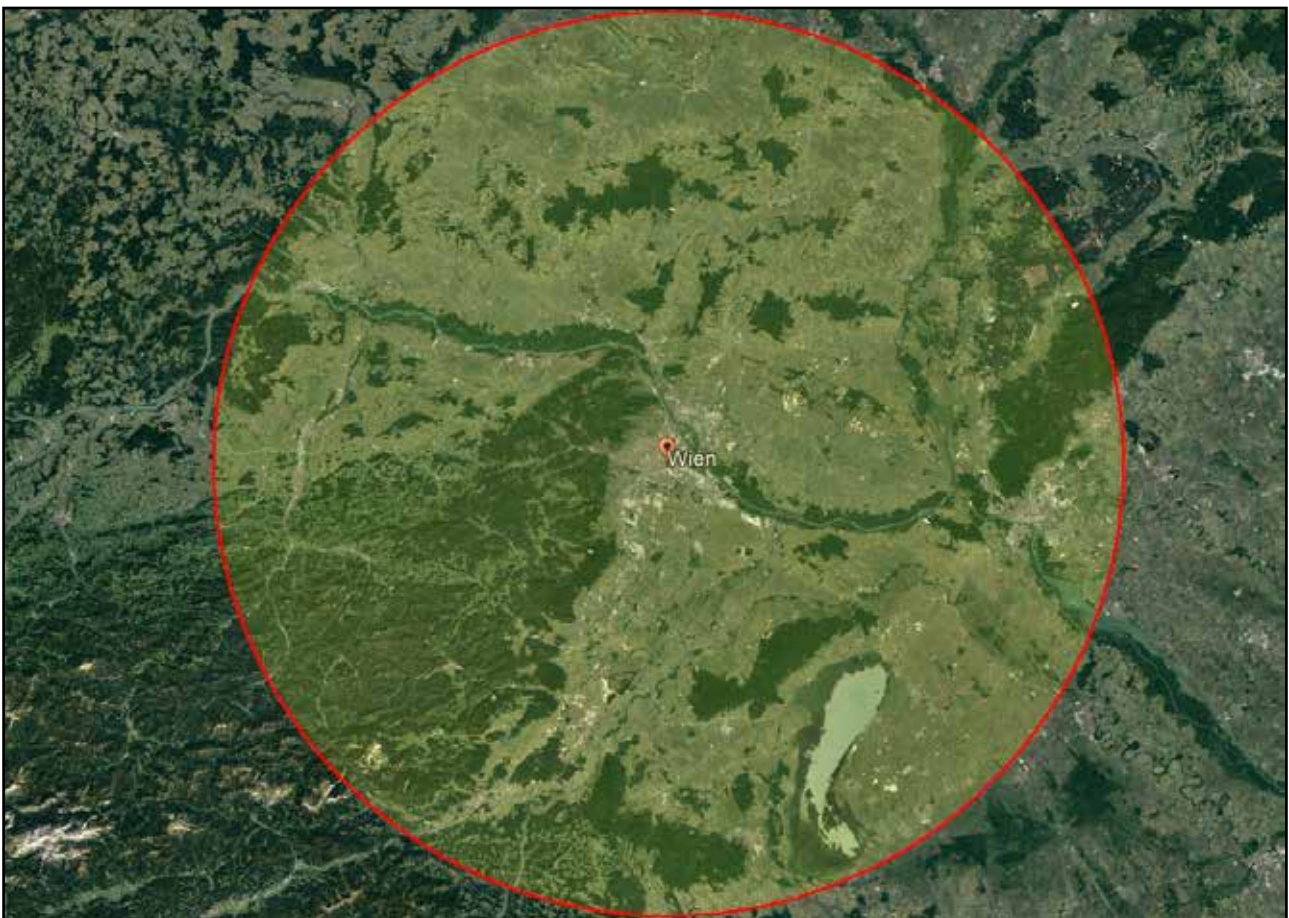


Abb. 11: Grenze des Einflussgebiets der Wiener Lichtglocke 2018 unter der vereinfachten Annahme einer kreissymmetrischen Geometrie. Der Durchmesser der Lichtglocke beträgt bis zu ihren Flanken 140 Kilometer.

DIE **WIENER LICHTGLOCKE** STÖRT DIE NATÜRLICHE NACHT AUF EINER FLÄCHE VON MEHR ALS **15.000 QUADRATKILOMETERN**

ist (Informationen von *Wien Energie*), kann direkt auf die für den Erhalt der vollständigen Lichtglocke notwendige Leistung hochgerechnet werden (Anmerkung: Wünschenswert ist eine Korrelation mit den vollständig zeitabhängigen Daten des Energieaufwands für öffentliche Beleuchtung. Dies würde die Präzision des von uns berechneten Energiebedarfs für die Aufrechterhaltung der Lichtglocke verbessern).

Möglich wird dieser Schluss erst durch die hohe Messfrequenz von 1 Hz, die eine genaue Erfassung der unterschiedlichen Schaltstufen ermöglicht. Nur so können die teils starken Schwankungen aufgrund lokaler Wettereffekte und anderer Faktoren (siehe Abschnitt Korrelationen mit Luftgütedaten) behandelt werden. Das von der Lichtglocke in Richtung Boden zurückgestreute Licht wird also in allen - auch sehr kleinskaligen - zeitlichen Situationsänderungen ganzjährig mit einem großen Stichprobenumfang erfasst.

Die in der Lichtglocke enthaltene Leistung repräsentiert im Median ein besonders stabiles statistisches Maß über längere Zeiträume, da es mit den Daten mehrerer Messstationen an verschiedenen Positionen in und

außerhalb Wiens ermittelt wird. Er basiert daher auch für den Zustand der vergleichsweise seltenen wolken- und mondlosen Nächte auf einer besonders hohen Zahl von Messungen und auf allen verfügbaren Messungen für Wien. Grundsätzlich ist die vollständige Lichtglocke der Stadt mit möglichst zahlreichen und repräsentativ verteilten Stationen am besten erfassbar.

4.2 Messwerte

Die in den Tabellen der folgenden Seite angegebenen Werte entsprechen den Medianen der zur Ausleuchtung der Wiener Lichtglocke nötigen Leistung im links daneben angeführten Monat, beziehungsweise Jahr. In der linken Spalte sind die Werte für alle Nächte (also inklusive Bewölkung) angegeben, auf der rechten Seite nur die Werte für wolken- und mondlose Situationen. Durch die Reflexionseigenschaften von Wolken sind die Werte in der linken Spalte in manchen Fällen sogar erheblich höher. Diese Unterschiede basieren primär auf meteorologischen Effekten wie dem Bedeckungsgrad sowie der Dichte und der Höhe der Untergrenze

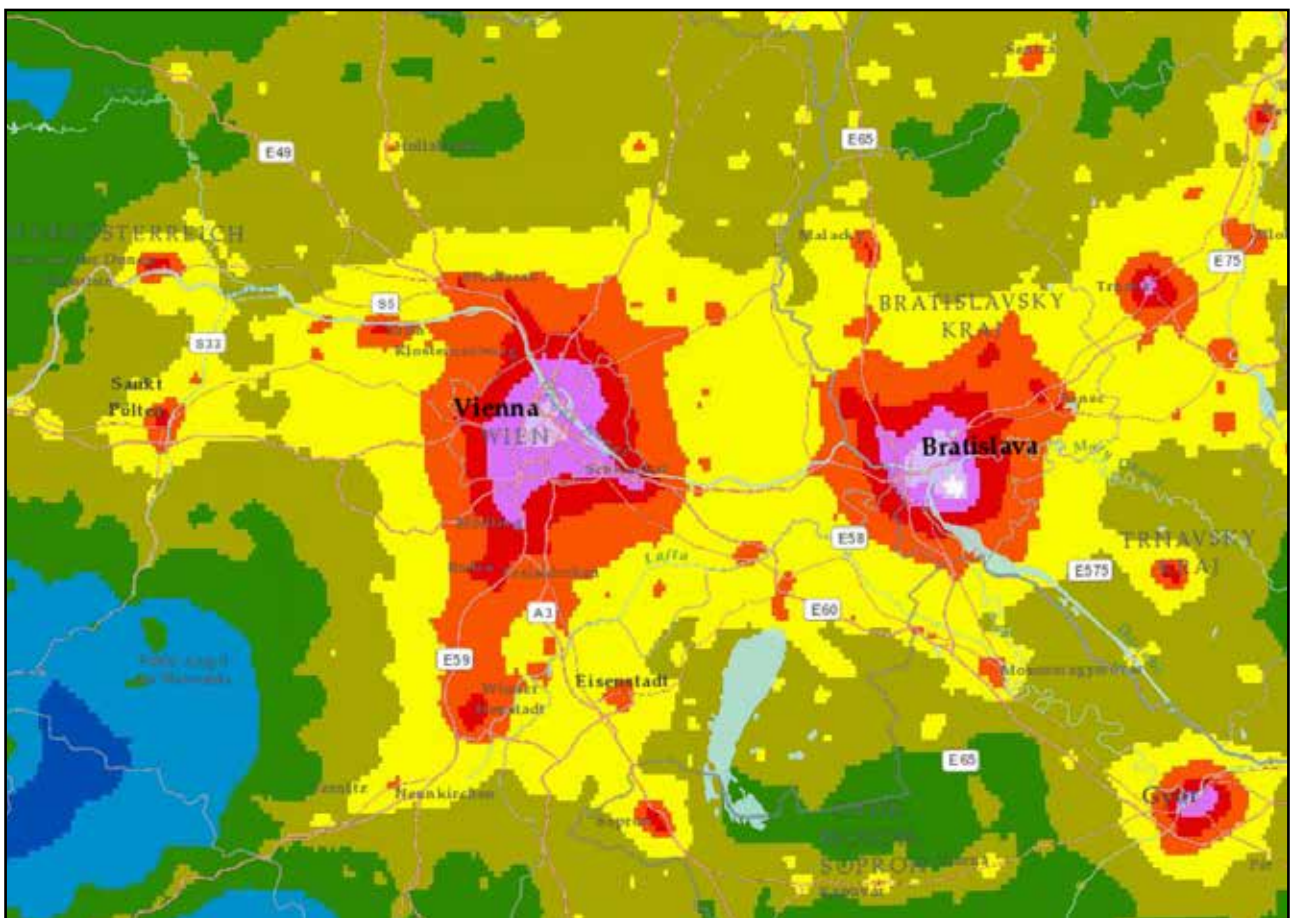


Abb. 12: Ausschnitt aus dem Weltatlas der Lichtverschmutzung mit dem gleichen Maßstab wie in der nebenstehenden Abbildung. Im Vergleich wird sichtbar, dass die Lichtglocke Wiens in nahezu alle Richtungen mit den Lichtglocken anderer Städte überlappt. Der von anderen Städten am wenigsten gestörte Blick liegt links unten (blau) Richtung Alpenhauptkamm.

WIENER LICHTGLOCKE Leistung [MW]		
Monat	alle	klar mondlos
Mär 2016	95	48
Apr 2016	94	24
Mai 2016	74	22
Jun 2016	62	30
Jul 2016	68	19
Aug 2016	41	19
Sep 2016	42	25
Okt 2016	143	35
Nov 2016	142	34
Dez 2016	97	32
Jän 2017	291	158
Dez 2017	176	65
Feb 2018	190	170
Mär 2018	148	63
Apr 2018	56	27
Mai 2018	181	37
Jun 2018	72	35
Jul 2018	127	34
Aug 2018	56	28
Sep 2018	66	31
Okt 2018	77	34
Nov 2018	210	141

Tab. 3: Für die Aufrechterhaltung der Wiener Lichtglocke erforderliche elektrische Leistung [Megawatt]. Monatsmediane von 2016 bis 2018.

der jeweils vorhanden Bewölkung. Schwankungen der Medianwerte bei klaren und mondlosen Bedingungen im Monatsverlauf weisen hingegen auf Veränderungen bestimmter Aerosolkonzentrationen der Wiener Luft hin (siehe folgendes Kapitel 6). Die in Tabelle 3 angegebenen Werte für die Monats-Mediane im Zeitraum von 2016 bis 2018 verdeutlichen beispielhaft das Ausmaß dieser Schwankungen. Besonders auffällig ist etwa der hohe Wert für den November-Median des Jahres 2018. Derart kurzfristige Änderungen der tatsächlich aus der Stadt zum Himmel abgegebenen Lichtmenge scheiden Aufgrund der Stärke der Variationen hochwahrscheinlich als Erklärung aus.

Um aus den Daten langfristige Trends abzulesen, betrachten wir die Jahresmediane. Hierbei wirken sich lokale und zeitlich kurzfristige Schwankungen deutlich geringer auf das Gesamtergebnis aus.

Die jährlichen Medianwerte der klaren und mondlosen Nächte waren im ersten Jahr unserer Messungen im Jahr 2011 mit 10 Megawatt am geringsten. In den beiden folgenden Jahren kam es jedes Jahr etwa zu einer Verdoppelung, bis sich in den Jahren 2014 und

WIENER LICHTGLOCKE Leistung [MW]			
Jahr	alle	Jahr	klar mondlos
2011	54	2011	10
2012	67	2012	17
2013	100	2013	42
2014	148	2014	60
2015	146	2015	56
2016	100	2016	29
2017	130	2017	41
2018	133	2018	37

Tab. 4: Für die Aufrechterhaltung der Wiener Lichtglocke erforderliche elektrische Leistung [Megawatt]. Jahresmediane von 2011 bis 2018.

2015 mit 60 und 56 Megawatt ein seither nicht mehr erreichtes Plateau eingestellt hat. Seit 2016 führt der langfristige Trend wieder abwärts, mit einem vorläufigen Wert für das Jahr 2018 von 37 Megawatt. Das entspricht etwa der Leistung des 2017 um 70 Millionen Euro erbauten und von Wien Energie mitbetriebenen Windparks Andlersdorf/Orth (NÖ).

Der Vergleich mit den Werten für alle Nächte (also inklusive Bewölkung) zeigt trotz der deutlich höheren Werte die jeweils gleichen Trends. Auch die zeitlichen Verläufe erweisen sich als weitgehend deckungsgleich (siehe Abb. 14 und 15 auf Seite 14).

Unter der Annahme, dass nächtliche Beleuchtung im Jahresmittel 10 Stunden pro Kalendertag eingeschaltet bleibt, lässt sich aus der Leistung auch die gesamte Energiemenge für ein Jahr und daraus über den aktuellen österreichischen Strommix ein CO₂-Äquivalent bestimmen. Die Höhe des dafür korrekten Umrechnungsfaktors wird in Abhängigkeit von der Quelle sehr unterschiedlich beziffert. So gibt derzeit die *Wien Energie* 0,132 kg CO₂ pro kWh an, während das *Umweltbundesamt* einen Wert von 0,248 kg/kWh ausweist. Letzterer soll die gesamtösterreichische Stromaufbringung inklusive Vorkette abbilden und muss daher nicht unbedingt dem spezifischen Strommix in Wien entsprechen. Wir weisen darauf hin, dass in unserem Lichtbericht für das Jahr 2012 [8, S. 7] noch ein Wert von 0,561 kg/kWh angenommen wurde. Dieser beruht auf den Angaben des deutschen Umweltbundesamtes mit dem deutschen Strommix der Jahre 2009 und 2010.

In Tab. 5 und 6 geben wir die CO₂-Äquivalente der Jahre 2011 bis 2018 für die beiden aktuellen Umrechnungsfaktoren an. Der bisherige Höchstwert im Jahr 2014 bewegt sich demnach bei 71.354 bis 134.059 Tonnen für alle Nächte und 28.830 bis 54.166 Tonnen für klare mondlose Nächte. 2018 waren es entsprechend 64.011 bis 120.264 Tonnen, beziehungsweise 17.706 bis 33.265 Tonnen.

DER **NACHTHIMMEL ÜBER DER WIENER INNENSTADT** IST BEI KLAREM HIMMEL **SO HELL WIE DER VOLLMOND** IM ZENIT.



Abb. 13: Blick auf die Wiener Lichtglocke von den Lichtmessstationen Kuffner-Sternwarte (oben), Großmugl (Mitte) und Dürrenstein (unten). Obwohl sich die Kuffner-Sternwarte bereits am westlichen Rand von Wien befindet, erhellt die Lichtglocke den gesamten Himmel. Bei Großmugl ist sie nur mehr in einer Himmelsrichtung dominant und darüber zeigen sich bereits deutlich auch lichtschwächere Sterne. Am Dürrenstein in 111 Kilometern Entfernung vom Stadtzentrum ist sie noch immer sichtbar (Bildmitte), stört den darüber liegenden Himmel aber nicht mehr.

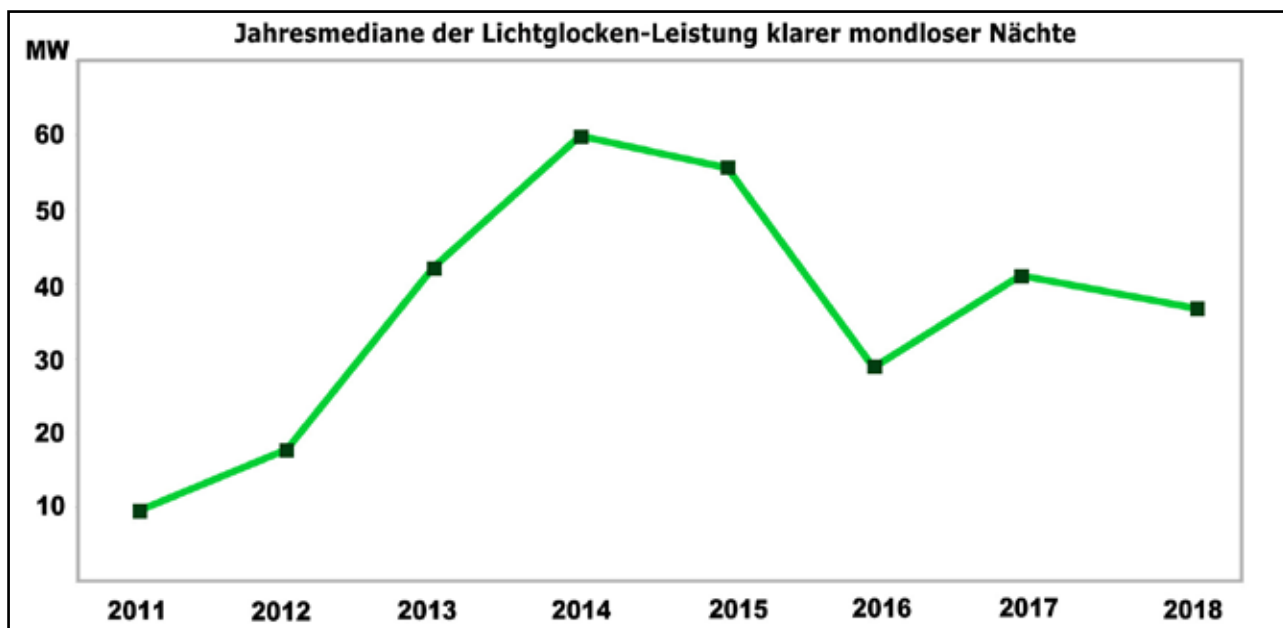


Abb. 14: Elektrische Leistung zur Aufrechterhaltung der Wiener Lichtglocke im Jahresverlauf. Eingetragen sind die Mediane klarer mondloser Nächte. Angabe in Megawatt.

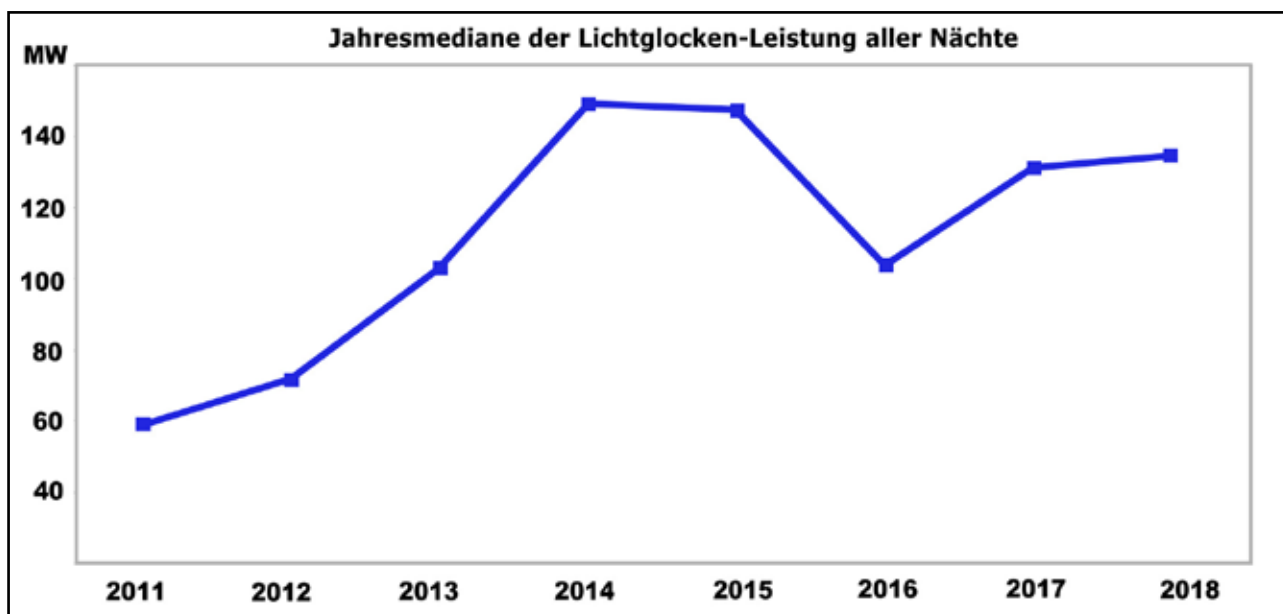


Abb. 15: Elektrische Leistung zur Aufrechterhaltung der Wiener Lichtglocke im Jahresverlauf. Eingetragen sind die Mediane aller Nächte. Angabe in Megawatt.

WIENER LICHTGLOCKE, alle CO ₂ [t]		
Datum	0,248 kg/kWh	0,132 kg/kWh
2011	49.000	26.000
2012	61.000	32.000
2013	90.000	48.000
2014	134.000	71.000
2015	132.000	71.000
2016	91.000	48.000
2017	117.000	62.000
2018	120.000	64.000

Tab. 5: CO₂-Äquivalente [Tonnen] der zur Ausleuchtung der Wiener Lichtglocke erforderlichen Energie. Gerundete Jahresmediane aller Nächte von 2011 bis 2018.

WIENER LICHTGLOCKE, klar mondlos CO ₂ [t]		
Datum	0,248 kg/kWh	0,132 kg/kWh
2011	9.000	5.000
2012	16.000	9.000
2013	38.000	20.000
2014	54.000	29.000
2015	50.000	27.000
2016	26.000	14.000
2017	37.000	20.000
2018	33.000	18.000

Tab. 6: CO₂-Äquivalente [Tonnen] der zur Ausleuchtung der Wiener Lichtglocke erforderlichen Energie. Gerundete Jahresmediane klarer mondloser Nächte von 2011 bis 2018.

5. Globalstrahlung des Nachthimmels

5.1 Tabellarische Darstellung der Jahresmediane und ihrer relativen Änderungen

Die folgenden Tabellen zeigen die Jahresmediane der Globalstrahlungen aller sowie klarer mondloser Nächte von 2011 bis 2018. In der Spalte „Diff %“ ist die relative prozentuale Änderung im Vergleich zum jeweiligen Vorjahr verzeichnet. Der Mittelwert gibt den arithmetischen Durchschnitt dieser Änderungen an.

Jahr	Wien Zentrum, alle	Diff %	Wien Zentrum, klar	Diff %
2011	0,536		0,257	
2012	0,766	42,9	0,206	-19,8
2013	1,415	84,7	0,307	49,0
2014	0,961	-32,1	0,331	7,8
2015	0,851	-11,4	0,271	-18,1
2016	0,883	3,7	0,228	-16,0
2017	0,754	-14,6	0,247	8,3
2018	0,598	-20,7	0,239	-3,2
Mittelwert		7,5		1,1

Tab. 7: Relative Änderung der Jahresmediane der Globalstrahlung aller („alle“) und klarer mondloser („klar“) Nächte von 2011 bis 2018 der Station Wien Zentrum.

Jahr	Kuffner-Sternwarte, alle	Diff %	Kuffner-Sternwarte, klar	Diff %
2011	0,301		0,069	
2012	0,307	2,0	0,087	26,1
2013	0,613	99,7	0,127	46,0
2014	0,549	-10,4	0,167	31,5
2015	0,499	-9,1	0,14	-16,2
2016	0,465	-6,8	0,112	-20,2
2017	0,568	22,2	0,132	17,7
2018	0,520	-8,5	0,138	5,1
Mittelwert		12,7		12,9

Tab. 8: Relative Änderung der Jahresmediane der Globalstrahlung aller („alle“) und klarer mondloser („klar“) Nächte von 2011 bis 2018 der Station Kuffner-Sternwarte.

Jahr	Großmugl, alle	Diff %	Großmugl, klar	Diff %
2011	0,034		0,01	
2012	0,049	44,1	0,017	70,0
2013	0,043	-12,2	0,024	41,2
2014	0,099	130,2	0,045	87,5
2015	0,104	5,1	0,046	2,2
2016	0,064	-38,1	0,025	-45,9
2017	0,099	53,8	0,038	51,2
2018	0,097	-1,8	0,032	-13,7
Mittelwert		25,9		27,5

Tab. 9: Relative Änderung der Jahresmediane der Globalstrahlung aller („alle“) und klarer mondloser („klar“) Nächte von 2011 bis 2018 der Station Großmugl.

5.2 Vergleich der Jahres-Mediane der Globalstrahlung aller Nächte

Darstellung des Verlaufs der Jahres-Mediane der Globalstrahlung aller Nächte über den Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl in $[\text{mW}/\text{m}^2]$.

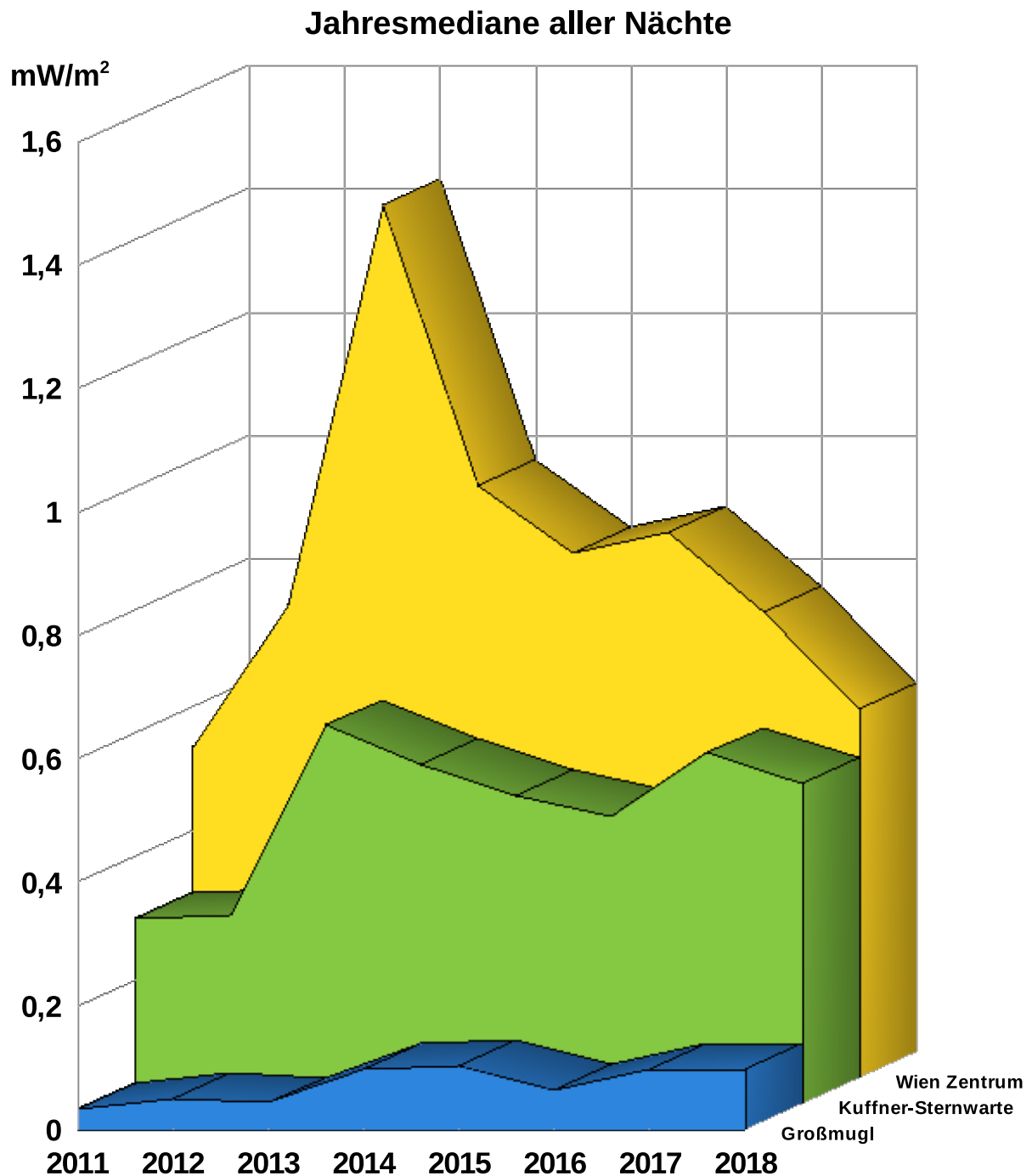


Abb. 16. Verlauf der Mediane der Globalstrahlung aller Nächte über den Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl von 2011 bis 2018. Angabe in $[\text{mW}/\text{m}^2]$.

Vergleich der Jahres-Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte

Darstellung des Verlaufs der Jahres-Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte über den Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl in mW/m^2 . Die Skalierung wurde gegenüber der Darstellung aller Nächte angepasst.

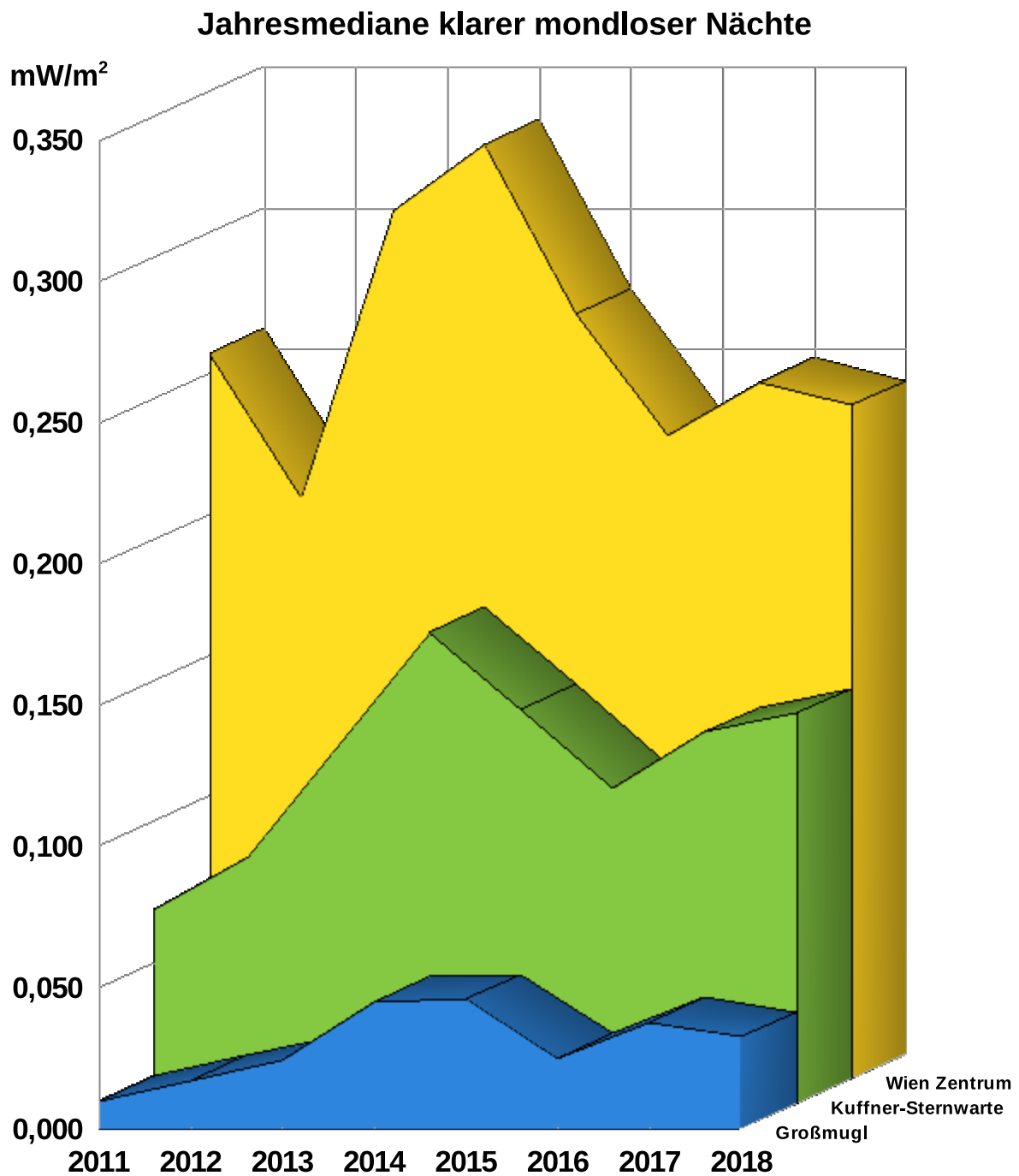


Abb. 17. Verlauf der Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte über den Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl von 2011 bis 2018. Angabe in mW/m^2 .

Vergleich der Jahres-Mediane der Globalstrahlung aller Nächte

Kurven-Darstellung des Verlaufs der Jahres-Mediane der Globalstrahlung aller Nächte über den Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl in $[mW/m^2]$.

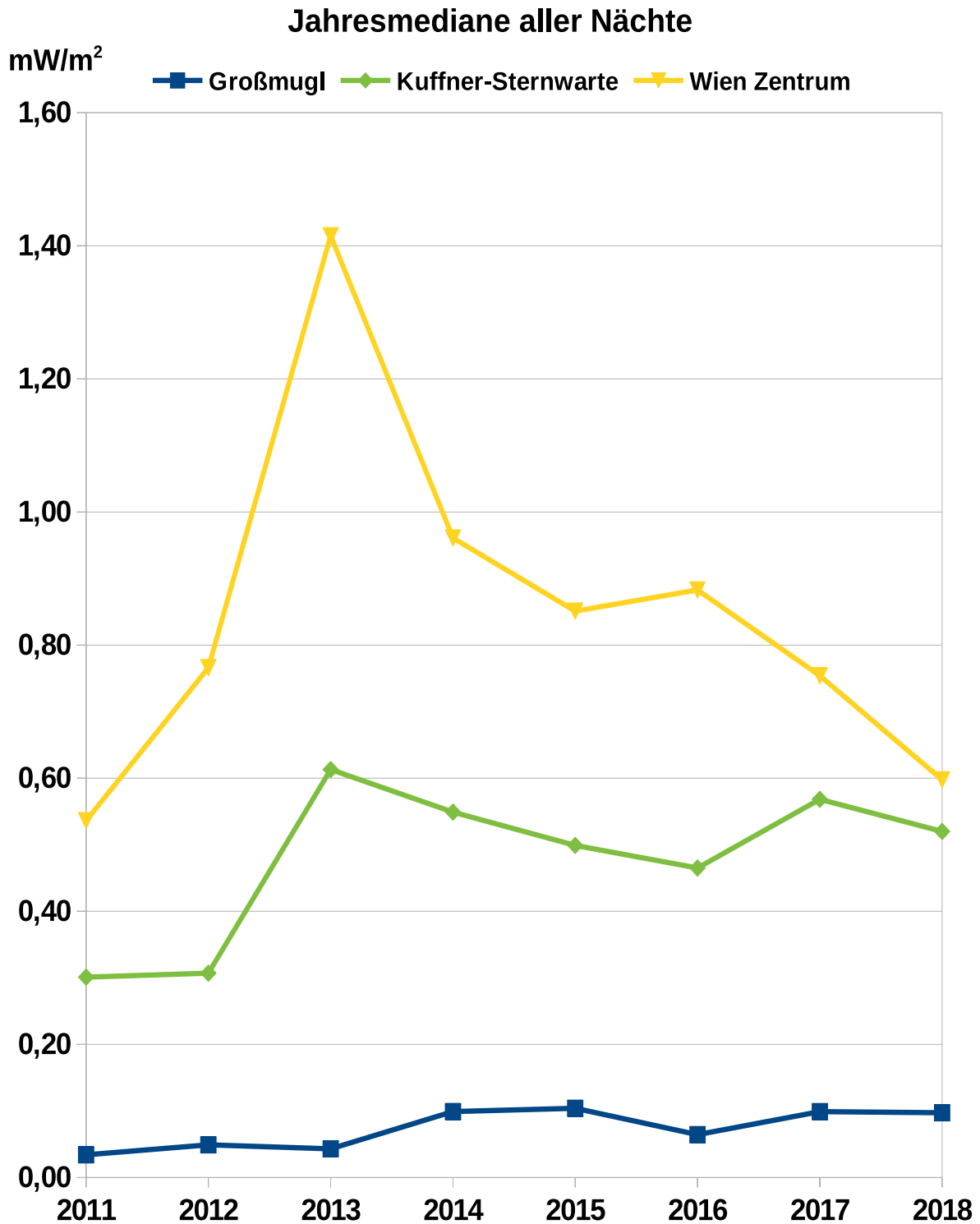


Abb. 18. Verlauf der Mediane der Globalstrahlung klarer aller Nächte über den Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl von 2011 bis 2018. Angabe in $[mW/m^2]$.

