

Licht über Wien VII

Lichtgehalt der Nacht über Wien von 2009 bis 2019
Energiegehalt des Kunstlichthalos über Wien
Relationen von nächtlichem Lichtgehalt und Luftgütedaten
Normierung von Lichtmessungen mit Luftgütedaten

Dr. Günther Wuchterl, Markus Reithofer (Verein Kuffner-Sternwarte)

Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22

Wien, April 2020

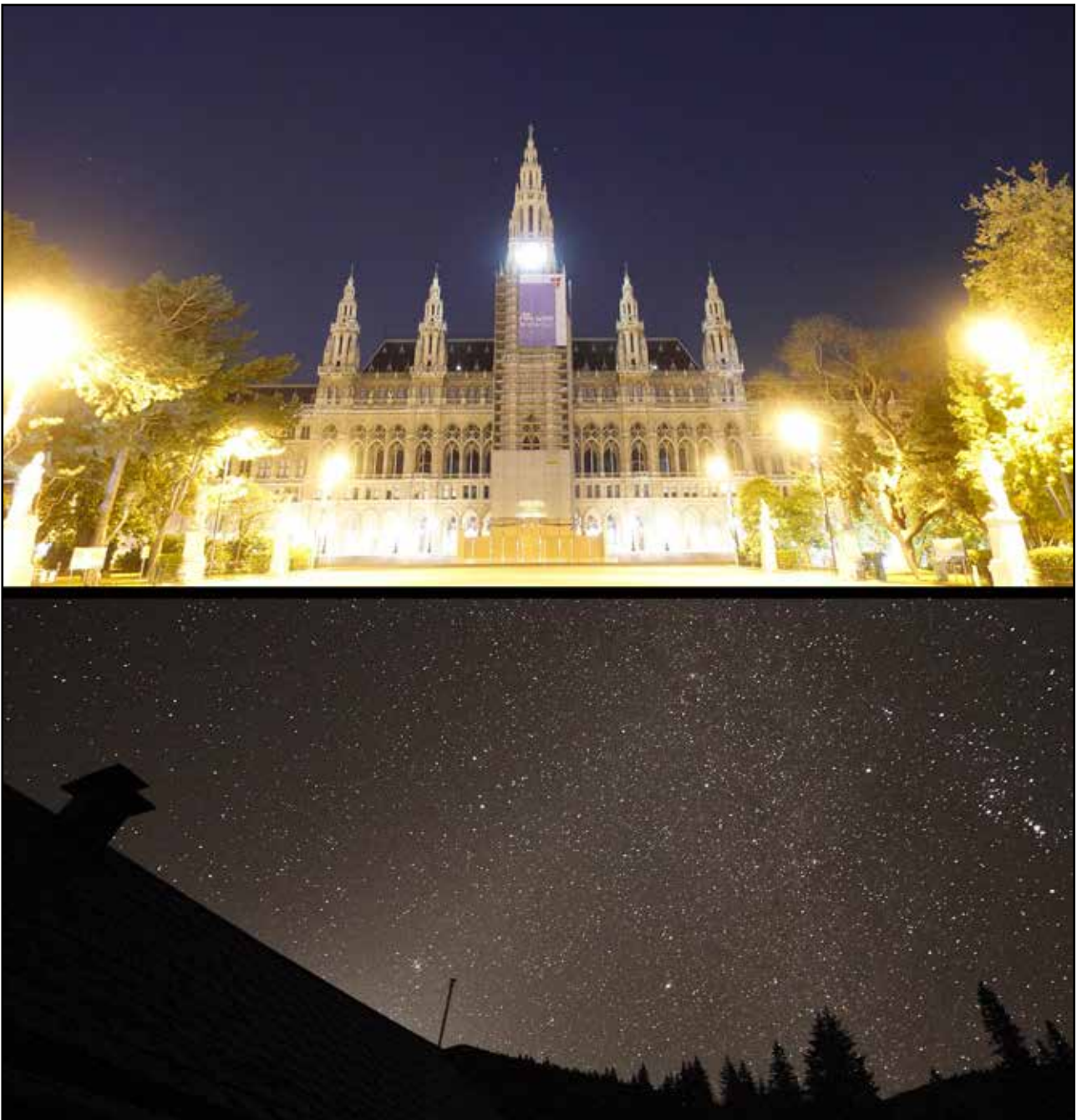


Abb. 1. Das Wiener Rathaus (oben) im April 2020. Das Foto dokumentiert die frühere Abschaltung der Fassadenanstrahlung infolge der Corona-Maßnahmen. Dadurch sind im Hintergrund sogar Sterne zu erahnen. Das Bild darunter zeigt einen Nachthimmel ohne Lichtverschmutzung über dem UNESCO-Welterbe und Wildnisgebiet Dürrenstein/Niederösterreich.

INHALT

1. Licht über Wien 2009-2019: Auf einen Blick	3
2. Grundlagen	4
3. Einführung	4
4. Wiener Licht-Messnetz	5
4.1 Licht-Messinstrumente	5
4.2 Kalibration	6
4.2.1 Wien Zentrum: Starke künstliche Beleuchtung erschwert die Kalibration	6
4.3 Standorte der Licht-Messinstrumente	9
5. Neue Entwicklungen	9
5.1 Leuchtentausch durch die MA 33	9
5.2 Zeitliche Überdeckung und Frequenz der Einzelmessungen	9
5.3 Zusammenführung aller verfügbaren Globalstrahlungs-Daten von 2009 bis 2019	10
6. Energieinhalt, CO ₂ -Äquivalent und Ausdehnung der Wiener „Lichtglocke“	12
6.1 Ausdehnung	12
6.2 Ergebnisse	16
7. Globalstrahlung des Wiener Nachthimmels 2009 bis 2019	16
8. Korrelationen mit Luftgütedaten der MA 22, 2009 bis 2019	18
8.1 Grundlagen	18
8.2 Untersuchte Luftgütedaten	18
8.3 Normierung auf standardisierte Luftgüte	19
8.4 Ergebnisse der Korrelationsprüfungen	20
9. Zusammenfassung der Ergebnisse	21
9.1 Trends und Schwankungen der Entwicklung der Globalstrahlung	21
10. Ausblick	23
10.1 Physikalische Korrekturen: Nichtlokale Luftgüte und Transparenz	23
10.2 Präzisierung der Analyse: Von Monatsmedianen zu Tages-, Wochen- und Stundenwerten	24
10.3 Vollständigere Darstellung des Kunstlichthalos	24
10.4 Gemeinsame Stationen Luftmessnetz und Lichtmessnetz	25
10.5 Vom Trend zum Entwicklungstyp – Nachweis der Lichtwende	25
Glossar: Definition der in den Diagrammen und Tabellen verwendeten Begriffe	26
Anhang A: Verlauf der Monatsmediane der Globalstrahlungen bei Normierung mit je einem Luftgütefaktor	27
Anhang B: Darstellung der Korrelationen von Globalstrahlung und Luftgütedaten	40
Anhang C: Zeitlicher Verlauf von Globalstrahlung und Luftgütedaten	49

DIE ENERGIE IM KUNSTLICHTHALO ÜBER WIEN ENTSPRICHT DEM ELEKTRIZITÄTSVERBRAUCH VON **100.000 HAUSHALTEN**

1. Auf einen Blick

Die Helligkeit des Wiener Nachthimmels hat sich stabilisiert. 2019 ist das zweite Jahr in Folge, in dem die Energie des Lichts über Wien um weniger als 5 % zugenommen hat. Die Menge des künstlichen Lichts über Wien hat sich nach dem steilem Anstieg der Jahre 2009 bis 2014 auf hohem Niveau eingependelt..

Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen Licht- und Luftverschmutzung. Über 10 Jahre bestehende Korrelationen von Lichtimmissions- und Luftgüteindikatoren bestätigen dies. Auf dieser Erkenntnis beruht eine auf standardisierte Luftgüte-Bedingungen normierte Angabe der Globalstrahlung, mit der direkter auf die von der Stadt eingebrachten Lichtmenge geschlossen werden kann.

Der Kunstlichthalo über Wien wurde mit einer neuen Methode vollständig berechnet und enthält demnach deutlich mehr Energie als bisher angenommen. 500 Gigawattstunden und 100.000 Tonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr müssen als typischer Wert für eine Untergrenze angenommen werden.

- Zuwachs der Globalstrahlung ist abgeflacht und könnte gestoppt sein
- Kunstlichthalo über Wien enthält mindestens 500 Gigawattstunden (100.000 Haushalte) und 100.000 Tonnen CO₂-Äquivalent
- Energiepreis-Äquivalent des Wiener Kunstlichthalos beträgt mindestens 100 Millionen Euro (bei 0,2 Euro/kWh)
- Helligkeitsschwankungen sind mit Normierung auf Luftgütefaktoren besser analysierbar

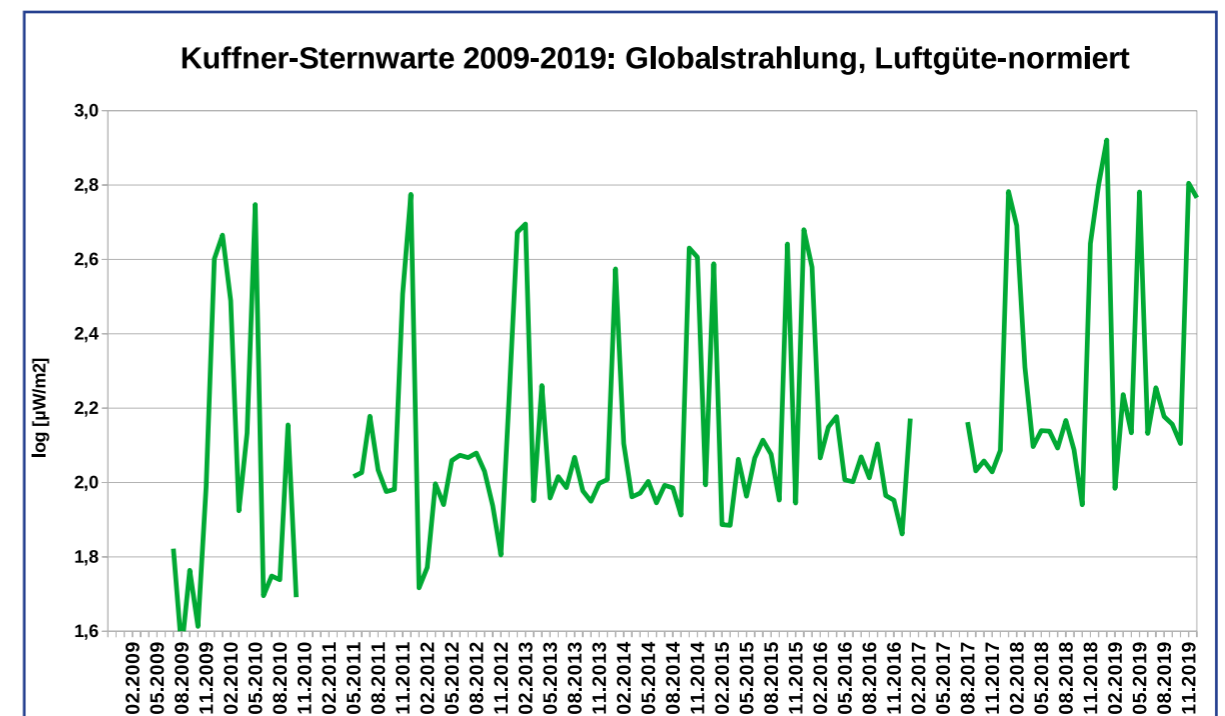


Abb. 2: Dekadischer Logarithmus der Monatsmediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte an der Lichtmessstation Kuffner-Sternwarte nach der Normierung auf vier Luftgütefaktoren.

2. Grundlagen

Anlass für Untersuchungen dieser als Lichtverschmutzung bezeichneten Umweltbelastung sind die für Beleuchtung aufgewendete Energie und die mit ihr verbundenen CO₂-Äquivalente.

Energieverschwendung ist nur eine der umfassenden Auswirkungen von Lichtverschmutzung. Nachgewiesen sind negative Effekte auf die Chronobiologie von Menschen und auf das Verhalten von zahlreichen Tierarten.

Eine detaillierte Untersuchung der von Wien ausgehenden Lichtverschmutzung ist nicht nur für die Stadt selbst von Bedeutung, sondern kann weltweit als exemplarisch für vergleichbare Großstädte betrachtet werden. Aktuell findet eine grundlegende Umrüstung der Beleuchtungstechnologie auf LED-Leuchtmittel statt, wodurch sich das nächtliche Erscheinungsbild und die Lichtimmissionen von Städten erstmals seit vielen Jahrzehnten fundamental verändern. Der wesentliche Anteil der mit dieser Umrüstung verbundenen Erhöhung der blauen Anteile des Beleuchtungsspektrums kann nur mit entsprechenden Sensoren vom Boden aus erfasst werden.

3. Einführung

Die vom Boden aus gemessene nächtliche Globalstrahlung über Wien unterliegt starken lokalen und zeitlichen Schwankungen. In Abhängigkeit vom Aufstellungsort des Messgeräts und dem Zeitpunkt der Messung sind innerhalb des Wirkungsbereichs der von Wien ausgehenden Lichtverschmutzung Unterschiede von mehreren Zehnerpotenzen möglich – und dies im Verlauf von nur einer Nacht.

Faktoren wie die Bevölkerungsdichte und die damit einhergehende Häufigkeit von beleuchteten Straßen, Plätzen, Gebäudefassaden und Schaufenstern, definieren in diesem Zusammenhang die lokalen Einflüsse. Tendenziell nimmt die Nachthimmelshelligkeit vom Zentrum zum Rand einer Stadt ab, wobei sich starke Asymmetrien beispielsweise durch außen liegende Industrie- und Siedlungsgebiete zeigen können.

Die an einem bestimmten Ort messbare Nachthimmelshelligkeit variiert mit der vom Boden abgestrahlten Lichtmenge, dem Streu- und Reflexionsverhalten sowie der Menge der darüber befindlichen Substanzen (Luft, Wolken, Luftfeuchtigkeit, Aerosole...). Wird beispielsweise die öffentliche Beleuchtung während den

Nachtstunden schrittweise reduziert, also die Lichtstärke eines Teils der Straßenbeleuchtung verringert, dann wird auch der darüber angestrahlte Bereich mit streuenden und reflektierenden Substanzen („der Himmel“) mit weniger Licht versorgt. Ein Zu- und Abschalten von Lichtquellen geschieht jedoch über die gesamte Nacht hindurch auch im privaten (Innenräume, Nachtruhe) und kommerziellen (Geschäftsschluss, zeitliche Begrenzung von Beleuchtung) Bereich. Über lange Zeiträume (Jahre) sind auch bauliche Veränderungen, beispielsweise durch den Neubau von Gebäuden und beleuchteten Parkplätzen sowie den Austausch von Beleuchtungsquellen entscheidende Faktoren für Änderungen der lokal gemessenen Nachthimmelshelligkeit. Der Ort der Messung ist daher von besonderer Bedeutung, wenn er für seine weitere Umgebung charakteristisch sein soll.

Zeitliche Veränderungen der am Boden gemessenen Globalstrahlung finden kurz-, mittel- und langfristig statt. Neben den erwähnten Änderungen durch Zu- und Abschaltung von Beleuchtung ist der zum Zeitpunkt der Messung vorliegende Zustand der über der Messstation befindlichen Luft (Wolken, Aerosole, etc.) von entscheidender Bedeutung. Bei bewölktem Himmel kehrt ein wesentlich größerer Anteil des nach oben gestrahlten Lichts zurück, als bei sternklarem Wetter. Auch die Luftfeuchtigkeit und die in der Atmosphäre enthaltenen Aerosole erhöhen die Rückstreuung und damit die am Boden messbare Nachthimmelshelligkeit in erheblichem Ausmaß (siehe Kapitel 8). Auch astronomische Phänomene beeinflussen die Nachthimmelshelligkeit. In der hier relevanten Größenordnung müssen jedoch lediglich die Sonne und der Mond berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Studie werden zwei nach wohldefinierten Kriterien ausgewählte Stichproben der insgesamt aufgezeichneten Daten präsentiert: Der Datensatz „alle Nächte“ enthält sämtliche Messwerte, bei denen die Sonne mindestens 18° unterhalb des Horizonts stand (Grenze der astronomischen Dämmerung). Das Licht des Mondes und allfällige Bewölkung bleiben in diesen Daten als beeinflussende Faktoren erhalten. Der Datensatz „klare mondlose Nächte“ beinhaltet ausschließlich Daten, bei denen zusätzlich der Mond mindestens 4° unter dem Horizont stand und daher keinen messbaren Einfluss auf die Nachthimmelshelligkeit hatte. Darüber hinaus wurde Bewölkung mithilfe eines aus den Lichtmessungen simultan direkt ermittelten Indikators (siehe Glossar) erfasst und nur solche Messungen



Abb. 3: Blick Richtung Wien in einer bewölkten Nacht. Der Himmel ist in solchen Situationen wesentlich heller als in klaren mondlosen Nächten.

verwendet, bei denen wir einen wolkenlosen Himmel bestimmen. Die Nächte sind in derartigen Situationen erheblich dunkler und der Median der Messwerte dieses Datensatzes daher kleiner als der Median aller Nächte. Mit dem Ausschluss der Bewölkung werden die mutmaßlich optisch stabilsten Atmosphärenzustände ausgewählt. Sie sollen die beste Vergleichbarkeit und die einfachsten Analysemöglichkeiten bieten. Die Größe der Stichprobe ist bei klaren mondlosen Nächten naturgemäß kleiner als bei der Verwendung aller Nächte.

Aus astronomischer Sicht sollte der zeitliche Verlauf klarer mondloser Nächte direkt den Veränderungen der Beleuchtungssituation am Boden entsprechen. Die kurz- und langfristigen Schwankungen in diesem Datensatz zeigen jedoch klare Hinweise, dass sie von zusätzlichen Effekten beeinflusst werden. Insbesondere gemessene Globalstrahlungs-Variationen, die den Jahreszeiten folgen und sich regelmäßig wiederholen, stoßen diese Vermutung an.

Darauf basierend werden in dieser Studie Korrelationen der Variation der Globalstrahlung bei klaren mondlosen Nächten mit Messwerten der Luftfeuchtigkeit und anderen Luftgütefaktoren untersucht. Durch das Anbringen entsprechender Korrekturen kann die Größe der Globalstrahlungs-Schwankungen signifikant reduziert werden.

Auch ohne den Einfluss von Wetter und Aerosolen unterliegt die Helligkeit des Wiener Nachthimmels noch starken Schwankungen. Die einfach anmutende Frage „Wie hell ist der Himmel über Wien“ kann präzise daher nur in Bezug auf eine bestimmte Messstation und einen bestimmten Zeitraum beantwortet werden. Will man daraus auf Veränderungen der von Wien ausgehenden Aufhellung des Nachthimmels



Abb. 4: Blick Richtung Wien in einer klaren mondlosen Nacht. Der Himmel ist dunkler als in bewölkten Nächten und es sind Sterne erkennbar.

schließen, müssen Langzeittrends untersucht werden. Auch innerhalb der darin enthaltenen Schwankungen ist dann erkennbar, ob und wie stark das Gesamtniveau über einen gewissen Zeitraum zu- oder abnimmt.

4. Wiener Licht-Messnetz

4.1 Licht-Messinstrumente

Für alle Messungen dieser Studie wurden Lightmeter der Firma k2wlights des Bautyps Mark 2.3l eingesetzt. Dieses für die präzise und hochfrequente (1 Hz) 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 wurde aufgrund seiner herausragenden Qualität unter anderem



Abb. 5: Sensor eines für die Lichtmessungen verwendeten Lightmeters. Die Sensorfläche beträgt rund 50 cm².

DIE LICHTVERSCHMUTZUNG DURCH ÖFFENTLICHE BELEUCHTUNG WURDE 2019 ERHEBLICH REDUZIERT

von der Europäischen Südsternwarte (ESO) für das Site-Testing der leistungsfähigsten Teleskope der Welt eingesetzt.

Um nicht nur die Entwicklung der Nachthimmels-helligkeit innerhalb der Stadtgrenzen Wiens, sondern auch die weit darüber hinaus reichende Ausdehnung der Lichtglocke zu quantifizieren, wurden ausgehend vom Stadtzentrum bis zu einer Entfernung von mehr als 100 km Lightmeter auf topographisch günstig gelegenen (keine Abschattungs- oder Störlichteffekte) Dächern von Häusern sowie auf Berghütten (Wildnis-gebiet Dürrenstein und Hochbärneck) montiert. Diese Instrumente messen die Globalstrahlung mit einer Frequenz von 1 Hz, wodurch jedes Lightmeter pro Jahr mehr als 31 Millionen Einzelmessungen durchführen kann.

Das Lightmeter ist zudem mit einem Temperatursensor ausgestattet. Eine Verfälschung von Messwerten infolge Vereisung oder Schneebedeckung des Lichtsensors kann dadurch bei der Datenauswertung über die Eliminierung aller Messwerte unterhalb einer bestimmten Temperatur vermieden werden. Aus Gründen der besseren Übersicht haben wir in diesem und den beiden vorangegangenen Lichtberichten auf diese „eisfreie“ Stichprobe verzichtet. Wir merken jedoch an, dass unsere Datenanalysen für die Winter der Jahre 2008, 2009, 2011, 2013, 2018 und 2019 am Stadtrand und außerhalb Wiens entsprechende Effekte vermuten lassen. Eine genauere Untersuchung der sich daraus ableitenden Folgen ist für die Wiener Lichtberichte der kommenden Jahre in Planung, sobald eine Datenbank mit sämtlichen Messdaten verfügbar ist.

4.2 Kalibration der Licht-Messinstrumente

Um zuverlässige Messwerte in SI-Einheiten und die Langzeitstabilität des Systems gegenüber Alterungs- und Verschmutzungseffekten zu gewährleisten, wird jedes Lightmeter direkt an seinem Einsatzort kalibriert. Die Kalibration erfolgt durch Anpassung eines Instrumentenmodells an die berechneten Globalstrahlungswerte für Sonne, Dämmerung und Mond an ausgewählten, wolkenlosen Tagen. Diese in der Astronomie übliche Vorgehensweise minimiert systematische Trends (etwa der Instrumentierung) und ermöglicht eine differenzielle Messung der stabilen Lichtquellen Sonne und Mond und der künstlichen Lichtquellen. Die Messwerte von Orten ohne (bzw. mit extrem geringer) Lichtverschmutzung liefern ein Maß für die Stabilität des Messsystems und Referenzwerte für den natürlichen Beitrag der Himmelsaufhellung. Der künstliche Beitrag kann über den Vergleich mit diesen Werten ermittelt werden. Diese Art der Kalibration ist zugleich ein Frühwarnsystem für Alterungseffekte des Lichtsensors, Veränderungen der umgebenden Vegetation und

den lokalen Bodenreflexionseigenschaften. Auf diese Weise wurden etwa die starken jahreszeitlichen Änderungen bestätigt, welche die Hauptmotivation für die Normierung auf bestimmte Luftgütwerte sind.

Diese Kalibrationen werden daher regelmäßig erneuert. So basieren auch die Globalstrahlungswerte für das Jahr 2019 auf den neuesten Kalibrationen von validiert wolkenlosen, zusammenhängenden Lichtwechseln ($10 \mu\text{W}/\text{m}^2$ bis $1 \text{ kW}/\text{m}^2$, entsprechend 1 mlx bis rund 100 000 lx) vom Ende der astronomischen Dämmerung bis über die wahren Mittag hinaus.

4.2.1 Wien Zentrum: Starke künstliche Beleuchtung erschwert die Kalibration

Aufgrund der sehr hohen Globalstrahlungswerte im Zentrum von Wien (Station ZENT) und den dort besonders häufigen Zu- und Abschaltungen von Beleuchtungen verschiedenster Herkunft (zusätzlich zu jenen der öffentlichen Beleuchtung) sind die Kalibrationen dieser Station außergewöhnlich aufwändig. Deshalb wurde für sie im Lichtbericht 2018 mit der Kalibration aus dem ersten bearbeiteten Jahr, 2016, gearbeitet. Das gilt auch für den Zwischenbericht des Jahres 2019.

Diese Vorgehensweise ist jedoch nicht für die komplette betrachtete Zeitspanne von 2011 bis 2019 möglich, da aus technischen Gründen die Hardware der Station mehrfach ausgetauscht werden musste. Dementsprechend sind für jedes Jahr bis zu drei neue Kalibrationen erforderlich, was jedoch die Entwicklung geeigneter Datenstrukturen in Kombination mit einer Datenbank voraussetzt – beides stand für diesen Lichtbericht jedoch nicht zur Verfügung. Erst damit wäre der Zugriff auf Stundenwerte und die Berücksichtigung von teilweisen Zu-/Abschaltvorgängen der Beleuchtung möglich und die angestrebte Kalibrationsgenauigkeit erzielbar. Es musste daher eine neue, notwendigerweise automatische Kalibrationsprozedur entwickelt werden, mit der eine durchgehende, wenn auch nur provisorische Kalibration über den gesamten Zeitraum durchgeführt wurde.

In den Jahren 2011 und 2013 waren außerdem manuelle Kalibrationen erforderlich. Stark lokale Licht-Phänomene (in unmittelbarer Nähe der Lichtmessstation) und erforderliche Änderungen an der Stations-Hardware machten dies notwendig. Diese kombinierte Kalibrationsstrategie zeichnet die Station ZENT gegenüber den anderen Messstationen aus. Dadurch kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass Änderungen der Lichtschaltpraxis (Zeiten, zu denen verschiedene Beleuchtungsquellen zu- und abgeschaltet werden) systematische Effekte in die langfristige Entwicklung der Globalstrahlung einbringen.

Als Ausblick ist eine Bearbeitung dieses Problems



Abb. 6: Blick auf den Wiener Kunstlichthalo von den Lichtmessstationen Kuffner-Sternwarte (oben), Großmugl (Mitte) und Dürrenstein (unten). Obwohl sich die Kuffner-Sternwarte bereits am westlichen Rand von Wien befindet, erhellt der Kunstlichthalo den gesamten Himmel. Bei Großmugl ist er nur mehr in einer Himmelsrichtung dominant und darüber zeigen sich bereits deutlich lichtschwächere Sterne. Am Dürrenstein in 111 Kilometern Entfernung vom Stadtzentrum ist er noch immer sichtbar (Bildmitte), stört den darüber liegenden Himmel aber nicht.

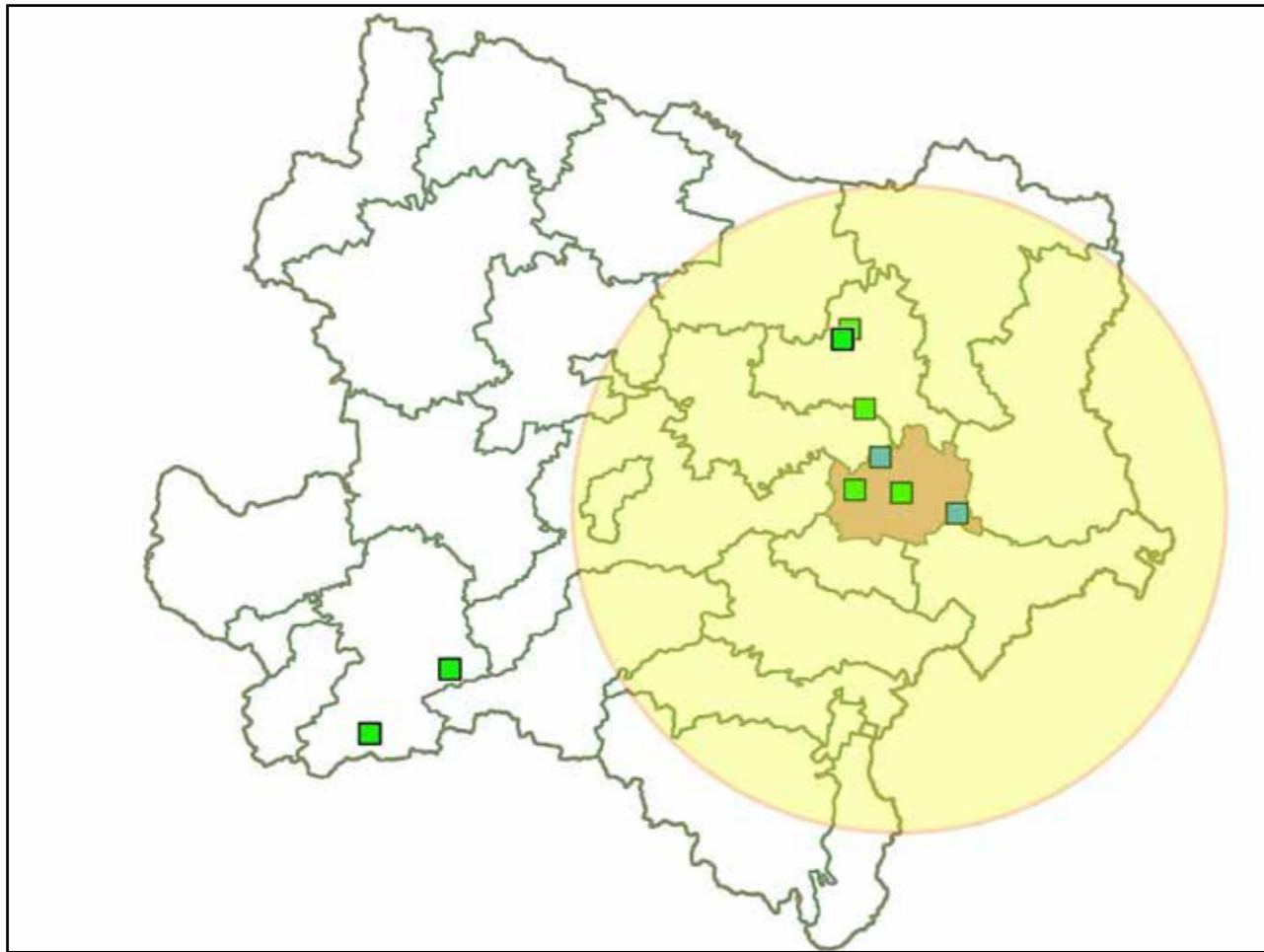


Abb. 7: Übersichtskarte der im Jahr 2019 Messwerte liefernden Lichtmessstationen des Verein Kuffner Sternwarte (grün) und der für den Vergleich mit den Umweltdaten genutzten Umweltmessstationen der MA 22 (blau). Die Ausdehnung des Kunstlichthalos ist gelb markiert.

Lichtmessstation	geogr. Breite	geogr. Länge	Höhe [m]	Abstand Zentrum [km]
Wien Zentrum	48° 12' 33,4" N	16° 22' 54,3" O	209	-
Naturhist. Museum	48° 12' 20,7" N	16° 21' 35,5" O	200	1,6
Kuffner Sternwarte	48° 12' 46,1" N	16° 17' 28,8" O	280	6,7
Alte Donau	48° 13' 58,0" N	16° 26' 00,8" O	160	4,7
Wien Liesing	48° 08' 16,7" N	16° 17' 09,0" O	220	10,4
Klosterneuburg/Höflein	48° 21' 05,1" N	16° 15' 49,6" O	180	18,2
Geitzendorf	48° 28' 36,1" N	16° 12' 23,3" O	224	32,4
Großmugl	48° 29' 17,5" N	16° 13' 22,8" O	217	35,7
Leopold-Figl-Observat.	48° 05' 15,5" N	15° 55' 13,3" O	882	36,1
Hochbärneck	47° 55' 28,5" N	15° 12' 20,5" O	925	91,7
Dürrenstein	47° 48' 03,6" N	15° 02' 34,3" O	1456	111
Niedere Tauern	47° 20' 00,0" N	14° 20' 00,0" O	2000	180

Tab. 1: Licht-Messnetz Wien und Umgebung inklusive historischer (gelb) und in Planung (rot) befindlicher Stationen.

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: Luftgütestationen: Bezeichnung und Lage der für die Luftgütedaten herangezogenen Umweltmessstationen der MA 22. In der rechten Spalte sind Abstand und Peilung zur nächsten Lichtmessstation Kuffner-Sternwarte angegeben.

möglich, wenn eine separate Analyse für unterschiedliche Tageszeiten (z.B. vor/nach Mitternacht, innerhalb und außerhalb von Zeiten maximaler Werbebeleuchtung und Arbeitstagen/Feiertagen) durchgeführt wird. Damit wäre die im Zentrum von Wien besonders helle künstliche Beleuchtung klarer von den für die Kalibrierung erforderlichen, aber wesentlich lichtschwächeren natürlichen Komponenten (Dämmerung, Mond) unterscheidbar.

4.3 Standorte der Licht-Messinstrumente

Für die Erfassung der Nachthimmelshelligkeit über Wien wird vom Verein Kuffner-Sternwarte seit 2008 kontinuierlich ein Messnetz entwickelt, aufgebaut und gewartet, das im Jahr 2019 mit zusätzlichen Messstationen erweitert worden ist.

Zur besseren Übersicht zeigen wir in Abb. 7 und Tabelle 1 einen Überblick zur historischen Entwicklung dieses Lichtmessnetzes.

Die in Tabelle 1 gelb markierten Stationen waren per Abschluss des vorliegenden Berichts nicht mehr in Betrieb, die grün markierten Stationen konnten noch nicht errichtet werden, alle blau markierten Stationen liefern derzeit Daten.

5. Neue Entwicklungen

5.1 Leuchtentausch durch die MA33

Seit dem Herbst 2017 ist die MA33 mit einer groß angelegten Modernisierung der öffentlichen Beleuchtung beschäftigt. Dabei werden bis Ende des Jahres 2020 rund 50.000 der insgesamt 154.000 Straßenleuchten durch neu entwickelte Full-Cutoff-Leuchten mit einem LED-Leuchtmittel ersetzt. Die Abstrahlung dieser Leuchten nach oben und damit ihr direkter Beitrag zum Kunstlichthalo über Wien ist wesentlich geringer, als bei den alten Leuchtenmodellen, die im Zuge dieser Umrüstung ersetzt werden. Ein online einsehbarer Plan gibt Auskunft über den aktuellen Stand der Umrüstungsmaßnahmen (Abb. 9 und 10).

Die Abbildung 10 zeigt den Stand per März 2020 und weist darauf hin, dass die Arbeiten zu diesem Zeitpunkt bereits großteils abgeschlossen waren. Per Erstellung dieses Berichts wurden etwas mehr als zwei Jahre der Umrüstungen messtechnisch mit einer parallelen Überwachung der Nachthimmelshelligkeit begleitet.



Abb. 8: Die neue Standardleuchte der Wiener MA 33. Gut erkennbar ist die am Rand montierte Blendschute.

5.2 Zeitliche Überdeckung und Frequenz der Einzelmessungen

Die seit dem Jahr 2008 im permanenten Außeneinsatz befindlichen Messinstrumente wurden aus Kostengründen über einen langen Zeitraum mit einer sehr heterogenen Hardware, vor allem kostengünstigen Datenloggern, betrieben. Ausfälle von Messstationen, die aufgrund nicht vorhandener Internet-Anbindung nicht sofort bemerkt wurden, waren daher nicht ausgeschlossen. Hier konnten wir durch die Anschaffung neuer Hardware signifikante Verbesserungen erzielen. Ein großer Teil der Messstationen ist seit 2019 über das Internet erreichbar und die Messdaten werden täglich übertragen. Im Verlauf der vergangenen zehn Jahre wurde die durchschnittliche Verfügbarkeit der Messstationen dadurch deutlich verbessert.

Bei den an den äußersten Randzonen der Lichtglocke Wiens (Abstände vom Zentrum mehr als 50 km) gelegenen Stationen steht diese Verbesserung noch aus. Diese Stationen werden nach wie vor im Rahmen aufwändiger Expeditionen überprüft und die Daten persönlich eingeholt. Stationen in Bergregionen, die lediglich über Photovoltaik mit elektrischer Energie versorgt werden können, verzeichnen vor allem während den Wintermonaten entsprechende Ausfälle. Diesem Problem soll durch entsprechende Investitionen in den Ausbau der Photovoltaik-Kapazitäten und einer energiesparenderen Datenaufzeichnung begegnet werden.

Die für die Langzeitstudie der Nachthimmelshelligkeit über Wien herangezogenen Messstationen Wien Zentrum (ZENT), Kuffner-Sternwarte (KUST) und

DAS JAHR 2019 MARKIERT EINE TRENDWENDE BEI DER VON WIEN AUSGEHENDEN NACHTHIMMELSAUFHELLUNG

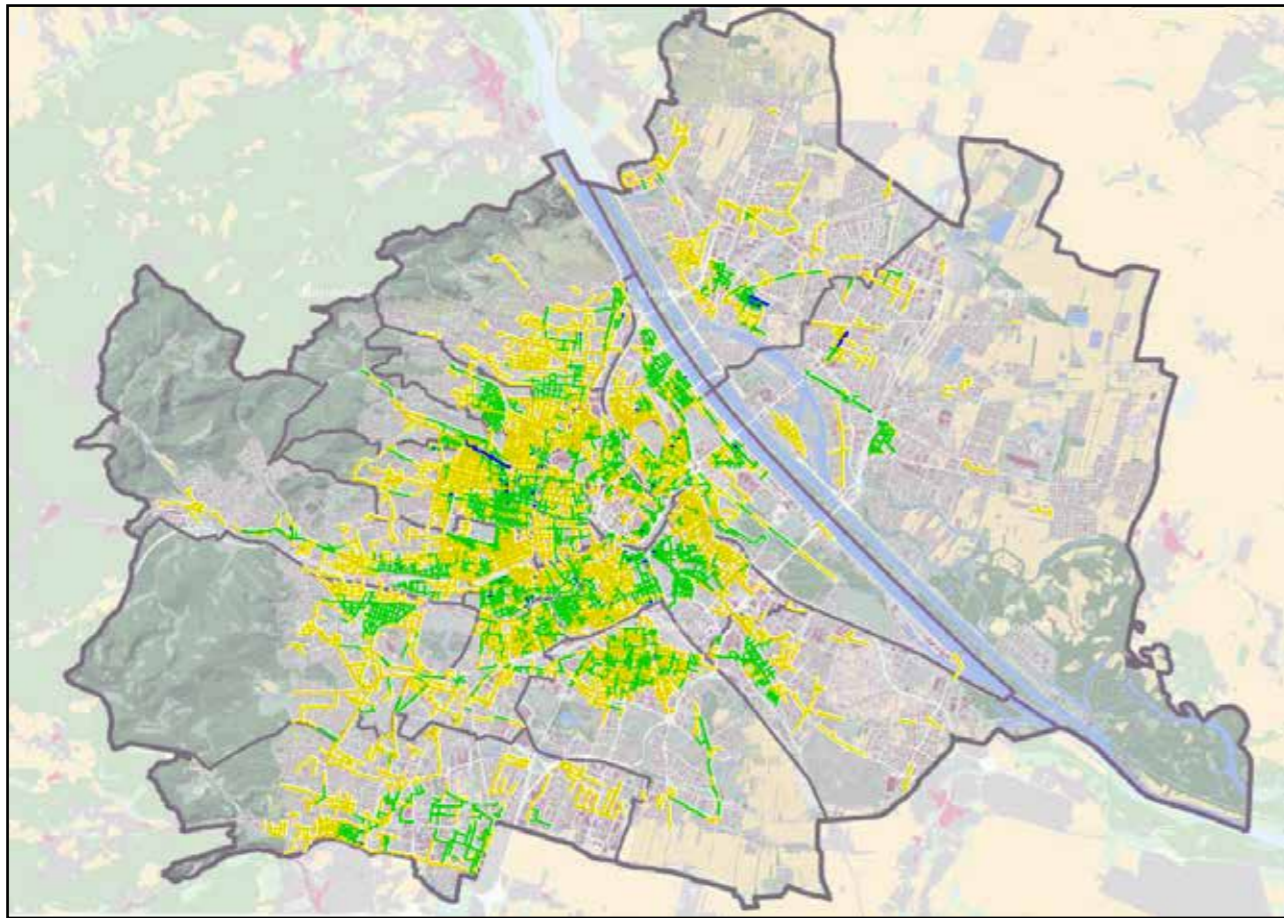


Abb. 9: Karte der Umrüstung auf die neue Standardleuchte (grün) durch die MA33. Stand Dezember 2018.

