

Licht über Wien V

Entwicklung der künstlichen Nachthimmels-Aufhellung über Wien in den Jahren 2011 bis 2017

Günther Wuchterl, Markus Reithofer (Verein Kuffner Sternwarte)

Erstellt im Dezember 2017 im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22.

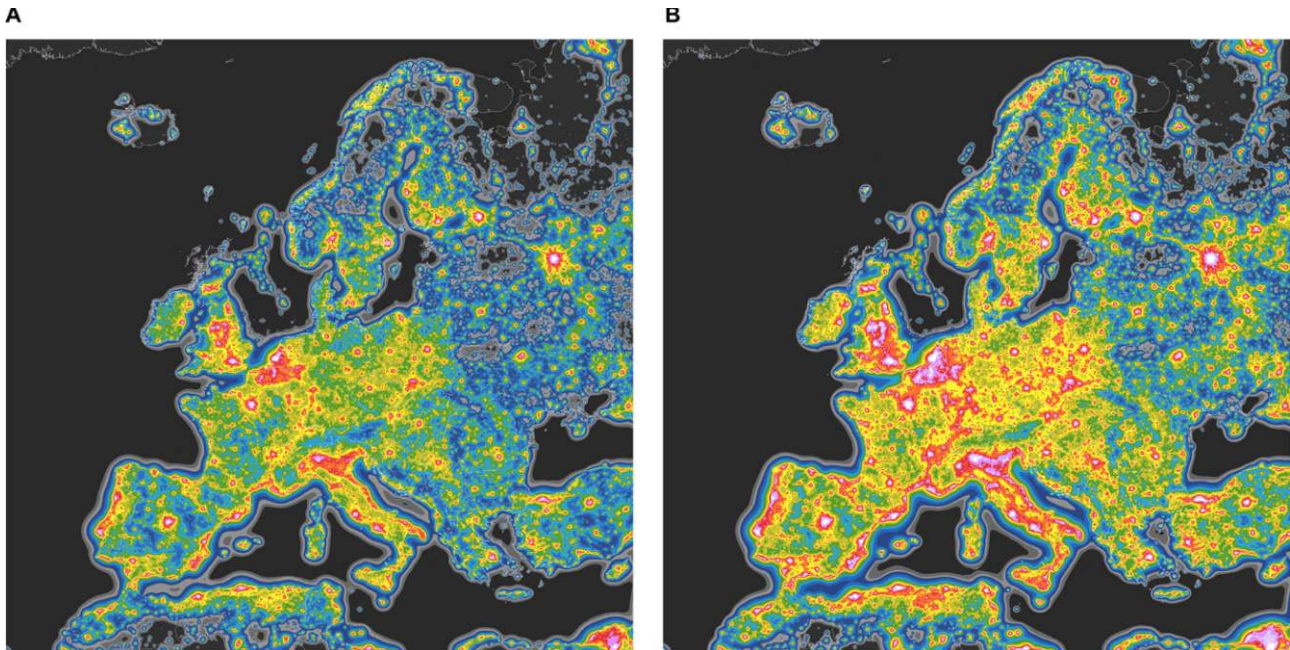


Abb. 1: Die beiden Grafiken zeigen die zu erwartende Zunahme der vom menschlichen Auge wahrnehmbaren Lichtverschmutzung über Europa, wenn die aktuelle Beleuchtung (A, links) durch LED-Beleuchtung mit einer Farbtemperatur von 4000 K ersetzt wird, ohne dabei die eingesetzte Beleuchtungsstärke zu erhöhen (B, rechts). [Grafik: Falchi et.al.]

Erläuterungen zu Abb. 1

Laut der in unserer Studie eingehend behandelten Untersuchung von Falchi et.al. [1] (2016) wird die bereits in Gang befindliche Umrüstung der Beleuchtung auf LED-Technik entgegen früheren Annahmen eine drastische Zunahme der wahrnehmbaren Lichtverschmutzung verursachen. Die aktuell vorherrschende Praxis, LED-Lampen mit einer Farbtemperatur von 4000 K einzusetzen, bewirkt wegen des höheren Blauanteils im Emissionsspektrum eine deutliche Erhöhung der Lichtstreuung, selbst wenn ihre energiesparenden Eigenschaften nicht dazu genutzt werden, zumindest einen Teil der eingesparten Energie in eine höhere Beleuchtungsstärke zu investieren. Die Lichtverschmutzung würde selbst dann zunehmen, wenn die Lampen nicht heller als ihre weniger energieeffizienten Vorgänger wären.

Tatsächlich zeigt aber die aktuelle Umrüstungspraxis, dass die Beleuchtungsstärke neu installierter LED-Lampen absichtlich deutlich höher gewählt wird als die der zuvor installierten.

Daraus folgt, dass die tatsächliche Zunahme der Lichtverschmutzung im Zuge der LED-Umstellung noch deutlich höher ausfallen wird als auf der Minimal-Prognose, die im rechten Teil (B) der Grafik zu sehen ist. Ein wesentliches Element, um diesem Trend zu begegnen, wäre die Verwendung von LED-Lampen mit 3000 K anstelle von 4000 K Farbtemperatur.

Inhalt

0.1 Kurzfassung	3
0.2 Motivation	4
1. Einführung	5
1.1. Neue Entwicklungen seit 2013	6
1.1.1. Weltatlas der Lichtverschmutzung	6
1.1.2. Vermessung des direkt nach oben in die Lichtglocke eingebrachten Lichts	6
1.1.3. Kontinuierliche Messungen der Lichtverschmutzung in Oberösterreich	7
1.1.4. Beleg der Datenqualität und Langzeitstabilität der Messgeräte	8
1.1.5. Neue Analysen von Satellitendaten: Deutliche Zunahme in Österreich?	9
1.1.6. Klärung widersprüchlicher Studien mithilfe von UAV-Messungen, Alternativen	10
2. Kontinuierliche Messung der Globalstrahlung über Wien	11
2.1 Globalstrahlung über Wien 2011 bis 2017	11
3. Zusammenfassung und Ergebnisse	11
Ergebnis 1: Wie viel Licht kommt vom Wiener Nachthimmel?	11
Ergebnis 2: Jahreslauf und Ortsabhängigkeit des Wiener Nachtlichts	11
4. Messnetz	13
4.1 Messinstrumente	13
4.2 Kalibration	14
4.3 Standorte	14
5. Literatur	15
6. Darstellung der Messwerte	16
6.1 Darstellung der Medianwerte	16
6.2. Histogramm-Darstellung der Messwerte	26
6.3. Darstellung der Messwerte der Globalstrahlung, über Zeit	48

0.1 Kurzfassung

Die hier präsentierte Studie gibt einen detaillierten Überblick zur Entwicklung der Lichtverschmutzung über dem Stadtgebiet von Wien in den Jahren 2011 bis 2017 und bietet eine Prognose bis 2020. Damit ist international erstmals eine Langzeitstudie über die Entwicklung der Lichtverschmutzung einer Großstadt verfügbar. Im Rahmen der begleitenden Untersuchungen sind Aussagen über die Verursacher und ihre spezifischen Anteile an der Lichtverschmutzung Wiens möglich. Die aktuelle Umrüstung auf LED-Technik wird diskutiert und findet Eingang in die Prognose. Neue Messungen und Analysen von internationalen Teams werden kurz vorgestellt und bezüglich ihrer Relevanz vergleichend mit unserer Studie diskutiert.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- 1) Die Lichtverschmutzung über Wien hat zwischen 2011 und 2017 im Mittel jährlich um 6 % zugenommen.
- 2) Um das Jahr 2014 wurde ein bisheriger Maximalwert festgestellt. Es gibt Hinweise auf eine Verlangsamung des Zuwachses und den Beginn einer Abnahme im Stadtzentrum (abhängig von der Wetterlage).
- 3) Prognose bis 2020: In Abhängigkeit von der noch ausstehenden Bestätigung der Zuwachsverlangsamung seit 2016 ein weiterer Zuwachs von insgesamt 10-15 %, das entspricht 3-5 % pro Jahr.

0.2 Motivation

Künstliche Beleuchtung zählte bis vor Kurzem zu den Technologien mit einem besonders schlechten Wirkungsgrad, da nur ein sehr geringer Teil der dafür aufgewendeten Energie zur Umwandlung in sichtbares Licht verfügbar war. Seit der Einführung der LED-Technik erfährt dieser Bereich eine grundlegende Verbesserung, der allerdings zahlreiche Nebenaspekte mit sich bringt.

Durch die Möglichkeit, gegenüber älteren Beleuchtungstechnologien bei gleicher Beleuchtungsstärke bis zu 80 % Energie einzusparen, werden bei Neuinstallationen tendenziell höhere Beleuchtungsstärken realisiert – dies auch zur Erfüllung der aktuellen Normen. Hinzu kommt der Trend zum Einsatz von LED-Lampen mit einer Farbtemperatur von 4000 K, was im Vergleich mit den im öffentlichen Bereich bisher vorherrschenden Mix aus Na-Dampf-Lampen und Leuchtstoffröhren einer drastischen Zunahme des blauen Anteils des abgestrahlten Lichts entspricht. Problematisch ist das abgesehen von den nachgewiesenen biologischen Störeinflüssen vor allem wegen dem erheblich höheren Streueffekt von blauem Licht. Bei gleicher Beleuchtungsstärke kann dieser Unterschied je nach gewählter Farbtemperatur mehrere Hundert Prozent betragen.

Der grundsätzlich positive Effekt einer energieeffizienten Beleuchtungstechnologie wird daher durch eine deutliche Erhöhung der Lichtverschmutzung konterkariert.

Ein weiterhin bestehendes Problem ist die ineffiziente Beleuchtung von Flächen im Außenbereich. Während die öffentliche Beleuchtung Wiens durch die Einführung der neuen Standardleuchte der MA33 in diesem Bereich große Fortschritte macht, strahlt ein großer Teil des privat und kommerziell eingesetzten Lichts an den zu beleuchteten Flächen vorbei. Rund ein Drittel der in der Lichtglocke Wiens enthaltenen Lichtmenge stammt aus direkt zum Himmel gestrahlten und damit vollständig verschwendetem Licht.

Grundsätzlich gilt: Jedes Watt an Lichtleistung, das die zu beleuchtende Fläche (z.B. Fahrbahn, Straßenverkehr, betrachtende Personen im Falle von Fassadenbeleuchtungen) nicht erreicht oder ungenutzt verlässt, ist verschwendet. Sichtbar wird diese Energie außerhalb von Städten anhand des in der Atmosphäre gestreuten Ablichts. Die Summe des Ablichts einer Stadt bildet ihre „Lichtglocke“ (Abb. 3). Wir unterscheiden es vom Auflicht, das direkt senkrecht ins Weltall strahlt, auf Satellitenbildern sichtbar wird, ebenfalls Energie kostet, aber nicht zur Lichtglocke beiträgt. Die kontinuierliche Überwachung dieser Lichtanteile ist Inhalt dieser Studie.



Abb.2: Ein Blick auf die Lichtglocke Wiens (heller Bereich in der Bildmitte) vom mehr als 100 Kilometer Luftlinie entfernten UNESCO Weltnaturerbe und Wildnisgebiet Dürrenstein, das einer der dunkelsten Orte Europas ist und zunehmende Beeinträchtigungen durch den Anstieg der Lichtverschmutzung erfährt. [Bild: G. Wuchterl, Verein Kuffner Sternwarte]

1. Einführung

Diese Studie umfasst eine Analyse der durch künstliche Beleuchtung verursachten Aufhellung des Nachthimmels über Wien in der Zeit von 2011 bis 2017, eine Interpretation der damit verbundenen Effekte, sowie eine Prognose der weiteren Entwicklung. Sie repräsentiert die Fortsetzung von drei Studien, die in den Jahren 2011 bis 2013 vom Verein Kuffner Sternwarte im Auftrag der Wiener Umweltschutzgesellschaft durchgeführt wurden.

Als weltweit erste Studie zeigt sie die Entwicklung der Nachthimmelsaufhellung einer Großstadt über einen Zeitraum von sieben Jahren und ermöglicht dadurch Prognosen für die nahe Zukunft.

Seit der letzten Durchführung dieser Analyse (2013) haben sich wesentliche Veränderungen in Bezug auf die Beleuchtungsbedingungen des erfassten Gebietes (Wien) und das durch andere Messungen verfügbare Datenmaterial ergeben. Insbesondere die Umrüstung der öffentlichen Beleuchtung auf LED-Lampen, die zum Teil mit Full-Cutoff-Technologie betrieben werden, und der Rückbau von Kugelleuchten sind hier zu nennen. Auch der private und gewerbliche Bereich wird seit einigen Jahren auf LED-Technik umgestellt.

Richtungsweisend ist der im Jahr 2016 publizierte Weltatlas der Lichtverschmutzung von Falchi et.al. [1]. Unter anderem auch für Österreich relevant ist die aktuelle Auswertung von Satellitendaten durch Kyba et.al. [2]. Neue Messungen wurden in den vergangenen Jahren auch vom Land Oberösterreich mit einem eigenen Messnetzwerk durchgeführt. Von großer Bedeutung für die Stadt Wien und das generelle Verständnis der Verteilung von Lichtverschmutzung über Großstädten ist die im Jahr 2016 durchgeführte Vermessung der nach oben gerichteten Beleuchtung Wiens durch den Verein Kuffner Sternwarte [3]. Grundlegend für die Absicherung der Qualität der hier präsentierten Daten war der Abschluss einer Langzeitstudie von Messungen beim UNESCO Weltnaturerbe und Wildnisgebiet Dürrenstein, die mit dem gleichen Instrument wie die Messungen in Wien durchgeführt wurden [4].

Auf die zitierten Arbeiten gehen wir im folgenden Kapitel näher ein und setzen sie in Bezug zu den in unserer Studie präsentierten Ergebnissen.

1.1. Neue Entwicklungen seit 2013

1.1.1. Weltatlas der Lichtverschmutzung

Der von Falchi et.al. [1] 2016 publizierte Weltatlas der Lichtverschmutzung ermöglicht einen globalen Blick auf die derzeitige Verteilung der Lichtverschmutzung. Darüber hinaus beinhaltet er eine Extrapolation der aktuellen Werte auf eine Umstellung der Beleuchtung mit LED-Lampen einer Farbtemperatur von 4000 K. Durch die vergleichsweise grobe Auflösung des Atlas sind zwar keine präzisen Aussagen über die Lichtverschmutzung einzelner Städte möglich, aber es zeigt sich deutlich der Rückgang von Regionen mit einem annähernd naturnahen (nicht von Kunstlicht beeinträchtigten) Himmel. In Europa sind diese nahezu ausnahmslos verschwunden.

Alarmierend ist dieser Atlas vor allem in Hinblick auf die erwarteten Effekte durch die LED-Umstellung [Abb.1]. Hier wird mit einer drastischen Zunahme der Lichtverschmutzung gerechnet, die einem wesentlich rascheren und höheren Anstieg als in sämtlichen Jahren zuvor entsprechen dürfte. Auch unter Schutz gestellte Gebiete werden davon betroffen sein.

Aus dieser Perspektive deckt sich der Weltatlas der Lichtverschmutzung mit den Ergebnissen unserer Messungen und ist als Aufruf zu einer deutlich sensibleren und differenzierteren Vorgangsweise bei der Umrüstung auf LED-Beleuchtung zu verstehen.

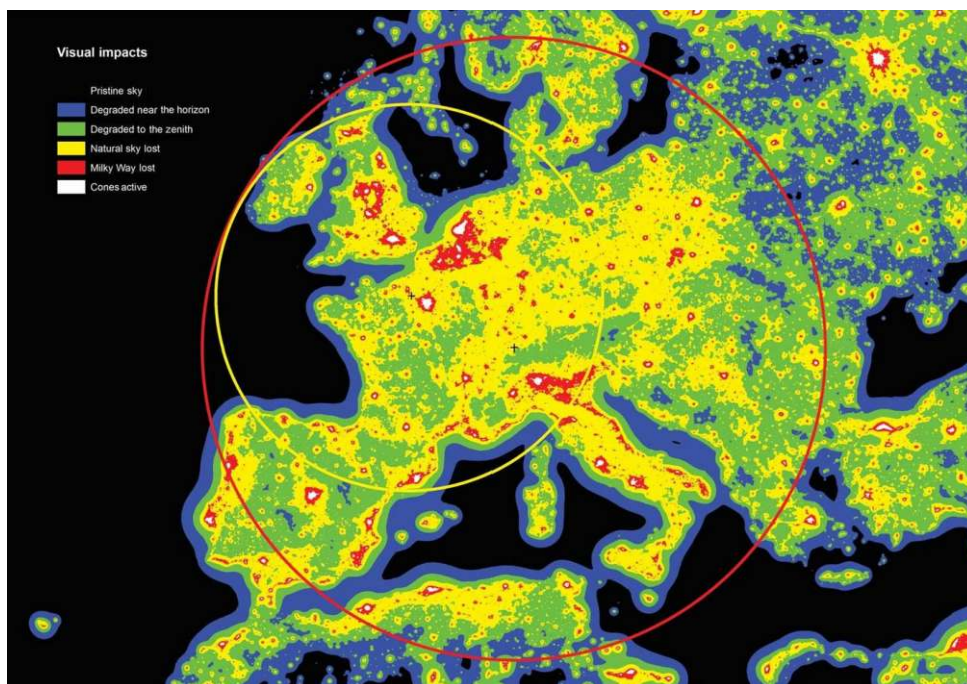


Abb. 3: Ausschnitt aus dem Weltatlas der Lichtverschmutzung von Falchi et.al. [1]. Lediglich schwarz markierte Gebiete sind noch frei von Lichtverschmutzung. [Grafik: Falchi et.al.]

1.1.2. Vermessung des direkt nach oben in die Lichtglocke eingebrachten Lichts

Basierend auf den Messungen der vergangenen Jahre konnten wir zwei Drittel der Helligkeit der Wiener Lichtglocke grob den Verursachern zuordnen. Demnach stammt etwa ein Drittel aus der öffentlichen Straßenbeleuchtung und ein weiteres Drittel aus Geschäfts-, Auslagen- und Werbebeleuchtung.

Das verbleibende Drittel entzog sich zunächst der Messung, da es offensichtlich direkt nach oben abgestrahlt wird. Die naheliegende Vermutung, dass es sich dabei primär um Gebäude- und Fassadenanstrahlungen sowie großflächige Werbebeleuchtungen handelt, ist nur durch eine direkte

und vollständige Vermessung der Lichtglocke von oben belegbar. Im Jahr 2016 erfolgte diese Messung durch den Verein Kuffner Sternwarte im Auftrag der MA33. Als Messgeräte wurden neben Lightmetern vor allem hochempfindliche Digitalkameras verwendet, die an Bord eines Hubschraubers bei einer nächtlichen Befliegung Wiens nach einem exakt definierten Flugplan zum Einsatz kamen.

Als Ergebnis konnte dieses fehlende Drittel an Verursachern nicht nur allgemein den direkt nach oben gerichteten Lichtquellen zugeordnet werden, sondern auch eine individuelle Identifikation und Quantifizierung der einzelnen Lichtquellen erfolgen. Eine wichtige Feststellung dieser Untersuchung ist, dass eine relativ kleine Zahl an Verursachern durch außergewöhnlich helle und zugleich ineffiziente Beleuchtungsmethoden für einen Großteil des direkt nach oben gestrahlten Lichts verantwortlich ist. In diesem Bereich ließe sich daher mit einem vergleichsweise geringen Aufwand ein erheblicher Teil der Wiener Lichtverschmutzung reduzieren.



Abb.4: Detailaufnahme aus der Datenerfassung für die Ermittlung des direkt nach oben abgestrahlten Lichts des Stadtgebiets von Wien im Jahr 2016. [Bild: M. Reithofer, Verein Kuffner Sternwarte]

1.1.3. Kontinuierliche Messungen der Lichtverschmutzung in Oberösterreich

Das Land Oberösterreich betreibt ein Netzwerk aus 23 Mess-Stationen, die eine regelmäßige Überwachung der Lichtverschmutzung über den abgedeckten Gebieten ermöglichen. Als Messinstrumente dienen dort so genannte Sky-Quality-Meter, deren Aufbau und Messprinzip sich grundlegend von den in Wien eingesetzten Lightmetern unterscheiden. Aufgrund der vergleichsweise kurzen Laufzeit sind noch keine Langzeitprognosen möglich, die Betreiber berichten allerdings bereits von einer Zunahme der Lichtverschmutzung im Großraum Linz.

Ein Vergleich der in Oberösterreich gewonnenen Daten mit dem Messnetzwerk in Wien ist durch das sehr unterschiedliche Design der Instrumente nicht möglich. Im Gegensatz zu den in Oberösterreich verwendeten Sky-Quality-Metern werden in Wien Instrumente eingesetzt, die mit SI-Einheiten arbeiten, die Konventionen der Internationalen Astronomischen Union (IAU) und der

Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) erfüllen, keine maßgebliche Alterung zeigen und Wittereffekte kalkulierbar halten.

Davon unabhängig zeugt das Lichtmessnetzwerk in Oberösterreich vom wachsenden politischen Interesse und Engagement für das Thema Lichtverschmutzung und dokumentiert, dass ein derartiger Verbund von Messgeräten auch auf Landesebene geschaffen und verwaltet werden kann. Die dabei gewonnenen Daten sind öffentlich zugänglich und können kostenlos von Servern des Landes Oberösterreich bezogen werden.

Eine vergleichbare Initiative für Wien wäre vor allem aufgrund der langen Erfahrungen mit den bestehenden Mess-Stationen, der hohen Qualität der eingesetzten Instrumente (Lightmeter) und der vergleichsweise einfachen Einbindung in das Wiener Umweltmessnetzwerk naheliegend.



Abb.5: Lageplan der Stationen des Mess-Netzwerks des Landes Oberösterreich.[Bild: Land OÖ]

1.1.4. Beleg der Datenqualität und Langzeitstabilität der Messgeräte

Eine baugleiche Variante der in Wien verwendeten Mess-Stationen wird vom Verein Kuffner Sternwarte seit dem Jahr 2010 in der Nähe des UNESCO Weltnaturerbe und Wildnisgebiet Dürrenstein betrieben. Die Bedingungen für eine Langzeitüberprüfung des Sensors und der Elektronik sind dort aufgrund des außergewöhnlich dunklen Himmels ideal. Ein Ergebnis der Messungen ist, dass am Dürrenstein eine der letzten naturnahen Nachthimmelssituationen Europas vorzufinden ist und daher nur eine minimale Beeinträchtigung durch Lichtverschmutzung festgestellt werden kann.

Darüber hinaus konnten wir die hohe Messgenauigkeit und die Langzeitstabilität des Lightmeters belegen. Die durch natürliche Effekte hervorgerufenen minimalen Helligkeitsschwankungen des am Dürrenstein nahezu perfekt dunklen Himmels haben sich dabei als größer erwiesen als die Streuungsstatistik der Messungen. Insgesamt wurden am Dürrenstein mehrere Millionen Einzelmessungen durchgeführt. Die Publikation einer detaillierten Analyse der dabei gewonnenen Daten erfolgte 2017 in [2].

1.1.5. Neue Analysen von Satellitendaten: Deutliche Zunahme in Österreich?

Kyba et.al. [3] haben im Jahr 2017 eine auf der Analyse von Satellitendaten beruhende indirekte Messung der globalen Lichtverschmutzung publiziert. Demnach nehmen die Intensität der Lichtverschmutzung und die Ausdehnung der beleuchteten Flächen seit dem Jahr 2012 weltweit um rund 2 Prozent pro Jahr zu.



Abb.6: Vergleich der Beleuchtungssituation der Stadt Calgary (CAN) im Jahr 2010 (li.) und 2015 (re.). Neben einer Zunahme der beleuchteten Fläche ist der erheblich höhere Blauanteil durch die Umstellung einiger Bezirke auf LED-Technik sichtbar. [Bild: NASA Earth Observatory/Kyba, GFZ]

Für Österreich findet diese Studie allerdings einen deutlich überdurchschnittlichen Anstieg der Lichtverschmutzung, der sich nicht mit den vom Boden gemessenen Daten anderer Studien deckt. Kyba et.al. vermuten, dass eine unregelmäßige Veränderung der Bodenalbedo durch Schneebedeckung (höhere Reflexion nach oben) für diese Datenverzerrung verantwortlich sein kann. Die generelle Problematik von Satellitendaten ist, dass sie nur direkt nach oben gerichtetes Licht erfassen können und Rückschlüsse auf die gesamte Lichtverschmutzung inklusive der in der Erdatmosphäre gestreuten Anteile entsprechend schwierig sind. Hinzu kommt, dass keine kontinuierliche Messung erfolgt, weil Aufnahmen immer nur dann möglich sind, wenn sich der Satellit über dem Beobachtungsgebiet befindet. Die Anzahl der Zeitpunkte ist bei dieser Studie daher um mehrere Größenordnungen geringer als bei den von uns durchgeführten Lightmeter-Bodenmessungen.

Ein weiteres Problem ist der unvollständige Indikator für das Wetter und die Bewölkungseffekte. Hierin liegt ein wesentlicher Schlüssel zur Erklärung der von Kyba et.al. gemessenen überdurchschnittlichen Lichtverschmutzungszunahme.

Durch das Design unseres Messverfahrens sind wir in der Lage, simultane Aussagen über die Wetterbedingungen inklusive der Temperatur während der Messungen zu treffen. Zusammen mit unserer deutlich höheren Datendichte (Messfrequenz 1 Hz, also sekundlich gegenüber jährlich) und dem uns möglichen konsistenten Vergleich mit den Daten der vergangenen Jahre können wir eine Schneebedeckung im Jahr 2016 als Erklärung für die von Kyba et.al. gemessene Zunahme für Wien ausschließen. Stattdessen dürften die zu geringe Datendichte der Satellitenmessungen und die unzureichende Elimination von Bewölkungseffekten für dieses Ergebnis verantwortlich sein. Der vermutete Anstieg der Lichtverschmutzung über Österreich von bis zu 200 % findet im Fall von Wien damit keine Bestätigung durch unsere Studie.

1.1.6. Klärung widersprüchlicher Studien mithilfe von UAV-Messungen, Alternativen

Der Einfluss der Bodenalbedo (Reflexionsvermögen des Bodens) auf unterschiedliche Methoden zur Messung der Lichtverschmutzung wird von verschiedenen Studienautoren kontrovers diskutiert. Insbesondere die Veränderung bei Schneelage kann demnach eine deutliche Verzerrung der Messergebnisse bewirken. Allerdings existiert bisher in der Literatur kaum eine messtechnische Evaluierung dieses vermuteten Effekts.

Neu aufgetaucht ist diese Diskussion in der in 1.1.5. diskutierten Studie von Kyba et.al., in der ein deutlicher Anstieg der Lichtverschmutzung in Österreich als nur scheinbarer Effekt infolge von Schneebedeckung vermutet wird, die jedoch als solche nicht nachgewiesen werden konnte.

Ursprünglich war daher als Teil unserer Studie eine messtechnische UAV-Befliegung von Straßenlaternen bei unterschiedlichen Bodenalbedos geplant, um die relative Größenordnung des vermuteten Effekts experimentell einstufen zu können.