Vergleich der Jahres-Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte

Kurven-Darstellung des Verlaufs der Jahres-Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte über den Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl in mW/m^2 . Die Skalierung wurde gegenüber der Darstellung aller Nächte angepasst.

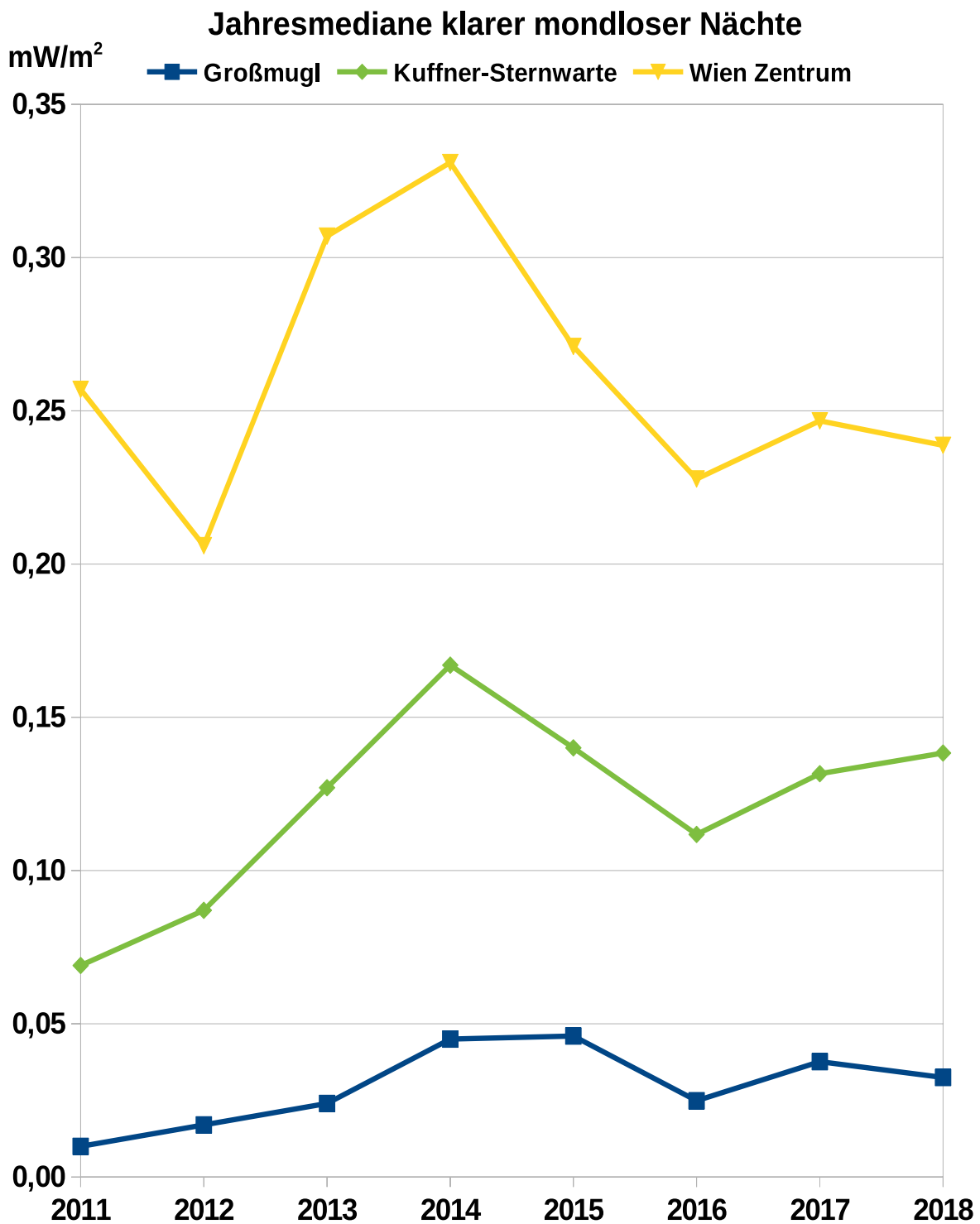


Abb. 19. Verlauf der Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte über den Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl von 2011 bis 2018. Angabe in mW/m^2 .

5.3 Vergleich der Jahresmediane aller und klarer mondloser Nächte

Die folgenden Diagramme bieten einen Überblick, wie sich die Jahresmediane der Globalstrahlung aller Nächte von jener klarer mondloser Nächte zwischen den Jahren 2011 und 2018 unterscheiden. Die Volumen-Darstellung soll einen Vergleich für die jeweils dabei vom Himmel rückgestreute Lichtmenge vermitteln. Wolken und andere meteorologische Phänomene lassen einen lichtverschmutzten Himmel demnach wesentlich heller erscheinen.

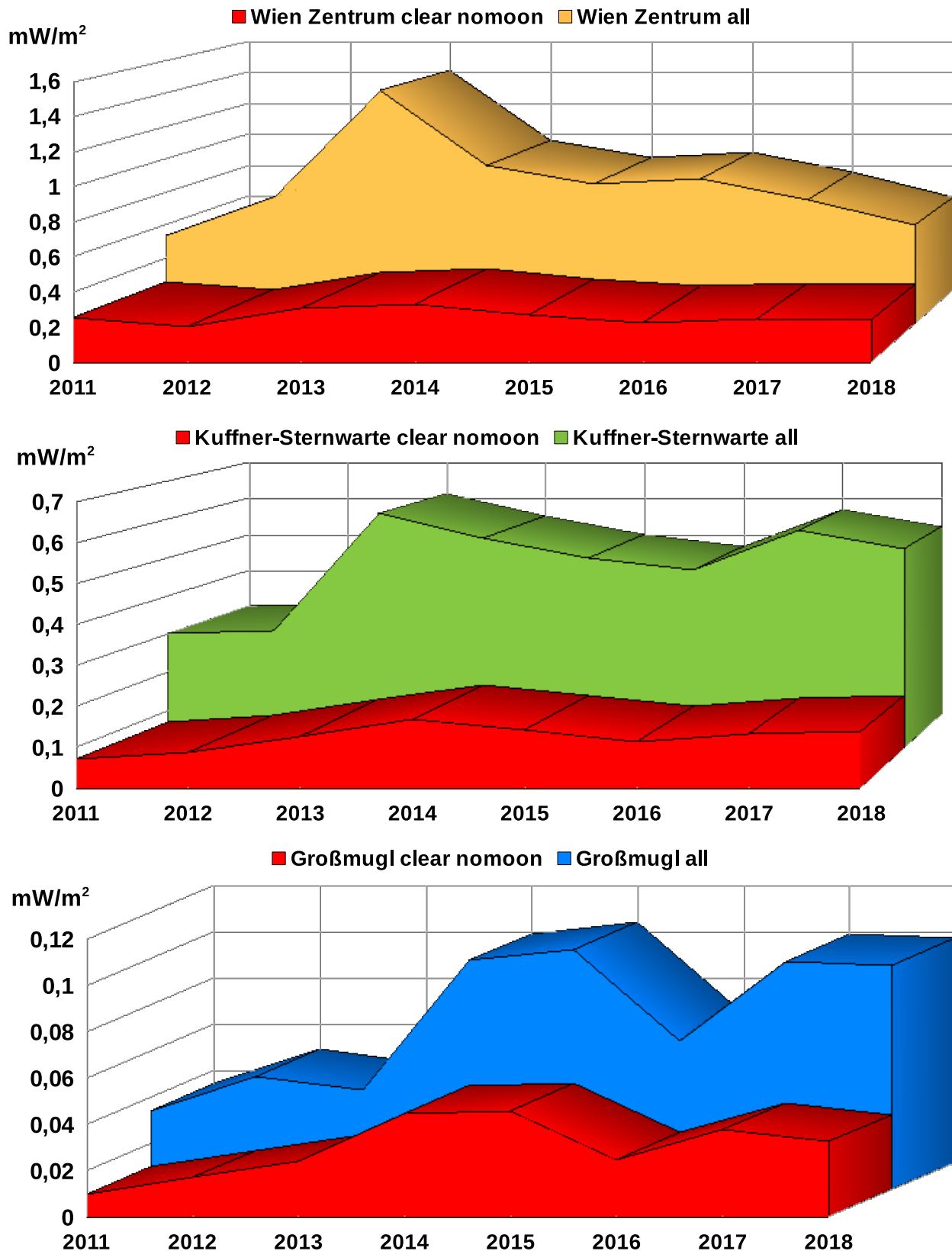


Abb. 20: Jahresmediane der Globalstrahlung aller und klarer mondloser Nächte im Vergleich.

5.4 Lineare Extrapolation der Jahresmediane und Prognosen

Die folgenden Diagramme zeigen Histogrammdarstellungen der Jahresmediane der Globalstrahlung für drei Stationen sowie eine Extrapolation bis zum Jahr 2021 über eine lineare Regression. Die zugehörige Gleichung ist angegeben, die Schätzwerte für die folgenden drei Jahre können direkt abgelesen werden. Ab der Abb. 27 werden selektive Extrapolationen gezeigt. Hier bleiben für die lineare Regression alle Jahre unberücksichtigt, bei denen von weniger als acht Monaten Daten zur Verfügung stehen. Damit können eventuelle Auswahleffekte durch die Nichterfassung beispielsweise ganzer Jahreszeiten eliminiert werden. Die Trendrichtungen bleiben davon offensichtlich unberührt, lediglich die für 2021 extrapolierten Werte differieren etwas.

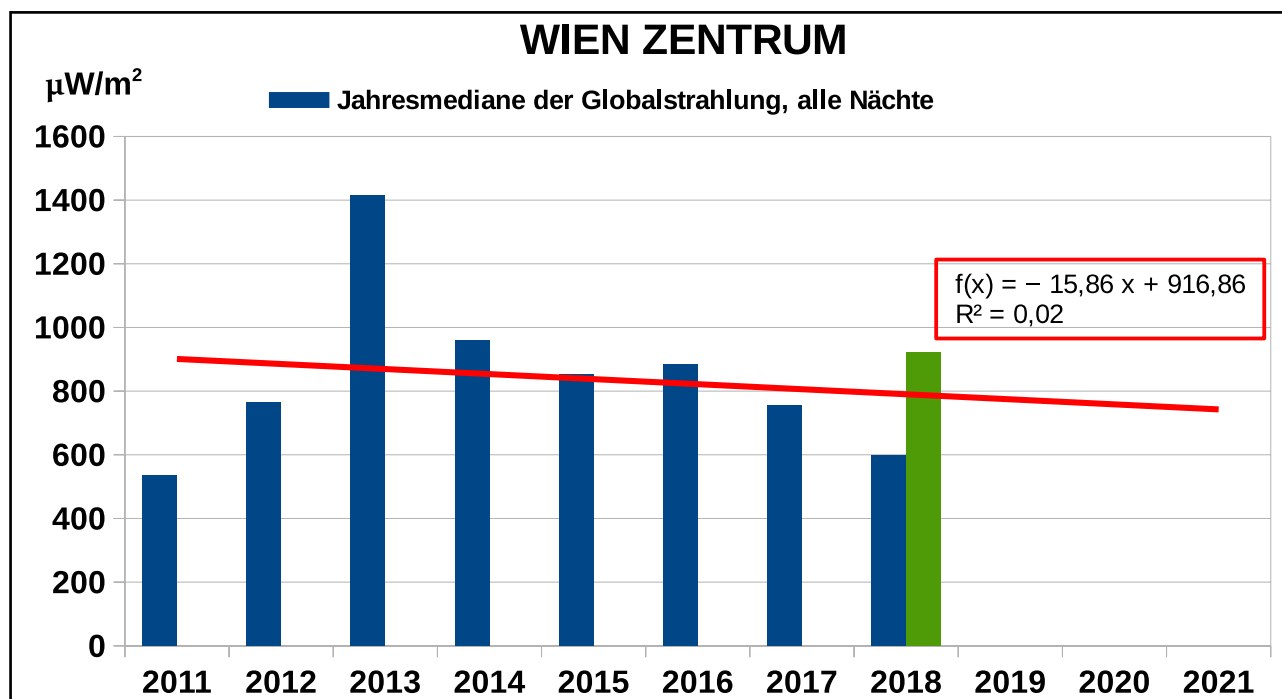


Abb. 21: Jahresmediane **aller** Nächte der Globalstrahlung über Wien Zentrum. Rot: lineare Regression der Werte und ihre Extrapolation bis 2021. Grün: Prognose für 2018 aus dem Lichtbericht 2017.

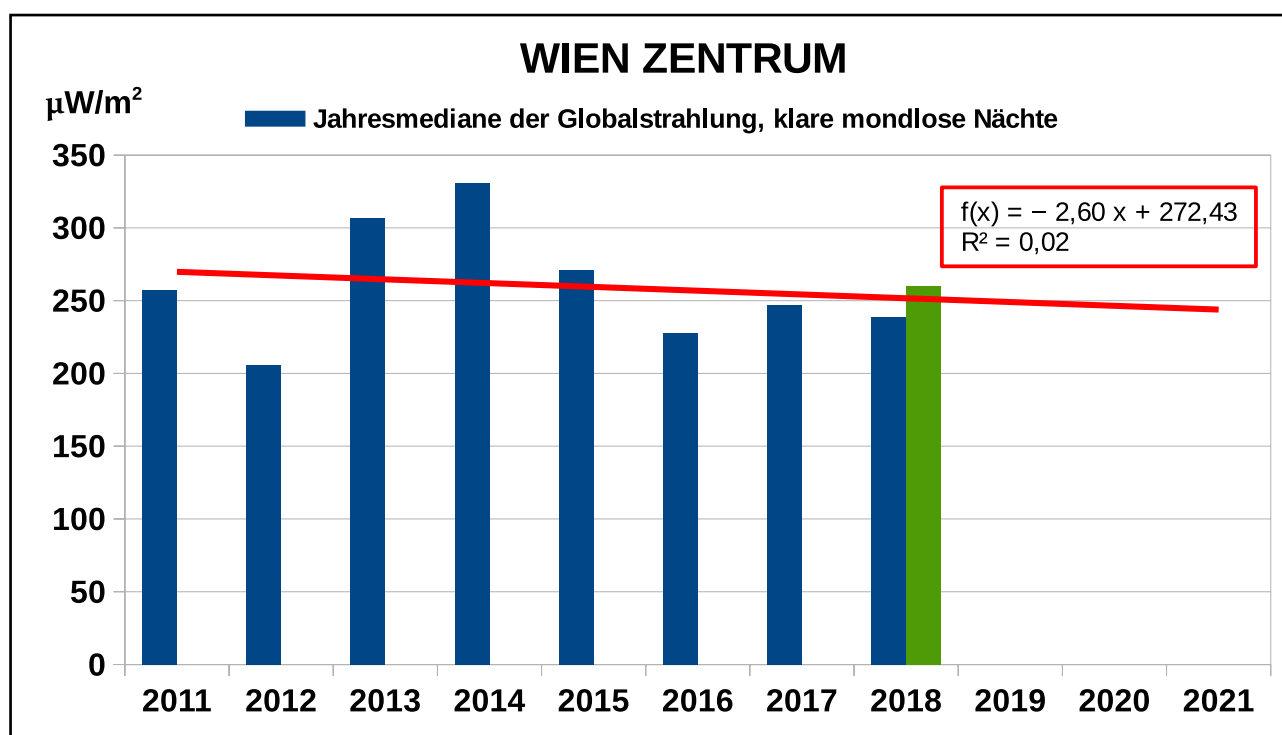


Abb. 22: Jahresmediane **klarer mondloser** Nächte der Globalstrahlung über Wien Zentrum. Rot: lineare Regression der Werte und ihre Extrapolation bis 2021. Grün: Prognose für 2018 aus dem Lichtbericht 2017.

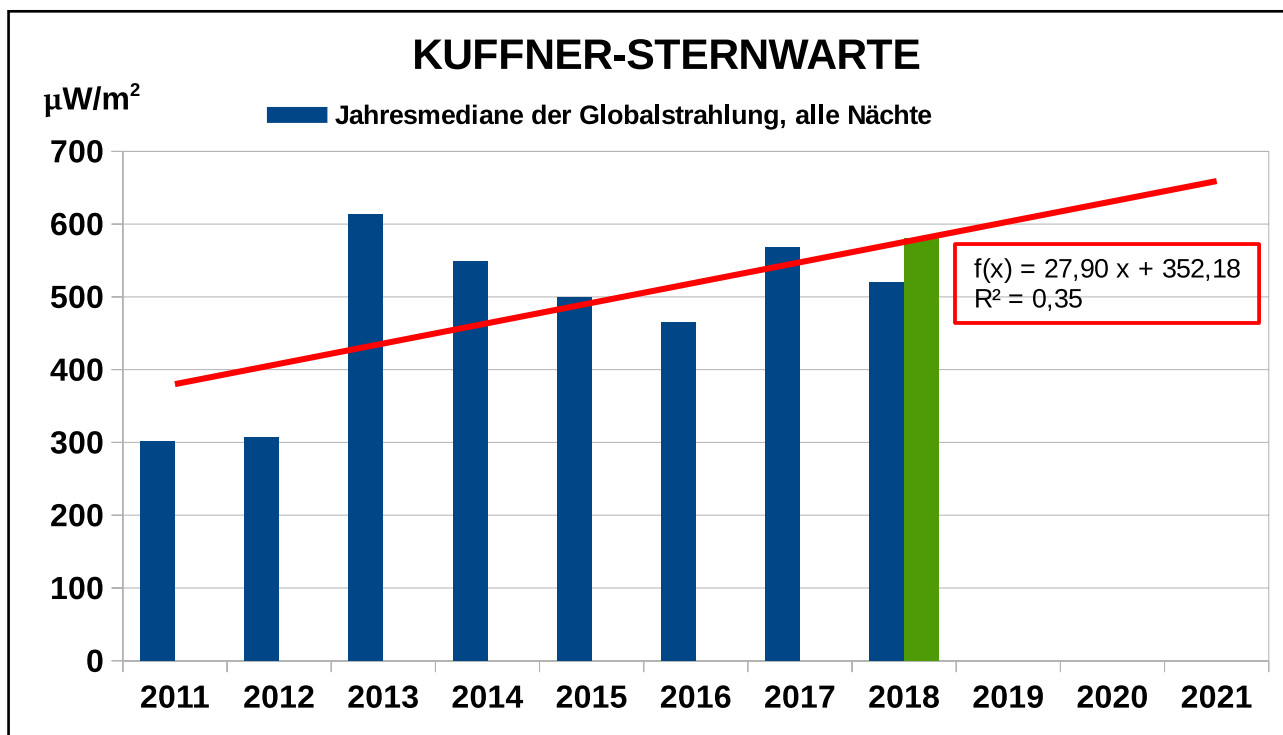


Abb. 23: Jahresmediane **aller Nächte** der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte. Rot: lineare Regression der Werte und ihre Extrapolation bis 2021. Grün: Prognose für 2018 aus dem Lichtbericht 2017.

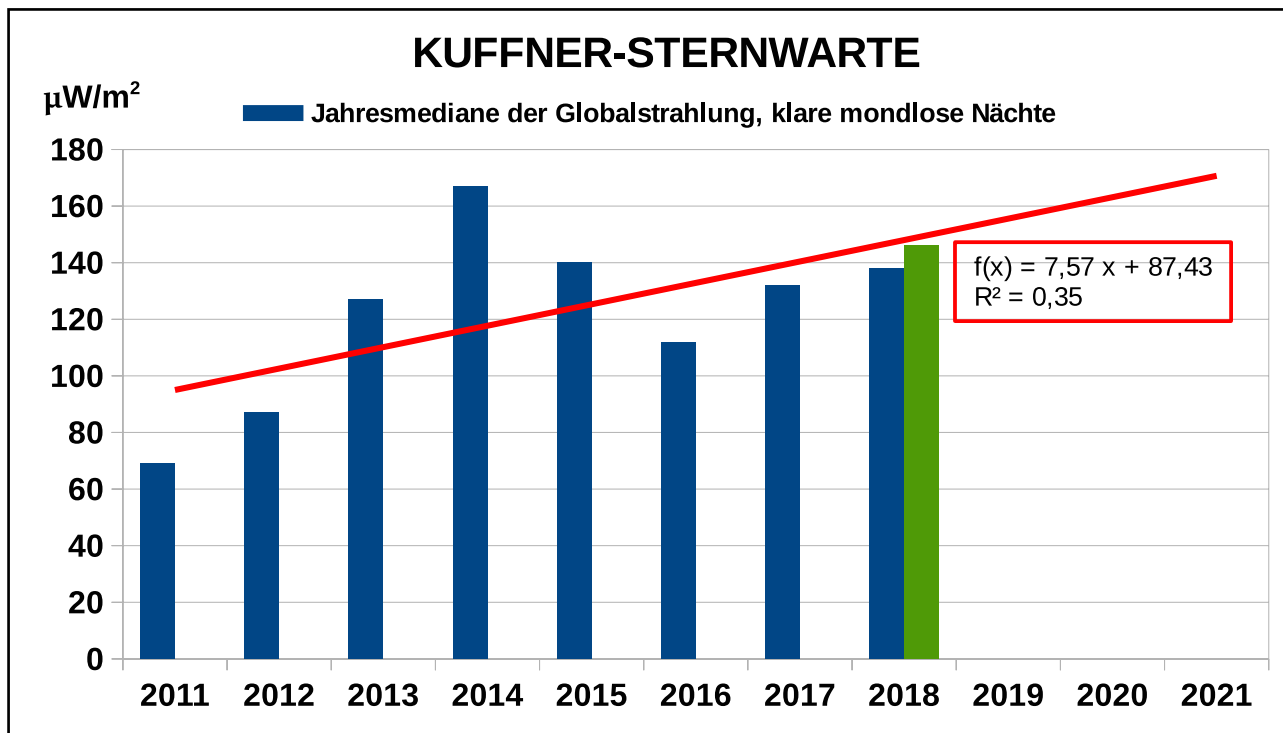


Abb. 24: Jahresmediane **klarer mondloser Nächte** der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte. Rot: lineare Regression der Werte und ihre Extrapolation bis 2021. Grün: Prognose für 2018 aus dem Lichtbericht 2017.

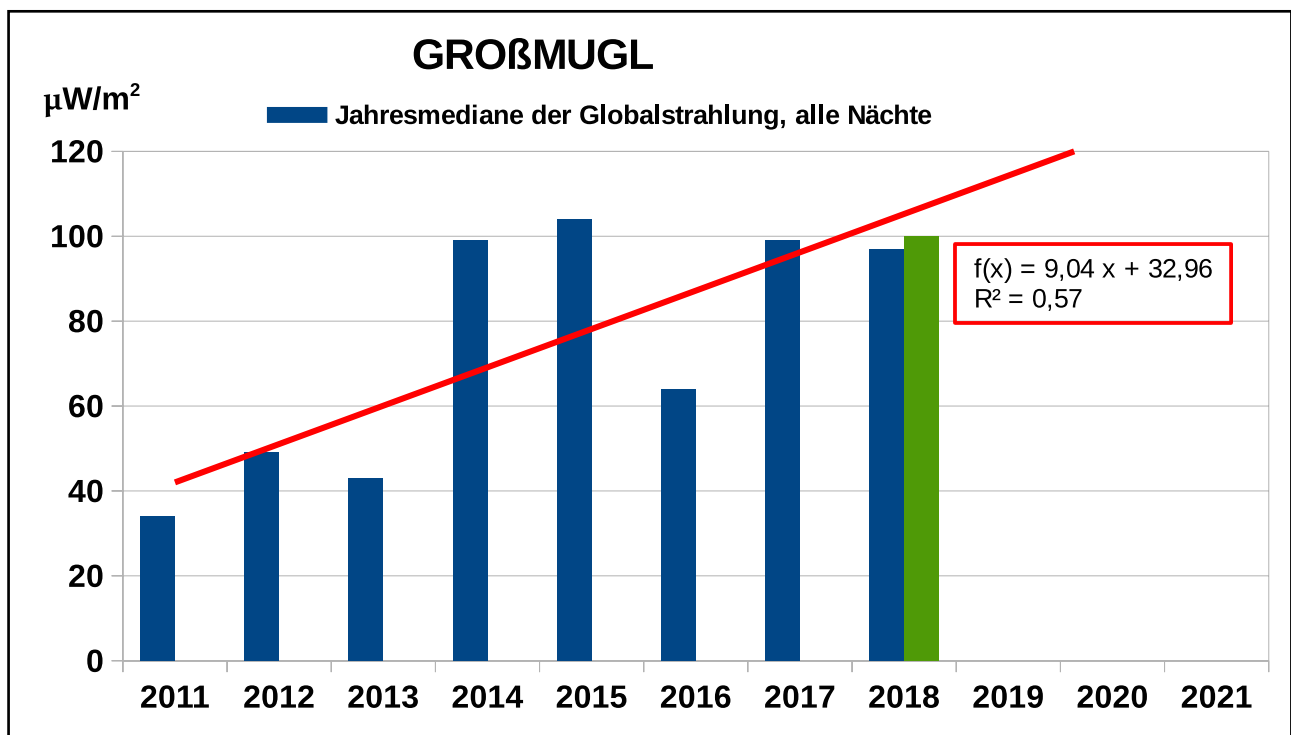


Abb. 25: Jahresmediane **aller Nächte** der Globalstrahlung über Großmugl. Rot: lineare Regression der Werte und ihre Extrapolation bis 2021. Grün: Prognose für 2018 aus dem Lichtbericht 2017.

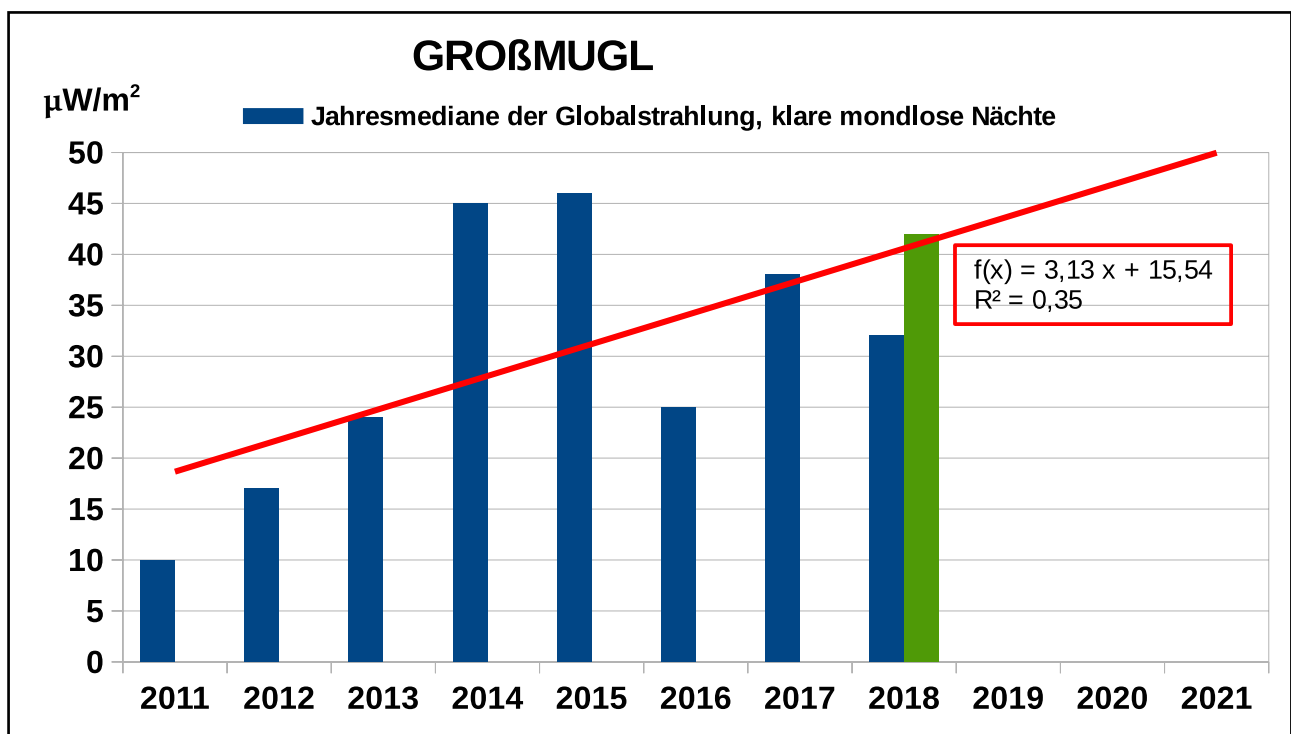


Abb. 26: Jahresmediane **klarer mondloser Nächte** der Globalstrahlung über Großmugl. Rot: lineare Regression der Werte und ihre Extrapolation bis 2021. Grün: Prognose für 2018 aus dem Lichtbericht 2017.

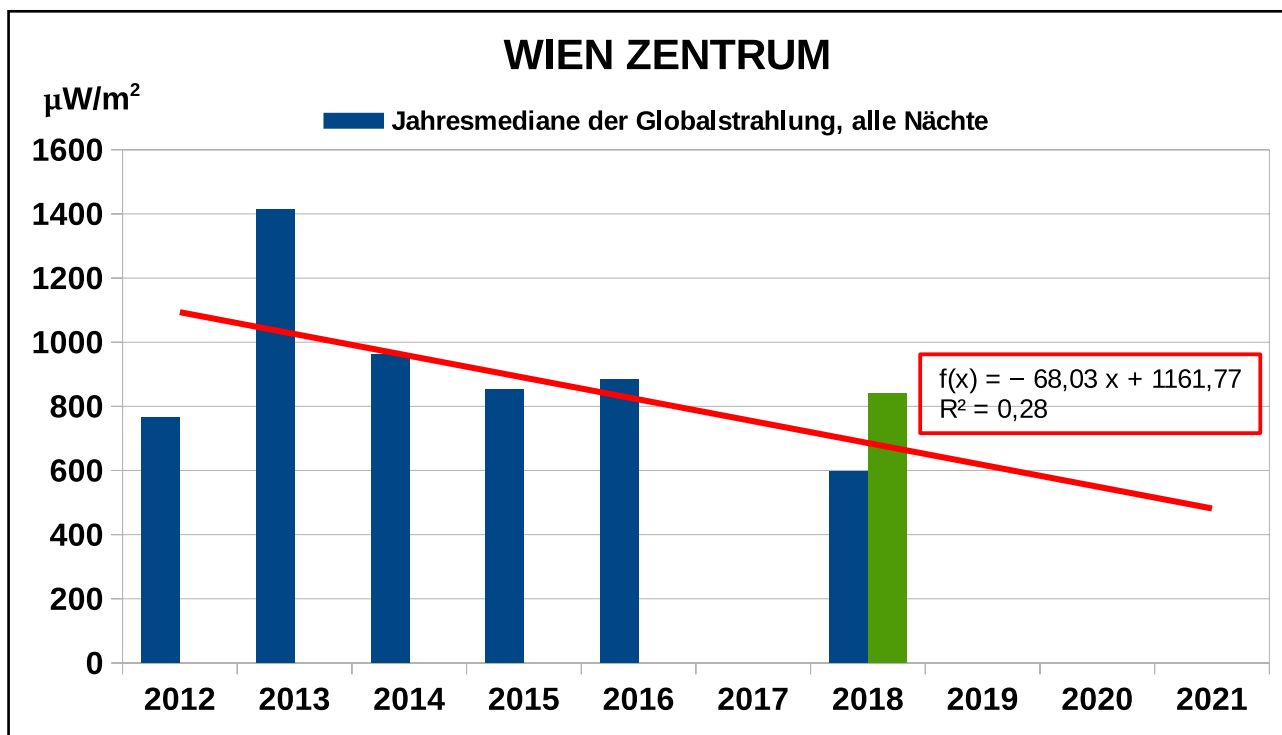


Abb. 27: Jahresmediane **aller Nächte** der Globalstrahlung über Wien Zentrum. Die Jahre 2011 und 2017 sind hier unberücksichtigt. Rot: lineare Regression der Werte und ihre Extrapolation bis 2021. Grün: Prognose für 2018 aus dem Lichtbericht 2017.

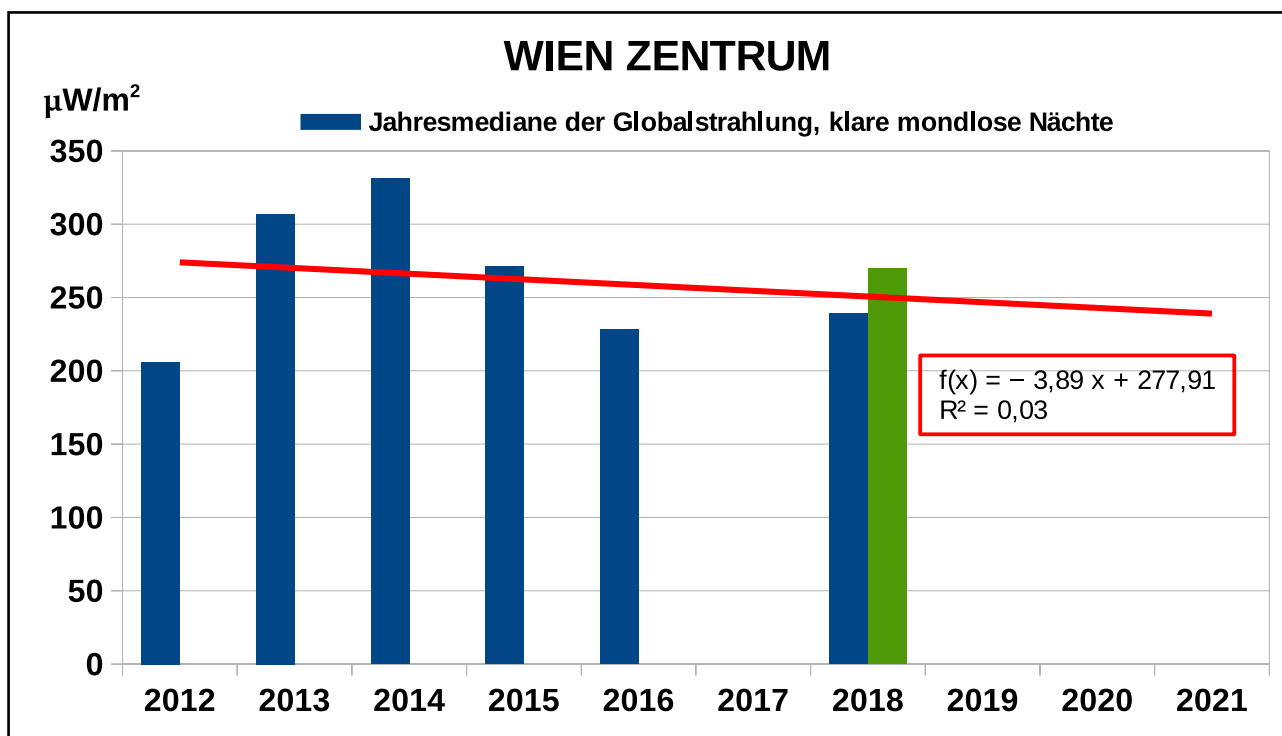


Abb. 28: Jahresmediane **klarer mondloser Nächte** der Globalstrahlung über Wien Zentrum. Die Jahre 2011 und 2017 sind hier unberücksichtigt. Rot: lineare Regression der Werte und ihre Extrapolation bis 2021. Grün: Prognose für 2018 aus dem Lichtbericht 2017.