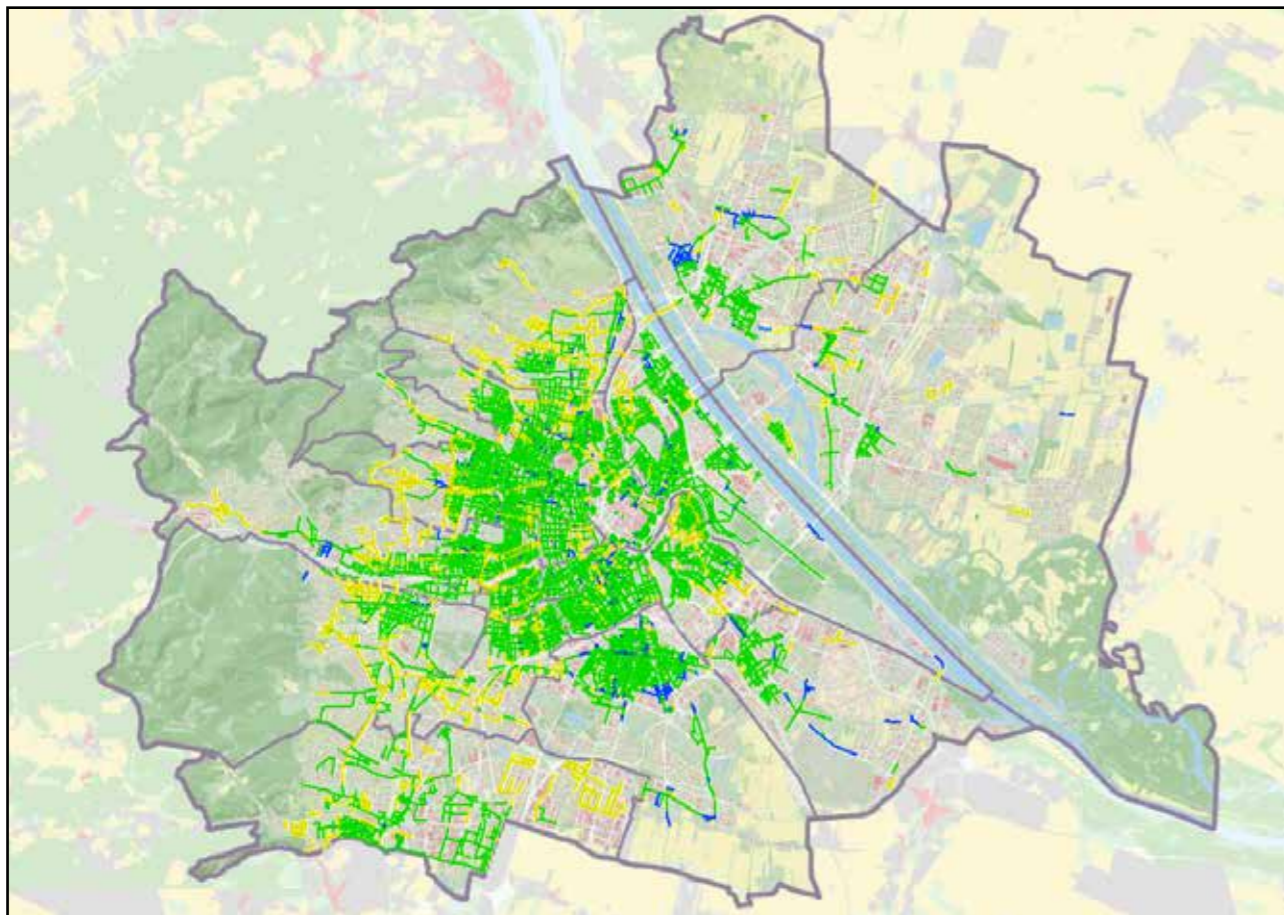


Abb. 10: Karte der Umrüstung auf die neue Standardleuchte (grün) durch die MA 33. Stand März 2020.

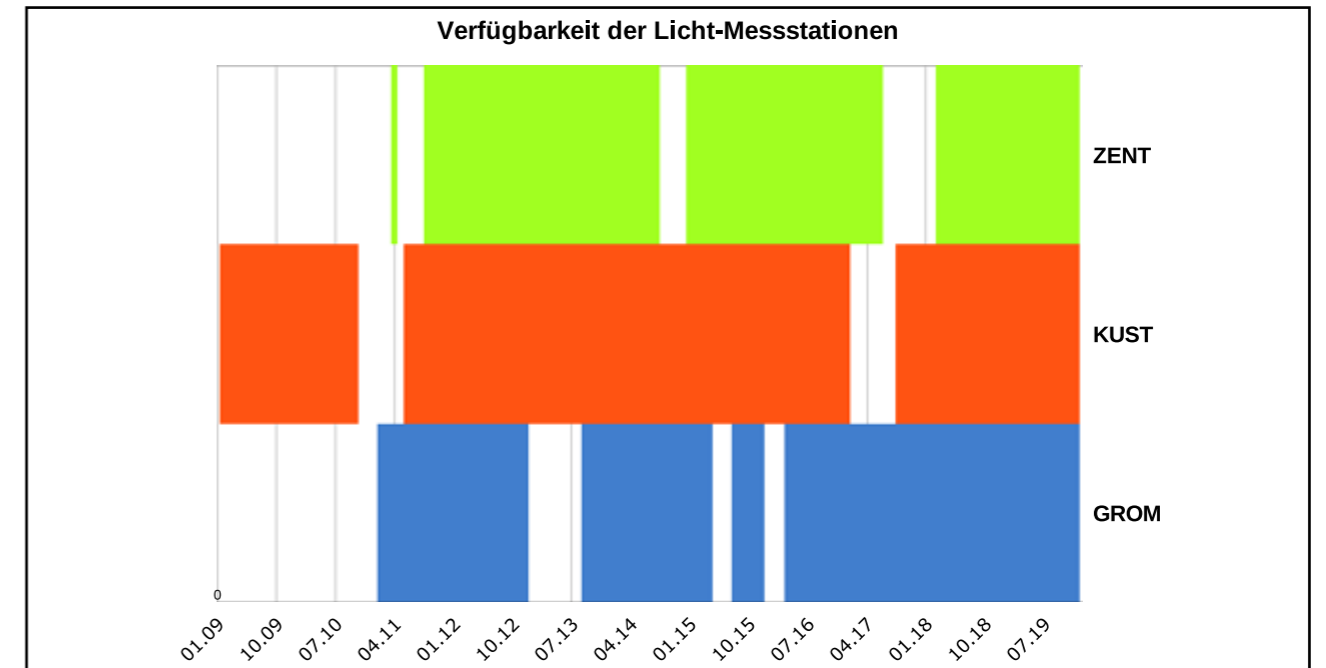


Abb. 11: Zeitliche Verfügbarkeit der drei Basismessstationen im Zentrum von Wien (ZENT), an der Kuffner-Sternwarte (KUST) und in Großmugl (GROM) von Jänner 2009 bis Dezember 2019. Die weißen Bereiche markieren Stationsausfälle.

	Zeitraum	Verfügbarkeit
ZENT	03.2011-12.2019	89 %
KUST	01.2009-12.2019	91 %
GROM	01.2011-12.2019	90 %

Tab. 3: Zeitraum der für diesen Lichtbericht verwendeten Daten und die prozentuelle Verfügbarkeit der einzelnen Stationen im Zentrum von Wien (ZENT), an der Kuffner-Sternwarte (KUST) und in Großmugl (GROM)

Großmugl (GROM) bilden das Rückgrat des Wiener Licht-Messnetzes. Den längsten Zeitraum umfasst die Station KUST, deren Daten wir hier ab Jänner 2009 präsentieren. ZENT und GROM tragen in dieser Analyse ab März des Jahres 2011, respektive Jänner 2011 zum Gesamtbild bei.

Die Verfügbarkeit lag über den präsentierten Zeitraum durchschnittlich bei 90 Prozent. Zusammen mit anderen für diesen Lichtbericht herangezogenen Messstationen (siehe Stationsliste) liegt eine Summe von rund 1 Milliarde Einzelmessungen vor. Daraus abgeleitete Aussagen über Langzeitentwicklungen stützen sich daher auf eine sehr robuste Basis und lassen trotz starker Schwankungen der Nachthimmelshelligkeit im Monatsverlauf Trends erkennen.

Die Bedeutung dieser großen Zahl an Einzelmessungen zeigt sich insbesondere bei der Analyse von Wetterphänomenen (Bewölkung und deren Einfluss auf die gemessene Globalstrahlung). Eine Filterung der Daten nach wolkenlosen Bedingungen anhand kurzfristiger Veränderungen der Globalstrahlung und eine Kalibration direkt vor Ort wäre sonst nicht möglich. Diese hohe Messfrequenz ist nur mit entsprechend lichtempfindlichen Sensoren realisierbar. Vergleichbare

Messnetze anderer Betreiber beschränken sich deshalb bestenfalls auf Minutenintervalle. Satellitenmessungen (die zudem lediglich das direkt nach oben abgestrahlte Licht erfassen) beruhen in Abhängigkeit von ihrer Umlaufbahn auf wenigen Überflügen und Einzelmessungen pro Monat – die Monate von Mai bis August sind in unseren Breiten damit derzeit überhaupt nicht erfassbar.

Global betrachtet wird nur ein verschwindend geringer Anteil der besiedelten Gebiete überhaupt regelmäßig in Bezug auf die am Boden wirksame Nachthimmelshelligkeit vermessen. Das Wiener Lichtmessnetz nimmt hier eine herausragende Rolle ein. Dies nicht zuletzt aufgrund des mit den Lichtmessungen verknüpfbaren Daten des Wiener Luftgütemessnetzes, mit denen die Einflüsse lokaler Luftgütefaktoren mit den Variationen der Nachthimmelshelligkeit in Bezug gesetzt werden können.

5.3 Zusammenführung aller verfügbaren Globalstrahlungs-Daten von 2009 bis 2019

Durch die zunächst nur lokale Speicherung der bei den einzelnen Messstationen anfallenden Daten wurden sie

im Verlauf der vergangenen 11 Jahre auf unterschiedlichen Datenträgern und in mehr als zehn verschiedenen Formaten archiviert. Insgesamt wurde so die Größenordnung von rund einer Milliarde Einzelmessungen gesammelt, wobei jede Messung einer Zeile mit mehreren Parametern (Licht, Temperatur, Status, Zeit, Datum) entspricht.

Vor allem in den ersten Jahren waren die einzelnen Messstationen durch Änderungen der exakten Sensorposition, des verwendeten Sensortyps, der Hard- und Software für die Datenaufzeichnung sowie der Art des Zeitsignals gekennzeichnet. Dies wirkt sich beispielsweise auf die Kalibrationen aus und führt zu einem erheblichen Mehraufwand der korrekten Verknüpfung von Daten, die unter anderen Voraussetzungen gemessen und aufgezeichnet wurden. Ein Beispiel dafür ist die Station Kuffner-Sternwarte, wo zu Beginn der Messungen in den Jahren 2008 und 2009 zahlreiche logistische Hürden überwunden werden mussten, um die Datenaufzeichnung aufrecht zu erhalten. Als problematisch stellten sich auch veränderliche Beleuchtungsbedingungen in unmittelbarer Umgebung der Sternwarte heraus, etwa eine bedauerlicherweise bis 2009 aktive Fassadenanstrahlung und unterschiedliche Abschattungskriterien aufgrund eines mehrfachen Wechsels der Sensorposition im Dachbereich des Gebäudes.

In diesem Zusammenhang machen wir auf die Wichtigkeit der nach wie vor nicht dauerhaft gesicherten und klar definierten Aufstellungsorte für die Sensoren (Lightmeter) sowie eine stabile Datenaufzeichnung aufmerksam, die zumindest im Großraum Wien automatisiert über Fernübertragung realisiert werden sollte. Die Sicherstellung von lückenlosen Messungen unter jederzeit eindeutig definierten Bedingungen ist eine wesentliche Grundlage für belastbare Aussagen über die Entwicklung der Nachthimmelhelligkeit über Wien und den mit ihr verbundenen Effekten von Energieverschwendung und negativen Umwelteinflüssen.

Um diese Datenvielfalt und Datenfülle effizient verwalten und verarbeiten zu können, ist die Programmierung einer geeigneten Datenbank und die Einpflegung sämtlicher Daten und Metadaten erforderlich. Dieser Teil der vorliegenden Studie wurde jedoch nicht beauftragt, wodurch die Daten von Hand auf einen eigens dafür angeschafften Server überspielt und dort zusammengeführt wurden. Damit befinden sich erstmals wesentliche Teile der Wien-bezogenen Globalstrahlungsdaten an einem gemeinsamen Ort. Auf diesem Server erfolgten auch alle für diese Studie erforderlichen Berechnungen, was jedoch aufgrund der fehlenden Datenbank mit einem hohen Zusatzaufwand verbunden war, der bei der Analyse von Datensätzen der kommenden Jahre erneut anfallen würde.

6. Ausdehnung, Energieinhalt und CO₂-Äquivalent der Wiener „Lichtglocke“

Wir zeigen auf der Basis von Messungen an mehreren Orten einen zeitlichen Verlauf für eine Untergrenze – also ein Mindestmaß – des Energieinhalts der durch künstliche Beleuchtung in Wien verursachten Lichtmissionen. Dieses Phänomen wird üblicherweise als „Lichtglocke“ bezeichnet. Aufgrund der in alle Richtungen stark asymmetrischen Form verwenden wir hier den allgemein passenderen Begriff Kunstlichthalo. Außerdem werden deutlich verbesserte Berechnungen zu dessen Form und Volumen präsentiert.

6.1. Ausdehnung des Wiener Kunstlichthalos: verbesserte Methodik

Die allgemein verbreitete Vorstellung der Form der „Lichtglocke“ einer Stadt beruht auf der stark vereinfachenden Annahme einer zu einer einzigen theoretischen Punktlichtquelle zusammengefassten Summe aller an der Aufhellung der umgebenden Atmosphäre beteiligten Lichtquellen. Hinzu kommt die Annahme einer axialsymmetrischen Form, die eine kreisrunde Stadt voraussetzt.

Will man die darin enthaltene Lichtmenge (=Energie) berechnen, kann über die am Boden befindlichen Messstationen mathematisch ein Kegel (genauer ein Stapel von Kegelmüpfen) konstruiert werden. Dessen Achse wird in das Stadtzentrum gelegt und der Kegelmantel wird mit einem mit der gemessenen Globalstrahlung variierenden Neigungswinkel modelliert. Zwischen den Messstationen bleibt dieser Neigungswinkel konstant. Diese in unseren Lichtberichten vor dem Jahr 2019 verwendete Methode erlaubt die Berechnung mit wenigen Messorten. Die Position dieser Messstationen in und um das Wiener Stadtgebiet ist jedoch so gewählt, dass dort vom Stadtzentrum aus gesehen die steilsten Abnahmen zu erwarten sind und die berechneten Werte daher keinen Fall eine Überbewertung, sondern eine Untergrenze der tatsächlich vorliegenden Gesamtausdehnung darstellen.

Die Station KUST (Kuffner-Sternwarte) liegt vom Stadtzentrum in Richtung Westen am Beginn des Wienerwalds, der das urbane Wachstum begrenzt. Die Station GROM (Großmugl) befindet sich 33 Kilometer vom Stadtzentrum entfernt in Richtung der stärksten Abnahme des Wiener Kunstlichthalos und zeigt dort für diese Distanz besonders geringe Messwerte der Globalstrahlung. Die für die Definition der natürlichen Helligkeit des Nachthimmels verwendete Station im

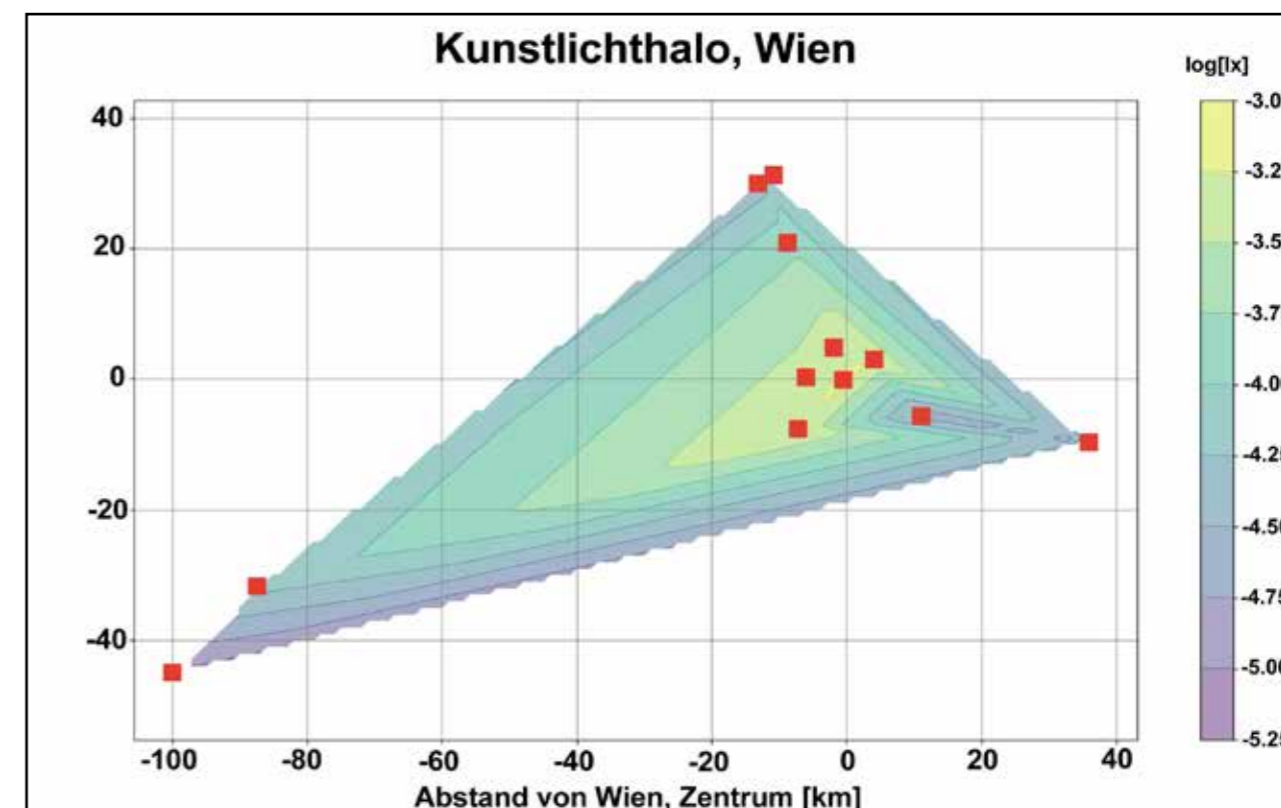


Abb. 12: Form des Wiener Kunstlichthalos (alle Nächte). Die Quadrate markieren die Positionen der dafür verwendeten Lichtmessstationen. Angegeben ist der Abstand zum Ursprung in [km]. Die farbigen Flächen zeigen die jeweilige Beleuchtungsstärke. Aufgrund der viele Größenordnungen umfassenden Unterschiede erfolgt die Angabe logarithmisch (Basis 10).

Wildnisgebiet Dürrenstein/Niederösterreich ist bereits 111 Kilometer vom Wiener Zentrum entfernt und bietet damit auch eine Gelegenheit, das Wiener Kunstlichthalo aus dieser Richtung von außen zu betrachten. Gemeinsam mit den robusten Medianwerten und der durch das große Datenvolumen und die kontinuierliche Messung ermöglichten Stichprobe klarer mondloser Nächte kann sehr verlässlich auf Untergrenzen für das Volumen und damit die mindestens aufgewendete Energie zur Ausleuchtung des Kunstlichthalos geschlossen werden.

Doch schon ein Blick auf einen Wiener Stadtplan zeigt anhand der keineswegs axialsymmetrischen Besiedlung und Bebauung, dass die tatsächliche Form des Kunstlichthalos deutlich komplexer beschaffen sein muss. Auch Satellitenmessungen belegen, dass es vom Zentrum aus betrachtet in nahezu allen Richtungen heller als in die Richtungen der von uns verwendeten Messstationen ist. Hinzu kommt die Verschmelzung der Kunstlichthalos verschiedener Städte: Jene von Wien und Bratislava treffen zwischen Wildungsmauer und Petronell aufeinander, jene von Wien und Wiener Neustadt ungefähr bei Fischamend und jenes von St. Pölten wird bereits vollständig vom Wiener Kunstlichthalo eingenommen.

Davon ausgehend ist eine genauere Erfassung wünschenswert, die am besten möglichst ohne Vorannahmen auskommt und ausschließlich auf Messungen der

Globalstrahlung beruht. Anschließend kann dieser neue Berechnungsansatz mit der bisher verwendeten Methode eines Kegels verglichen werden, um deren Genauigkeit abzuschätzen und entsprechende Korrekturfaktoren anbringen zu können.

Berechnung des Wiener Kunstlichthalos über „Triangulation“

Unser neuer Ansatz fußt auf den folgenden Voraussetzungen:

- Bestimmung der Form ohne Symmetrieanahmen. Es fließen ausschließlich die Globalstrahlungsdaten der Licht-Messstationen des Vereins Kuffner-Sternwarte in die Berechnung ein.
- Maximale Vollständigkeit der vorhandenen Messpositionen und Messdaten.
- Anwendung von in der Kartographie üblichen Standardmethoden.
- Ausschließliche Verwendung von differenziellen, simultanen Messungen zur Vermeidung von verfälschenden Effekten, etwa aufgrund von Wetter- oder zeitlichen Teilschaltungen der privaten und öffentlichen Beleuchtung.
- Rekonstruktion unter typischen (Monatsmediane) Bedingungen. Betrachtung für zwei verschiedene wohldefinierte Stichproben (alle, sowie klare mondlose Nächte).

WIENER KUNSTLICHHALO Leistung [MW]			
Jahr	alle	Jahr	klar mondlos
2011	61	2011	17
2012	84	2012	19
2013	101	2013	40
2014	143	2014	57
2015	130	2015	47
2016	97	2016	28
2017	144	2017	43
2018	152	2018	41
2019	119	2019	40

Tab. 4: Für die Aufrechterhaltung des Wiener Kunstlichthals erforderliche elektrische Leistung [Megawatt]. Jahresmediane von 2011 bis 2019.

WIENER KUNSTLICHHALO Energie/Jahr [GWh]			
Jahr	alle	Jahr	klar mondlos
2011	223	2011	62
2012	307	2012	71
2013	368	2013	148
2014	521	2014	209
2015	476	2015	173
2016	355	2016	101
2017	524	2017	157
2018	556	2018	150
2019	435	2019	144

Tab. 5: Für die Aufrechterhaltung des Wiener Kunstlichthals erforderliche elektrische Leistung [Megawatt]. Jahresmediane von 2011 bis 2019.

WIENER KUNSTLICHHALO CO ₂ -Äquivalent [t]			
Jahr	alle	Jahr	klar mondlos
2011	57505	2011	16015
2012	79243	2012	18336
2013	94942	2013	38070
2014	134304	2014	54017
2015	122859	2015	44645
2016	91474	2016	26131
2017	135286	2017	40378
2018	143540	2018	38711
2019	112242	2019	37221

Tab. 6: Für die Aufrechterhaltung des Wiener Kunstlichthals erforderliche elektrische Leistung [Megawatt]. Jahresmediane von 2011 bis 2019.

Die Globalstrahlungsdaten stammen von den drei Hauptstationen Wien Zentrum (ZENT), Kuffner-Sternwarte (KUST) und Großmugl (GROM), sowie von Messungen in Wien/Hohe Warte, Wien/Alte Donau, Wien/Liesing, Wien/Lobau, Petronell/Augebiet, Geitzendorf/NÖ, Hochbärneck/NÖ und Höflein an der Donau/NÖ. Darunter sind auch Daten einzelner Messekursionen, welche die Richtungslücken im Süden und Südosten Wiens reduzieren. Diese Messwerte wurden zusätzlich in Kombination mit der „natürlichen Hintergrundstation“ Dürrenstein/NÖ zur Berechnung der Lichtglockenparameter verwendet.

In den so aufgebauten Netzdaten wurde beginnend mit dem Jahr 2019 in der Zeit rückwärts und vorwärts nach simultanen Messphasen gesucht und ein Verzeichnis aller paarweise simultanen Datensätze erstellt. Dieses führt zu einer Zeitspanne von 2014 bis zum März 2020 (die Daten wurden mit Messungen bis in den Frühling 2020 ergänzt) in der zumindest paarweise simultane Daten vorliegen. Für die Kernstationen ergibt sich daraus eine simultane Überdeckung mit Daten von mehr als 90 Prozent. Zum direkten Anschluss an die alten axialsymmetrischen Berechnungen und für eine Maximierung der Differenzengenauigkeit, wurden daraufhin alle Differenzen paarweise simultaner Messungen zur Station Großmugl (GROM) gebildet. Die Grundflächen der Einhüllenden der Positionen aller in diesem Netz enthaltenen Stationen werden mit Polygonen gefüllt, die einem geeigneten Extremalprinzip folgen (es wurde eine Dirichlet-Zerlegung der Ebene durchgeführt). Die Polygone werden derart gebildet, dass auf ihnen jeweils die Distanz zu den Punkten – und damit zu den Messstationen in ihrer „Mitte“ – minimiert ist. Jedem Ort werden so die nächstgelegenen Messstationen zugeordnet.

Ähnlich wie Höhenlinien werden die Globalstrahlungswerte der Stationen auf den von den Polygonen gebildeten Flächen linear unter Verwendung der jeweiligen nächsten Messtationen interpoliert. Das Ergebnis ist neben einer Art „Höhenkarte“ der Globalstrahlung auch die Form und das Volumen des Kunstlichthals über Wien. Eine Karte in Merkator-Projektion mit farbkodierten Werten für die kartierte Globalstrahlung findet sich in Abb. 12.

Damit können auch die Leistung, der Jahresenergieaufwand und das damit verknüpfte CO₂-Äquivalent ermittelt werden. Außerdem ist ein direkter Vergleich mit jenen Werten möglich, die sich bei einer Berechnung mit der axialsymmetrischen Methode ergeben. Daraus ergeben sich die Verhältnisse von alten und neuen Bestimmungen aus den Medianen aller Nächte und klarer mondloser Nächte in den Jahren 2014, 2018, 2019, für welche die meisten Simultandaten vorliegen. Sie betragen für die Stationen ZENT, KUST

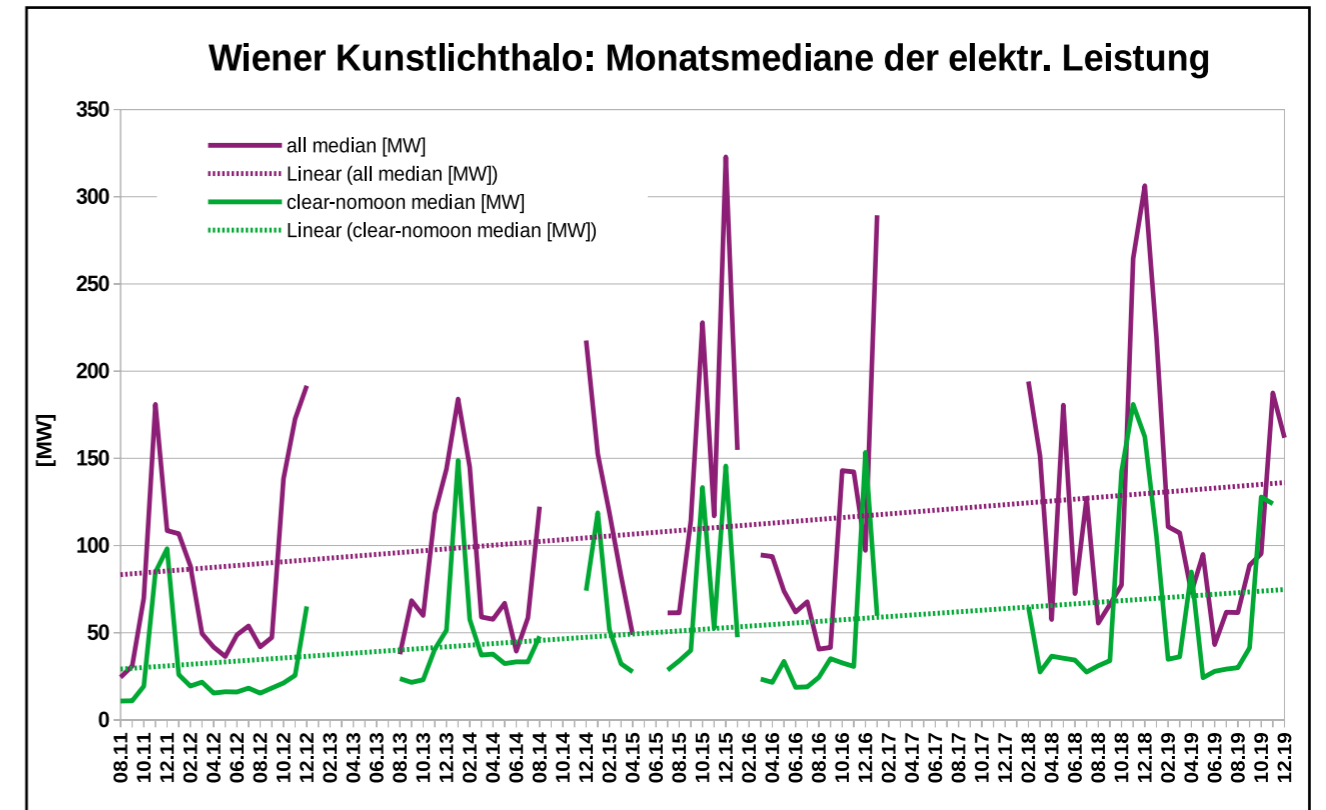


Abb. 13: Das Diagramm zeigt den zeitlichen Verlauf der Monatsmediane der elektrischen Leistung des Wiener Kunstlichthals von 2011 bis 2019. Die Ergebnisse für alle Nächte sind violett, jene für klare mondlose Nächte grün markiert. Die strichlierten Geraden zeigen Trendlinien auf Basis einer linearen Regression über alle Monatsmediane der jeweiligen Stichprobe.

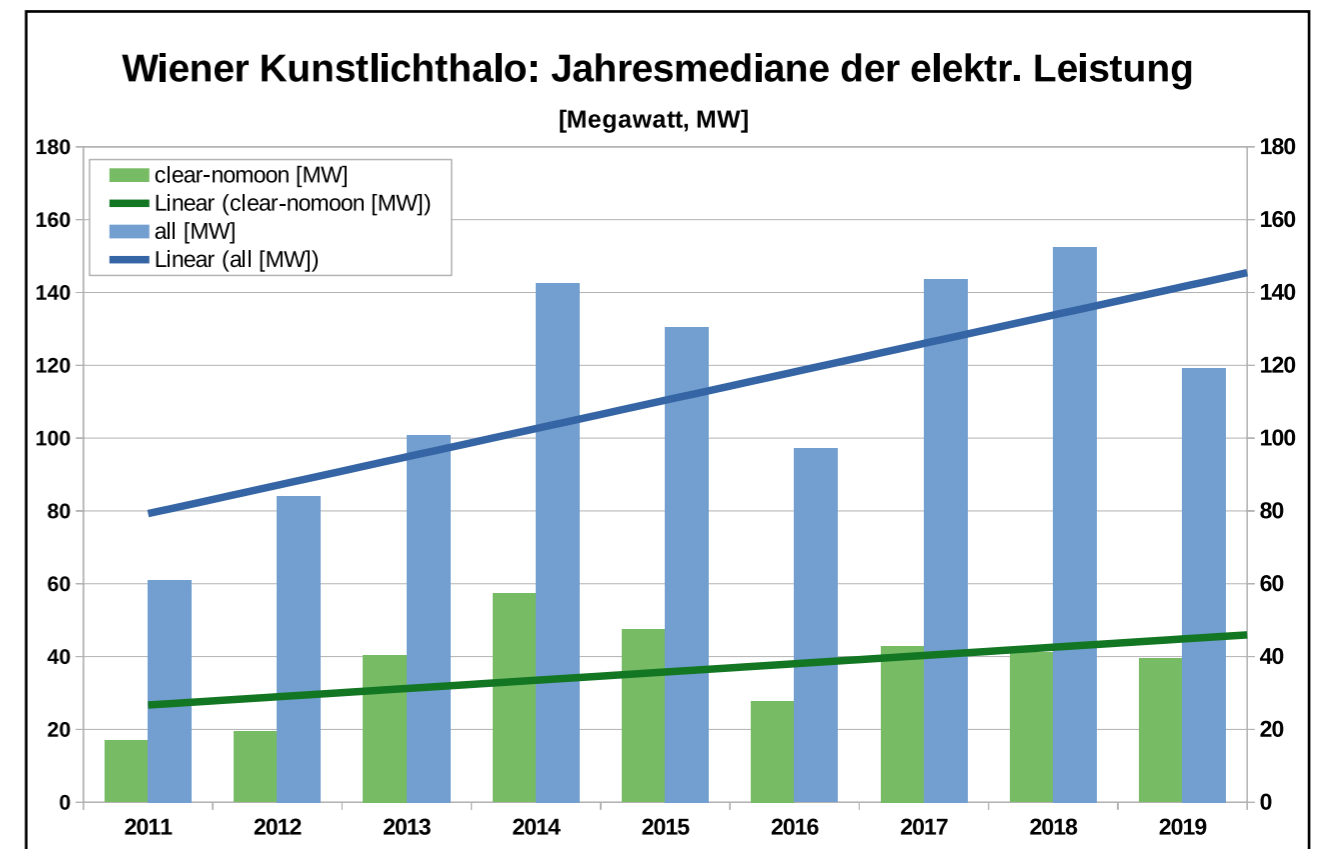


Abb. 14: Zeitlicher Verlauf der Jahresmediane der elektrischen Leistung des Wiener Kunstlichthals von 2011 bis 2019. Die blauen Säulen markieren die Werte für alle Nächte, die grünen für klare mondlose Nächte. Die Geraden zeigen Trendlinien auf Basis einer linearen Regression über alle Jahresmediane der jeweiligen Stichprobe.

und GROM 1,6/2,3/1,8 für alle Nächte und 1,3/1,1/1,1 für klare mondlose Nächte. Um diese Faktoren sind die Energieberechnungen mit der axialsymmetrischen Methode also jeweils zu gering, woraus folgt, dass die zur Aufrechterhaltung des Wiener Kunstlichthalos erforderliche Energie noch deutlich höher ist, als wir in den Lichtberichten bis inklusive des Jahres 2018 angenommen hatten.

Die Bodenablichtleistung wird für den Datensatz „alle Nächte“ mit 0,52 MW und für den Datensatz „klare mondlose Nächte“ mit 0,25 MW bestimmt (siehe Lichtbericht 2012). Der Multiplikator für die dafür erforderliche Menge an elektrischer Energie beträgt 128,6 und beruht auf Messungen der Halbschaltung öffentlicher Beleuchtung und einer Auskunft der Stadt Wien über die damit verbundene Anschlussleistung. Dieser Wert muss für zukünftige Lichtberichte aufgrund von Änderungen der Schaltungsmodalitäten (im Zuge der Umrüstung auf LED) neu bestimmt und die entsprechenden Anschlussleistungen von der Stadt Wien neu erhoben werden.

Unter der Annahme, dass nächtliche Beleuchtung im Jahresmittel 10 Stunden pro Kalendertag eingeschaltet bleibt, berechnen wir die gesamte Energiemenge für ein Jahr und daraus über den aktuellen österreichischen Strommix ein CO₂-Äquivalent. Die Höhe des dafür empfohlenen Umrechnungsfaktors entnehmen wir den Erhebungen des Umweltbundesamtes für die Stromaufbringung Österreichs (Stand Oktober 2019) mit 258 kg/MWh. Letzterer gibt laut Umweltbundesamt die gesamtösterreichische Stromaufbringung inklusive Vorkette wieder und muss daher nicht unbedingt dem spezifischen Strommix in Wien entsprechen.

Auch mit dieser verbesserten Methode wird das Kunstlichthalo nicht vollständig erfasst, da unsere Berechnungen ausschließlich solche Energiebeiträge beinhaltet, für die lokal entsprechende Messungen vorliegen. Die Form und das Volumen wurden also nicht für Orte extrapoliert, an denen keine Messwerte zwischen zwei Stationen verfügbar sind. Alle Himmelsrichtungen relativ zum Stadtzentrum, beziehungsweise Abstände, in denen keine Messstationen installiert waren, tragen daher auch nicht zu der von uns berechneten Form bei. Daher sind die in den Tabellen angegebenen Werte für die Energie und CO₂-Äquivalente weiterhin als wesentlich verbesserte Mindestwerte zu betrachten, die real mit Sicherheit noch höher angesiedelt werden müssen. Um eine vollständige Erfassung der im Kunstlichthalo enthaltenen Energie zu ermöglichen, ist die Installation zusätzlicher Messstationen vor allem im Osten und im Süden Wiens erforderlich.

Insbesondere in einem Abstand von rund 50 Kilometern rund um Wien würden zusätzliche Messstationen wertvolle Stützstellen liefern.

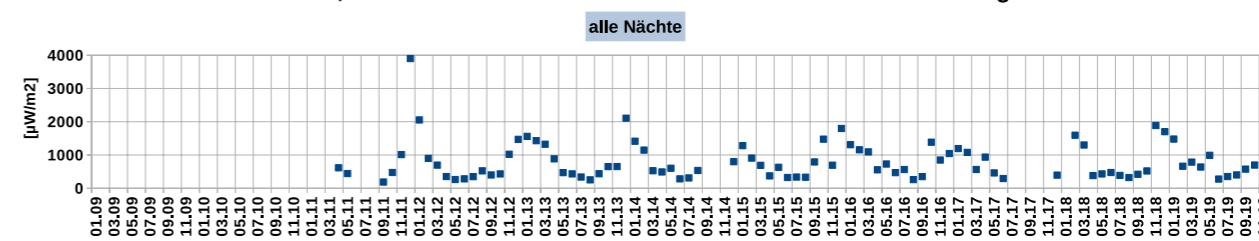
6.2 Ergebnisse

Die in den Tabellen angegebenen Werte entsprechen den Medianen der zur Ausleuchtung des Wiener Kunstlichthalos nötigen elektrischen Leistung im jeweiligen Monat, beziehungsweise Jahr. In der linken Spalte sind die Werte für alle Nächte (also inklusive Bewölkung und Mond) angegeben, auf der rechten Seite nur die Werte für klare mondlose Situationen. Durch die Reflexionseigenschaften von Wolken sind die Werte in der linken Spalte in manchen Fällen sogar erheblich höher. Diese Unterschiede entstehen, da bei nicht klarer Atmosphäre ein größerer Anteil des nach oben abgestrahlten Lichts wieder zurück zur Erdoberfläche gelenkt wird, anstatt die Atmosphäre in Richtung Weltraum zu verlassen. Diese Situation ergibt ein vollständigeres aber schlechter zu analysierendes Bild von der Gesamtmenge des den Kunstlichthalo erhellenden Lichts und damit der möglichen Energie und CO₂-Einsparungen - am besten ein oberer typischer (median) Wert der Untergrenze zu lesen. Schwankungen der Medianwerte bei klaren und mondlosen Bedingungen im Monatsverlauf weisen hingegen neben Änderungen der Lichtimmission auch auf Veränderungen bestimmter Aerosolkonzentrationen oder anderer atmosphärischer Effekte hin (siehe Kapitel 8). Zu beachten ist, dass diese Effekte tatsächliche Veränderungen Bodenablichtleistung (von der Stadt emittierte Lichtmenge) entsprechen, aber einer detaillierten Analyse schwerer zugänglich sind.

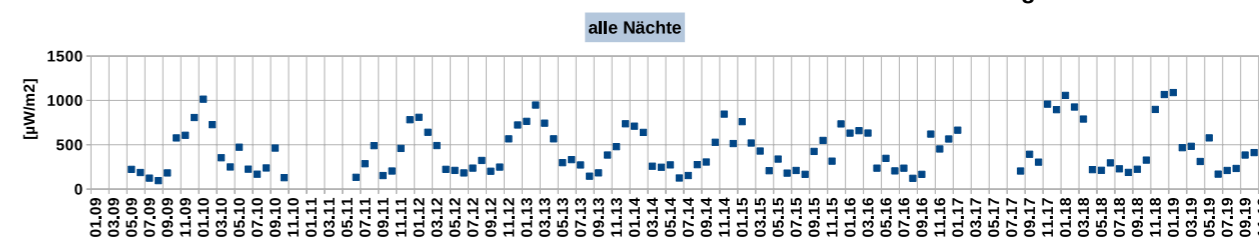
7. Globalstrahlung des Wiener Nachthimmels 2009 bis 2019

Der hier präsentierte Zeitraum von 11 Jahren ist die bisher umfangreichste Studie zur Entwicklung der von Wien ausgehenden Lichtverschmutzung und lässt langfristige Trends ebenso erkennen wie regelmäßig wiederkehrende Schwankungen. Dabei ist zwischen den unterschiedlichen Stichproben „alle Nächte“ und „klare mondlose Nächte“ zu unterscheiden. Beide zeigen deutliche jahreszeitliche Schwankungen mit steilen Anstiegen während den Wintermonaten und vergleichsweise dunklen Nächten in den warmen Jahreszeiten. Diese Systematik setzt sich über den gesamten Beobachtungszeitraum fort, wobei die relativen Anstiege bei der Stichprobe klarer mondloser Nächte höher sind, als bei der Stichprobe mit allen Nächten. Diese jahreszeitlichen Schwankungen sind dem Trend über die gesamte Dekade überlagert. Die hohe Amplitude der Werte in den Wintermonaten erschwert die Erfassung der langfristigen Trends. Diese deutlich herauszuarbeiten, ist ein Hauptziel dieses Berichts (siehe Kapitel 8).