Ein Vergleich unseres Datenmaterials mit der Studie von Kyba et.al. hat uns jedoch zu einer anderen – direkteren – Methode geführt, um die bestehenden Widersprüche analysierbar zu machen. Die Grundlage dafür sind die hohe Lichtempfindlichkeit, die sehr hohe zeitliche Auflösung und der eingebaute Temperatursensor der von uns eingesetzten Lightmeter. Dadurch waren wir grundsätzlich in der Lage, genaue Aussagen über die aktuelle Wettersituation vorort zu treffen, wofür allerdings ein neuer Auswerte-Algorithmus entwickelt und getestet werden musste. Über eine entsprechende Analyse der insgesamt mehr als 500 Millionen Einzelmessungen umfassenden Zeitserien unserer Mess-Stationen können wir mithilfe dieser Algorithmus Bewölkungseffekte diagnostizieren und Messungen mit und ohne Schneebedingungen in beliebig wählbaren Zeitfenstern vergleichen („klare“ und „frostfreie“ Stichproben).

Dadurch sind wir in der Lage, diejenigen Messungen zur Beurteilung der Lichtverschmutzung heranzuziehen, die frei von Bewölkung und Schnee-Effekten sind. Detaillierte Beispiele für die Leistungsfähigkeit dieser Methode finden sich in den präsentierten Medianen der Nachthimmelshelligkeit über den Mess-Stationen Kuffner Sternwarte und Wien Zentrum, sowie in den entsprechend gekennzeichneten Histogrammverteilungen im Anhang.

2. Kontinuierliche Messung der Globalstrahlung über Wien

Um die in der Atmosphäre gestreute Lichtenergie (Lichtglocke) zu quantifizieren, wurden ausgehend vom Wiener Stadtzentrum bis weit über die Stadtgrenze hinaus mehrere Lightmeter auf topographisch günstig gelegenen Hausdächern montiert.

Mit diesen Lightmetern wurde mit einer Messfrequenz von 1 Hz bei allen Wetterlagen die aktuelle „Gesamthelligkeit“ des lokalen Himmels gemessen und für die Weiterverarbeitung gespeichert.

Die Ergebnisse dieses mehr als 500 Millionen Einzelmessungen umfassenden Datensatzes werden auf drei Arten dargestellt:

- Über die Mediane unterschiedlicher nächtlicher Stichproben. Das sind jene aller nächtlichen (Sonne mind. 18° unter dem Horizont) Werte, die von mondlosen Bedingungen, jene mondloser bzw. klarer mondloser Bedingungen sowie für frostfreie, klare mondlose Bedingungen. Letztere sind vor allem zur Kontrolle etwaiger Effekte von Schnee oder Eis auf den Sensoren (Abschattung) sowie von Schneelagen am Boden (Reflexion) nützlich.
- Mit den jährlichen Verteilungen der Messwerte für diese Stichproben (Histogramme).
- Mit dem zeitlichen Verlauf der Messwerte für alle Jahre und alle Mess-Stationen. Für die bessere Darstellbarkeit wurde die Gesamtzahl der Messungen um den Faktor 10 reduziert. Es wird also alle 10 Sekunden eine Messung dargestellt.

Die Ergebnisse sind im technischen Abschnitt vollständig dokumentiert. In Tabelle 3 findet sich eine Übersicht über die Jahres- und Monatsmediane der klaren mondlosen Nächte für alle Stationen.

2.1 Globalstrahlung über Wien 2011 bis 2017

Die künstliche Aufhellung des Nachthimmels – die nur einen Teil der als „Lichtverschmutzung“ bekannten Phänomene repräsentiert – stellt hohe Anforderungen an die Messtechnik und die wissenschaftliche Auswertung der mit ihr gewonnenen Daten.

Das Phänomen selbst und sein Effekt auf die Umwelt sind durch künstliche und natürliche Einflüsse auf die Atmosphäre stark zeitabhängig. Derartige Effekte sind die Ein- und Ausschaltvorgänge künstlicher Beleuchtung ebenso wie Wetter- und Luftqualitätsveränderungen, die die optischen Eigenschaften der Atmosphäre verändern. Besonders auffällig sind die Effekte der Wolken, die das Licht großteils zum Boden zurück reflektieren, während die klare Atmosphäre deutlich mehr Licht nach oben in Richtung Weltraum durchlässt.

Um die Effekte der künstlichen Aufhellung des Nachthimmels möglichst detailliert verstehen zu können, sind daher Messungen mit einer hohen zeitlichen (rasche Änderungen) und räumlichen (lokale Phänomene) Auflösung erforderlich.

Die hohe Dynamik – mehrere Größenordnungen in den Lichtniveaus – und die Veränderungen werden von uns auf der Basis von Langzeit-Messserien auf drei Arten dargestellt. Sie ermöglichen jeweils unterschiedliche Aussagen:

1. **Der Median-Wert jeweils eines ganzen Jahres** dämpft die täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen auf robuste Weise und ermöglicht dadurch einen differenzierten Langzeit-Vergleich.
2. **Die jährlichen Verteilungen der Messwerte für unterschiedliche Stichproben** (Wolken, Mond, Frost, etc.) erfassen die große Bandbreite des Phänomens. Hier werden Schwankungen und ihre „inneren Strukturen“ sichtbar. Alle Verteilungen zeigen mehrere Maxima, deren Lage und Ausprägung weitere Rückschlüsse erlauben.
3. **Die Zeitserien der Messwerte.** Hier wird der zeitliche Verlauf der Daten direkt dargestellt und mit natürlichen Werten (Mond, natürlicher Himmel) verglichen.

Nur vollständige Zeitserien mit hoher Dynamik und Genauigkeit ermöglichen diese Differenzierung. Die außergewöhnliche Länge der hier vorgestellten Zeitserien von 7 Jahren ermöglicht international erstmalig eine Analyse in dieser differenzierten Form. In der Meteorologie und in der Atmosphärenforschung ist diese Methodik bereits ausführlich erforscht. Das Studium der Globalstrahlung bei Tageslicht ist entsprechend hoch entwickelt und Gegenstand zahlreicher Publikationen, während es sich beim Licht der Nacht noch in den Anfängen befindet. Das zeigt auch der international geführte Diskurs um die Messung von Lichtverschmutzung: Er beschränkt sich überwiegend auf wolkenlosen Himmel. Dass aber sämtliche Umweltbedingungen in die Datenanalyse mit einbezogen werden müssen, zeigt die Analyse der hier präsentierten Messungen mit aller Deutlichkeit. Unser Zugang erfasst daher über die drei genannten Methoden die Entsprechungen eines Lichtwetters und eines Lichtklimas. In diesem Bereich wirft unsere Studie international den ersten belastbaren Blick auf den Wandel des Lichtklimas einer Großstadt.

3. Zusammenfassung und Ergebnisse

Die Zeitserien (Licht als Funktion des Datums) zeigen im Zentrum Wiens Schwankungen des Nachtlichts zwischen der Halbmond-Helligkeit als Untergrenze und mehreren Vollmondhelligkeiten im Zenit. Das entspricht etwa dem 1000-Fachen der Helligkeit eines nicht lichtverschmutzten Himmels. Dabei werden Werte über 1 Lux Beleuchtungsstärke (etwa 10 mW/m²) durch den aufgehellten Nachthimmel regelmäßig überschritten.

Die Verteilungen zeigen, dass die Lichtbedingungen fast unabhängig davon sind, ob der Mond am Himmel oder unter dem Horizont steht und dass sich sogar die Bedingungen bei Schönwetter und Wolken zum Großteil überlappen. Im Zentrum Wiens sind diese Bedingungen im Jahr 2017 auch in

den Verteilungen nicht mehr getrennt. Die Grundhelligkeit des durch künstliche Beleuchtung erhellten Himmels ist also auf einem derart hohen Niveau, dass es kaum noch einen Unterschied macht, ob der Vollmond am Himmel steht oder ob Bewölkung vorliegt.

Die Entwicklung der Jahresübersichten für 2011 bis 2017 (Jahresmediane) zeigt unabhängig von der betrachteten Mess-Station und unabhängig von der Mond-Helligkeit und Wetterphänomenen ein Maximum zwischen 2013 und 2015. Das ist auch gut in den Zeitserien in den besonders hellen Wintermonaten 2014 und 2015 erkennbar. Ob das bereits eine nachhaltige Wende in der bisher stetig zunehmenden Lichtverschmutzung ist, wird der weitere Trend ab 2018 zeigen.

Die bis ins Jahr 2011 reichende Zeitbasis ermöglicht es uns erstmals, unterschiedliche Effekte und Ursachen in den Entwicklungen zu diskutieren. Am Stadtrand und 33 km vom Stadtzentrum entfernt (Station Großmugl) ergibt sich das Bild eines langfristigen Zuwachses mit einem Buckel rund um das Lichtmaximum zwischen 2013 und 2015.

In Großmugl ist der Himmel bis auf Horizontaufhellungen naturnah (etwa das 2 bis 4-fache des Naturnachtlichts ohne Mond) mit geringem Eigenbeitrag (z.B. Straßenbeleuchtung) und hohen Einstrahlungen (etwa 90 % Beitrag). Bei diesen trägt Wien den bei weitem überwiegenden Anteil. Großmugl liegt 33 km vom Stadtzentrum Wiens entfernt und damit etwa am halben Radius der Wiener Lichtglocke. Damit zeigt es eine Perspektive auf das Wiener Ablicht abseits seiner Hauptquellen.

Die langjährigen Trends schwanken in den verschiedenen Stichproben je nach Wetter und Mondanteil um 20 % (2011-2017) und 11 % (2012-2016) jährlichen Zuwachs.

An der Kuffner-Sternwarte zeigen die Trends unterschiedlicher Nacht-Bedingungen die geringsten Schwankungen um Mittelwerte von **+6 % pro Jahr** (2011-2017) und um **+5 % pro Jahr** (2012-2016).

Im Wiener Stadtzentrum ist das Licht-Maximum am stärksten bei den klaren mondlosen Nächten ohne Frost ausgeprägt. Die Trends schwanken je nach Stichprobe zwischen **-5 % pro Jahr** (mittlerer jährlicher *Abnahme* des Medians klarer Nächte 2012-2016), und **+2 % pro Jahr** (mittlerer jährliche *Zunahme* des Medians mondloser, klarer, frostfreier Nächte). Die Mittelwerte der Trends (über alle Stichproben) schwanken im Zentrum um -0.5% (2011-2017) und -2.2% (2012-2016). Zum Vergleich schwanken die Mittelwerte der **Änderungen von Jahr zu Jahr um +7% und +11%**. Vermutlich zeigt dieses uneinheitliche Bild, dass bei der extremen Lichtverschmutzung im Stadtzentrum sowohl lineare Trends, als auch astronomisch-meteorologisch definierte Stichproben nicht mehr ausreichen, um die Situation und ihre Entwicklung konsistent darzustellen. Eine Möglichkeit für weitere Untersuchungen wäre die Beschränkung auf „alle Nächte“. Dann ginge man allerdings das Risiko meteorologischer oder astronomischer Auswahleffekte ein, was separat untersucht werden müsste, um diese Wahl zu rechtfertigen.

Insgesamt schwanken die Änderungen um jenen Trend der Kuffner-Sternwarte, der aus der längsten Zeitbasis abgeleitet ist, das ist ein **Zuwachs** der Mediane der nächtlichen Globalstrahlung von **6 % pro Jahr**.

Damit lassen sich die von uns erhobenen Daten wie folgt zusammenfassen:

Auch am äußeren Stadtrand von Wien herrscht während der gesamten Nacht ein permanenter Dämmerungszustand. Das künstlich erzeugte Nachtlcht bleibt typischerweise etwa 100 Mal heller als ein natürlicher, nicht lichtverschmutzter Himmel (ohne Mondlicht). Der langfristige Zuwachs der Nachthelligkeit von 6 % pro Jahr ist den natürlichen Variationen (Wetter und Mond) überlagert, diese sind aber durch Messungen als Beiträge gut erfasst und dokumentiert.

Im Wiener Stadtzentrum ist die Situation noch deutlich stärker vom Kunstlicht dominiert. Die dortige Permanentdämmerung ist typischerweise etwa 400 bis 1000 Mal heller als ein natürlicher, nicht lichtverschmutzter Himmel (ohne Mondlicht). Damit übertrifft die künstliche Aufhellung des Nachthimmels dort sämtliche astronomische Ursachen inklusive eines im Zenit stehenden Vollmonds. Kurzfristige Schwankungen werden im Stadtzentrum ausschließlich durch die Bewölkung (Bedeckungsgrad, Höhe und Art der Wolken) und Ein- Ausschaltprozesse der künstlichen Beleuchtung bestimmt. Der Mondrhythmus ist dabei kein relevanter Faktor. Die Verteilungen für unterschiedliche Wetter- und Mondbedingungen beginnen einander besonders gegen Ende des Studienzeitraums (2017) so stark zu ähneln, dass sogar das Wetter nur mehr Änderungen verursacht, die mit jenen der Ein- Ausschaltprozesse der künstlichen Beleuchtung vergleichbar sind. Wien produziert damit im Zentrum sein eigenes „Lichtwetter“, das bereits größtenteils von natürlichen Prozessen abgekoppelt ist.

In einer vorläufigen Bewertung zeigt das Wiener Zentrum Extrembedingungen ohne einem eindeutigen Bild für die weitere Entwicklung. In Großmugl stellt sich die Lichtglocke in einer auf die Hauptquellen bezogenen Fernperspektive dar. Wegen der dort absolut betrachtet niedrigen Werte können bei dieser Station aber Nachbarschaftseffekte aus Niederösterreich als Ursache für die stärkeren Zuwächse nicht ausgeschlossen werden. Die quantitativ in der Mitte liegenden Zuwächse der Kuffner-Sternwarte mit ihrer Lage am Stadtrand können als beste Charakterisierung der Entwicklung der Wiener Lichtverschmutzung betrachtet werden.

Gleichzeitig zeichnen sich mit dem Lichtmaximum von 2014 Hinweise für eine Umkehr dieses Trends ab. Ob es sich dabei um einen kurzfristigen Rückgang oder eine echte Wende handelt, wird durch eine Analyse anhand der Ein- /Ausschaltprozesse der künstlichen Beleuchtung anstelle einer Analyse nach astronomischen oder meteorologischen Ursachen zu klären sein.

4. Messnetz

4.1. Messinstrumente

Für sämtliche Messungen dieser Studie wurden Lightmeter der Firma k2wlights des Bautyps Mark 2.31 eingesetzt. Dieses speziell für die hocheffiziente Erfassung aller natürlicher, insbesondere auch sehr geringer Lichtmengen konzipierte Instrument wurde in einer Kooperation des Vereins Kuffner-Sternwarte und der Thüringer Landessternwarte entwickelt. Es ist weltweit im Einsatz und wird aufgrund seiner herausragenden Qualität auch von der Europäischen Südsternwarte (ESO) für das Site-Testing der leistungsfähigsten Teleskope eingesetzt.

Um die in der Atmosphäre gestreute Lichtenergie (Lichtglocke) zu quantifizieren, wurden ausgehend vom Wiener Stadtzentrum bis weit über die Stadtgrenze hinaus Lightmeter auf topographisch günstig gelegenen (keine Abschattungs- oder Störlichteffekte in unmittelbarer Nachbarschaft) Hausdächern montiert.



Abb. 7: Die Messzelle eines Lightmeters. [Bild: Verein Kuffner Sternwarte]

4.2. Kalibration der Messinstrumente

Durch das formulativ bekannte Messverhalten der Lightmeter konnte die Kalibrierung anhand der Vermessung des zeitlichen Verlaufs der Himmelselligkeit (Sonne und Dämmerung) bei wolkenlosem Himmel durchgeführt werden. Aus dem Vergleich dieser Daten mit einem meteorologischem Globalstrahlungsmodell wurden für jedes Gerät sechs Koeffizienten ermittelt, die eine direkte Rückrechnung des Messwertes auf die reale Bestrahlungsstärke, eine Energiestromdichte in $[\text{W}/\text{m}^2]$ ermöglichen.

4.3. Standorte der Messinstrumente

Zur Erfassung der Globalstrahlung sind in Wien und darüber hinaus sechs Messstationen in Betrieb, die mit einer Frequenz von 1 Hz Messwerte aufzeichnen.

Zu den vier Stationen, die in *Lichtbericht 1, Kapitel II.2 und II.4* beschrieben sind, wurde im Dezember 2012 die Station Wien Liesing in Betrieb genommen. Im Oktober 2013 wurde das Messnetz schließlich um die Station Alte Donau ergänzt.

Ausgestattet sind diese mit Lightmetern vom Typ Mk2.3, bzw. Mk2.3L, der Firma k2wLights.

Station	geogr. Breite	geogr. Länge	Seehöhe [m]
Großmugl	48° 29' 17,50" N	16° 13' 22,80" O	217
Klosterneuburg/Höflein	48° 21' 05,12" N	16° 15' 49,58" O	180
Kuffner Sternwarte	48° 12' 46,13" N	16° 17' 28,75" O	280
Wien Zentrum	48° 12' 33,35" N	16° 22' 54,32" O	209
Wien Liesing	48° 08' 16,70" N	16° 17' 08,97" O	220
Alte Donau	48° 13' 58,00" N	16° 26' 00,80" O	160

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

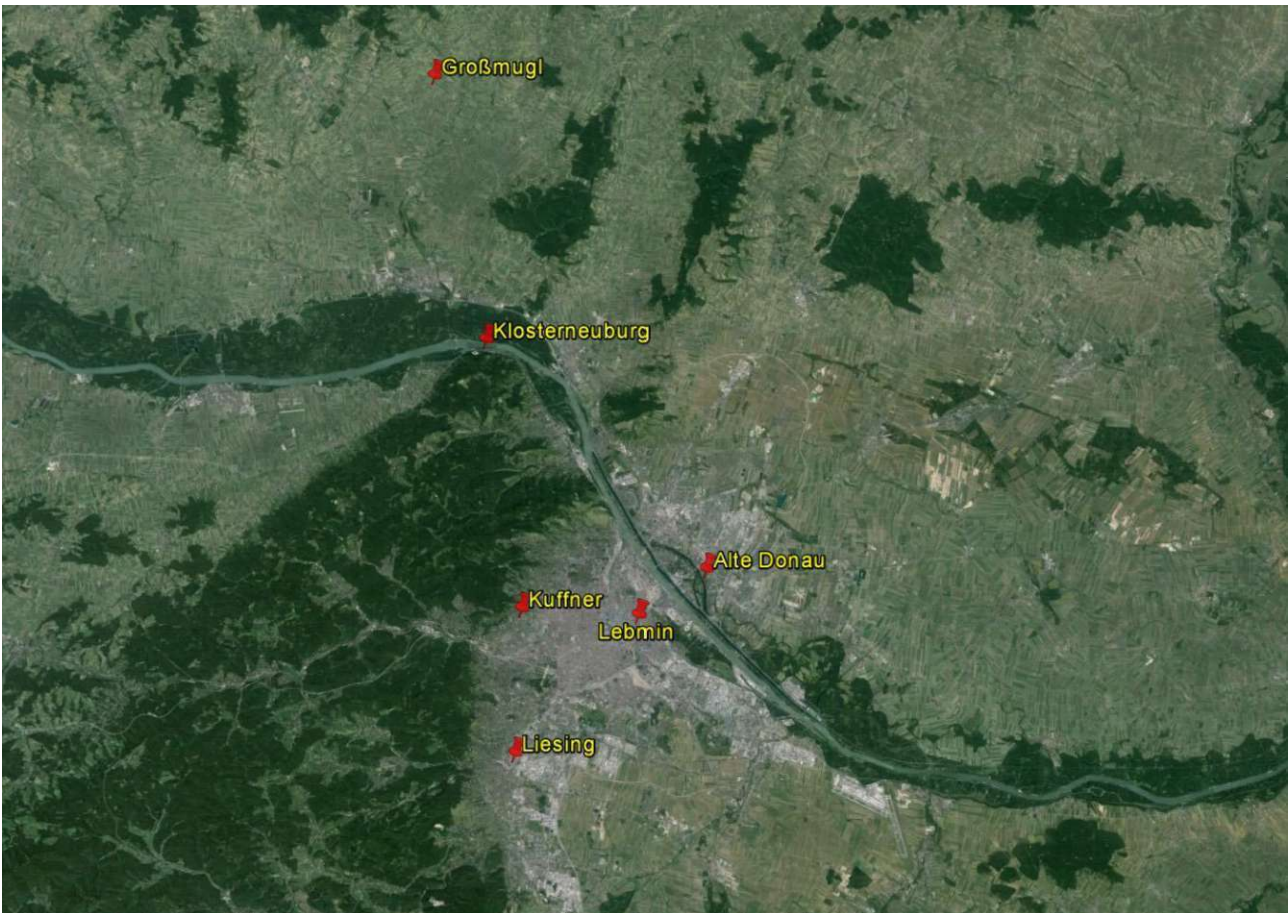


Abb.8: Orientierungskarte der Standorte der Mess-Stationen.

Für den in dieser Studie gegebenen Überblick über die Jahre 2011 bis 2017 haben wir aus Gründen der Datenkonsistenz zunächst nur diejenigen Stationen herangezogen, die über den gesamten Zeitraum hinweg in Betrieb waren. Dabei handelt es sich um die Stationen auf der Kuffner Sternwarte am westlichen Rand von Wien und die Station auf dem Dach des Lebensministeriums im Zentrum von Wien.

Eine Übernahme der Daten der Station Großmugl ermöglicht es die innerhalb Wiens gemessenen Effekte auch am äußeren Rand des direkten Wirkungsbereichs der Lichtglocke zu überprüfen: Rund 90% der künstlichen Nachthimmelaufhellung über Großmugl stammen aus Wien.

5. Literatur:

- 1) F. Falchi et.al.: The new world atlas of artificial night sky brightness. Science Advances 10 Jun 2016: Vol. 2, no. 6, e1600377
- 2) C. Kyba et.al.: Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. Science Advances 22 Nov 2017: Vol. 3, no. 11, e1701528
- 3) G. Wuchterl: Licht über Wien - Eine erste vollständige Perspektive:
<https://www.wien.gv.at/verkehr/strassen/einrichtungen/beleuchtung/led-tausch/pdf/licht-ueber-wien.pdf>
- 4) G. Wuchterl: Das Licht der Nacht über dem Wildnisgebiet Dürrenstein. Silva Fera 6/2017.
www.wildnisgebiet.at/forschung/silva-fera/#

6. Darstellung der Messwerte

6.1. Darstellung der Medianwerte

Die mithilfe unseres Algorithmus ermöglichte Unterscheidung von bewölkten und klaren Nächten erlaubt die Darstellung der Medianwerte unterschiedlich gefilterter Datensätze. Angegeben sind jeweils die Medianwerte der Globalstrahlung über dem Zentrum Wiens, der Kuffner Sternwarte und über Großmugl in mW/m^2 für wolkenlose (klare) Nächte, in denen kein Mond am Himmel steht und zum Vergleich die Medianwerte von allen Nächten. Die blaue strichlierte Linie entspricht einer linearen Regression durch diese Werte und erlaubt eine Prognose für die kommenden Jahre.

Tabellarische Darstellung der Medianwerte und der prozentuellen Veränderungen

1) Wien Zentrum

	A	Diff	B	Diff	C	Diff	D	Diff	E	Diff
2011	0,536		0,359		0,459		0,257		0,219	
2012	0,766	43%	0,310	-14%	0,495	8%	0,206	-20%	0,208	-5%
2013	1,415	85%	0,717	131%	1,138	130%	0,307	49%	0,294	41%
2014	0,961	-32%	0,459	-36%	0,732	-36%	0,331	8%	0,31	5%
2015	0,851	-11%	0,412	-10%	0,642	-12%	0,271	-18%	0,283	-9%
2016	0,875	3%	0,318	-23%	0,552	-14%	0,23	-15%	0,234	-17%
2017	0,778	-11%	0,381	20%	0,532	-4%	0,244	6%	0,175	-25%
X		13%		11%		12%		2%		-2%
Y reg	1,61%		-1,78%		-0,87%		-0,36%		-1,27%	
Z reg	-3,21%		-5,45%		-4,62%		0,45%		1,62%	

Tab.2: Die mittlere jährliche Zuwachsrate beträgt für 2011 bis 2017 **-0,5 % (über lineare Regression)**, bzw. **+7,2 % (aus den Mittelwerten)**. Für 2012 bis 2016 ergeben sich **-2,2 %** bzw. **+10,9 %** pro Jahr.

2) Kuffner Sternwarte

	A	Diff	B	Diff	C	Diff	D	Diff	E	Diff
2011	0,301		0,093		0,16		0,069		0,088	
2012	0,307	2%	0,121	30%	0,166	4%	0,087	26%	0,088	0%
2013	0,613	100%	0,569	370%	0,482	190%	0,127	46%	0,114	30%
2014	0,549	-10%	0,459	-19%	0,499	4%	0,167	31%	0,144	26%
2015	0,499	-9%	0,19	-59%	0,373	-25%	0,14	-16%	0,142	-1%
2016	0,514	3%	0,185	-3%	0,35	-6%	0,117	-16%	0,121	-15%
2017	0,456	-11%	0,154	-17%	0,304	-13%	0,114	-3%	0,111	-8%
X		12%		51%		26%		11%		5%
Y reg	7,18%		-0,93%		9,51%		7,82%		5,94%	
Z reg	6,87%		-7,07%		8,04%		6,46%		9,13%	

Tab. 3: Die mittlere jährliche Zuwachsrate beträgt für 2011 bis 2017 **5,9 % (über lineare Regression)**, bzw. **+10,0 % (aus den Mittelwerten)**. Für 2012 bis 2016 ergeben sich **4,7 %** bzw. **+15,2 %** pro Jahr.

3) Großmugl:

(2013 wurden nur wenige Monate gemessen. Die starke relative Änderung 2014 beruht vermutlich auf Auswahleffekten im Jahr 2013.)

	A	Diff	B	Diff	C	Diff	D	Diff	E	Diff
2011	0,034		0,012		0,016		0,01		0,01	
2012	0,049	44%	0,02	67%	0,024	50%	0,017	70%	0,017	70%
2013	0,043	-12%	0,034	70%	0,028	17%	0,024	41%	0,028	65%
2014	0,099	130%	0,088	159%	0,053	89%	0,045	88%	0,044	57%
2015	0,104	5%	0,079	-10%	0,048	-9%	0,046	2%	0,044	0%
2016	0,058	-44%	0,028	-65%	0,025	-48%	0,019	-59%	0,018	-59%
2017	0,087	50%	0,062	121%	0,04	60%	0,035	84%	0,032	78%
X		29%		57%		26%		38%		35%
Y reg	20,14%		32,02%		14,37%		21,00%		16,15%	
Z reg	14,42%		16,22%		7,05%		10,40%		6,77%	

Tab. 4: Die mittlere jährliche Zuwachsrate beträgt für 2011 bis 2017 **+20,7 % (über lineare Regression)** bzw. **+39,8 % (aus den Mittelwerten)**. Für 2012 bis 2016 ergeben sich **+11,0 %**, bzw. **+4 %** pro Jahr.