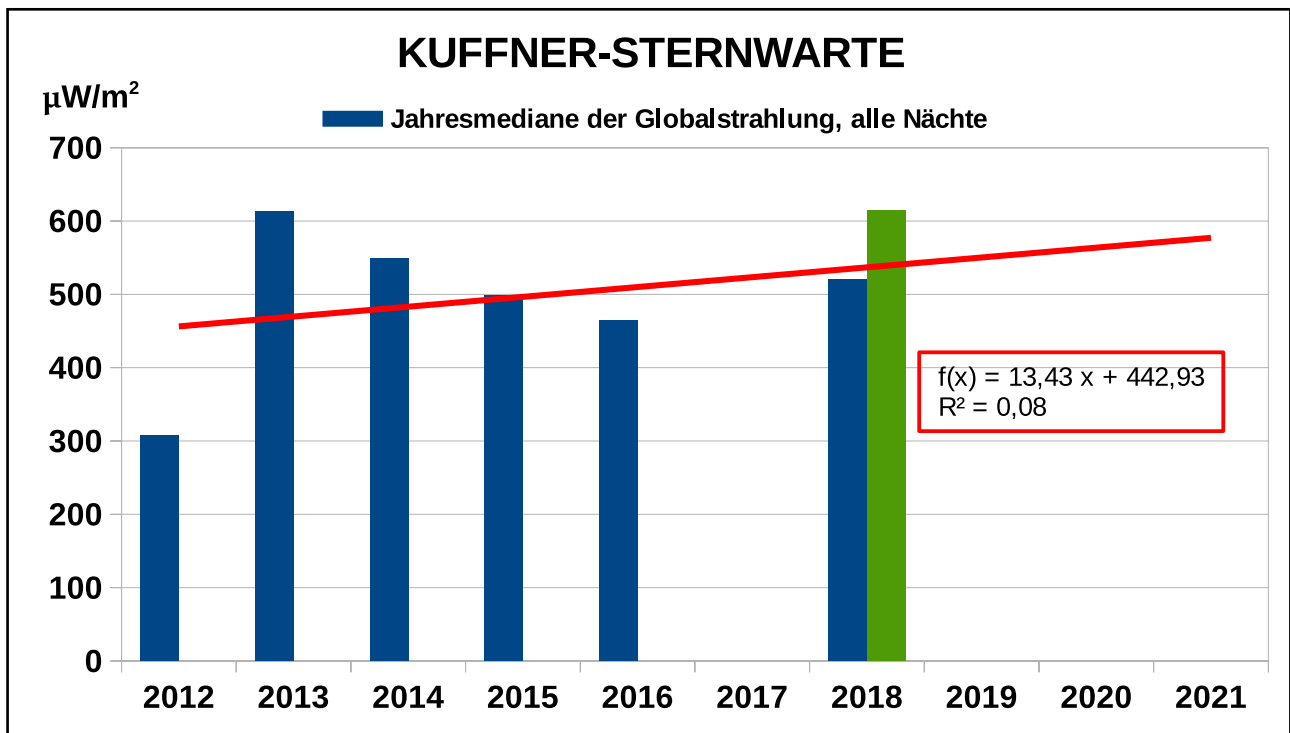


Abb. 29: Jahresmediane **aller Nächte** der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte. Die Jahre 2011 und 2017 sind hier unberücksichtigt. Rot: lineare Regression der Werte und ihre Extrapolation bis 2021. Grün: Prognose für 2018 aus dem Lichtbericht 2017.

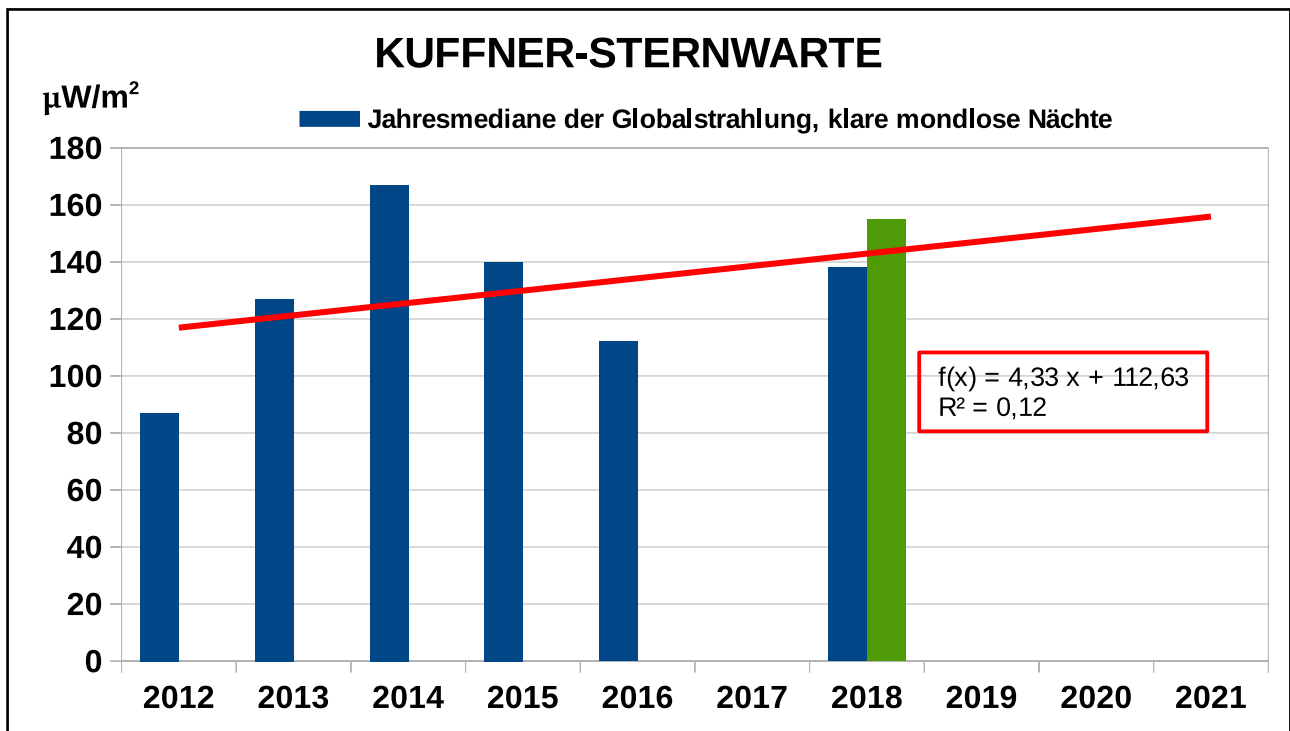


Abb.30: Jahresmediane **klarer mondloser Nächte** der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte. Die Jahre 2011 und 2017 sind hier unberücksichtigt. Rot: lineare Regression der Werte und ihre Extrapolation bis 2021. Grün: Prognose für 2018 aus dem Lichtbericht 2017.

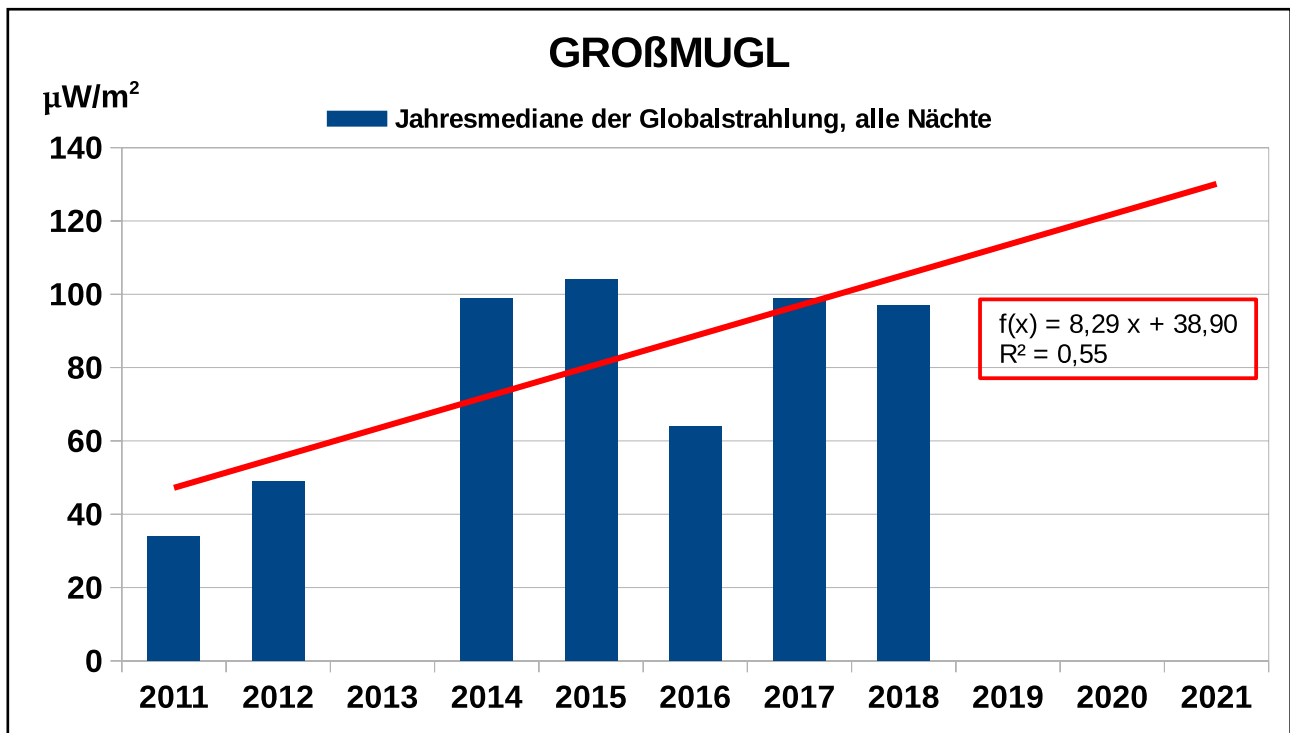


Abb. 31: Jahresmediane **aller Nächte** der Globalstrahlung über Großmugl. Das Jahr 2013 ist hier unberücksichtigt. Als rote Linie eingetragen ist die lineare Regression der Werte und eine Extrapolation bis 2021. Der Wegfall des Jahres 2013 hat hier nahezu keine Auswirkung auf das Ergebnis der Extrapolation.

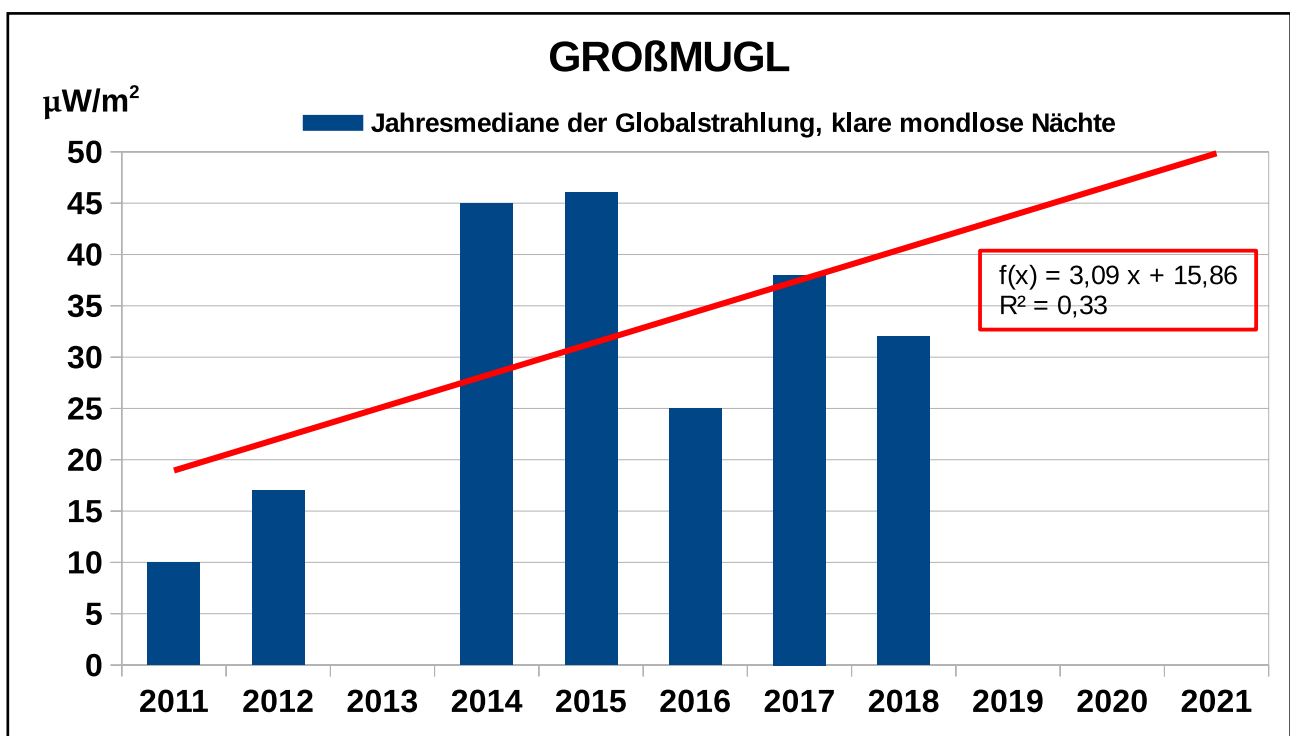


Abb. 32: Jahresmediane **klarer mondloser Nächte** der Globalstrahlung über Großmugl. Das Jahr 2013 ist hier unberücksichtigt. Als rote Linie eingetragen ist die lineare Regression der Werte und eine Extrapolation bis 2021. Der Wegfall des Jahres 2013 hat hier nahezu keine Auswirkung auf das Ergebnis der Extrapolation.

5.5 Verteilungen der Globalstrahlung

Für die Nachthimmelshelligkeit ist insbesondere die Bewölkung von besonderer Bedeutung. Die Sortierung der Daten nach dem wichtigen Kriterium „klar und mondlos“ (keine Bewölkung und Mond mindestens 4 Grad unter dem Horizont) geschieht daher mit einem Algorithmus, der die zeitliche Varianz der Messwerte für die Bewertung der Bewölkungssituation heranzieht. Die physikalisch begründete Filterung der hohen Datenvielfalt ist damit ein wesentliches Merkmal für die Aussagekraft der daraus ableitbaren Schlussfolgerungen. Um sichtbar zu machen, wie unterschiedlich einzelne Globalstrahlungswerte bereits innerhalb eines einzigen Monats sein können, sind auf den folgenden Seiten Verteilungsdiagramme für drei Messstationen der Jahre 2016, 2017 und 2018 dargestellt. Lücken in den Diagrammen sind durch unterschiedliche Ausfälle der bereits deutlich gealterten Daten-Logger entstanden, während die Lightmeter selbst keine erkennbare Alterung zeigen.

Abb. 33 zeigt die hohe Bandbreite der Messergebnisse der drei Stationen Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (grün) und Großmugl (blau) in einer logarithmischen Darstellung für den auf der x-Achse angegebenen Monat. Die Länge eines einzelnen farbigen Balkens zeigt die Schwankungsbreite der in diesem Monat gemessenen nächtlichen Globalstrahlungen. Markiert sind die Quantile von 5-95% (hell), 25-75% (mittel), 45-55% (dunkel). Diese Darstellung zeigt deutlich die Überlappungen der einzelnen Stationen. Obwohl die Mediane

der Station Großmugl erheblich niedriger sind als von Wien Zentrum, gibt es in manchen Monaten Nächte, wo es dort so hell ist wie in anderen Nächten des selben Monats über der Wiener Innenstadt. Es gibt auch Nächte, in denen der Himmel über Großmugl 300 Mal dunkler ist, als in einigen Nächten über der Station Wien Zentrum.

In **Abb. 34 und 35** repräsentiert die rote Linie den Verlauf der Monatsmediane. Die grauen Flächen zeigen das untere bzw. obere 5%-Quantil der jeweiligen Stichprobe. So wurden beispielsweise in Wien Zentrum im Jänner 2016 auch in klaren und mondlosen Nächten sowohl Messwerte von deutlich unter $200 \mu\text{W}/\text{m}^2$ als auch solche mit mehr als $4000 \mu\text{W}/\text{m}^2$ gemessen. Ein anderes Extrem der Variationsbreite zeigt der September 2018 an der Messstation Kuffner-Sternwarte. Das untere 5%-Quantil liegt hier bei 84, das obere bei nur $197,5 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Die Unterschiede in dieser Auswahl der Extremwerte sind also etwa zehn Mal geringer als im genannten Beispiel von Wien Zentrum.

Die **Abb. 36 bis 41** zeigen die Verteilungen der Messwerte für jede Station in einer 3D-Darstellung. Die relativen Abstände zwischen unterem und oberem 5%-Quantil sind hier besonders deutlich sichtbar. Dass sie auch in klaren mondlosen Nächten noch sehr hoch ausfallen, lässt Effekte vermuten, die unabhängig von künstlicher Beleuchtung starke Variationen aufweisen. Die von uns identifizierten Korrelationen mit Luftgüteindikatoren liefern dazu erstmals einen noch weiter zu erforschenden Ansatz (siehe Kapitel 6).

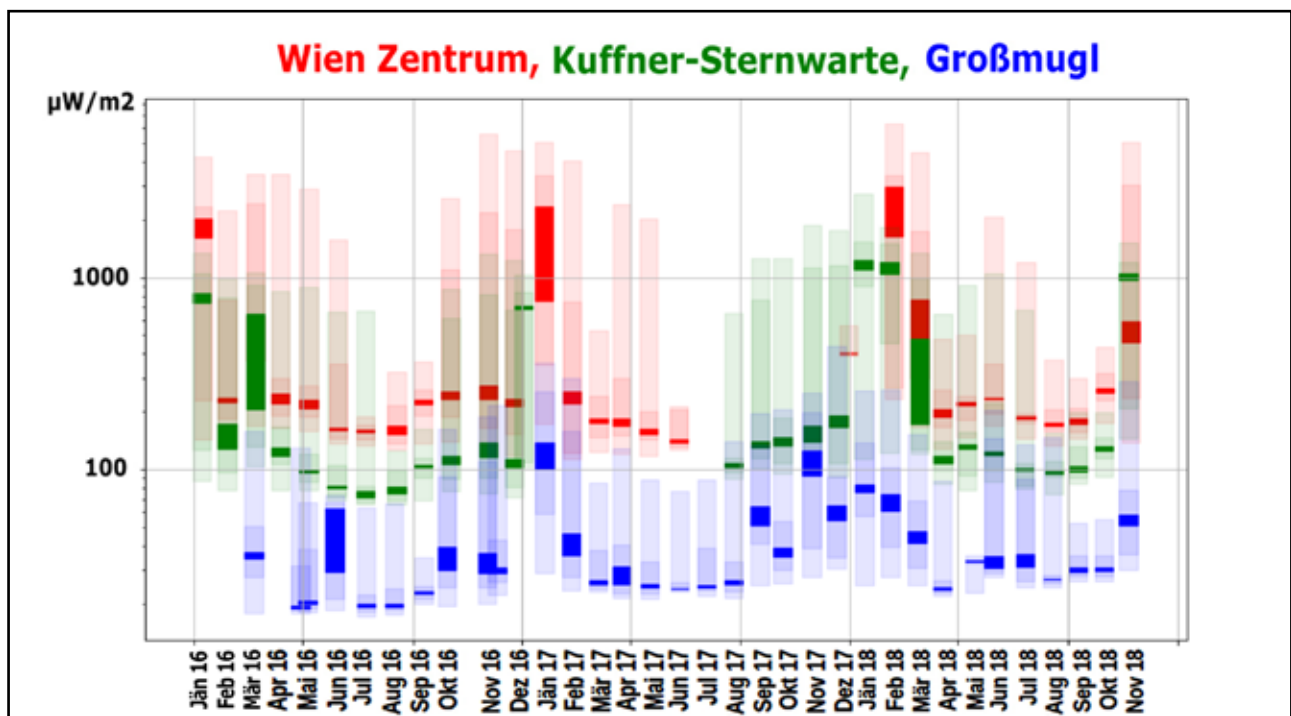


Abb. 33: Darstellung der monatlichen Bandbreite der Globalstrahlungsdaten für die Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl in klaren mondlosen Nächten. Markiert sind 5-95% (hell), 25-75% (mittel), 45-55% (dunkel).

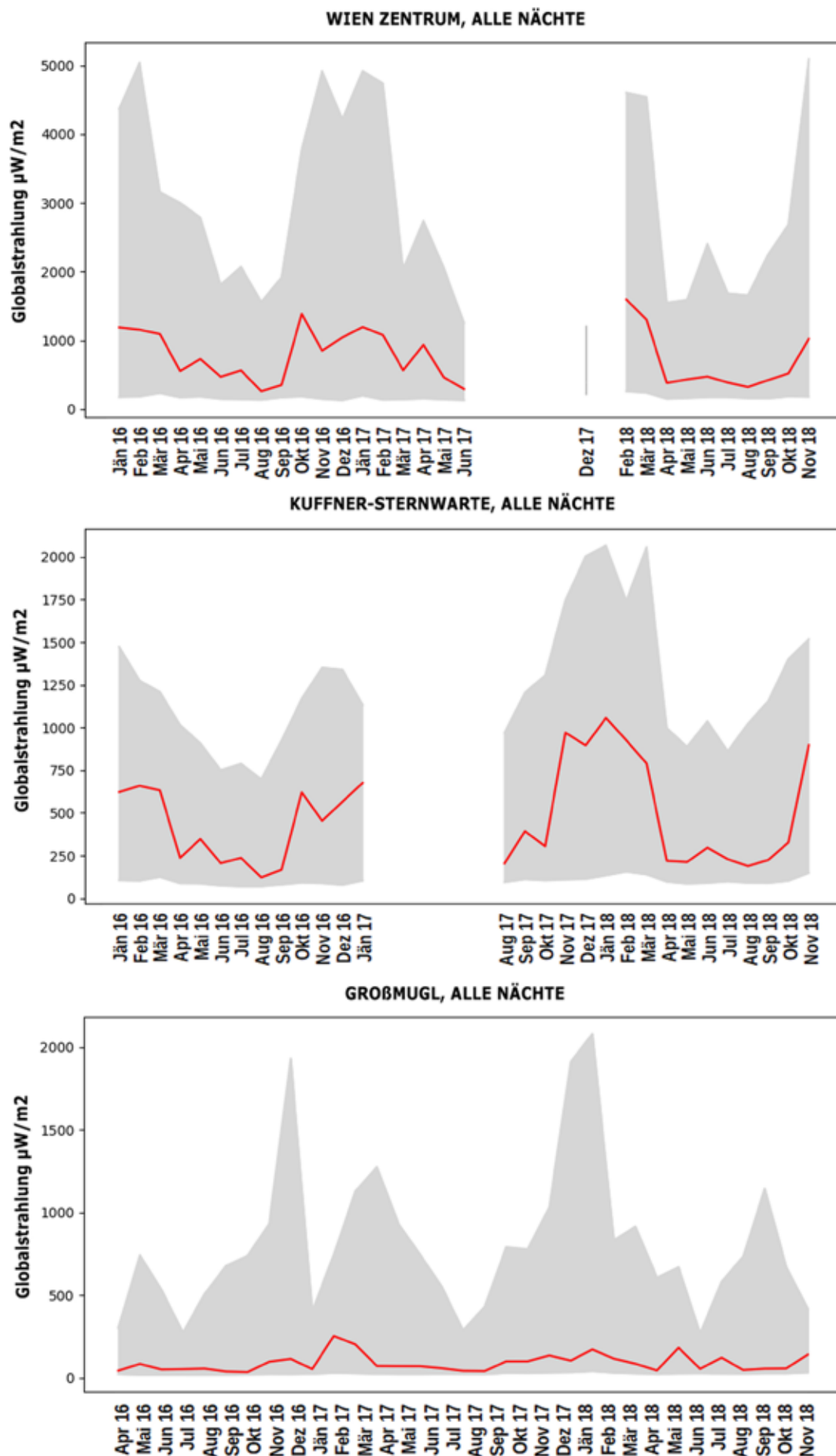


Abb. 34: Monats-Mediane (rot) sowie untere und obere 5%-Quantile (grau) aller Nächte von 2016 bis 2018.

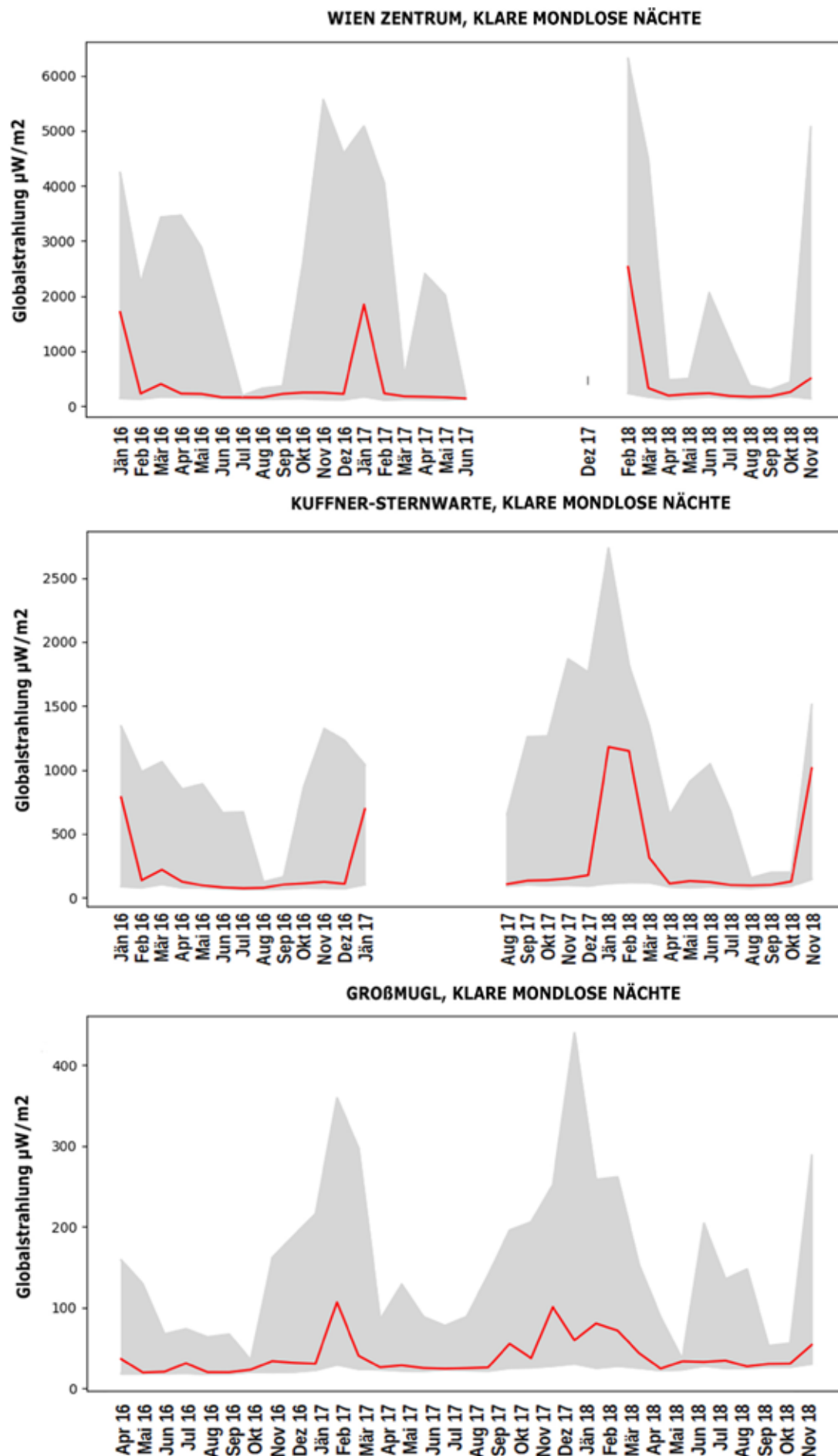


Abb. 35: Monats-Mediane (rot) sowie untere und obere 5%-Quantile (grau) klarer mondloser Nächte von 2016 bis 2018.

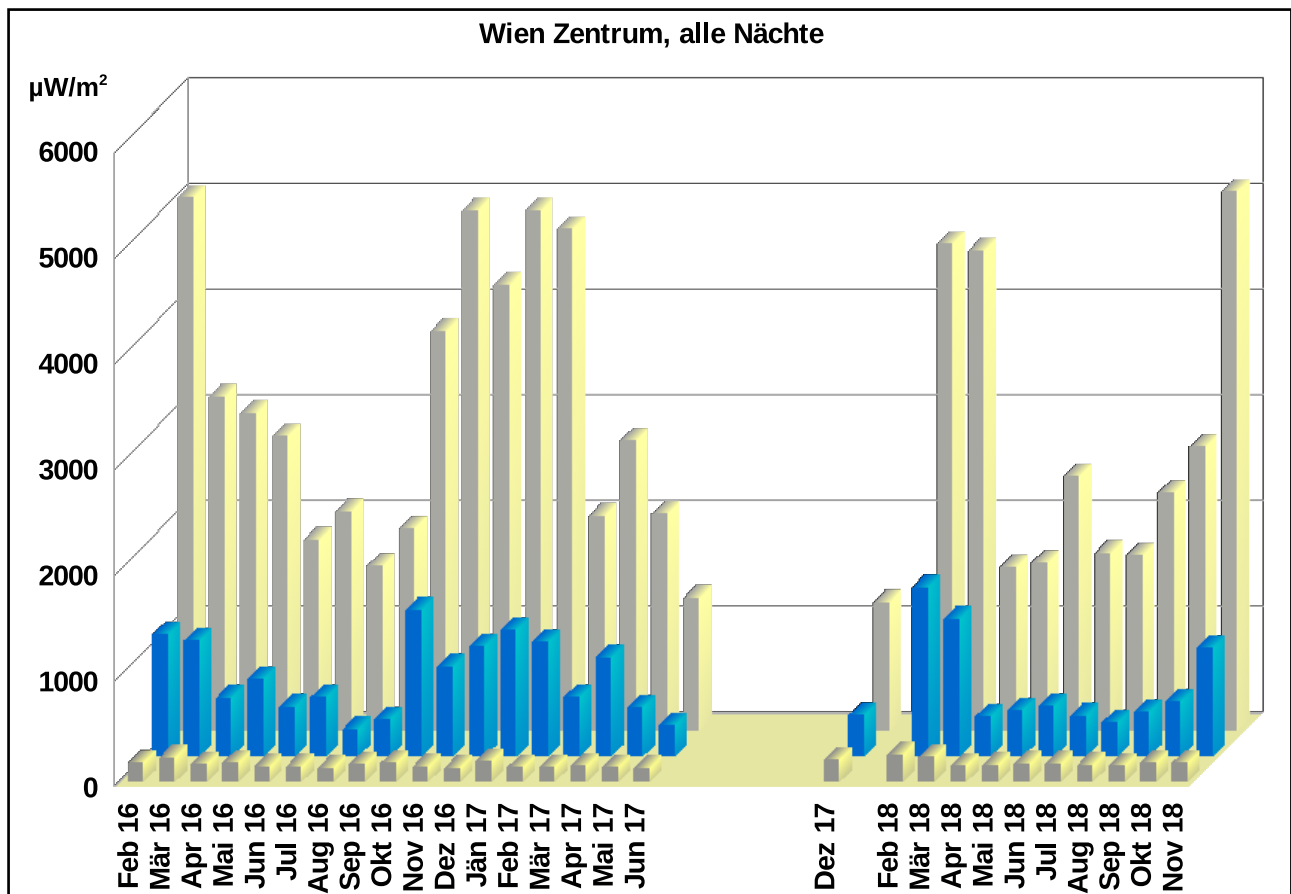


Abb. 36: Station Wien Zentrum, alle Nächte. Histogramm-Darstellung des untersten 5%-Quantils, des 95%-Quantils (blau) und des obersten 5%-Quantils der Globalstrahlung für das unten angeführte Monat.

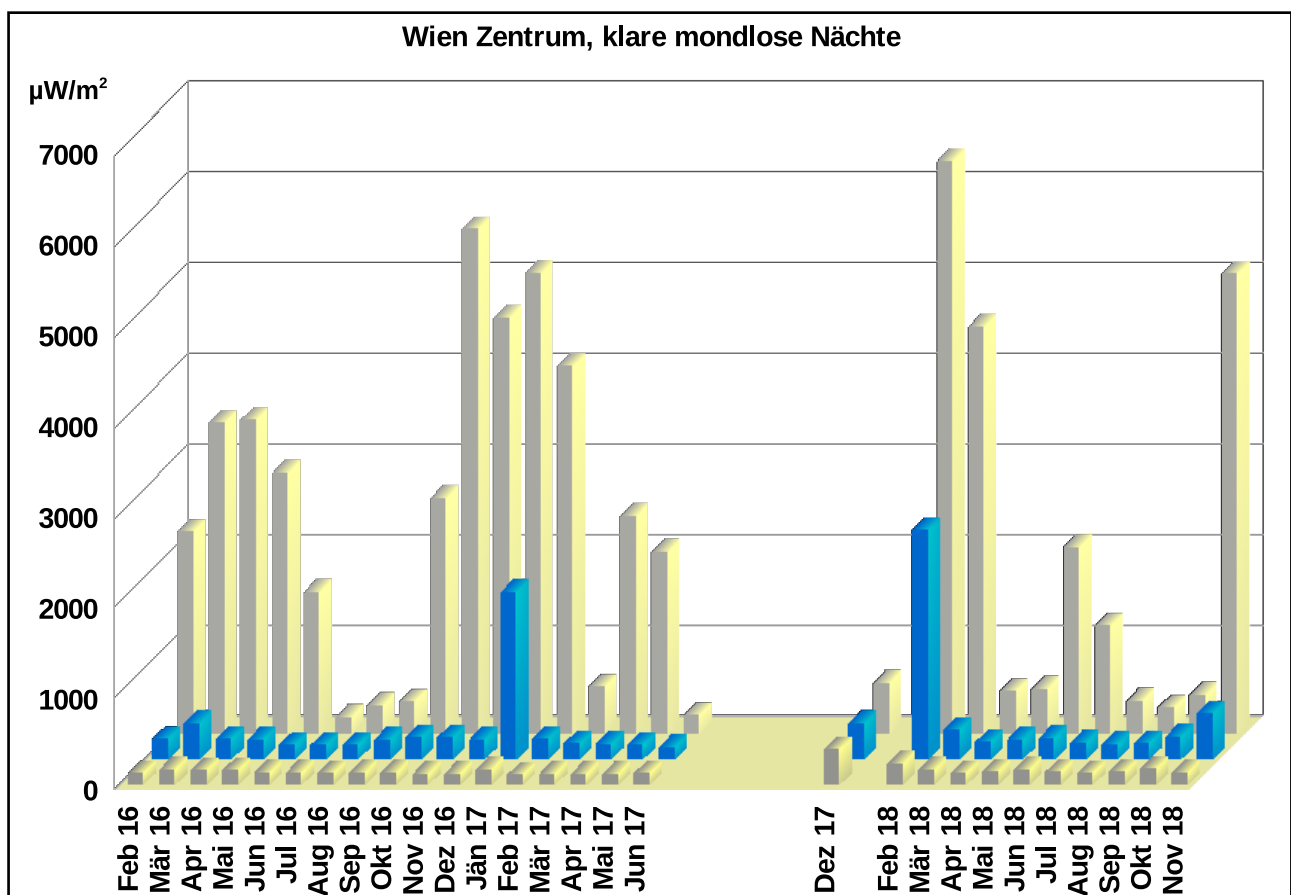


Abb. 37: Station Wien Zentrum, klare mondlose Nächte. Histogramm-Darstellung des untersten 5%-Quantils, des 95%-Quantils (blau) und des obersten 5%-Quantils der Globalstrahlung für das unten angeführte Monat.