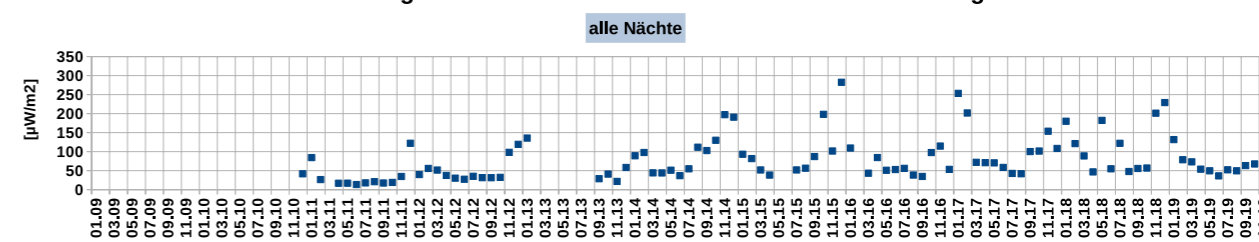
Wien, Zentrum: Verlauf der Monatsmediane der Globalstrahlung



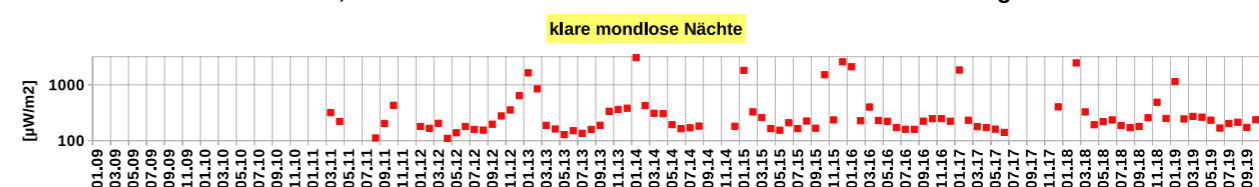
Kuffner-Sternwarte: Verlauf der Monatsmediane der Globalstrahlung



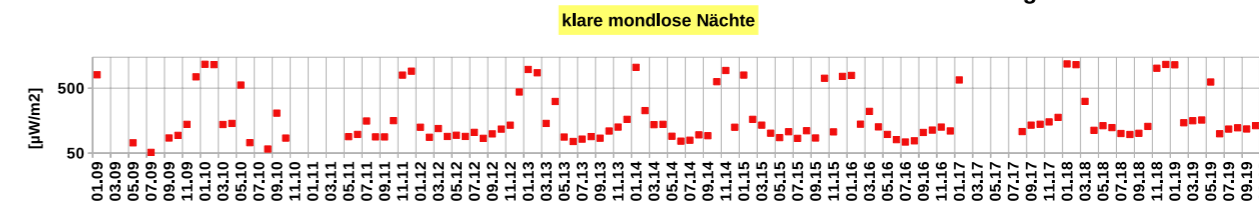
Großmugl: Verlauf der Monatsmediane der Globalstrahlung



Wien, Zentrum: Verlauf der Monatsmediane der Globalstrahlung



Kuffner-Sternwarte: Verlauf der Monatsmediane der Globalstrahlung



Großmugl: Verlauf der Monatsmediane der Globalstrahlung

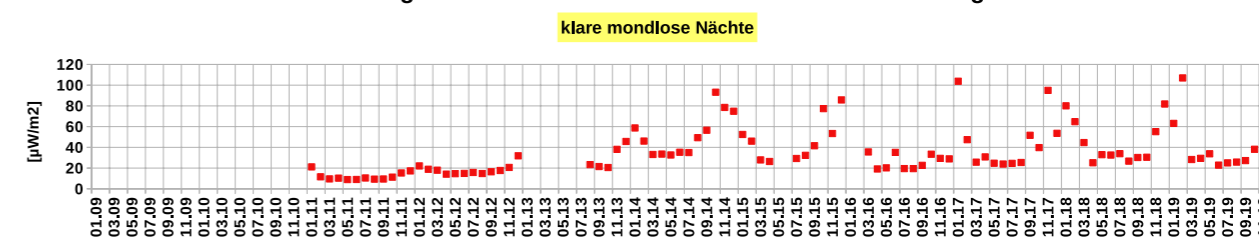


Abb. 16: Zeitlicher Verlauf der Monatsmediane der Globalstrahlungen aller (blau) und klarer mondloser (rot) Nächte der Messstationen Wien-Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl von 2009-2019 (Kuffner-Sternwarte), bzw. von 2011-2019 (Wien-Zentrum und Großmugl). Auf eine Verbindung der einzelnen Messwerte mit Linien wurde hier bewusst verzichtet.

8. Korrelationen mit Luftgütedaten der MA 22 von 2009 bis 2019

8.1 Grundlagen

Basis dieses Kapitels ist die Feststellung, dass der Jahresverlauf der gemessenen Globalstrahlung auch für klare mondlose Nächte – also ohne den starken Effekten von Bewölkung – noch deutliche Schwankungen zeigt, die zum Teil den Jahreszeiten folgen. Bei Betrachtung des Globalstrahlungsverlaufs aller Nächte – also inklusive besonders heller Nächte aufgrund von Bewölkung – ist dieser Effekt sogar noch stärker ausgeprägt.

8.2 Untersuchte Luftgütedaten

Die maßgeblichen physikalischen Phänomene für die Ausbreitung von Licht in der Atmosphäre sind Streuung, Reflexion und Extinktion. Bei dem von uns angenommenen wolkenlosen Zustand ist Streuung als deutlich überwiegender Effekt anzunehmen. In der Luft über Großstädten beteiligen sich daran mit unterschiedlichen Anteilen die Luftmoleküle selbst, sowie darin vorkommende andere Gase, sowie Staubteilchen und andere Aerosole. Neben der natürlichen und lokal konstanten Zusammensetzung der Luft (Stickstoff, Sauerstoff, Argon, etc.) ist ihr relativ größter veränderlicher Anteil die Luftfeuchtigkeit. Verschiedene Stäube und Aerosol-bildende Gase wie Schwefeldioxid (SO₂) unterliegen im Umfeld von Großstädten starken Schwankungen und kommen daher ebenfalls in die engere Wahl als Mitverursacher für die gemessenen Schwankungen der Nachthimmelhelligkeit.

In der Praxis sind die Vergleiche an die gute Verfügbarkeit entsprechender Messdaten gebunden. Das von der Wiener MA22 betriebene Luftmessnetz liefert von mehreren infrage kommenden Faktoren entsprechende Daten, wobei nicht bei allen Stationen die gleichen Sensoren vorhanden sind und nicht bei allen für den gesamten von uns betrachteten Zeitraum von 2009 bis 2019 Daten vorliegen.

Auf Basis der vorhandenen Daten haben wir uns für eine Korrelationsprüfung der Globalstrahlungsdaten klarer mondloser Nächte mit den folgenden Luftgütedaten entschieden:

- relative Luftfeuchtigkeit
- absolute Luftfeuchtigkeit
- Feinstaubanteil PM₁₀
- Feinstaubanteil PM_{2,5}
- Schwefeldioxid, SO₂
- Ozon, O₃

Die ersten vier Genannten wurden 2018 nach einem physikalisch plausiblen Einfluss auf die Transparenz der Luft und damit auf ihren Einfluss auf die Lichtausbreitung ausgewählt und werden wegen den gefundenen Korrelationen und der Vergleichbarkeit auch für diese Studie betrachtet. Schwefeldioxid und Ozon wurden für diese Studie erstmals herangezogen. Schwefeldioxid gilt zwar als stark aerosolbildendes Gas, seine Konzentration in der Wiener Luft ist jedoch seit vielen Jahren so gering, dass sein Einfluss auf die nächtliche Globalstrahlung als eher niedrig eingeschätzt wird.

Noch mehr gilt das für Ozon, das in den üblichen Konzentrationen auf Basis von physikalischen Überlegungen keinen nennenswerten Beitrag zur Lichtstreuung der Atmosphäre liefern sollte. Ozon kann allerdings ein Indikator für „Photo-Smog“ sein. Es entsteht dann sekundär aufgrund anderer photoaktiver Aerosole und ist beispielsweise als Begleiter des „Los-Angeles-Smog“ bekannt, der starke Auswirkungen auf die Sichtweiten auch bei wolkenfreier Atmosphäre in stabilen Hochdrucklagen erbringt. Die Korrelationsprüfung mit den Ozon-Werten dient in diesem Zusammenhang auch als Test unserer statistischen Methode, ob sich die hier zu erwartende sehr schwache oder nicht vorhandenen Korrelation tatsächlich in den Daten manifestiert.

8.2.1 Herkunft der Luftgüte-Daten

Aufgrund der nicht bei allen Luftmessstationen gleichermaßen verfügbaren Luftgütedaten haben wir wie bereits im Lichtbericht 2018 (Licht über Wien VI) aus den Daten der Stationen Hermannskogel (Luftfeuchtigkeit, SO₂) und Lobau (PM₁₀, PM_{2,5}, O₃) eine synthetische Station berechnet, die repräsentative Werte für die zeitlichen Variationen dieser Größen im Wiener Stadtgebiet liefert. Maßgeblich für die Auswahl sind auch die in Wien vorherrschende Westwetterlage und die sich daraus ergebenden Strömungsverhältnisse.

Die Luftmessstation Hermannskogel liegt aufgrund ihrer geographischen Position im nordwestlichen Wienerwald und der im Vergleich zum Stadtgebiet großen Höhe (488 m) noch in 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 Westwind-Situationen von einer guten Durchmischung der verschiedenen Feinstaubquellen über Wien auszugehen. Die Basiswerte für PM₁₀, PM_{2,5} und O₃ wurden dieser Station entnommen. Für den weiteren Ausbau des Wiener Lichtmessnetzes sollte daher insbesondere bei der Station Lobau die Installation eines Lightmeters vorrangig behandelt werden. Einige Luftgütedaten standen nicht zu allen Zeiten zur Verfügung (PM_{2,5}, SO₂).

Korrelationskoeffizienten der Monatsmediane: Globalstrahlung/Luftgütedaten					
Wien Zentrum 2011-2019	Korr.-Koeff.	Kuffner-Sternwarte 2009-2019	Korr.-Koeff.	Großmugl 2011-2019	Korr.-Koeff.
clr/PM10 clr	0,36	clr/PM10 clr	0,42	clr/PM10 clr	0,05
all/PM10 all	0,49	all/PM10 all	0,38	all/PM10 all	0,29
clr/PM2,5 clr	0,38	clr/PM2,5 clr	0,44	clr/PM2,5 clr	0,19
all/PM2,5 all	0,52	all/PM2,5 all	0,44	all/PM2,5 all	0,33
clr/RF clr	0,50	clr/RF clr	0,60	clr/RF clr	0,59
all/RF all	0,59	all/RF all	0,58	all/RF all	0,65
clr/AF clr	-0,37	clr/AF clr	-0,53	clr/AF clr	-0,29
all/AF all	-0,50	all/AF all	-0,65	all/AF all	-0,25
clr/SO2 clr	0,05	clr/SO2 clr	0,26	clr/SO2 clr	0,13
all/SO2 all	0,19	all/SO2 all	0,14	all/SO2 all	0,17
clr/O3 clr	-0,14	clr/O3 clr	0,01	clr/O3 clr	-0,04
all/O3 all	-0,26	all/O3 all	-0,14	all/O3 all	-0,29

Tab. 7: Korrelationskoeffizienten der linearen Korrelation von Globalstrahlung und den einzelnen Luftgütedaten. „all“ steht für alle Nächte, „clr“ für klare mondlose Nächte. „PM10“ und „PM2,5“ steht für die jeweiligen Feinstaubfraktionen und „RF“ und „AF“ für die relative, beziehungsweise absolute Luftfeuchtigkeit, „SO₂“ für Schwefeldioxid und „O₃“ für Ozon.

8.3 Normierung auf standardisierte Luftgüte

Zunächst haben wir die Korrelationskoeffizienten aus den Monatsmediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte mit den Monatsmediane jedes Luftgütedaten bestimmt, um ein Bild der Größenordnung der Korrelation zu erhalten. Auf dieser Basis haben wir jene Luftgütedaten ausgewählt, die wir für eine Normierung mit mehreren Komponenten heranziehen: Relative Luftfeuchtigkeit, PM₁₀, PM_{2,5} und absolute Luftfeuchtigkeit. Für die Zusammenhänge zwischen den Monatsmediane der jeweiligen Luftgütedaten und den Monatsmediane der Globalstrahlung wurde die entsprechende Regressionsgerade bestimmt. In einem weiteren Schritt wurden die Globalstrahlungen auf einen Luftzustand normiert, den sie unter Anwendung dieser Geradengleichungen bei einem typischen Zehnjahres-Median des jeweiligen Luftgütedaten statistisch annehmen würden. Diese normierten Werte entsprechen natürlich nicht den tatsächlichen

Lichtverhältnissen vor Ort. Sie ermöglichen aber eine bessere Vergleichbarkeit der Monatswerte. Die Normierung reduziert Luftgüte-Variationen. Variationen der Globalstrahlung werden von den Luftgüte-Variationen getrennt und zeigen sich dadurch deutlicher.

Damit kann beispielsweise für die relative Luftfeuchtigkeit ein von Feuchtigkeitsschwankungen befreiter Verlauf der Globalstrahlung angegeben werden, wie er bei einer konstanten Feuchte von 70 % vorliegen würde – so der Zusammenhang tatsächlich linear wäre. Diese normierten Globalstrahlungswerte können nun mit den Originalwerten verglichen werden (s. Anhang A).

Diese Form der Normierung wurde entsprechend für jeden der sechs untersuchten Luftgütedaten angewandt und die Monatsmediane vor und nach der Normierung miteinander verglichen. Diese Vergleiche zeigen auch in den grafischen Darstellungen klar, dass Ozon und Schwefeldioxid keine, bzw. nur sehr geringe Beiträge für eine Normierung mit mehreren

Durchschnittliche prozentuelle Änderung der Globalstrahlung (% pro Jahr). Klare mondlose Nächte ohne/mit standardisierter Luftgüte.			
Zeitraum	Ohne Normierung	Multinormiert	Multinormiert, Sichtweite ab 18 km
ZENT 03.2011-12.2019	-6,3	-4,1	-5,5
KUST 01.2009-12.2019	4,6	10,9	3,7
GROM 01.2011-12.2019	17,2	16,8	12,4

Tab. 8: Die Zahlen geben an, um wieviel Prozent die Globalstrahlung klarer mondloser jährlich im Durchschnitt des in der linken Spalte angegebenen Zeitraums abgenommen (grün), bzw. zugenommen (rot) hat. Angegeben sind die Werte ohne Normierung mit Luftgütedaten, mit einer Normierung auf relative und absolute Luftfeuchtigkeit, PM₁₀ und PM_{2,5} (Multinormiert), sowie nach einer Filterung der multinormierten Werte nach einer Sichtweite von mehr als 18 Kilometern.

Komponenten bringen würden, weshalb wir sie dafür ausgeschlossen haben.

Die Normierung mit allen vier Komponenten wurde durchgeführt, indem für jeden Monat der Mittelwert aus den normierten Globalstrahlungswerten von Relativer Luftfeuchtigkeit, PM₁₀, PM_{2,5} und absoluter Luftfeuchtigkeit gebildet wurde.

8.4 Ergebnisse der Korrelationsprüfungen

Die Korrelationskoeffizienten zeigen bei allen drei untersuchten Messstationen ZENT, KUST und GROM die höchsten Werte für die relative Luftfeuchtigkeit mit einem Bereich von 0,57 bis 0,65. Etwas niedrigere, aber noch vergleichbare Werte zeigen sich für die beiden Feinstaubfraktionen PM₁₀ und PM_{2,5}, wobei hier die Korrelation bei der bereits weit vom Stadtzentrum entfernten Station GROM erheblich geringer ist. Die von GROM aus noch messbaren Effekte der Feinstaubkonzentration in Wien wären demnach kleiner als bei den in Wien gelegenen Stationen ZENT und KUST.

Eine klare Anti-Korrelation zeigt sich für die absolute Luftfeuchtigkeit: Steigende Werte der Globalstrahlung stehen sinkenden Werten der absoluten Luftfeuchtigkeit gegenüber. Die Korrelationskoeffizienten reichen von -0,52 und -0,63 für ZENT respektive KUST und stehen einem nur mehr etwa halb so großen Wert von -0,25 im weiter entfernten GROM gegenüber.

Schwefeldioxid zeigt Korrelationen mit Werten im Bereich von 0,17 bis 0,26, wobei die Station KUST mit der besonders langen Zeitbasis von elf Jahren den höchsten Wert aufweist.

Die Konzentration von Ozon korreliert von allen untersuchten Luftgütefaktoren am geringsten, beziehungsweise faktisch überhaupt nicht mit den Globalstrahlungswerten der klaren mondlosen Nächte. Der stärkste Korrelationskoeffizient liegt bei der Station ZENT mit -0,16 vor, bei den weiter vom Zentrum entfernten Stationen bewegt er sich um Null.

8.4.1 Ergebnisse der Normierung

Die Normierung der Globalstrahlungen klarer mondloser Nächte auf eine relative Luftfeuchtigkeit von 70 % bewirkt bei allen drei Messstationen eine deutliche Dämpfung der besonders hellen Monatsmediane rund um den Monat Jänner. Charakteristisch sind aber auch Überkorrekturen in den vergleichsweise dunklen Monaten der wärmeren Jahreszeiten. Sie äußern sich in zusätzlichen Schwankungen rund um die unkorrigierten Werte.

Auch eine Normierung auf einen Standardwert der absoluten Feuchtigkeit (8 g/m³) führt zu einer deutlichen Dämpfung der Spitzen während der Wintermonate und zu stärkeren Schwankungen in den warmen Jahreszeiten. Insgesamt ist der Effekt der Normierung weniger stark ausgeprägt als bei der relativen Luftfeuchtigkeit. Vor allem die Station GROM zeigt wesentlich geringere Veränderungen der Globalstrahlung bei einer Änderung der absoluten als bei entsprechenden Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit. Wir merken dazu an, dass die absolute Luftfeuchtigkeit aus den Wiener Messwerten der relativen Luftfeuchtigkeit und der ebenfalls dort gemessenen Temperatur berechnet wurde, also auf Messungen in 33 Kilometer Abstand beruht.

Auch die Feinstaubindikatoren PM₁₀ und PM_{2,5} bewirken jeweils eine Dämpfung der hellen Monatsmediane, dies allerdings in einem geringeren Ausmaß als bei der relativen Luftfeuchtigkeit. Die in Wien gemessenen PM₁₀-Werte zeigen bei der Station GROM keine signifikanten Korrekturen der Globalstrahlung. Auffallend ist bei der Normierung auf einen Standardwert der PM_{2,5}-Konzentration von 20 µg/m³ eine leichte Anhebung des gesamten Globalstrahlungsniveaus bei den Stationen ZENT und GROM.

Bemerkenswert ist die drastische Dämpfung einer bei allen drei Stationen sichtbaren Helligkeitsspitze um den Jänner 2017, die sowohl bei der Normierung auf PM₁₀ als auch auf PM_{2,5} eintritt. In diesem Monat wurde laut Hinweis des Luftgüte-Teams der MA 22 ein überregionaler so genannter Feinstaub-Event festgestellt, bei dem die Konzentrationen beider Feinstaubindikatoren ungewöhnlich stark angestiegen sind und sich schon im Monat darauf wieder auf normale Werte eingependelt haben. Aus physikalischer Sicht ist hier neben der Korrelation auch ein kausaler Zusammenhang sehr wahrscheinlich.

Schwefeldioxid (SO₂) bewirkt bei einer Normierung auf eine Konzentration von 4 µg/m³ über den gesamten beobachteten Zeitraum nur sehr geringe Korrekturen der Globalstrahlung. Sichtbar ist jedoch auch hier der Monat Jänner 2017, der neben der höheren Feinstaubkonzentrationen auch einen deutlichen Anstieg der SO₂-Konzentration aufweist. Die entsprechende Helligkeitsspitze wird daher durch die Normierung etwas gedämpft, wobei das Ausmaß wesentlich geringer ist, als bei den Feinstaub-Normierungen. Den relativ stärksten Einfluss zeigt SO₂ bei der Station KUST in den Jahren 2009 und 2010.

Bei Ozon (O₃) bewirkt die Normierung auf einen Standardwert von 40 µg/m³ von allen untersuchten Luftgütefaktoren die geringsten Änderungen auf den Verlauf der monatlichen Globalstrahlungsmediane klarer

mondloser Nächte. Ein statistischer Zusammenhang ist auch aufgrund der nahe Null liegenden Korrelationskoeffizienten nicht zu erwarten. Auch auf Basis von physikalischen Überlegungen sollten Ozon-Konzentrationen dieser Größenordnung eher keinen Einfluss auf die gemessene Globalstrahlung haben.

8.4.2 Ergebnisse der Normierung mit vier Luftgüte-Komponenten

Durch Bildung des Mittelwerts der mit den jeweils über die Normierung auf relative und absolute Luftfeuchtigkeit, sowie PM₁₀ und PM_{2,5} berechneten Globalstrahlungswerte ergibt sich eine auf deren Anteile gewichtete Normierung.

Der Vergleich dieser Globalstrahlungswerte für klare mondlose Nächte zeigt über den betrachteten Zeitraum von 2009 bis 2019 einen deutlich glatteren Verlauf der Monatsmediane. Dieses Verfahren liefert die ersten Schritte für einen Weg, die gemessenen Globalstrahlungen auf kürzeren Zeitskalen und rascher mit den Veränderungen der Lichtmissionen in Verbindung zu bringen.

Die Normierung mit den einzelnen Luftgüte-Komponenten funktioniert vor allem in der Sommermonaten gut. Wie in Abb. 17 erkennbar, werden dadurch die oft U-förmigen Variationen gedämpft. Die Verbesserung der Vergleichbarkeit mit den Normierungseffekten in den Wintermonaten ist allerdings eingeschränkt. Dies liegt vermutlich auch an den aus technischen Gründen (Fehlen geeigneter Datenstrukturen und einer Datenbank) zum Einsatz kommenden Monatsmediane, die nur langsam auf die rasch wechselnden Wettersituationen der Wintermonate reagieren können. Auch die relative Abstimmung der Korrekturen ist noch verbesserungsfähig, indem etwa ein Multikorrelationsansatz verfolgt wird.

Als Vorschau auf die damit verbundenen Möglichkeiten einer auch besser synchronisierten Multikorrelation zeigen wir im Ausblick eine Kombination der multinormierten Daten mit Messungen der Sichtweite (Abb. 18).

Eine geeignete Normierung der Wintermonate muss im Zyklus der Wetterwechsel dieser Jahreszeiten erfolgen. Eine entsprechend hohe zeitliche Auflösung im Bereich von Tagen oder sogar Stunden, die auch bei den Normierungen und Medianwerten Verwendung finden muss, ist dazu erforderlich.

9. Zusammenfassung der Ergebnisse

Seit 2009 wurde die Nacht über Wien zunehmend heller. In den Jahren 2018 und 2019 begann sich eine Stagnation dieser Entwicklung zu manifestieren.

Die elektrische Leistung zur Aufrechterhaltung des damit verbundenen Kunstlichts folgt dieser Entwicklung mit einem auf den Monatsmedian für alle Nächte (in denen ein größerer Anteil des sonst in den Weltraum abgestrahlten Lichts zum Boden zurückkehrt) bezogenen Spitzenwert von 323 MW (Dezember 2015) und einem Energiebedarf von 1179 GWh (ca. 1,2 TWh) jährlich bei einem CO₂-Äquivalent von mehr als 300.000 Tonnen mit dem österreichischen Energiemix.

Die erstmals ohne Symmetrie- oder Verlaufsannahmen mit geographischen Standardmethoden aus den monatlichen Globalstrahlungsmedianen erfolgte Rekonstruktion der Wiener Lichtglocke lässt bei vollständiger Erfassung (also die unterbrechungsfreie Messung an allen Stationen) das 1,1 bis 2,3-Fache, also 1,3 bis 2,7 TWh erwarten.

Diese Werte müssen als strikte Untergrenzen für die Medianwerte gesehen werden, denn das aktuelle Netz aus Messstationen erfasst auch in seiner größten Ausdehnung nur einen Sektor, dessen Schwerpunkt in der tendenziell dunkleren Westrichtung liegt. Vor allem eine genauere Erfassung des Südens und Südostens Wiens wird mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit noch deutlich höhere Werte ergeben. Nimmt man die Ergebnisse für die bekannte Ausdehnung und Form in Richtung WSW als typisch für die Wiener Lichtglocke an, ist anzunehmen, dass aktuell nur etwa ein Viertel bis ein Drittel der Gesamtfläche mit Messwerten erfasst ist. Wir merken an, dass der hier präsentierte Bericht über die Entwicklung der Lichtverschmutzung mit seiner Zeitbasis von 2009 bis 2019 die weltweit umfassendste Studie zu diesem Thema darstellt.

9.1 Trends und Schwankungen der Entwicklung der Globalstrahlung

Die deutlich erkennbare jahreszeitliche Variation und die großen natürlichen und künstlichen Schwankungen erfordern – wie auch bei Luftschadstoffen – eine kontinuierliche Erfassung in vollständigen Zeitserien mit der hohen Langzeit-Stabilität, Kadenz und Empfindlichkeit des Wiener Licht-Messnetzes. Atmosphärische Extremereignisse (z.B. Feinstaub) begrenzen allerdings die Genauigkeit bei der raschen Diagnose der Langzeit-Entwicklung.

2018 wurde erstmals die enge Beziehung der gemessenen Globalstrahlung mit mehreren Luftgütewerten festgestellt und deren Korrelationen bestimmt. Die daraus neu entwickelte Normierung der Globalstrahlungswerte auf einen fixierten Bezugszustand der Luft

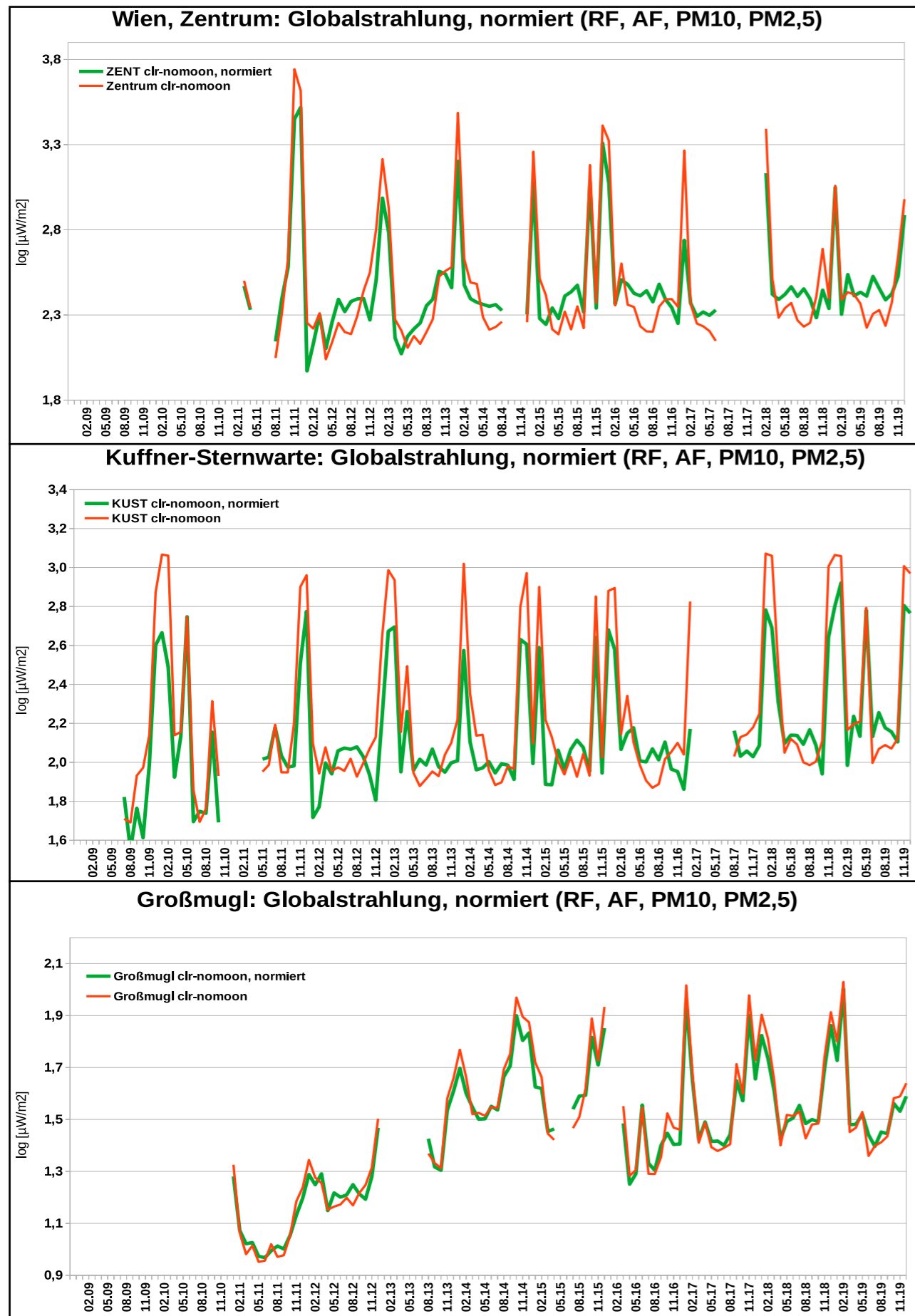


Abb. 17: Unterschiede des zeitlichen Verlaufs der Monatsmediane der Globalstrahlungen klarer mondloser Nächte (rot) und den mit vier Luftgütwerten multinormierten Globalstrahlungen (grün) der drei Messstationen. Deutlich sichtbar ist die gute monatliche Dämpfung bei der Kuffner-Sternwarte, während sie im 33 km entfernten Großmugl kaum anschlägt.

Relative Standardabweichung der Monatsmediane der Globalstrahlung. Klare mondlose Nächte ohne/mit standardisierter Luftgüte.		
Zeitraum	Ohne Normierung	Multinormiert (standardisierte Luftgüte)
ZENT 03.2011-12.2019	1,67	1,27
KUST 01.2009-12-2019	1,17	0,90
GROM 01.2011-12.2019	0,63	0,56

Tab. 9: Angegeben sind die Zahlenwerte der relativen Standardabweichung (Standardabweichung in Einheiten des Mittels) der dekadischen Logarithmen der Globalstrahlungs-Monatsmediane klarer mondloser Nächte ohne Normierung und mit der auch in Abb. 17 angewandten Multinormierung für relative und absolute Luftfeuchtigkeit sowie PM10 und PM2,5.

reduziert die monatlichen und jahreszeitlichen Schwankungen deutlich.

Die langfristigen Trends treten durch diese Normierung etwa doppelt so deutlich hervor, die Korrekturen bleiben aber in den Wintermonaten unter den Erwartungen. Dies tritt vermutlich aufgrund der technisch notwendigen Analyse über die Monatsmediane sowie Kreuzkorrelationen etwa zwischen PM2,5 und PM10 sowie absoluter und relativer Luftfeuchtigkeit auf. Gemeinsam mit den raschen Wetterwechseln der Wintermonate führt das zu ungenauen Normierungen. Die elf Jahre überstreichende Zeitbasis verdeutlicht, welche Luftgütefaktoren die größten Abhängigkeiten von den Globalstrahlungsdaten aufweisen. Sie verbreitert die Datenlage für alle Wettersituationen. Die stärkste Modulation der Globalstrahlung zeigt die Korrelation mit der relativen Luftfeuchtigkeit, gefolgt von den Feinstaubfraktionen PM10 und PM2,5 sowie einer Antikorrelation mit der absoluten Luftfeuchtigkeit. Eine schwache Korrelation zeigt sich auch bei SO₂, während bei Ozon keine Korrelation nachweisbar war (siehe Details in Kapitel 8).

Die verlängerte Zeitbasis – es ist die längste die bisher für Nachtlicht-Studien (im Unterschied zu astronomischen) bekannt ist – erlaubt die verbesserte Auftrennung von Kurz- und Langzeit-Trends und genauere langfristige Änderungsraten. Tab. 9 zeigt die geringere mittlere Standardabweichung der Globalstrahlungswerte nach der Multinormierung.

10. Ausblick

10.1 Physikalische Korrekturen: Nichtlokale Luftgüte und Transparenz

Die Natur der festgestellten Korrelationen – überproportional höhere Globalstrahlungswerte bei steigender relativer Luftfeuchtigkeit und Feinstaubkonzentration – bestärkt die Vermutung einer Abhängigkeit

des Kunstlichthalos von der typischen (wechselwirkungsfreien) Ausbreitungsdistanz des Lichts in der Atmosphäre.

Das motiviert die Berücksichtigung von gemessenen Sichtweiten, zusätzlich zu den bisher verwendeten Wetterindikatoren, die sich vor allem an Wolken und den lokalen Eigenschaften der Atmosphäre orientieren. Denn auch bei klarem Himmel kann Dunst oder Staub in Distanzen von oft mehr als 100 Kilometern die für die Lichtmessstationen relevante Lichtausbreitung beeinflussen. Diese Effekte werden bereits teilweise durch Wetterdaten und Luftgütekonzentrationen erfasst, derzeit allerdings nur lokal und in Bodennähe. Sichtweitedaten, wie sie an Flugplätzen und ausgewählten Wetterstationen ermittelt werden, erweitern die Diagnose der Transparenz der Luft und damit der Lichtausbreitung auf Skalen von bis zu 100 Kilometern und in jene Höhen, die für den Transport von Licht in der Atmosphäre bestimmend sind. Dabei müssen die jeweiligen Sichtbedingungen passend zu den anderen Messwerten ausgewertet werden. Wir zeigen hier eine erste Anwendung auf Basis der in dieser Studie vorhandenen Monatsmediane, die um jene der Sichtweitemessungen einer Messstation in der Nähe von Wien ergänzt werden.

In Abbildung 18 zeigen wir die Entwicklung der Globalstrahlung für die Monatsmediane von luftgütenormierten, klaren mondlosen Nächten, deren Monatsmediane der Sichtweitemessungen größer als 18 Kilometer sind. Die Einbeziehung nichtlokaler Atmosphärenindikatoren verbessert die Vergleichbarkeit der Globalstrahlungsdaten unterschiedlicher Wetterlagen. Höhenabhängige Maße für Aerosol-Konzentrationen und nichtlokale Transparenzmaße wie die Sichtweite, stellen den nächsten Verbesserungsschritt dieser Analyse dar.

Es ist absehbar, dass damit auch kurzfristige Trends (beispielsweise im Verlauf einzelner Wochen) rascher diagnostizierbar werden und die Evaluierung von Maßnahmen zur Reduktion des Kunstlichthalos innerhalb von wenigen Monaten möglich wird.

10.2 Präzisierung der Analyse: Von Monatsmedienen zu Tages-, Wochen- und Stundenwerten

Die aktuelle Analyse beruht auf zeitlichen Verläufen und Änderungen von Wetter- und Luftgütesituationen und impliziert, dass die natürlichen Helligkeitszyklen der Nacht (Mond, etc.) dafür eine geeignete Basis sind. In Städten ist dies jedoch seit mehr als zehn Jahren nicht mehr der Fall, weil die künstliche Ausleuchtung des Himmels seither sogar jene durch den Vollmond deutlich übersteigt. Darüber hinaus können Monatsmediane in den Wintermonaten den rascheren Wetterrhythmen offenbar nicht rasch genug folgen, wie die zu geringen Korrekturen zur Normierung der Wintermonate in dieser Studie andeuten.

Daraus folgen Genauigkeitsgrenzen der Messungen, weil die künstlichen Änderungen der Himmelsausleuchtung die natürlichen massiv überdecken. Die genaue Analyse der städtischen Lichtentwicklung muss deshalb dem in der Stadt praktizierten Lichtmanagement folgen. Dazu zählen Normal/Sommerzeitwechsel, Teilnachtschaltungen, Rhythmen der dekorativen Beleuchtungseinrichtungen, Verkehrsspitzen, Nutzung des öffentlichen Raumes für Lichtwerbung und viele andere. Ein derartiger – wir nennen ihn – „lichttechnischer Kalender“ muss jedoch als neues Analysewerkzeug erst entwickelt werden. Ein solcher könnte auch

für Simulationsmodelle zur Abschätzung und Evaluierung von Maßnahmenpaketen herangezogen werden, die von der bisherigen astronomisch-meteorologisch betrachteten Struktur der Nacht unabhängig sind. Zusätzlich muss die Normierung den jeweils aktuellen Wettersituationen – nicht nur den Monatswechseln von Mond und Jahreszeiten – folgen, damit auch von Oktober bis April die Globalstrahlungen umfassend auf Standard-Luftbedingungen normiert werden können.

10.3 Vollständigere Darstellung des Kunstlichthalos

Dringend notwendige Verbesserungen des bestehenden Wiener Lichtmessnetzes sind der Ausbau zu den Wachstumsrichtungen der Stadt (z.B. Seestadt) und in Richtung von wesentlich beitragenden Nachbarstädten wie St. Pölten, Wiener Neustadt und Bratislava. Aktuell ist das Lichtmessnetz an der Genauigkeit der Untergrenze orientiert. Es vermeidet deshalb die hellen Bereiche hin zu den Nachbarstädten, weil dort der Verlauf richtungsabhängig ist und die Konstruktion axialsymmetrischer Kunstlichthalos entsprechend unsicher wäre. Mit zusätzlichen Messstationen in diesen Richtungen kann die Form und die Ausdehnung des Kunstlichthalos mithilfe der beschriebenen Triangulierungsmethode

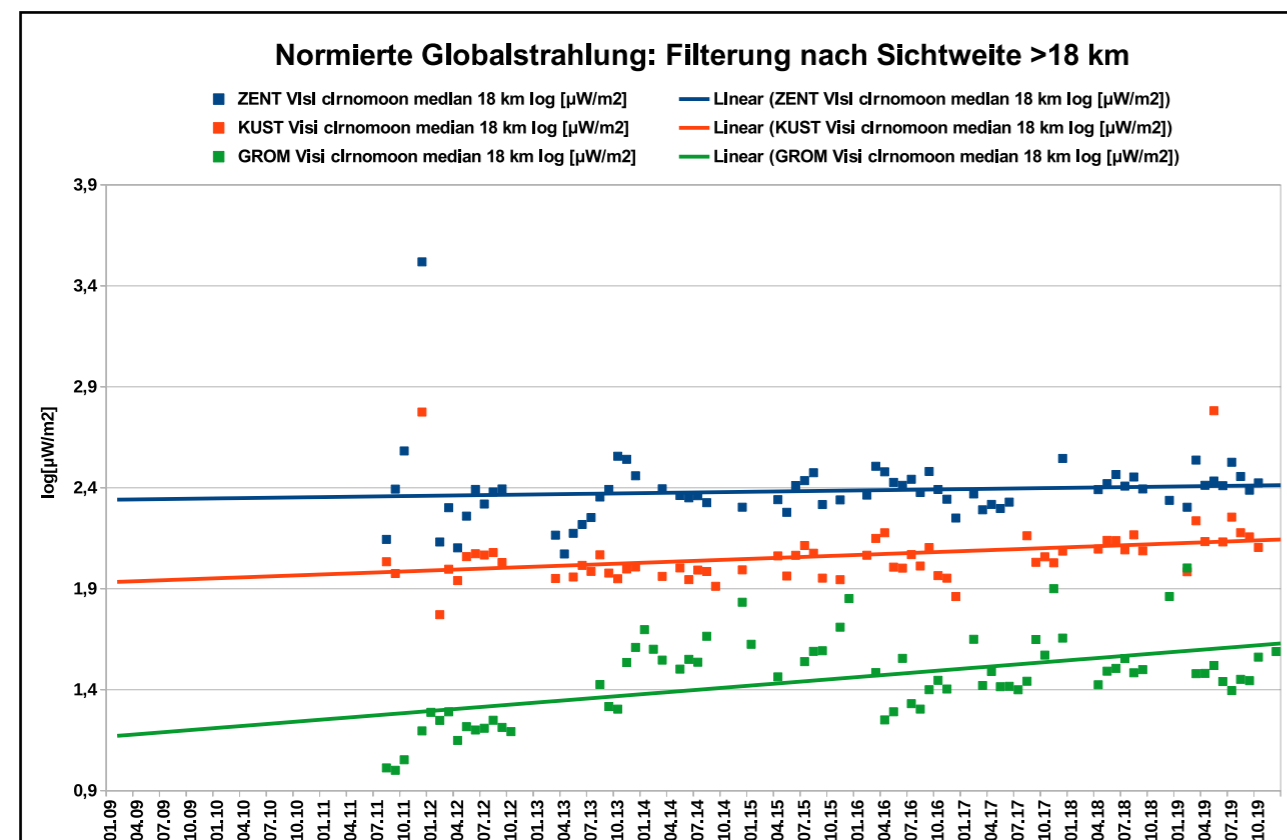


Abb. 18: Zeitlicher Verlauf der mit vier Luftgütwerten multinormierten und nach einer Sichtweite von mehr als 18 Kilometern gefilterten Monatsmediane der Globalstrahlungen klarer mondloser Nächte der Messstationen Wien-Zentrum (blau), Kuffner-Sternwarte (rot) und Großmugl (grün). Die Geraden markieren Trendlinien einer linearen Regression über alle Monatsmediane der jeweiligen Stichprobe. Angegeben sind auch die Geradengleichung und das Bestimmtheitsmaß.

aber auch bezüglich seiner oberen Grenzen (z.B. Energieinhalt, CO₂-Äquivalent) erfasst werden. Gleichzeitig ist eine umfassenderer radiale Überdeckung wichtig. Das Kunstlichthalo liefert wesentliche Beiträge auch bei über 35 Kilometern Abstand vom Wiener Zentrum und erstreckt sich auf Entfernungen von bis zu 70 Kilometern. Dieser Umstand erfordert Stationen in drei Hauptrichtungen von der Stadtgrenze bis hin zu dieser Grenze.