Legende zu den Tabellen:

A: alle Nächte, [mW/m²]

B: klare (wolkenfreie) Nächte, [mW/m²]

C: mondlose Nächte, [mW/m²]

D: klare (wolkenfreie) mondlose Nächte, [mW/m²]

E: klare (wolkenfreie) mondlose Nächte ohne Frost, [mW/m²]

Diff: Differenz zwischen aktuellem Jahr und vorhergehendem Jahr in %

X: durchschnittliche jährliche Änderung in %

Y reg: mittlere jährliche Zuwachsrate in %, die sich aus einer linearen Regression der Werte zwischen 2011 und 2017 ergibt.

Z reg: mittlere jährliche Zuwachsrate in %, die sich aus einer linearen Regression der Werte zwischen 2012 und 2016 ergibt.

In den Jahren 2011 und 2017 gab es über mehrere Monate hinweg technisch bedingte Ausfälle von Mess-Stationen, wodurch die Daten in diesen beiden Jahren weniger repräsentativ sind als in den Jahren 2012 bis 2016. Um die möglicherweise damit verbundenen Effekte darstellen zu können, haben wir die mittleren Zuwachsraten jeweils mit und ohne diese beiden Jahre dargestellt.

Grafische Darstellung der Medianwerte

A) Vergleich der Mess-Stationen: Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte

Der allgemeine Trend der einzelnen Jahre wird von allen drei Mess-Stationen trotz ihrer großen Entfernung zueinander gleichermaßen wiedergegeben. Damit ist geklärt, dass die Zu- und Abnahmen auch über der Kuffner Sternwarte am Rande Wiens und über dem rund 40 Kilometer vom Stadtzentrum entfernten Großmugl von der künstlichen Beleuchtung Wiens verursacht werden.

B) Mediane der Globalstrahlung der einzelnen Mess-Stationen und Prognose bis 2020

Die strichlierte Linie entspricht einer linearen Regression durch die Medianwerte und erlaubt eine entsprechende Prognose für den Trend der kommenden Jahre. Jeweils zusätzlich sind Grafiken ohne den Jahren 2011 und 2017 angegeben (Begründung siehe oben). Dargestellt ist abwechselnd die Globalstrahlung aller Nächte und zum Vergleich nur diejenige der klaren (wolkenlosen) und mondlosen Nächte, um allfällige Seiteneffekte durch Wetterbedingungen und den Mond zeigen zu können.

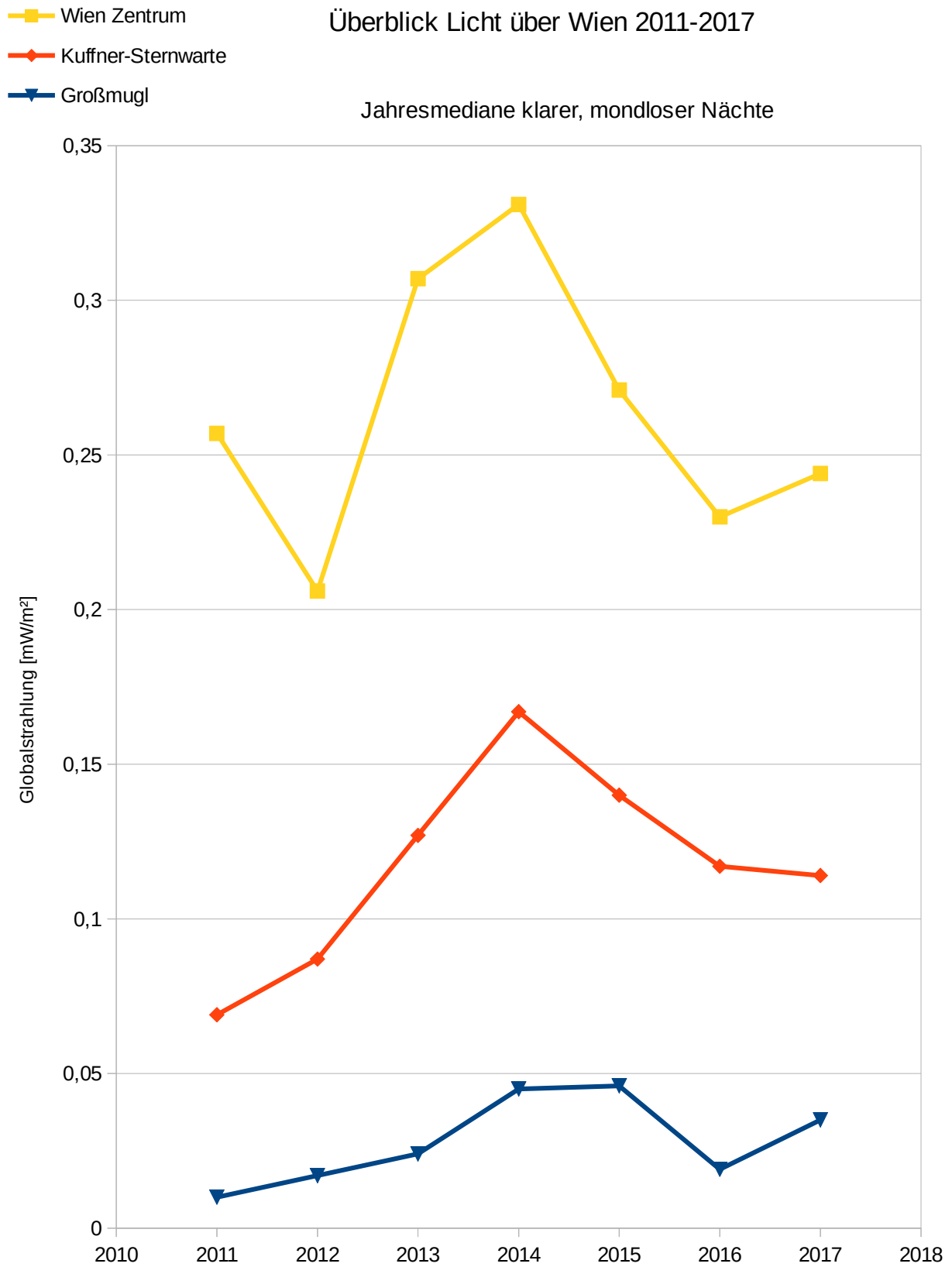


Abb. 9: Vergleich der Jahresmediane klarer mondloser Nächte bei den Mess-Stationen Wien Zentrum, Kuffner-Sternwarte und Großmugl

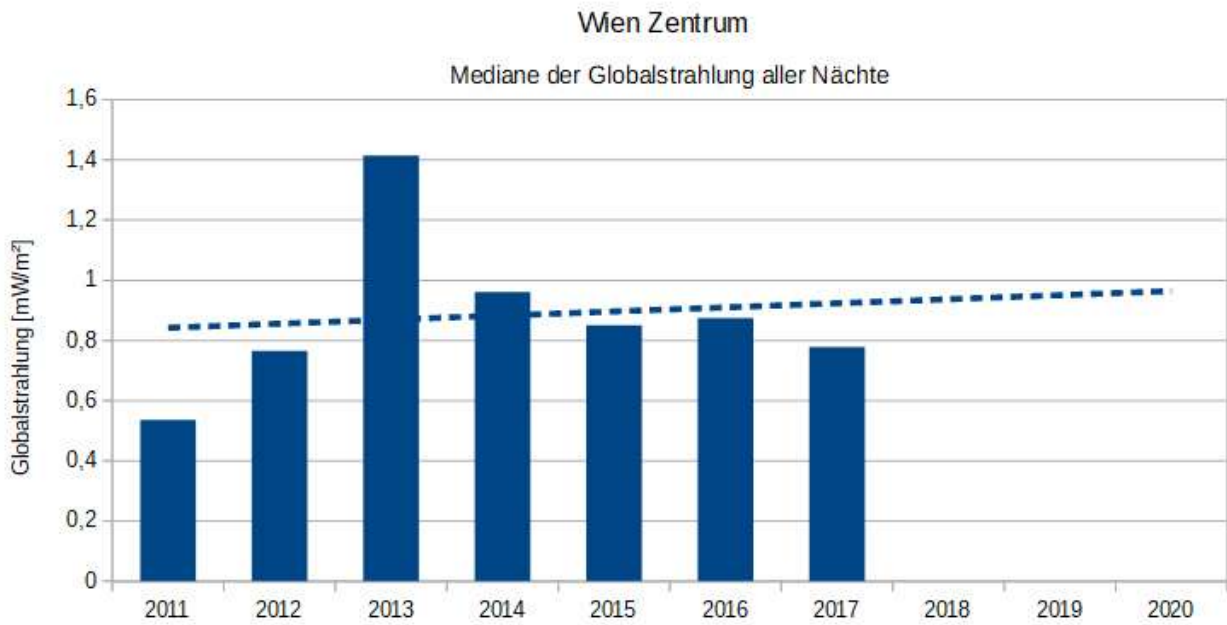


Abb. 10: Mediane der Globalstrahlung aller Nächte in Wien Zentrum.

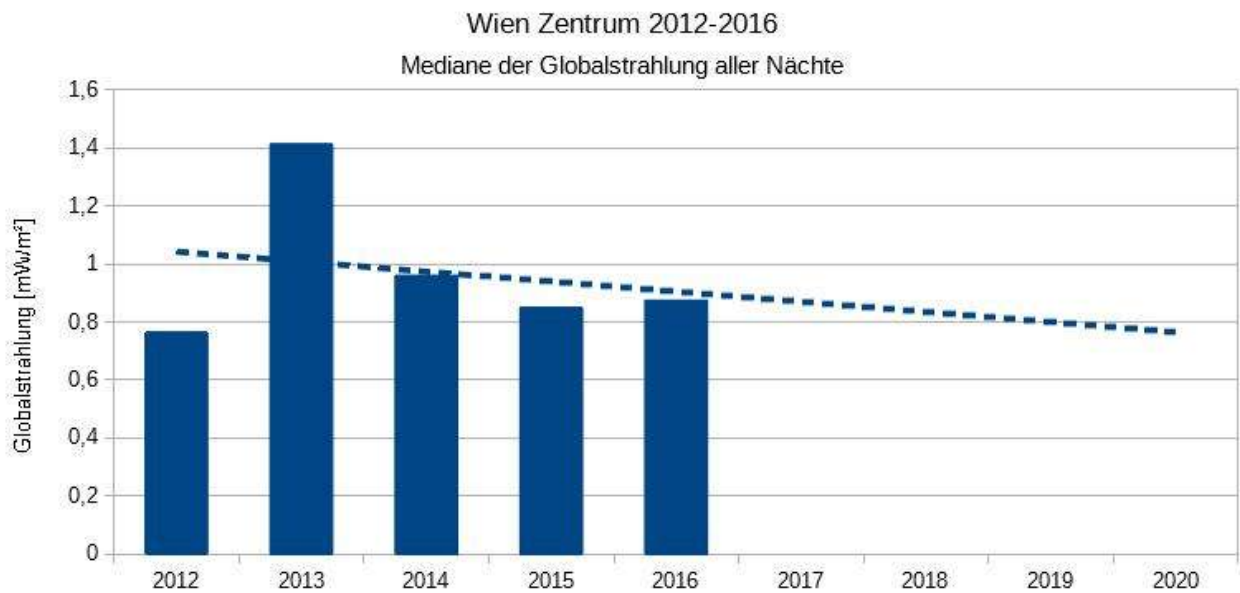


Abb. 11: Mediane der Globalstrahlung aller Nächte in Wien Zentrum von 2012 bis 2016.

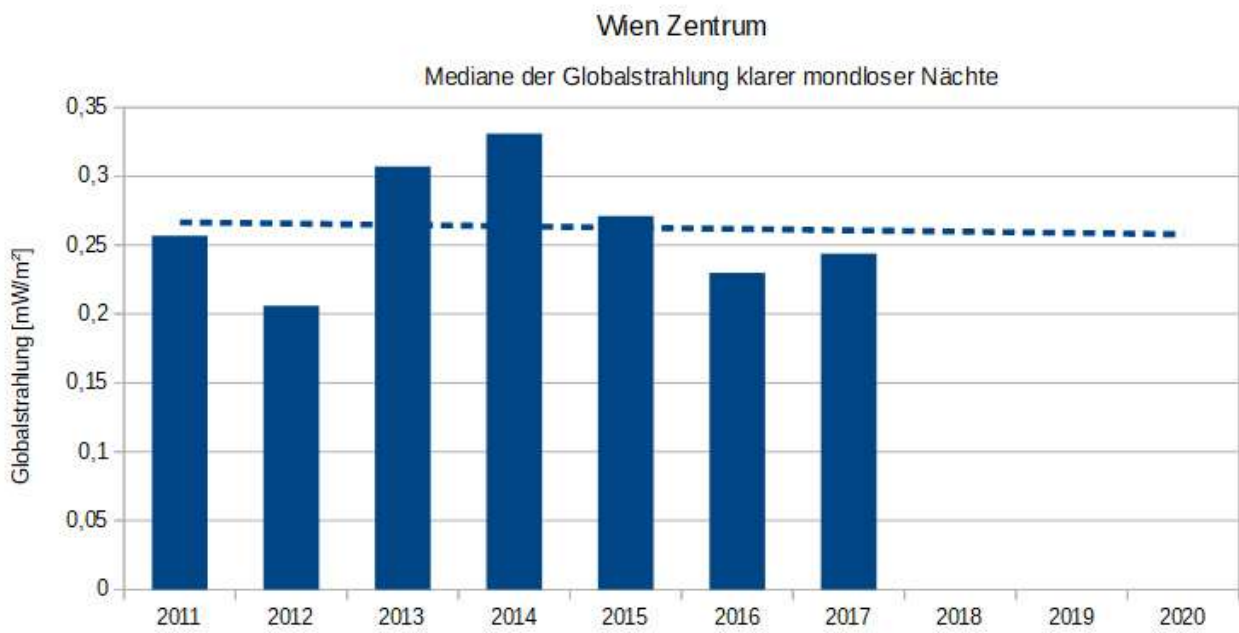


Abb. 12: Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte in Wien Zentrum.

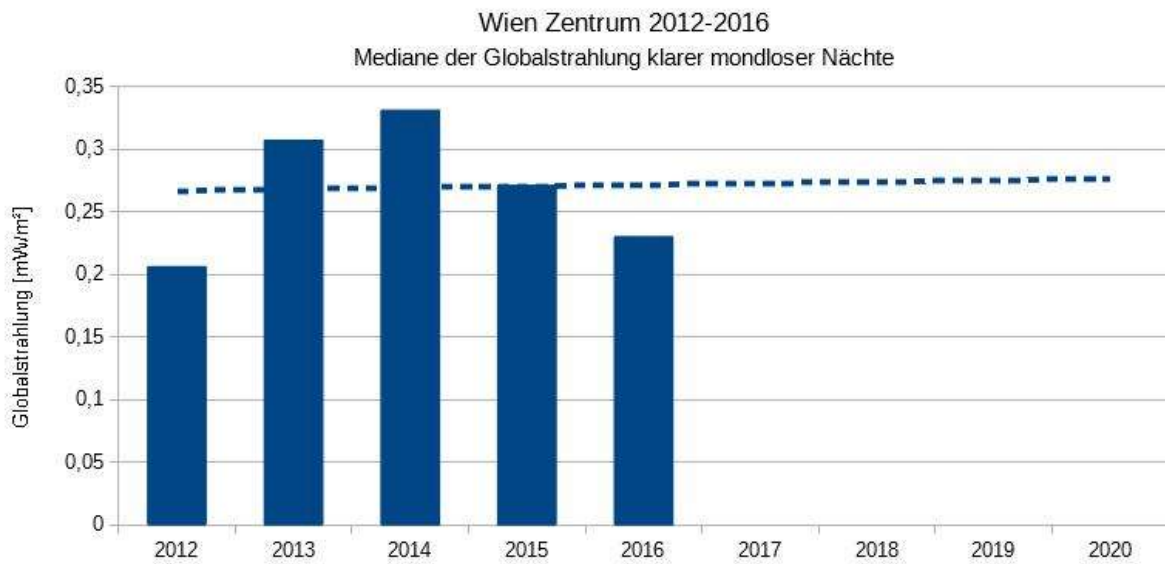


Abb. 13: Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte in Wien Zentrum 2012 bis 2016.

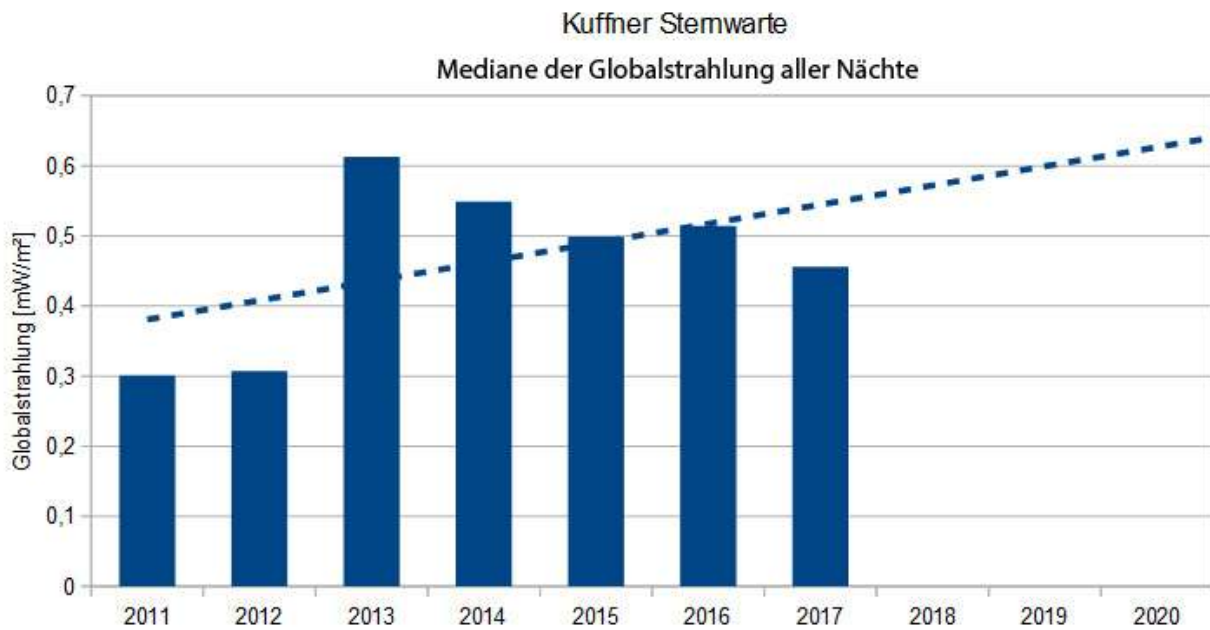


Abb. 14: Mediane der Globalstrahlung aller Nächte an der Kuffner Sternwarte.

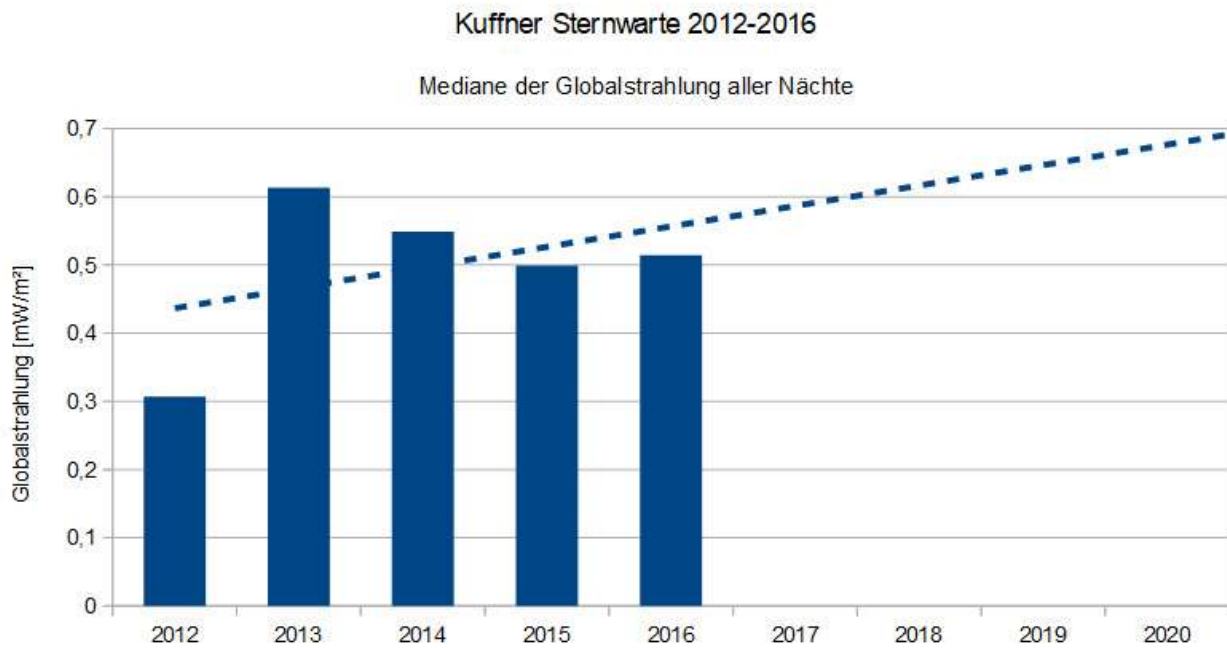


Abb. 15: Mediane der Globalstrahlung aller Nächte an der Kuffner Sternwarte 2012 bis 2016.

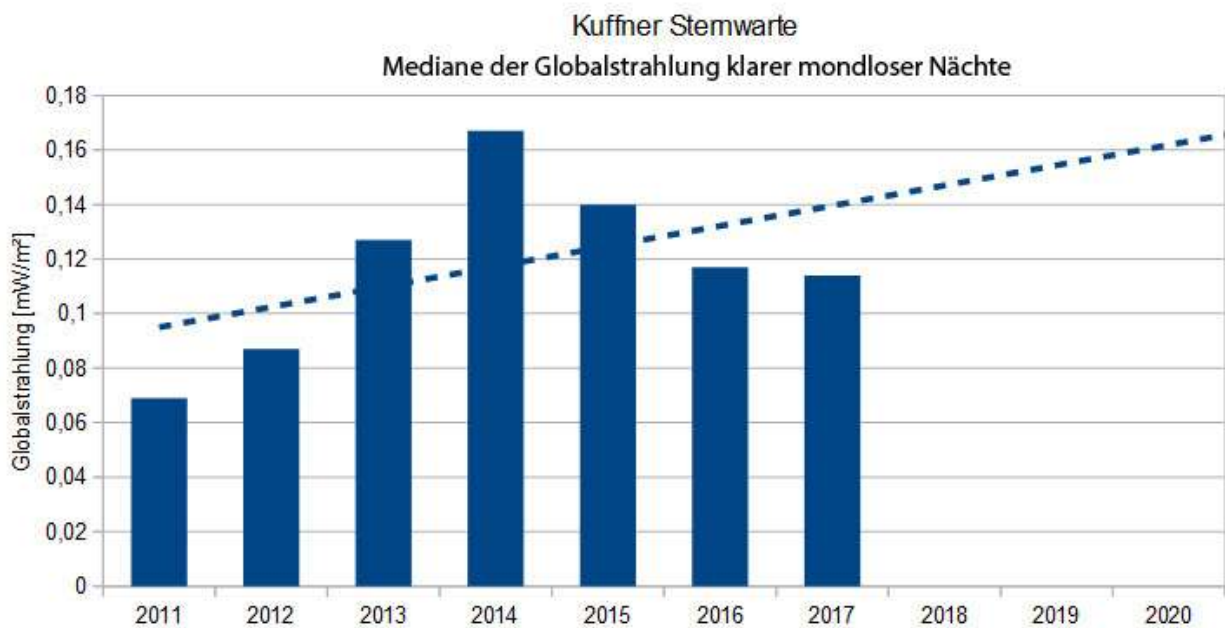


Abb. 16: Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte an der Kuffner Sternwarte.

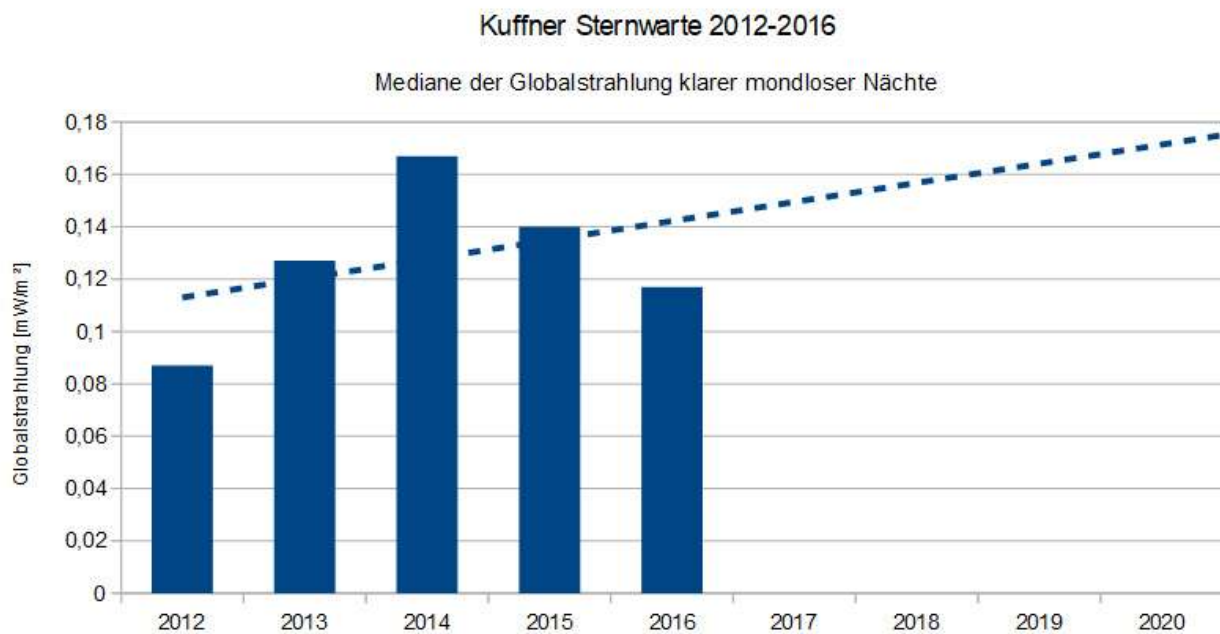


Abb. 17: Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte an der Kuffner Sternwarte 2012 bis 2016.