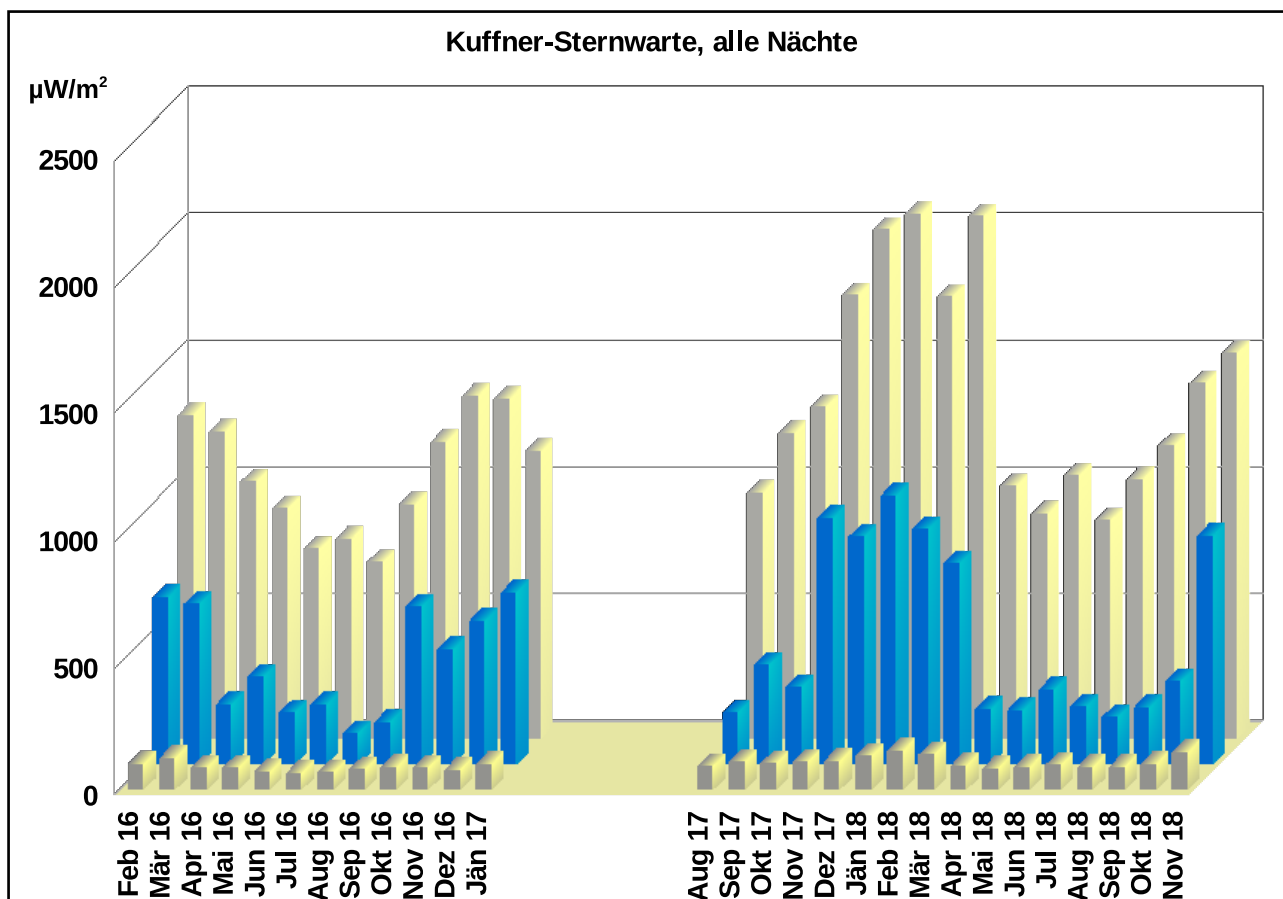


Abb. 38: Station Kuffner-Sternwarte, alle Nächte. Histogramm-Darstellung des untersten 5%-Quantils, des 95%-Quantils (blau) und des obersten 5%-Quantils der Globalstrahlung für das unten angeführte Monat.

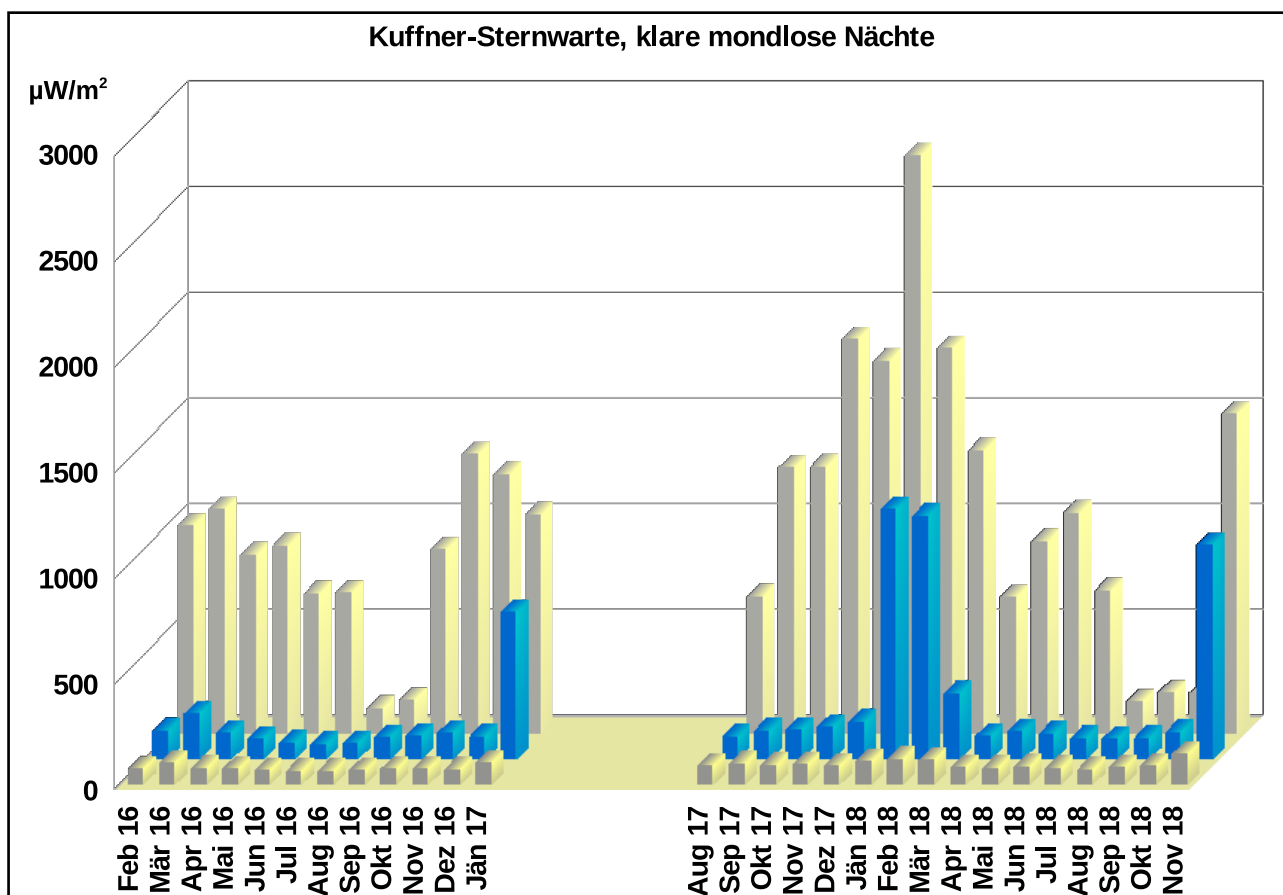


Abb. 39: Station Kuffner-Sternwarte, klare mondlose Nächte. Histogramm-Darstellung des untersten 5%-Quantils, des 95%-Quantils (blau) und des obersten 5%-Quantils der Globalstrahlung für das unten angeführte Monat.

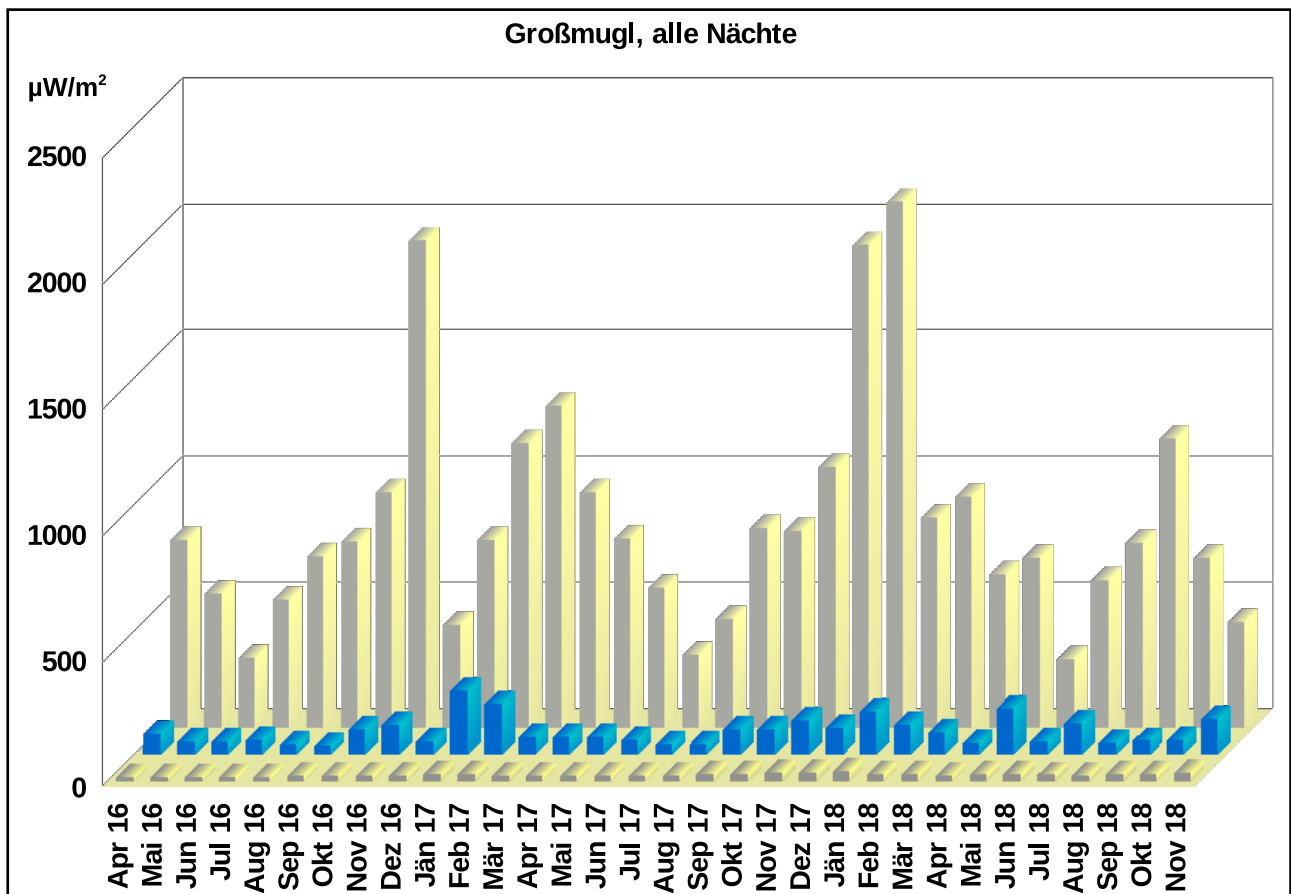


Abb. 40: Station Großmugl, alle Nächte. Histogramm-Darstellung des untersten 5%-Quantils, des 95%-Quantils (blau) und des obersten 5%-Quantils der Globalstrahlung für das unten angeführte Monat.

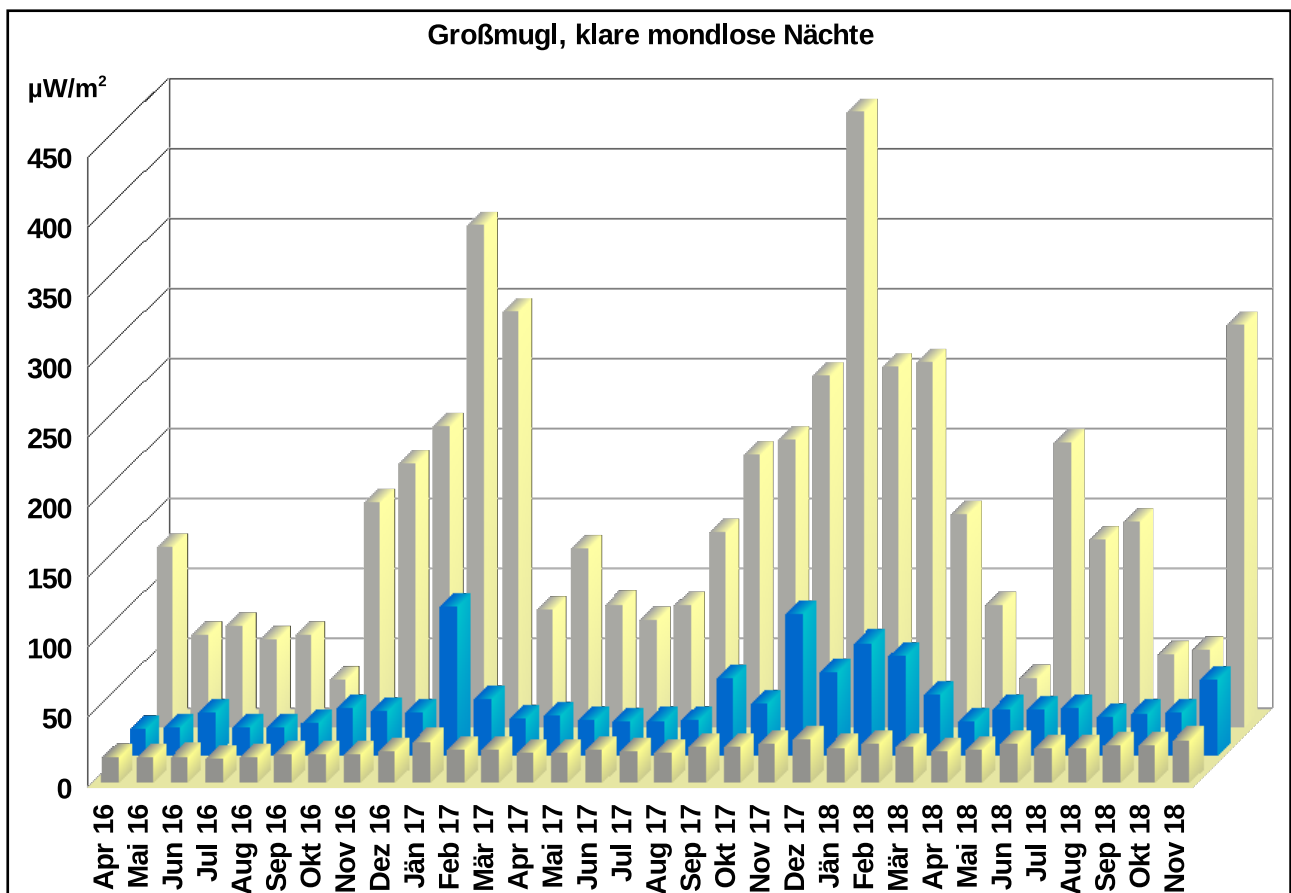


Abb. 41: Station Großmugl, klare mondlose Nächte. Histogramm-Darstellung des untersten 5%-Quantils, des 95%-Quantils (blau) und des obersten 5%-Quantils der Globalstrahlung für das unten angeführte Monat.

6. Korrelation mit Luftgüte-Indikatoren der Wiener MA 22

6.1 Motivation

Die im vorangegangenen Kapitel 5.7 gezeigte Vielfalt der Globalstrahlungsdaten zeichnet sich auch in klaren mondlosen Nächten durch eine hohe Bandbreite aus. Der Verlauf der Monatsmediane zeigt eine Variabilität, die nicht allein mit einer Zu- und Abnahme der künstlichen Beleuchtung erklärbar ist. Unterschiedliche Bewölkungsarten und -dichten scheiden innerhalb dieser Stichprobe als Verursacher aus.

Da die vom Boden aus sichtbare Lichtglocke primär durch Streuung des nach oben abgestrahlten Kunstlichts in der Atmosphäre entsteht, sind Änderungen des Streuverhaltens eine naheliegende Erklärung. In der freien Atmosphäre bedingt neben Aerosolen vor allem die Luftfeuchtigkeit eine höhere Lichtstreuung. Eine erste Untersuchung möglicher Zusammenhänge zwischen Konzentrationsänderungen dieser Faktoren und Veränderungen der Globalstrahlungswerte sind daher ein wesentlicher Teil dieser Studie.

6.2 Grundlagen

Auf der Basis physikalischer Überlegungen rund um wahrscheinliche Lichtstreuung wurden neben der Luftfeuchtigkeit auch Kondensationskeime in Form von Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2,5}) zur Untersuchung von Korrelationen herangezogen. Die Messwerte für deren zeitlichen Verlauf wurden von der Wiener Umweltschutzabteilung MA 22 zur Verfügung gestellt und dem von ihr betriebenen Luftgütemessnetzwerk entnommen.

Für den betrachteten Zeitraum von 2016 bis 2018 sind nicht bei allen Messstationen die gleichen Messgrößen verfügbar. Wir haben daher aus den Daten der Stationen Hermannskogel (Luftfeuchtigkeit) und Lobau (PM₁₀ und PM_{2,5}) eine synthetische Station berechnet, die repräsentative Werte für die zeitlichen Variationen von Feinstaub und Luftfeuchtigkeit im Wiener Stadtgebiet liefert. Maßgeblich für die Auswahl ist auch die in Wien vorherrschende Westwetterlage und die sich daraus ergebenden Strömungsverhältnisse. Die Luftgüte-Messstation Hermannskogel liegt aufgrund ihrer geographischen Position im nordwestlichen Wienerwald und der großen Höhe (488 m) noch in

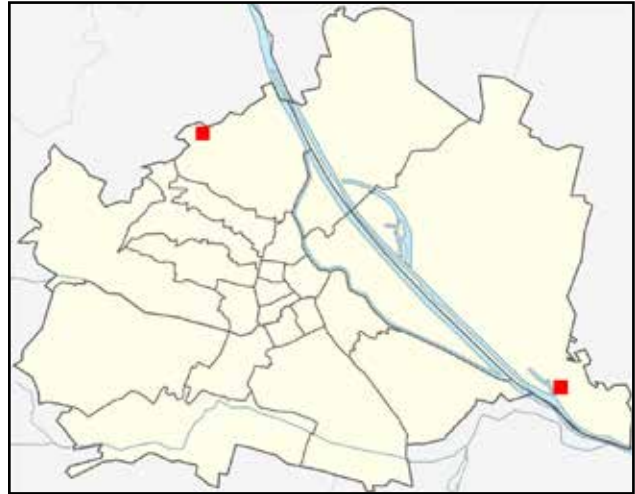


Abb. 42: Lage der für die Bildung der synthetischen Station herangezogenen Luftgüte-Messstationen Hermannskogel (oben) und Lobau (rechts unten).

der freien Anströmung der Atmosphäre. Kurzfristige Änderungen durch Einflüsse in unmittelbarer Nähe sind daher unwahrscheinlich. Bei der Station Lobau ist ebenfalls aufgrund der für Wien typischen Westwindsituationen von einer guten Durchmischung der verschiedenen Feinstaubquellen über Wien anzunehmen. Die Basiswerte für PM₁₀ und PM_{2,5} wurden dieser Station entnommen.

Ein Vergleich der Halbstundenmittelwerte (HMW) der PM₁₀- und PM_{2,5}-Konzentrationen aller verfügbaren Stationen der MA 22 über den Beobachtungszeitraum von drei Jahren ergab zudem keine signifikanten Unterschiede, wenn die Mediane jeweils eines ganzen Monats betrachtet wurden. Kurzfristige Spitzen durch Einzelereignisse werden dadurch weitgehend eliminiert und verschiedenen Messstationen liefern dann ein relativ einheitliches Bild.

Langfristige Änderungen - beispielsweise ein kontinuierlicher Anstieg über mehrere Wochen hinweg - wirken sich auf alle Messstationen und demnach auf das gesamte Stadtgebiet gleichermaßen aus. Sie sind daher im Gegensatz zu den bei einzelnen Messstationen vom Straßenverkehr verursachten Spitzen für ganz Wien repräsentativ und gut geeignet, um mit den Monatsmedien der Globalstrahlung verglichen zu werden.

Die Luftgüte-Messstationen liefern Werte zur Lufttemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit, woraus wir die absolute Luftfeuchtigkeit über Standardbeziehungen berechnen.

*EINE **HÖHERE FEINSTAUB-KONZENTRATION** BEWIRKT AUCH
EINE ZUNAHME DER NACHTHIMMELS-AUFHELLUNG.*

6.2.2 Überlegungen zur Theorie der von Feinstaub und Luftfeuchtigkeit verursachten Streuprozesse

Sowohl der gasförmige Anteil von Wasser in feuchter Luft als auch darin schwebende Wassertröpfchen streuen sichtbares Licht. Feuchte - wenn auch wolkenfreie - Luft über einer beleuchteten Stadt sollte daher in einer helleren Lichtglocke resultieren.

Für Feinstaub gilt dieser Zusammenhang in mehrfacher Hinsicht. Einerseits agieren die Staubteilchen selbst als Lichtstreuer, andererseits sind sie als Kondensationskeime für das Wachstum von Wassertröpfchen in feuchter Luft verantwortlich.

Einen Hinweis auf die komplexen Zusammenhänge dieser Faktoren gibt das Werk „Sichtbeobachtungen vom meteorologischen Standpunkt“ von Friedrich Löhle [3]. Es behandelt unter anderem die Auswirkungen von relativer Luftfeuchtigkeit und Kondensationskeimen auf die Durchsicht der Atmosphäre bei Tag. Löhle verweist dabei auch auf nichtlineare Effekte. Demnach würde die Sicht besser (und damit die Streuung geringer), wenn die Wassertröpfchen rund um ihre Kondensationskeime mit abnehmender relativer Feuchtigkeit im Bereich von 100 bis etwa 60 % verdampfen. Die Streuung könne jedoch bei weiterer Feuchtigkeitsabnahme wieder zunehmen, wenn die Zahl der Kondensationskeime schneller wächst, als sich die Menge lichtstreuender Dunstteilchen vermindert.

Eingehende Untersuchungen dazu sind jedoch nicht Teil der hier präsentierten Studie und erfordern spezifische Forschungstätigkeiten.

7. Literatur und Quellen

[1]: Andreas Hänel, Thomas Posch, Salvador J. Ribas, Martin Aubé, Dan Duriscoe, Andreas Jechow, Zoltán Kollath, Dorian 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 Nachthimmelselligkeit 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 Umweltschutzgesellschaft. 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 Umweltschutzgesellschaft. 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 Umweltschutzgesellschaft. Wien, 2014. <http://wua-wien.at/images/stories/publikationen/licht-ueber-wien-2013.pdf>

Bildnachweis:

Abb. 1: G. Wuchterl

Abb. 2: M. Reithofer

Abb. 3: Wien Energie-FOTObyHOFER

Abb. 4: wien.gv.at

Abb. 5: Christian-Fürthner, MA 33

Abb. 6, 7, 8: Land Oberösterreich

Abb. 9: G. Wuchterl

Abb. 10: M. Reithofer

Abb. 11: ESA/Copernicus

Abb. 12: Falchi et. al.

Abb. 13: G. Wuchterl, M. Reithofer

Abb. 15 bis 32: M. Reithofer

Abb. 33: G. Wuchterl

Abb. 34 bis 42: M. Reithofer

Abb. B1 bis B24: M. Reithofer

Abb. C1 bis C8: M. Reithofer

8. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die direkteste Beantwortung der Frage, ob die Aufhellung des Nachthimmels über Wien zunimmt, ergibt sich aus der Betrachtung der Einzelstationen. Um langfristige Trends von kurzfristigen Schwankungen zu unterscheiden, betrachten wir dabei astronomisch und meteorologisch möglichst konstante Verhältnisse, konkret die klaren mondlosen Nächte. Die Station Wien Zentrum zeigt dabei auch im Jahresmedian 2018 eine Abnahme von 3,2 Prozent, gemeinsam mit den vergangenen Messwerten 2015 bis 2017 bestätigt dies das sich bereits 2017 sich abgezeichnete Bild eines Lichtmaximums im Bereich der Jahre 2013 bis 2015. Interessanterweise gelangt man im Zentrum Wiens zum gleichen Schluss, wenn man alle astronomischen Nächte - unabhängig von Mond und Wetter - heranzieht. Allerdings liegt für alle Nächte das Maximum deutlich höher und Richtung 2013 verschoben. Bemerkenswert ist, dass sich mit Ausnahme des Jahres 2016 in den letzten 4 Jahren ein linearer Abwärtstrend abzeichnet.

Auf der Kuffner-Sternwarte zeigt sich ein ähnliches Bild, allerdings erscheint die Entwicklung um das Lichtmaximum von einem linearen Zuwachs überlagert. So ist 2018 im Jahresmedian zwar deutlich dunkler als das Spitzenjahr 2014, aber im Jahresvergleich zu 2017 ist ein Zuwachs von 5,1 Prozent zu verzeichnen. Dies liegt unterhalb des langjährigen Trends von 2011 bis 2017 von 6 Prozent, repräsentiert aber nach wie vor einen deutlichen Zuwachs.

Betrachtet man alle Nächte auf der Kuffner-Sternwarte, zeigt sich von 2017 auf 2018 allerdings eine Reduktion von 8,5 Prozent. Die linearen Trends weisen weiterhin einen Zuwachs für die Station Kuffner-Sternwarte aus, der sich möglicherweise abflacht, was angesichts der Wetterschwankungen (vgl. die starke Abnahme für alle Nächte) noch nicht von meteorologischen und jahreszeitlichen Ursachen zu unterscheiden ist. Immerhin kehren Mond und Wolken einen leichten Zuwachs von 5,1 Prozent in eine Abnahme von 8,5 Prozent um.

36 Kilometer von Wien Zentrum entfernt bietet die Station Großmugl ein noch stärker differenziertes Bild. Mit den neuen Daten des Jahres 2018 ergibt sich der mittlere jährliche Zuwachs zu 10,6 Prozent. Vergleicht man mit den im Lichtbericht 2017 gefundenen Werten von 10,4 Prozent bis 20,1 Prozent, erweist sich der Zuwachs in Großmugl erneut als der stärkste. Die beiden stark differierenden Werte des vergangenen Berichts resultierten aus dem Versuch, den Effekt der Datenverluste dadurch zu begrenzen, dass die Trends mit und ohne die Werte aus den Jahren 2011 und 2016 bestimmt wurden, um die darin enthaltenen Schwierigkeiten deutlich zu machen.

Der neue Wert mit fast vollständiger Jahresüberdeckung für 2018 bestätigt den niedrigeren Trend.

Insgesamt ergibt sich ein Bild einer Stabilisierung der Lichtentwicklung im Stadtzentrum mit einer Abnahme gegenüber 2017 sowohl in den klaren mondlosen als auch in allen Nächten. Ohne einer weiteren Analyse der Schwankungen ist die beste Beschreibung jene eines Endes des Lichtwachstum in Wien Zentrum auf hohem Niveau.

Über der Kuffner-Sternwarte nimmt die Nachthimmelselligkeit weiterhin zu. Während in Wien Zentrum eine Sättigung feststellbar ist und sich das Wachstum am Stadtrand abschwächt, ist auf halbem Weg zum Rand der Lichtglocke (Großmugl) weiterhin ein Zuwachs von 10 Prozent feststellbar, was einer Verdoppelung alle 7 Jahre entspricht.

Die vollständigste Übersicht über die Gesamtentwicklung ergibt sich daher aus der Betrachtung des gesamten Energiegehalts der Lichtglocke unter Einbeziehung der Messwerte aller Stationen. Dessen Berechnung wird in dieser Studie nach 2012 [8] und 2013 [9] zum dritten Mal durchgeführt. Bei dieser Betrachtung geht die gesamte Bandbreite der die Nachthimmelselligkeit beeinflussenden Faktoren in die Berechnung ein, während der Beitrag möglicher lokaler Phänomene reduziert wird. Tatsächlich ist der nun vorliegenden Entwicklung der Jahresmediane der Lichtglockenleistung von 2011 bis 2018 (Abb. 14, 15) ein gleichmäßiger Anstieg bis 2014 sichtbar, gefolgt von einem langsamen Rückgang. Dieses einfache Muster wird nur von den relativ niedrigen Werten im Jahr 2016 durchbrochen. Das gilt sowohl für die jetzt bei 140 MW liegenden Mediane für die Leistung der Wiener Lichtglocke unter Berücksichtigung aller Nächte, als auch für die meteorologisch/astronomisch besser definierten und deshalb von uns favorisierten Jahresmediane der klaren mondlosen Nächte, wo sie 2018 bei rund 36 MW liegt.

Um die Langzeitentwicklung bei Einzelstationen deutlicher hervortreten zu lassen, müssen neben astronomisch/meteorologischen Ursachen offenbar weitere lokale Faktoren berücksichtigt werden. Die von uns gewählten Jahresmediane sind zusammen mit den hohen Stichprobengrößen bereits Garant für eine repräsentative Charakterisierung. Die strikte Beschränkung auf klare mondlose Nächte garantiert die größtmögliche Vergleichbarkeit der Daten über mehrere Jahre hinweg. Dennoch existieren bei den Zeitserien der Einzelstationen noch deutliche jährliche Schwankungen. Der nächste Schritt zu einem besseren Verständnis dieser Schwankungen ist eine genauere Charakterisierung der klaren Atmosphäre. Für uns sind hier vor allem jene Eigenschaften von Bedeutung, die die Ausbreitung von Licht beeinflussen.

Für die hier vorliegende Studie wurden uns erstmals Daten des Wiener Luftmessnetzes seitens der MA 22 in Form von Halbstundenmittelwerten zur Verfügung gestellt. Zum ersten Verständnis des Zusammenhangs zwischen Luftgüte und nächtlicher Globalstrahlung haben wir jene Größen ausgewählt, von denen bekannt ist, dass sie die Lichtausbreitung in der Atmosphäre erheblich beeinflussen: Luftfeuchtigkeit und Feinstaub.

Die Zusammenhänge wurden unter Nutzung der bekannten jahreszeitlichen Modulation der Lufteigenschaften studiert. Feuchtigkeit und Feinstäube zeigen zum Beispiel deutliche Unterschiede zwischen den Werten im Sommer und jenen im Winter. Zur genauen Quantifizierung bilden wir monatliche Mediane für die Globalstrahlung und die von uns gewählten Luftgüteindikatoren. Die Monatsmediane erlauben einerseits ausreichend viele mondlose Nächte. Andererseits werden verkehrsbedingte Tages- und Wochenspitzen im bekannten Luftgüteverlauf gemittelt. Etwaige Beziehungen von großräumigen, durch jahreszeitliche oder meteorologische Variationen bedingte Unterschiede in der Transparenz und im Streuverhalten der Atmosphäre zur Globalstrahlung können dadurch untersucht werden.

Die Ergebnisse sind in Relationen für die Monatsmediane von 2016 bis 2018 dargestellt. Dieser Zeitraum erlaubt eine dreifache Wiederholung der jahreszeitlichen Modulation und einen Ausschluss von Einzeleignissen, die nur für ein bestimmtes Jahr charakteristisch sind. In unserem Fall sollte das vor allem die Effekte von flächendeckenden Schneelagen und großräumigen Aerosolverfrachtungen (z.B. Saharastaubereignisse) minimieren.

Tatsächlich finden sich deutliche Korrelationen an allen Messstationen und bei allen gewählten Luftgüteindikatoren. Bemerkenswert ist, dass die Abhängigkeiten bei allen Stationen sehr ähnlich sind, obwohl diese sich in der Globalstrahlung um mehrere Größenordnungen unterscheiden und in verschiedenen Verbauungssituationen (innerstädtisch bis landwirtschaftlich) lokalisiert sind.

Mit drei der Größen (relative Feuchtigkeit, PM_{2,5} und PM₁₀) steht die nächtliche Globalstrahlung in direktem Zusammenhang. Sowohl in klaren mondlosen Nächten, als auch in beliebigen Nächten steigen die Globalstrahlungswerte mit diesen wachsenden Luftgütewerten. Für uns überraschend ist die Antikorrelation der absoluten Luftfeuchtigkeit mit der Globalstrahlung, also die Abnahme der Globalstrahlung mit steigendem Wassergehalt der Luft.

Allen gemeinsam ist die logarithmische Natur des

Zusammenhangs zwischen Globalstrahlung und Umweltwerten. Dieses Verhalten ist eine Konsequenz der Lichtausbreitung, da sowohl Absorptions- als auch Streuprozesse proportional zum Lichtstrom sind. Feinstaubkonzentrationen und relative Feuchtigkeit beeinflussen linear die Lichtverluste pro Längeneinheit.

Der lineare Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Globalstrahlung und den Luftgütewerten zeigt derart ähnliche Steigungen, dass wir alle drei Stationen in einer Grafik zeigen können, um deren Parallelität augenfällig zu machen. So zeigt beispielsweise die Korrelation von relativer Luftfeuchtigkeit und der Globalstrahlung aller Nächte für Globalstrahlungen im Bereich von 20 bis 2000 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ und Luftfeuchtigkeiten von 30 bis 95 Prozent nahezu die gleiche Steigung. Das ist konsistent mit der Annahme, dass es sich um einen optischen Effekt handelt, der proportional zur Lichtmenge ist.

Die Globalstrahlung ist am stärksten von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig, gefolgt von PM_{2,5} und PM₁₀. Insgesamt ist die Abhängigkeit in dieser Gruppe von Luftgüteindikatoren sehr ähnlich, was aus physikalischen Überlegungen nicht anders zu erwarten ist. Deshalb gehen wir von einem direkten Zusammenwirken aus. Möglich wäre etwa die bekannte gemeinsame Wirkung auf die Sichtweite [3].

Die größte Abweichung findet sich in der Beziehung der relativen Feuchtigkeit mit der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte über Großmugl. Erklärungsansätze hierfür sind die große Distanz zur Luftmessstelle in Wien, landwirtschaftliche Tätigkeit im näheren Umfeld und die jahreszeitliche Modulation der Staubverteilung.

Auf der Kuffner-Sternwarte entspricht beispielsweise ein Anstieg der Luftfeuchtigkeit von 75 auf 95 Prozent einer Zunahme der Globalstrahlung um einen Faktor 10.

Schon durch die Berücksichtigung dieses einzelnen Luftgütefaktors sind atmosphärenbedingte Schwankungen der Globalstrahlungsdaten um bis zu einen Faktor 10 reduzierbar. Damit ist bei zukünftigen Auswertungen auch bei der Betrachtung kurzer Zeiträume ein wesentlich genauerer Zusammenhang mit der tatsächlich eingebrachten Lichtmenge möglich. Die Aussagekraft von Messungen der Nachthimmelselligkeit in Bezug auf die vorliegende Lichtverschmutzung kann mit Hilfe dieser Luftgütedaten erheblich gesteigert werden.

Diese auf den Daten der Luftmessstationen der MA 22 beruhende Erkenntnis repräsentiert einen erheblichen Fortschritt für die Erforschung der Lichtverschmutzung.

In den kommenden Jahren erwarten wir durch diesen neuen Ansatz ein wesentlich umfassenderes Verständnis der Vorgänge beim Einbringen von Kunstlicht in die nächtliche Atmosphäre. Ein Ausbau unseres Licht-Messnetzwerks unter Einbeziehung bestehender Luftmessstationen der MA 22 würde dem Vorschub leisten, da dadurch die Präzision und Verfügbarkeit der Messwerte eine weitere Steigerung erfahren würden.

Definition der in den Diagrammen und Tabellen verwendeten Begriffe

Nacht:

Der in dieser Studie verwendete Nachtbegriff bezieht sich auf Messungen, die nach dem Ende der astronomischen Abenddämmerung und vor dem Beginn der astronomischen Morgendämmerung durchgeführt wurden. In beiden Fällen befindet sich die Sonne mehr als 18 Grad unter dem mathematischen Horizont des Beobachtungsorts. Während der so definierten astronomischen Nacht kann die Sonne auch über die Beleuchtung der Atmosphäre oberhalb der Troposphäre keinen direkten Beitrag mehr zur gemessenen Globalstrahlung liefern.

Alle Nächte:

Sämtliche Messwerte innerhalb der o.a. Nachtdefinition. Enthalten sind auch Nächte, in denen das Mondlicht zu den Messungen beiträgt oder Wolken die künstliche Beleuchtung verstärkt nach unten streuen, was zu einer Erhellung der Nacht führt. Es erfolgt keine Filterung der Daten nach meteorologischen Gesichtspunkten (Bewölkung, Temperatur).

Klare mondlose Nächte:

Messwerte innerhalb der o.a. Nachtdefinition, bei denen der Mond mehr als 4 Grad unter dem mathematischen Horizont des Beobachtungsorts stand und der Himmel auf Basis der Datenanalyse als wolkenfrei angenommen wird. Wolken werden durch die Standardabweichung der Messungen in einem gleitenden Zeitfenster von 20 Minuten Dauer bestimmt. Dieser Wolkenindikator basiert bei der Messfrequenz von 1 Hz auf 1200 Einzelmessungen

Globalstrahlung:

Energiestromdichte in $[W/m^2]$ der auf den Sensor des Lightmeters auftreffenden Strahlung. Angabe in Diagrammen aufgrund besserer Darstellbarkeit auch in $[mW/m^2]$ oder $[\mu W/m^2]$.

Jahresmedian:

Median aller Messwerte der genannten Stichprobe (alle oder klare mondlose Nächte), die während eines Kalenderjahres gemessen wurden.

Monatsmedian:

Median aller Messwerte der genannten Stichprobe (alle oder klare mondlose Nächte), die während eines Kalendermonats gemessen wurden.

PM10:

Luftgüteindikator für eine bestimmte Feinstaubfraktion. Die Definition dieses Werts beruht nicht auf einem einzigen Durchmesser der Staubteilchen, sondern auf einer Nachbildung ihres Abscheideverhaltens in den oberen Atemwegen und ist damit medizinisch begründet. Er umfasst mit einer definierten Gewichtungsfunktion Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser bis zirka $15 \mu m$, wobei Teilchen mit $10 \mu m$ zu 50 % in die Gewichtung eingehen. Teilchen mit weniger als $1 \mu m$ werden vollständig einbezogen.

PM2,5:

Auch diese Feinstaubfraktion ist medizinisch begründet und bezieht sich auf die lungengängigen Anteile. Die Gewichtungsfunktion beinhaltet alle Teilchen unter $0,5 \mu m$ und endet bei maximal $3,5 \mu m$. Teilchen mit $2,5 \mu m$ gehen zu 50 % in die Gewichtung ein.