10.4 Gemeinsame Stationen Luftmessnetz und Lichtmessnetz

Die aktuellen Normierungen der Globalstrahlungsdaten mit Luftgütedaten der MA 22 und die damit verbundenen Fortschritte basieren auf einer synthetischen Luftmessstation (rechnerische Kombination von Daten der Luftmessstationen Hermannskogel und Lobau). Diese leitet für die gesamte Stadt dieselben Relationen aus der Konstruktion eines Satzes von Korrelationen und daraus die Reduktion auf die normierten Luftgütwerte ab.

Am besten funktioniert diese Vorgehensweise für die Luft- und Lichtmessstationen, die in unmittelbarer Nähe zueinander liegen. Für die im vorliegenden Bericht gebildete synthetische Station ist das die relative Luftfeuchtigkeit bei der Kombination KUST (Licht) – Jägerwiese (Feuchte) und ZENT (Licht) – Lobau (Feinstaub). Für die Lichtmessstation GROM, die mehr als 30 Kilometer vom Stadtzentrum entfernt liegt, zeigen sich bereits deutliche Abnahmen der Korrelationen, da dort sehr wahrscheinlich andere atmosphärische Bedingungen vorliegen.

Es ist daher die ortsgleiche Messung von nächtlicher Globalstrahlung (mit Lightmetern) und Luftgütefaktoren erforderlich, um die Normierungen auf Standardbedingungen mit hoher Genauigkeit vornehmen zu können.

Diese sind bereits in technischer Vorbereitung, konnten für die vorliegende Studie aber noch nicht in Betrieb genommen werden. Ein wesentlicher Schritt in diese Richtung sind die gemeinsam mit der ZAMG begonnenen Messungen auf der Hohen Warte in Wien. Aber auch kombinierte Messungen mit den Tages-Globalstrahlungsmessgeräten der MA 22 wären eine wichtige Erweiterung.

10.5 Vom Trend zum Entwicklungstyp – Nachweis der Lichtwende

In den normierten Entwicklungen der Einzelstationen beginnen sich Strukturen der Lichtentwicklung abzuzeichnen. Die jahreszeitlichen Variationen treten durch die lange Zeitbasis von 11 Jahren in ihrer Wiederholung

nun sehr deutlich hervor. Die Art, wie sich die Globalstrahlungswerte langfristig entwickeln, wird dadurch der Analyse deutlich besser zugänglich gemacht.

Die nächsten Verbesserungen, vor allem in den extrem hellen urbanen Lagen in denen die (verschwindenden) natürlichen Lichtrhythmen nicht mehr gut zu erfassen sind wird die Verfeinerung unterhalb der Monatsstichproben bringen. Auch gemischte Stichproben – etwa Monatsmediane der Schaltzeiten oder beispielsweise Ruhezeiten (22:00 bis 06:00 Uhr) würden dadurch zugänglich. Das ist erforderlich, um die Globalstrahlungsschwankungen an solchen Orten besser zu kontrollieren, wo die Beleuchtungsschaltzyklen und künstlichen Veränderungen der gemessenen Globalstrahlung die natürlichen Effekte (Mond, etc.) so stark überdecken, dass die Monatsmediane durch Schaltprozesse ihre Prägnanz verlieren. Derzeit wäre dieses Problem nur mit einer aufwändigen Analyse der Lichtverteilungen operativ behandelbar.

Der im Zuge dieser Studie festgestellte Abwärtstrend im Zentrum Wiens ist robust belegt, allerdings sind derzeit die realen kurzfristigen Schwankungen derart hoch, dass es für unterschiedliche Uhrzeiten, oder in Bezug auf Teilnachtschaltungsperioden ein sehr unterschiedliches Verhalten geben wird. Eine erste Pilot-Analyse für den Fall der Station KUST (Kuffner-Sternwarte) hat einen deutlichen Unterschied zwischen der Zehnjahres-Entwicklung vor und nach Mitternacht gezeigt. Auch in diesem Bereich sind weitere Untersuchungen anzustreben, um langfristige Trends präziser erkennen zu können.

Bildnachweis:

- Abb. 1: G. Wuchterl
- Abb. 2: M. Reithofer
- Abb. 3: www.foto-webcam.eu
- Abb. 4: www.foto-webcam.eu
- Abb. 5: G. Wuchterl
- Abb. 6: G. Wuchterl/M. Reithofer
- Abb. 7: M. Reithofer
- Abb. 8: Wien Energie-FOTObyHOFER
- Abb. 9: ViennaGIS
- Abb. 10: ViennaGIS
- Abb. 11: M. Reithofer
- Abb. 12: G. Wuchterl
- Abb. 13 bis 18: M. Reithofer
- Abb. A1 bis A36: M. Reithofer
- Abb. B1 bis B12: M. Reithofer
- Abb. C1 bis B18: M. Reithofer

GLOSSAR

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 Lichtimmission 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 $[\mu W/m^2]$ oder dem dekadischen Logarithmus daraus, $\log [\mu W/m^2]$.

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.

Kunstlichthalo:

Durch optische Effekte wie Streuung, Reflexion und Extinktion in der Atmosphäre über und rund um ein künstlich beleuchtetes Gebiet entstehende Aufhellung.

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.

Schwefeldioxid (SO₂):

Konzentration des Gases Schwefeldioxid in $[\mu g/m^3]$ in der Luft.

Ozon (O₃):

Konzentration des Gases Ozon in $[\mu g/m^3]$ in der Luft.

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

Verlauf der Monatsmediane der Globalstrahlungen bei Normierung mit je einem Luftgütefaktor

Während auf Seite 22 für jede Lichtmessstation ein Vergleich der originalen Globalstrahlungsdaten klarer mondloser Nächte mit den multinormierten Werten (Mittelwert aus den Korrekturen von relativer und absoluter Luftfeuchtigkeit sowie PM10 und PM2,5) zu sehen ist, zeigen wir auf den folgenden Seiten die Ergebnisse für die Normierung auf jeweils nur einen Luftgütefaktor. Die unterschiedlichen Effekte der einzelnen Faktoren sind damit ersichtlich.

Dargestellt ist jeweils der dekadische Logarithmus der originalen (grün) und der auf einen Luftgütefaktor normierten (violett) Monatsmediane der Globalstrahlungen gegen das Datum. Die Diagramme sind nach dem Abstand der Stationen zu Wien-Zentrum geordnet. Zunächst sind die Feinstaubindikatoren PM10 und PM2,5 angeführt, dann die relative und absolute Luftfeuchtigkeit und abschließend die vergleichsweise geringen (und in der Multinormierung daher nicht berücksichtigten) Effekte der Gase Schwefeldioxid und Ozon. Die unterschiedlichen Effekte einer Normierung auf die drei Lichtmessstationen können jeweils auf einer Doppelseite verglichen werden.

Wien, Zentrum, Globalstrahlung: Normierung auf 20 µg/m³ PM10

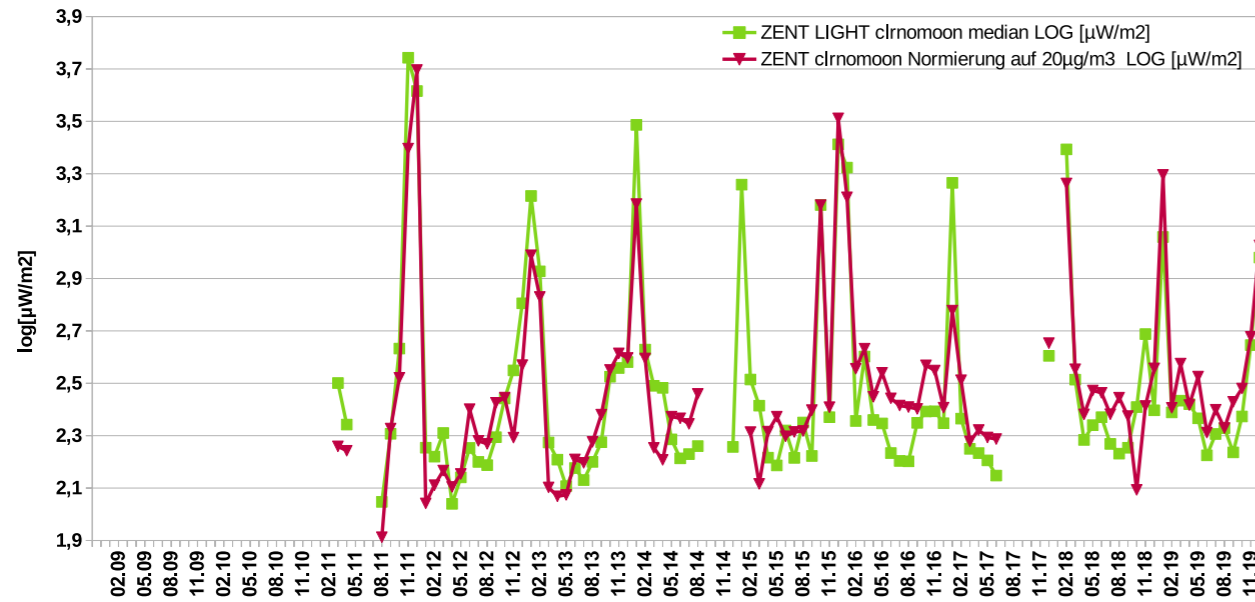


Abb. C1: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] in Wien Zentrum mit den auf 20 µg/m³ PM10 normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl, Globalstrahlung: Normierung auf 20 µg/m³ PM10

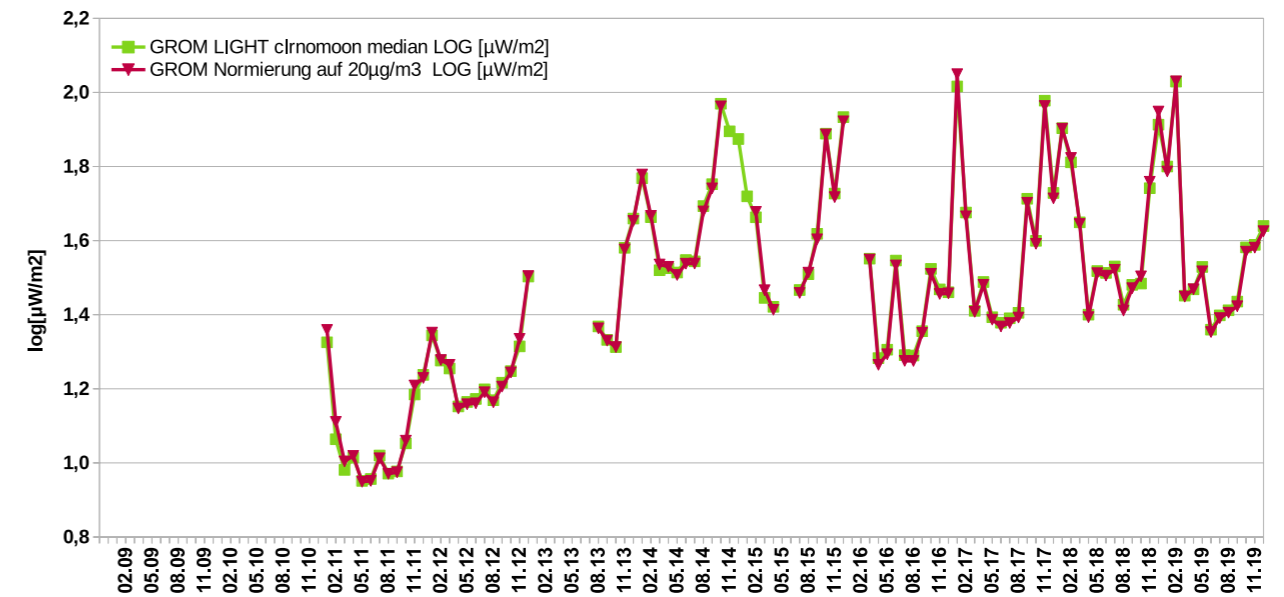


Abb. C3: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] in Großmugl mit den auf 20 µg/m³ PM10 normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte, Globalstrahlung: Normierung auf 20 µg/m³ PM10

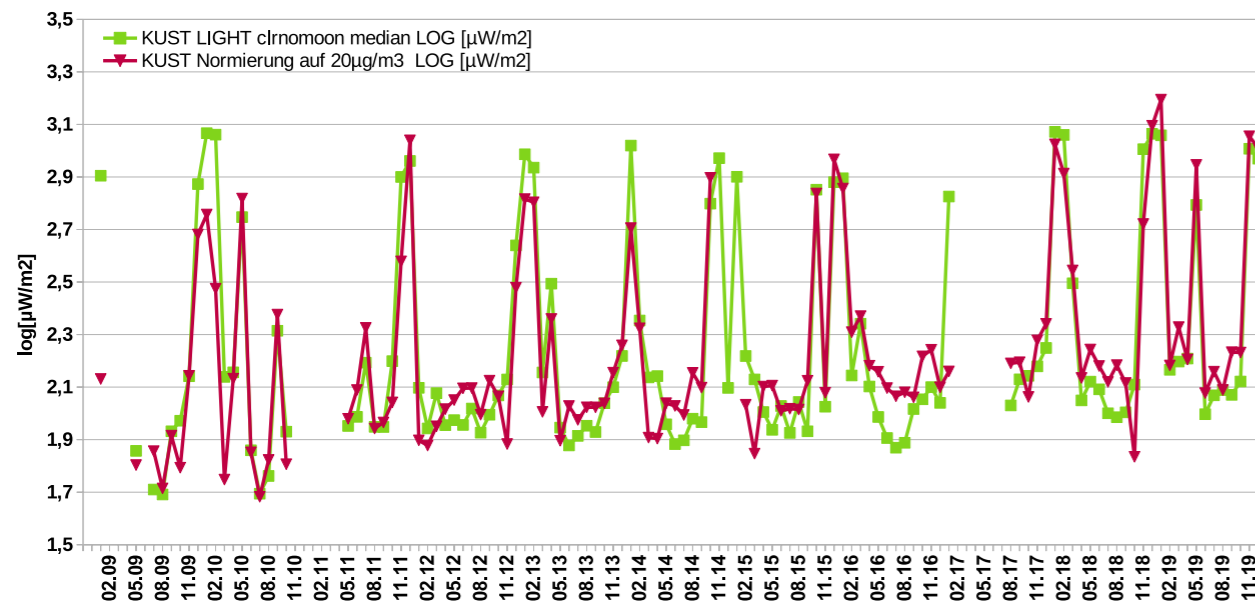


Abb. C2: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] auf der Kuffner-Sternwarte mit den auf 20 µg/m³ PM10 normierten Globalstrahlungen (violett) von 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Wien, Zentrum, Globalstrahlung: Normierung auf 20 µg/m³ PM_{2,5}

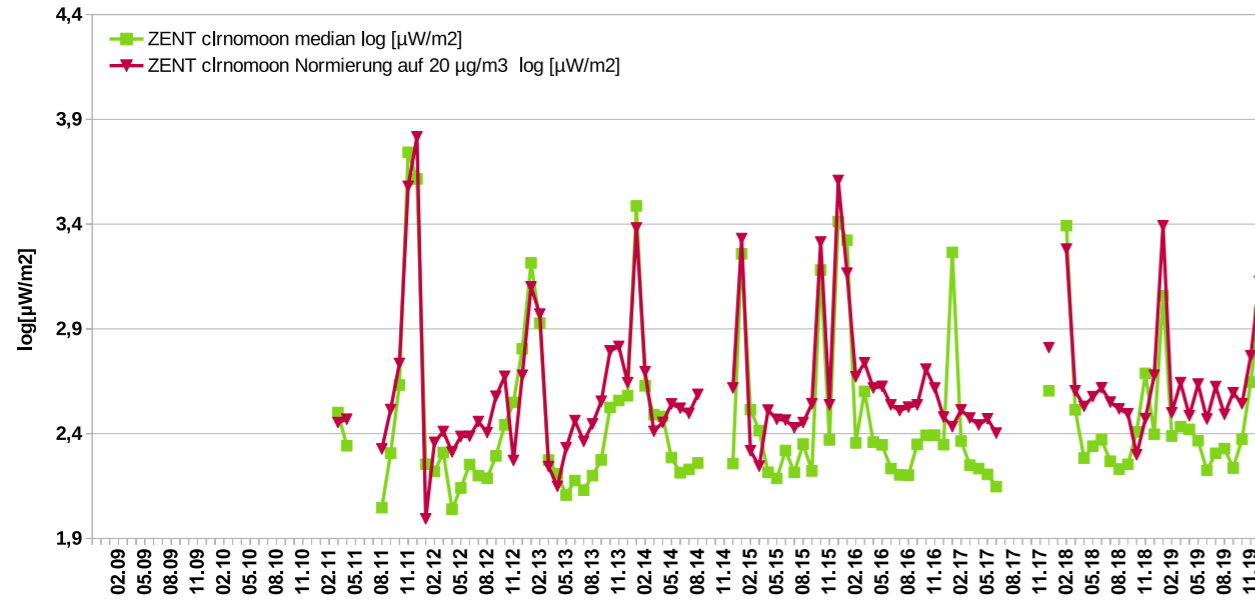


Abb. C4: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] in Wien Zentrum mit den auf 20 µg/m³ PM_{2,5} normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl, Globalstrahlung: Normierung auf 20 µg/m³ PM_{2,5}

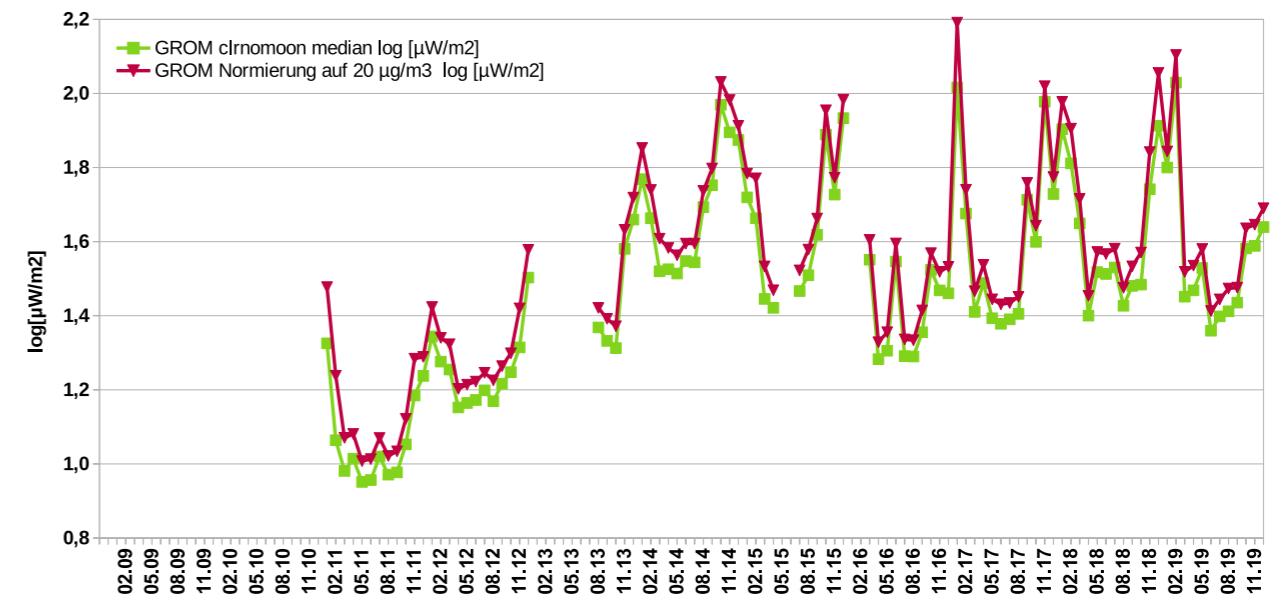


Abb. C6: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] in Großmugl mit den auf 20 µg/m³ PM_{2,5} normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte, Globalstrahlung: Normierung auf 20 µg/m³ PM_{2,5}

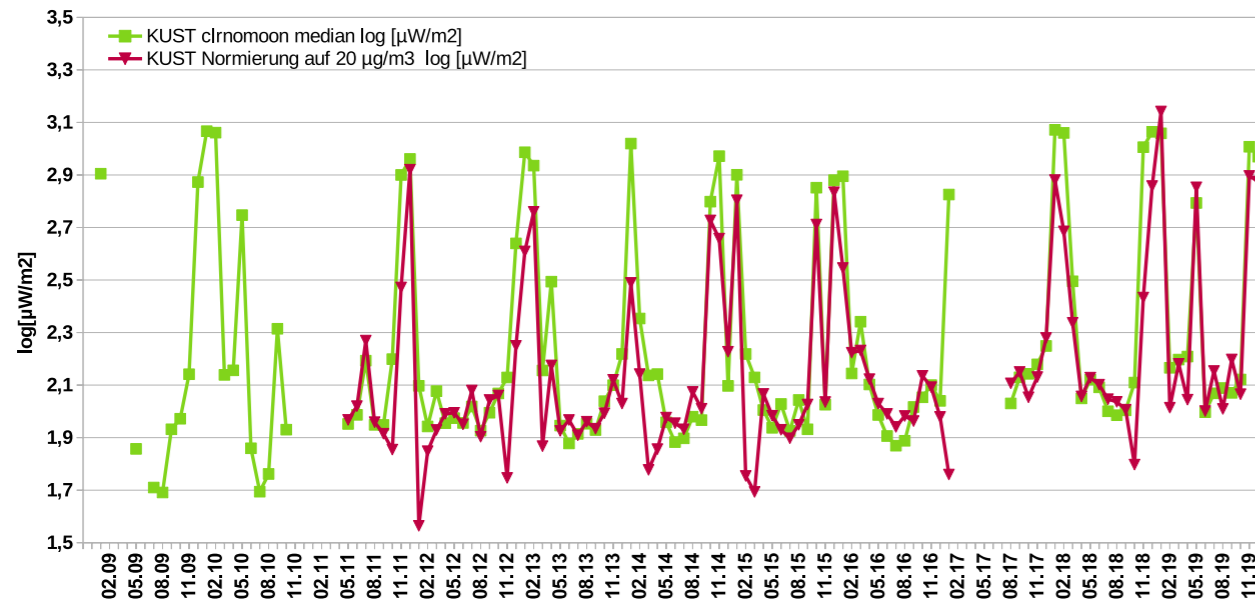


Abb. C5: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] auf der Kuffner-Sternwarte mit den auf 20 µg/m³ PM_{2,5} normierten Globalstrahlungen (violett) von 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Wien, Zentrum, Globalstrahlung: Normierung auf 70 % rel. Luftfeuchtigkeit

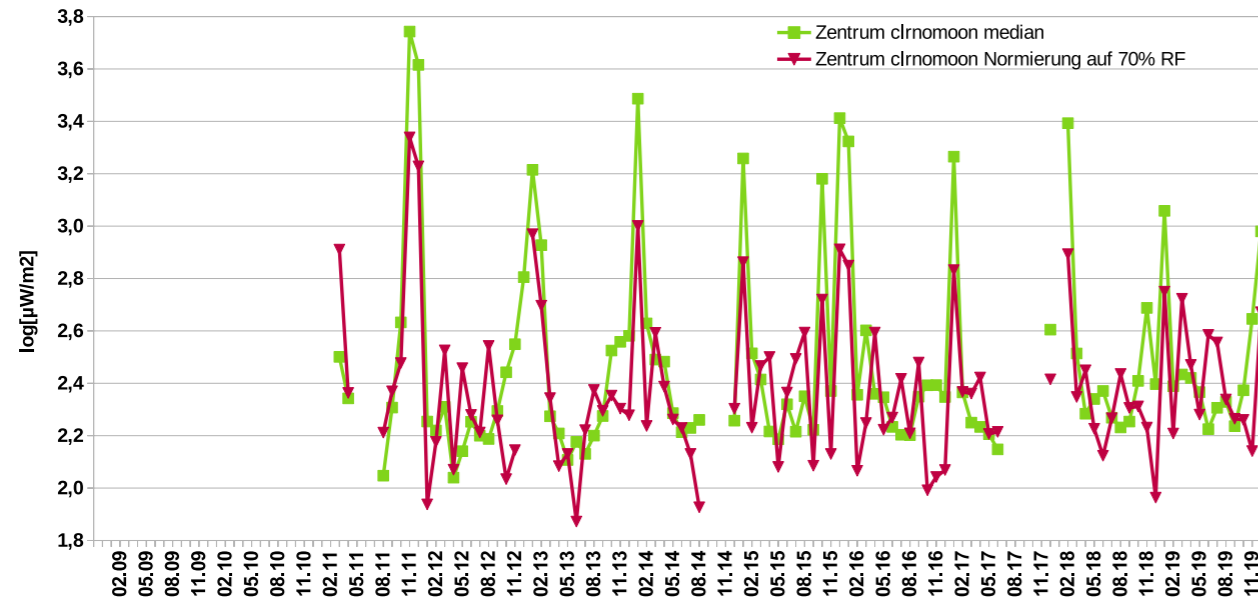


Abb. C7: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in $\log[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum mit den auf 70 % relative Luftfeuchtigkeit normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl, Globalstrahlung: Normierung auf 70 % rel. Luftfeuchtigkeit

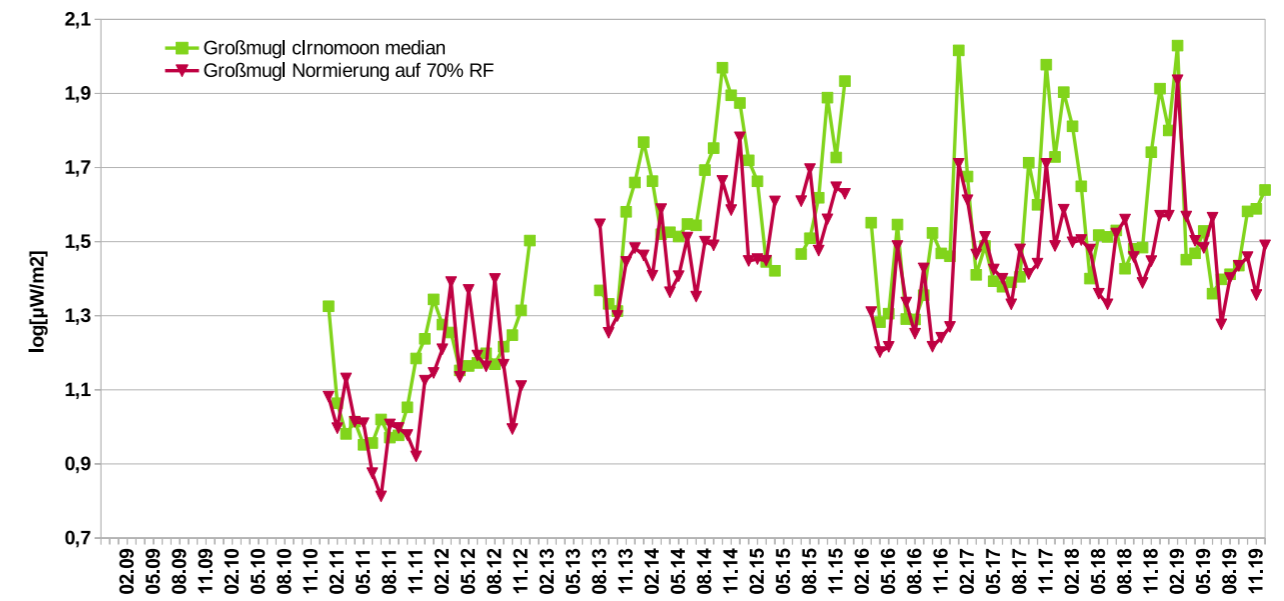


Abb. C9: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in $\log[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Großmugl mit den auf 70 % relative Luftfeuchtigkeit normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte, Globalstrahlung: Normierung auf 70 % rel. Luftfeuchtigkeit

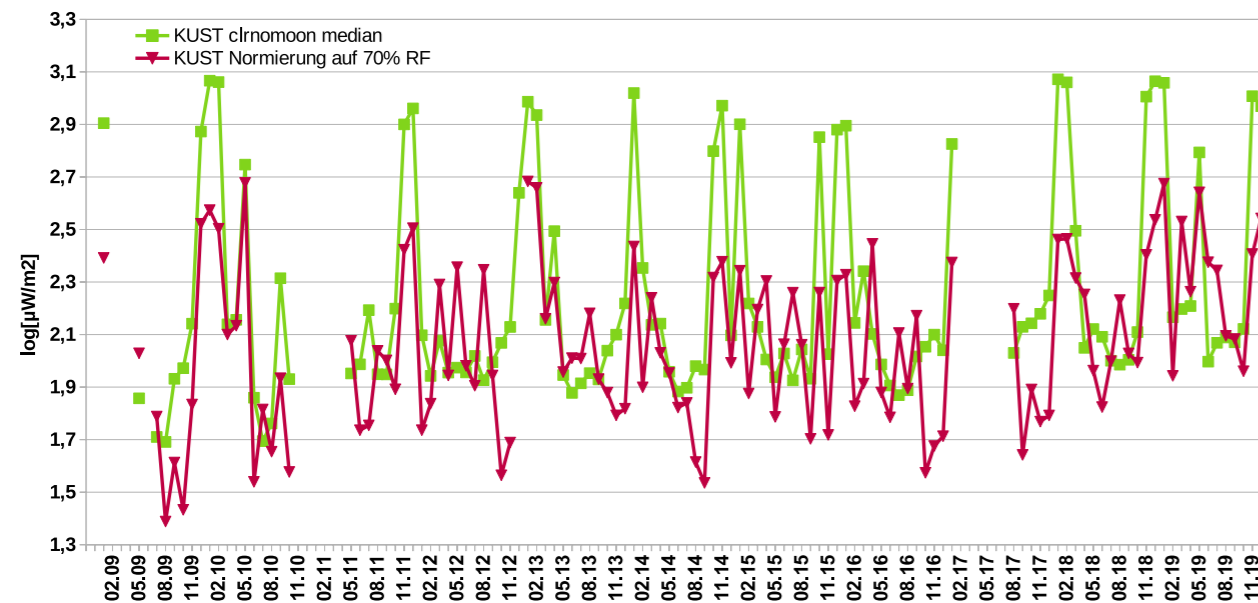


Abb. C8: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in $\log[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ auf der Kuffner-Sternwarte mit den auf 70 % relative Luftfeuchtigkeit normierten Globalstrahlungen (violett) von 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Wien, Zentrum, Globalstrahlung: Normierung auf 8 g/m3 abs. Luftfeuchtigkeit

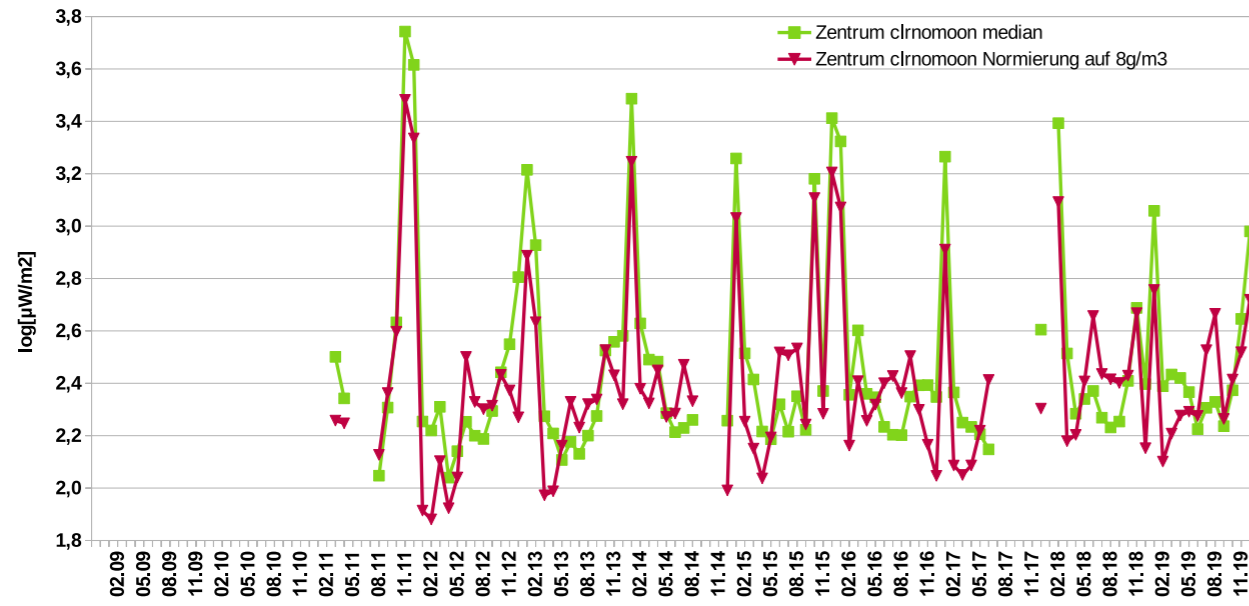


Abb. C10: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in $\log[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum mit den auf 8 g/m³ absolute Luftfeuchtigkeit normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl, Globalstrahlung: Normierung auf 8 g/m3 abs. Luftfeuchtigkeit

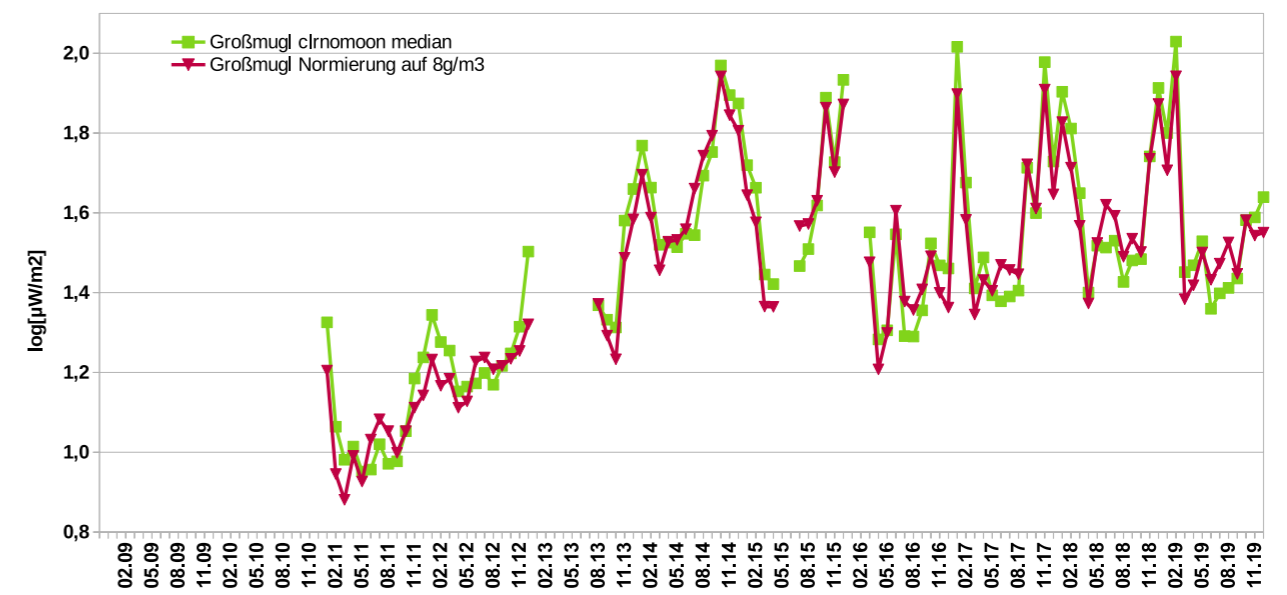


Abb. C12: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in $\log[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Großmugl mit den auf 8 g/m³ absolute Luftfeuchtigkeit normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte, Globalstrahlung: Normierung auf 8 g/m3 abs. Luftfeuchtigkeit

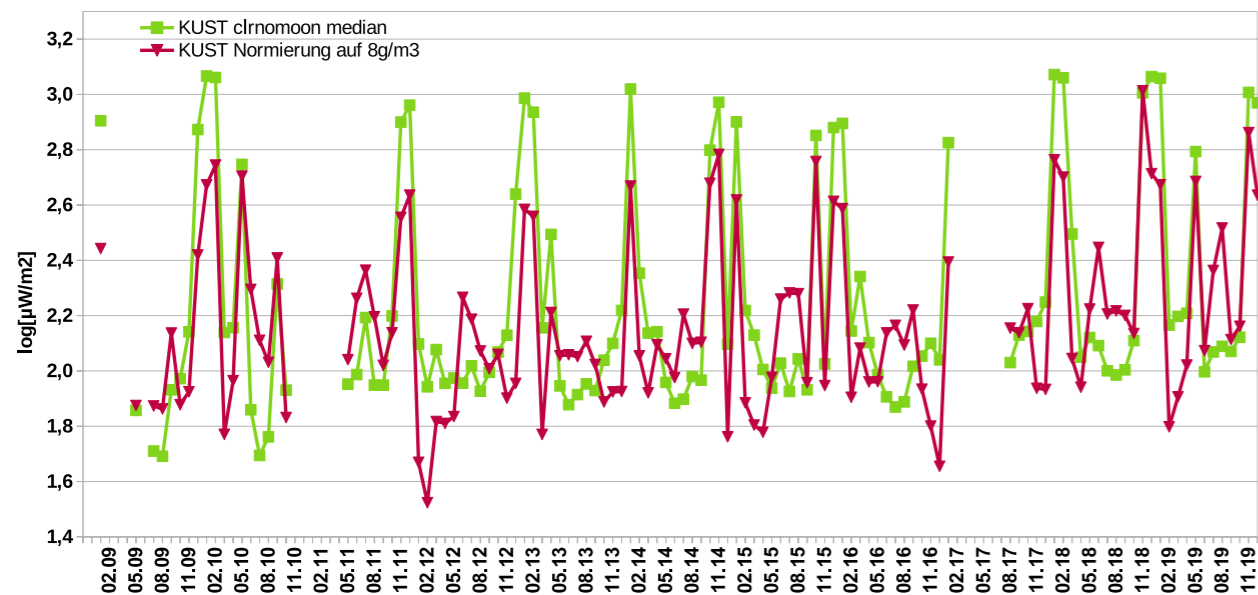


Abb. C11: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in $\log[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ auf der Kuffner-Sternwarte mit den auf 8 g/m³ absolute Luftfeuchtigkeit normierten Globalstrahlungen (violett) von 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Wien, Zentrum, Globalstrahlung: Normierung auf 4 µg/m3 SO2

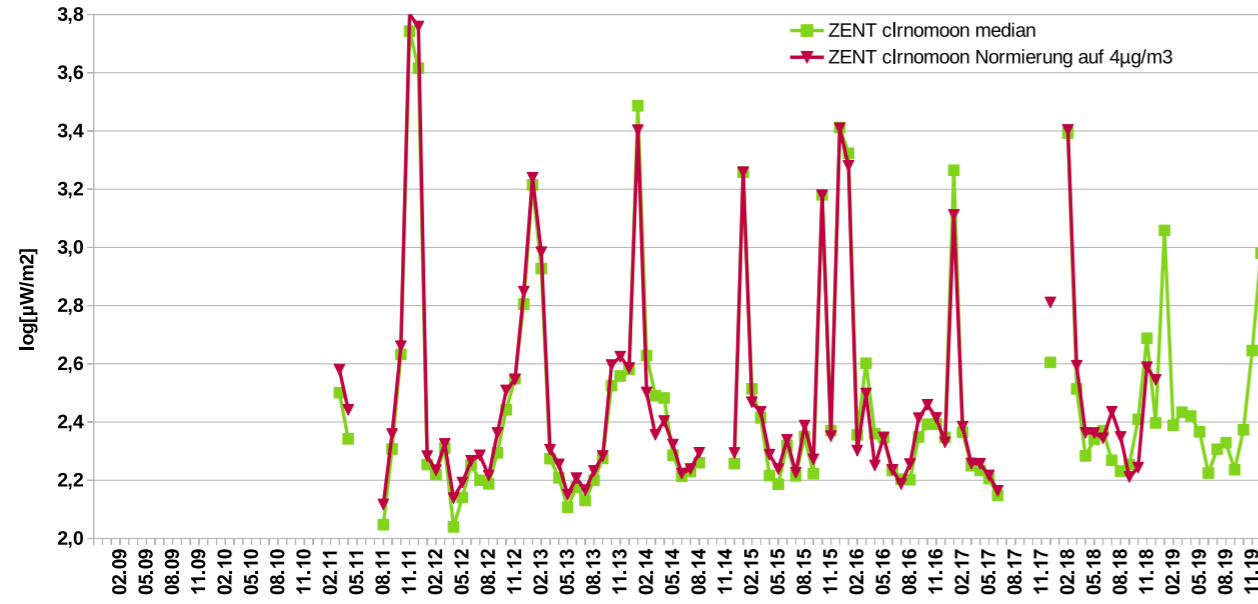


Abb. C13: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] in Wien Zentrum mit den auf 4 µg/m³ Schwefeldioxid normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl, Globalstrahlung: Normierung auf 4 µg/m3 SO2