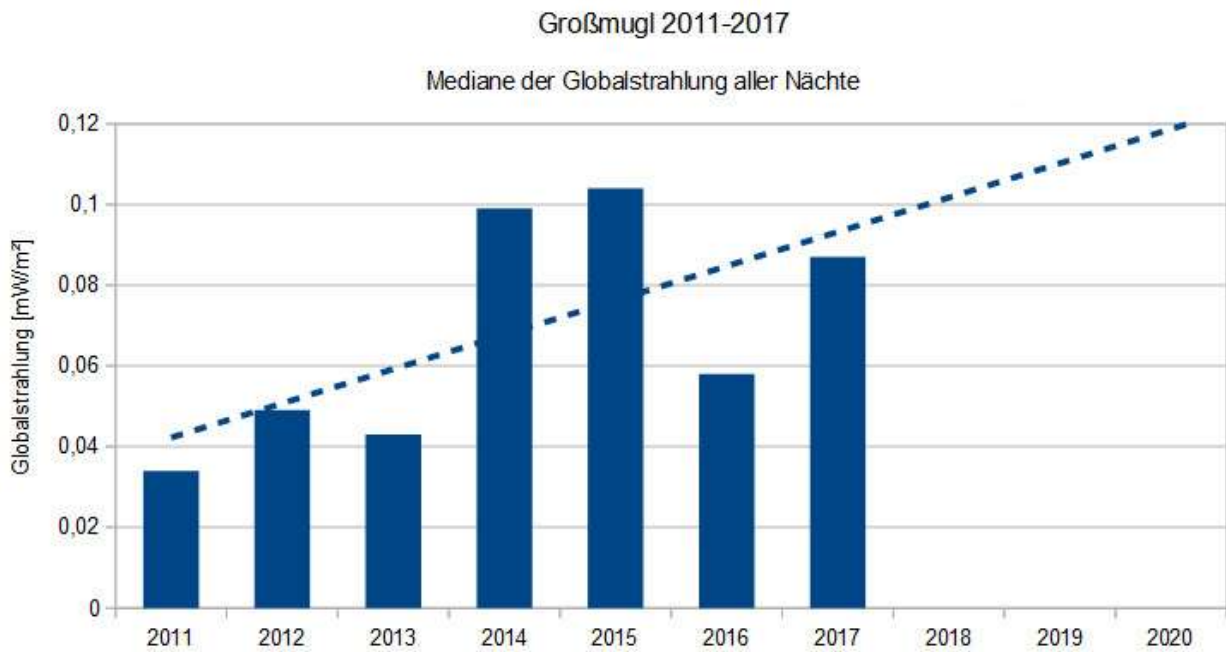


Abb. 18: Mediane der Globalstrahlung aller Nächte in Großmugl.

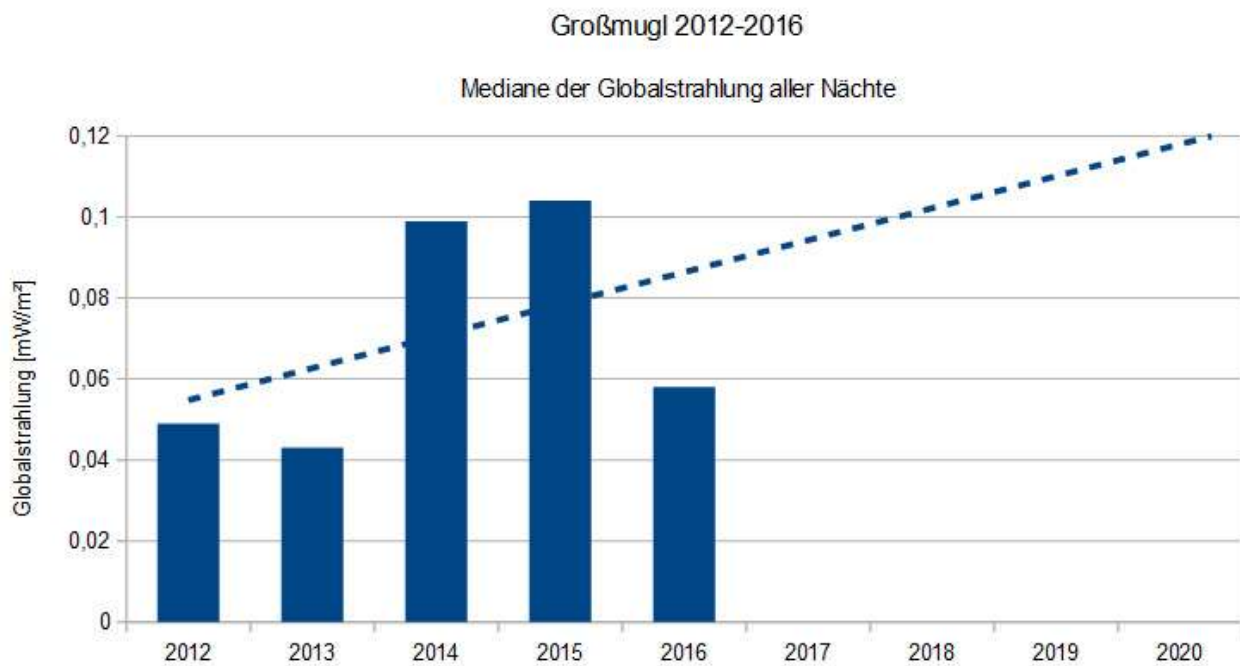


Abb. 19: Mediane der Globalstrahlung aller Nächte in Großmugl 2012 bis 2016.

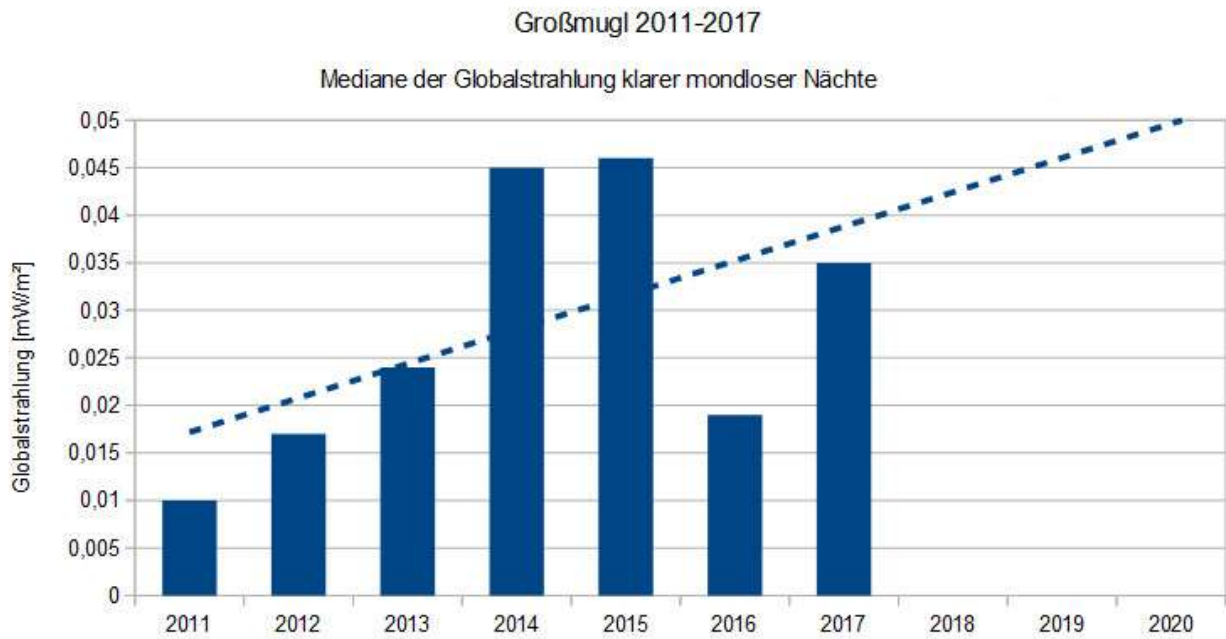


Abb. 20: Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte in Großmugl.

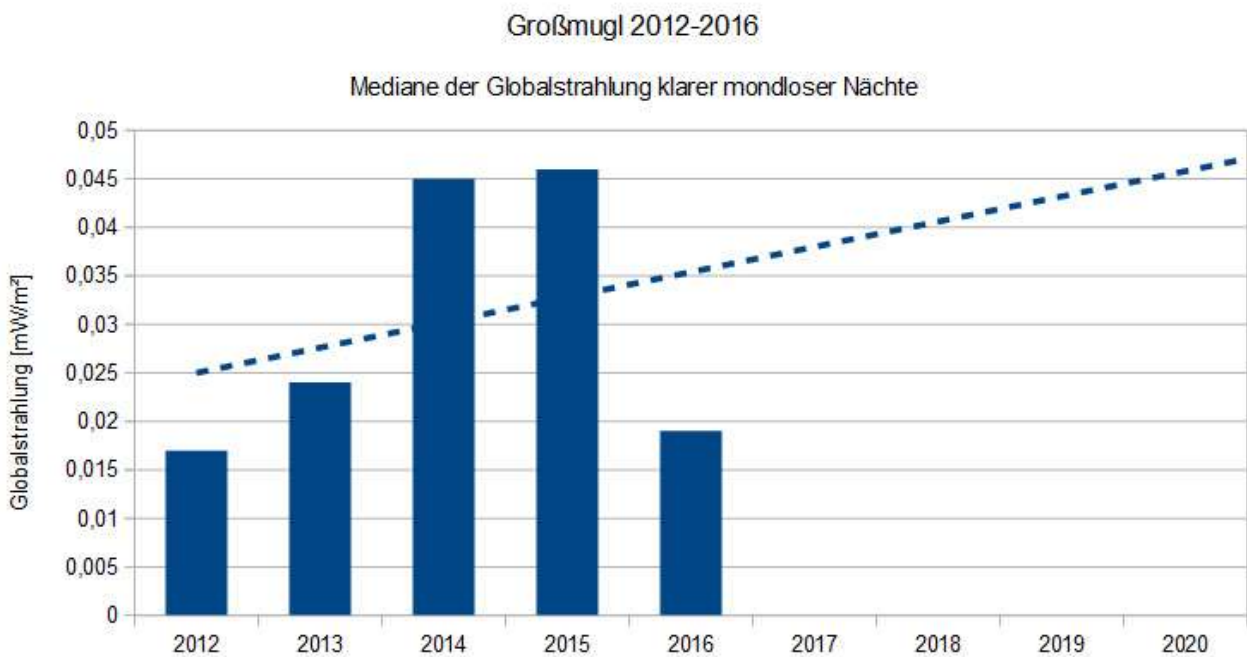


Abb. 21: Mediane der Globalstrahlung klarer mondloser Nächte in Großmugl 2012 bis 2016.

5.2. Histogramm-Darstellung der Messwerte

Jede Säule in den folgenden Histogrammen repräsentiert die Anzahl der Messwerte im jeweiligen Intervall der Globalstrahlung (Helligkeit) auf der x-Achse des Diagramms.

Die x-Achse ist im dekadischen Logarithmus der Globalstrahlung (W/m^2) skaliert und beschriftet.

Legende zur Histogramm-Darstellung der Messwerte:

- **Full moon in zenith:**

Helligkeit des Vollmondes im Zenit über dem Beobachtungsort

- **natural sky:**

natürliche Helligkeit des Nachthimmels ohne künstliches Störlicht und ohne Wolkenbedeckung

- **light pollution:**

Grenze, ab der von Lichtverschmutzung gesprochen wird

- **darkest sky:**

geringstmögliche Himmelshelligkeit

- **all:**

Verteilung aller Daten (Tag & Nacht)

- **night:**

Verteilung aller Daten (nur Nacht)

- **dark:**

Verteilung der Daten bei mondlosen Nächten

- **clear dark:**

Verteilung der Daten bei klaren, mondlosen Nächten

- **clear dark no ice:**

Verteilung der Daten bei klaren, mondlosen Nächten und einer Sensor-Temperatur über 2°C (sicher kein Schnee/Eis auf dem Sensor)

Anmerkung zur Histogramm-Darstellung der Kuffner Sternwarte des Jahres 2011:

Die Werte im Bereich von $-5,5$ erklären wir mit einem Empfindlichkeitsverlust des Sensors Ende des Jahres 2010. Dieser Sensor stammte noch aus der Prototypen-Serie der Lightmeter, war seit 2008 im Einsatz und wurde im August 2011 durch die jetzt verwendete moderne Variante ersetzt. Die Säulen geben die Anzahlen jener Messungen wieder, deren Werte unter einer sicheren Nachweisgrenze (5 Sigma) liegen. Wir haben diese Werte trotz des offensichtlichen Messgeräte-Fehlers vermerkt, um die Anzahl dieser Fehl-Messungen grob darzustellen.

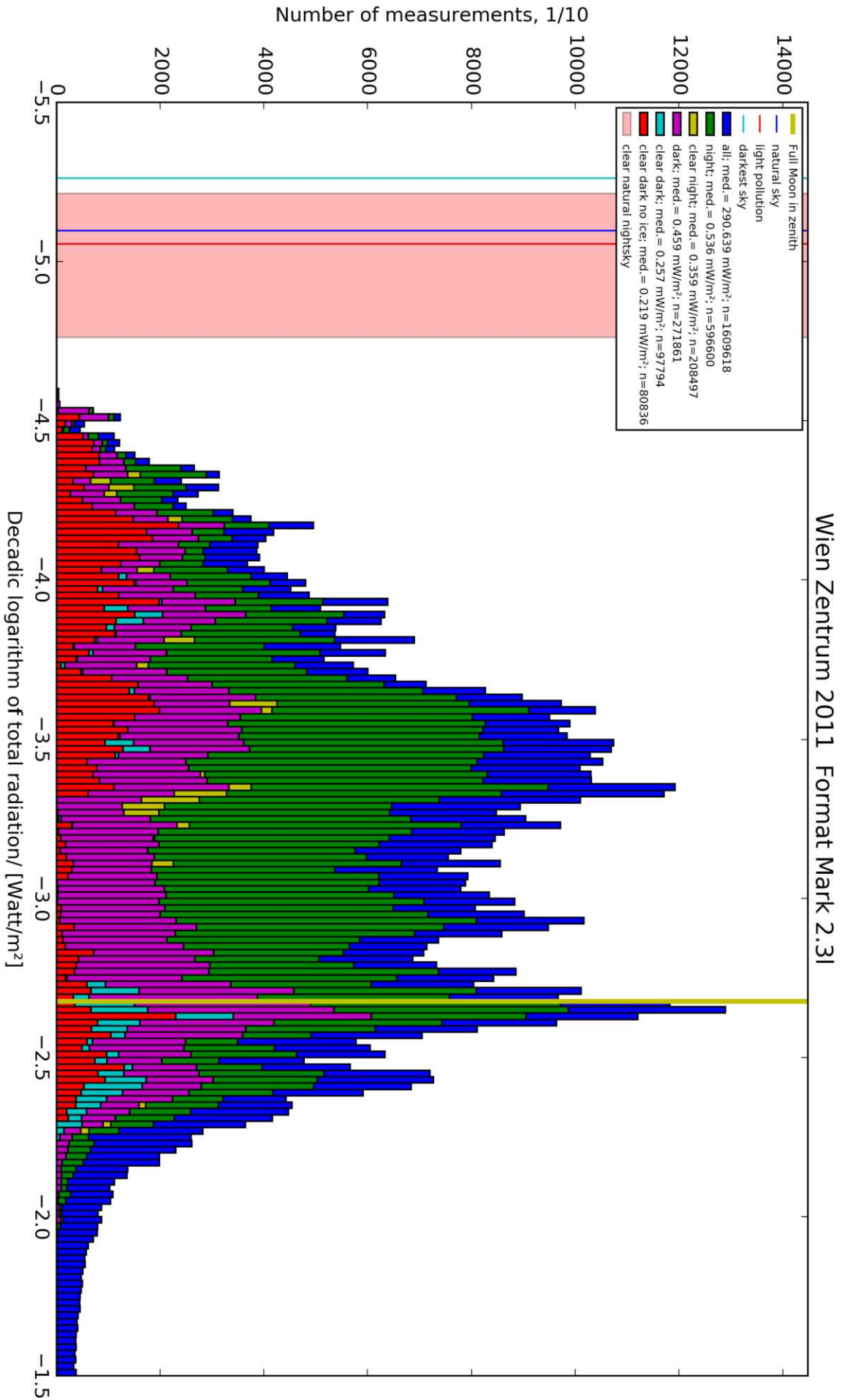
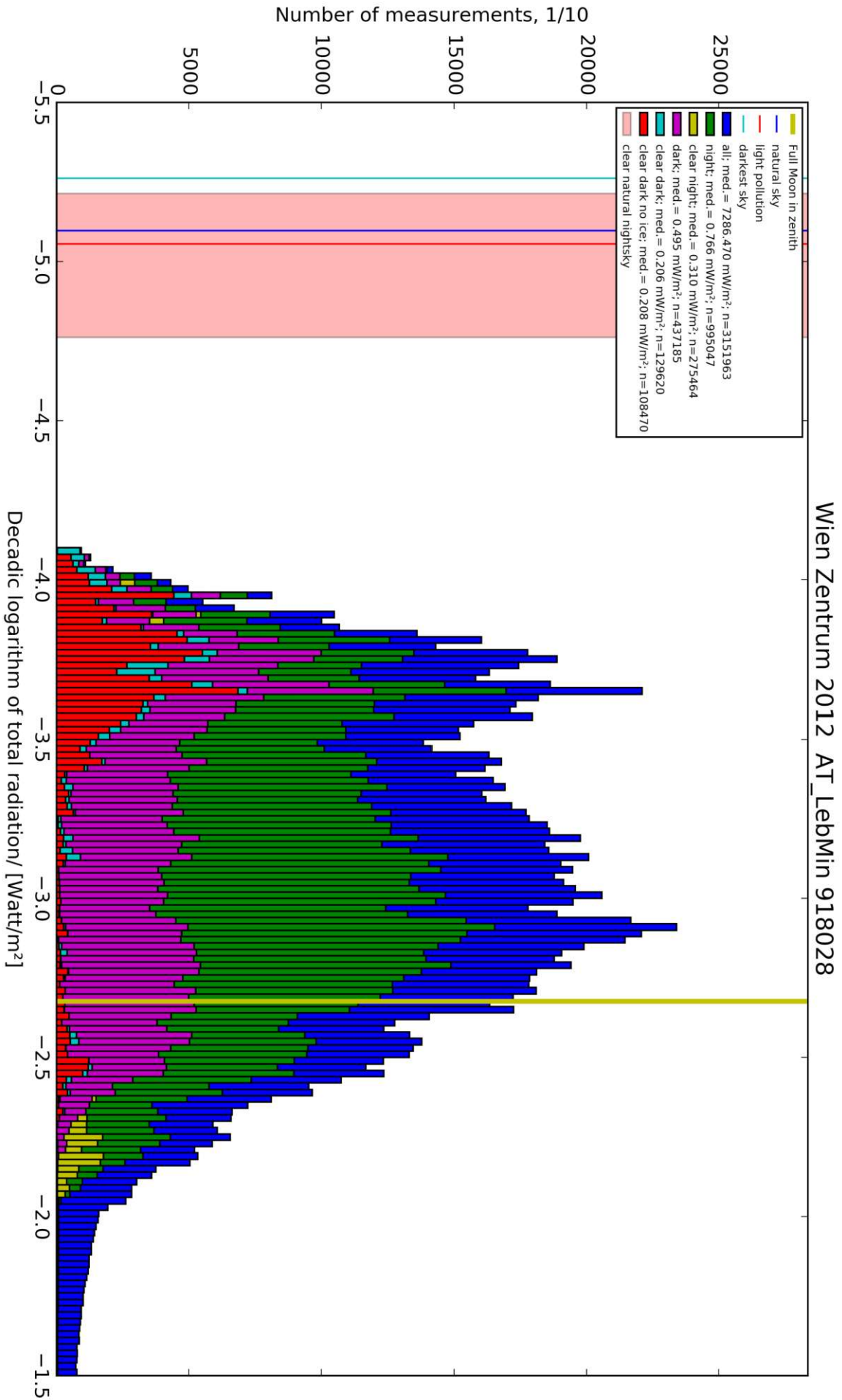
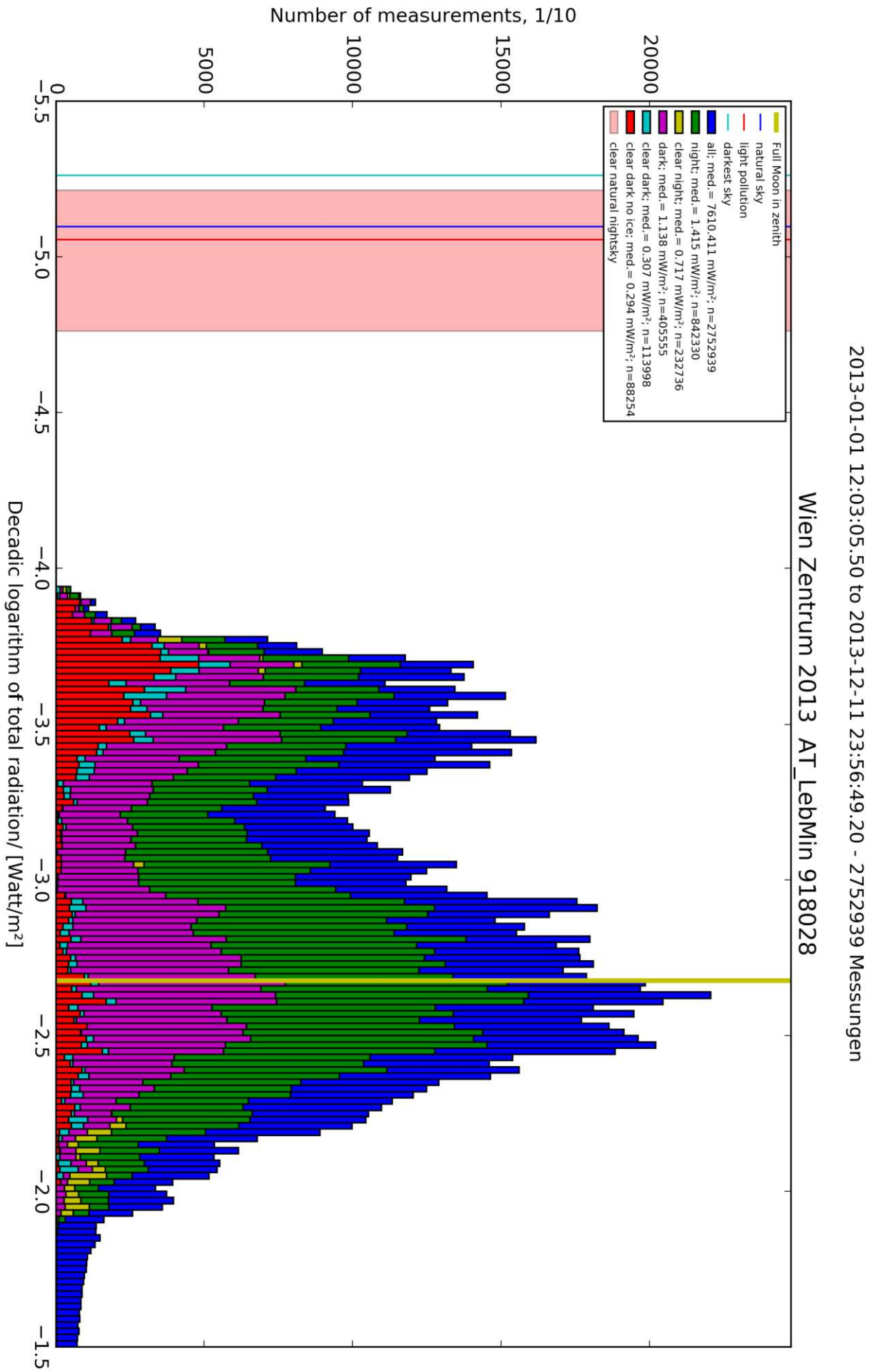