Relative Luftfeuchtigkeit:

Prozentuales Verhältnis zwischen dem vorliegenden Dampfdruck des Wassers und seinem Sättigungsdruck. Angabe in Prozent.

Absolute Luftfeuchtigkeit:

Masse des pro Kubikmeter Luft enthaltenen Wasserdampfs in Gramm. Die in dieser Studie angegebenen Werte wurden nicht direkt gemessen, sondern aus der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur berechnet.

ANHANG A

Tabellarische Auflistung der Mediane und der 5%-Quantile 2016-2018

Die folgenden Tabellen listen die Monatsmediane der Messwerte sowie die unteren und oberen 5%-Quantile der entsprechenden Monate in den Jahren 2016 bis 2018 auf. Für diesen Zeitraum haben wir einen Vergleich unserer Globalstrahlungsdaten mit einigen Luftgüte-Indikatoren aus dem Luftgütemessnetzwerk der Wiener MA 22 durchgeführt.

Fehlende Monate in den Daten sind Folgen von temporären Ausfällen von mindestens einer der beteiligten Messstationen (Globalstrahlungs- und/oder Luftmessstationen) im zeitlichen Abschnitt der entsprechenden Stichprobe (beispielsweise zu den Bedingungen klarer mondloser Nächte). Dies ist in den anschließenden Diagrammen deutlich dargestellt.

Die Tabellen beginnen mit den Globalstrahlungsdaten (gelb) der Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl, jeweils getrennt für alle Nächte und klare mondlose Nächte. Daran anschließend werden die berechneten Luftgütedaten für alle drei Lightmeter der Reihe nach aufgeführt.

Die hier angegebenen Daten für PM₁₀, PM_{2,5}, relative und absolute Luftfeuchtigkeit basieren auf Berechnungen mit einer synthetischen Luftgütemessstation, die aus den realen Daten der Station Hermannskogel und der Station Lobau gebildet wurde. Die absolute Luftfeuchtigkeit wurde aus den Stationswerten der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur gemäß [2]

$$\frac{6.112 \times e^{[(17.67 \times T)/(T+243.5)]} \times RF \times 2.1674}{(273.15+T)}$$

berechnet. T entspricht der Lufttemperatur in [° C],
RF der relativen Luftfeuchtigkeit in [%].

WIEN ZENTRUM Globalstrahlung [$\mu\text{W}/\text{m}^2$], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	174,9	1188,9	4367,8
Feb 16	181,7	1155,3	5039,2
Mär 16	232,3	1093,3	3156,0
Apr 16	169,7	554,3	3001,7
Mai 16	181,2	728,9	2783,9
Jun 16	147,9	470,0	1808,8
Jul 16	142,5	563,8	2071,3
Aug 16	134,9	260,4	1559,3
Sep 16	169,1	350,1	1914,8
Okt 16	183,4	1385,6	3775,6
Nov 16	148,0	848,5	4918,1
Dez 16	129,2	1043,1	4215,9
Jän 17	195,6	1193,8	4917,6
Feb 17	136,1	1078,5	4737,0
Mär 17	141,1	564,8	2034,2
Apr 17	154,3	937,3	2741,3
Mai 17	139,9	462,0	2055,6
Jun 17	130,3	293,0	1255,5
Dez 17	209,7	395,9	1219,2
Feb 18	259,0	1594,7	4602,3
Mär 18	236,6	1300,9	4539,8
Apr 18	149,1	381,3	1548,1
Mai 18	158,8	431,8	1590,0
Jun 18	172,6	473,6	2406,0
Jul 18	172,6	386,8	1683,1
Aug 18	156,9	321,9	1656,0
Sep 18	154,0	421,7	2251,0
Okt 18	184,0	519,9	2685,0
Nov 18	177,8	1023,5	5090,5

Tab. A1: Wien Zentrum. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der Globalstrahlung **aller Nächte** in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]

WIEN ZENTRUM Globalstrahlung [$\mu\text{W}/\text{m}^2$], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	142,8	1706,5	4239,6
Feb 16	130,8	228,0	2228,7
Mär 16	169,0	400,7	3430,1
Apr 16	163,4	228,7	3460,9
Mai 16	158,9	222,4	2883,0
Jun 16	137,0	161,6	1568,5
Jul 16	133,6	159,6	188,3
Aug 16	126,5	159,4	321,9
Sep 16	136,6	223,3	362,0
Okt 16	139,0	246,8	2599,6
Nov 16	121,7	246,0	5566,5
Dez 16	118,1	223,1	4585,7
Jän 17	172,6	1844,5	5081,3
Feb 17	113,5	232,1	4049,2
Mär 17	123,8	177,8	526,4
Apr 17	120,7	171,2	2406,0
Mai 17	117,7	160,7	2013,3
Jun 17	126,8	140,5	213,6
Dez 17	390,4	402,7	561,7
Feb 18	233,2	2527,8	6308,7
Mär 18	166,7	326,6	4486,0
Apr 18	128,5	191,8	475,4
Mai 18	147,1	220,3	500,0
Jun 18	167,5	234,8	2060,2
Jul 18	144,6	185,4	1194,7
Aug 18	132,4	170,4	371,7
Sep 18	145,9	179,3	296,5
Okt 18	175,8	256,5	432,7
Nov 18	138,2	504,5	5071,7

Tab. A2: Wien Zentrum. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der Globalstrahlung **klarer mondloser Nächte** in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]

KUFFNER STERNWARTE Globalstrahlung [$\mu\text{W}/\text{m}^2$], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	105,2	622,2	1472,8
Feb 16	102,1	659,0	1275,1
Mär 16	124,1	632,3	1209,0
Apr 16	87,5	236,5	1014,6
Mai 16	86,3	346,7	908,0
Jun 16	72,8	205,3	750,2
Jul 16	67,9	236,1	788,0
Aug 16	68,1	121,9	697,4
Sep 16	79,8	166,4	923,9
Okt 16	91,3	620,4	1169,7
Nov 16	87,9	452,7	1351,3
Dez 16	77,8	564,9	1339,3
Jän 17	103,1	675,6	1133,5
Aug 17	94,0	203,8	968,9
Sep 17	111,2	392,9	1204,5
Okt 17	104,4	304,1	1306,0
Nov 17	109,1	970,0	1746,0
Dez 17	112,4	895,4	2004,0
Jän 18	133,3	1056,7	2066,9
Feb 18	155,3	925,6	1741,9
Mär 18	139,0	789,9	2057,0
Apr 18	96,7	219,2	996,7
Mai 18	85,2	212,1	887,3
Jun 18	89,5	296,3	1037,9
Jul 18	98,2	228,6	860,7
Aug 18	90,1	188,4	1022,8
Sep 18	88,9	223,9	1155,2
Okt 18	101,9	326,9	1401,8
Nov 18	147,8	897,9	1518,0

Tab. A3: Kuffner Sternwarte. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der Globalstrahlung **aller Nächte** in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]

KUFFNER STERNWARTE Globalstrahlung [$\mu\text{W}/\text{m}^2$], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	87,7	785,9	1341,0
Feb 16	77,9	137,1	983,6
Mär 16	104,1	219,1	1062,1
Apr 16	78,2	126,5	848,2
Mai 16	77,8	96,9	889,2
Jun 16	68,8	80,6	662,8
Jul 16	65,4	74,0	669,4
Aug 16	65,9	77,2	124,3
Sep 16	69,1	103,9	163,3
Okt 16	77,4	113,1	871,0
Nov 16	75,1	125,7	1322,8
Dez 16	71,6	109,6	1228,5
Jän 17	102,8	694,5	1038,3
Aug 17	89,8	107,3	651,3
Sep 17	101,2	134,8	1257,1
Okt 17	95,2	138,9	1262,2
Nov 17	98,7	152,3	1865,4
Dez 17	91,6	177,4	1763,0
Jän 18	112,6	1179,4	2733,0
Feb 18	121,2	1148,2	1820,3
Mär 18	119,8	312,1	1340,6
Apr 18	84,0	112,1	646,4
Mai 18	78,4	132,1	909,1
Jun 18	86,0	123,5	1045,8
Jul 18	78,7	100,1	676,9
Aug 18	74,2	96,7	154,9
Sep 18	84,0	100,9	197,5
Okt 18	91,9	128,7	198,2
Nov 18	145,8	1013,5	1510,4

Tab. A4: Kuffner Sternwarte. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der Globalstrahlung **klarer mondloser Nächte** in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]

GROßMUGL Globalstrahlung [$\mu\text{W}/\text{m}^2$], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Mär 16	22,9	43,4	302,5
Apr 16	18,8	84,5	742,7
Mai 16	18,7	50,9	533,8
Jun 16	18,7	52,9	274,8
Jul 16	18,0	56,3	507,8
Aug 16	17,9	38,4	678,0
Sep 16	20,6	34,7	739,3
Okt 16	22,6	97,5	932,2
Nov 16	21,9	114,8	1932,3
Dez 16	23,9	53,4	404,6
Jän 17	30,6	253,3	746,4
Feb 17	28,0	202,6	1129,1
Mär 17	23,6	72,0	1275,8
Apr 17	22,5	71,0	932,9
Mai 17	22,4	70,5	747,2
Jun 17	23,3	58,4	554,7
Jul 17	22,5	42,6	287,9
Aug 17	22,2	41,0	430,8
Sep 17	30,4	99,6	791,7
Okt 17	28,7	99,7	778,3
Nov 17	31,8	135,8	1032,5
Dez 17	34,0	104,1	1913,0
Jän 18	40,8	172,1	2081,0
Feb 18	30,9	116,1	833,8
Mär 18	27,0	85,3	915,5
Apr 18	22,2	44,5	606,0
Mai 18	26,7	182,8	670,3
Jun 18	27,6	54,7	269,0
Jul 18	25,7	122,0	583,1
Aug 18	25,0	47,7	734,1
Sep 18	27,2	55,7	1145,0
Okt 18	27,0	57,0	671,3
Nov 18	32,8	141,3	417,7

Tab. A5: Großmugl. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der Globalstrahlung **aller Nächte** in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]

GROßMUGL Globalstrahlung [$\mu\text{W}/\text{m}^2$], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Mär 16	17,8	35,9	158,5
Apr 16	17,8	19,2	129,0
Mai 16	18,0	20,2	66,8
Jun 16	18,4	30,7	73,3
Jul 16	17,2	19,6	63,2
Aug 16	17,6	19,5	66,6
Sep 16	19,9	22,7	34,8
Okt 16	19,5	33,3	161,4
Nov 16	20,0	31,2	189,1
Dez 16	22,3	30,1	215,6
Jän 17	29,0	106,2	359,2
Feb 17	23,5	40,0	297,0
Mär 17	23,0	25,7	84,9
Apr 17	21,5	28,1	128,6
Mai 17	21,0	24,7	88,3
Jun 17	23,0	23,9	77,2
Jul 17	21,9	24,6	88,2
Aug 17	21,4	25,5	139,8
Sep 17	24,8	54,8	195,5
Okt 17	25,4	36,9	205,7
Nov 17	27,4	100,5	251,8
Dez 17	30,2	59,1	439,9
Jän 18	24,8	79,9	258,3
Feb 18	27,3	71,2	261,3
Mär 18	24,9	43,2	152,3
Apr 18	21,9	24,0	87,6
Mai 18	22,9	33,1	35,5
Jun 18	27,5	32,4	204,0
Jul 18	24,3	34,0	135,0
Aug 18	24,4	26,8	147,1
Sep 18	26,2	29,9	52,3
Okt 18	26,1	30,2	55,4
Nov 18	30,1	53,5	288,2

Tab. A6: Großmugl. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der Globalstrahlung **klarer mondloser Nächte** in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]

WIEN ZENTRUM PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	1,92	18,23	45,55
Feb 16	1,73	10,62	25,72
Mär 16	5,51	16,02	29,56
Apr 16	2,89	11,77	30,24
Mai 16	3,18	10,06	20,04
Jun 16	3,68	9,22	18,00
Jul 16	5,26	8,51	16,77
Aug 16	4,42	8,80	15,78
Sep 16	3,41	15,96	26,48
Okt 16	4,20	12,77	26,52
Nov 16	4,36	16,96	41,27
Dez 16	3,90	17,26	39,18
Jän 17	3,42	31,80	79,66
Feb 17	2,58	25,54	72,03
Mär 17	0,48	14,27	31,35
Apr 17	4,56	13,25	23,46
Mai 17	4,35	11,35	22,65
Jun 17	6,10	12,23	24,96
Dez 17	6,16	12,07	23,15
Feb 18	11,30	28,73	51,27
Mär 18	2,66	18,88	64,31
Apr 18	2,64	14,49	35,75
Mai 18	4,74	12,59	26,57
Jun 18	4,12	14,54	21,46
Jul 18	5,48	15,05	23,49
Aug 18	4,05	10,44	22,79
Sep 18	2,59	11,36	21,38
Okt 18	3,74	21,40	60,22
Nov 18	10,44	30,77	50,28

Tab. A7: Wien Zentrum. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM10 **aller Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

WIEN ZENTRUM PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	1,51	20,22	48,54
Feb 16	2,10	8,74	25,15
Mär 16	5,30	14,06	27,66
Apr 16	4,44	12,63	37,30
Mai 16	3,65	11,58	20,66
Jun 16	5,30	9,33	11,39
Jul 16	5,30	8,20	16,42
Aug 16	4,73	9,15	17,49
Sep 16	6,32	15,93	25,46
Okt 16	3,22	10,71	26,08
Nov 16	4,74	13,14	37,91
Dez 16	3,73	15,91	37,26
Jän 17	3,58	42,12	80,49
Feb 17	2,03	13,50	77,67
Mär 17	0,34	16,88	31,54
Apr 17	3,46	12,91	22,00
Mai 17	7,40	15,82	33,99
Jun 17	2,41	13,23	27,48
Dez 17	14,25	15,39	20,65
Feb 18	11,32	27,74	52,83
Mär 18	2,00	16,10	42,34
Apr 18	2,11	14,08	41,34
Mai 18	2,57	10,72	20,53
Jun 18	7,83	15,12	21,46
Jul 18	8,14	12,91	18,71
Aug 18	3,47	7,91	21,39
Sep 18	7,07	12,77	20,13
Okt 18	6,51	34,76	60,78
Nov 18	12,26	35,19	48,43

Tab. A8: Wien Zentrum. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM10 **klarer mondloser Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

WIEN ZENTRUM PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	2,40	15,20	46,70
Feb 16	2,80	8,00	17,70
Mär 16	5,90	12,50	25,30
Apr 16	2,90	8,10	17,10
Mai 16	1,80	8,30	13,00
Jun 16	3,30	6,70	13,40
Jul 16	3,20	6,70	13,00
Aug 16	4,00	6,60	13,80
Sep 16	3,40	10,90	18,90
Okt 16	2,20	8,70	19,00
Nov 16	3,60	12,90	41,30
Dez 16	3,60	16,50	37,20
Jän 17	2,80	32,20	78,60
Feb 17	3,30	23,40	61,60
Mär 17	2,90	9,10	27,30
Apr 17	4,10	8,40	15,40
Mai 17	4,70	7,90	11,00
Jun 17	2,50	6,90	14,30
Dez 17	5,00	9,23	11,40
Feb 18	9,70	24,70	43,20
Mär 18	4,50	19,50	55,80
Apr 18	3,30	8,40	15,80
Mai 18	5,90	9,90	14,70
Jun 18	3,40	8,70	12,30
Jul 18	6,00	9,80	12,80
Aug 18	3,90	8,80	14,90
Sep 18	2,10	8,50	13,30
Okt 18	2,37	12,45	39,40
Nov 18	7,10	25,85	45,15

Tab. A9: Wien Zentrum. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM2,5 **aller Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

WIEN ZENTRUM PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	2,30	15,20	47,60
Feb 16	2,80	6,90	16,80
Mär 16	3,50	9,80	30,70
Apr 16	2,90	9,20	17,10
Mai 16	3,30	8,50	14,70
Jun 16	3,30	6,70	10,60
Jul 16	3,60	6,70	12,50
Aug 16	4,15	6,30	20,20
Sep 16	3,50	10,90	15,70
Okt 16	2,20	7,20	18,16
Nov 16	3,30	10,30	36,02
Dez 16	3,30	12,40	35,90
Jän 17	2,80	47,90	78,60
Feb 17	3,20	11,10	63,60
Mär 17	2,40	9,30	27,30
Apr 17	3,00	7,60	15,40
Mai 17	4,70	8,30	11,30
Jun 17	2,50	9,60	14,40
Dez 17	8,20	11,40	11,40
Feb 18	8,90	24,70	43,20
Mär 18	3,80	14,50	40,80
Apr 18	3,10	9,70	15,80
Mai 18	5,60	9,70	12,60
Jun 18	6,40	9,60	11,80
Jul 18	6,00	9,30	12,80
Aug 18	4,30	8,00	19,20
Sep 18	6,10	9,80	13,30
Okt 18	4,50	20,40	39,40
Nov 18	9,71	29,07	43,29

Tab. A10: Wien Zentrum. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM2,5 **klarer mondloser Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

WIEN ZENTRUM relative Feuchte [%], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	58,7	87,0	97,0
Feb 16	60,9	86,3	97,0
Mär 16	58,0	84,0	97,0
Apr 16	46,2	73,4	97,0
Mai 16	53,0	81,3	97,0
Jun 16	41,0	75,5	97,0
Jul 16	53,0	75,5	97,0
Aug 16	58,3	76,8	97,0
Sep 16	50,9	67,0	97,0
Okt 16	75,0	95,0	97,0
Nov 16	67,8	91,3	97,0
Dez 16	55,3	88,2	97,0
Jän 17	68,2	90,2	95,5
Feb 17	45,5	87,9	97,2
Mär 17	45,5	74,1	96,5
Apr 17	50,7	74,0	97,1
Mai 17	58,0	74,7	96,8
Jun 17	44,1	66,1	95,3
Dez 17	66,8	80,8	97,2
Feb 18	72,1	91,7	97,2
Mär 18	55,1	85,1	97,2
Apr 18	41,9	61,8	89,3
Mai 18	51,0	78,4	93,0
Jun 18	57,6	78,0	93,2
Jul 18	47,4	68,3	93,3
Aug 18	41,3	59,7	93,0
Sep 18	54,0	69,5	94,0
Okt 18	59,5	77,3	93,1
Nov 18	75,2	94,1	97,1

Tab. A11: Wien Zentrum. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der relativen Luftfeuchtigkeit **aller Nächte** in [%]

WIEN ZENTRUM relative Feuchte [%], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	70,8	93,0	97,0
Feb 16	65,9	84,0	97,0
Mär 16	56,0	88,0	97,0
Apr 16	45,1	74,1	97,0
Mai 16	48,4	77,9	97,0
Jun 16	40,5	70,1	96,6
Jul 16	51,4	67,4	97,0
Aug 16	55,4	73,5	97,0
Sep 16	49,4	63,6	97,0
Okt 16	70,1	93,1	97,0
Nov 16	63,6	88,6	97,0
Dez 16	55,0	86,2	97,0
Jän 17	57,0	91,8	95,5
Feb 17	38,7	75,7	97,2
Mär 17	30,6	67,6	95,9
Apr 17	52,5	81,0	97,1
Mai 17	54,0	68,6	89,4
Jun 17	46,5	64,2	94,4
Dez 17	65,9	69,2	80,6
Feb 18	74,5	95,4	97,2
Mär 18	55,1	81,7	97,0
Apr 18	43,3	63,3	88,9
Mai 18	50,2	79,7	93,6
Jun 18	63,7	80,5	93,5
Jul 18	54,9	69,8	93,1
Aug 18	41,3	59,5	92,7
Sep 18	52,3	68,1	93,5
Okt 18	58,3	75,0	90,3
Nov 18	76,5	95,1	96,9

Tab. A12: Wien Zentrum. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der relativen Luftfeuchtigkeit **klarer mondloser Nächte** in [%]

WIEN ZENTRUM absolute Feuchte [g/m³], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	2,21	4,28	6,40
Feb 16	3,87	5,10	7,00
Mär 16	4,10	4,97	6,87
Apr 16	4,10	6,30	8,42
Mai 16	6,11	8,00	10,98
Jun 16	6,44	10,50	13,90
Jul 16	8,60	12,54	14,61
Aug 16	8,09	11,08	14,00
Sep 16	6,63	10,50	12,80
Okt 16	5,57	6,93	10,10
Nov 16	3,20	5,40	8,01
Dez 16	2,89	3,90	6,00
Jän 17	1,80	2,80	4,20
Feb 17	3,02	4,05	6,42
Mär 17	3,60	5,30	7,65
Apr 17	3,80	6,02	7,52
Mai 17	6,00	8,51	10,90
Jun 17	7,17	10,34	13,48
Dez 17	2,80	3,49	7,63
Feb 18	1,40	3,75	4,50
Mär 18	2,20	4,50	7,14
Apr 18	4,62	6,94	9,82
Mai 18	6,31	9,90	12,61
Jun 18	7,10	10,89	14,90
Jul 18	6,79	11,50	13,80
Aug 18	8,10	10,90	14,50
Sep 18	4,84	10,19	12,66
Okt 18	5,80	7,50	10,50
Nov 18	3,94	7,76	9,40

Tab. A13: Wien Zentrum. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der relativen Luftfeuchtigkeit **aller Nächte** in [g/m³]

WIEN ZENTRUM absolute Feuchte [g/m³], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	2,30	4,36	6,37
Feb 16	4,05	5,20	6,90
Mär 16	4,10	5,00	6,87
Apr 16	4,30	6,70	8,00
Mai 16	6,19	7,86	11,33
Jun 16	5,77	10,27	13,65
Jul 16	7,20	12,02	14,41
Aug 16	7,82	11,07	13,80
Sep 16	7,34	10,50	12,20
Okt 16	5,40	6,73	10,20
Nov 16	3,00	5,49	8,09
Dez 16	2,84	3,80	6,34
Jän 17	2,20	2,80	3,80
Feb 17	3,20	4,33	6,53
Mär 17	2,90	5,70	7,84
Apr 17	3,30	5,74	7,33
Mai 17	6,34	8,51	10,90
Jun 17	9,10	11,40	13,60
Dez 17	2,81	2,87	7,76
Feb 18	3,13	3,90	4,60
Mär 18	2,40	4,90	7,32
Apr 18	5,17	6,90	9,80
Mai 18	6,34	9,04	11,48
Jun 18	9,10	12,64	15,60
Jul 18	8,90	10,77	13,10
Aug 18	8,70	11,06	14,10
Sep 18	8,56	10,45	12,63
Okt 18	5,97	8,40	10,60
Nov 18	4,60	8,01	9,61

Tab. A14: Wien Zentrum. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der relativen Luftfeuchtigkeit **klarer mondloser Nächte** in [g/m³]

KUFFNER STERNWARTE PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	2,09	21,36	46,58
Feb 16	1,73	10,62	25,71
Mär 16	5,52	16,15	29,55
Apr 16	2,90	11,79	30,33
Mai 16	3,18	10,07	20,04
Jun 16	3,69	9,22	17,93
Jul 16	5,26	8,51	16,76
Aug 16	4,43	8,80	15,78
Sep 16	3,41	15,96	26,48
Okt 16	4,20	12,78	26,52
Nov 16	4,36	16,96	41,27
Dez 16	3,89	17,22	39,31
Jän 17	20,15	61,02	66,02
Aug 17	3,35	11,02	23,37
Sep 17	1,50	9,31	28,58
Okt 17	2,11	10,05	44,91
Nov 17	1,70	15,71	34,26
Dez 17	3,02	11,49	31,59
Jän 18	0,84	17,72	40,97
Feb 18	7,48	27,91	50,33
Mär 18	2,66	18,88	64,33
Apr 18	2,64	14,49	35,71
Mai 18	4,75	12,58	26,57
Jun 18	4,12	14,54	21,46
Jul 18	5,48	15,05	23,49
Aug 18	4,05	10,44	22,79
Sep 18	2,59	11,36	21,38
Okt 18	3,74	21,40	60,22
Nov 18	10,76	36,60	48,37

Tab. A15: Kuffner Sternwarte. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM10 **aller Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

KUFFNER STERNWARTE PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	1,58	23,54	51,00
Feb 16	2,10	8,72	25,14
Mär 16	5,31	14,18	27,61
Apr 16	4,44	12,66	37,32
Mai 16	3,65	11,58	20,66
Jun 16	5,30	9,33	11,39
Jul 16	5,30	8,20	16,39
Aug 16	4,73	9,15	17,49
Sep 16	6,32	15,93	25,46
Okt 16	3,22	10,72	26,08
Nov 16	4,74	13,14	37,91
Dez 16	3,71	15,07	37,42
Jän 17	20,07	56,52	65,95
Aug 17	3,71	11,07	19,88
Sep 17	2,51	11,67	27,45
Okt 17	3,30	14,44	48,81
Nov 17	2,59	13,63	35,39
Dez 17	3,66	11,27	30,58
Jän 18	0,07	18,72	35,94
Feb 18	11,28	27,69	52,81
Mär 18	2,00	16,10	42,34
Apr 18	2,10	14,08	41,34
Mai 18	2,57	10,71	20,53
Jun 18	7,84	15,12	21,47
Jul 18	8,14	12,92	18,71
Aug 18	3,47	7,91	21,38
Sep 18	7,07	12,78	20,13
Okt 18	6,51	34,76	60,77
Nov 18	16,58	36,99	48,14

Tab. A16: Kuffner Sternwarte. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM10 **klarer mondloser Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

KUFFNER STERNWARTE PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	2,40	15,90	46,70
Feb 16	2,80	8,00	17,70
Mär 16	5,90	12,50	25,30
Apr 16	2,90	8,10	17,10
Mai 16	1,80	8,30	13,00
Jun 16	3,30	6,70	13,40
Jul 16	3,20	6,70	13,00
Aug 16	4,00	6,60	13,80
Sep 16	3,40	10,90	18,90
Okt 16	2,20	8,70	19,00
Nov 16	3,60	12,90	41,30
Dez 16	3,60	16,50	37,20
Jän 17	29,60	51,80	51,80
Aug 17	2,60	7,00	14,10
Sep 17	1,50	4,90	14,10
Okt 17	1,70	5,40	29,30
Nov 17	3,10	9,60	22,90
Dez 17	2,90	6,90	29,10
Jän 18	2,10	14,90	35,73
Feb 18	8,90	22,70	43,20
Mär 18	4,50	19,50	55,80
Apr 18	3,30	8,40	15,80
Mai 18	5,90	9,90	14,70
Jun 18	3,40	8,70	12,30
Jul 18	6,00	9,80	12,80
Aug 18	3,90	8,80	14,90
Sep 18	2,10	8,50	13,30
Okt 18	2,37	12,45	39,40
Nov 18	6,76	31,45	42,36

Tab. A17: Kuffner Sternwarte. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM2,5 **aller Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

KUFFNER STERNWARTE PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	2,30	17,40	47,60
Feb 16	2,80	6,90	16,80
Mär 16	3,50	9,80	30,70
Apr 16	2,90	9,20	16,71
Mai 16	3,30	8,50	14,70
Jun 16	3,30	6,70	10,60
Jul 16	3,60	6,70	12,50
Aug 16	4,15	6,30	20,20
Sep 16	3,50	10,90	15,70
Okt 16	2,20	7,20	18,16
Nov 16	3,30	10,30	36,01
Dez 16	3,30	12,40	35,90
Jän 17	29,60	51,80	51,80
Aug 17	1,80	7,00	10,90
Sep 17	1,50	5,80	14,10
Okt 17	1,88	6,90	34,10
Nov 17	2,50	7,60	27,40
Dez 17	2,90	6,90	23,10
Jän 18	2,00	16,10	31,80
Feb 18	8,90	24,70	43,20
Mär 18	3,80	14,50	40,80
Apr 18	3,10	9,70	15,80
Mai 18	5,60	9,70	12,60
Jun 18	6,40	9,60	11,80
Jul 18	6,00	9,30	12,80
Aug 18	4,30	8,00	19,20
Sep 18	6,10	9,80	13,30
Okt 18	4,50	20,40	39,40
Nov 18	13,68	31,84	43,15

Tab. A18: Kuffner Sternwarte. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM2,5 **klarer mondloser Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

KUFFNER STERNWARTE relative Feuchte [%], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	59,1	88,8	97,0
Feb 16	61,0	86,2	97,0
Mär 16	58,0	84,0	97,0
Apr 16	46,2	73,3	97,0
Mai 16	53,0	81,3	97,0
Jun 16	41,0	75,6	97,0
Jul 16	53,0	75,5	97,0
Aug 16	58,3	76,8	97,0
Sep 16	50,9	67,0	97,0
Okt 16	75,0	95,0	97,0
Nov 16	67,8	91,3	97,0
Dez 16	56,5	88,8	97,0
Jän 17	53,8	75,4	94,8
Aug 17	50,6	66,2	96,6
Sep 17	61,2	87,0	96,8
Okt 17	64,9	84,1	96,8
Nov 17	67,2	89,0	97,1
Dez 17	66,8	88,3	97,2
Jän 18	71,1	96,9	97,2
Feb 18	72,9	91,7	97,2
Mär 18	55,1	85,1	97,2
Apr 18	41,9	61,8	89,3
Mai 18	51,0	78,4	93,0
Jun 18	57,7	78,0	93,2
Jul 18	47,5	68,3	93,3
Aug 18	41,3	59,7	93,0
Sep 18	54,1	69,6	94,0
Okt 18	59,5	77,3	93,1
Nov 18	70,3	95,8	96,9

Tab. A19: Kuffner Sternwarte. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der relativen Luftfeuchtigkeit **aller Nächte** in [%]

KUFFNER STERNWARTE relative Feuchte [%], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	71,4	94,0	97,0
Feb 16	65,9	84,0	97,0
Mär 16	56,0	88,0	97,0
Apr 16	45,1	73,8	97,0
Mai 16	48,4	78,0	97,0
Jun 16	40,5	70,2	96,6
Jul 16	51,4	67,4	97,0
Aug 16	55,4	73,5	97,0
Sep 16	49,4	63,6	97,0
Okt 16	70,1	93,1	97,0
Nov 16	63,6	88,6	97,0
Dez 16	57,0	86,8	97,0
Jän 17	53,8	78,0	95,0
Aug 17	50,0	61,1	96,7
Sep 17	67,8	92,4	96,8
Okt 17	68,9	87,2	96,8
Nov 17	61,8	90,0	97,1
Dez 17	65,2	88,7	97,1
Jän 18	75,2	97,0	97,3
Feb 18	74,4	95,2	97,2
Mär 18	55,1	81,8	97,0
Apr 18	43,3	63,3	88,9
Mai 18	50,2	79,7	93,6
Jun 18	63,7	80,5	93,5
Jul 18	55,0	69,8	93,1
Aug 18	41,3	59,5	92,7
Sep 18	52,3	68,2	93,5
Okt 18	58,4	75,0	90,3
Nov 18	77,8	96,1	96,9

Tab. A20: Kuffner Sternwarte. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der relativen Luftfeuchtigkeit **klarer mondloser Nächte** in [%]

KUFFNER STERNWARTE absolute Feuchte [g/m³], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	2,29	4,20	6,39
Feb 16	3,88	5,10	7,00
Mär 16	4,10	4,96	6,87
Apr 16	4,10	6,30	8,41
Mai 16	6,11	8,00	10,98
Jun 16	6,44	10,50	13,90
Jul 16	8,60	12,54	14,61
Aug 16	8,09	11,08	14,00
Sep 16	6,63	10,50	12,80
Okt 16	5,57	6,92	10,10
Nov 16	3,20	5,40	8,01
Dez 16	2,90	3,90	6,00
Jän 17	2,80	3,02	3,35
Aug 17	7,77	11,57	15,01
Sep 17	6,79	8,50	10,82
Okt 17	4,92	8,10	9,95
Nov 17	3,99	5,40	7,18
Dez 17	3,09	4,40	6,35
Jän 18	3,66	5,00	6,40
Feb 18	1,50	3,80	4,80
Mär 18	2,20	4,51	7,14
Apr 18	4,62	6,94	9,82
Mai 18	6,31	9,90	12,61
Jun 18	7,10	10,89	14,90
Jul 18	6,79	11,50	13,80
Aug 18	8,10	10,90	14,49
Sep 18	4,84	10,19	12,66
Okt 18	5,80	7,50	10,50
Nov 18	7,30	8,40	10,33

Tab. A21: Kuffner Sternwarte. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der absoluten Luftfeuchtigkeit **aller Nächte** in [g/m³]

KUFFNER STERNWARTE absolute Feuchte [g/m³], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Jän 16	2,30	4,30	6,32
Feb 16	4,05	5,20	6,90
Mär 16	4,10	5,00	6,87
Apr 16	4,30	6,71	8,00
Mai 16	6,19	7,86	11,32
Jun 16	5,77	10,27	13,65
Jul 16	7,20	12,02	14,41
Aug 16	7,82	11,07	13,80
Sep 16	7,34	10,50	12,20
Okt 16	5,40	6,73	10,20
Nov 16	3,00	5,49	8,09
Dez 16	2,90	3,80	6,36
Jän 17	2,80	2,98	3,33
Aug 17	7,43	10,80	12,97
Sep 17	6,88	8,42	10,62
Okt 17	5,91	8,55	10,20
Nov 17	4,10	5,00	6,73
Dez 17	3,10	4,40	6,20
Jän 18	3,50	4,50	6,10
Feb 18	3,13	3,90	4,60
Mär 18	2,40	4,90	7,32
Apr 18	5,17	6,90	9,80
Mai 18	6,34	9,05	11,48
Jun 18	9,10	12,65	15,60
Jul 18	8,90	10,77	13,10
Aug 18	8,70	11,06	14,10
Sep 18	8,56	10,45	12,63
Okt 18	5,97	8,40	10,60
Nov 18	7,30	8,38	10,36

Tab. A22: Kuffner Sternwarte. Mediane (MEDIAN), sowie unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der absoluten Luftfeuchtigkeit **klarer mondloser Nächte** in [g/m³]

GROßMUGL PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Mär 16	5,48	18,75	30,33
Apr 16	2,20	10,68	26,47
Mai 16	3,20	10,05	20,04
Jun 16	3,77	9,37	15,67
Jul 16	5,25	8,44	16,80
Aug 16	4,41	8,83	15,55
Sep 16	3,40	15,88	26,47
Okt 16	4,11	12,80	26,50
Nov 16	4,33	17,02	41,36
Dez 16	4,85	20,43	38,70
Jän 17	33,10	46,56	83,98
Feb 17	2,55	25,00	72,12
Mär 17	0,47	14,27	31,32
Apr 17	4,54	13,36	23,62
Mai 17	4,18	11,35	22,48
Jun 17	1,93	11,79	23,93
Jul 17	0,90	10,08	19,65
Aug 17	3,37	11,22	23,18
Sep 17	1,51	9,33	28,59
Okt 17	2,12	10,05	44,92
Nov 17	1,70	15,71	34,24
Dez 17	3,02	11,49	31,59
Jän 18	0,83	17,71	40,97
Feb 18	7,48	27,91	50,34
Mär 18	2,66	18,89	64,44
Apr 18	2,25	14,00	37,20
Mai 18	8,51	15,06	21,43
Jun 18	4,26	14,61	21,45
Jul 18	5,48	15,10	23,63
Aug 18	4,05	10,42	22,79
Sep 18	2,75	11,49	21,55
Okt 18	3,74	21,40	60,22
Nov 18	10,43	30,77	50,27

Tab. A23: Großmugl. Mediane (MEDIAN), unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM10 **aller Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

GROßMUGL PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Mär 16	4,41	16,52	28,47
Apr 16	4,17	5,95	37,90
Mai 16	3,66	11,58	20,65
Jun 16	5,30	9,44	11,50
Jul 16	5,26	8,20	16,56
Aug 16	4,73	9,13	17,65
Sep 16	6,37	16,06	25,60
Okt 16	3,11	10,38	25,99
Nov 16	4,73	13,37	37,93
Dez 16	5,85	17,15	38,63
Jän 17	32,83	45,82	73,57
Feb 17	2,03	13,42	77,75
Mär 17	0,34	16,60	31,50
Apr 17	3,45	13,00	22,02
Mai 17	7,40	15,82	23,24
Jun 17	1,89	12,97	28,10
Jul 17	0,59	9,97	17,23
Aug 17	3,76	11,08	19,72
Sep 17	2,51	11,68	27,46
Okt 17	3,30	14,43	48,83
Nov 17	2,59	13,64	35,34
Dez 17	3,66	11,27	30,58
Jän 18	0,07	18,72	35,97
Feb 18	11,28	27,69	52,82
Mär 18	2,00	16,08	42,33
Apr 18	2,10	14,08	41,34
Mai 18	12,74	16,61	16,87
Jun 18	7,93	15,04	21,52
Jul 18	8,14	12,92	18,66
Aug 18	3,47	7,90	21,39
Sep 18	7,07	12,79	20,17
Okt 18	6,52	34,82	60,78
Nov 18	12,26	35,19	48,44