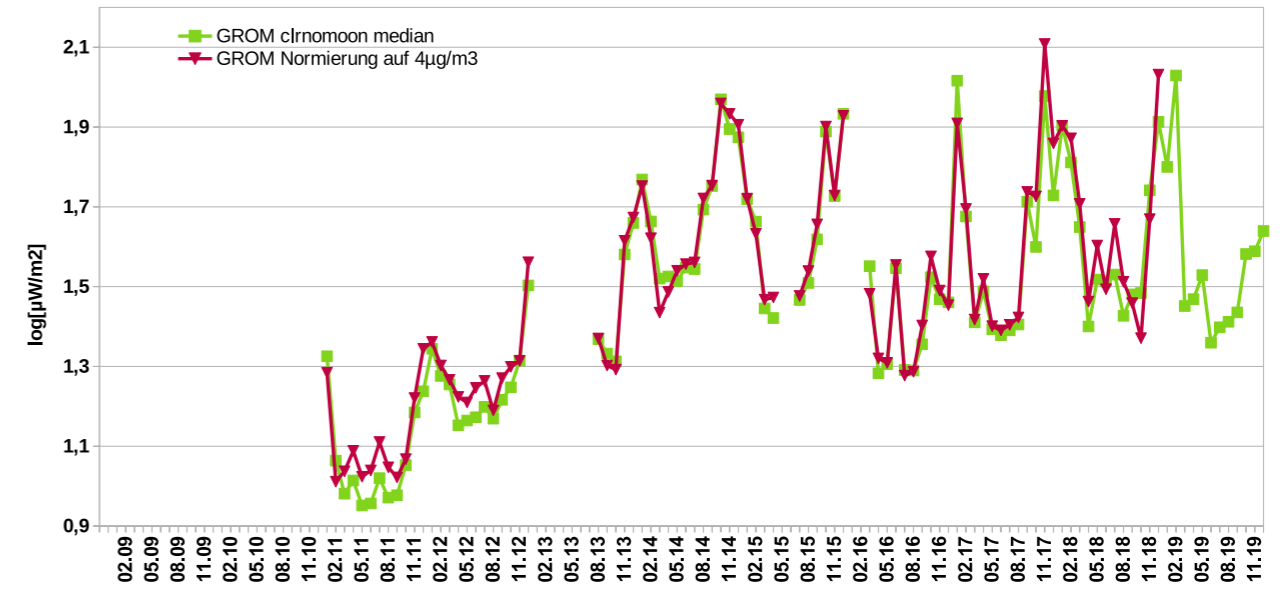


Abb. C15: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] in Großmugl mit den auf 4 µg/m³ Schwefeldioxid normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte, Globalstrahlung: Normierung auf 4 µg/m3 SO2

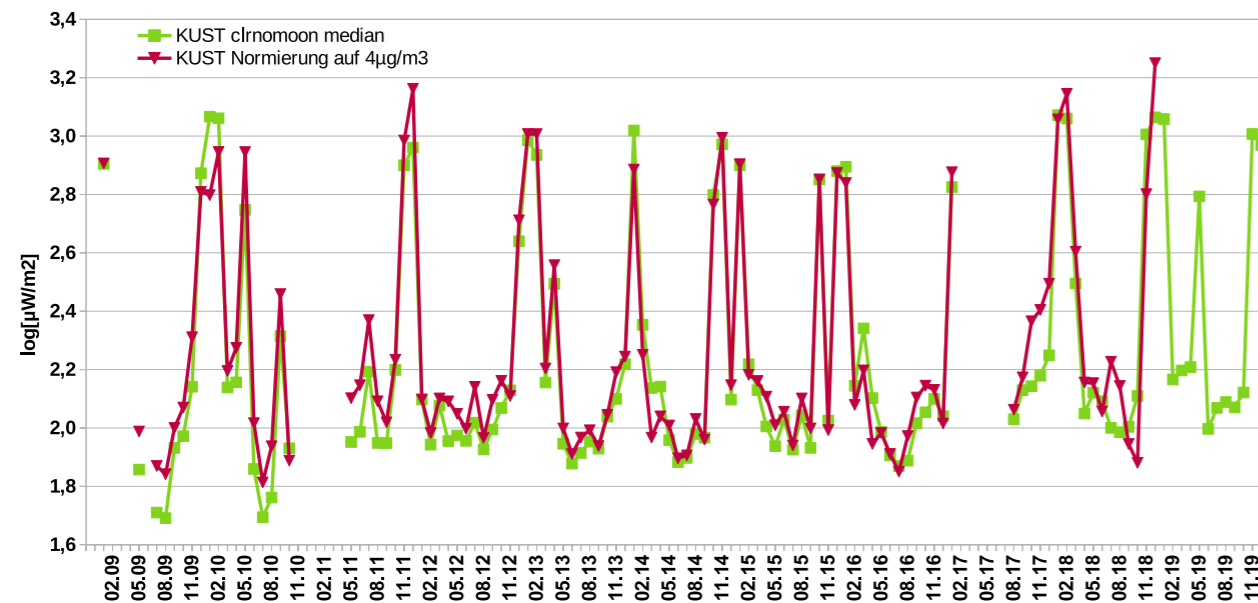


Abb. C14: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] auf der Kuffner-Sternwarte mit den auf 4 µg/m³ Schwefeldioxid normierten Globalstrahlungen (violett) von 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Wien, Zentrum, Globalstrahlung: Normierung auf 40 µg/m3 Ozon

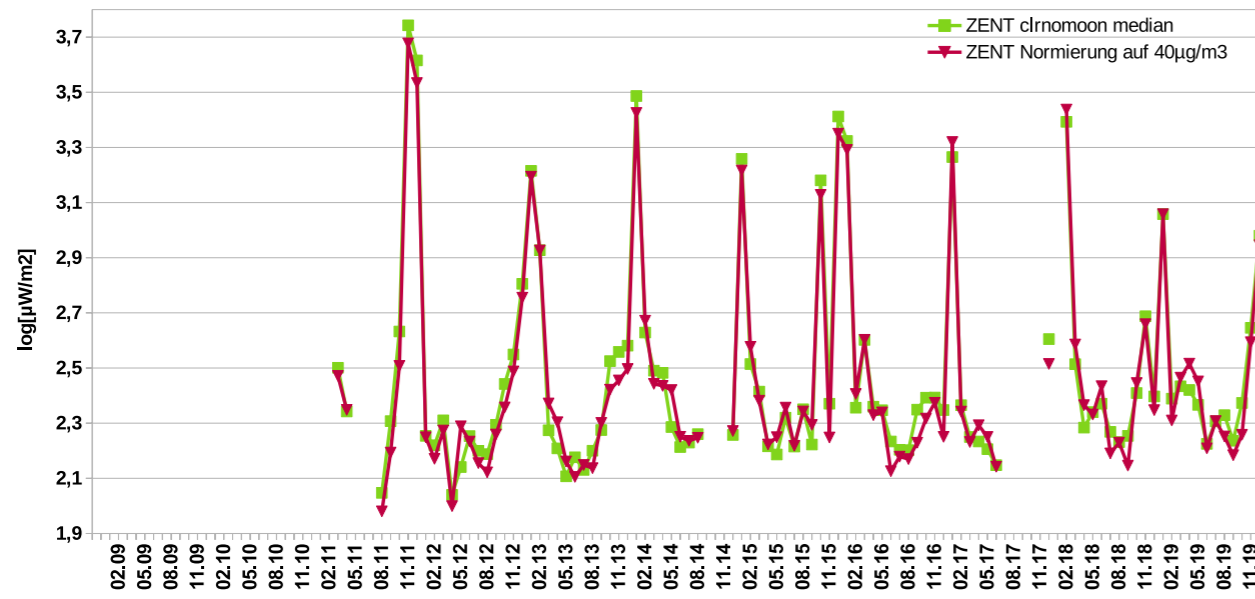


Abb. C16: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] in Wien Zentrum mit den auf 40 µg/m³ Ozon normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl, Globalstrahlung: Normierung auf 40 µg/m3 Ozon

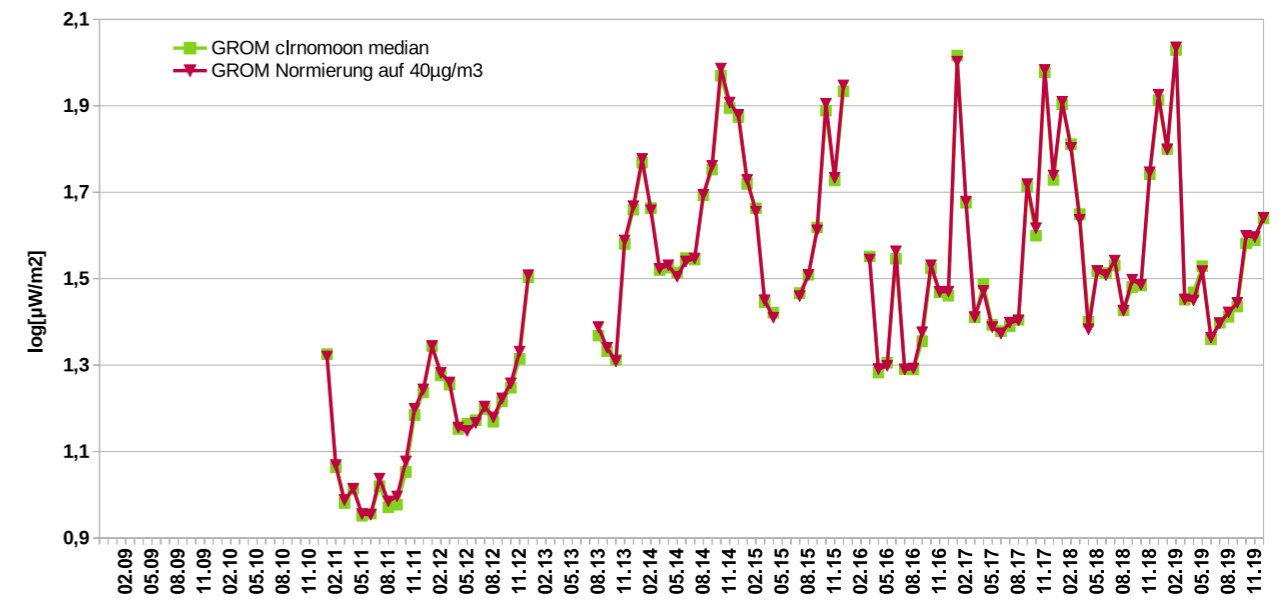


Abb. C18: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] in Großmugl mit den auf 40 µg/m³ Ozon normierten Globalstrahlungen (violett) von 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte, Globalstrahlung: Normierung auf 40 µg/m3 Ozon

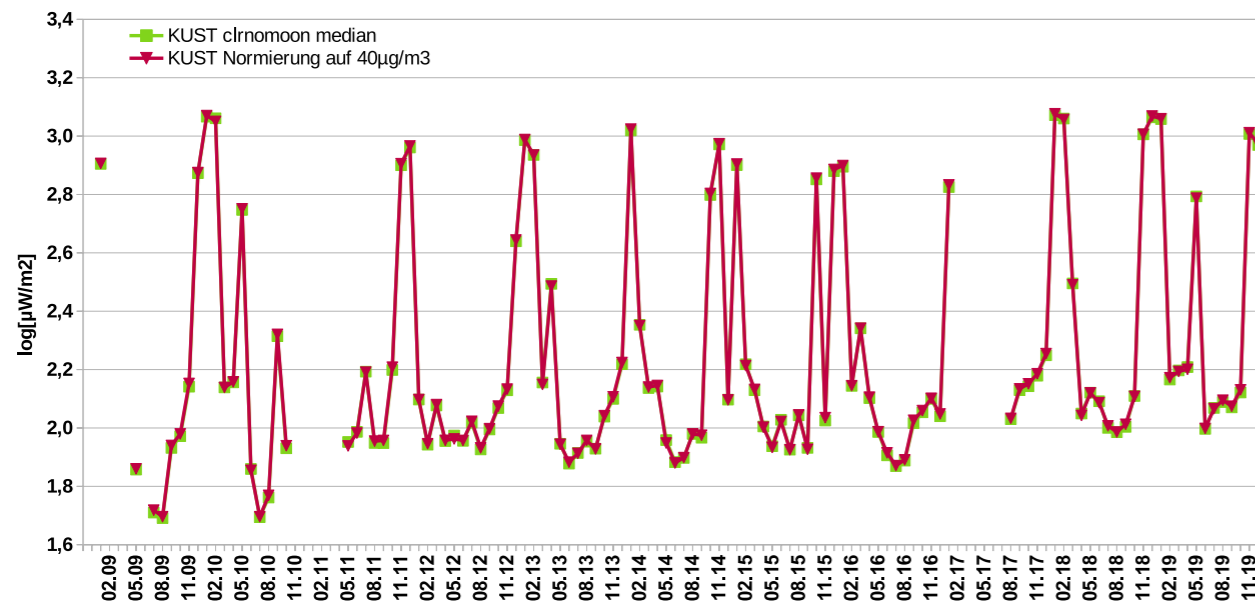


Abb. C17: Vergleich der Globalstrahlungen (grün) in log[µW/m²] auf der Kuffner-Sternwarte mit den auf 40 µg/m³ Ozon normierten Globalstrahlungen (violett) von 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

ANHANG B

DARSTELLUNG DER KORRELATIONEN

Die folgenden Diagramme stellen die Korrelation der Mediane der Luftgütewerte (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 (Logarithmus zur Basis 10) dargestellt.

Die Regressionsgeraden werden mit den angegebenen Gleichungen für die natürlichen Logarithmen (ln) der Globalstrahlungen als unabhängige Variable (x-Achse) angegeben. Auch die Geradengleichung ist für den natürlichen Logarithmus der Globalstrahlung versus dem entsprechenden Luftgütewert angegeben.

Gegenüber den im Lichtbericht des Jahres 2018 nur bis Anfang Dezember des Jahres 2018 reichenden Daten sind in den hier gezeigten Diagrammen die Daten bis Ende Dezember 2019 enthalten und umfassen dieses Jahr daher vollständig.

Die Diagramme sind nach folgendem System geordnet: Feinstaub, Feuchte, Gase. Zuerst Zentrum, dann Kuffner-Sternwarte, dann Großmugl. Blau steht für alle, gelb für klar emondlose Nächte. Am oberen Ende der Seite sind alle Nächte, am unteren die klaren mondlosen zu sehen.

Korrelation Globalstrahlung - PM10, Monatsmediane

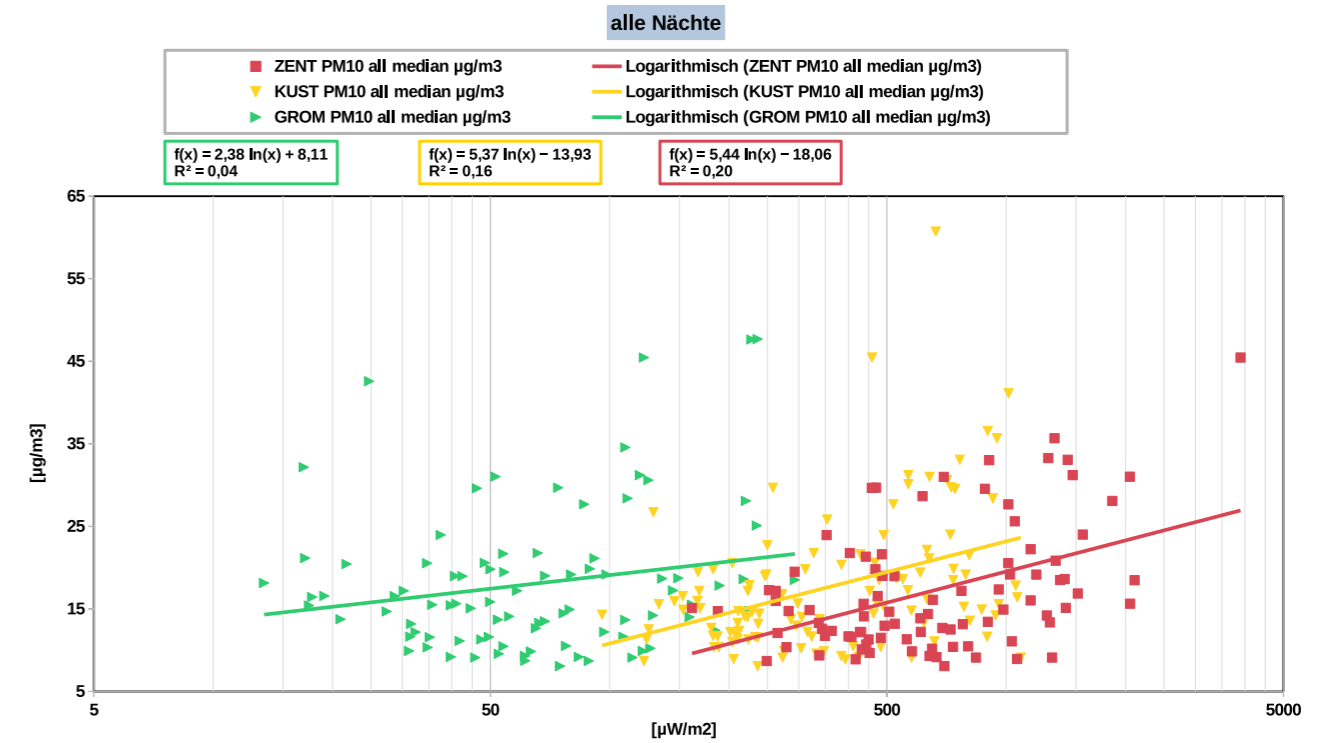


Abb. B1: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in $[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit den PM10-Konzentration in Wien 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - PM10, Monatsmediane

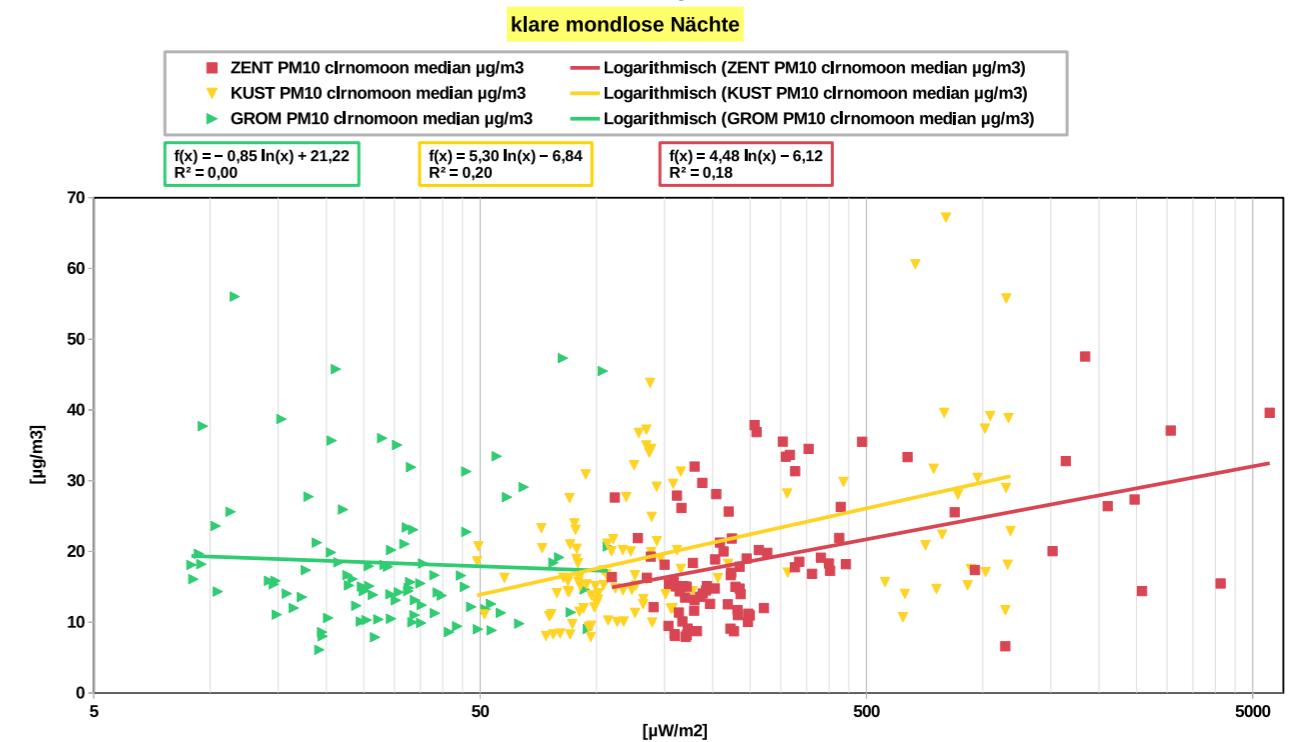


Abb. B2: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in $[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit den PM10-Konzentration in Wien 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - PM25, Monatsmediane

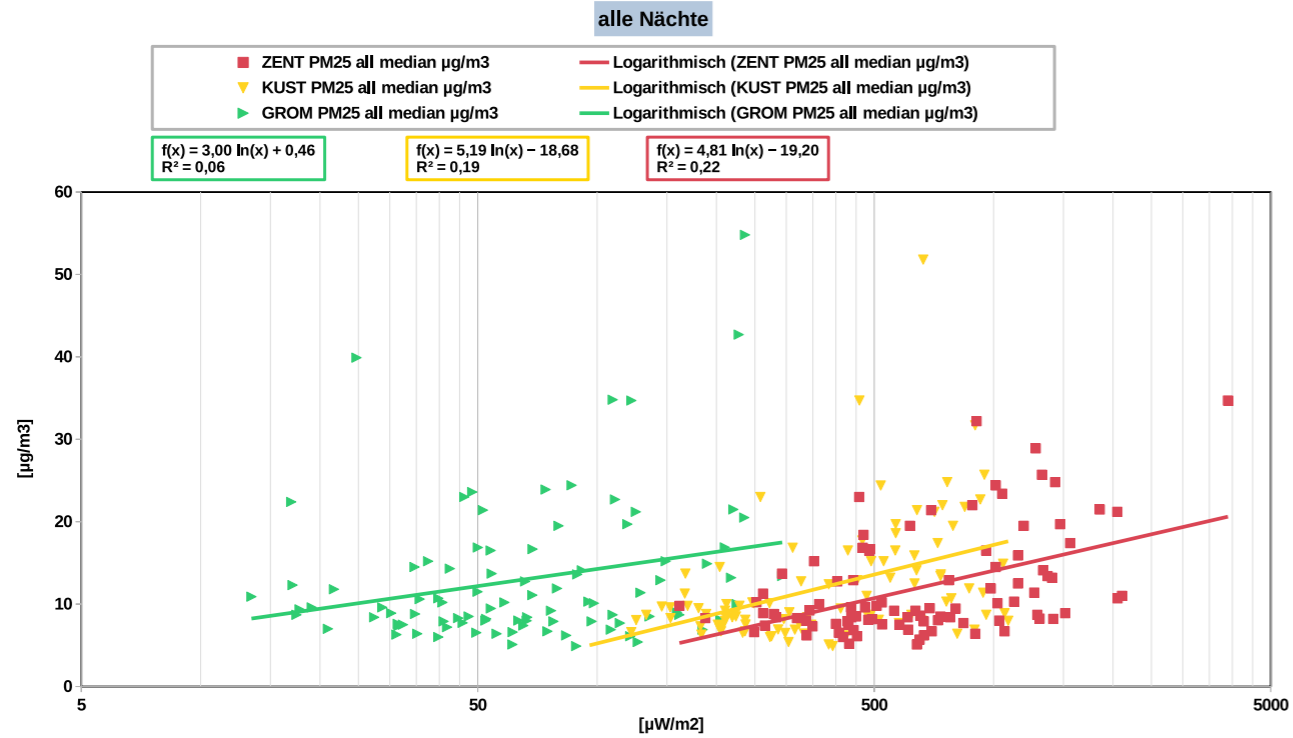


Abb. B3: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit den PM_{2,5}-Konzentration in Wien 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - rel. Luftfeuchtigkeit, Monatsmediane

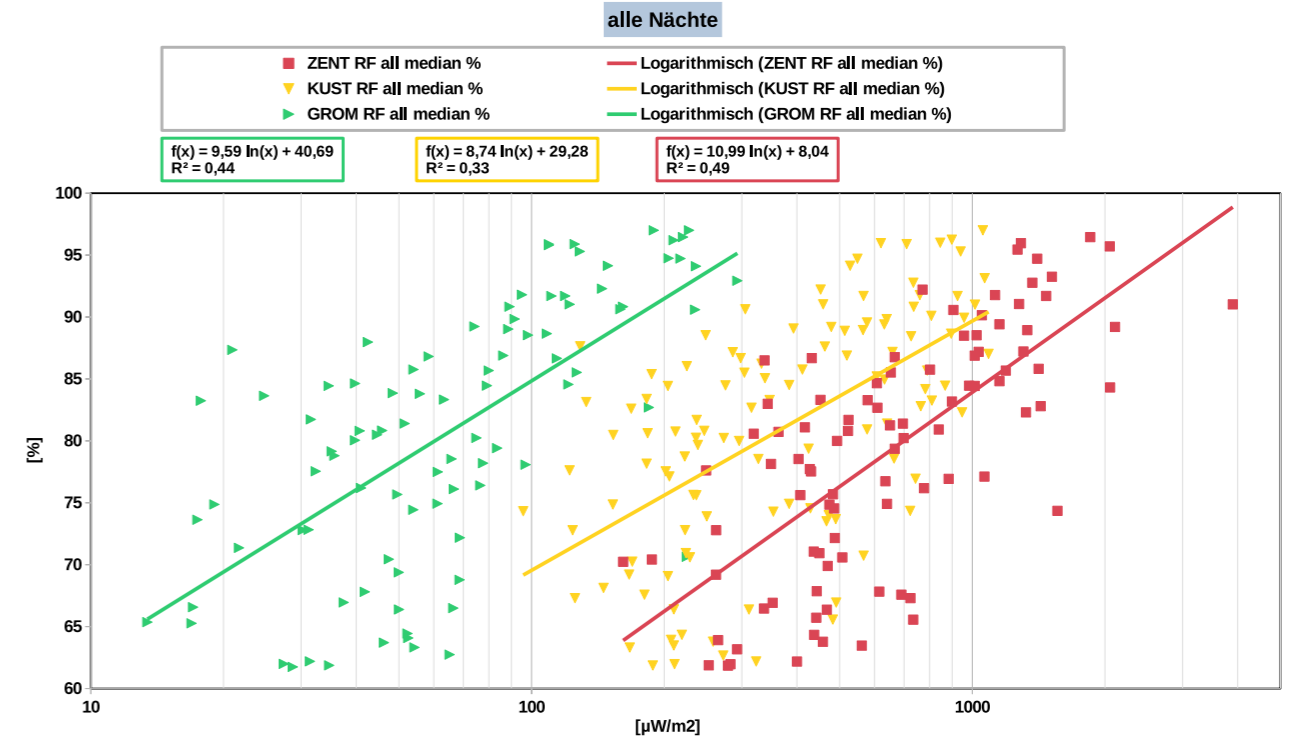


Abb. B5: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - PM25, Monatsmediane

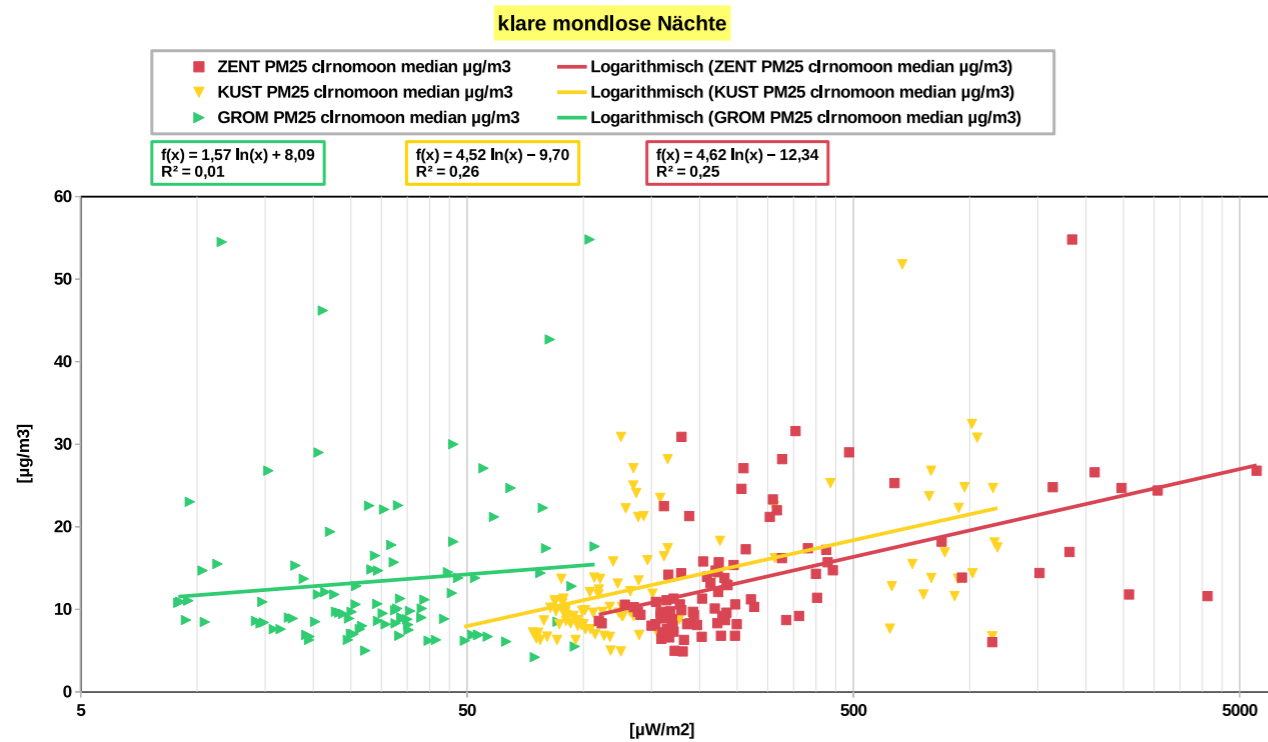


Abb. B4: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit den PM_{2,5}-Konzentration in Wien 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - rel. Luftfeuchtigkeit, Monatsmediane

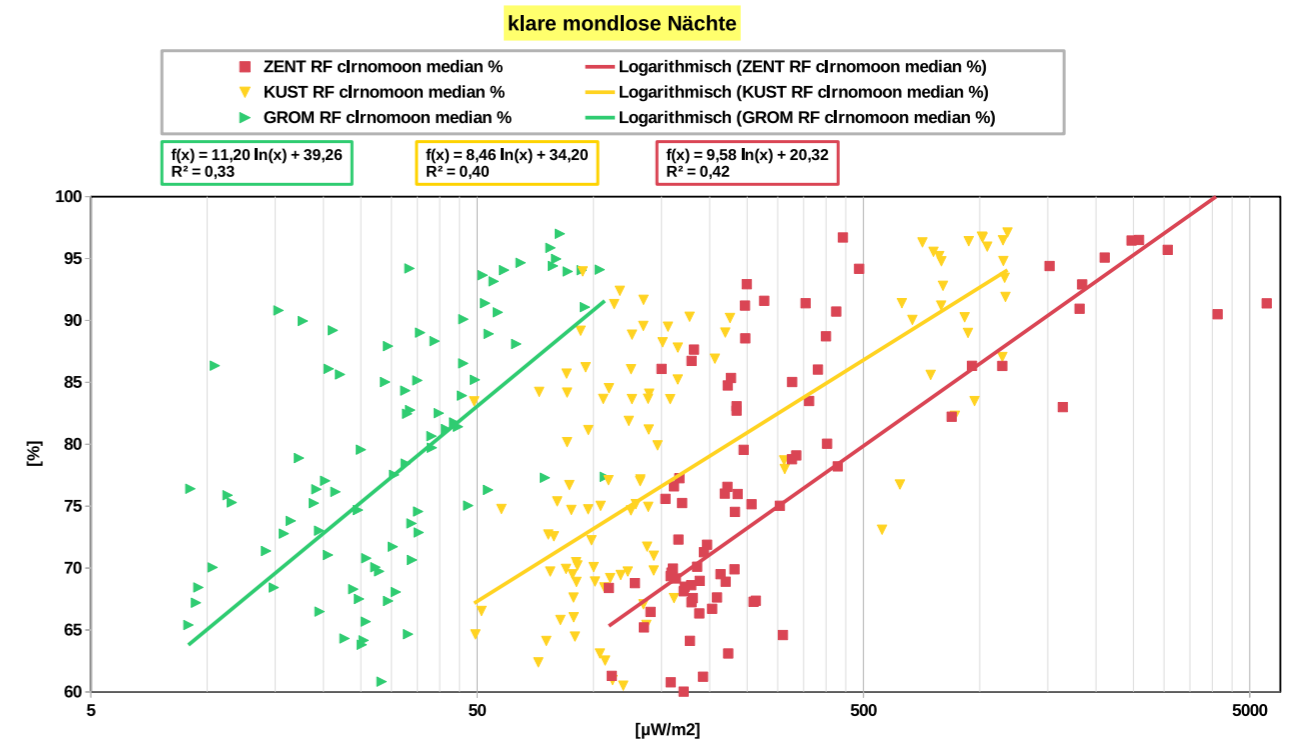


Abb. B6: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - abs. Luftfeuchtigkeit, Monatsmediane

alle Nächte

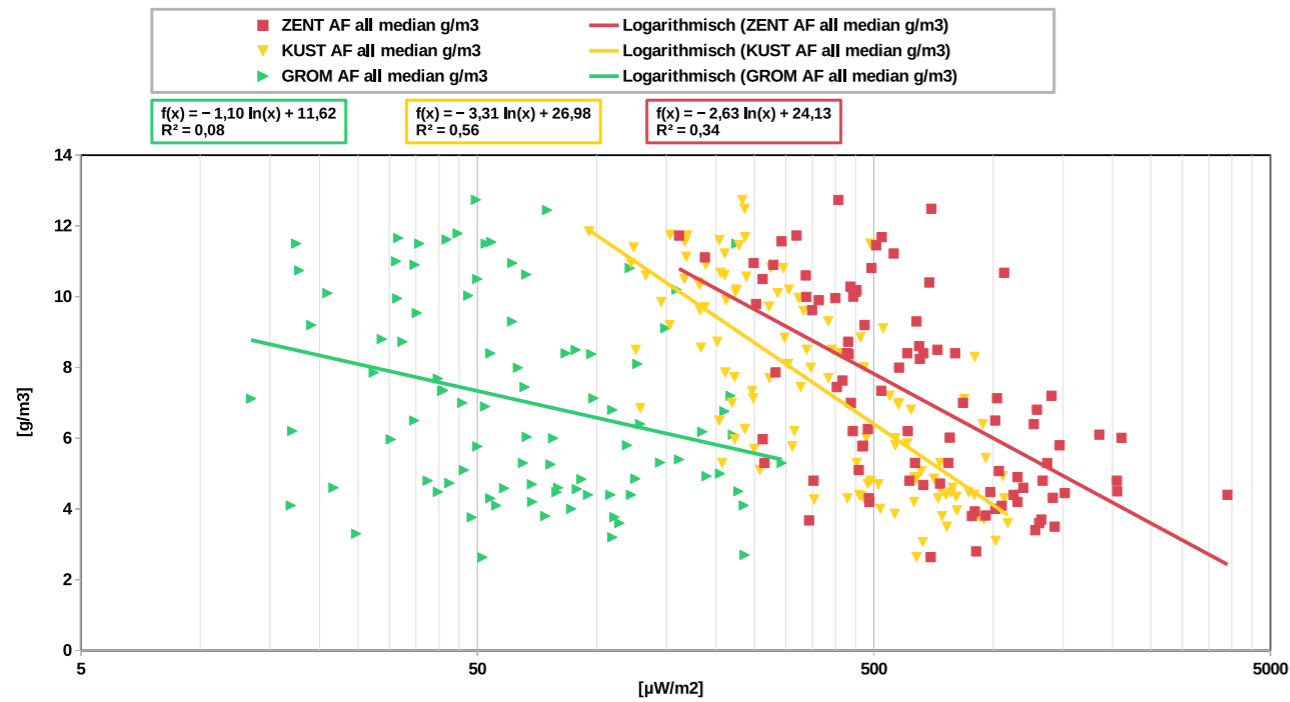


Abb. B7: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in $[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien 2016 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - SO2, Monatsmediane

alle Nächte

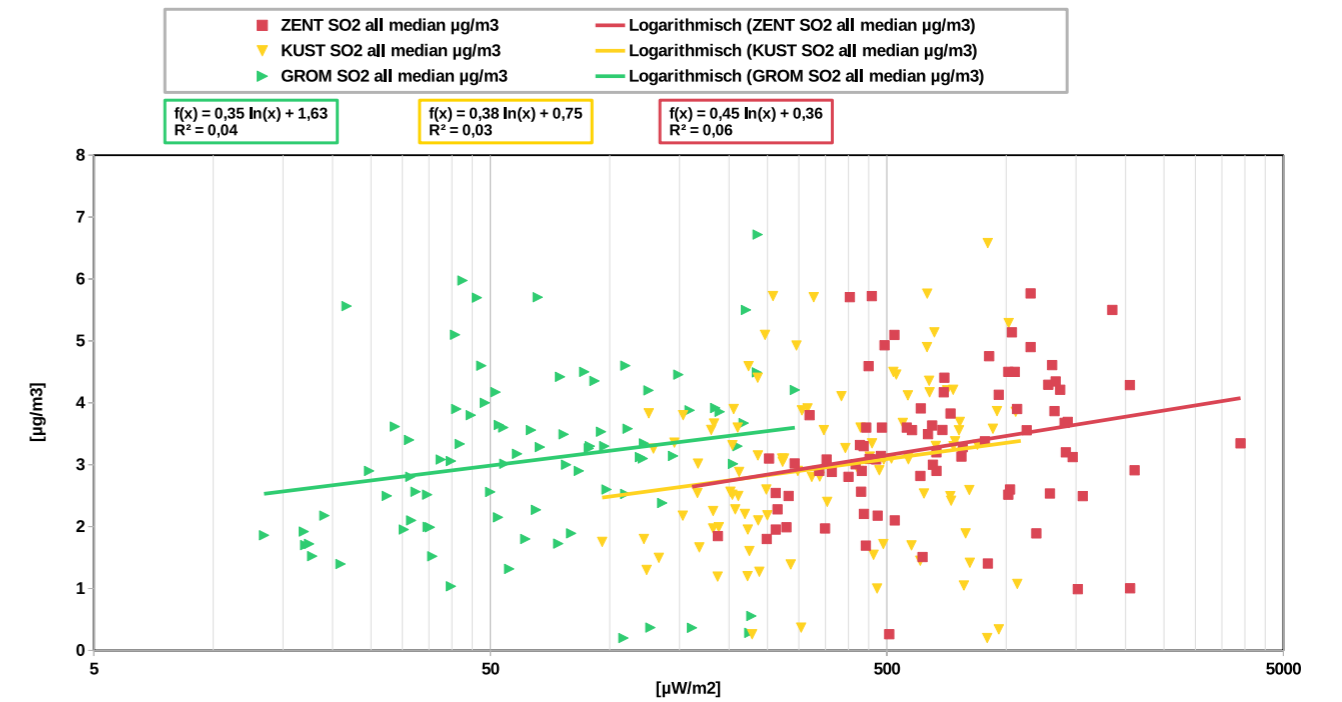


Abb. B9: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in $[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit Schwefeldioxid in Wien 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - abs. Luftfeuchtigkeit, Monatsmediane

klare mondlose Nächte

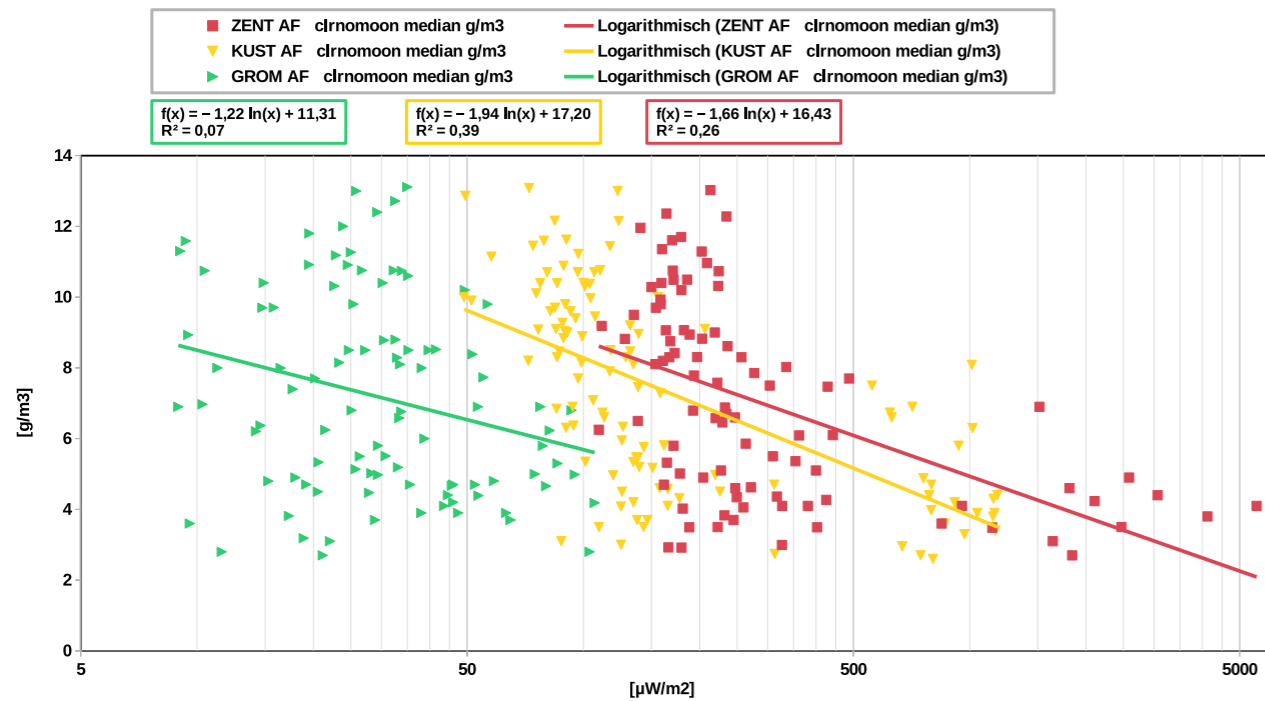


Abb. B8: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in $[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien 2016 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - SO2, Monatsmediane

klare mondlose Nächte

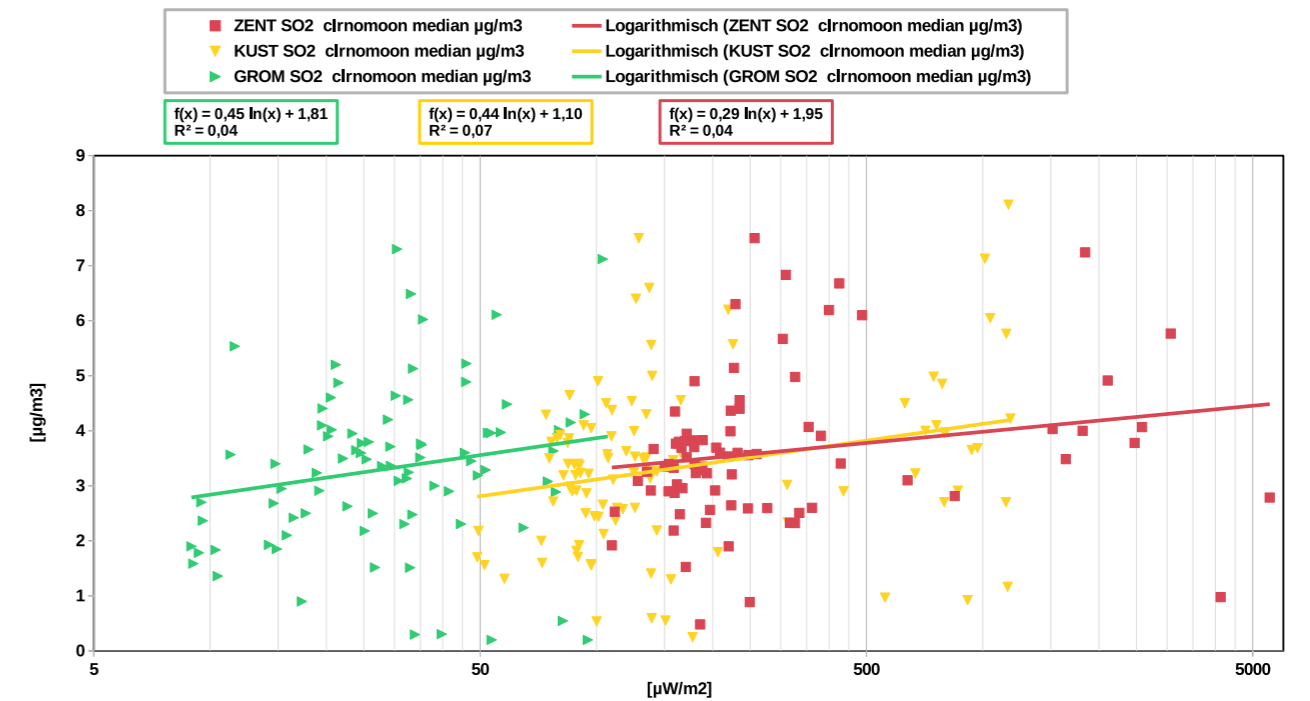


Abb. B10: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in $[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit Schwefeldioxid in Wien 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - Ozon, Monatsmediane