Abb. 22: Verteilung der Messdaten, Wien Zentrum 2011



Günther Wuchterl, Wed Jan

Abb. 23: Verteilung der Mess-Daten, Wien Zentrum 2012



Günther Wucherl, Sun Ja

Abb. 24: Verteilung der Mess-Daten, Wien Zentrum 2013

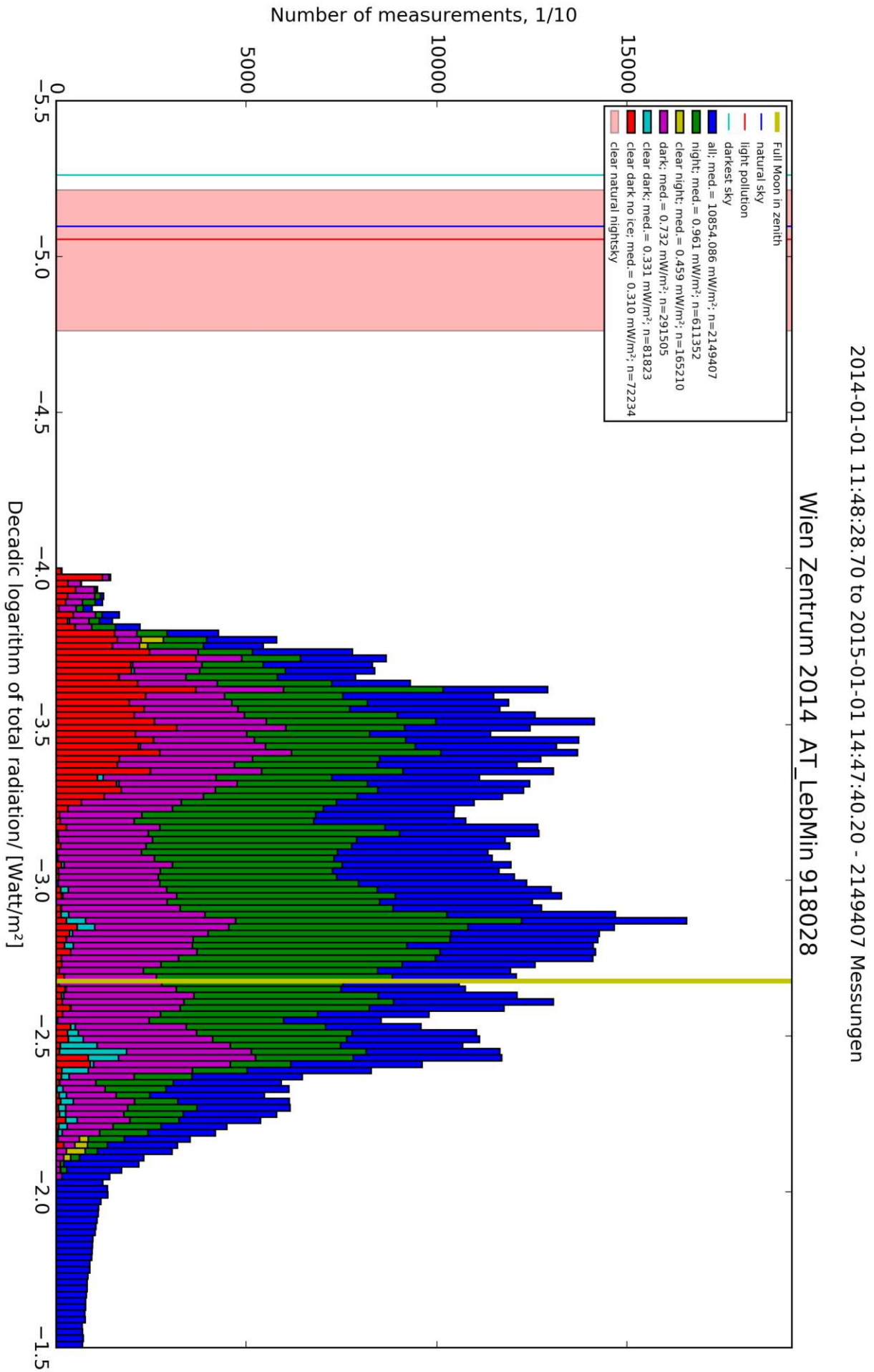


Abb. 25: Verteilung der Mess-Daten, Wien Zentrum 2014

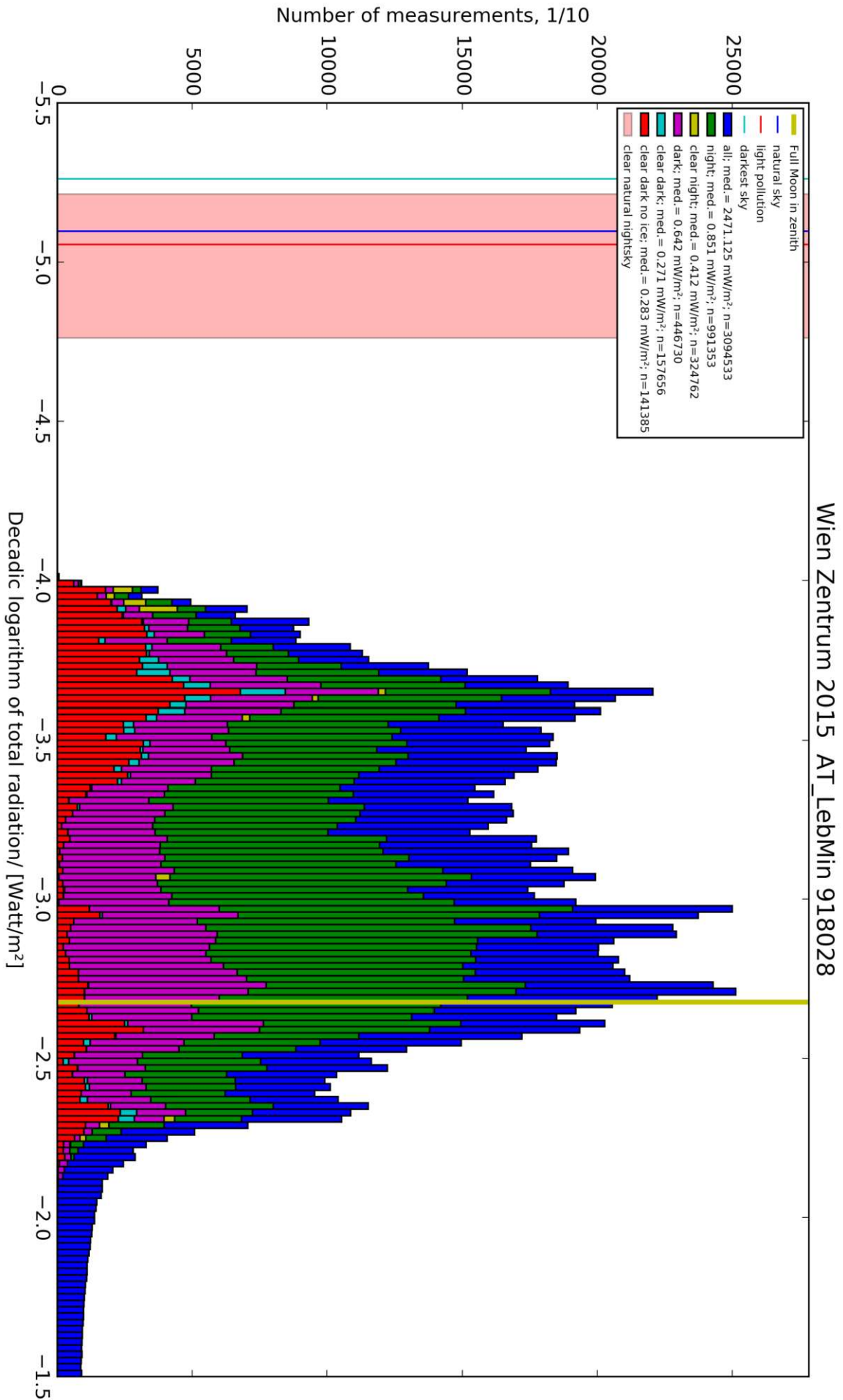


Abb. 26: Verteilung der Mess-Daten, Wien Zentrum 2015

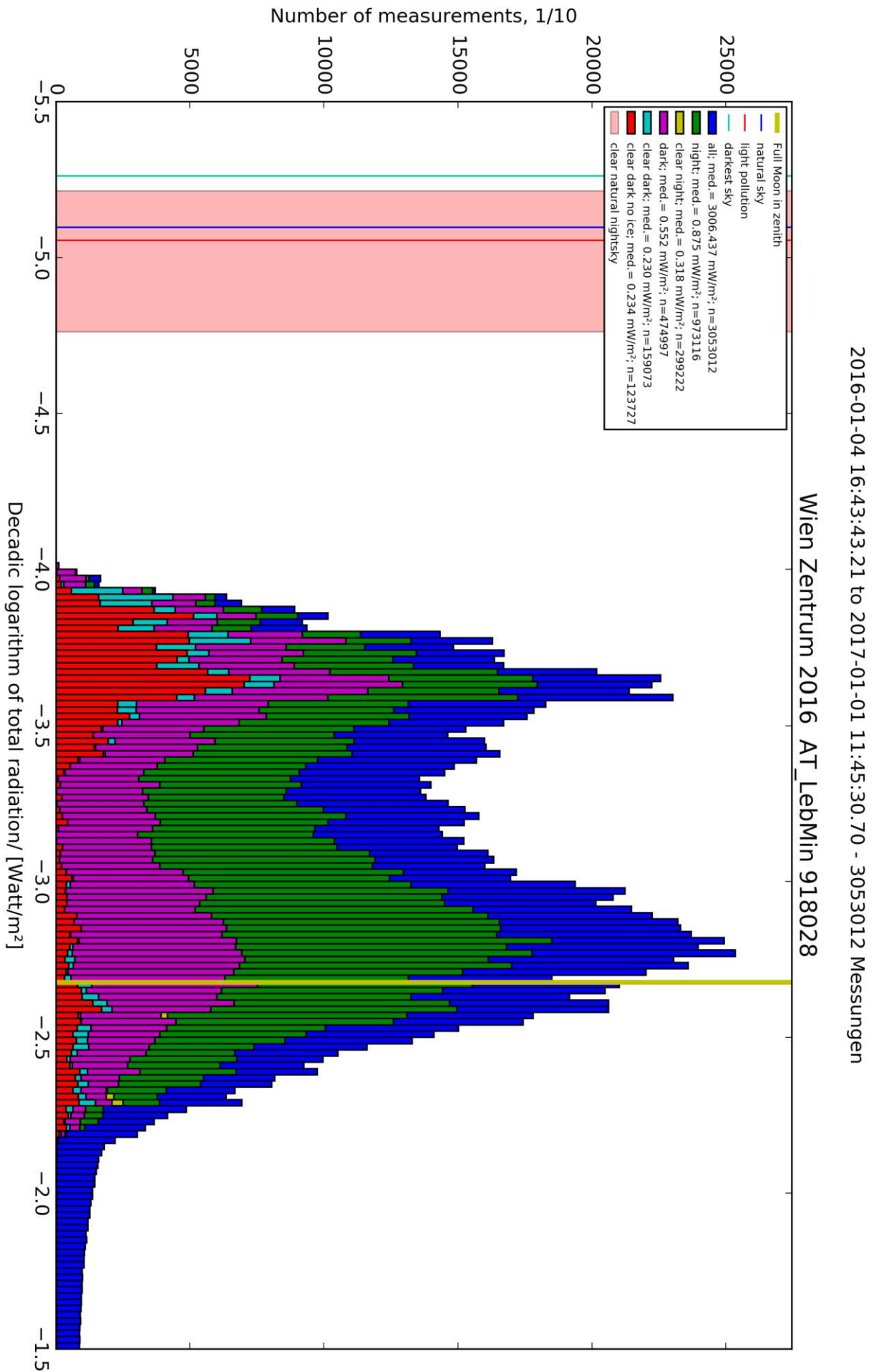


Abb. 27: Verteilung der Mess-Daten, Wien Zentrum 2016

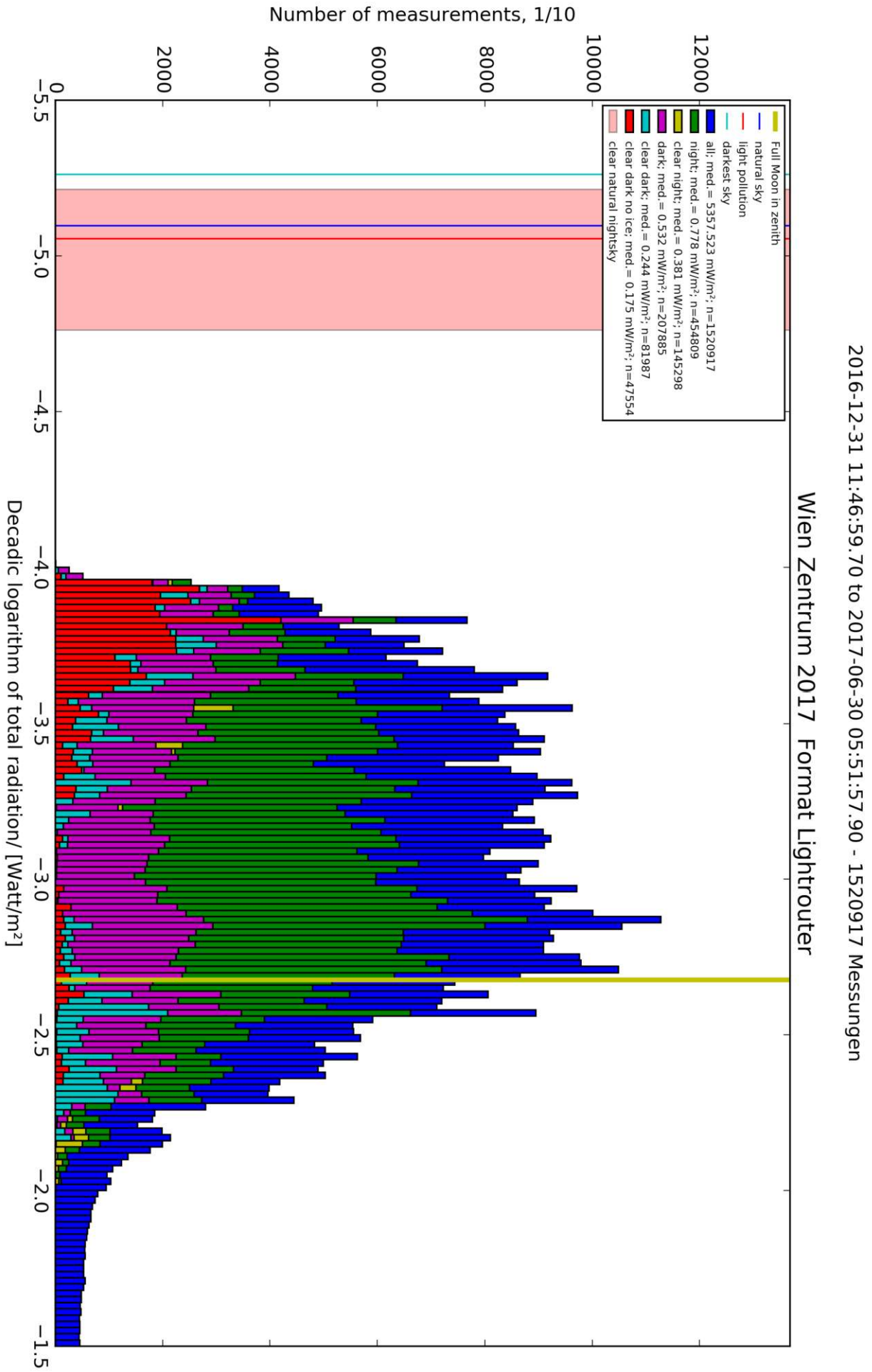


Abb. 28: Verteilung der Mess-Daten, Wien Zentrum 2017

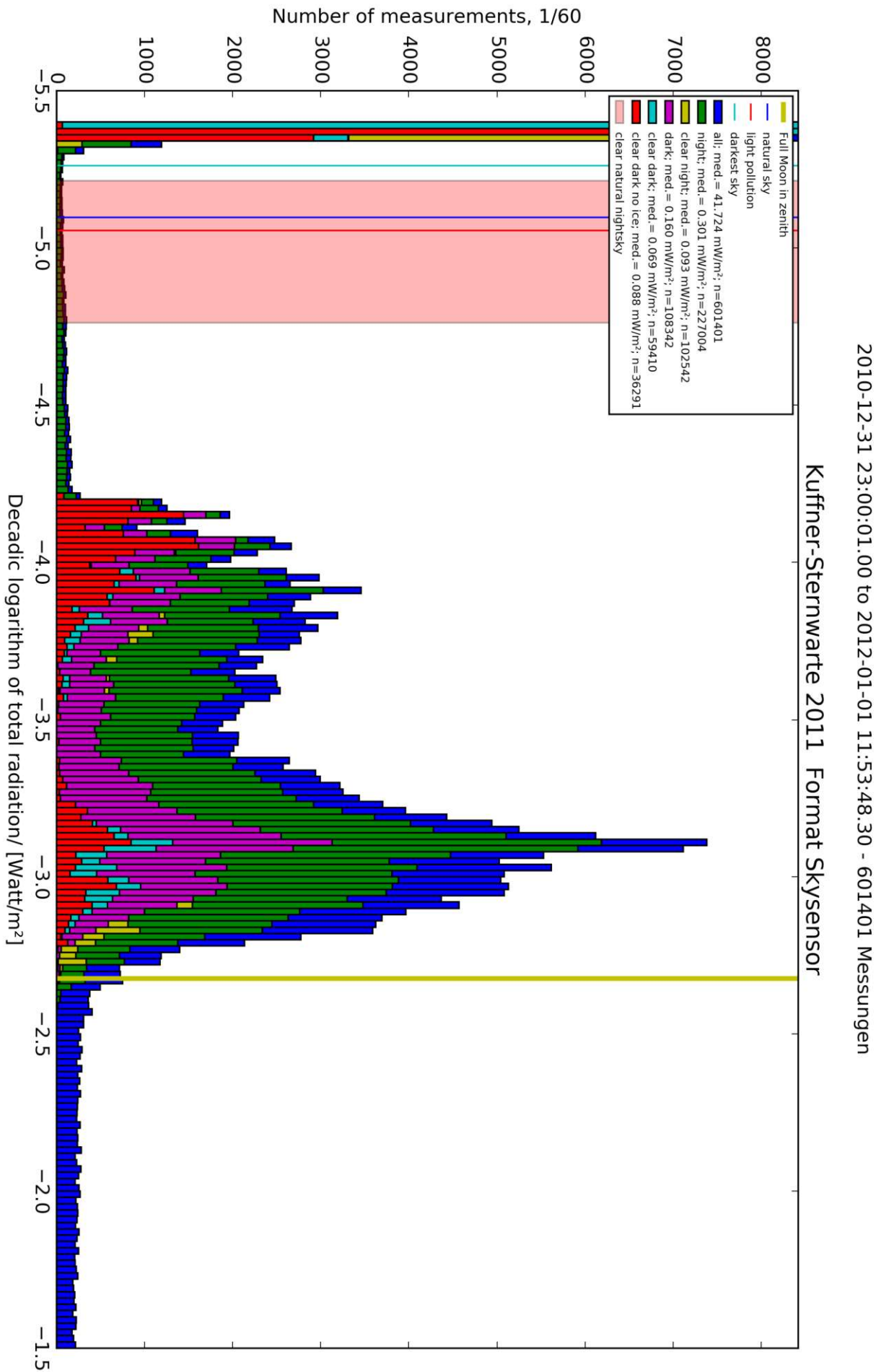
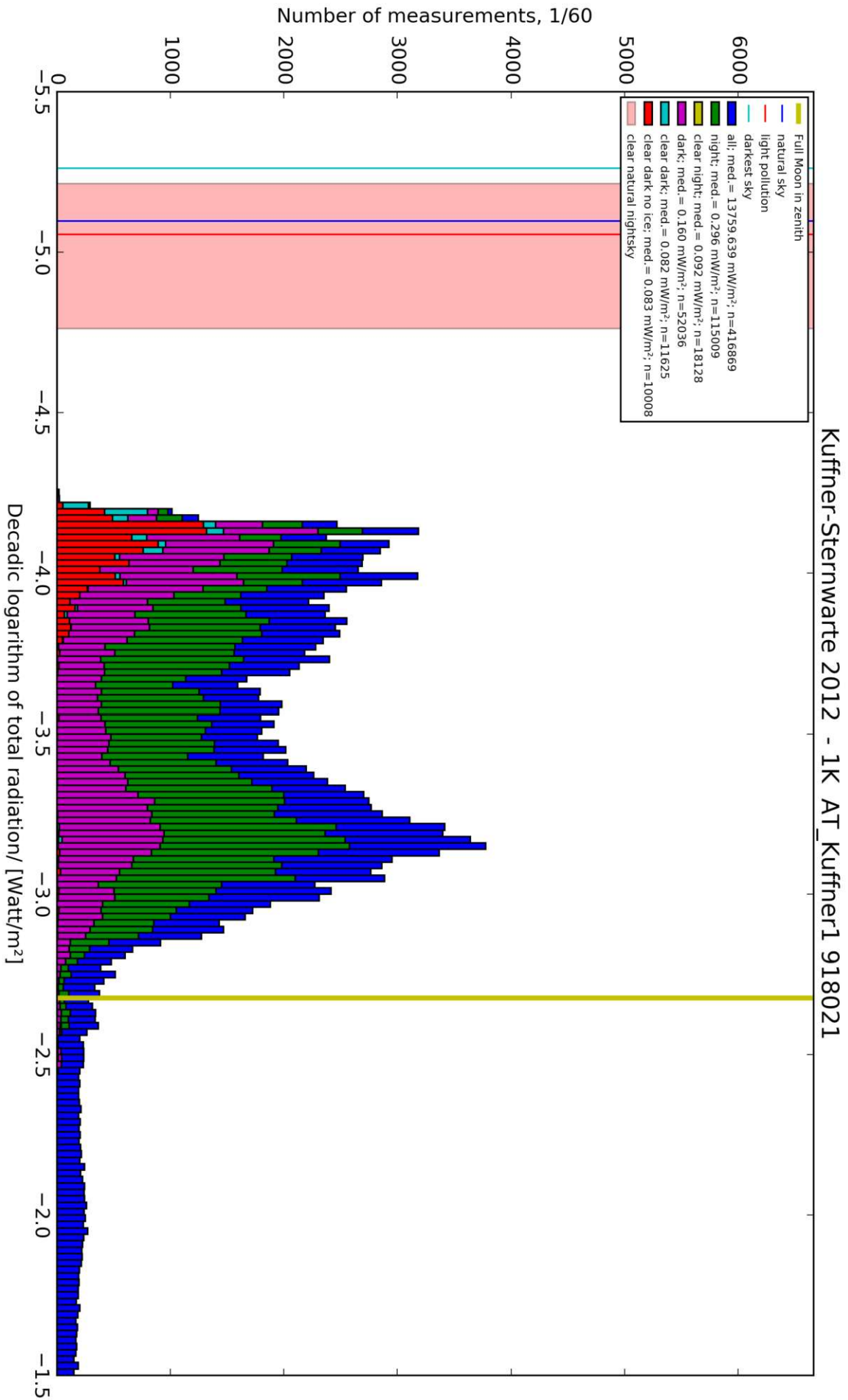