Tab. A24: Großmugl. Mediane (MEDIAN), unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM10 **klarer mondloser Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

GROßMUGL PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Mär 16	5,02	14,30	25,30
Apr 16	2,90	7,90	25,80
Mai 16	1,80	8,30	13,00
Jun 16	3,30	6,70	10,60
Jul 16	3,20	6,70	13,00
Aug 16	4,00	6,60	13,80
Sep 16	3,40	10,90	18,90
Okt 16	2,20	8,70	19,00
Nov 16	3,60	12,90	41,30
Dez 16	5,20	23,60	38,60
Jän 17	34,10	54,80	75,10
Feb 17	3,30	23,40	61,60
Mär 17	2,90	9,10	27,30
Apr 17	4,10	8,40	15,40
Mai 17	4,70	7,90	11,00
Jun 17	2,50	6,90	14,00
Jul 17	2,70	6,30	10,20
Aug 17	2,60	7,20	14,10
Sep 17	1,50	4,90	14,10
Okt 17	1,70	5,40	29,30
Nov 17	3,10	9,60	22,90
Dez 17	2,90	6,90	29,10
Jän 18	2,10	14,90	35,72
Feb 18	8,90	22,70	43,20
Mär 18	4,50	19,50	55,80
Apr 18	3,30	8,00	15,80
Mai 18	7,80	10,60	14,70
Jun 18	3,60	9,20	12,30
Jul 18	6,00	9,80	12,80
Aug 18	3,90	8,80	14,90
Sep 18	2,10	8,50	13,30
Okt 18	2,37	12,45	39,40
Nov 18	7,10	25,85	45,16

Tab. A25: Großmugl. Mediane (MEDIAN), unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM2,5 **aller Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

GROßMUGL PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Mär 16	3,50	9,80	30,70
Apr 16	2,90	7,90	25,80
Mai 16	3,30	8,50	14,70
Jun 16	3,30	6,70	10,60
Jul 16	3,74	6,70	12,50
Aug 16	4,12	6,30	20,20
Sep 16	3,50	10,90	15,70
Okt 16	2,20	7,20	19,00
Nov 16	3,60	10,30	36,97
Dez 16	5,20	16,50	38,60
Jän 17	34,10	54,80	75,10
Feb 17	3,20	11,10	63,60
Mär 17	2,40	9,30	27,30
Apr 17	3,00	7,60	15,40
Mai 17	4,70	8,30	11,30
Jun 17	2,40	9,30	14,40
Jul 17	1,40	6,30	10,70
Aug 17	2,04	7,00	10,90
Sep 17	1,50	5,80	14,10
Okt 17	1,70	6,90	34,10
Nov 17	2,50	7,60	27,40
Dez 17	2,90	6,90	23,10
Jän 18	2,00	16,10	31,80
Feb 18	8,90	24,70	43,20
Mär 18	3,80	14,50	40,80
Apr 18	3,10	9,67	15,80
Mai 18	8,33	10,45	10,60
Jun 18	6,40	9,60	11,80
Jul 18	6,00	9,30	12,80
Aug 18	4,30	7,93	19,20
Sep 18	6,30	9,80	13,30
Okt 18	4,50	20,40	39,40
Nov 18	9,71	29,07	43,29

Tab. A26: Großmugl. Mediane (MEDIAN), unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil von PM2,5 **klarer mondloser Nächte** in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

GROßMUGL relative Feuchte [%], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Mär 16	63,0	87,1	97,0
Apr 16	48,7	76,0	97,0
Mai 16	53,0	81,4	97,0
Jun 16	40,9	75,7	96,8
Jul 16	53,0	75,4	97,0
Aug 16	58,1	76,6	97,0
Sep 16	51,3	67,0	97,0
Okt 16	75,1	94,9	97,0
Nov 16	68,0	91,4	97,0
Dez 16	51,8	83,0	97,0
Jän 17	78,2	94,3	96,1
Feb 17	45,5	88,2	97,2
Mär 17	45,5	74,1	96,7
Apr 17	50,7	73,9	97,1
Mai 17	58,0	75,0	96,8
Jun 17	42,3	68,2	96,7
Jul 17	49,6	65,7	96,7
Aug 17	50,1	65,1	96,6
Sep 17	61,2	87,0	96,8
Okt 17	64,9	84,1	96,8
Nov 17	67,2	89,0	97,1
Dez 17	66,8	88,3	97,2
Jän 18	71,1	96,9	97,2
Feb 18	72,9	91,7	97,2
Mär 18	55,1	85,1	97,2
Apr 18	41,6	62,2	89,4
Mai 18	64,0	78,1	88,8
Jun 18	57,6	79,4	93,3
Jul 18	47,6	68,4	93,4
Aug 18	41,3	59,7	93,0
Sep 18	53,9	69,0	93,7
Okt 18	59,5	77,3	93,1
Nov 18	75,2	94,1	97,1

Tab. A27: Großmugl. Mediane (MEDIAN), unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der relativen Feuchte **aller Nächte** in [%]

GROßMUGL relative Feuchte [%], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Mär 16	66,0	89,0	97,0
Apr 16	45,3	80,0	97,0
Mai 16	48,3	78,2	97,0
Jun 16	40,5	70,2	96,7
Jul 16	51,4	67,8	97,0
Aug 16	55,4	73,6	97,0
Sep 16	49,3	63,5	97,0
Okt 16	68,3	92,4	97,0
Nov 16	63,6	88,7	97,0
Dez 16	52,1	83,0	97,0
Jän 17	77,8	94,3	96,2
Feb 17	38,5	75,7	97,2
Mär 17	30,9	67,4	96,0
Apr 17	52,4	79,3	97,1
Mai 17	53,8	68,8	89,4
Jun 17	46,2	65,2	95,0
Jul 17	47,2	78,2	96,7
Aug 17	50,2	61,5	96,6
Sep 17	67,9	92,4	96,8
Okt 17	69,0	87,3	96,8
Nov 17	61,8	90,0	97,1
Dez 17	65,2	88,7	97,1
Jän 18	75,2	97,0	97,3
Feb 18	74,4	95,2	97,2
Mär 18	55,1	81,8	97,0
Apr 18	43,4	63,4	88,9
Mai 18	65,6	82,8	83,3
Jun 18	63,9	81,3	93,6
Jul 18	55,0	69,7	93,1
Aug 18	41,3	59,5	92,7
Sep 18	52,3	67,2	93,4
Okt 18	58,3	75,0	90,3
Nov 18	76,5	95,1	96,9

Tab. A28: Großmugl. Mediane (MEDIAN), unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der relativen Feuchte **klarer mondloser Nächte** in [%]

GROßMUGL absolute Feuchte [g/m³], alle			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Mär 16	4,10	4,80	5,63
Apr 16	4,04	6,00	8,76
Mai 16	6,11	8,00	10,92
Jun 16	6,41	10,37	13,90
Jul 16	8,60	12,53	14,62
Aug 16	8,11	11,08	13,95
Sep 16	6,68	10,47	12,80
Okt 16	5,60	6,90	10,10
Nov 16	3,20	5,40	8,02
Dez 16	3,41	3,78	4,91
Jän 17	2,20	2,70	3,49
Feb 17	3,10	4,09	6,43
Mär 17	3,60	5,30	7,70
Apr 17	3,80	6,03	7,53
Mai 17	6,00	8,50	10,90
Jun 17	6,93	10,57	13,53
Jul 17	8,50	11,07	14,28
Aug 17	7,84	11,63	14,77
Sep 17	6,78	8,50	10,82
Okt 17	4,92	8,10	9,95
Nov 17	3,99	5,40	7,18
Dez 17	3,09	4,40	6,35
Jän 18	3,66	5,00	6,40
Feb 18	1,50	3,80	4,80
Mär 18	2,20	4,50	7,14
Apr 18	4,60	6,87	9,80
Mai 18	8,46	11,50	13,65
Jun 18	7,10	11,04	14,90
Jul 18	6,92	11,50	13,81
Aug 18	8,10	10,90	14,50
Sep 18	4,82	10,09	12,66
Okt 18	5,80	7,50	10,50
Nov 18	3,94	7,76	9,40

Tab. A29: Großmugl. Mediane (MEDIAN), unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der absoluten Feuchte **aller Nächte** in [g/m³]

GROßMUGL absolute Feuchte [g/m³], klar mondlos			
Datum	UNT 5%	MEDIAN	OB 5%
Mär 16	4,10	4,90	5,70
Apr 16	4,03	5,70	8,20
Mai 16	6,18	7,86	11,30
Jun 16	5,76	10,27	13,65
Jul 16	7,20	12,23	14,41
Aug 16	7,86	11,07	13,80
Sep 16	7,33	10,49	12,26
Okt 16	5,40	6,65	10,21
Nov 16	3,00	5,50	8,10
Dez 16	3,44	3,77	4,40
Jän 17	2,20	2,70	3,59
Feb 17	3,20	4,33	6,54
Mär 17	2,93	5,70	7,89
Apr 17	3,28	5,74	7,18
Mai 17	6,25	8,50	10,90
Jun 17	9,09	11,41	13,60
Jul 17	8,86	11,57	13,71
Aug 17	7,47	10,90	13,10
Sep 17	6,88	8,42	10,62
Okt 17	5,91	8,54	10,20
Nov 17	4,10	5,00	6,72
Dez 17	3,10	4,40	6,20
Jän 18	3,50	4,50	6,10
Feb 18	3,14	3,90	4,60
Mär 18	2,40	4,90	7,32
Apr 18	5,17	6,90	9,80
Mai 18	8,22	8,64	8,75
Jun 18	9,10	13,09	15,60
Jul 18	8,90	10,79	13,10
Aug 18	8,70	11,06	14,10
Sep 18	8,55	10,40	12,63
Okt 18	5,97	8,40	10,60
Nov 18	4,60	8,01	9,60

Tab. A30: Großmugl. Mediane (MEDIAN), unteres (UNT 5%) und oberes (OB 5%) 5%-Quantil der absoluten Feuchte **klarer mondloser Nächte** in [g/m³]

ANHANG B

Zeitlicher Verlauf von Globalstrahlung und Luftgütedaten

Auf den folgenden Seiten sind die zeitlichen Verläufe der Monats-Mediane der gemessenen Globalstrahlung über den Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl gegen die Werte der Feinstaubindikatoren PM10 und PM2,5, sowie gegen die relative und absolute Luftfeuchtigkeit aufgetragen. Diese entsprechen den Werten in der Spalte „MEDIAN“ in den Tabellen auf den vorherigen Seiten.

Das Ziel dieser Diagramme ist nicht die präzise Ablesbarkeit von Messpunkten, sondern ein visuelles Erfassen der qualitativen Verläufe. Die Skalierung wurde daher für jeden Größenvergleich individuell angepasst. Ein etwa gleichzeitiges Ansteigen, Gleichbleiben oder Abfallen der miteinander verglichenen Werte ist damit auf einen Blick überschaubar.

Datenlücken bei den Stationen Wien Zentrum und Kuffner Sternwarte beruhen auf Ausfällen der dort eingesetzten Hardware.

Statistische Aussagekraft haben die in Tabelle B1 angeführten Korrelationskoeffizienten der linearen Korrelation der jeweils miteinander verglichenen Daten.

Korrelationskoeffizienten: Globalstrahlung/Luftgütewerte					
Wien Zentrum	Korr.-Koeff.	Kuffner-Sternwarte	Korr.-Koeff.	Großmugl	Korr.-Koeff.
Light/PM10 all	0,61	Light/PM10 all	0,44	Light/PM10 all	0,68
Light/PM10 clear	0,63	Light/PM10 clear	0,61	Light/PM10 clear	0,56
Light/PM2,5 all	0,68	Light/PM2,5 all	0,46	Light/PM2,5 all	0,66
Light/PM2,5 clear	0,74	Light/PM2,5 clear	0,67	Light/PM2,5 clear	0,61
Light/RF all	0,82	Light/RF all	0,78	Light/RF all	0,63
Light/RF clear	0,58	Light/RF clear	0,56	Light/RF clear	0,68
Light/AF all	-0,72	Light/AF all	-0,76	Light/AF all	-0,46
Light/AF clr	-0,49	Light/AF clr	-0,48	Light/AF clr	-0,57

Tab. B1: Korrelationskoeffizienten der linearen Korrelation von Globalstrahlung und einzelnen Luftgütedaten. „Light“ steht für die Globalstrahlung, „PM10“ und „PM2,5“ für die jeweiligen Feinstaubwerte und „RF“ und „AF“ für die relative, beziehungsweise absolute Luftfeuchtigkeit. „all“ sind die Werte aller Nächte, „clear“ die Werte klarer mondloser Nächte.

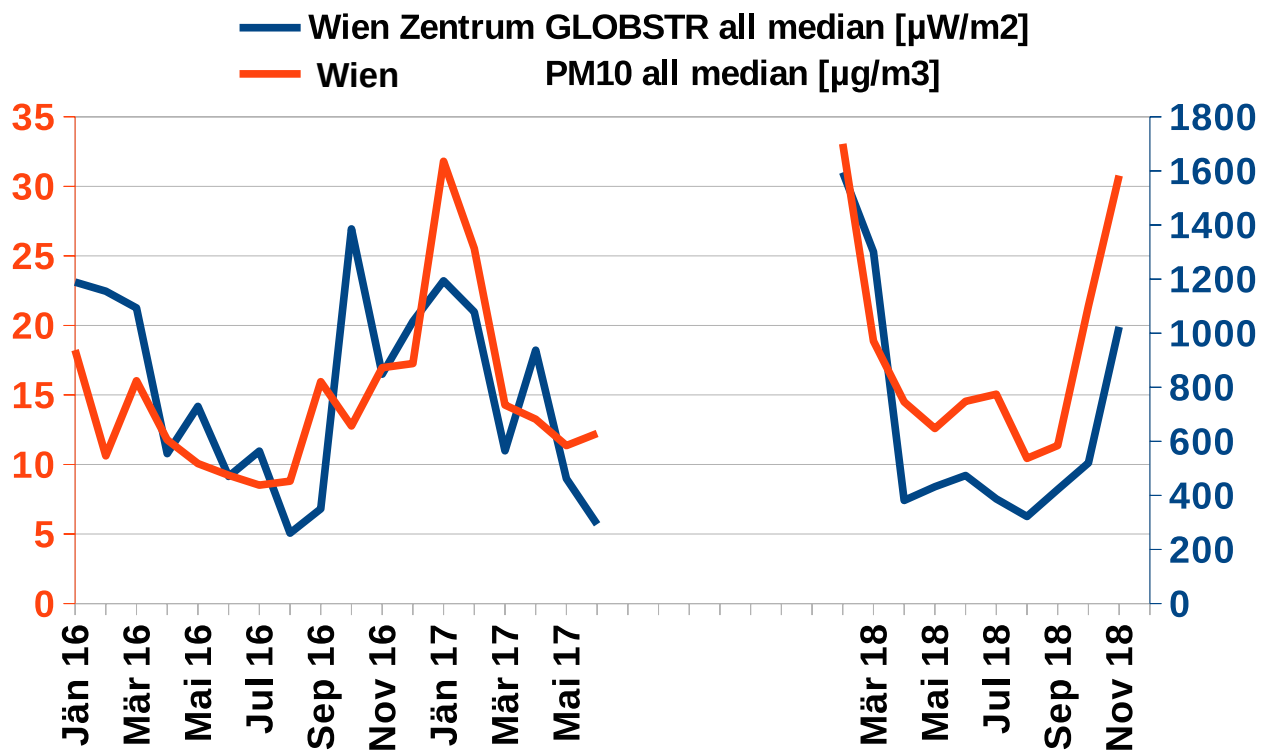


Abb. B1: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM10-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

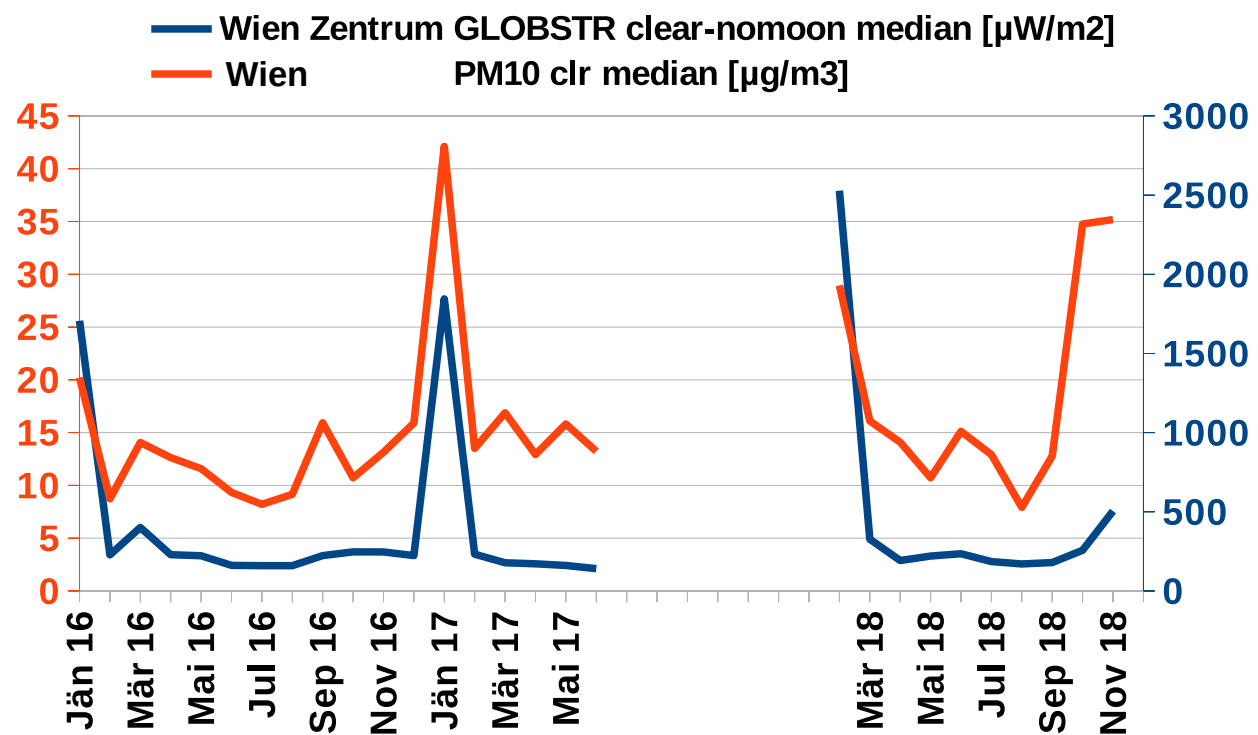


Abb. B2: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM10-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

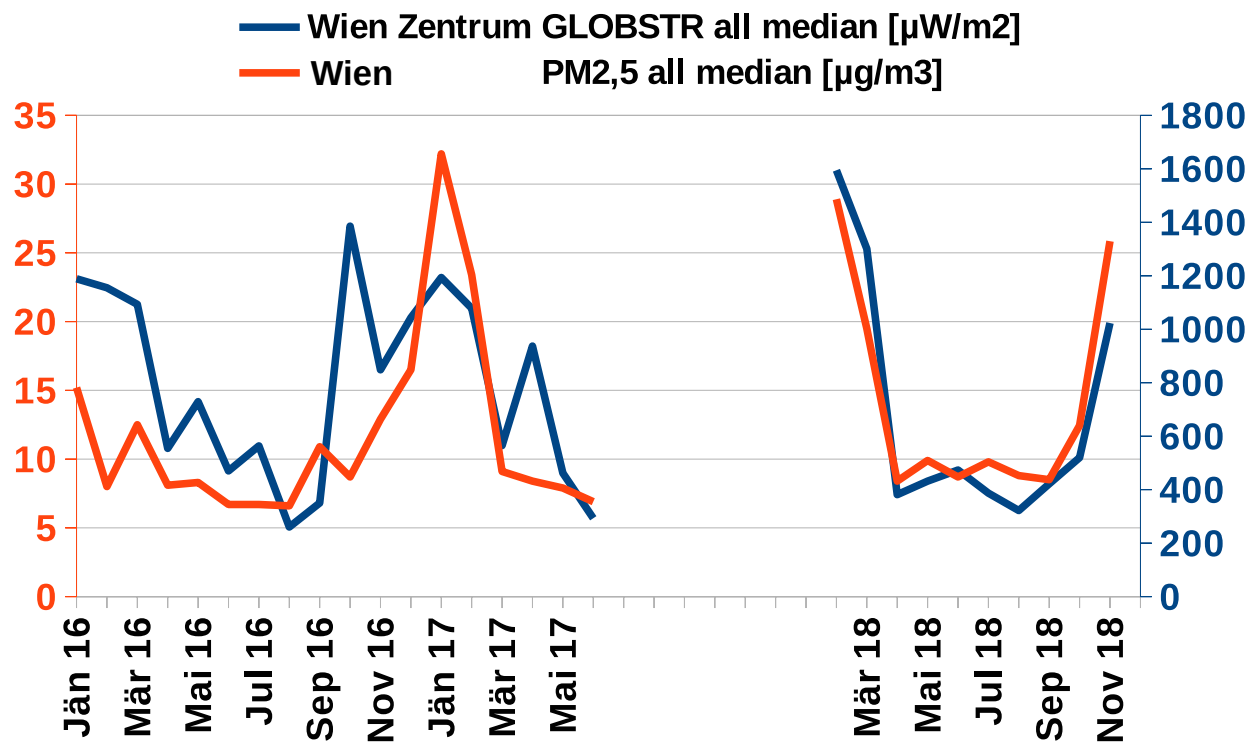


Abb. B3: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM_{2,5}-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

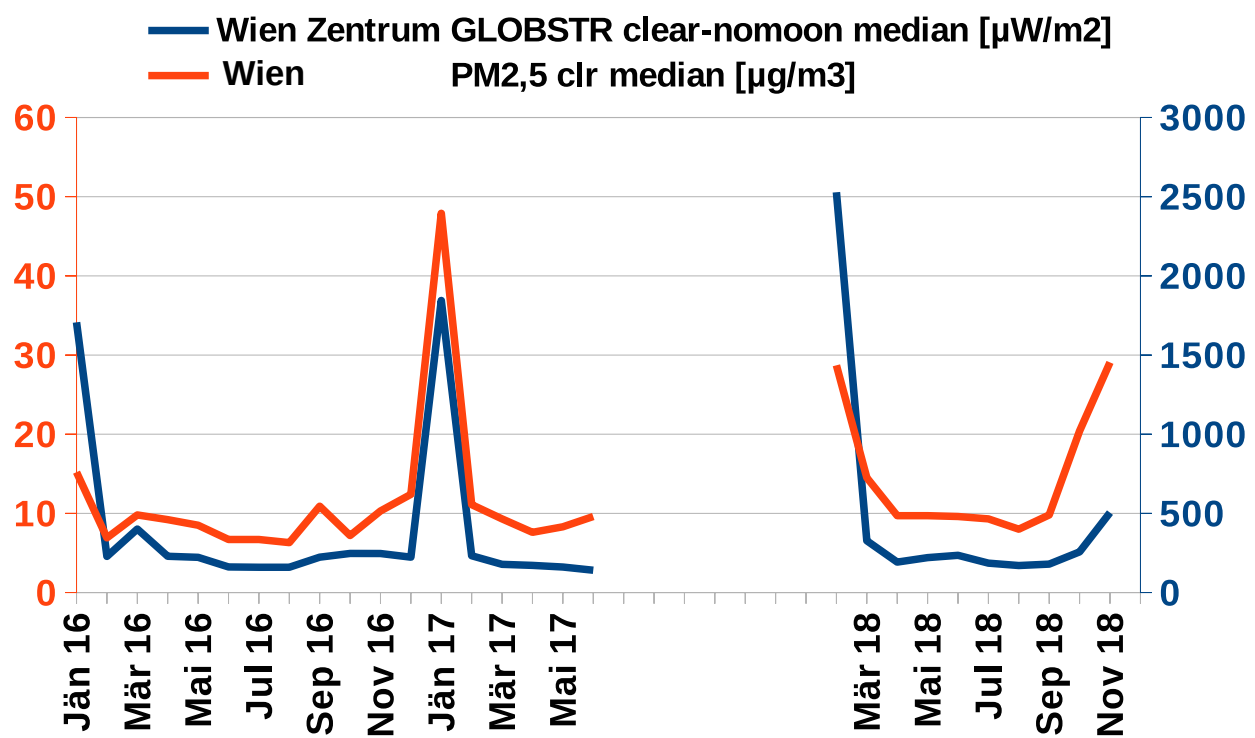


Abb. B4: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM_{2,5}-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

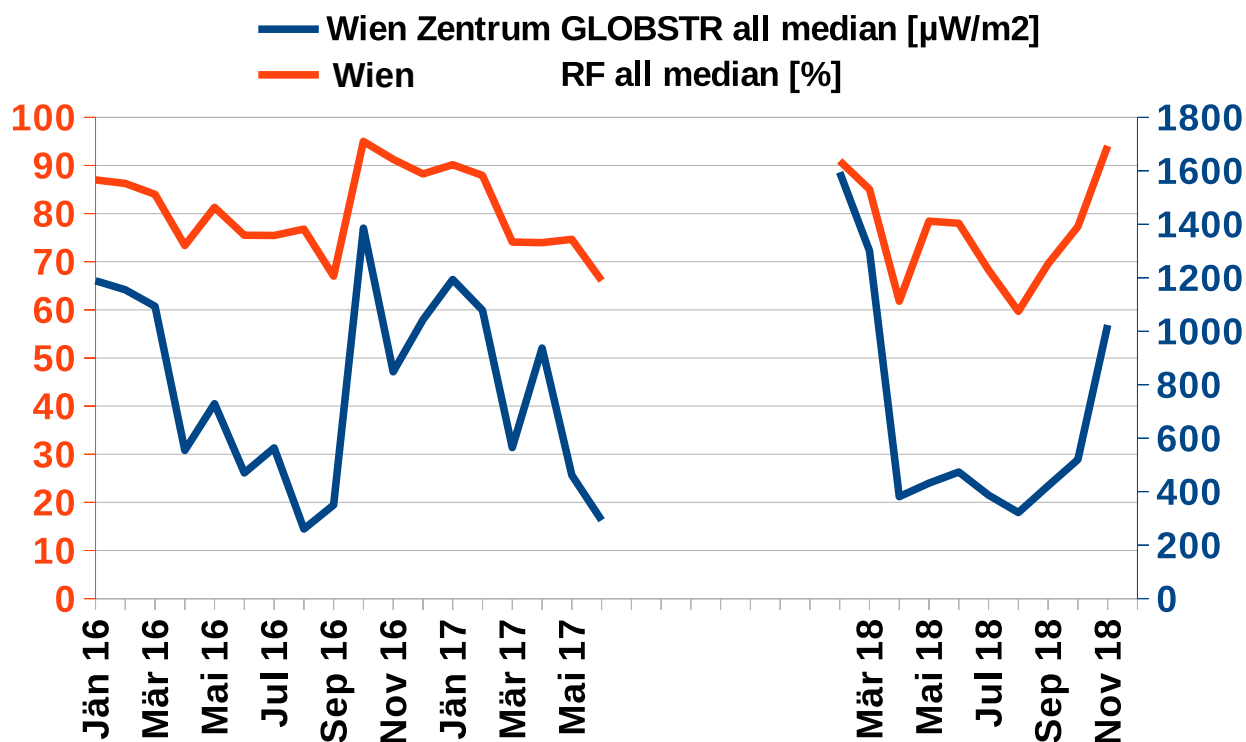


Abb. B5: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

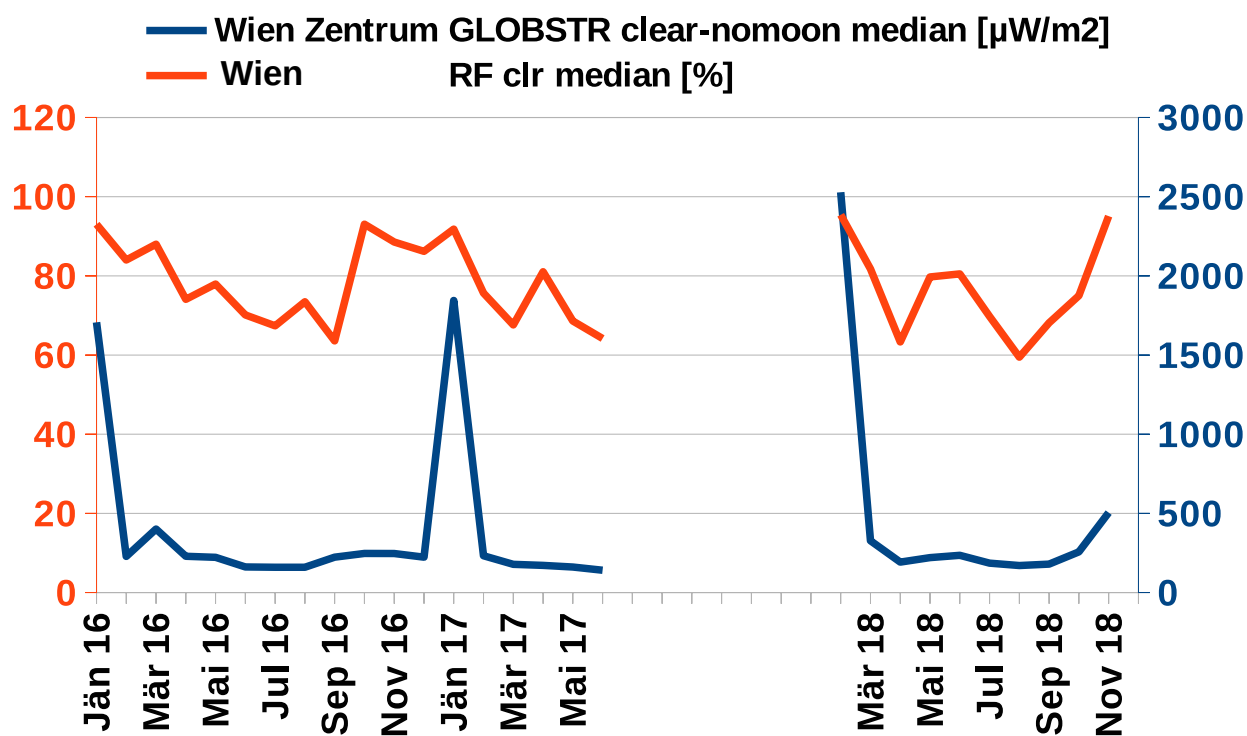


Abb. B6: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

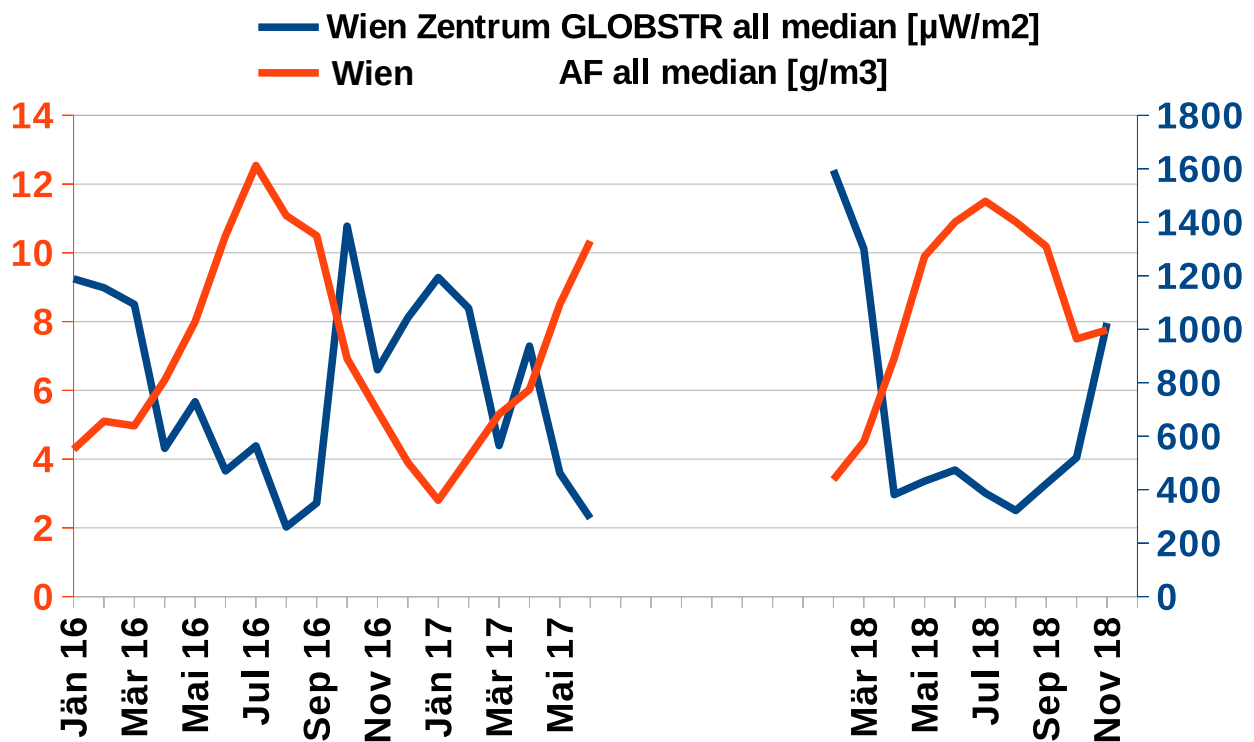


Abb. B7: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

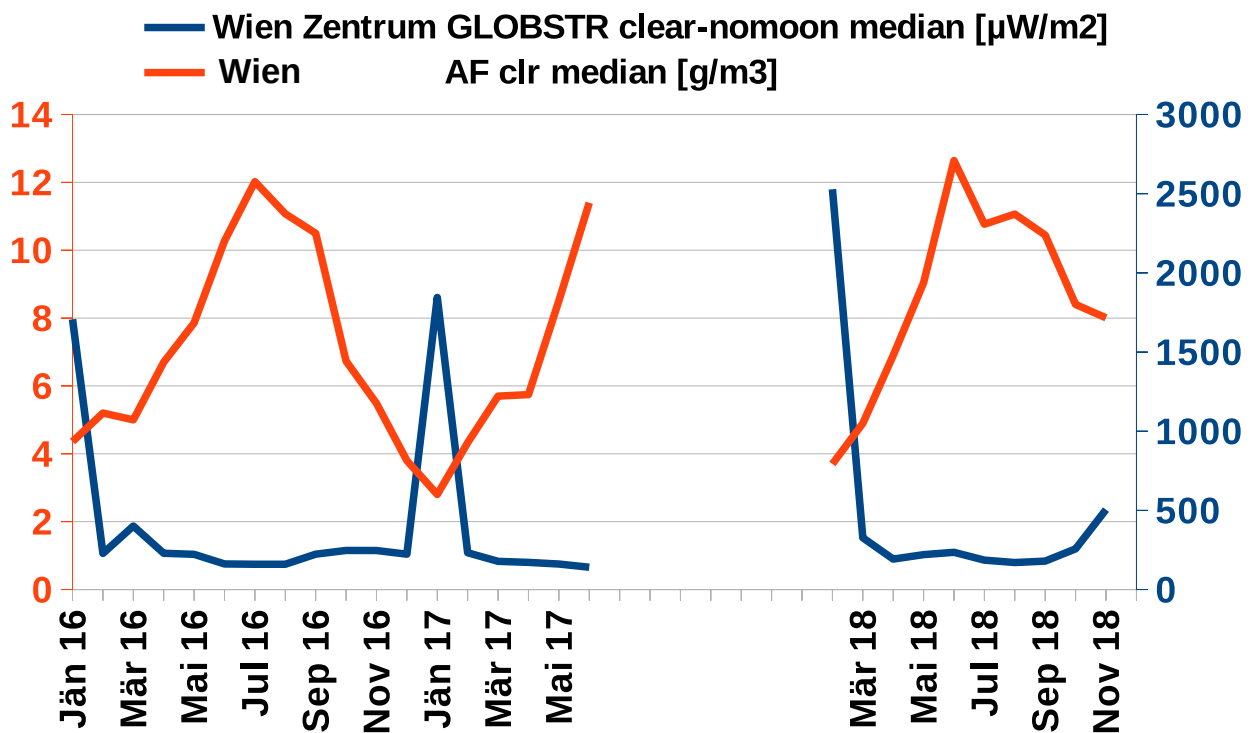


Abb. B8: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

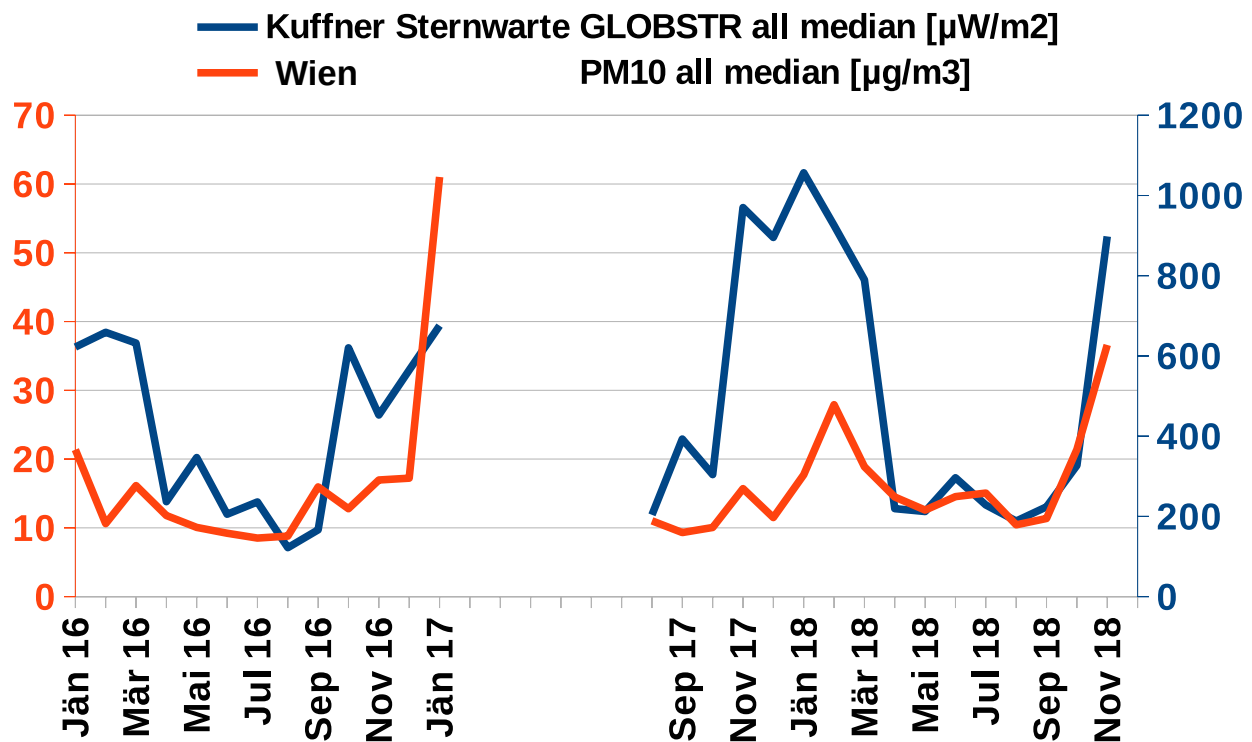


Abb. B9: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM10-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