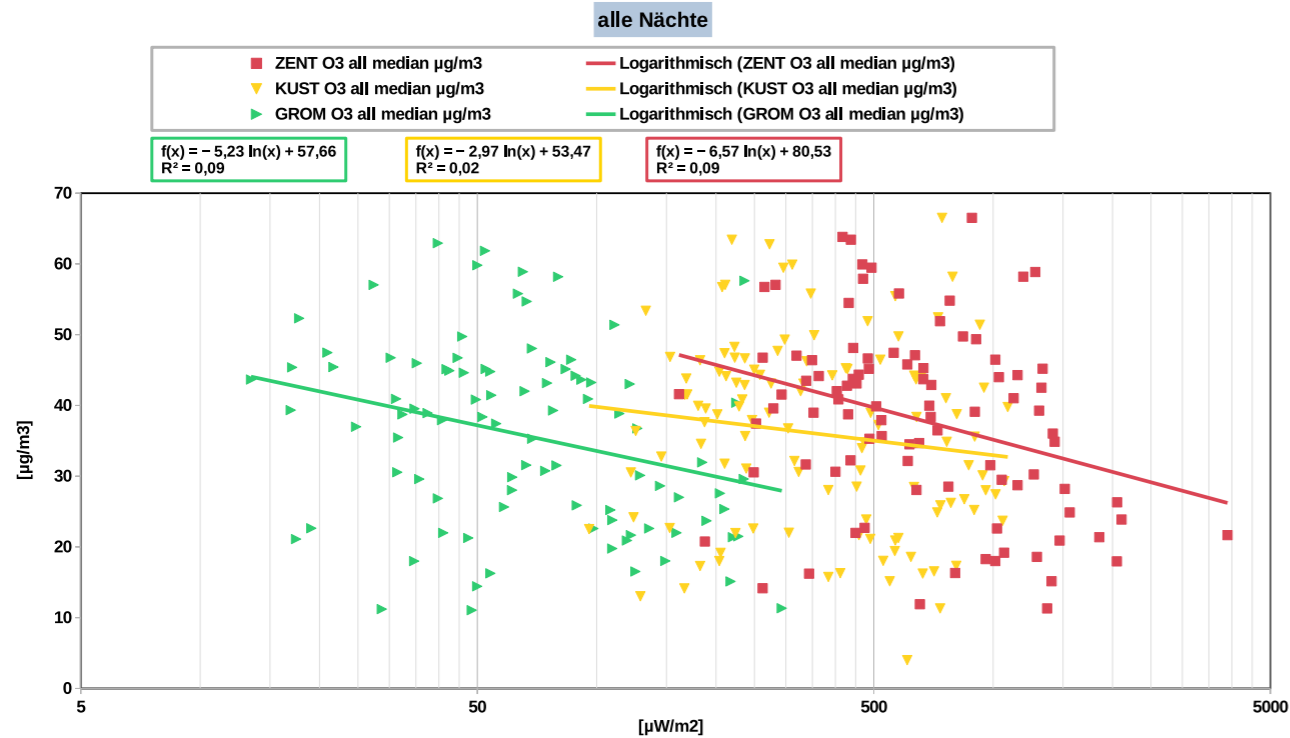


Abb. B11: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in $[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit Ozon in Wien 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Korrelation Globalstrahlung - Ozon, Monatsmediane

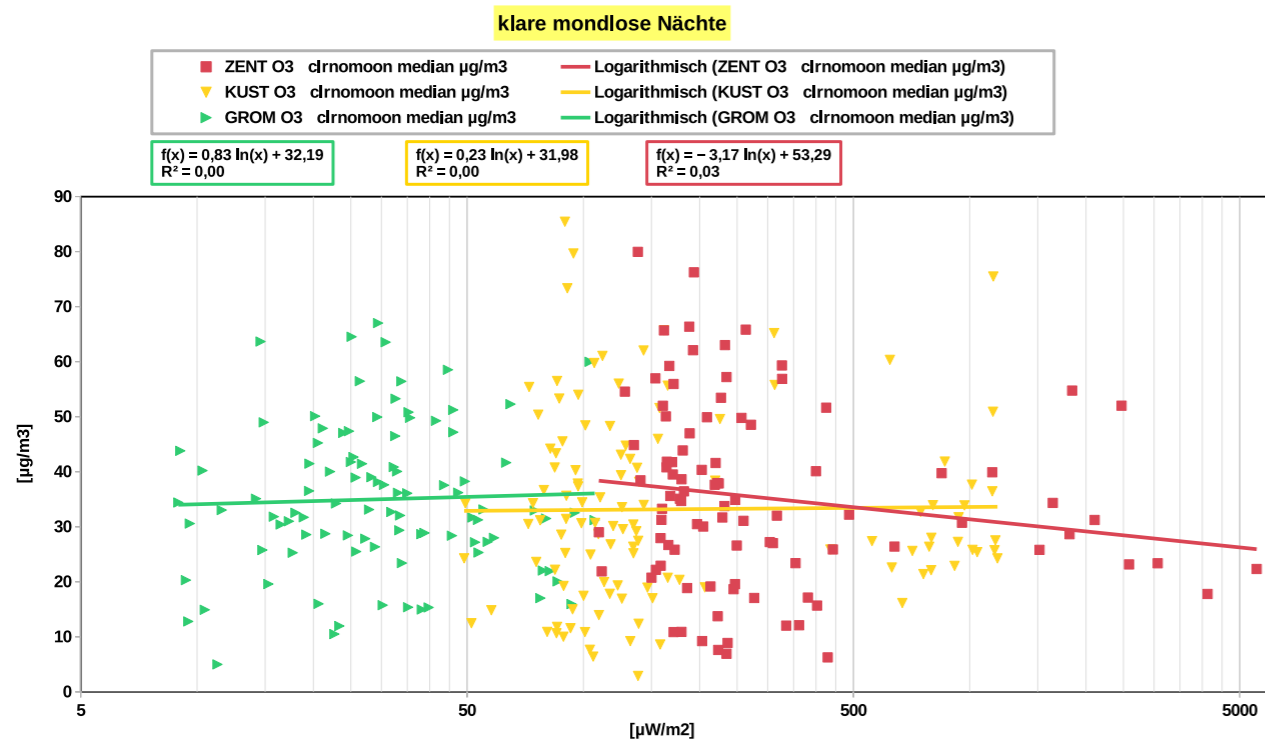


Abb. B12: Korrelation der Globalstrahlungen (x-Achse) in $[\mu\text{W}/\text{m}^2]$ in Wien Zentrum (rot), Kuffner-Sternwarte (gelb) und Großmugl (grün) mit Ozon in Wien 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Vergleich der Korrelationskoeffizienten bei unterschiedlich langer Zeitbasis

Die von uns im Wiener Lichtbericht „Licht über Wien VI“ des Jahres 2018 erstmals angewandten Korrelationsuntersuchungen mit Luftgütefaktoren beruhen noch auf einer wesentlich kleineren Zeitbasis von drei Jahren (2016-2018). Im hier vorliegenden Bericht umfasst das Datenmaterial jedoch neun bis elf Jahre, entspricht also mindestens einer Verdreifachung. Ein Vergleich der sich jeweils daraus ergebenden Korrelationskoeffizienten wird in den Diagrammen B13, B14 und B15 gezeigt.

Mit der längeren Zeitbasis (grün) nehmen die Korrelationskoeffizienten mit wenigen Ausnahmen kleinere Absolutwerte an, als bei der kürzeren Zeitbasis (blau), die Größenordnung bleibt aber etwa gleich. Dieses Verhalten kann auf zahlreiche Ursachen zurückgeführt werden. Zu beachten ist dabei, dass die Zahlenwerte der Monatsmediane von Globalstrahlung und jeweiligem Luftgütefaktor untersucht werden. Jahreszeitliche Extremwerte, die nur in einer Stichprobe vorkommen, können die Korrelationskoeffizienten daher stark beeinflussen.

Die von uns für die Berechnungen zugrunde gelegte synthetische Luftgütestation, die aus Daten der von der MA 22 betriebenen Stationen Hermannskogel und Lobau zusammengesetzt sind, muss zudem nicht für alle Jahre gleich repräsentativ sein. Eine engere lokale Verknüpfung der Lichtmessstationen mit den Luftgütestationen ist daher auch aus diesem Grund vorteilhaft.

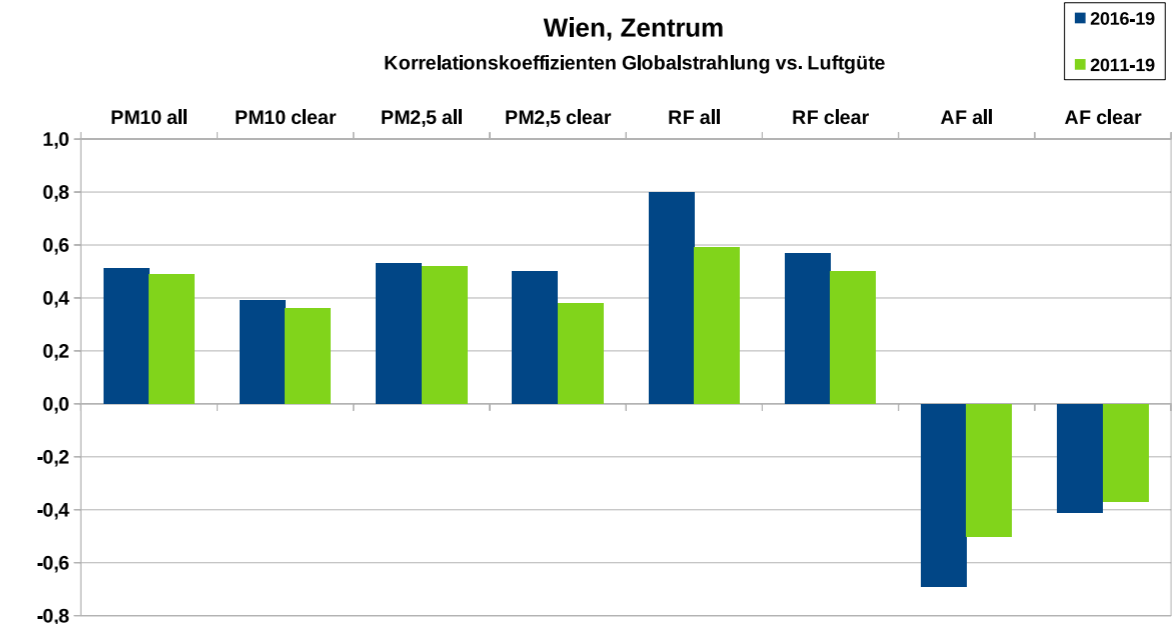


Abb. B13: Korrelationskoeffizienten der Globalstrahlungen in Wien Zentrum mit den Luftgütefaktoren PM10, PM2,5, relative Luftfeuchtigkeit (RF) und absolute Luftfeuchtigkeit (AF) für alle (all) und klare mondlose (clear) Nächte. Die blauen Balken zeigen die Koeffizienten für die Jahre 2016-2019, die grünen Balken für die Jahre 2011-2019. Verglichen wurden die Zahlenwerte der jeweiligen Monatsmediane.

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, die relative und absolute Luftfeuchtigkeit, sowie Schwefeldioxid (SO2) und Ozon (O3) aufgetragen. Die blauen Linien zeigen die auf der linken Diagrammseite skalierten Werte der Globalstrahlung, die roten die rechts skalierten Werte des jeweiligen Luftgütedefaktors. Auf jeder Seite findet sich oben das Diagramm für die Stichprobe „alle Nächte“ und darunter für die Stichprobe „klare mondlose Nächte“.

Die Werte für die Luftgütedaten entstammen der Luftgütestation Hermannskogel (für Luftfeuchtigkeit und SO2) sowie Lobau (für PM10, PM2,5, Ozon). Siehe dazu Kapitel 8.2.1 auf Seite 18.

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 beruhen auf einem Mangel an Messdaten der Lichtmessstationen und/oder der Luftgütestationen.

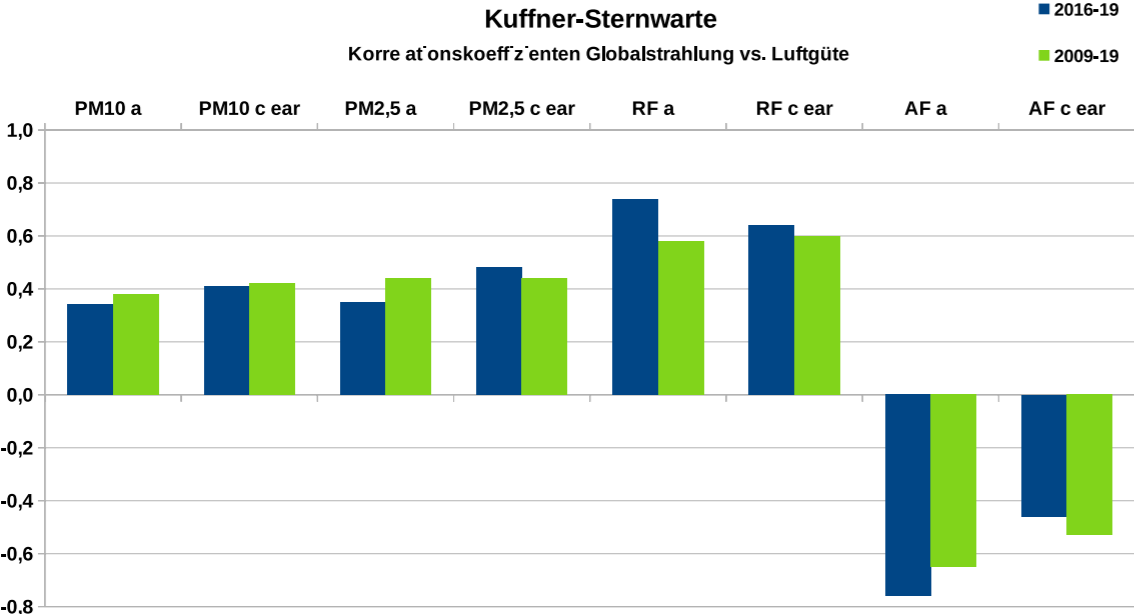


Abb. B14: Korrelationskoeffizienten der Globalstrahlungen für die Kuffner-Sternwarte mit den Luftgütedefaktoren PM10, PM2,5, relative Luftfeuchtigkeit (RF) und absolute Luftfeuchtigkeit (AF) für alle (all) und klare mondlose (clear) Nächte. Die blauen Balken zeigen die Koeffizienten für die Jahre 2016-2019, die grünen Balken für die Jahre 2009-2019. Verglichen wurden die Zahlenwerte der jeweiligen Monatsmediane.

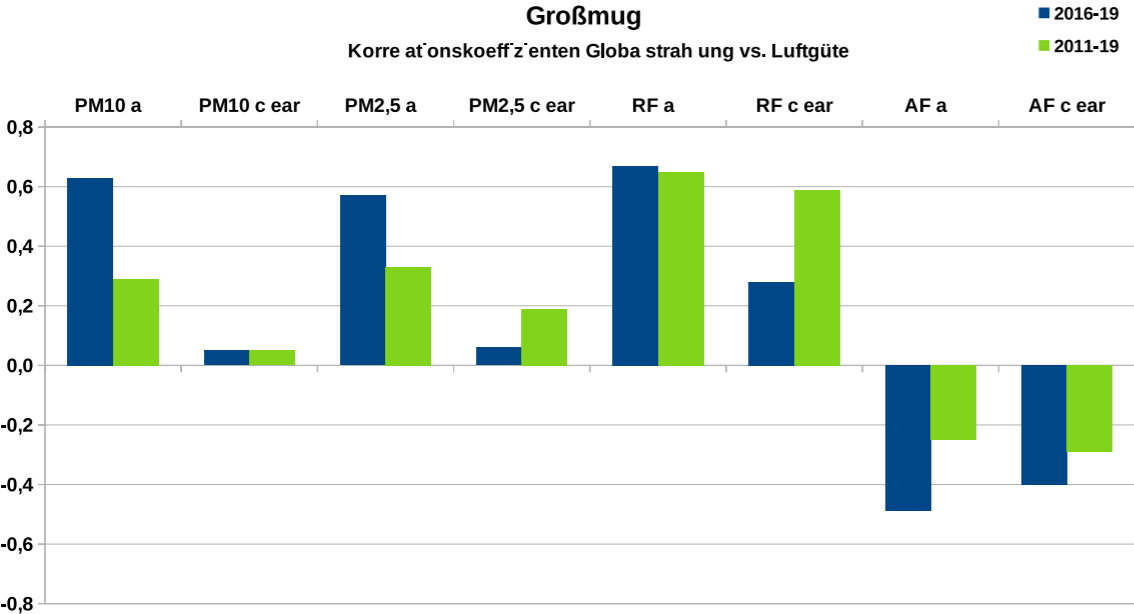


Abb. B13: Korrelationskoeffizienten der Globalstrahlungen in Großmugl mit den Luftgütedefaktoren PM10, PM2,5, relative Luftfeuchtigkeit (RF) und absolute Luftfeuchtigkeit (AF) für alle (all) und klare mondlose (clear) Nächte. Die blauen Balken zeigen die Koeffizienten für die Jahre 2016-2019, die grünen Balken für die Jahre 2011-2019. Verglichen wurden die Zahlenwerte der jeweiligen Monatsmediane.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/PM10

alle Nächte

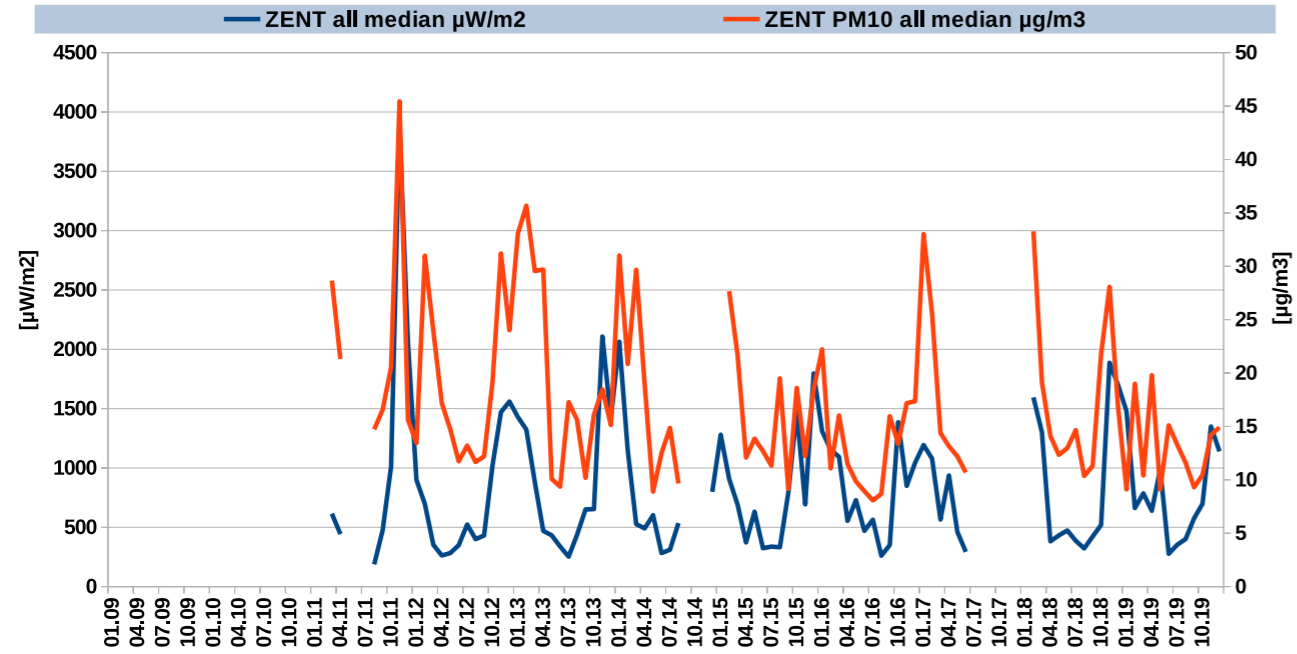


Abb. A1: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM10-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/PM2,5

alle Nächte

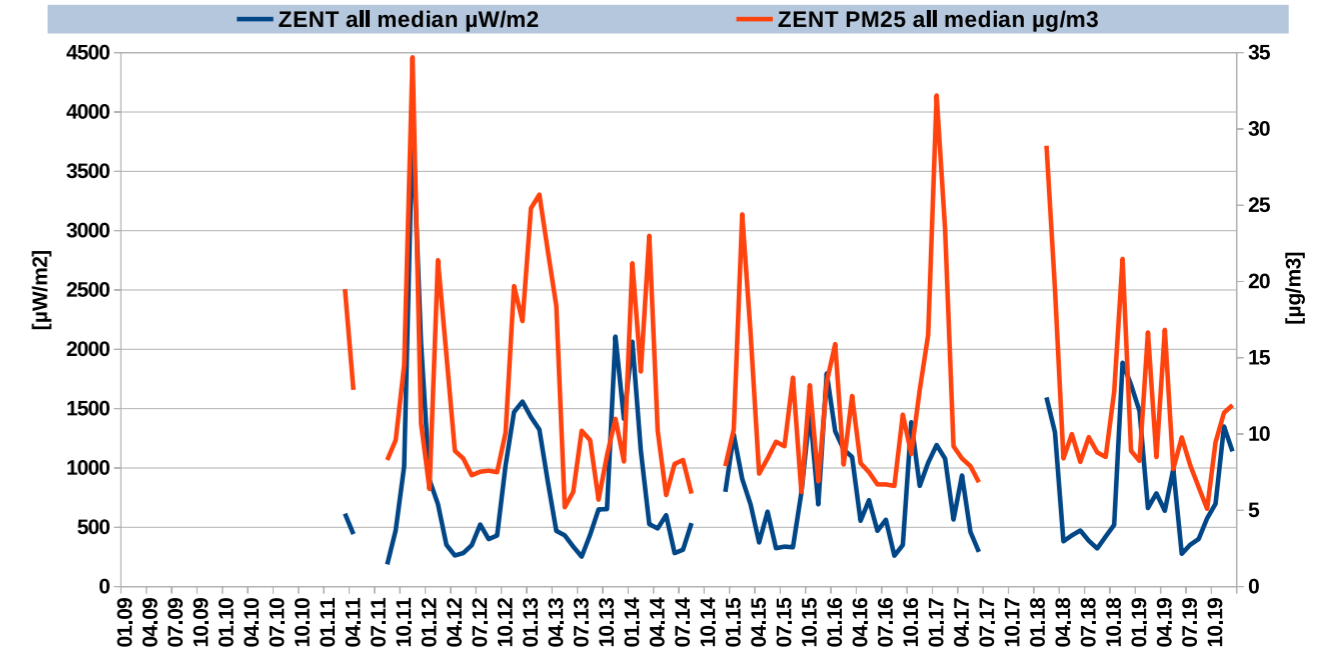


Abb. A3: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM2,5-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/PM10

klare mondlose Nächte

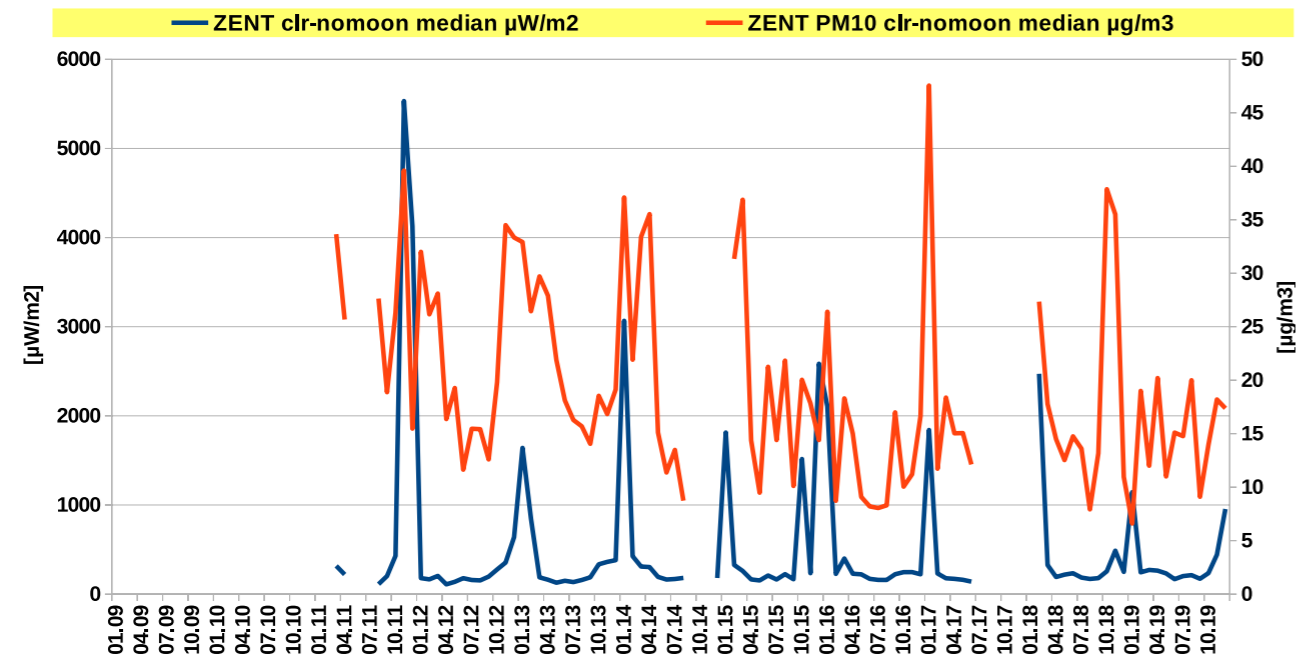


Abb. A2: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM10-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/PM2,5

klare mondlose Nächte

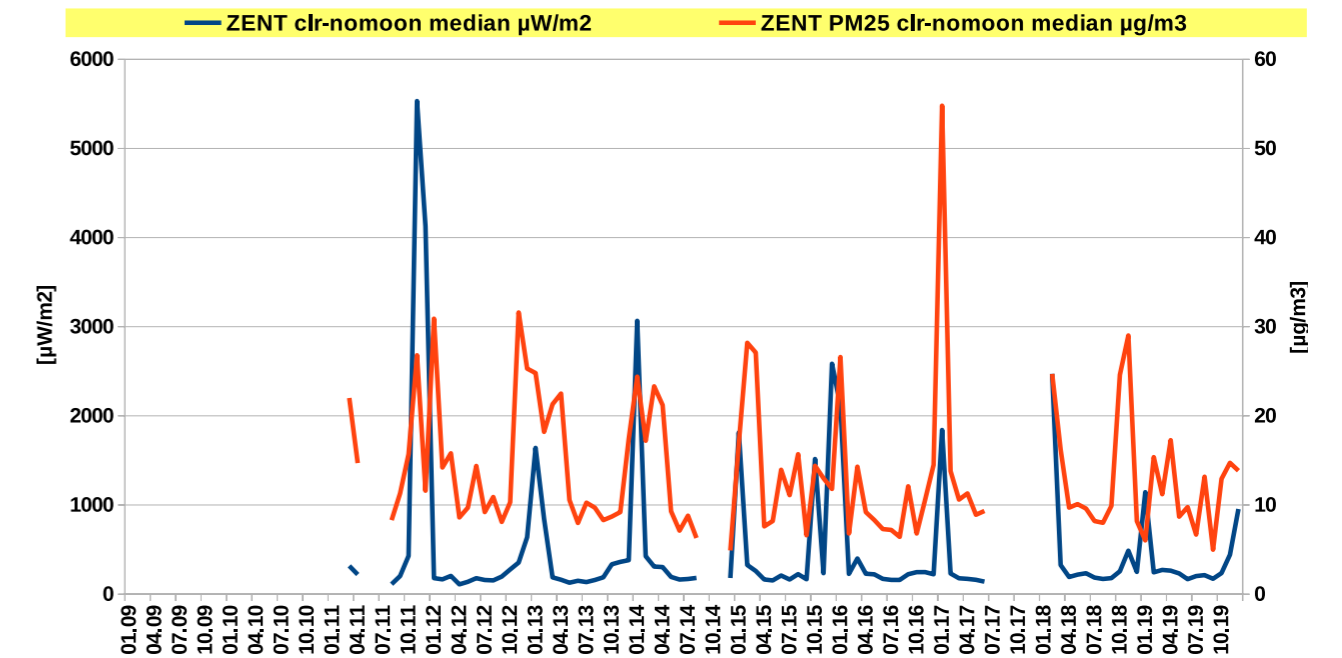


Abb. A4: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der PM2,5-Konzentration in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/rel. Luftfeuchtigkeit

alle Nächte

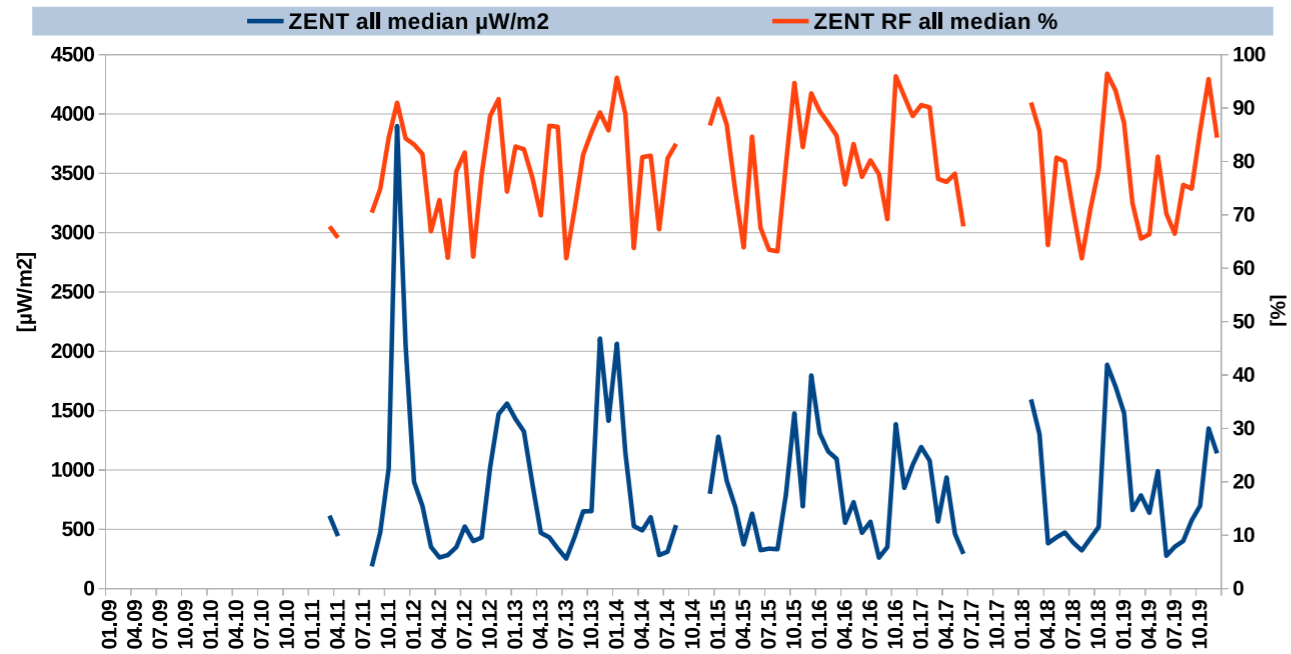


Abb. A5: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/abs. Luftfeuchtigkeit

alle Nächte

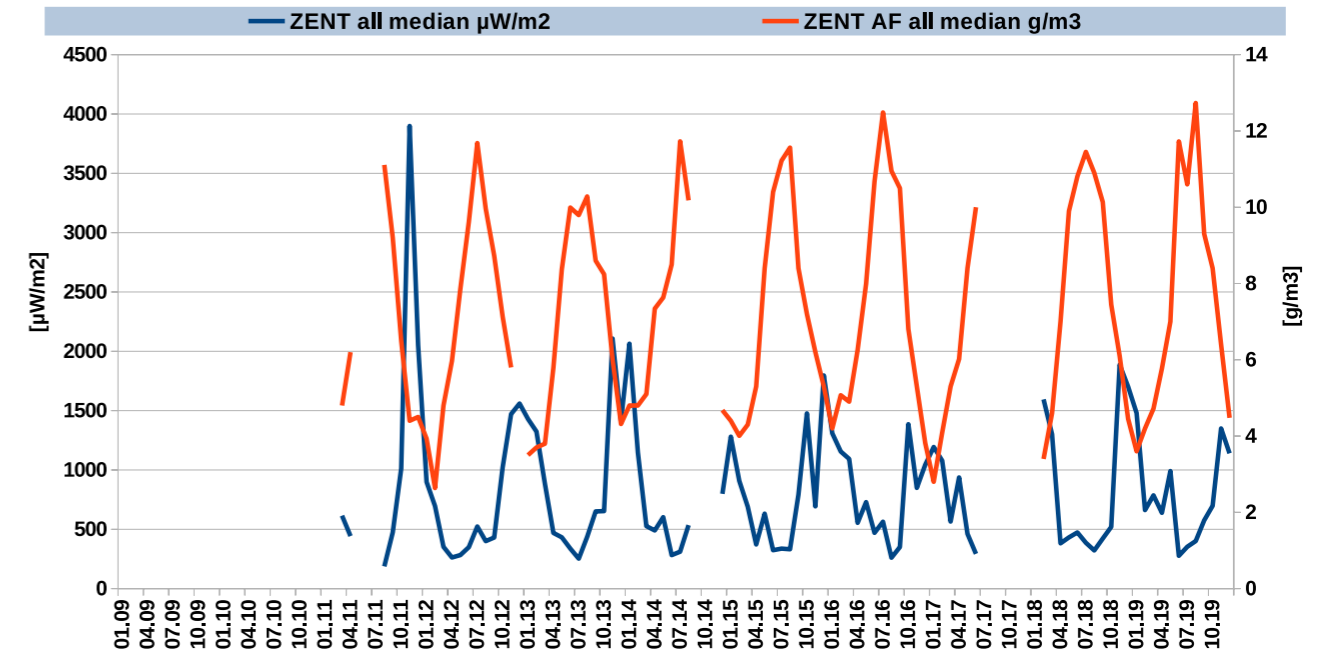


Abb. A7: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/rel. Luftfeuchtigkeit

klare mondlose Nächte

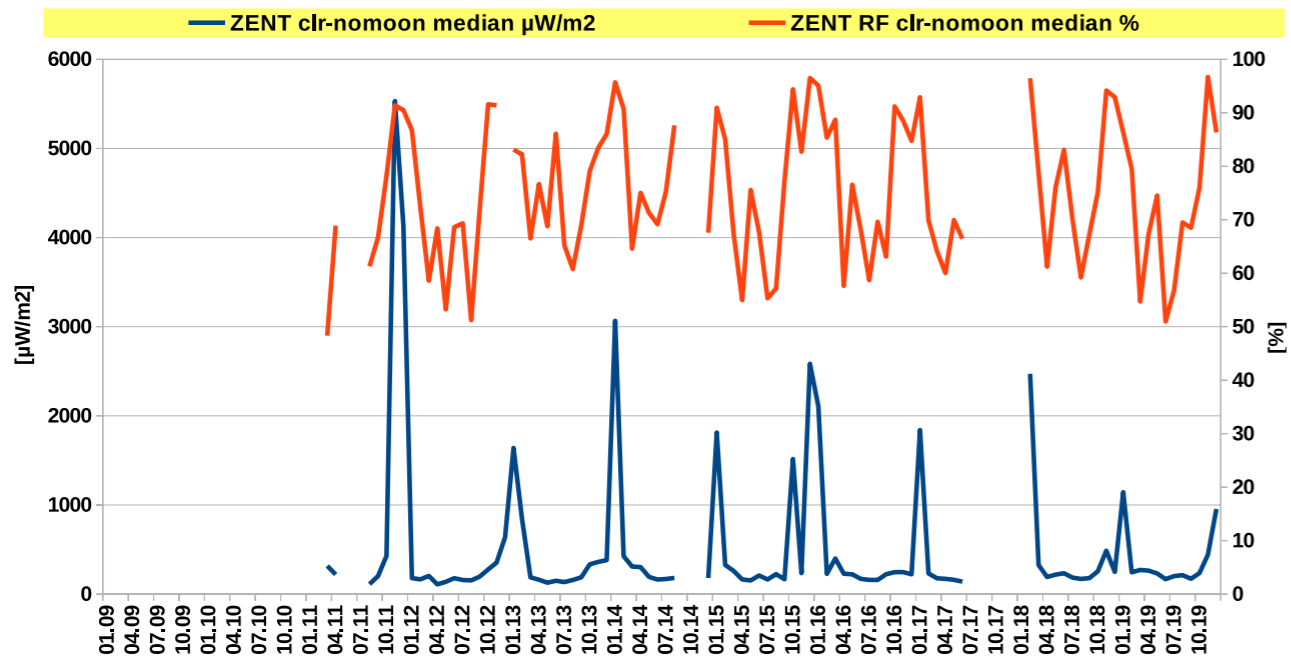


Abb. A6: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/abs. Luftfeuchtigkeit