Abb. 29: Verteilung der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2011



2011-12-31 11:58:48.30 to 2012-10-16 21:58:16.20 - 416869 Messungen

Kuffner-Sternwarte 2012 - 1K_AT_Kuffner1 918021

Abb. 30: Verteilung der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2012

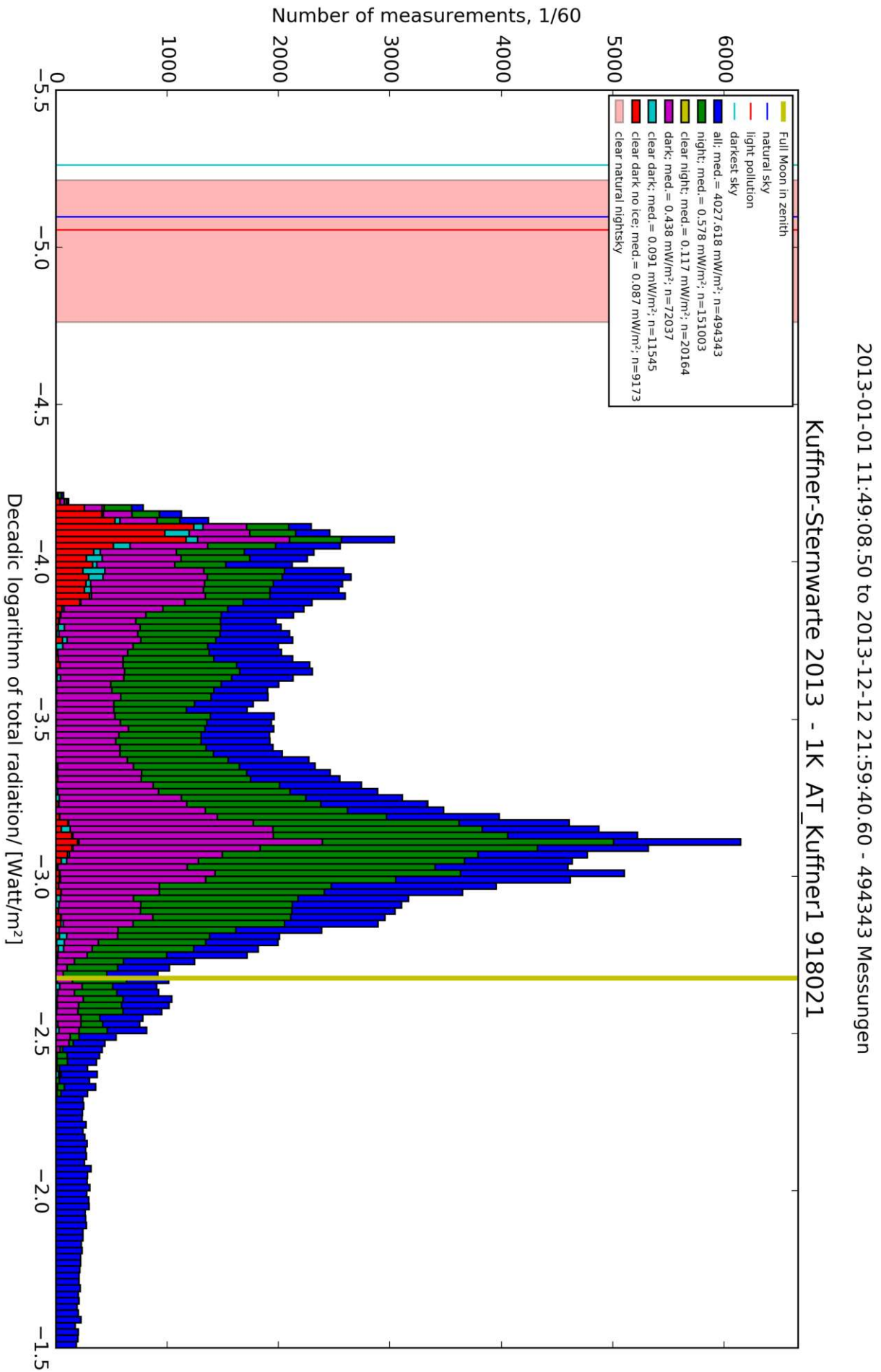


Abb. 31: Verteilung der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2013

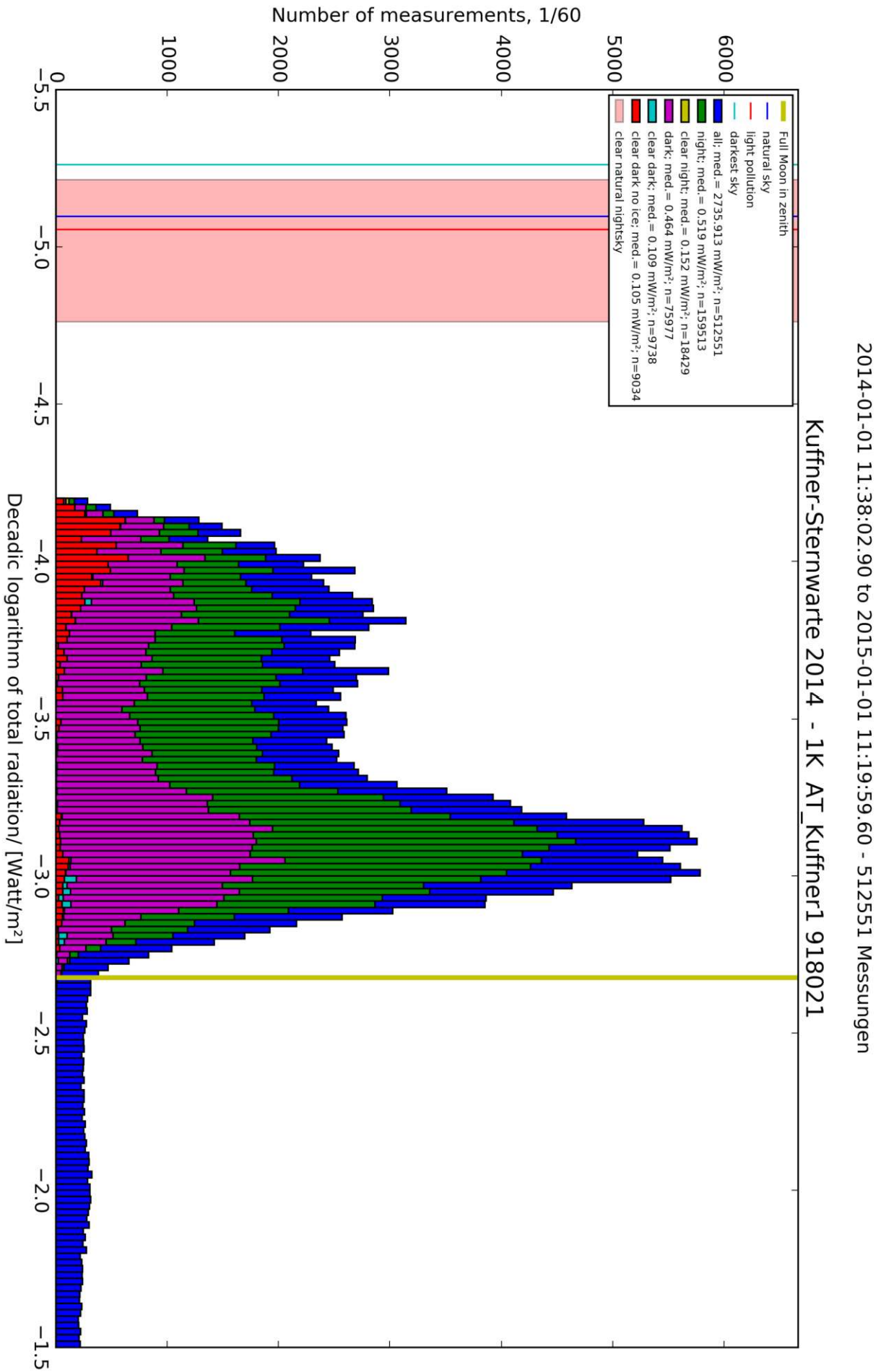


Abb. 32: Verteilung der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2014

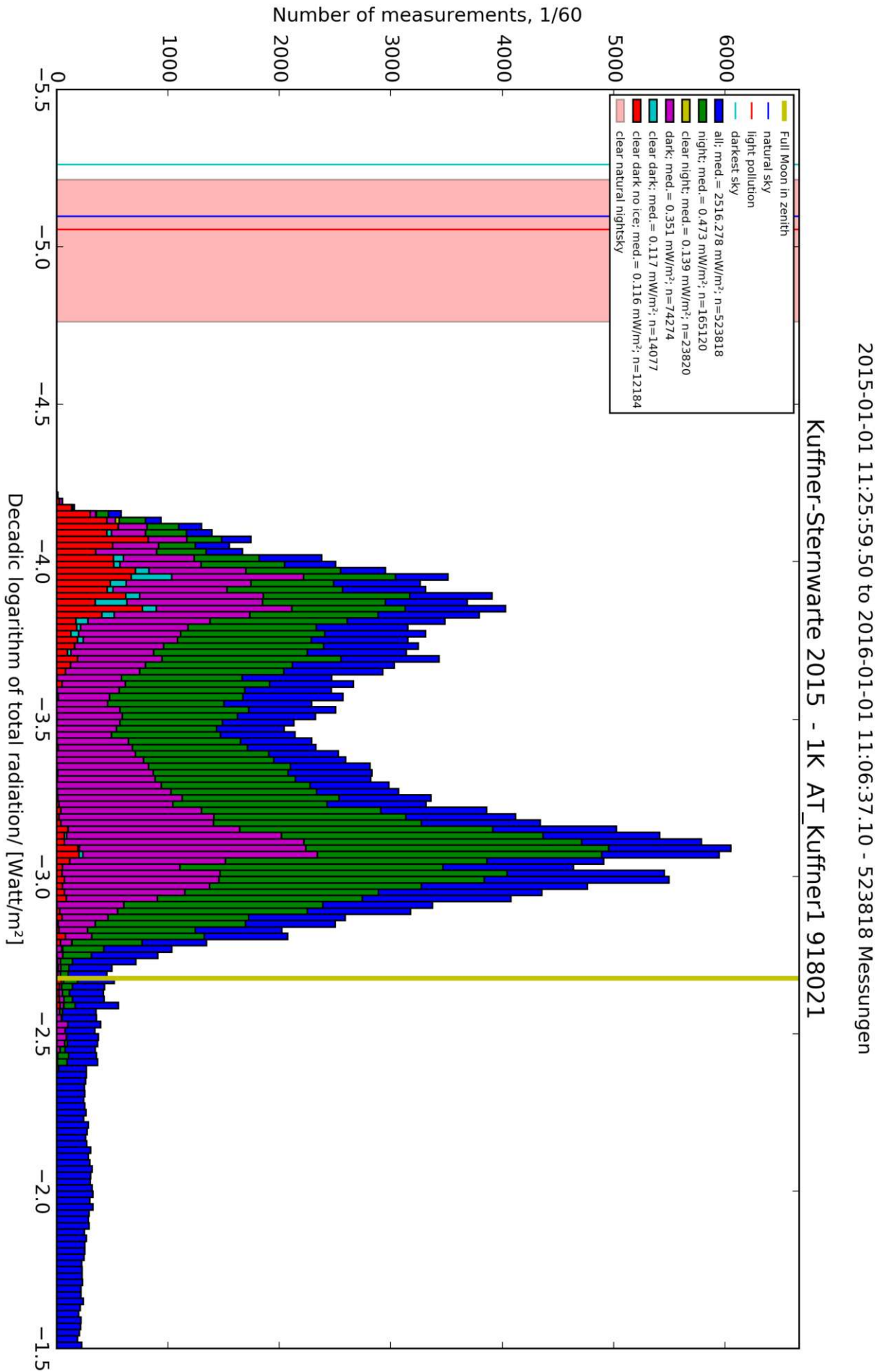


Abb. 33: Verteilung der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2015

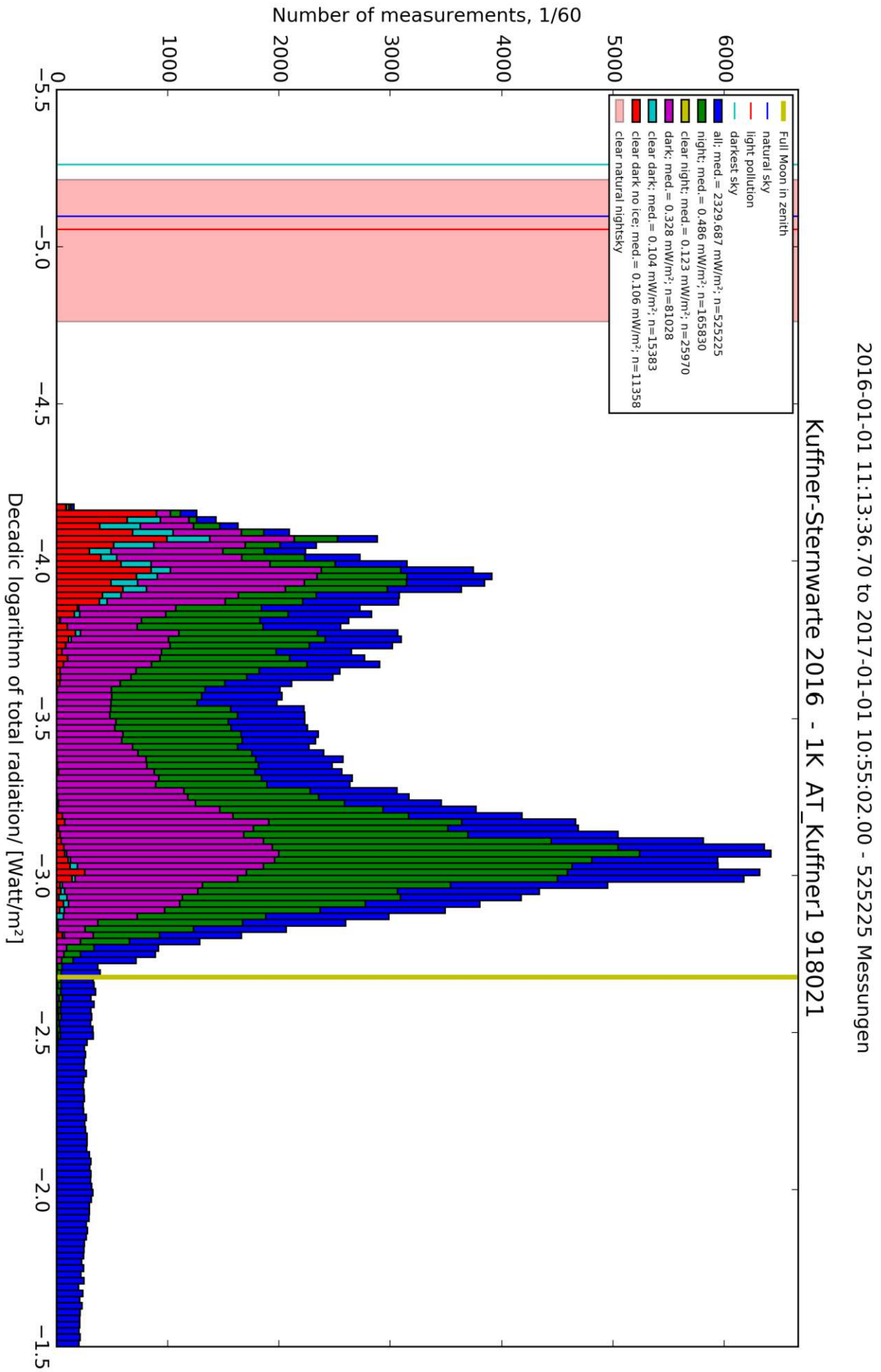
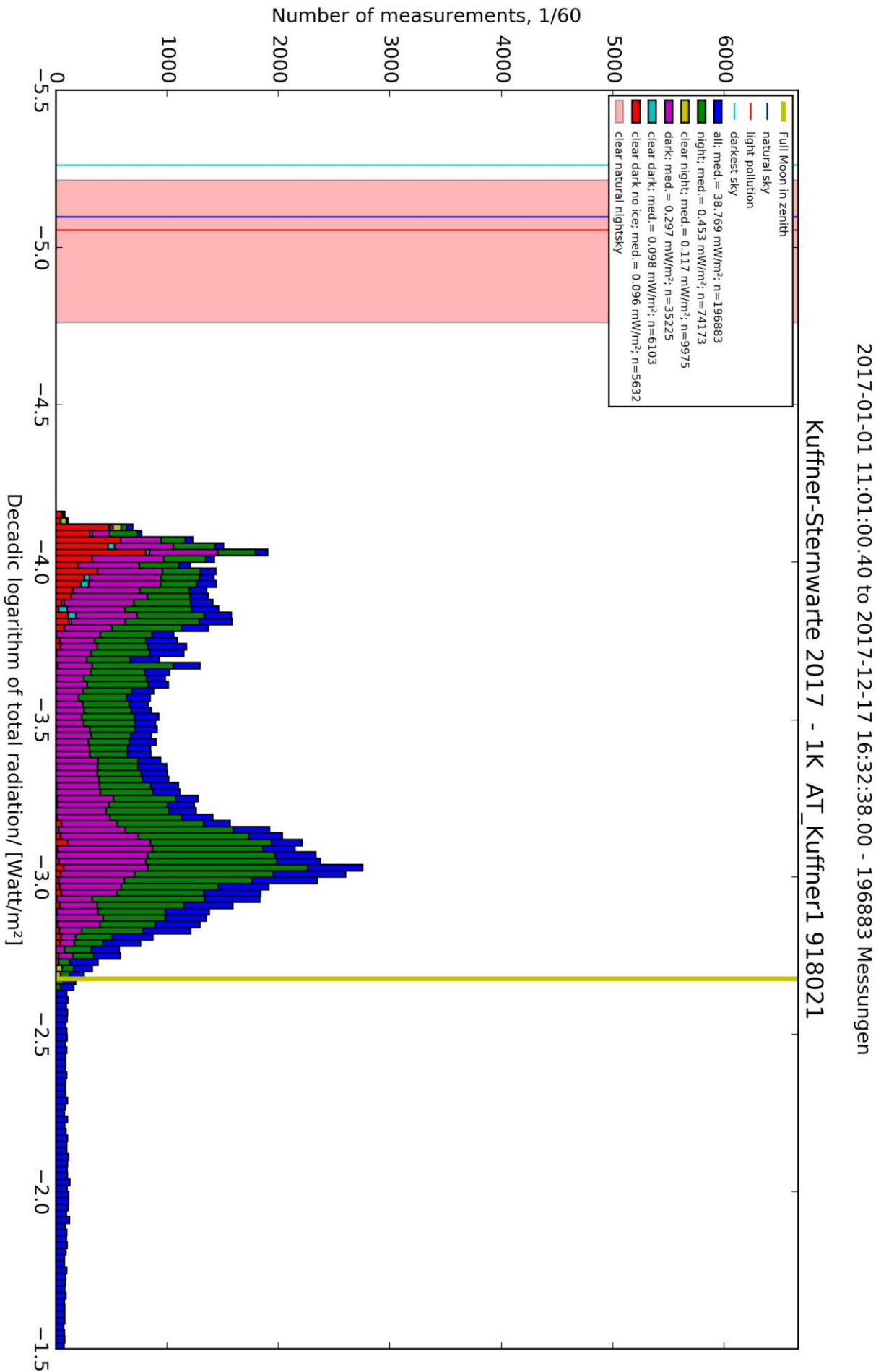