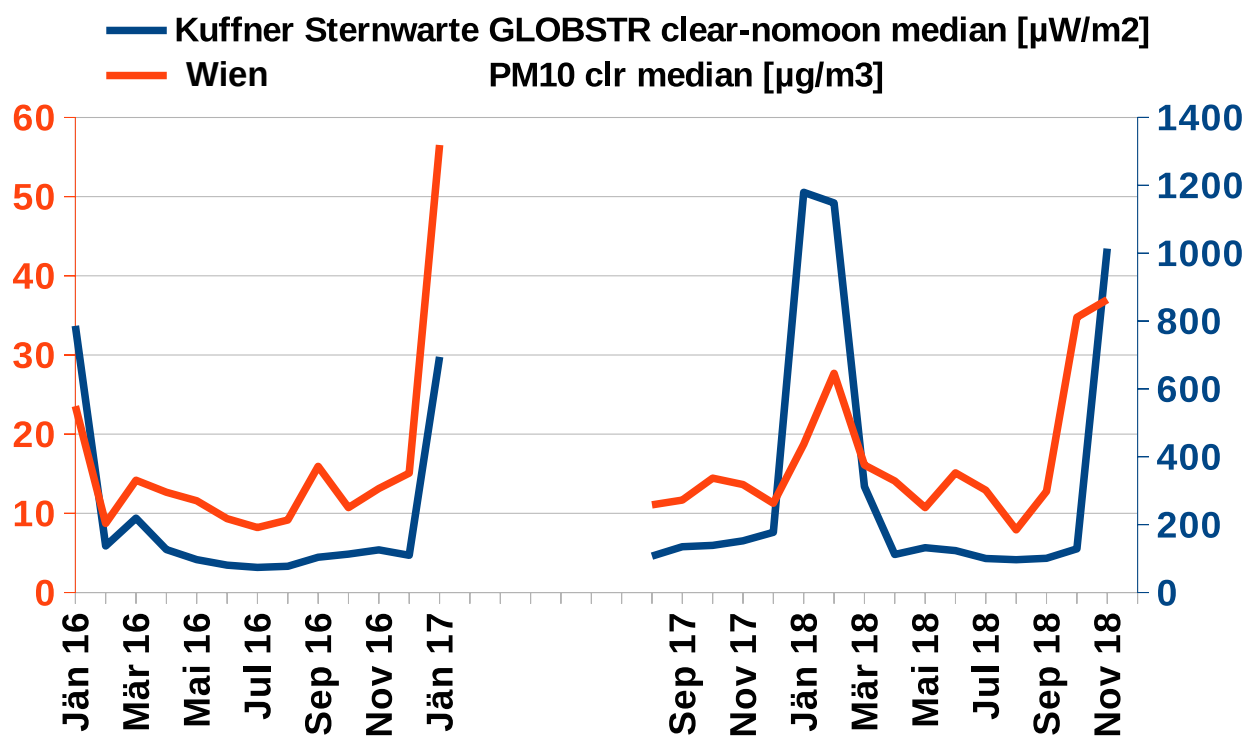


Abb. B10: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM10-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

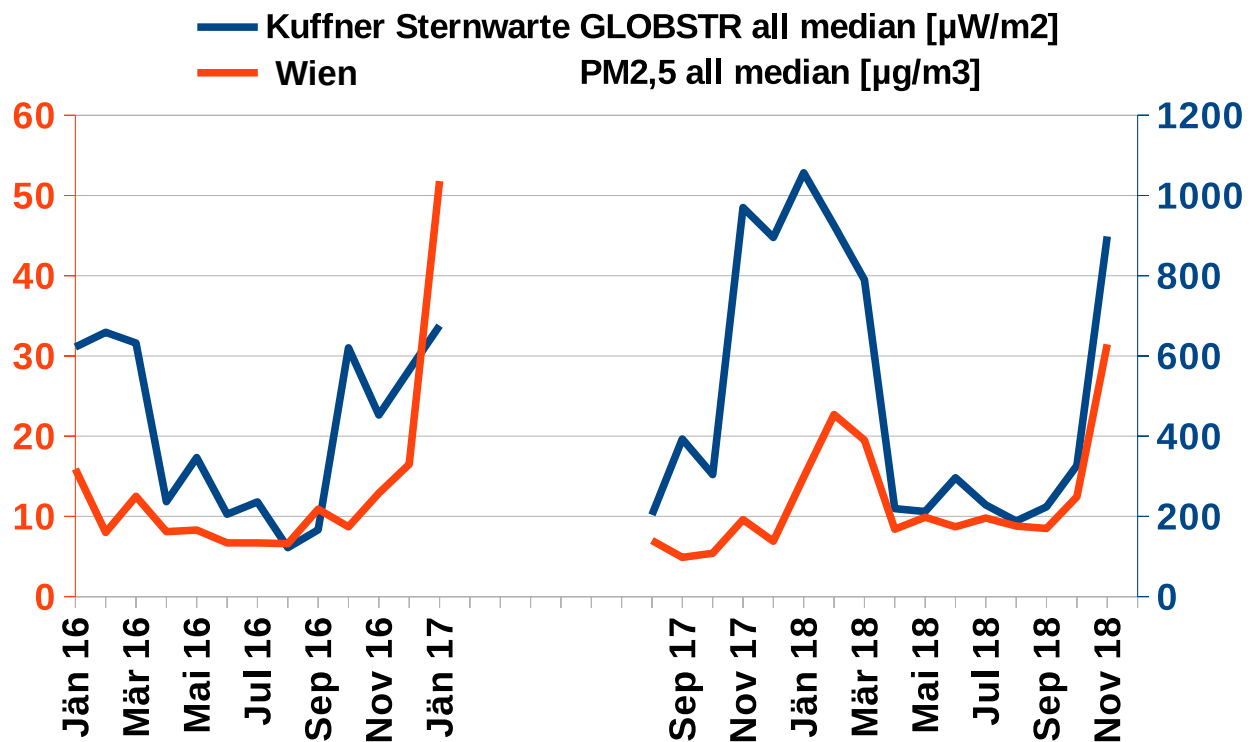


Abb. B11: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM2,5-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

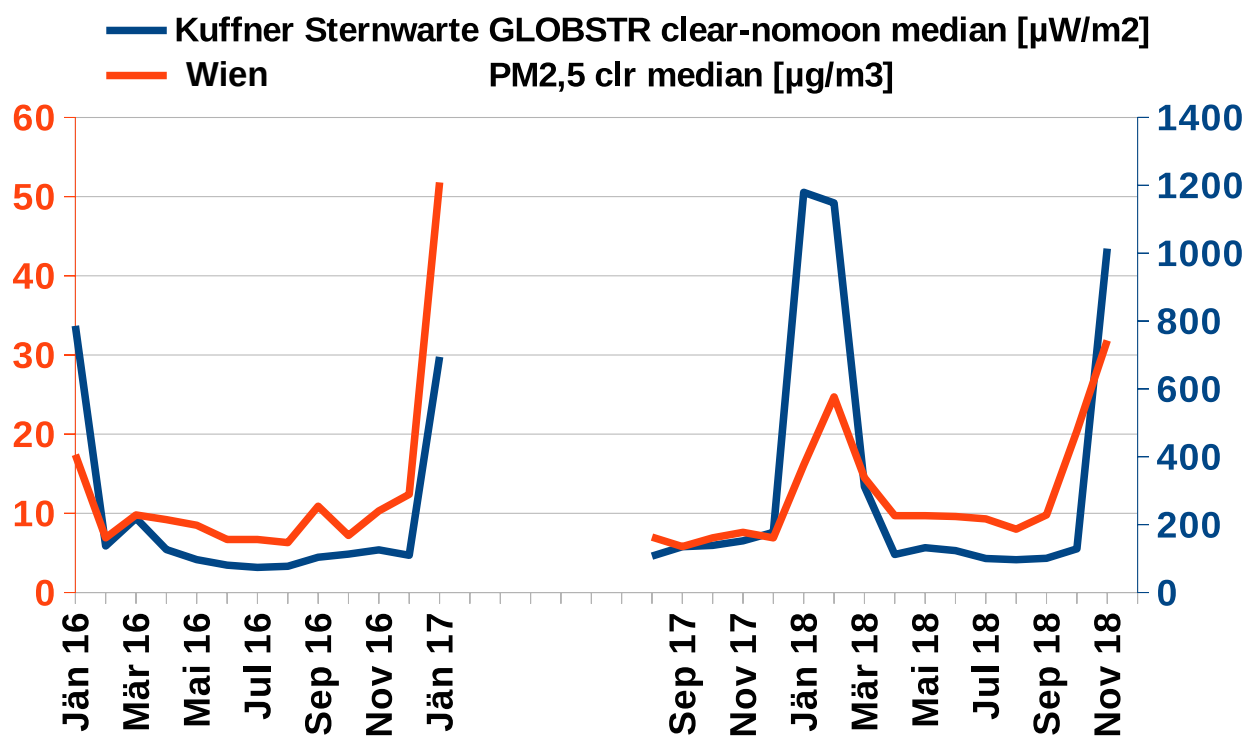


Abb. B12: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM2,5-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

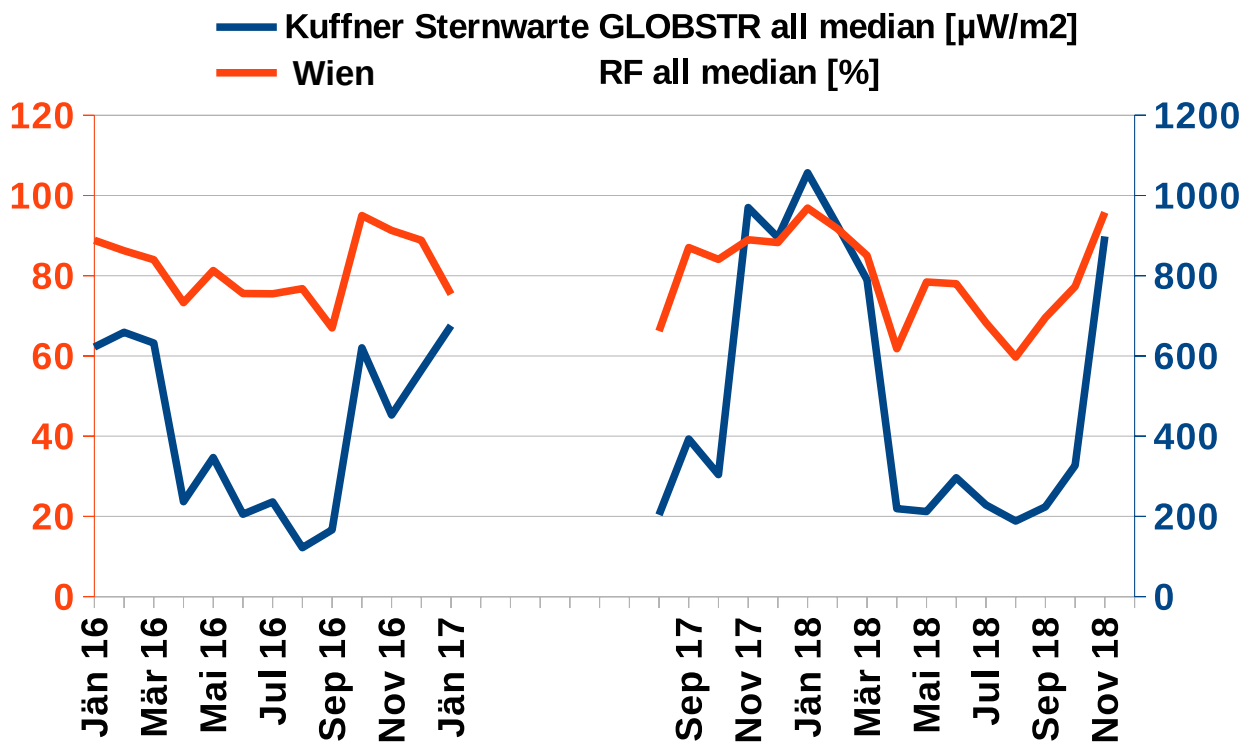


Abb. B13: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

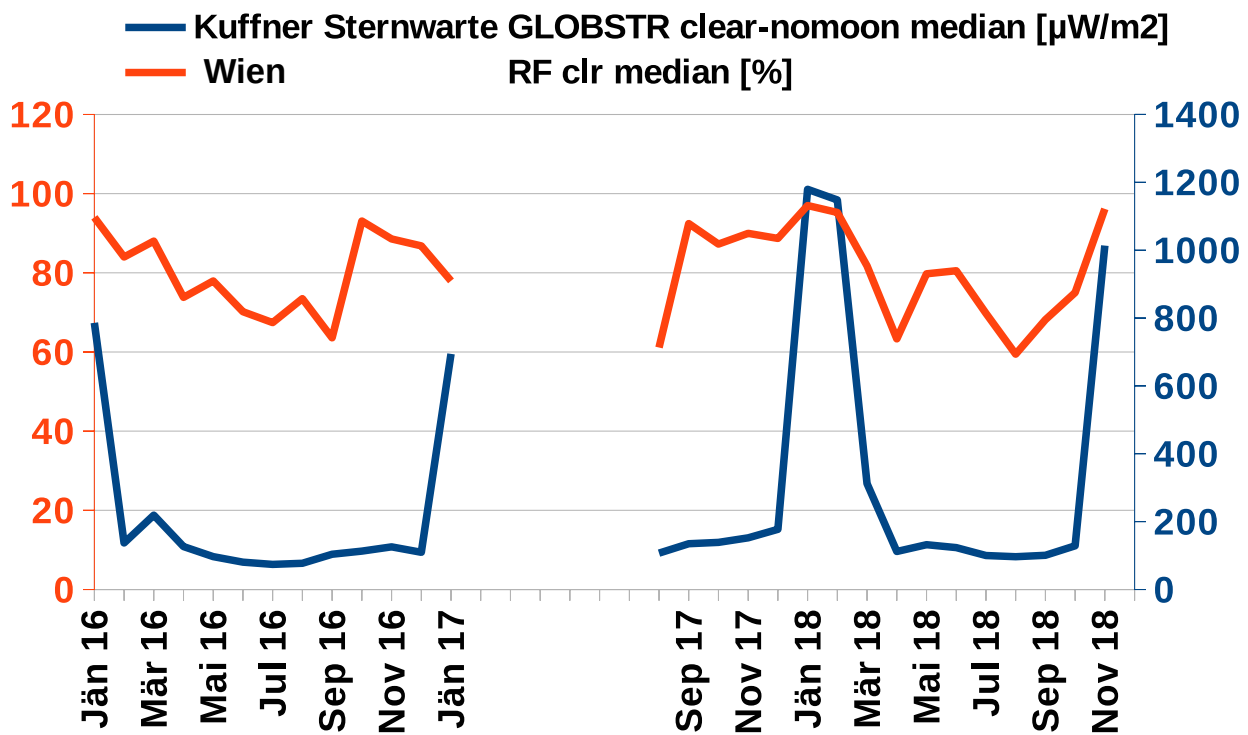


Abb. B14: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

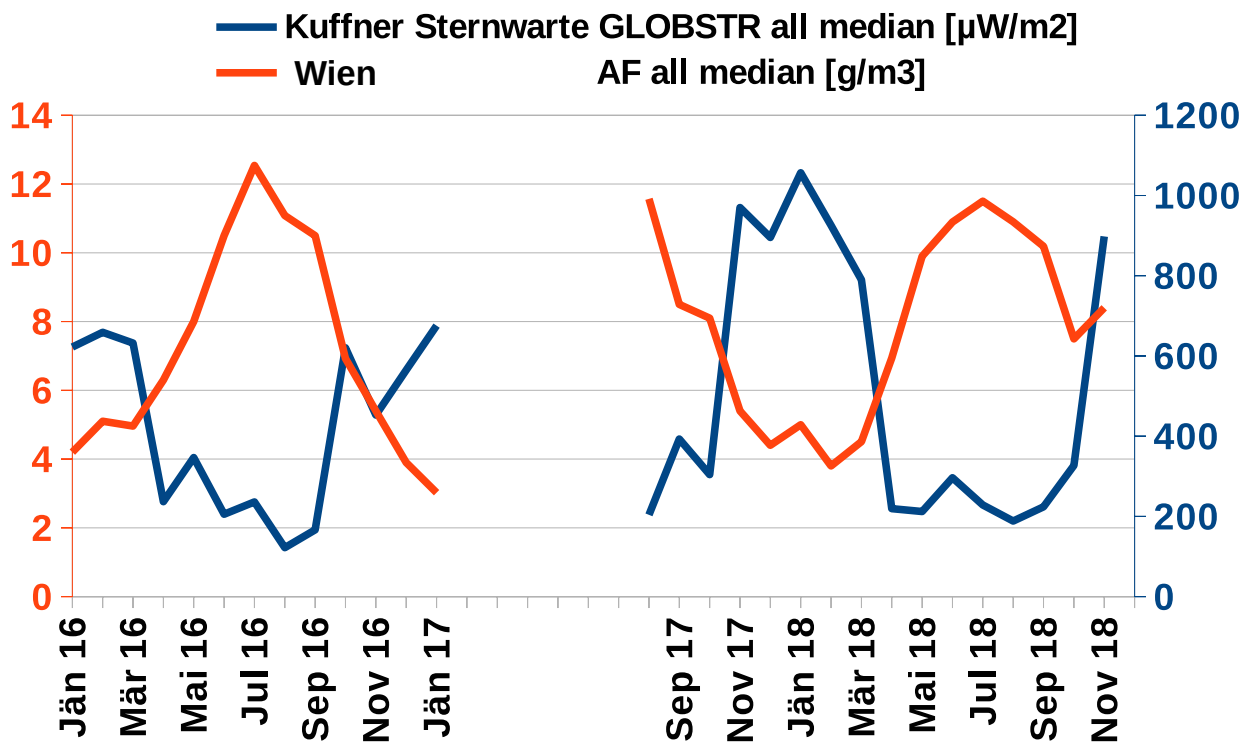


Abb. B15: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

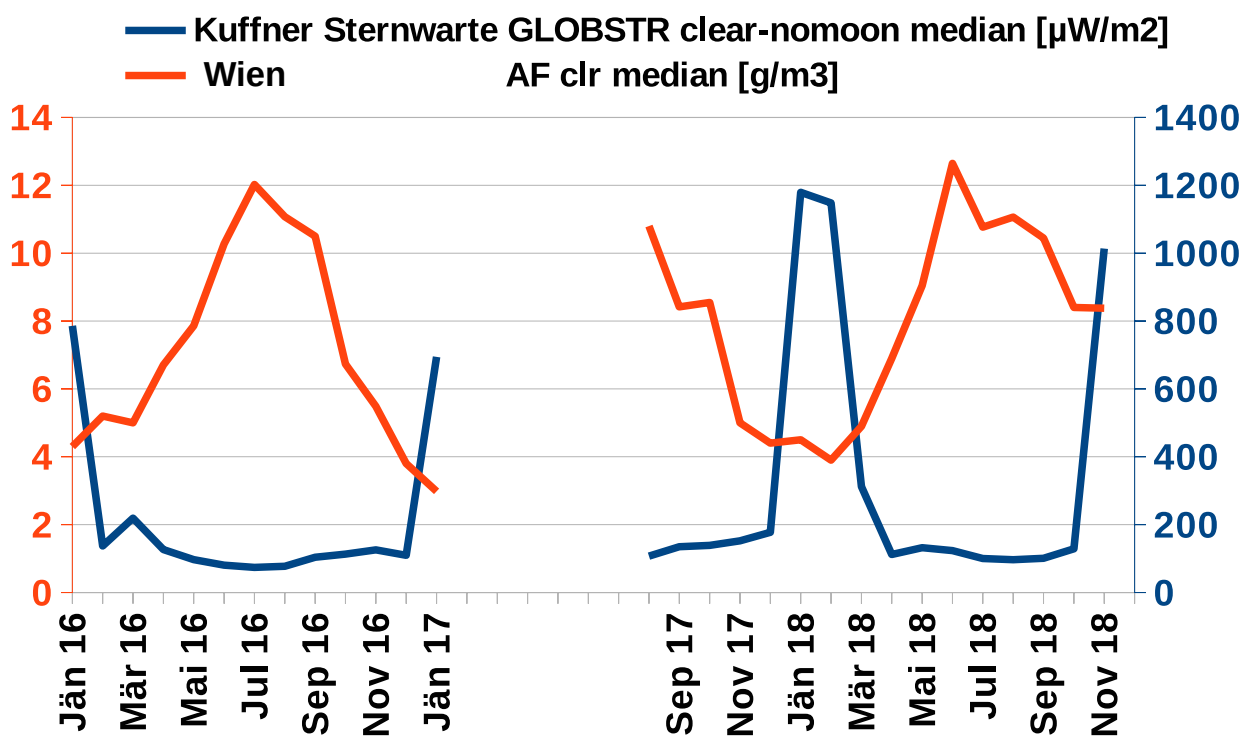


Abb. B16: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung über der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

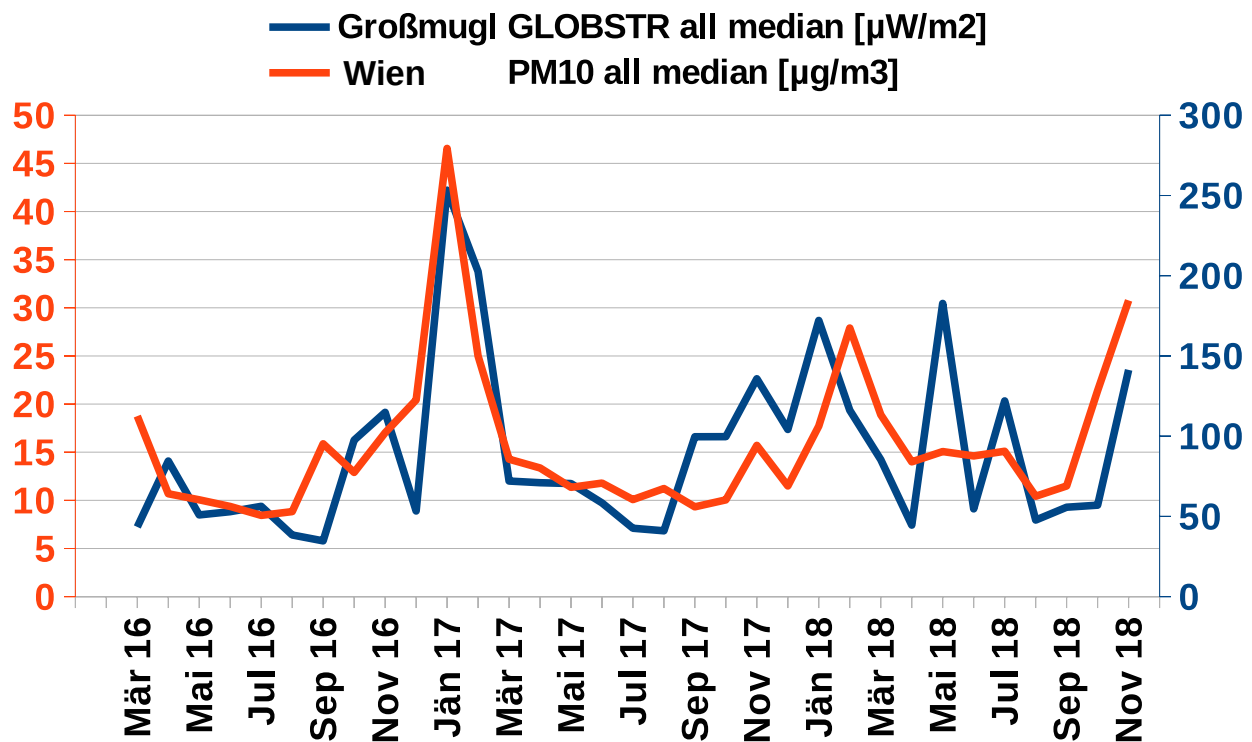


Abb. B17: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM10-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

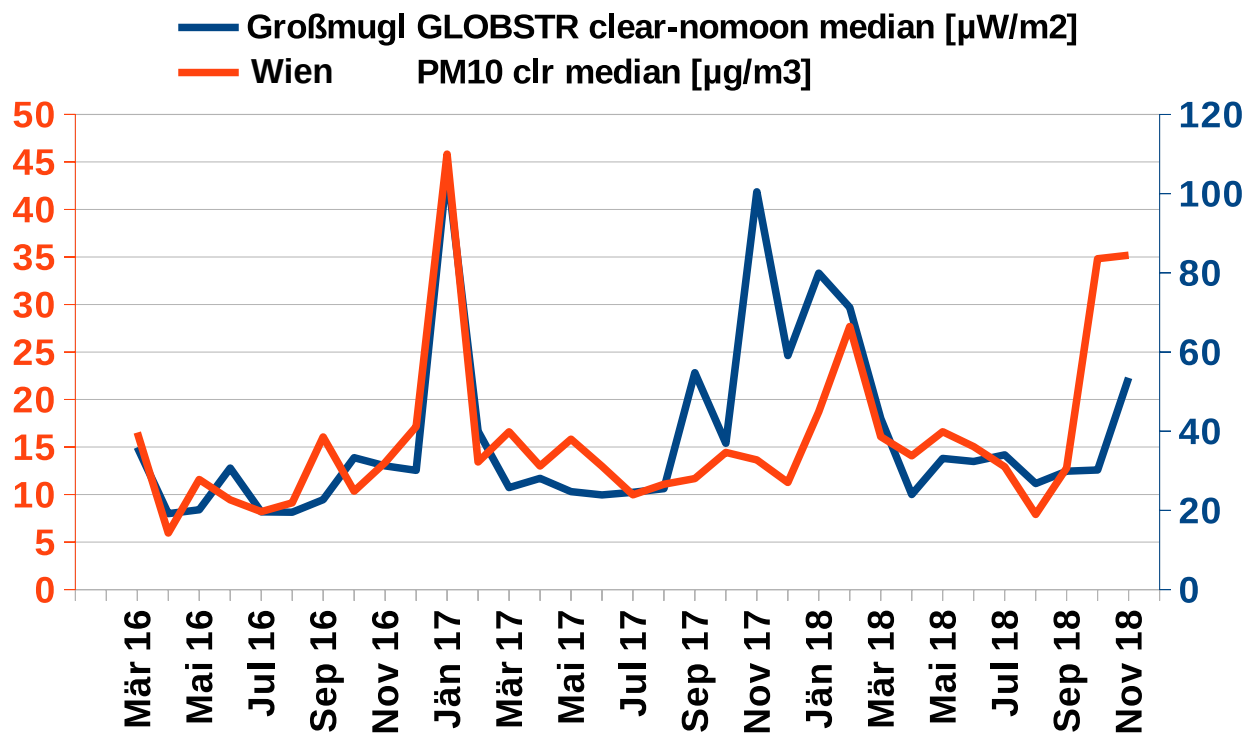


Abb. B18: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM10-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

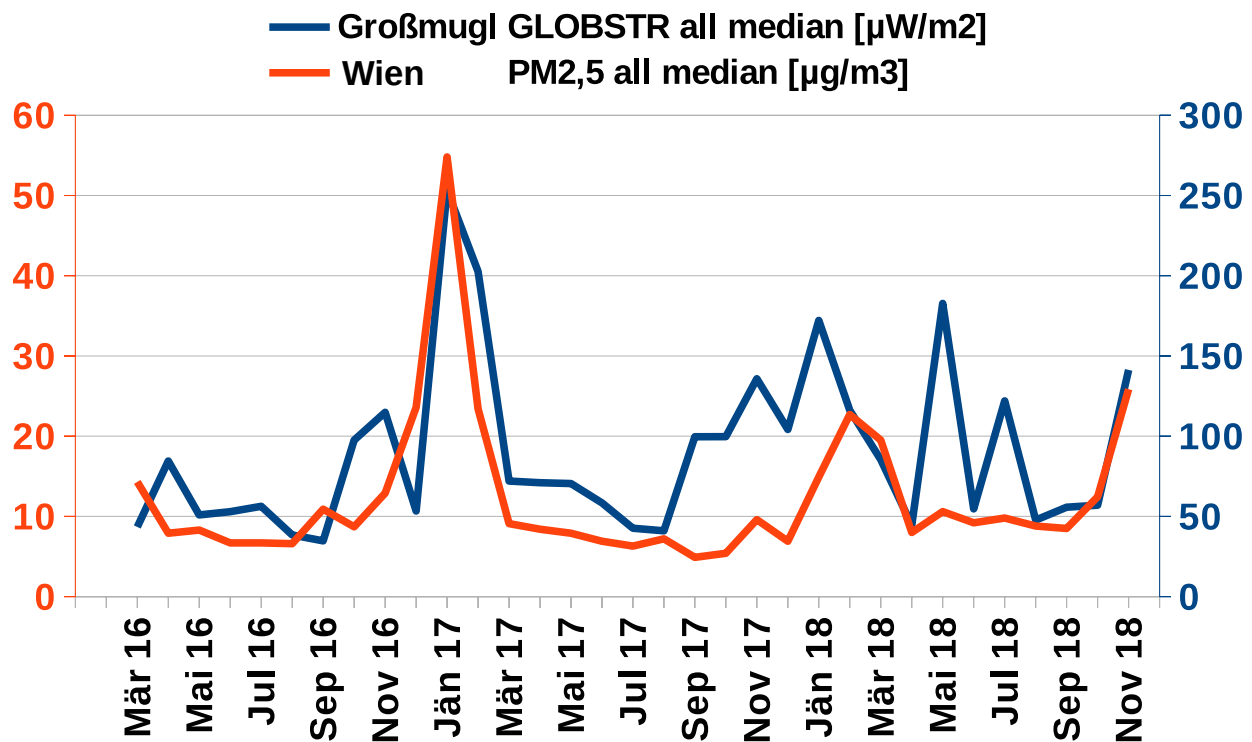


Abb. B19: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM2,5-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

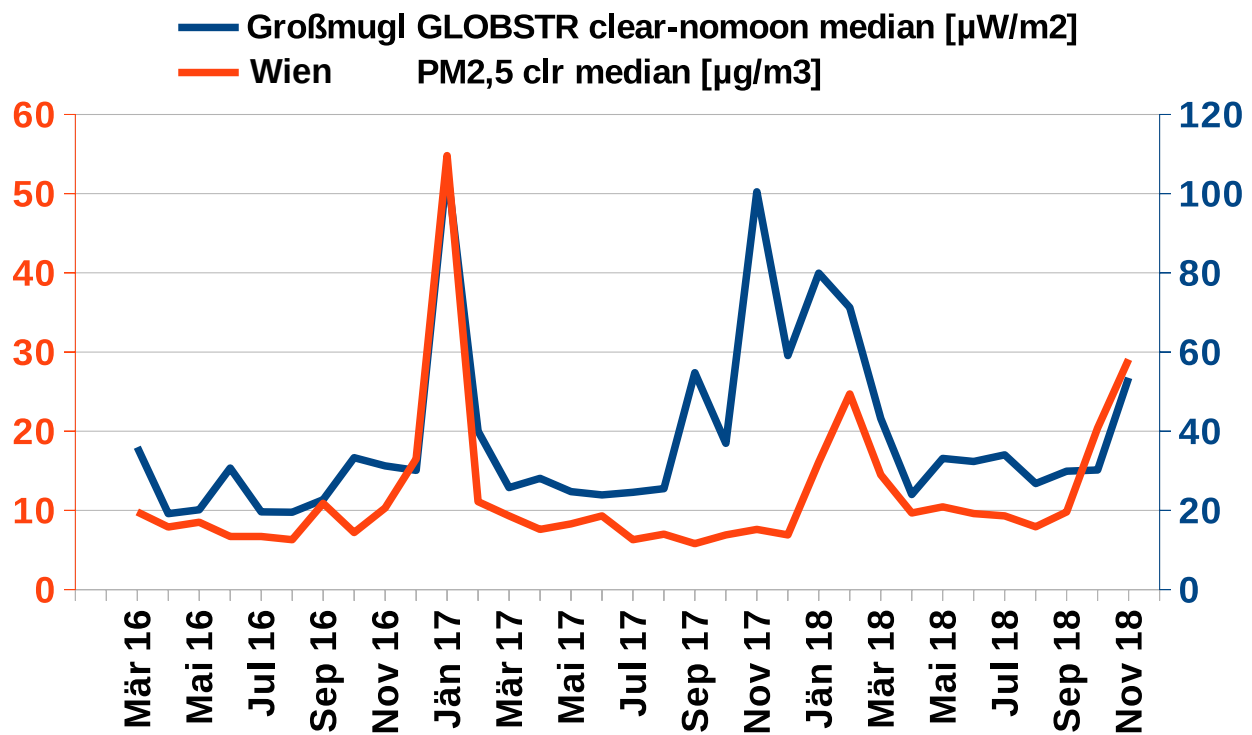


Abb. B20: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM2,5-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