klare mondlose Nächte

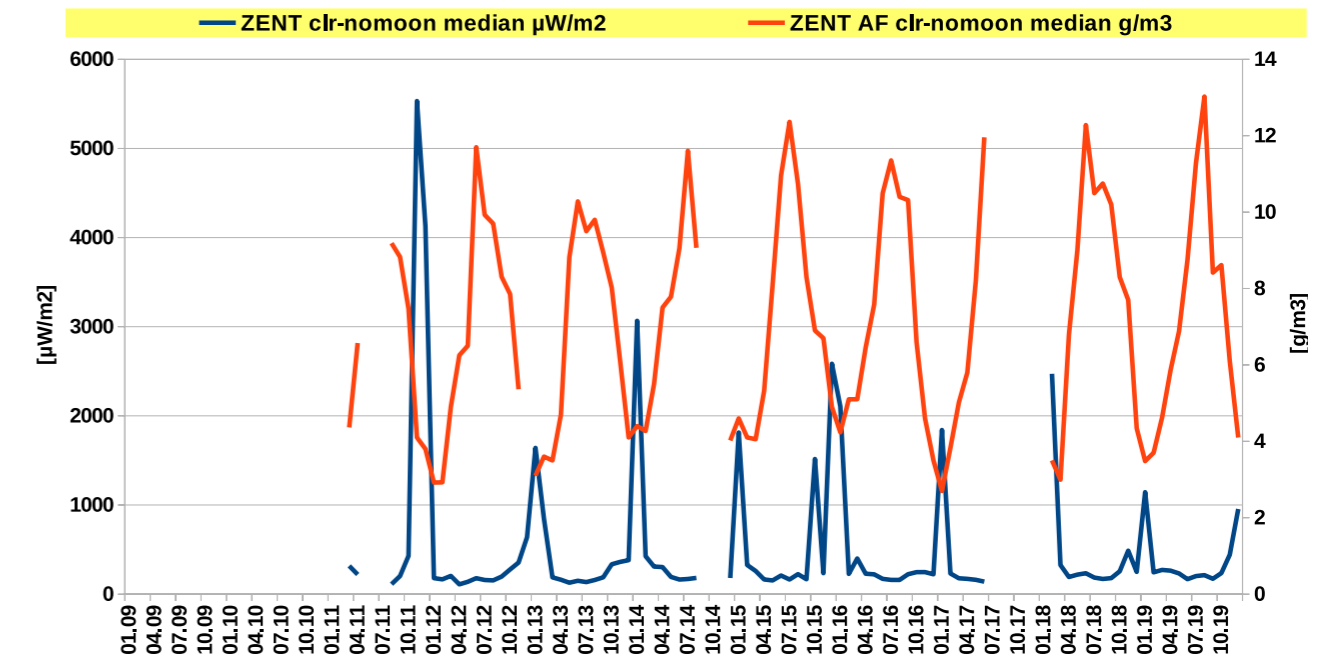


Abb. A8: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/SO2

alle Nächte

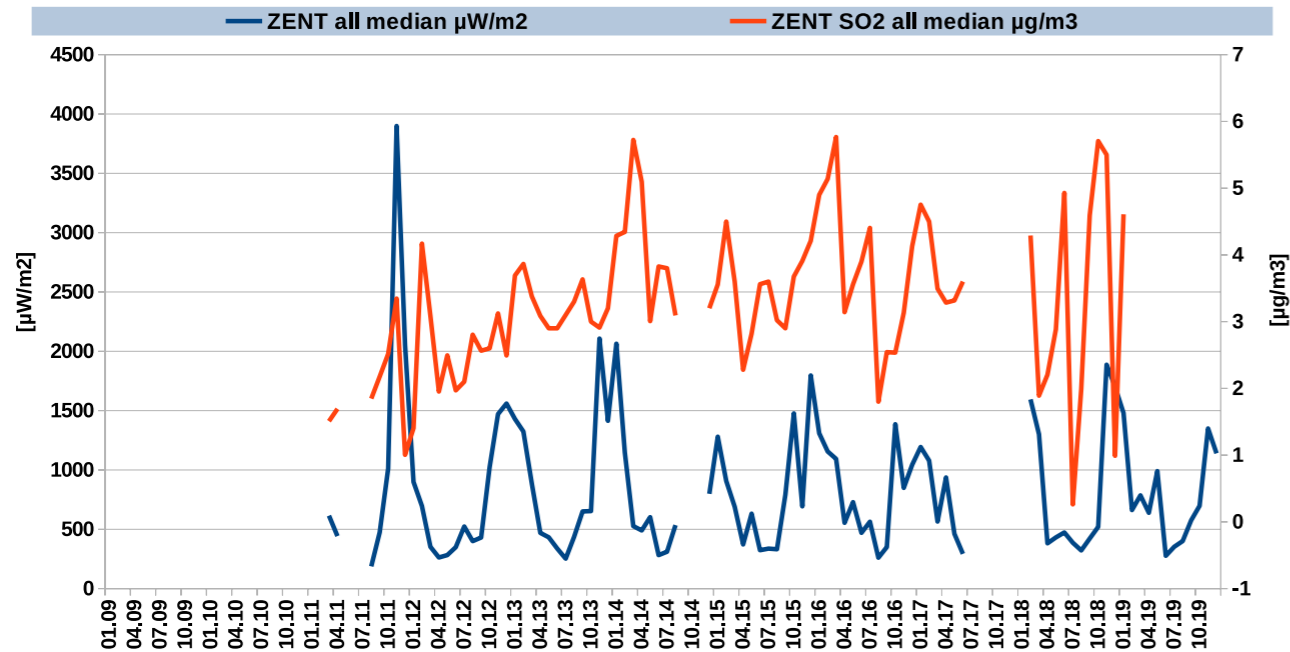


Abb. A9: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Schwefeldioxid in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/Ozon

alle Nächte

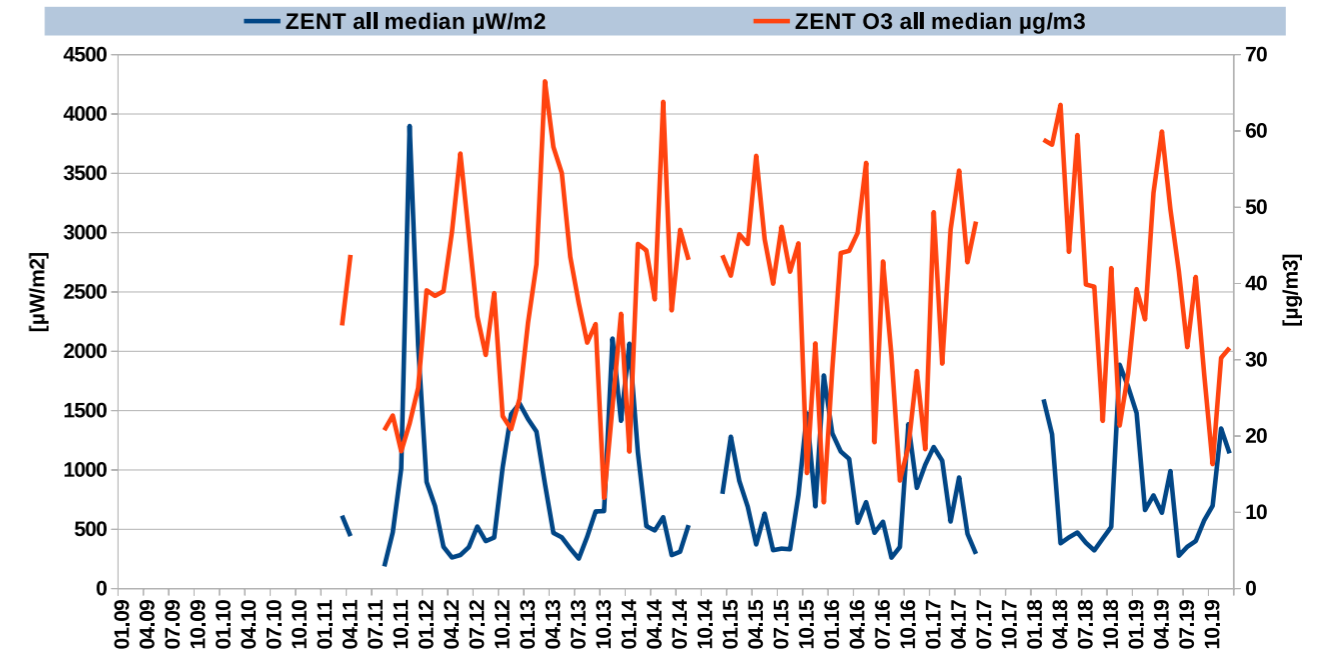


Abb. A11: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Ozon in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/SO2

klare mondlose Nächte

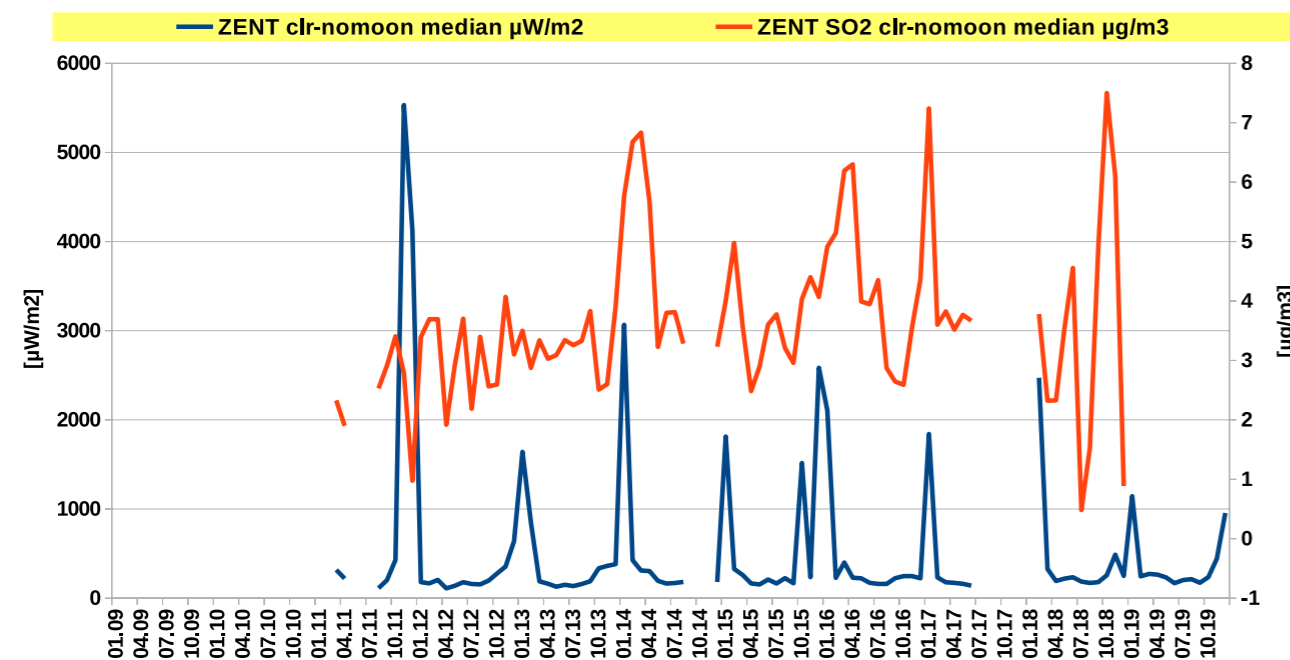


Abb. A10: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Schwefeldioxid in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Wien, Zentrum: Globalstrahlung/Ozon

klare mondlose Nächte

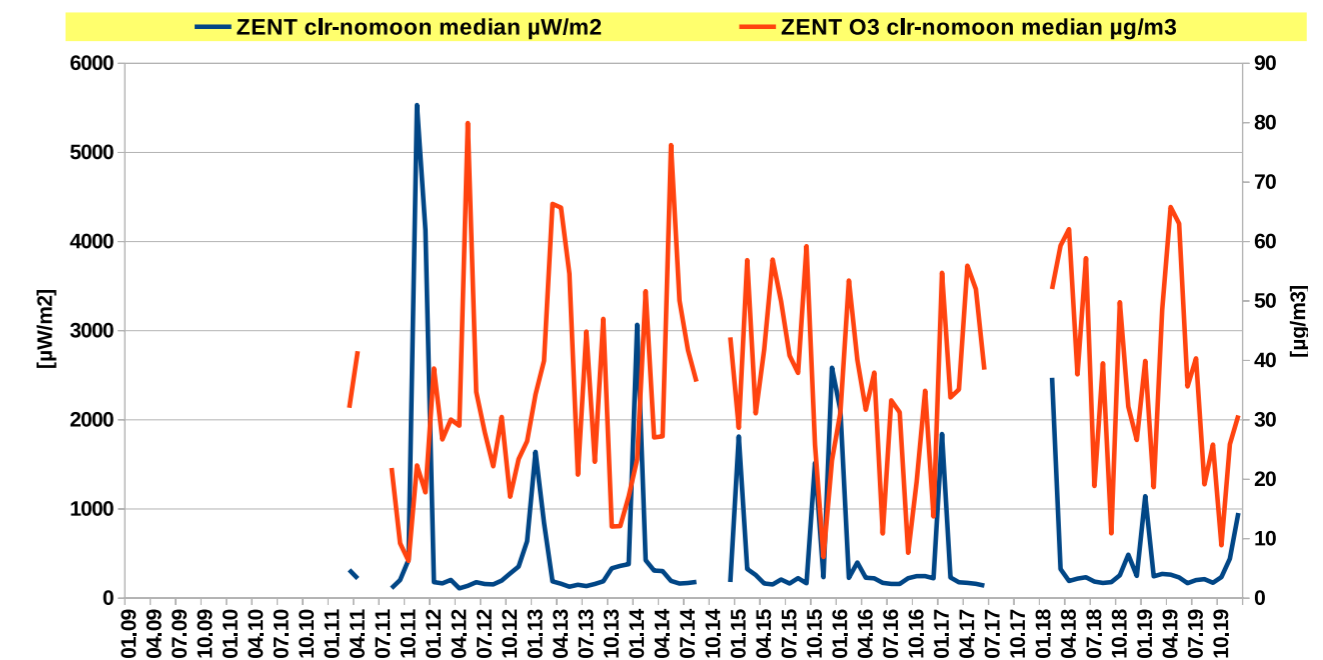


Abb. A12: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Wien Zentrum [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Ozon in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/PM10

alle Nächte

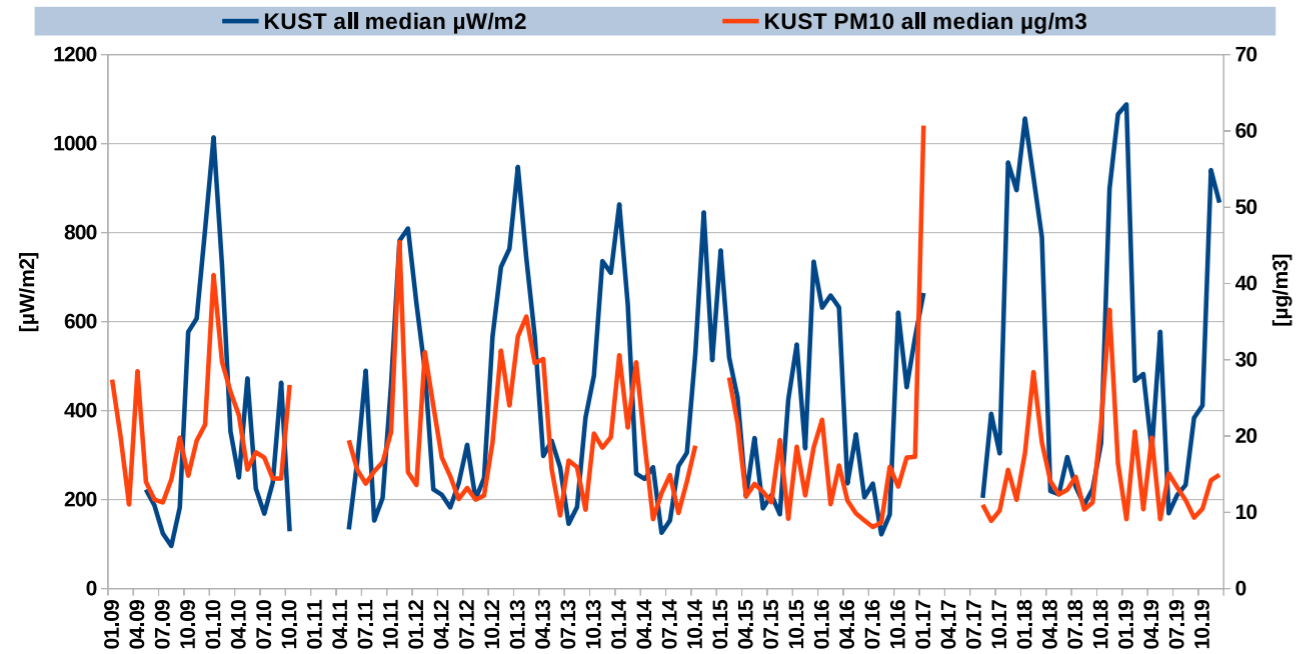


Abb. A13: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und PM10 in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/PM2,5

alle Nächte

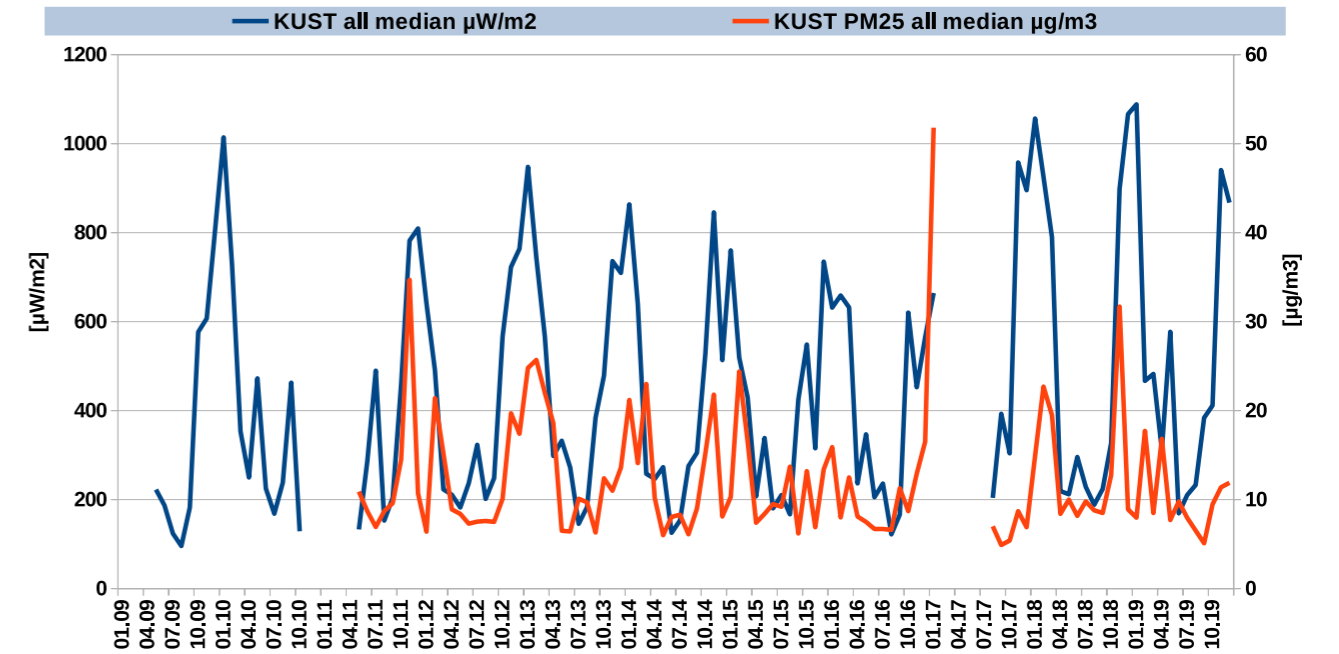


Abb. A15: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und PM2,5 in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/PM10

klare mondlose Nächte

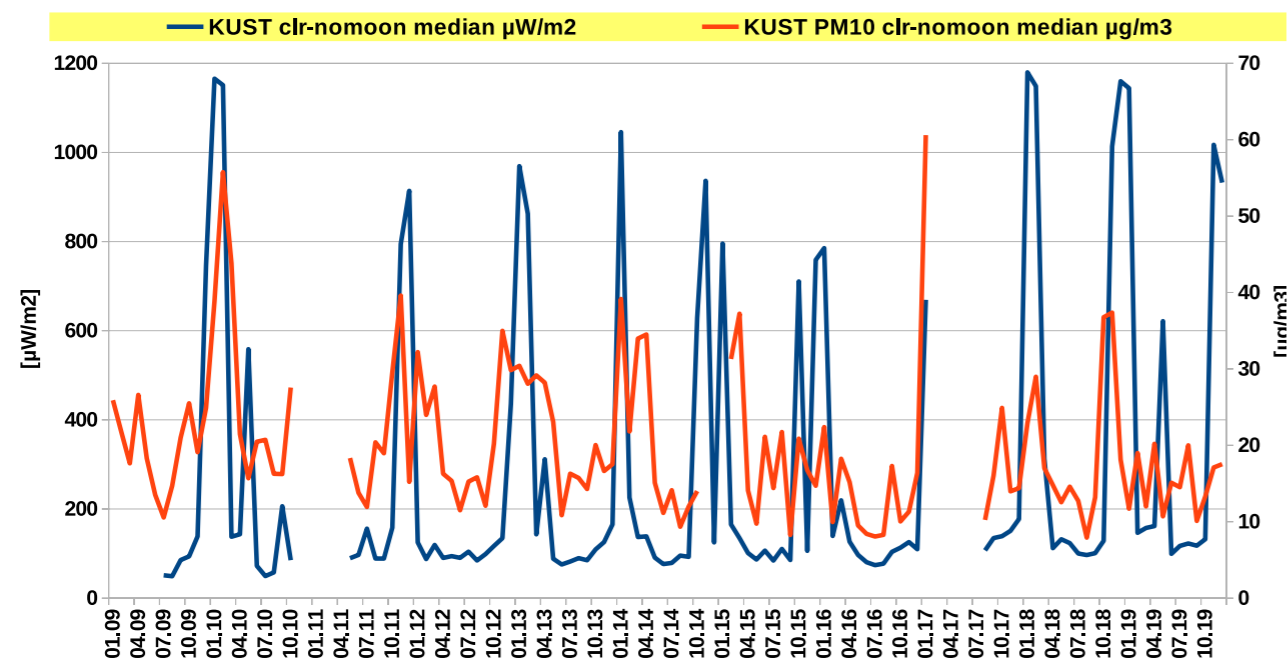


Abb. A14: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und PM10 in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/PM2,5

klare mondlose Nächte

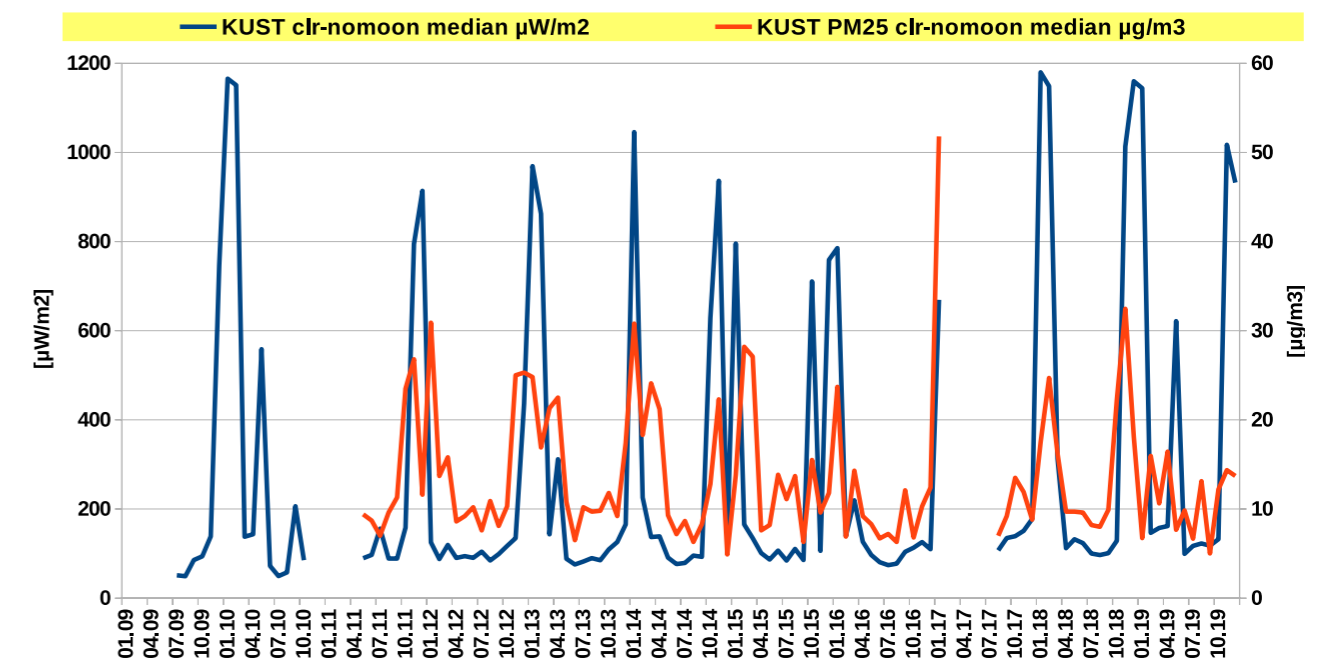


Abb. A16: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und PM2,5 in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/rel. Luftfeuchtigkeit

alle Nächte

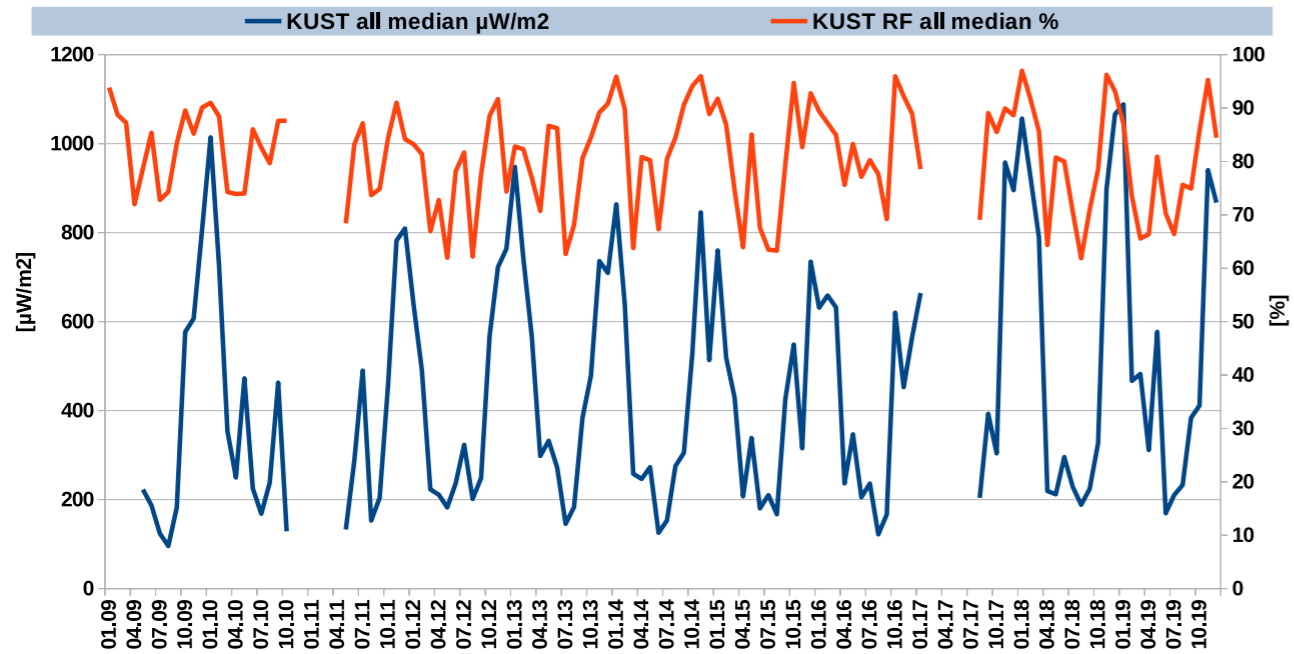


Abb. A17: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/abs. Luftfeuchtigkeit

alle Nächte

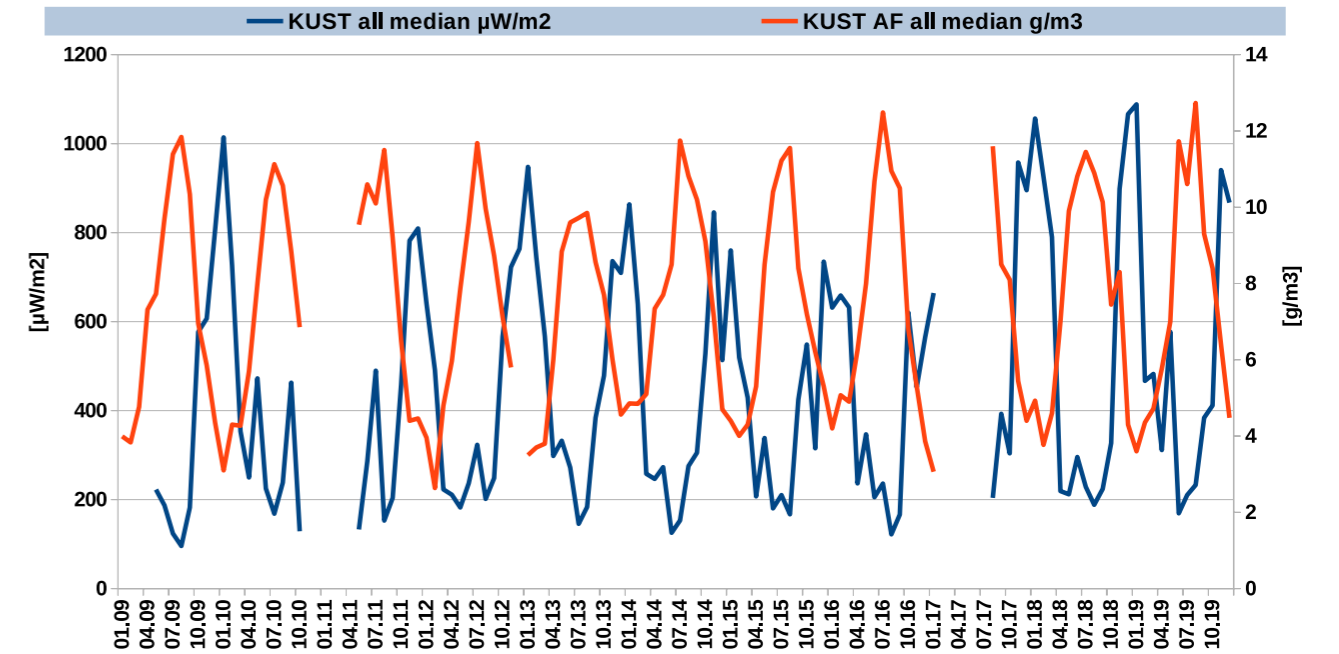


Abb. A19: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/rel. Luftfeuchtigkeit

klare mondlose Nächte

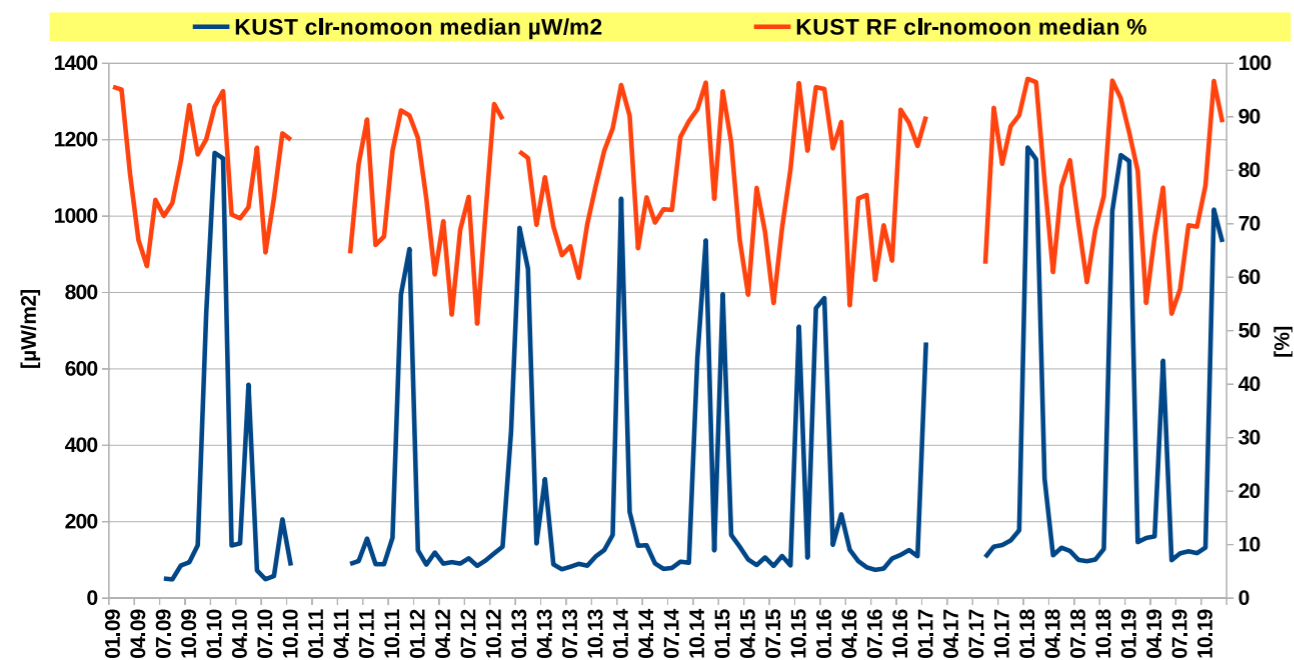


Abb. A18: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/abs. Luftfeuchtigkeit

klare mondlose Nächte

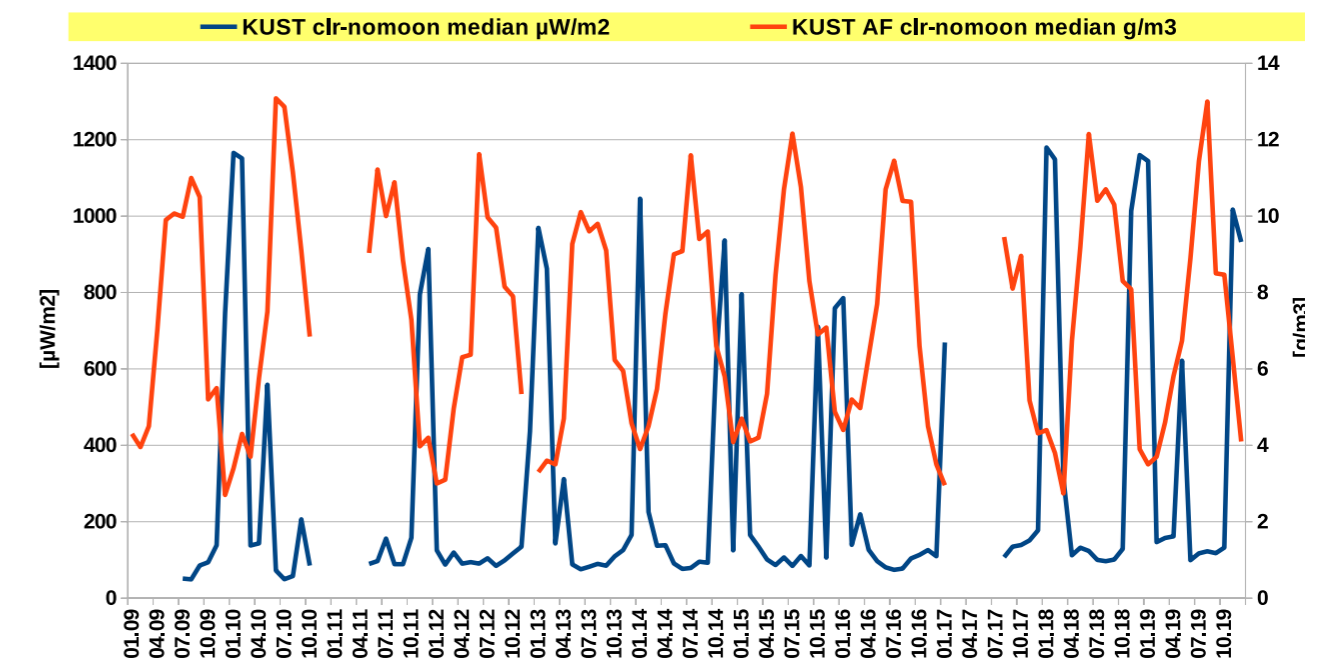


Abb. A20: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/SO2

alle Nächte

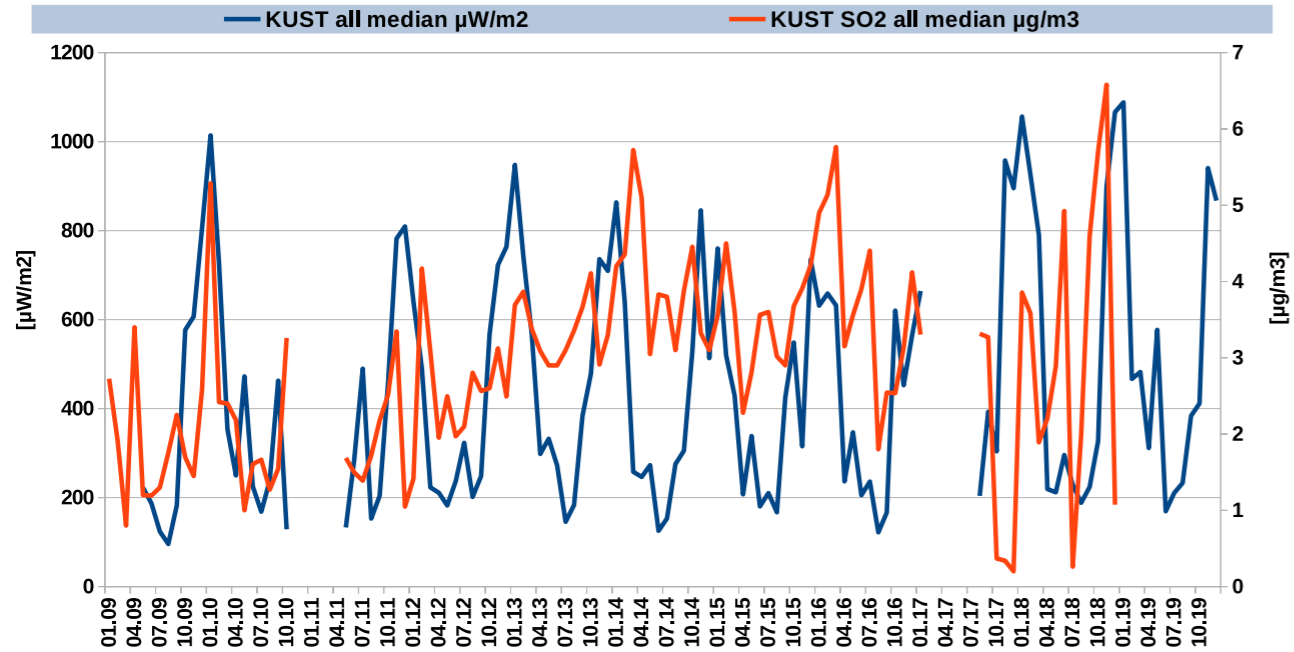


Abb. A21: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Schwefeldioxid in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/Ozon

alle Nächte

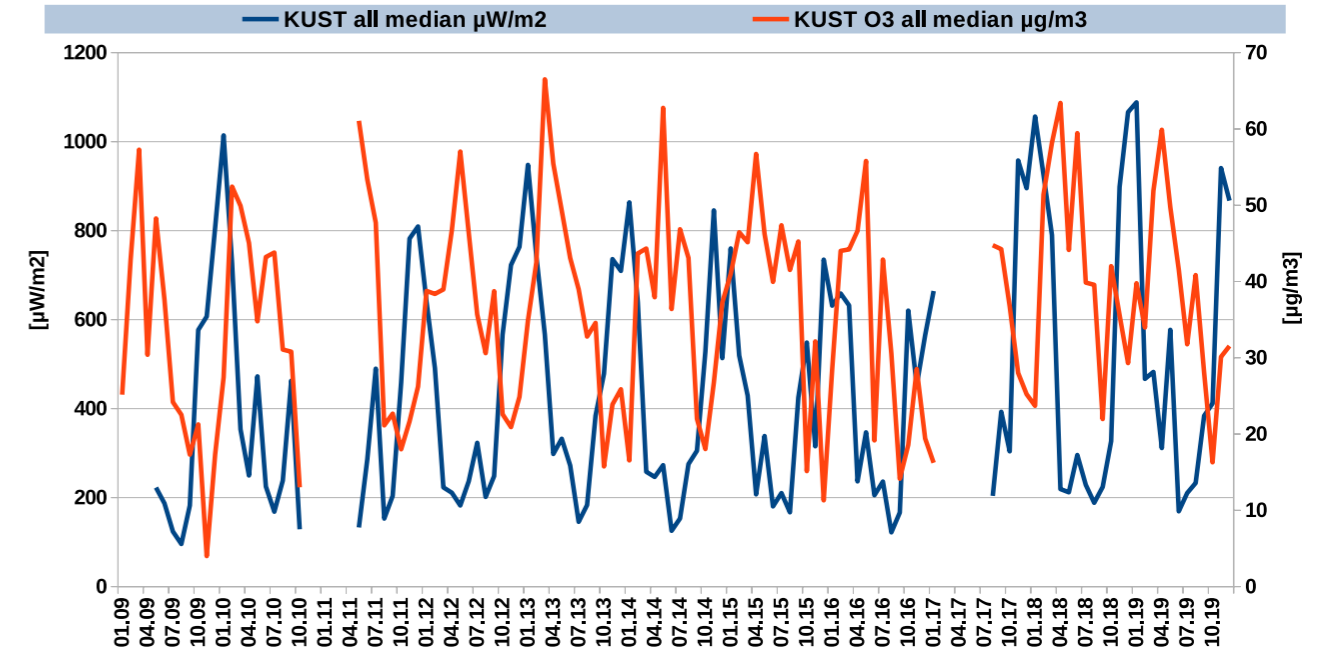


Abb. A23: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Ozon in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/SO2