Abb. 34: Verteilung der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2016



Günther Wucherl, Wed D

Abb. 35: Verteilung der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2017

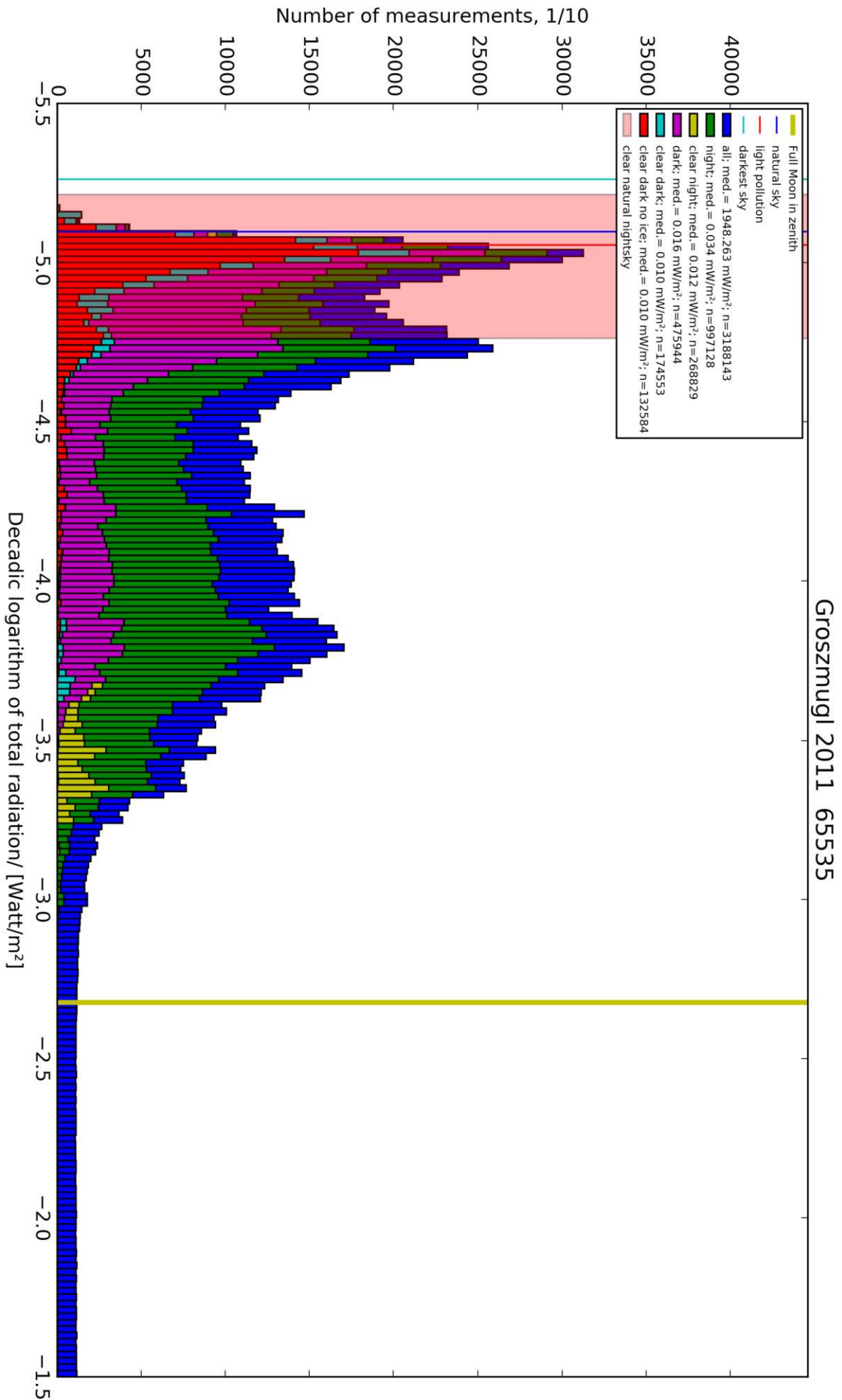


Abb. 36: Verteilung der Mess-Daten, Großmugl 2011

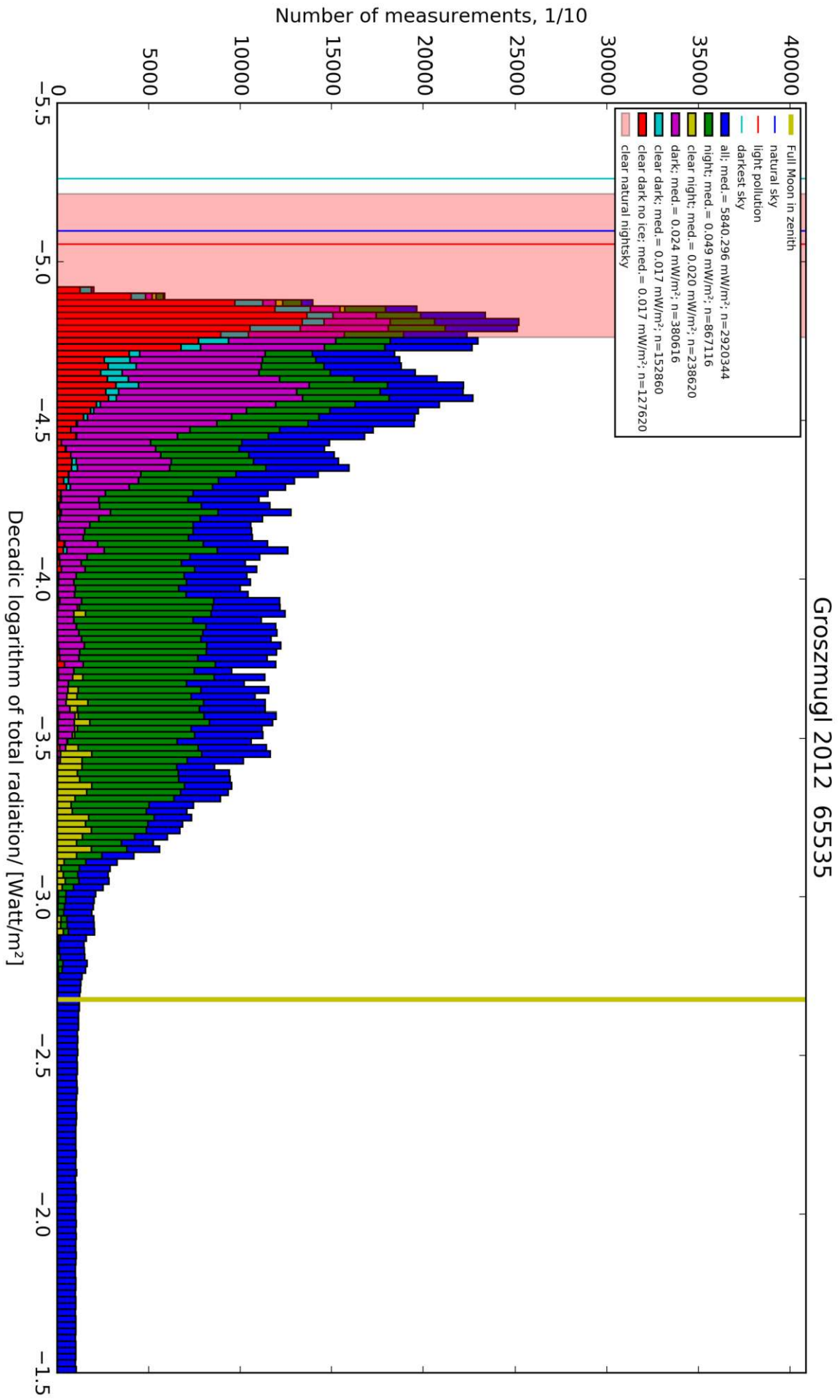


Abb. 37: Verteilung der Mess-Daten, Großmugl 2012

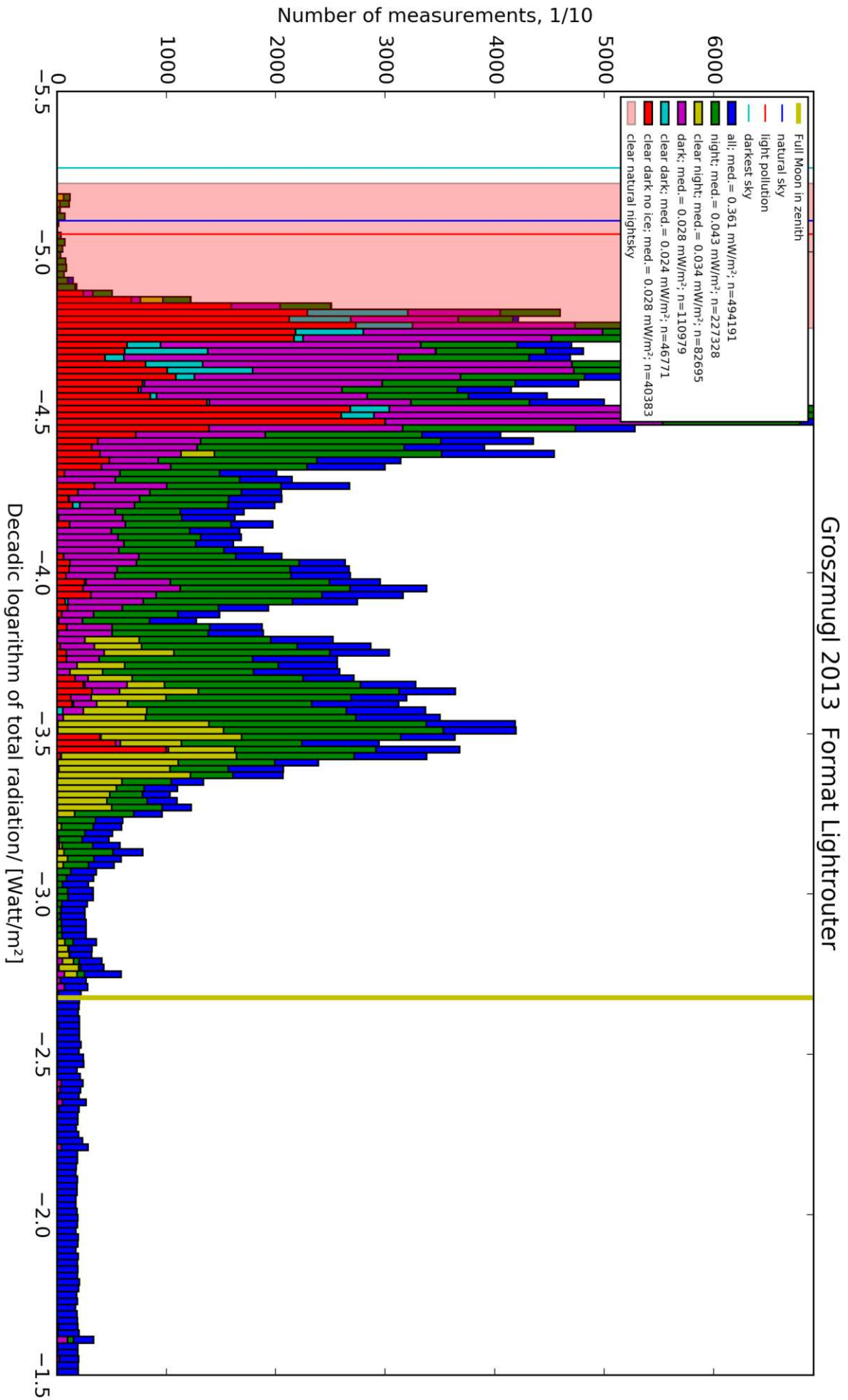


Abb. 38: Verteilung der Mess-Daten, Großmugl 2013

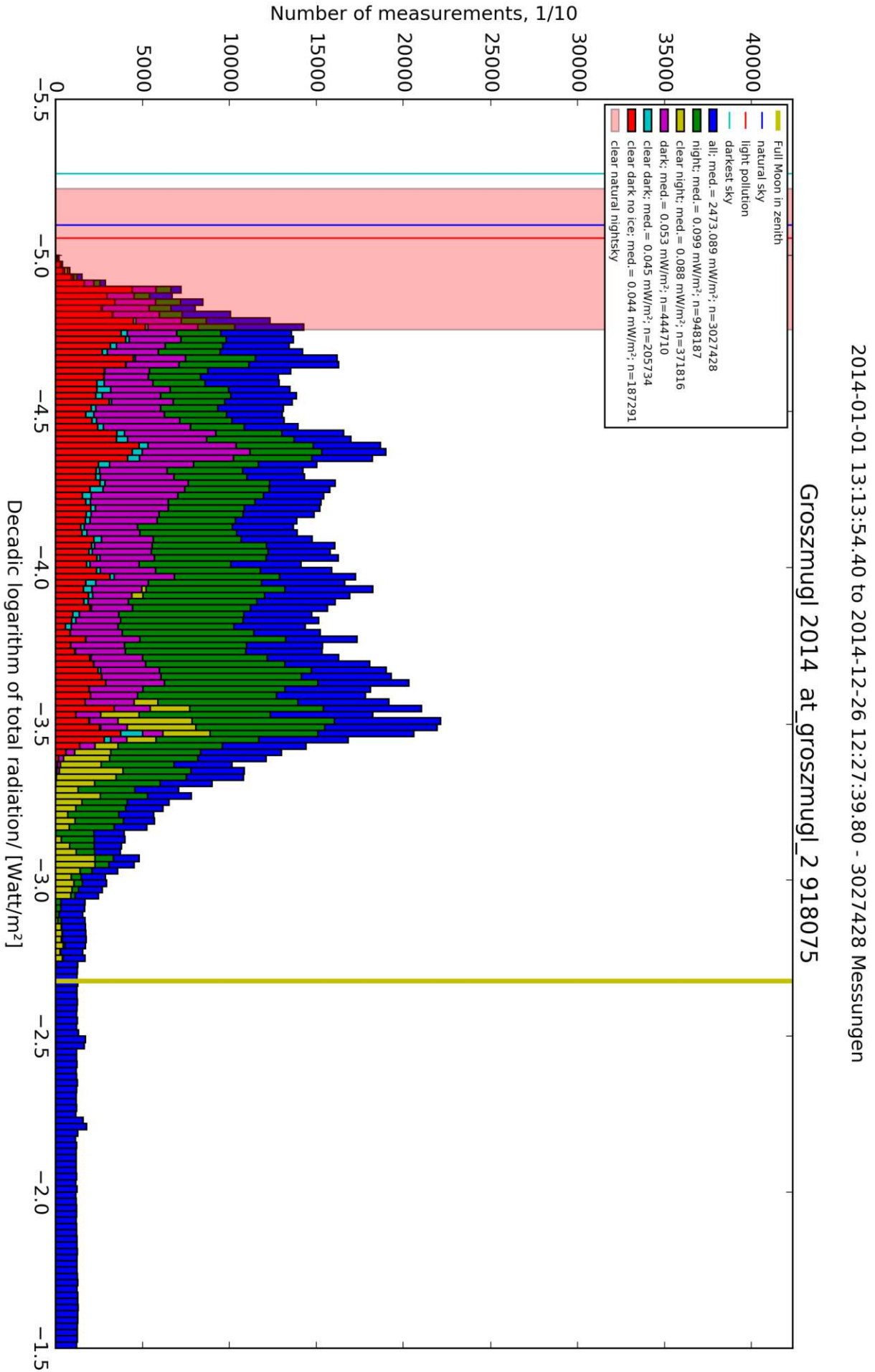


Abb. 39: Verteilung der Mess-Daten, Großmugl 2014

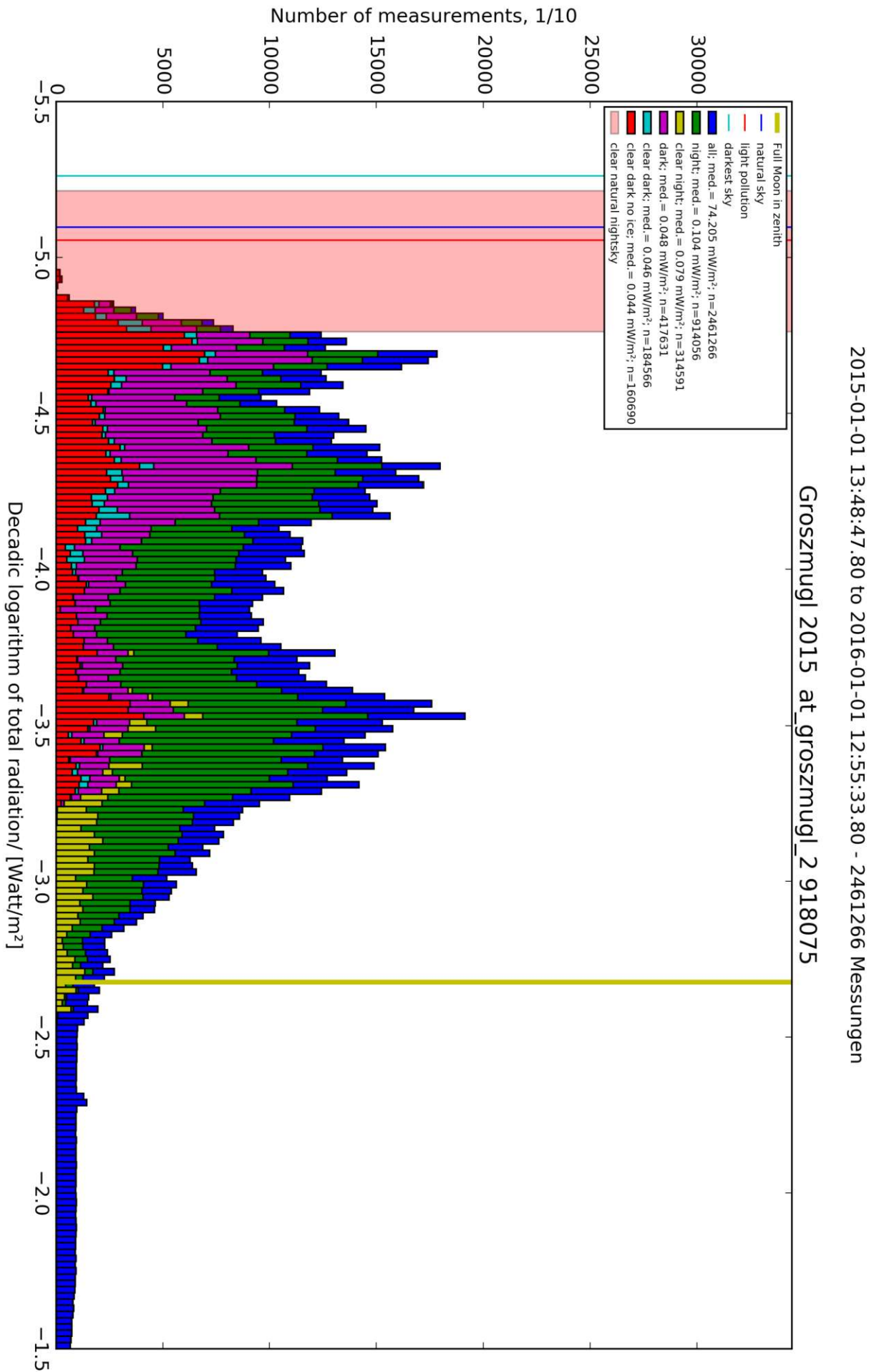
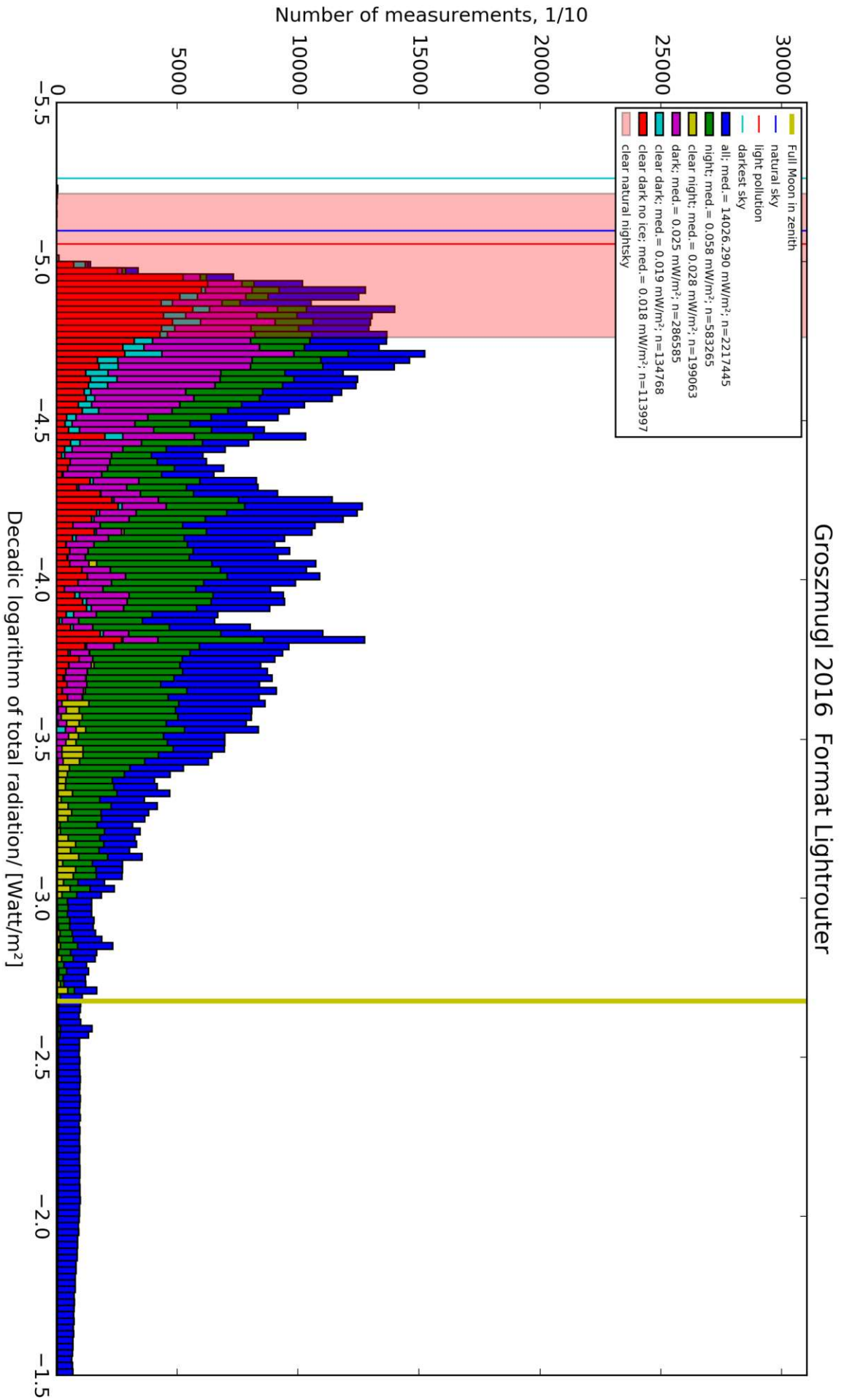
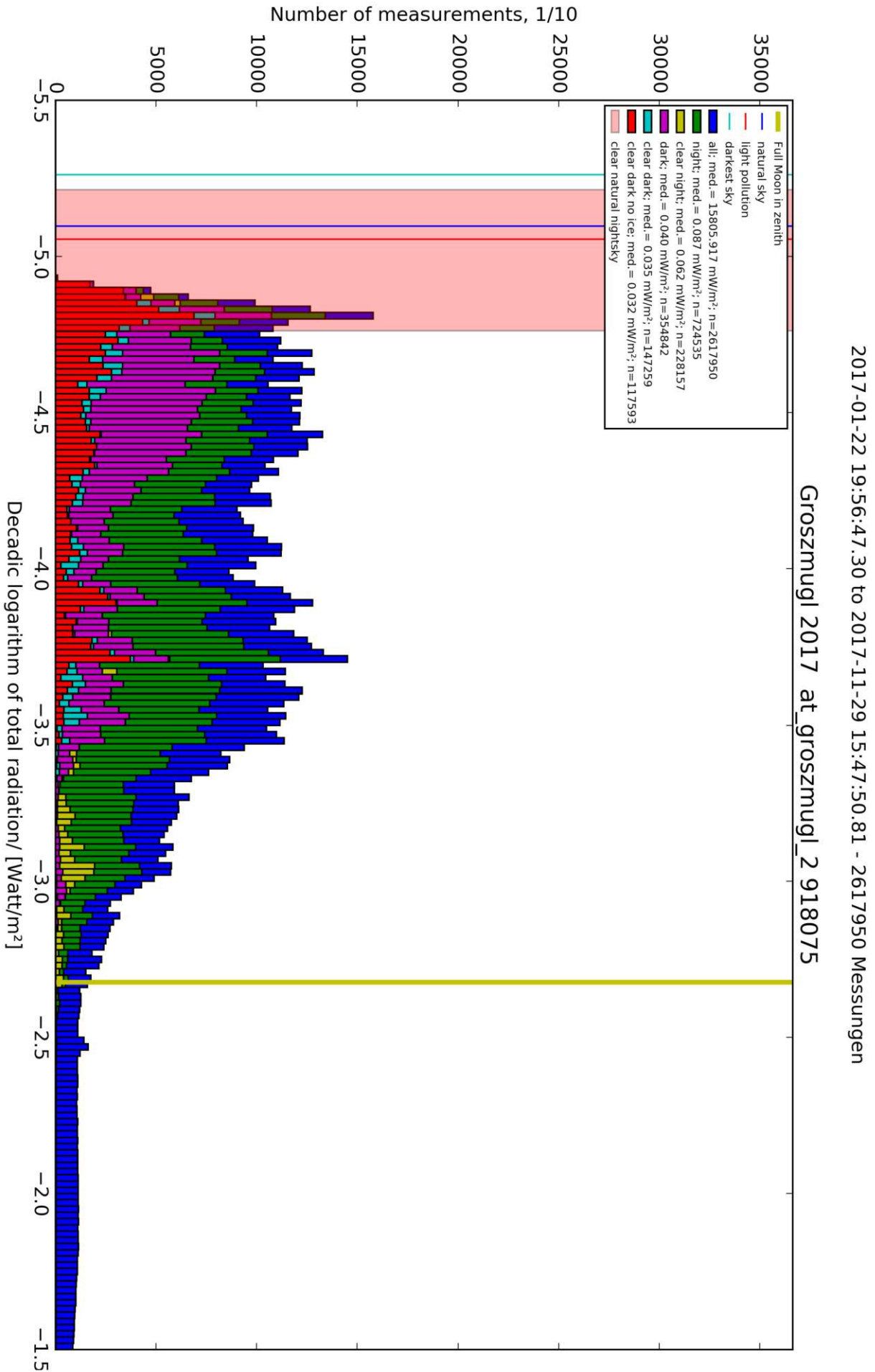


Abb. 40: Verteilung der Mess-Daten, Großmugl 2015



Günther Wuchterl, Sun

Abb. 41: Verteilung der Mess-Daten, Großmugl 2016



Günther Wuchterl, Suir

Abb. 42: Verteilung der Mess-Daten, Großmugl 2017

6.3. Darstellung der Messwerte der Globalstrahlung, über Zeit

Legende zu den Grafiken:

- **Moon Graff HBA ph.f.:**

Globalstrahlung des Mondes gemäß Modell von Graff

- **Full moon:**

Globalstrahlung des Vollmondes im Zenit über dem Beobachtungsort

- **natural skies:**

Bereich natürlicher Himmelshelligkeiten, ohne künstliches Störlicht und Wolkenbedeckung

Die dünnen, eng aneinander liegenden schwarzen Linien entsprechen den kalibrierten Messwerten der Messstation (Lightmeter) am jeweiligen Ort.