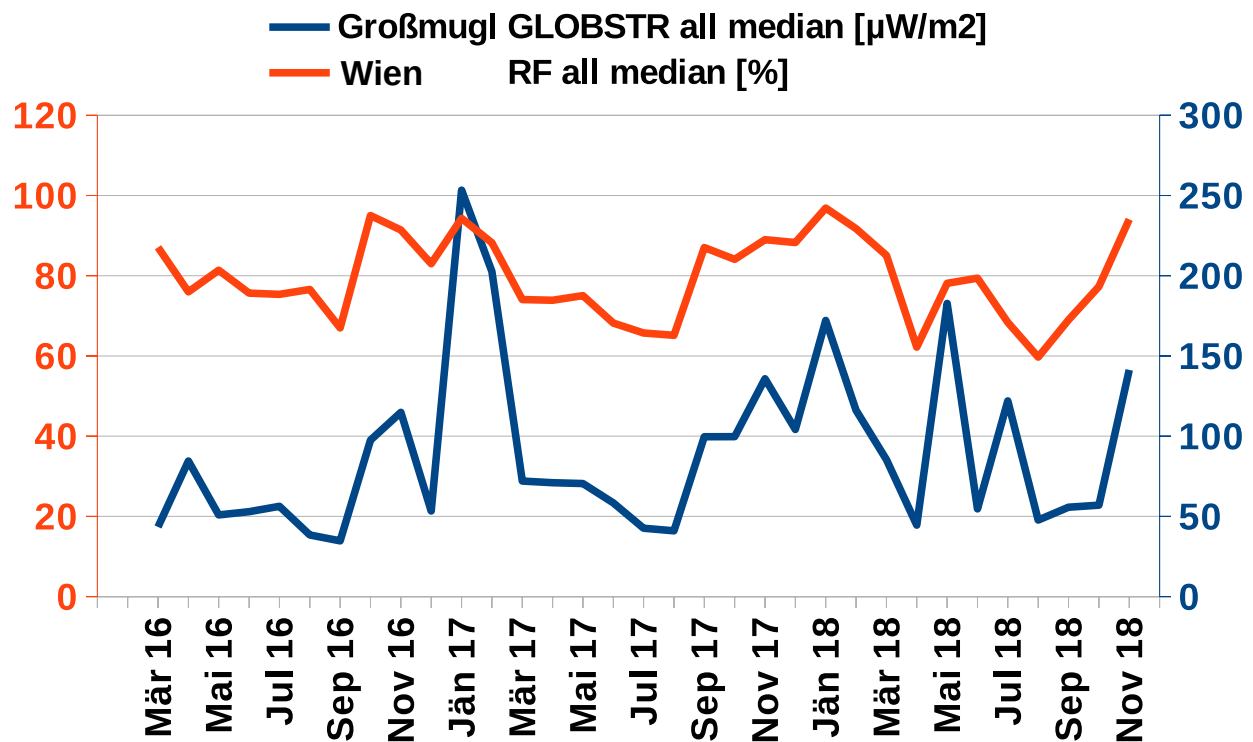


Abb. B21: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

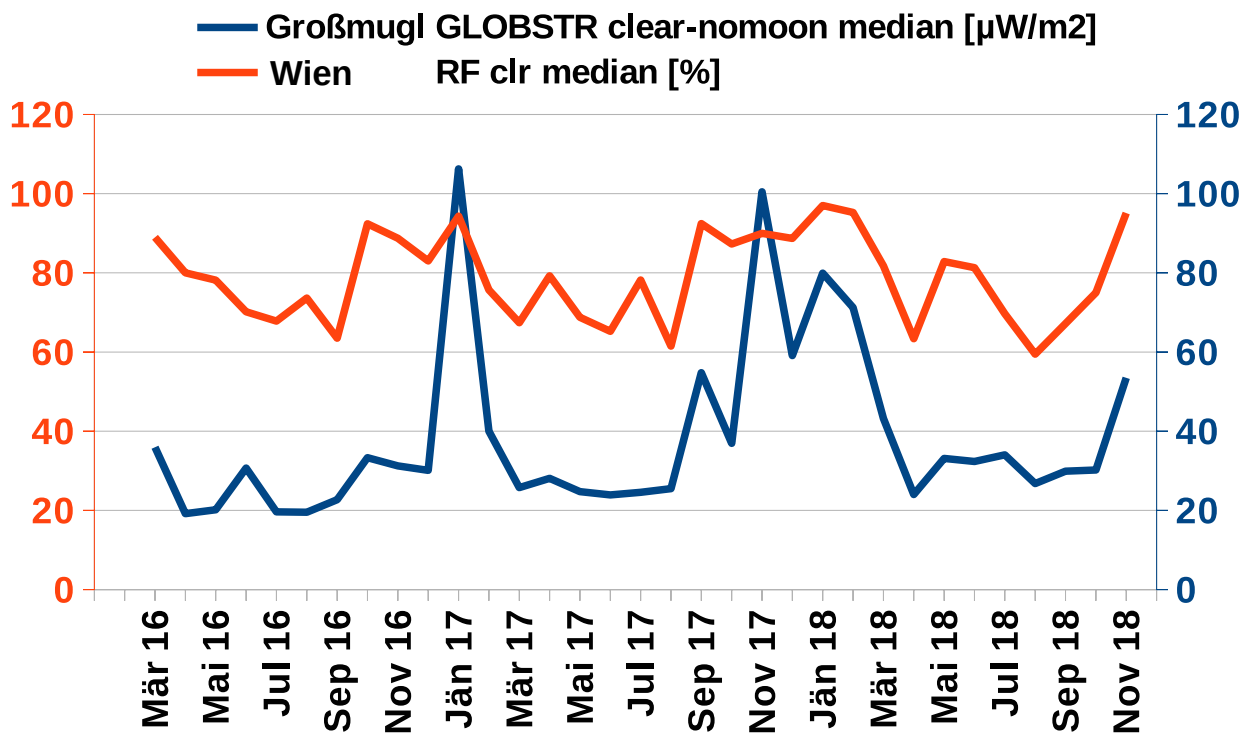


Abb. B22: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

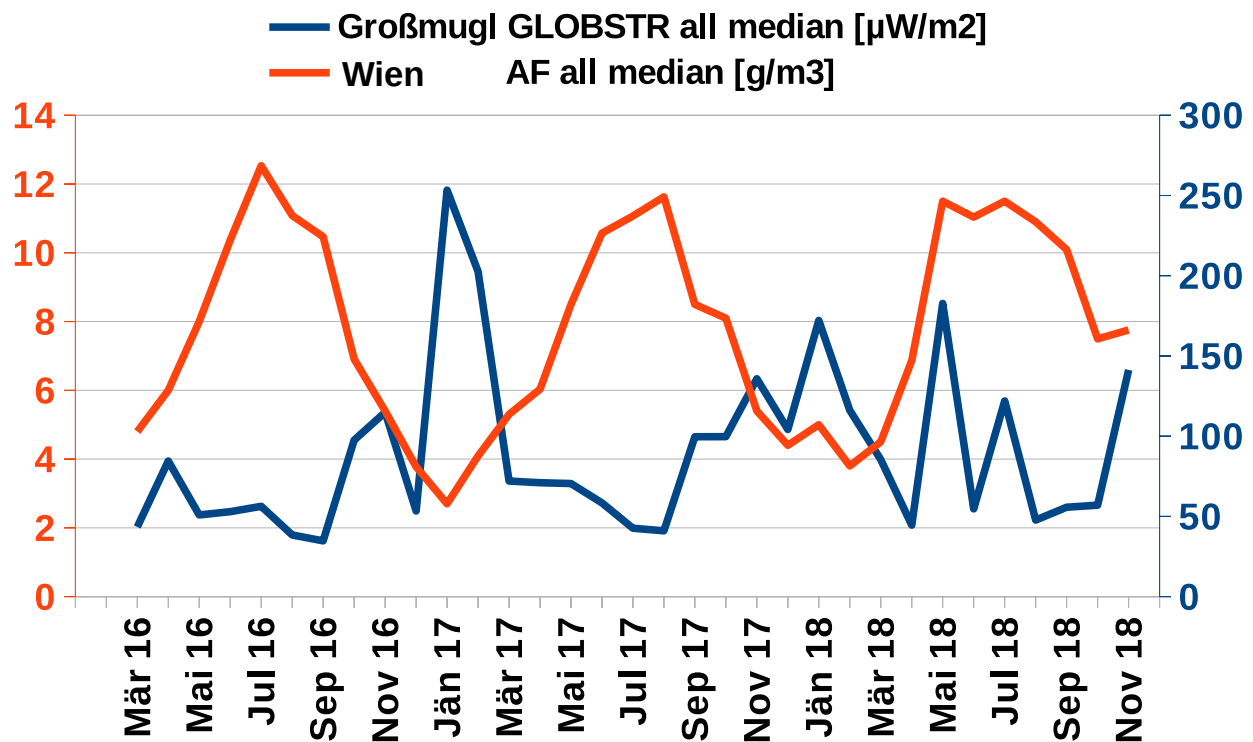


Abb. B23: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

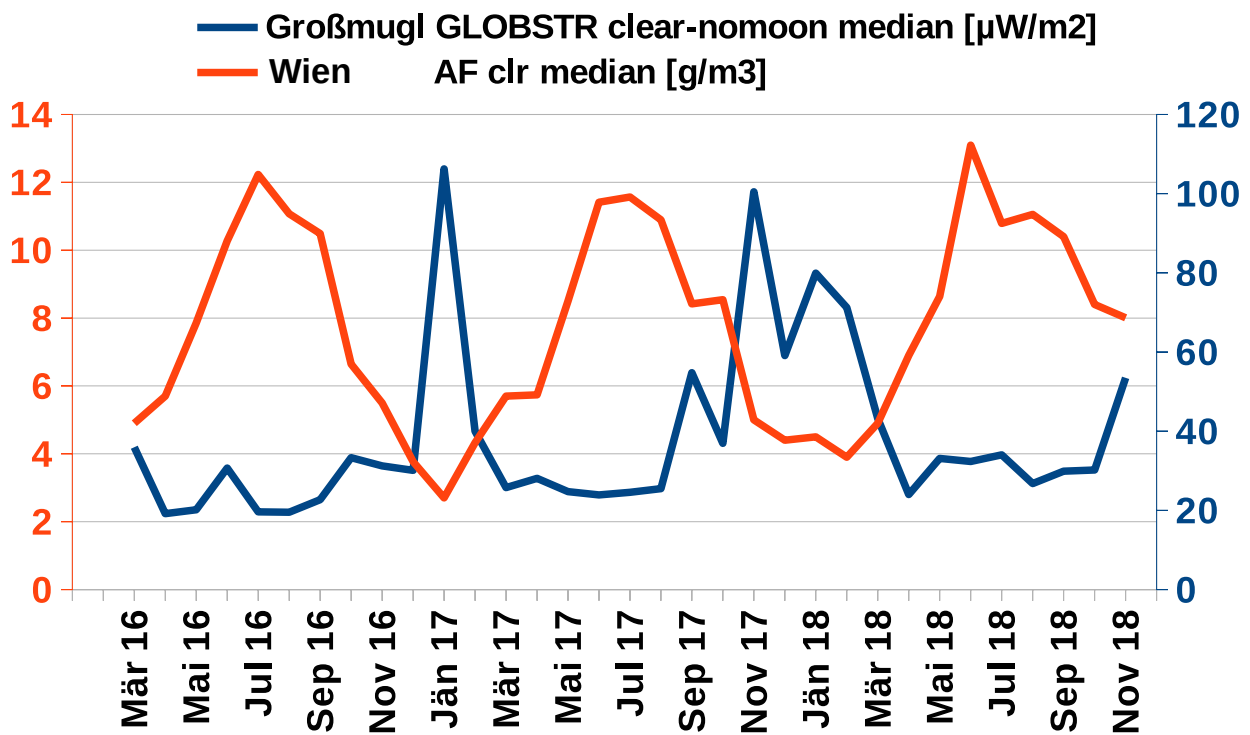


Abb. B24: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

ANHANG C

DARSTELLUNG DER KORRELATIONEN

Die folgenden Diagramme stellen die Korrelation der Mediane der Umweltwerte PM10, PM2,5 sowie relative und absolute Luftfeuchtigkeit mit den natürlichen Logarithmen der Mediane der gemessenen Globalstrahlungen der Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl dar. Ablesbar sind auch die Gleichungen der im Diagramm sichtbar gemachten Regressionsgeraden und die jeweiligen Bestimmtheitsmaße R^2 (passend zu den in der Legende verwendeten Farben). Aufgrund des hohen Dynamikumfangs der dargestellten Daten ist die Globalstrahlung (x-Achse) logarithmisch dargestellt und daher auch die Geradengleichung für den natürlichen Logarithmus der Globalstrahlung versus dem entsprechenden Luftgütwert angegeben.

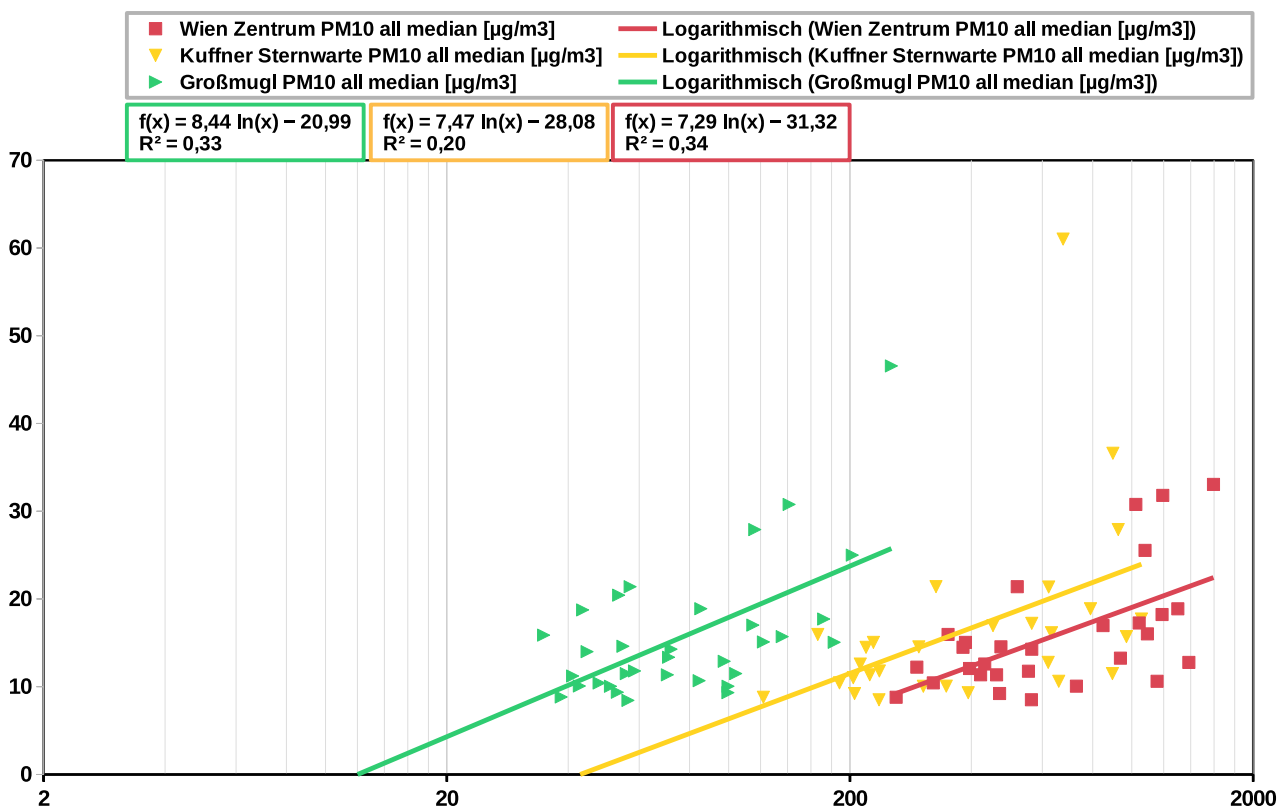


Abb. C1: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der PM10-Konzentration in Wien 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

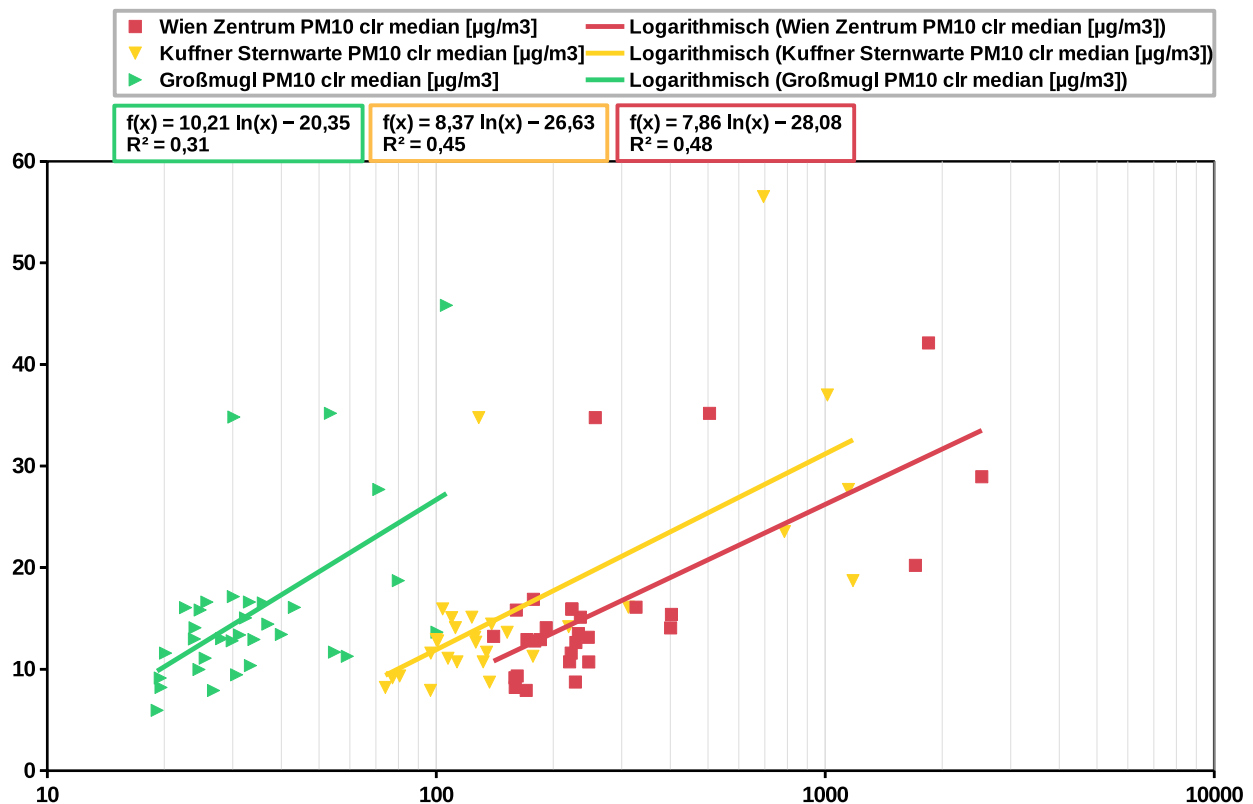


Abb. C2: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der PM10-Konzentration in Wien 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

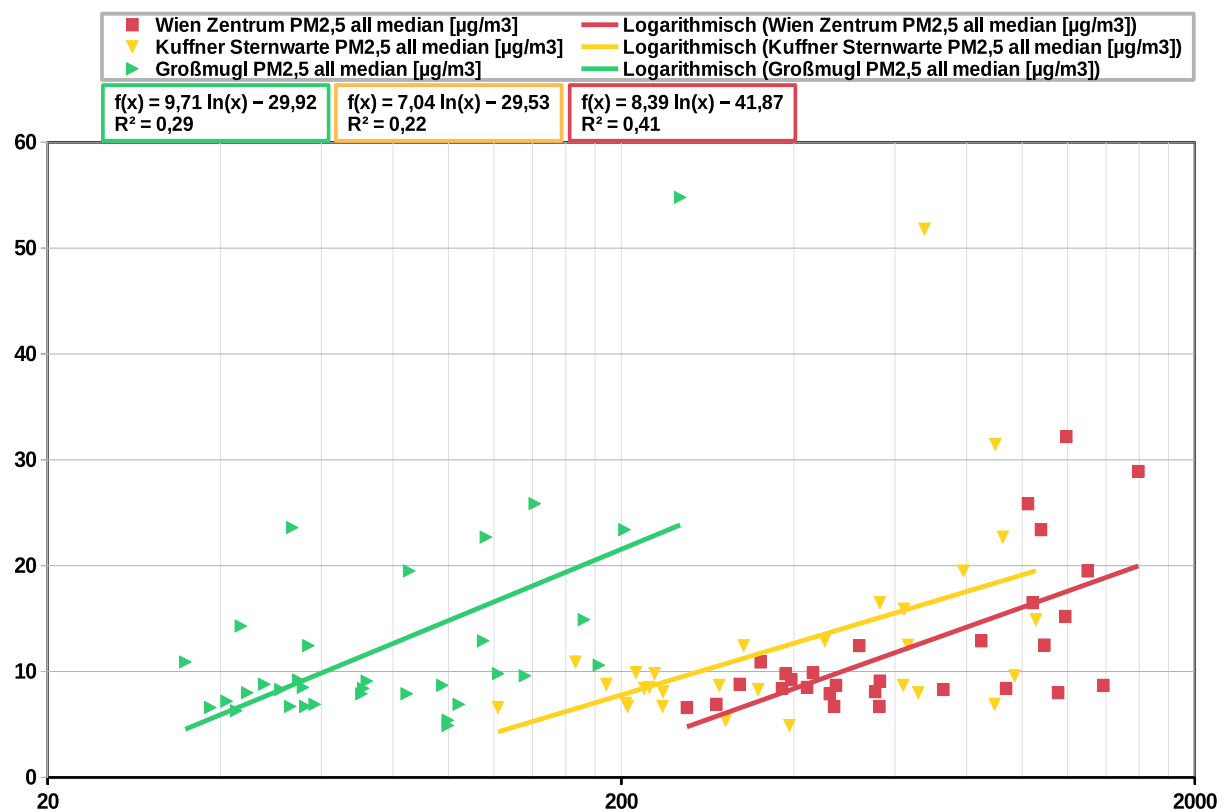


Abb. C3: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der PM2,5-Konzentration in Wien 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

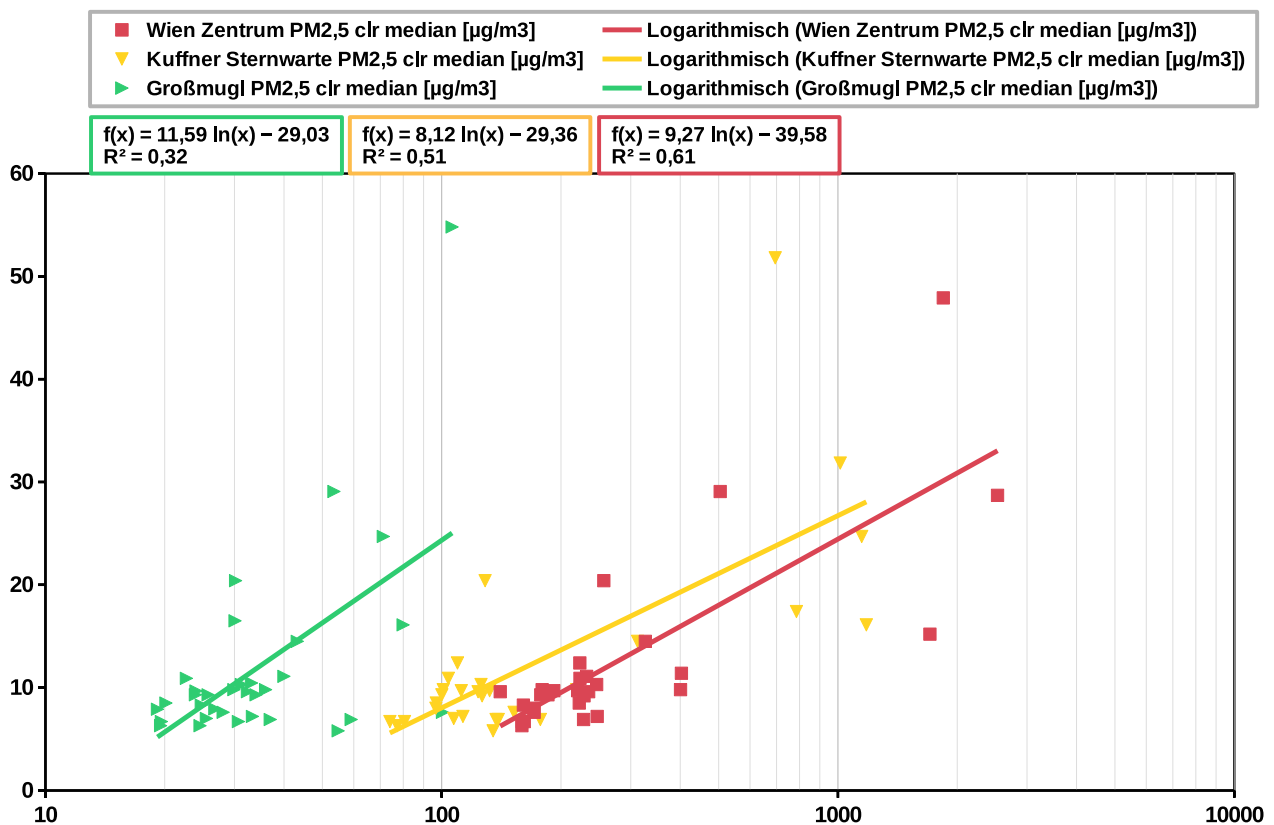


Abb. C4: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der PM2,5-Konzentration in Wien 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

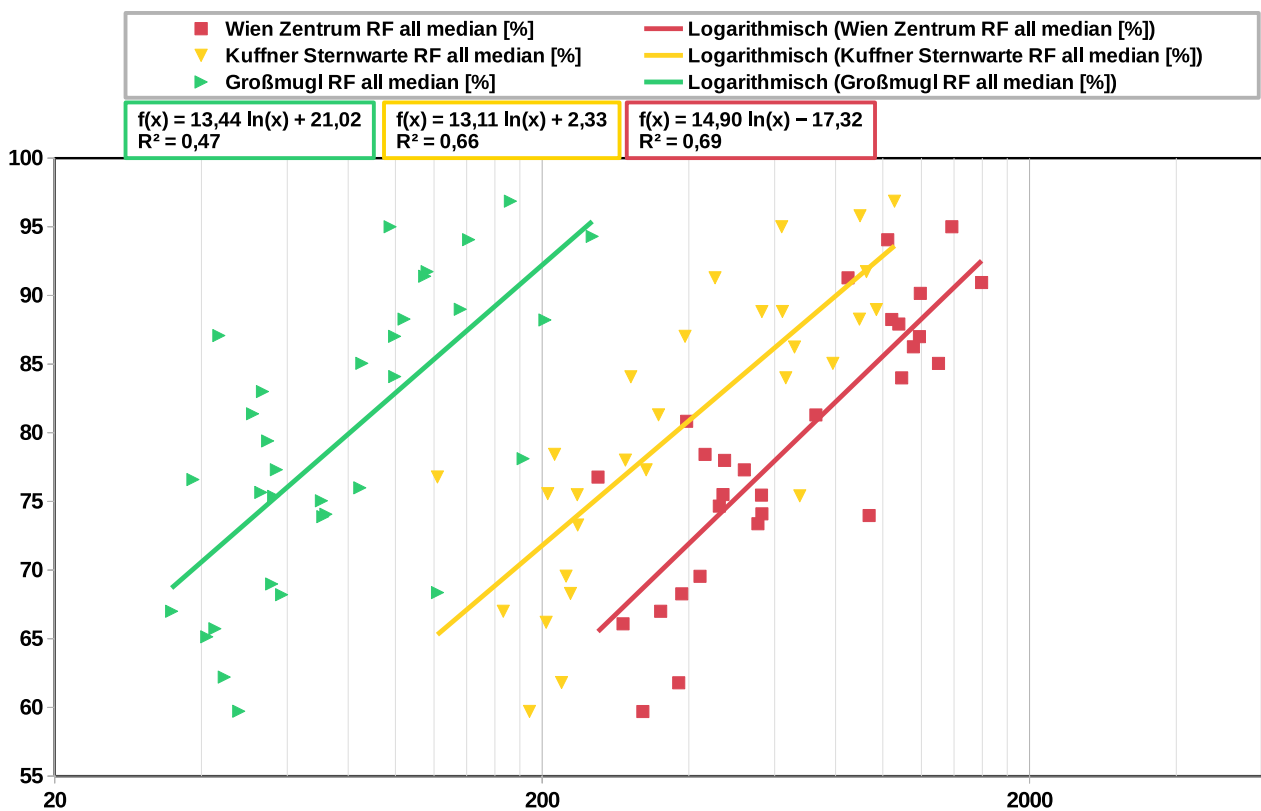


Abb. C5: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

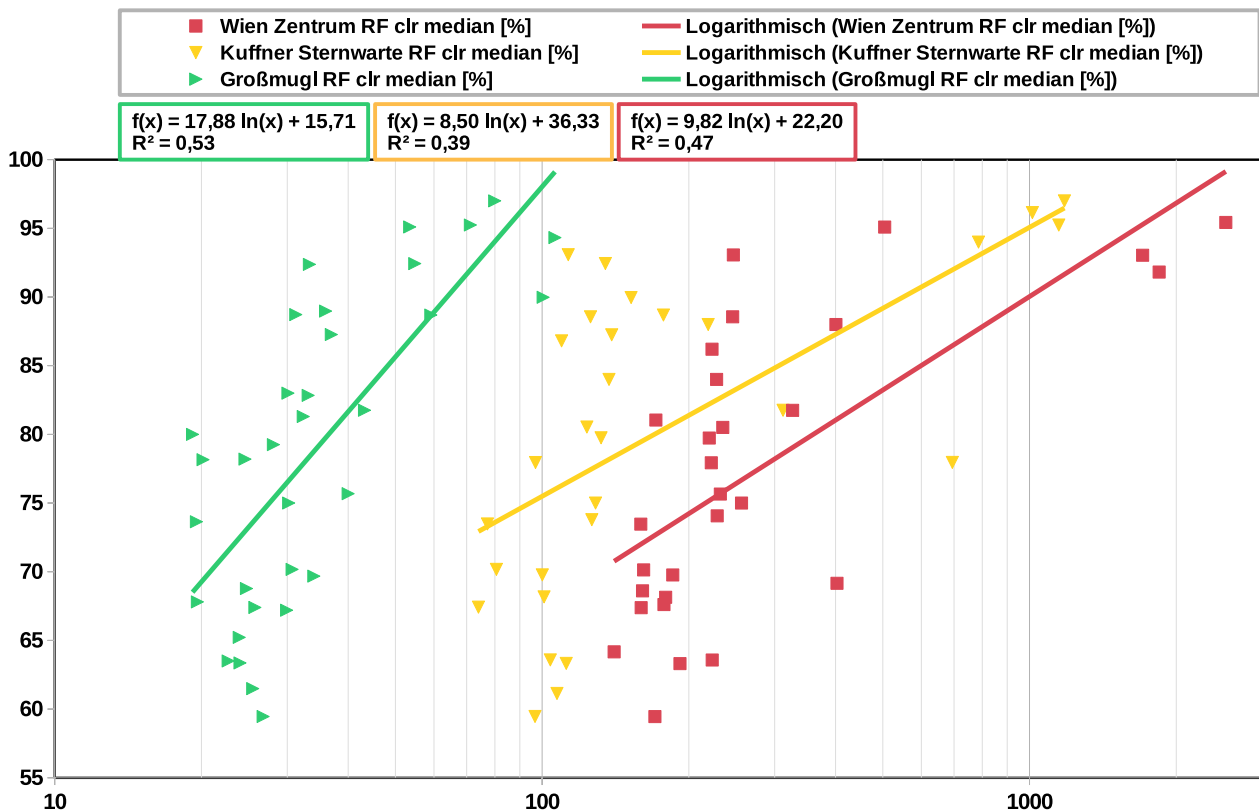


Abb. C6: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in $[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.

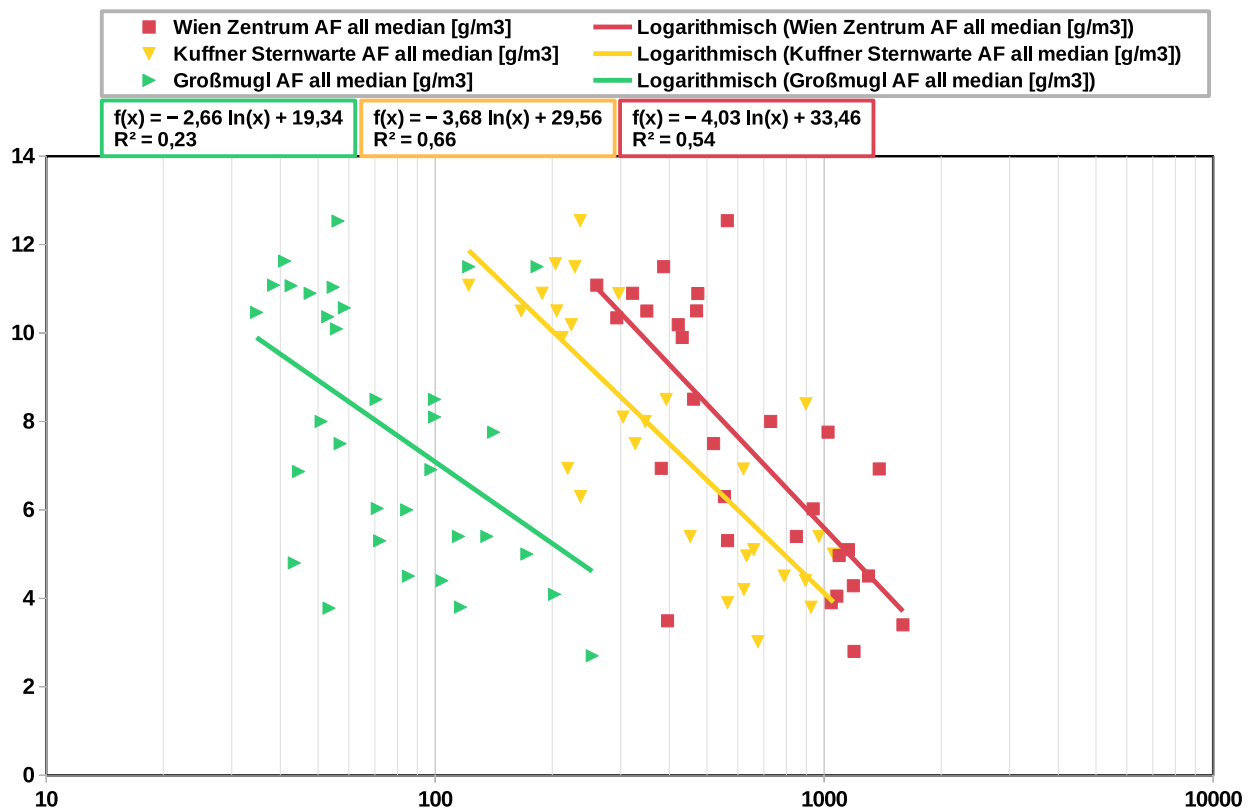


Abb. C7: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in $[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien 2016, 2017 und 2018. Mediane aller Nächte.

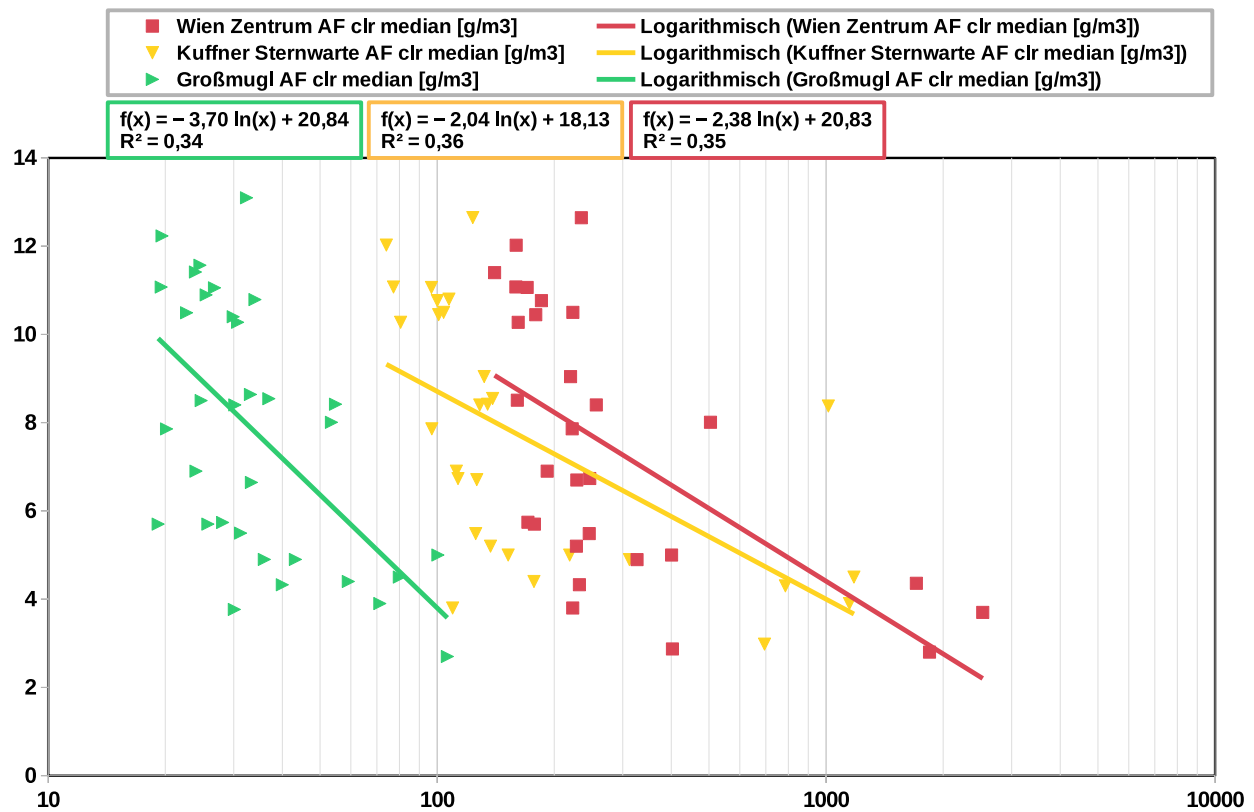


Abb. C8: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien 2016, 2017 und 2018. Mediane klarer mondloser Nächte.