klare mondlose Nächte

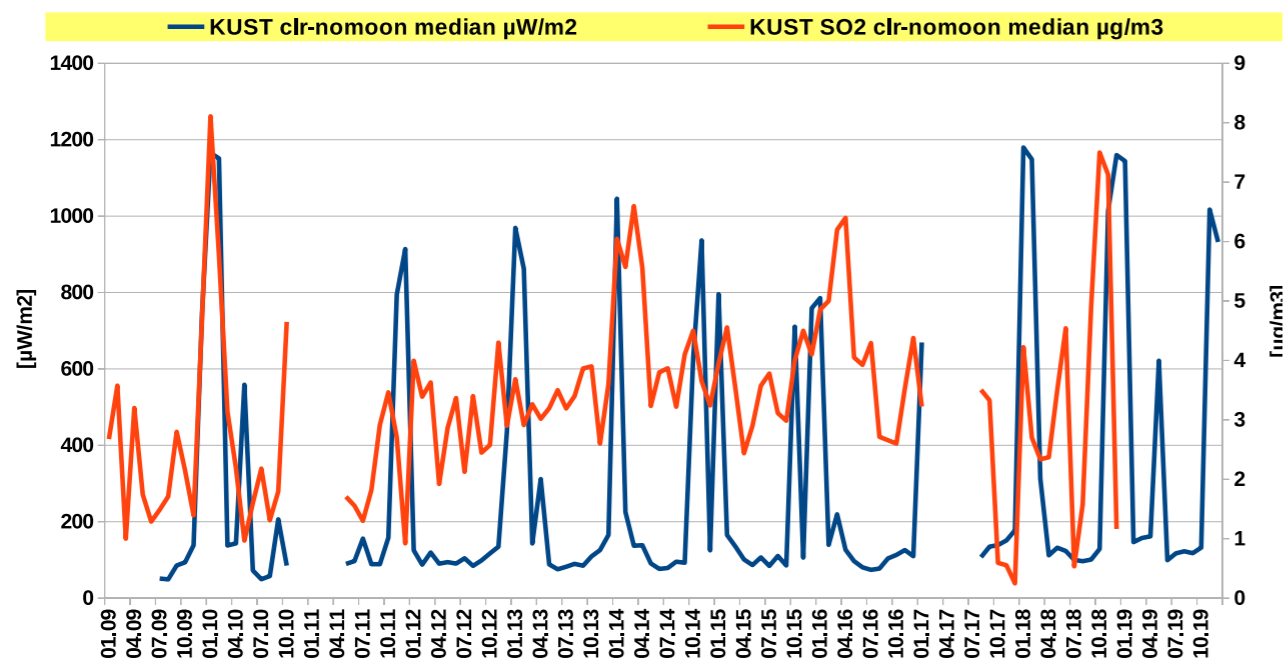


Abb. A22: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Schwefeldioxid in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Kuffner-Sternwarte: Globalstrahlung/Ozon

klare mondlose Nächte

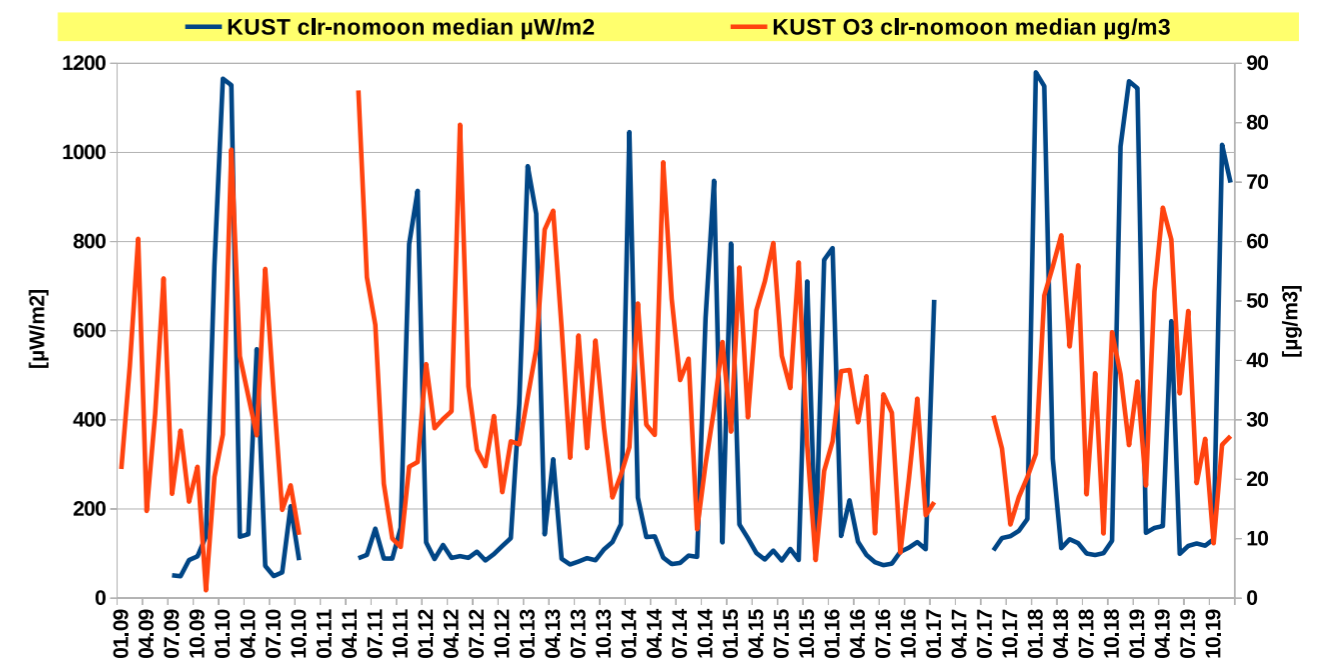


Abb. A24: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung auf der Kuffner-Sternwarte [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Ozon in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2009 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/PM10

alle Nächte

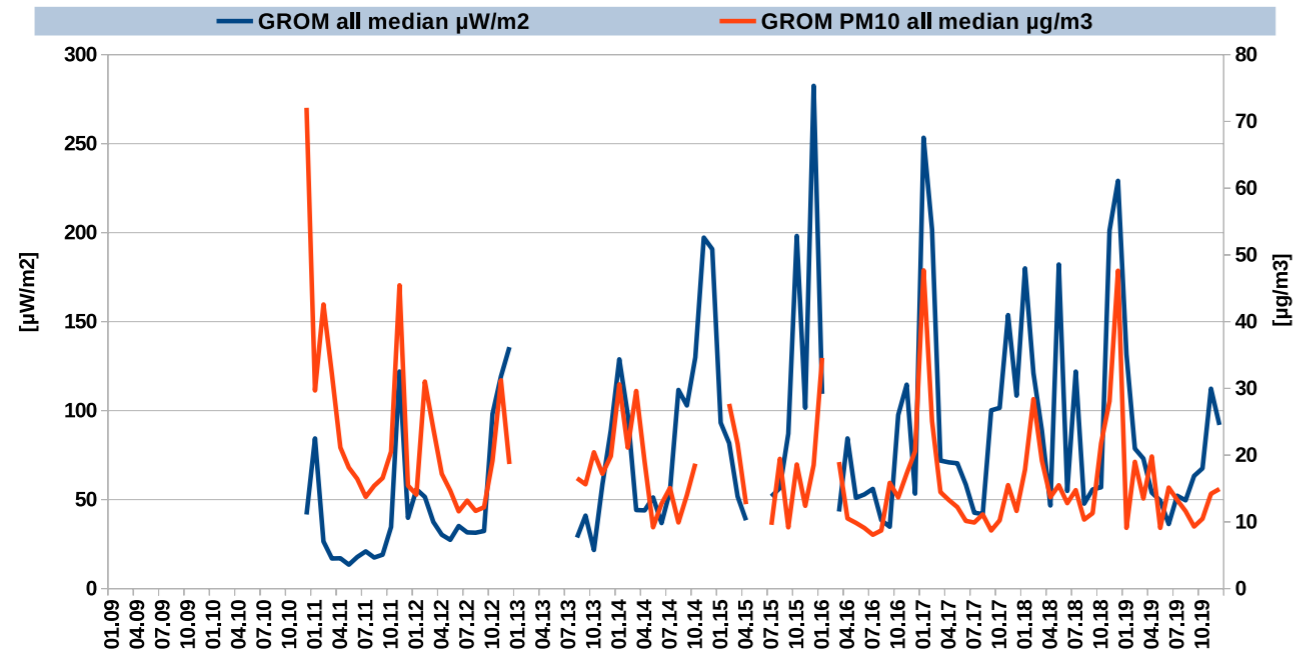


Abb. A25: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und PM10 in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/PM2,5

alle Nächte

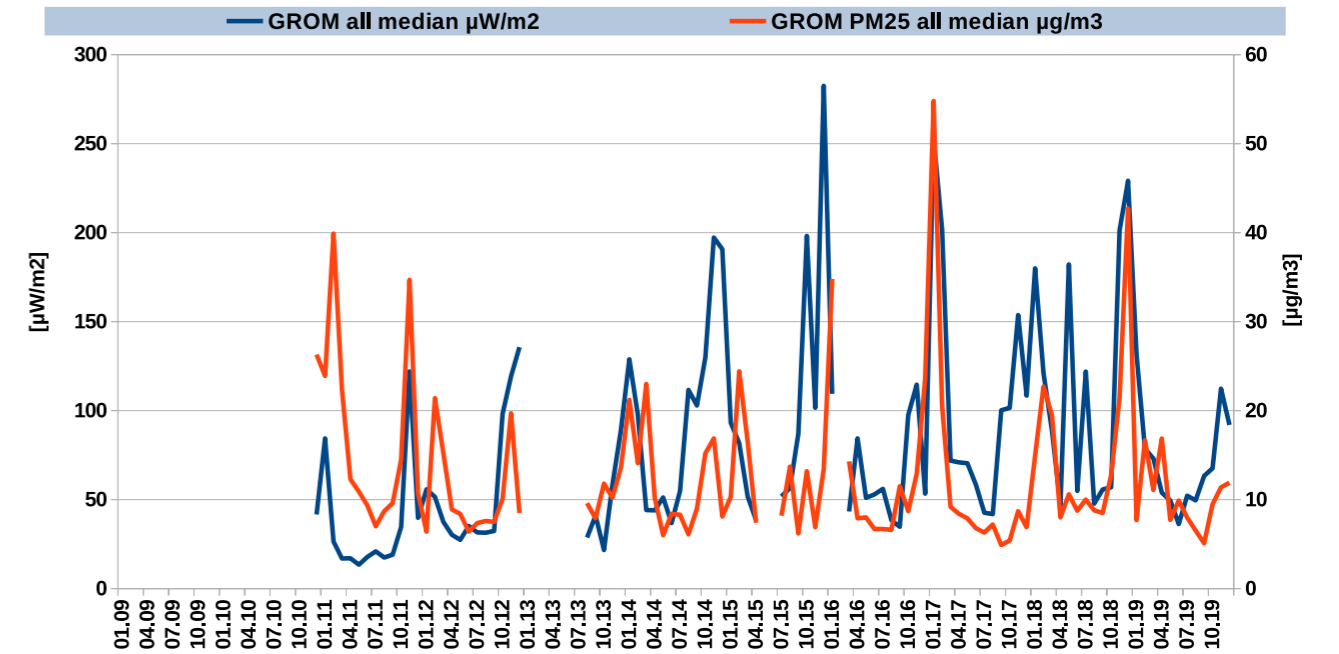


Abb. A27: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und PM2,5 in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/PM10

klare mondlose Nächte

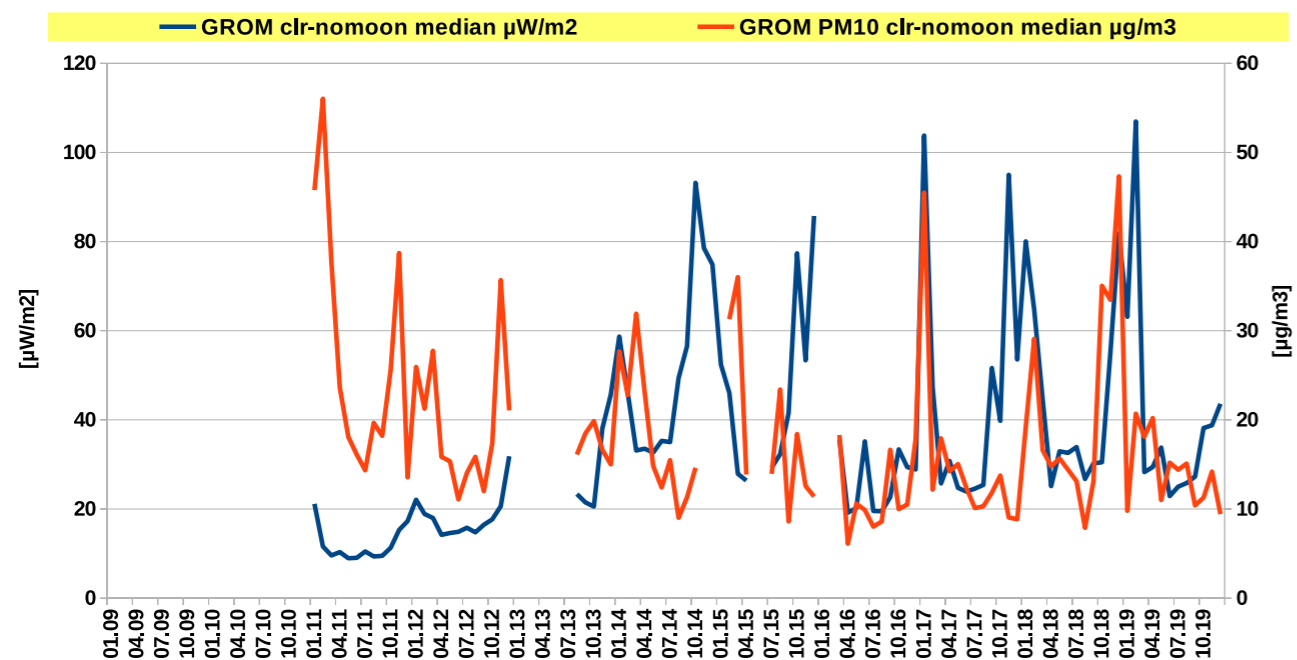


Abb. A26: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und PM10 in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/PM2,5

klare mondlose Nächte

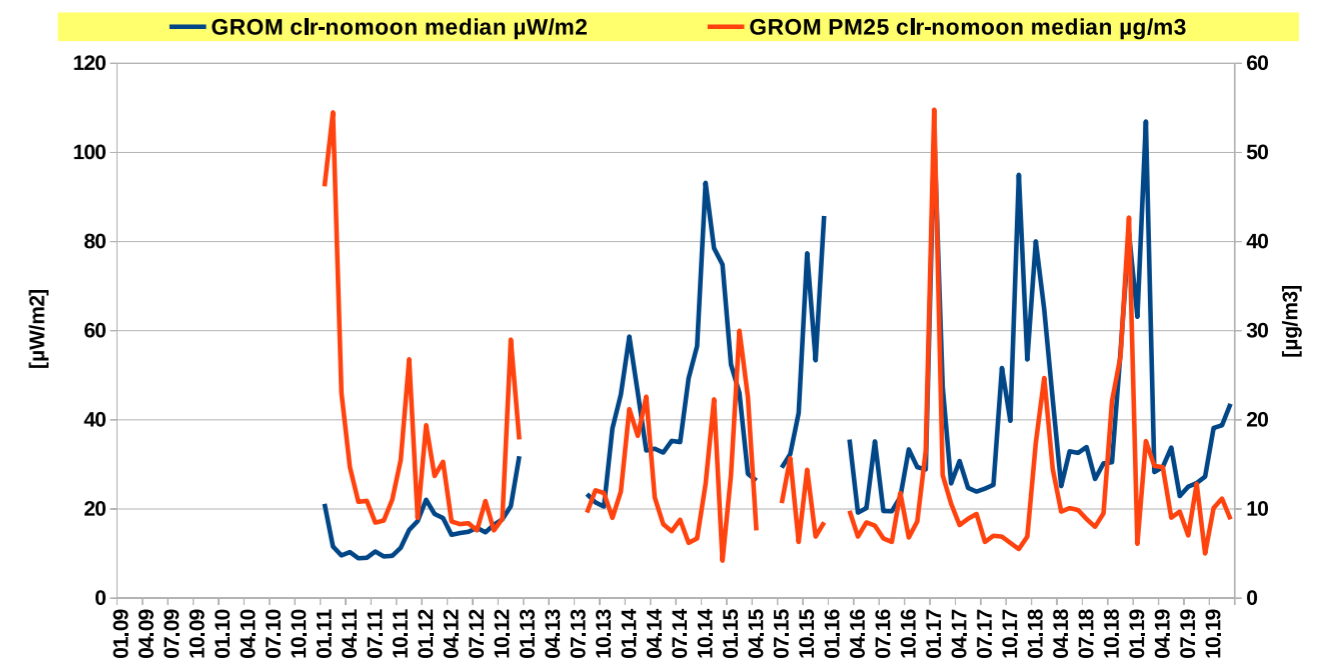


Abb. A28: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und PM2,5 in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/rel. Luftfeuchtigkeit

alle Nächte

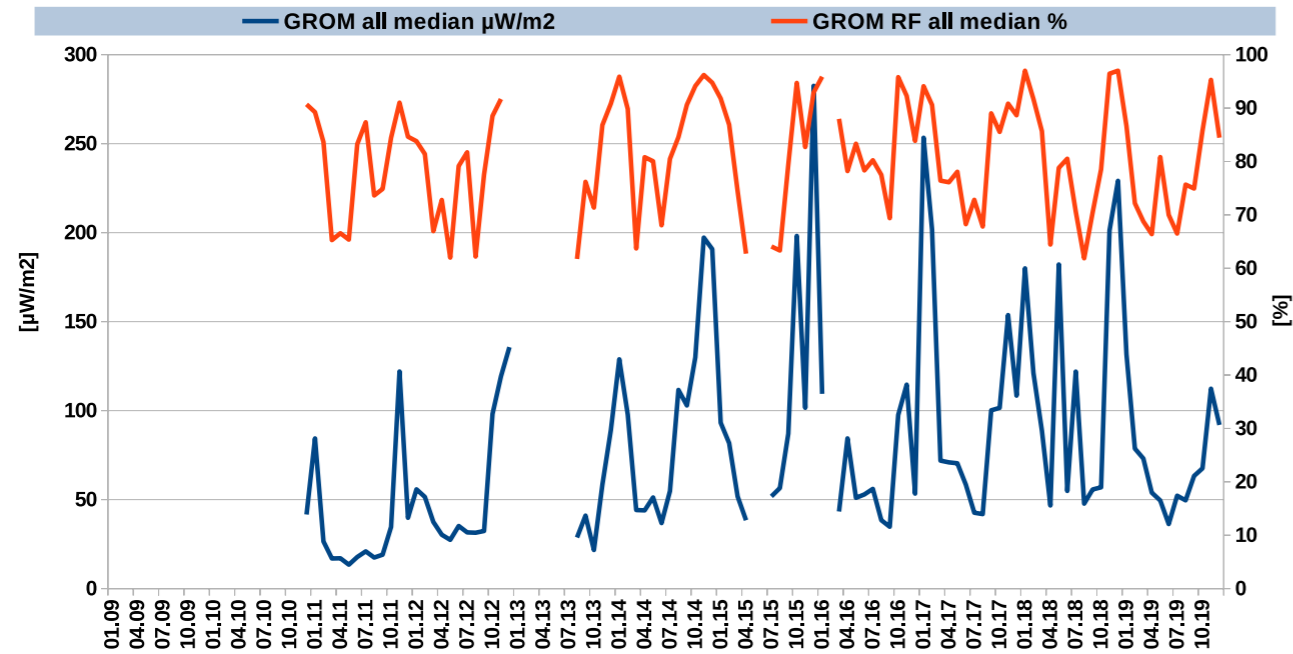


Abb. A29: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/abs. Luftfeuchtigkeit

alle Nächte

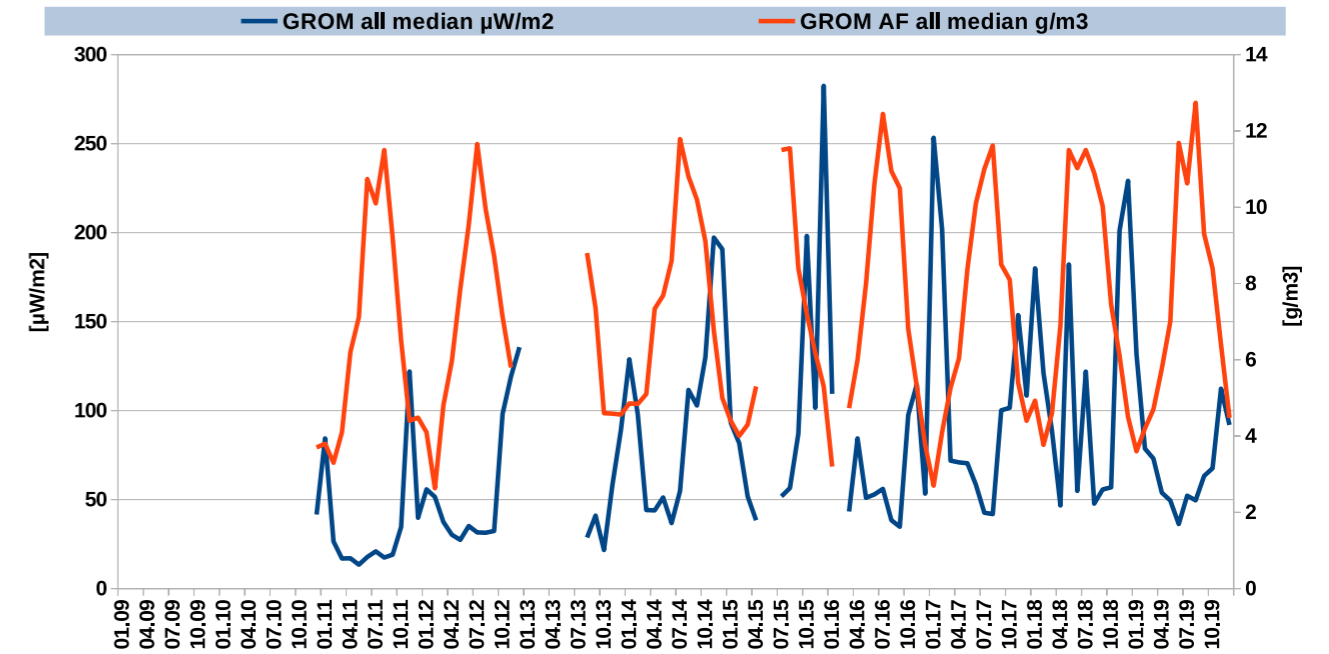


Abb. A31: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/rel. Luftfeuchtigkeit

klare mondlose Nächte

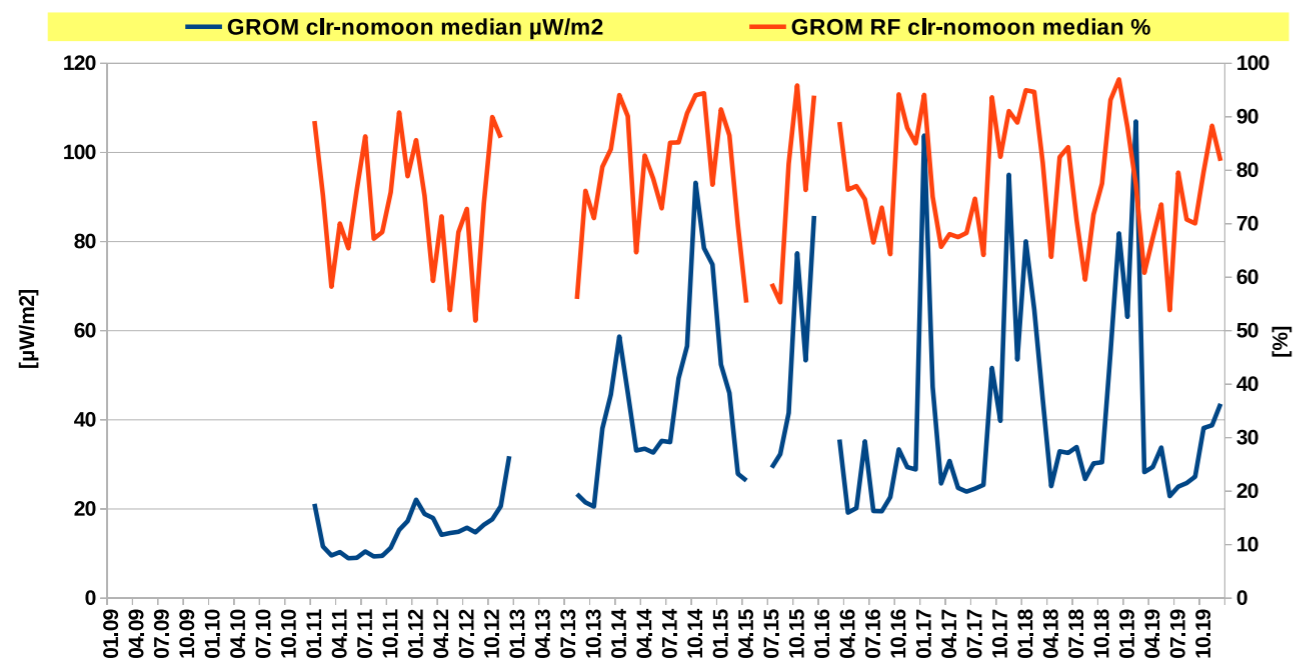


Abb. A30: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der relativen Luftfeuchtigkeit in Wien [%] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/abs. Luftfeuchtigkeit

klare mondlose Nächte

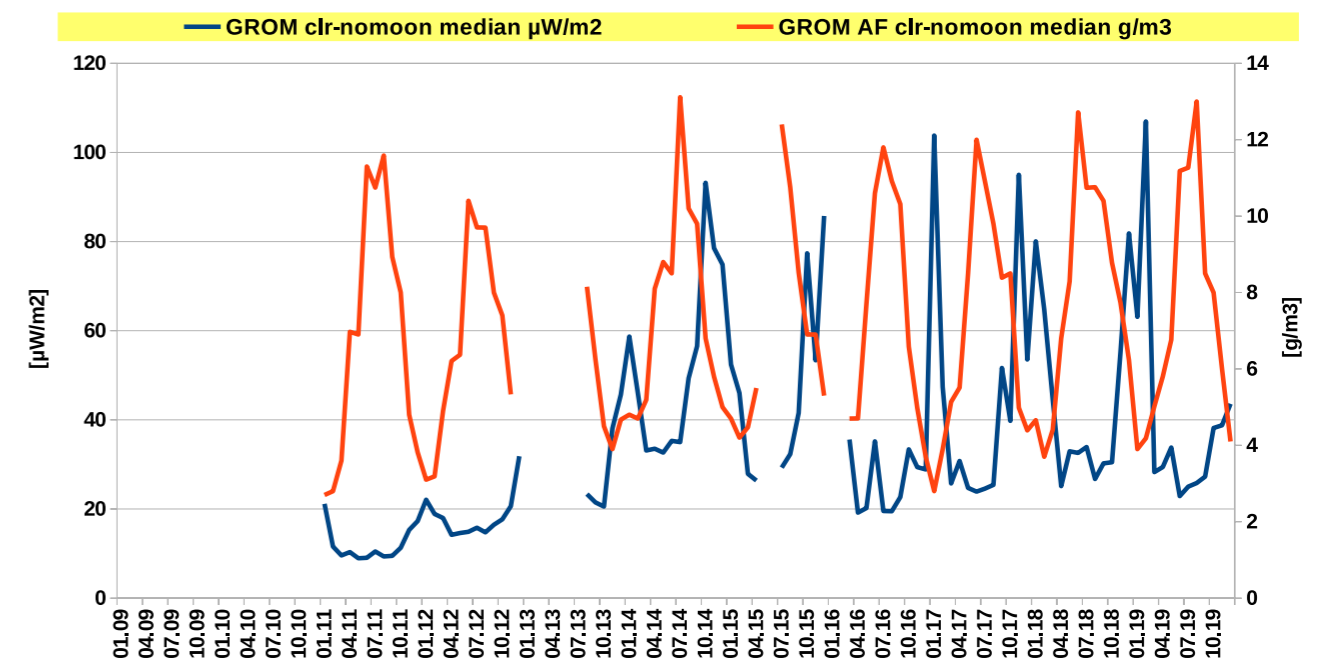


Abb. A32: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und der absoluten Luftfeuchtigkeit in Wien [g/m^3] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/SO2

alle Nächte

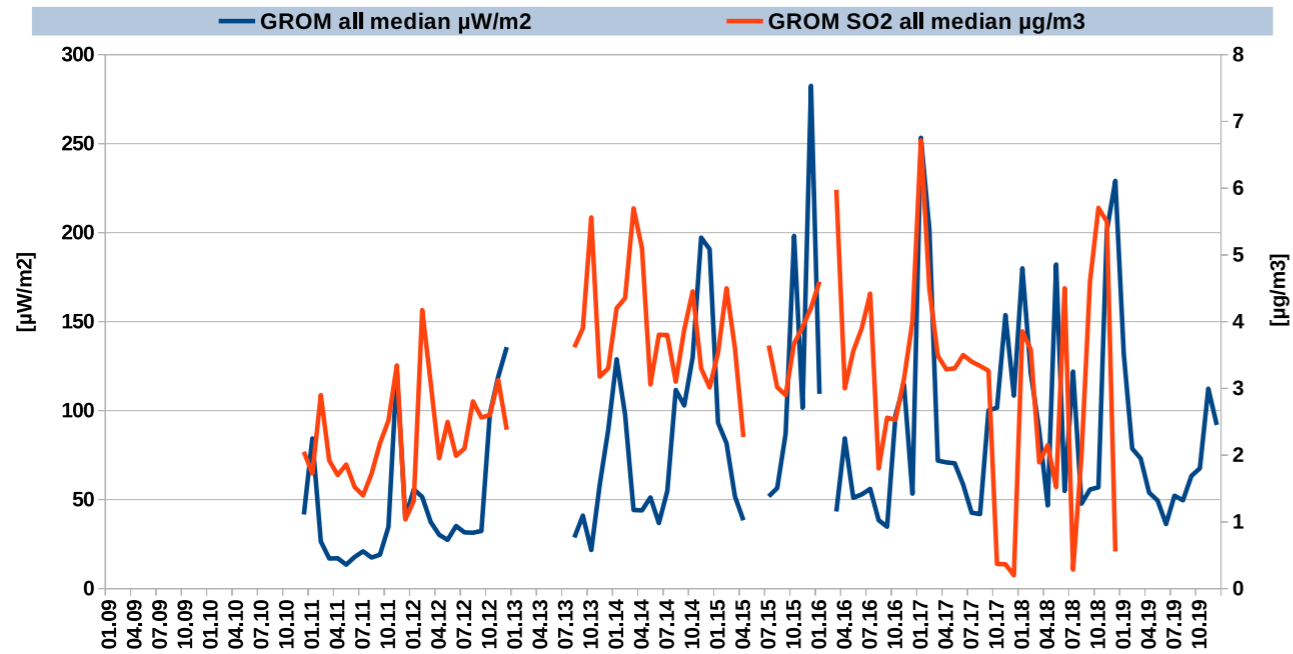


Abb. A33: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Schwefeldioxid in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/Ozon

alle Nächte

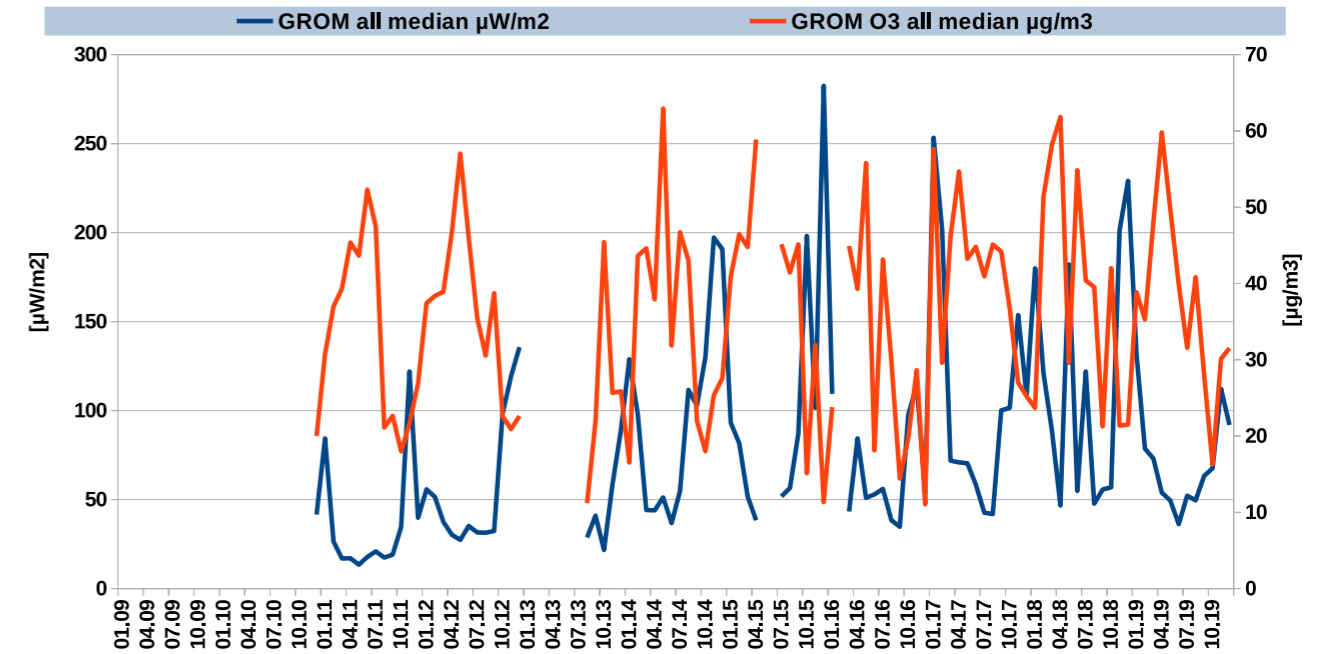


Abb. A35: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Ozon in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane aller Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/SO2

klare mondlose Nächte

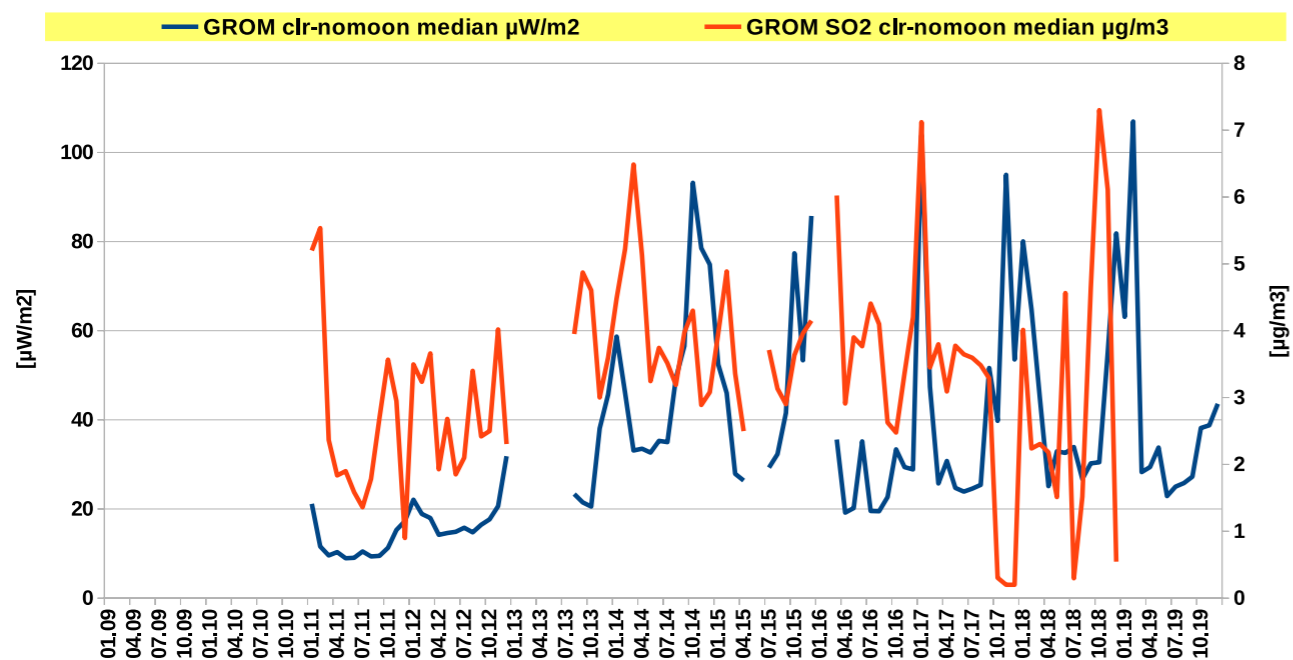


Abb. A34: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Schwefeldioxid in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.

Großmugl: Globalstrahlung/Ozon

klare mondlose Nächte

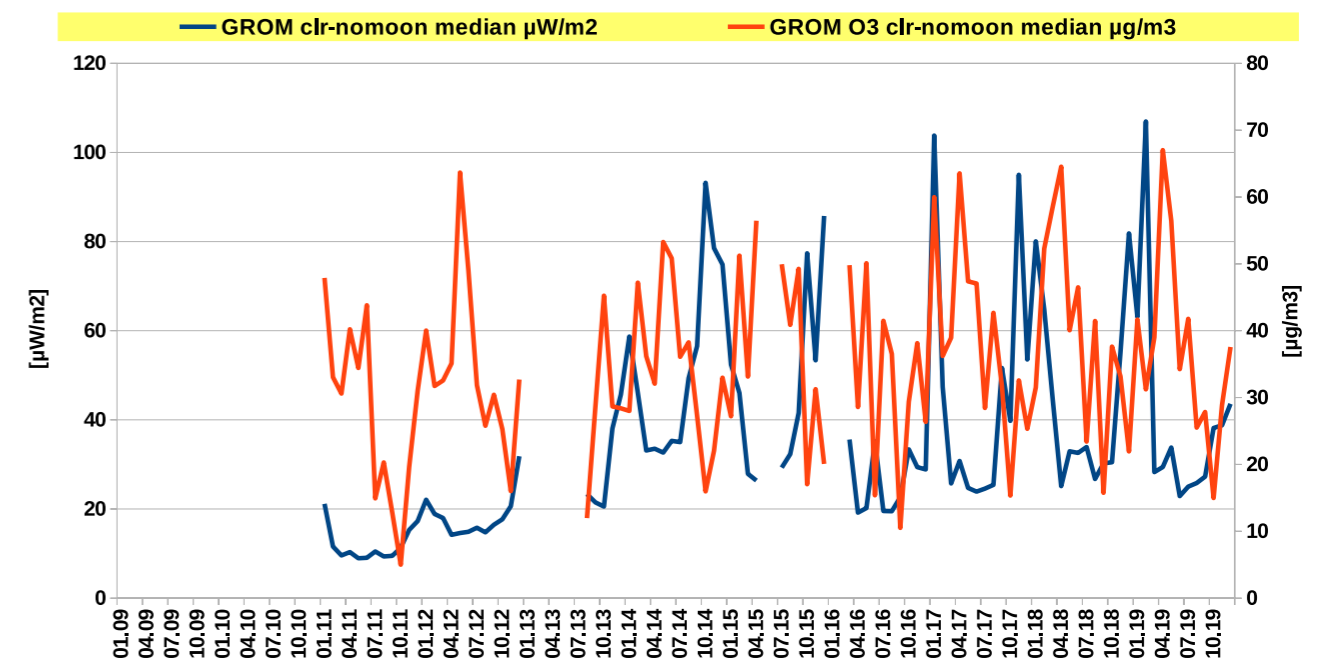


Abb. A36: Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung in Großmugl [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] und Ozon in Wien [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in den Jahren 2011 bis 2019. Monatsmediane klarer mondloser Nächte.