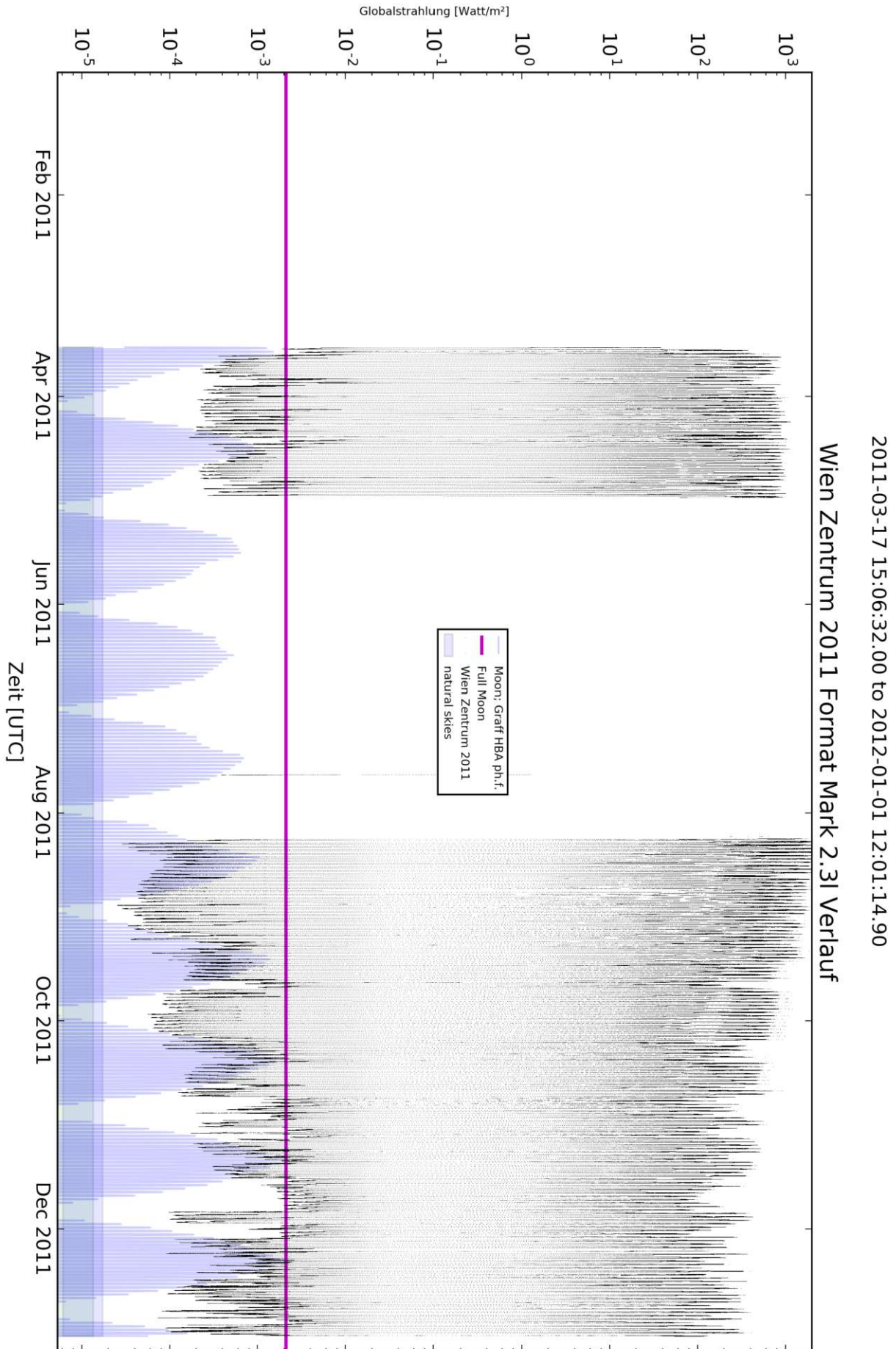


Abb. 43: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Wien Zentrum 2011

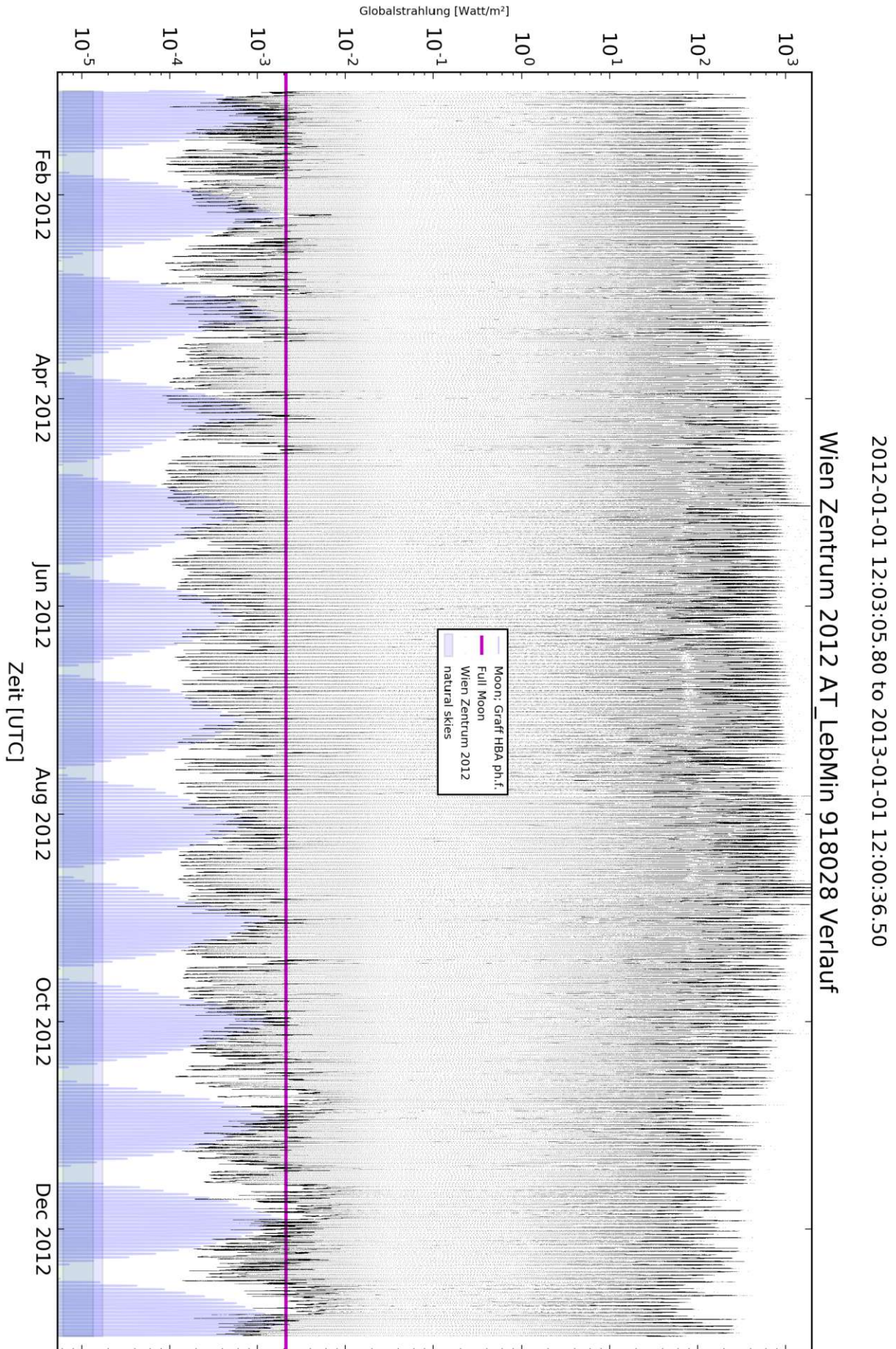


Abb. 44: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Wien Zentrum 2012

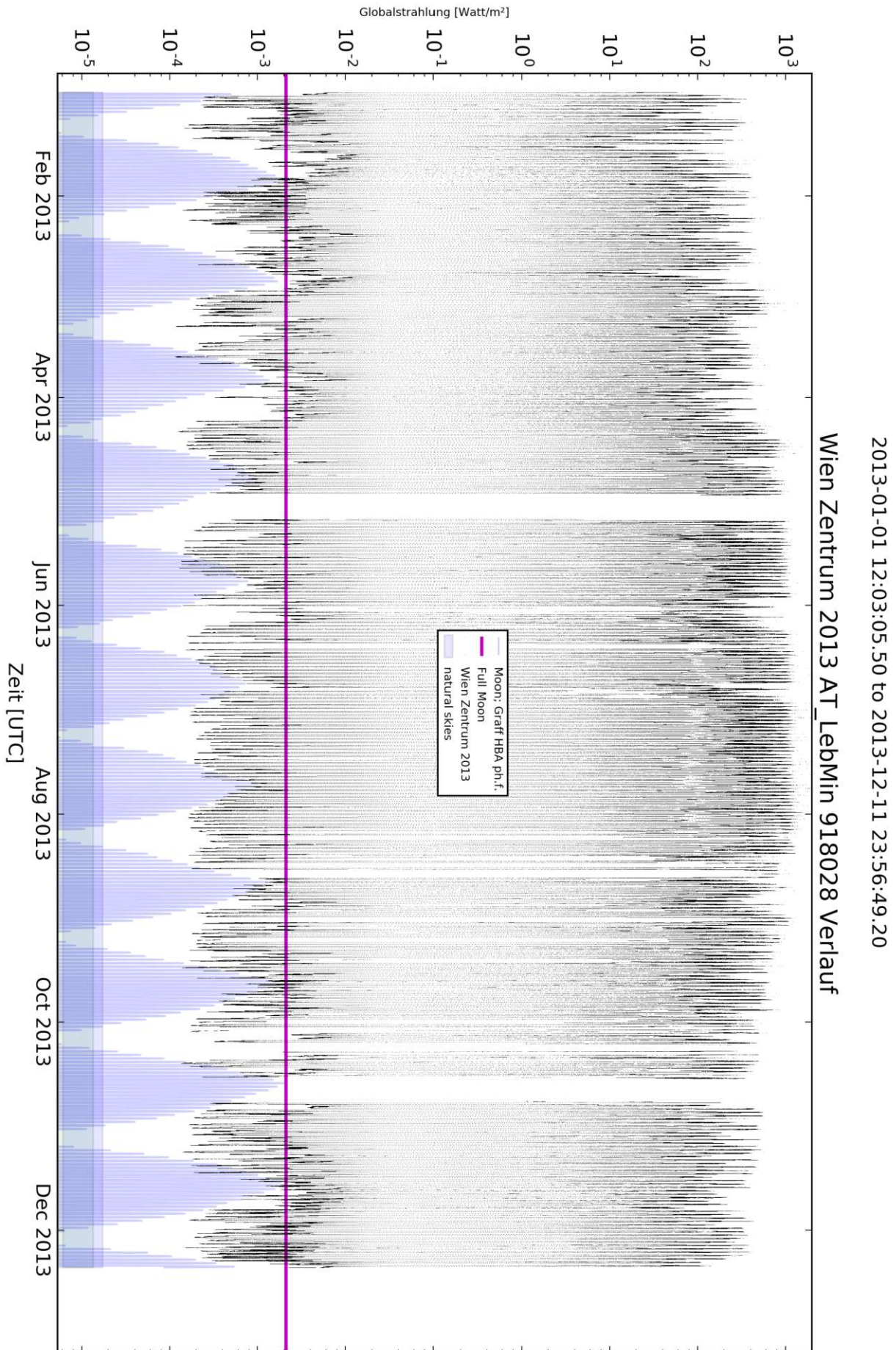


Abb. 45: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Wien Zentrum 2013

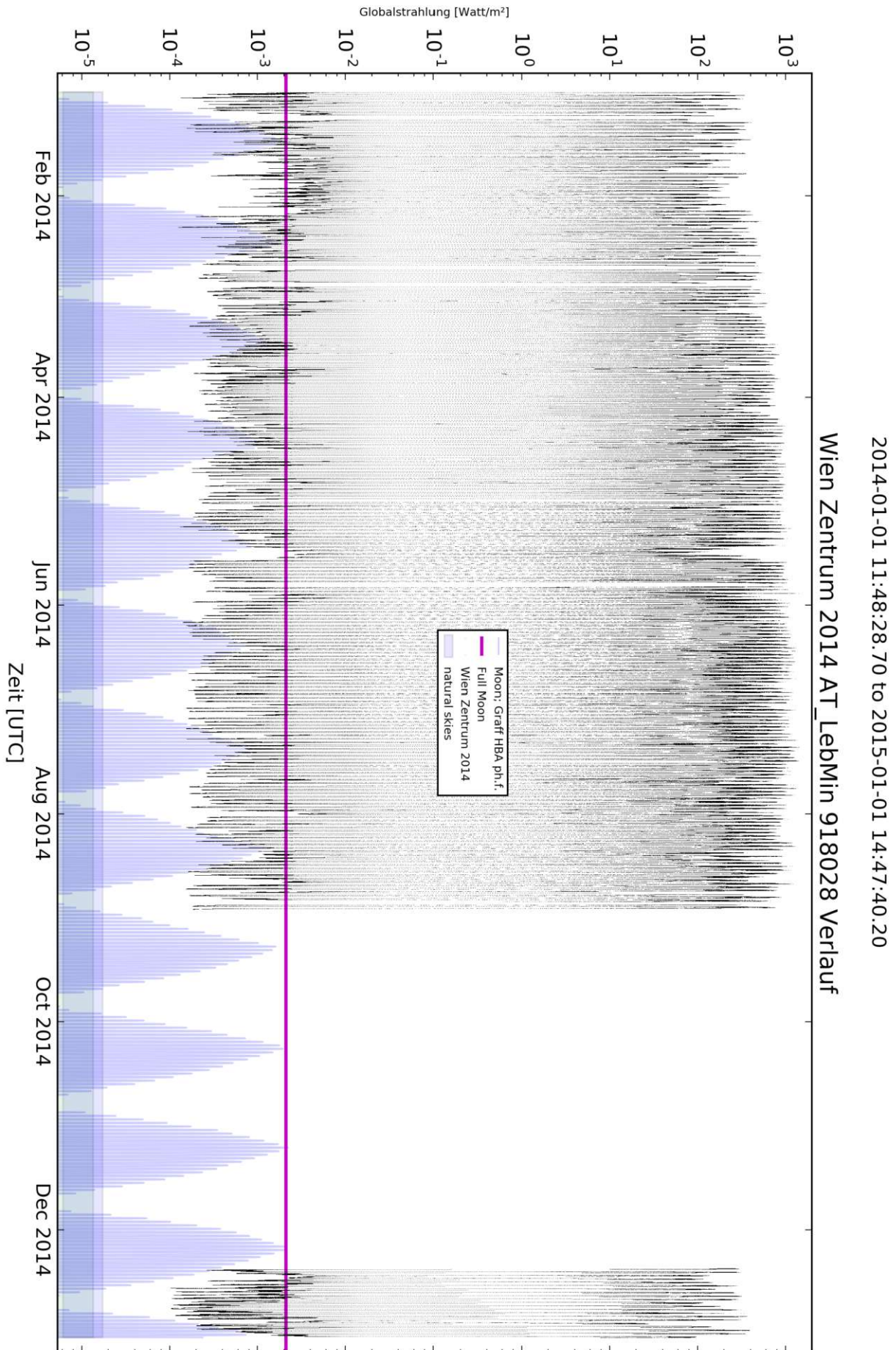


Abb. 46: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Wien Zentrum 2014

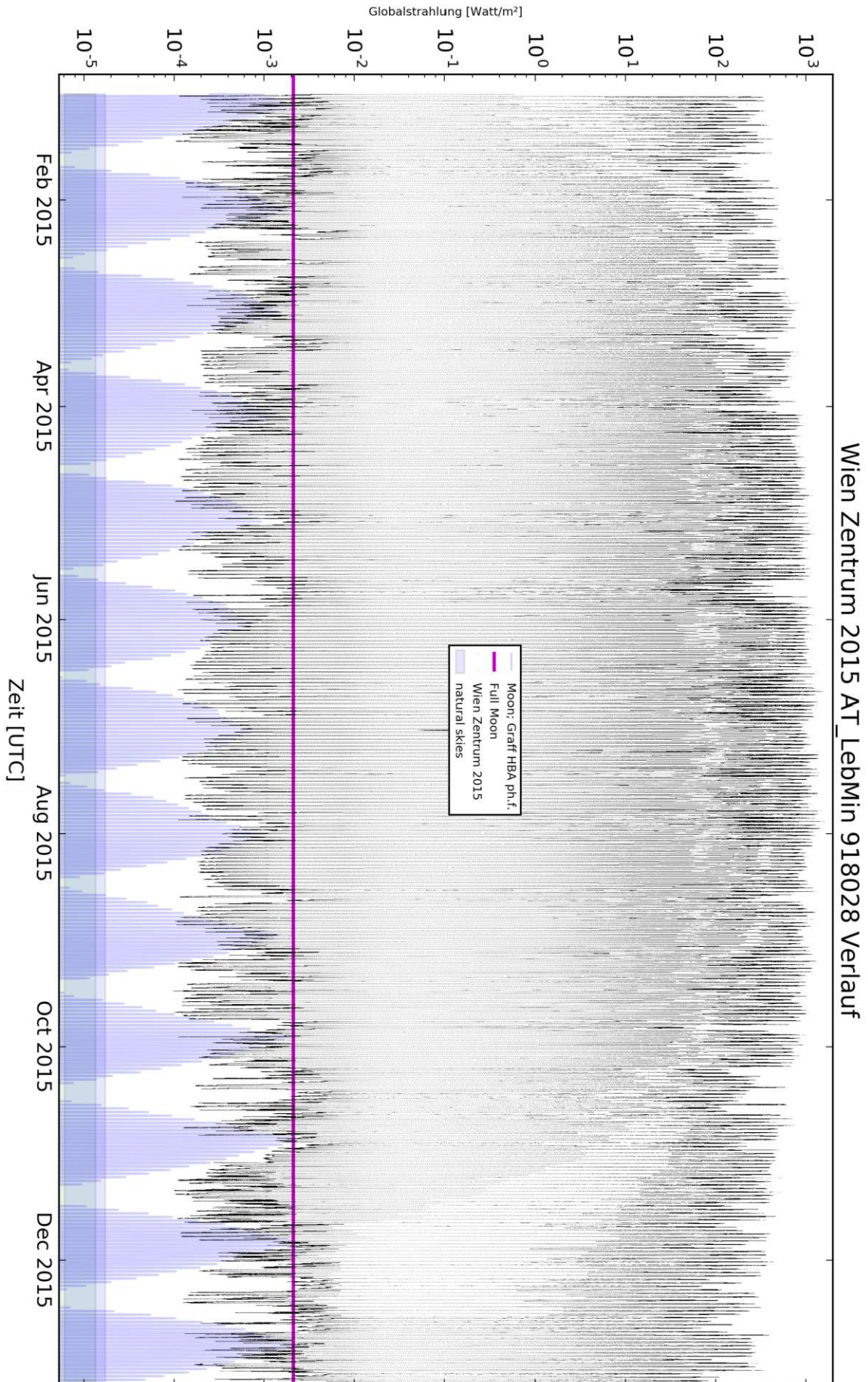


Abb. 47: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Wien Zentrum 2015

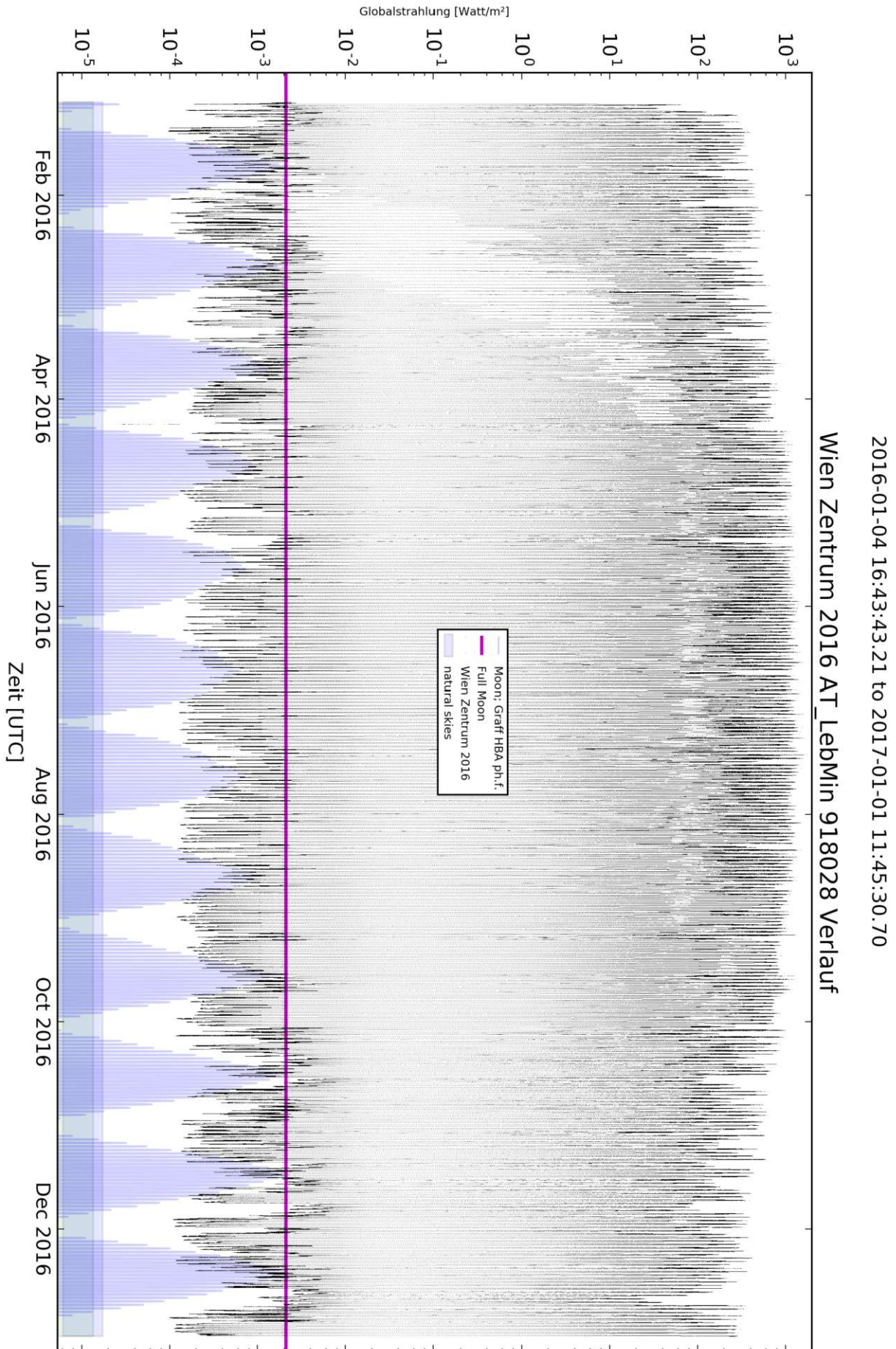


Abb. 48: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Wien Zentrum 2016

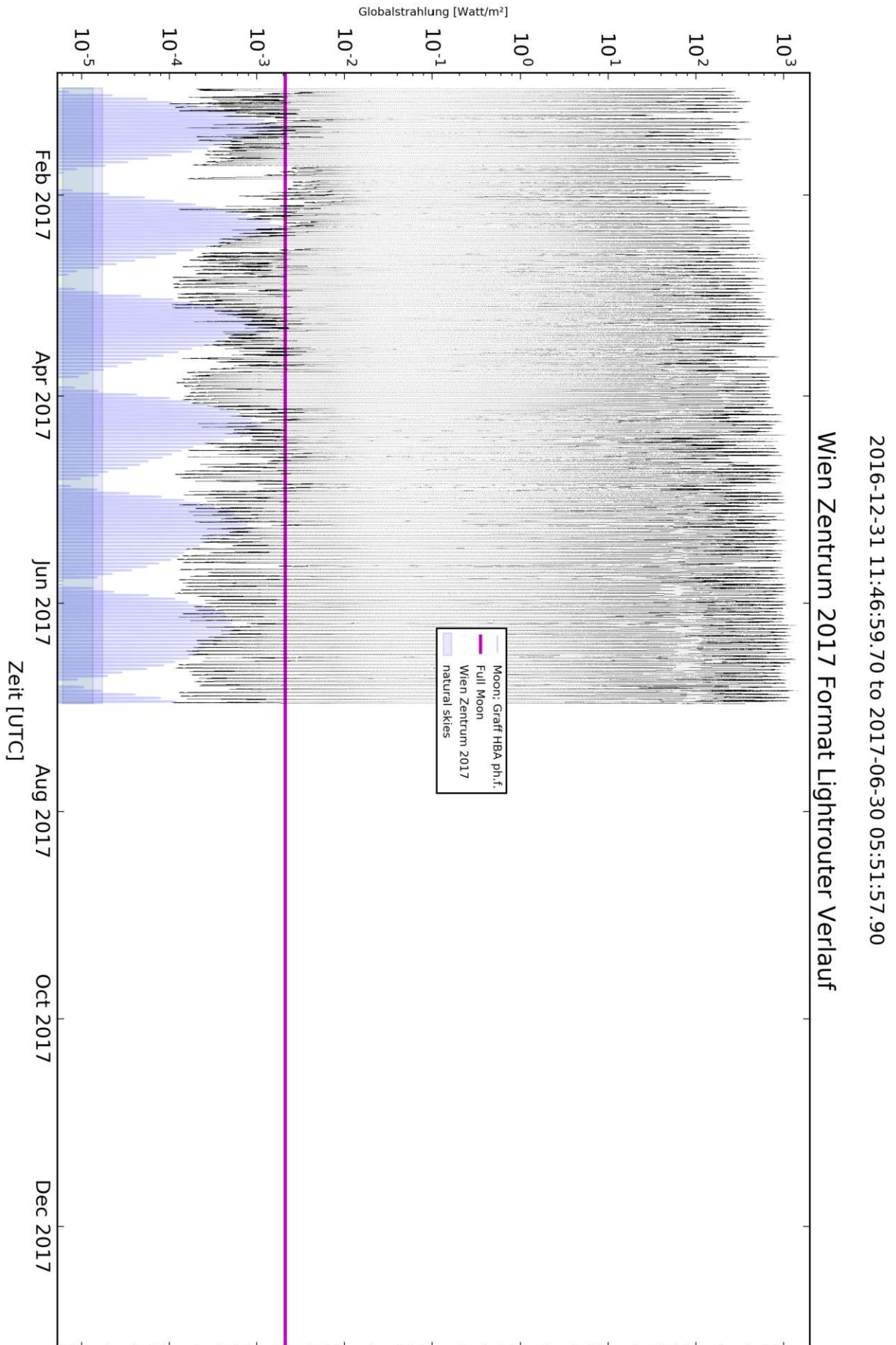


Abb. 49: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Wien Zentrum 2017

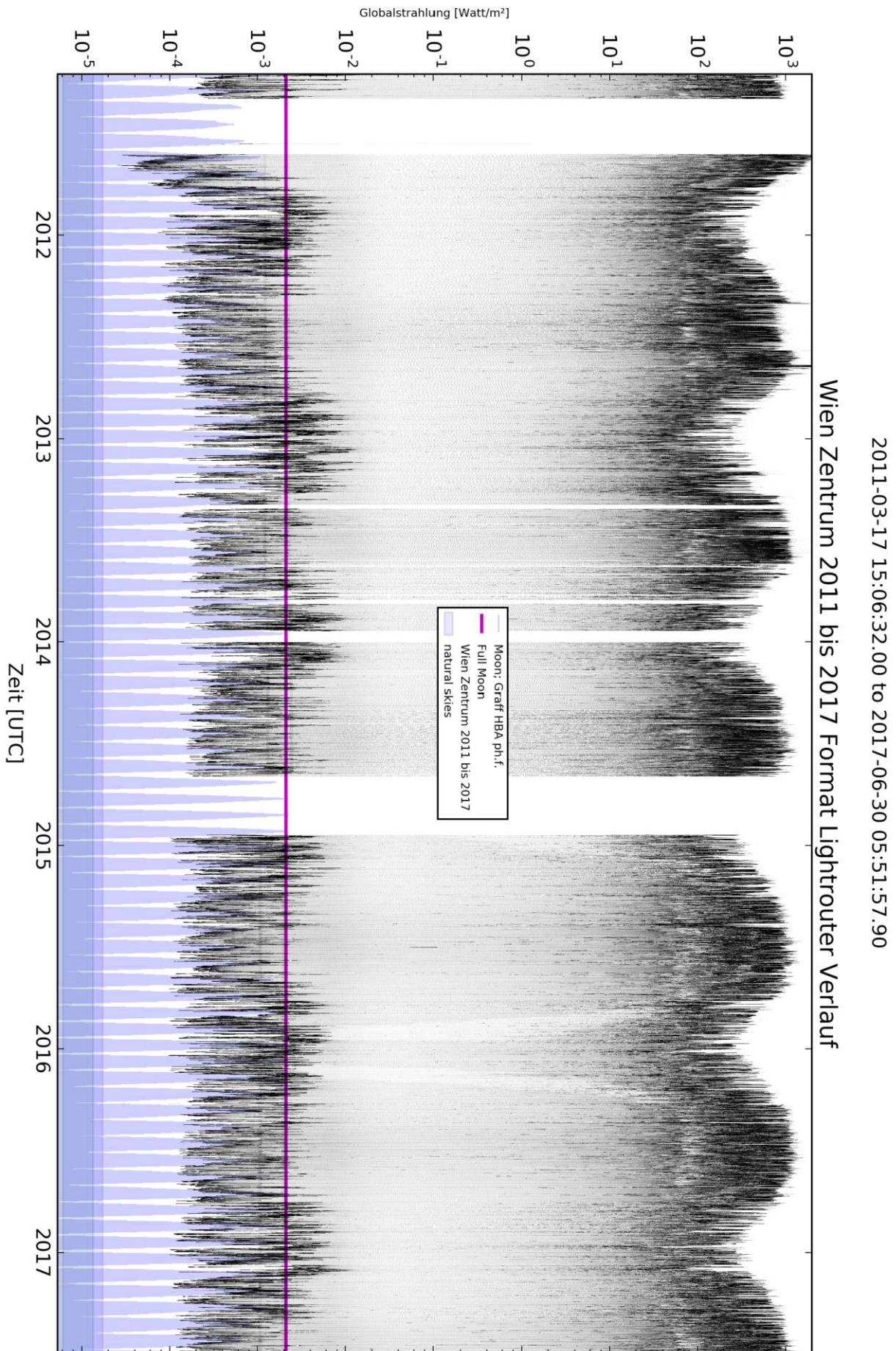


Abb. 50: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Wien Zentrum 2011 bis 2017

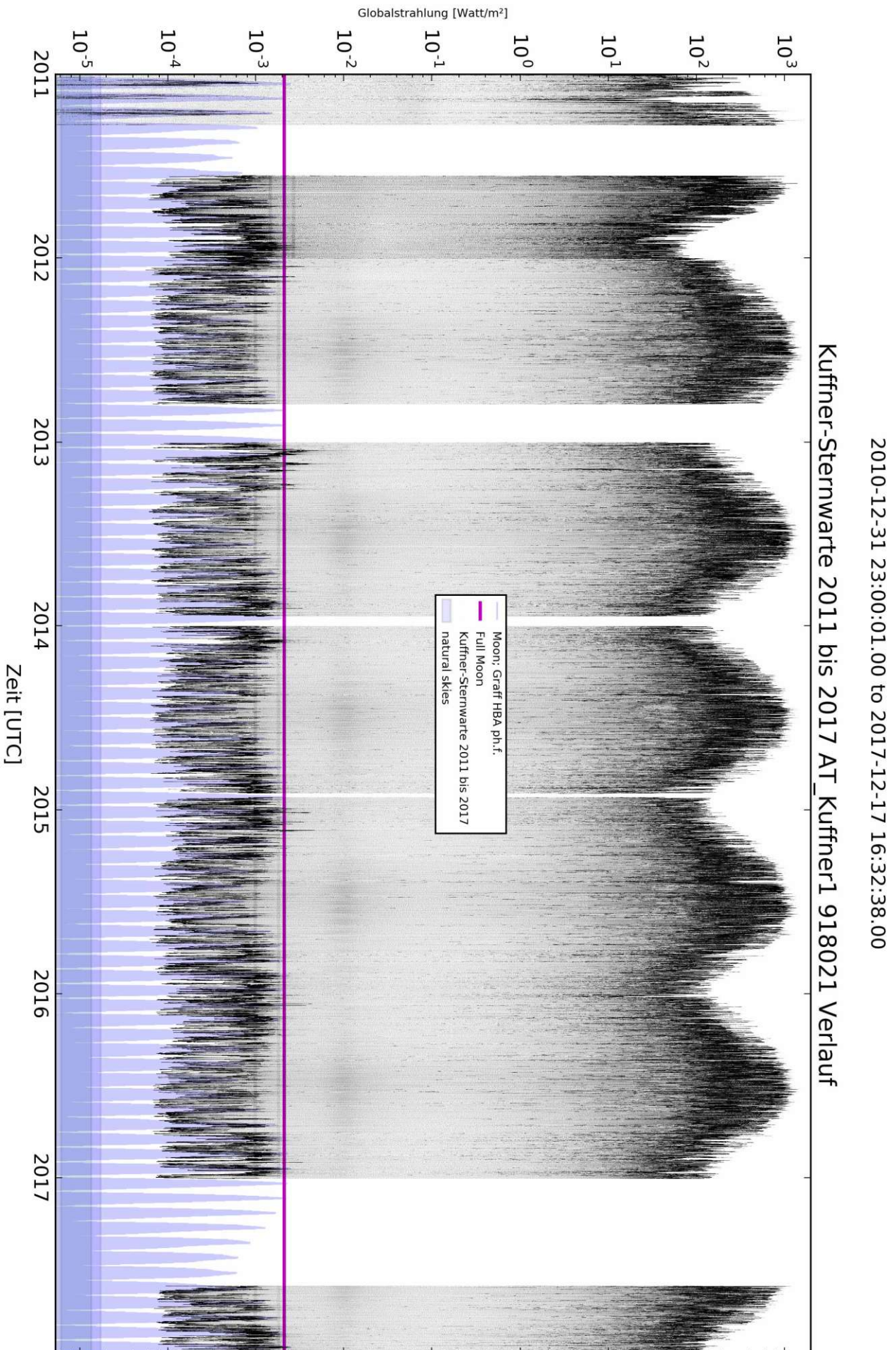


Abb. 51: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2011 bis 2017

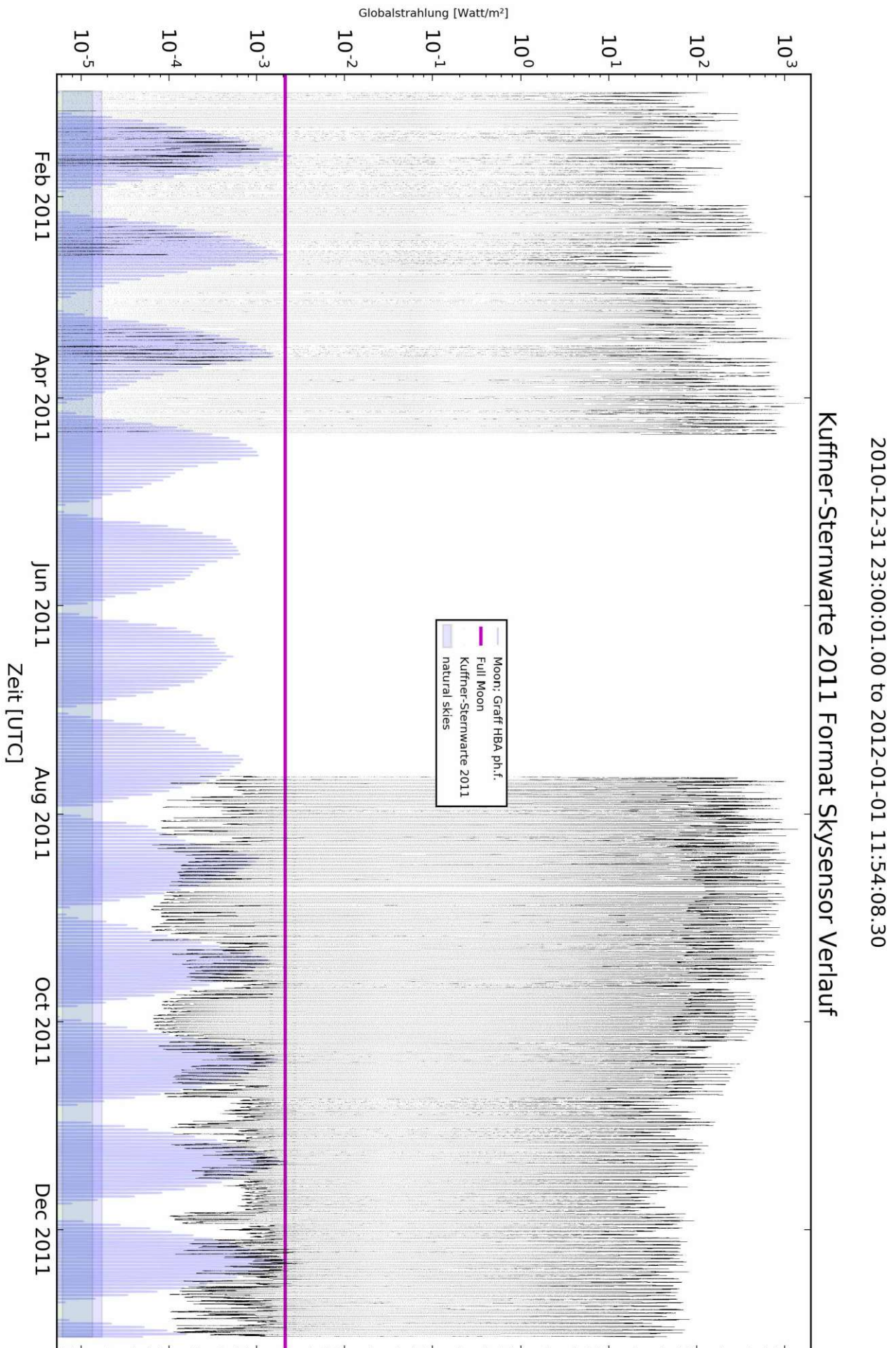


Abb. 52: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2011

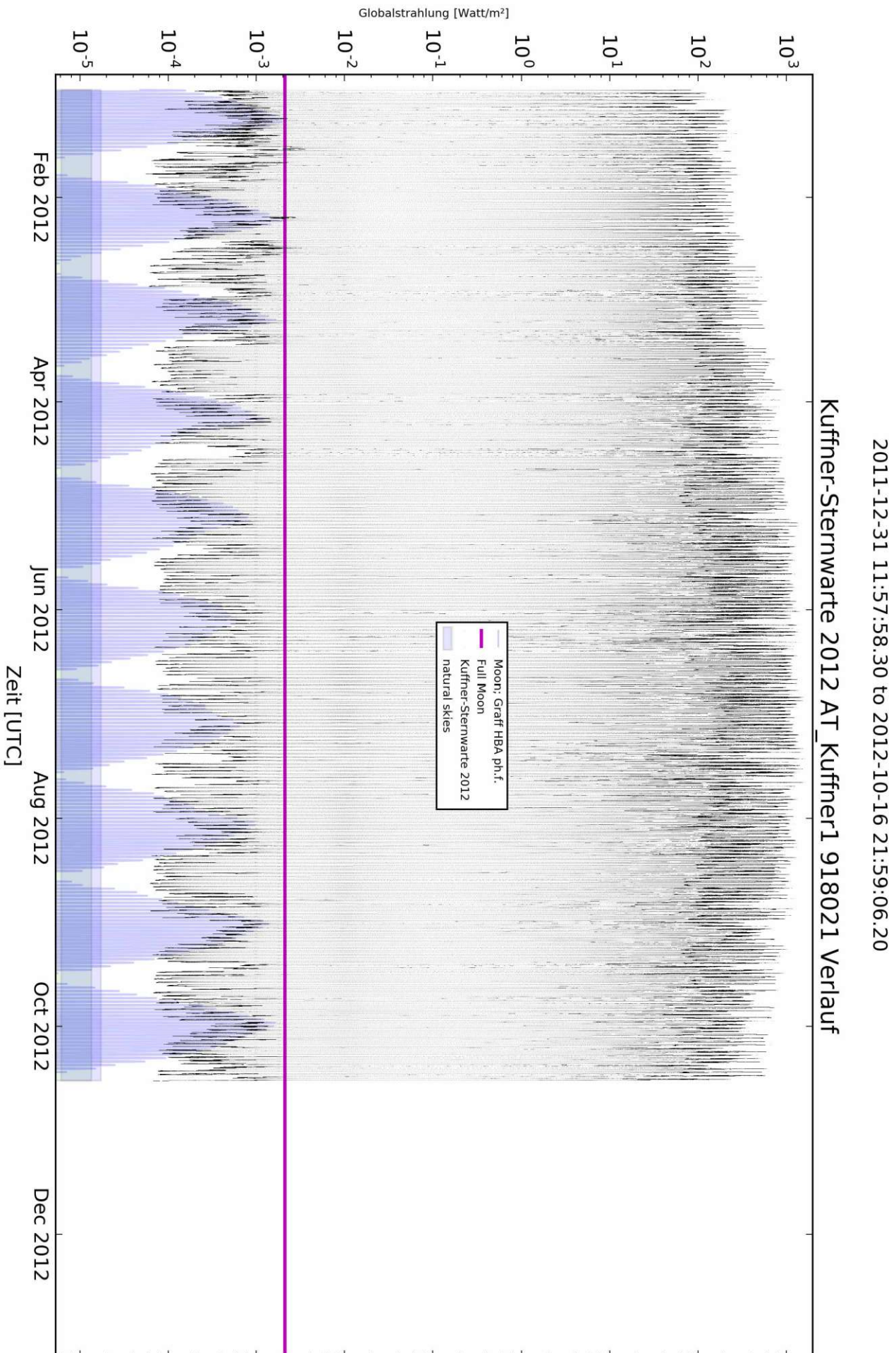


Abb. 53: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2012

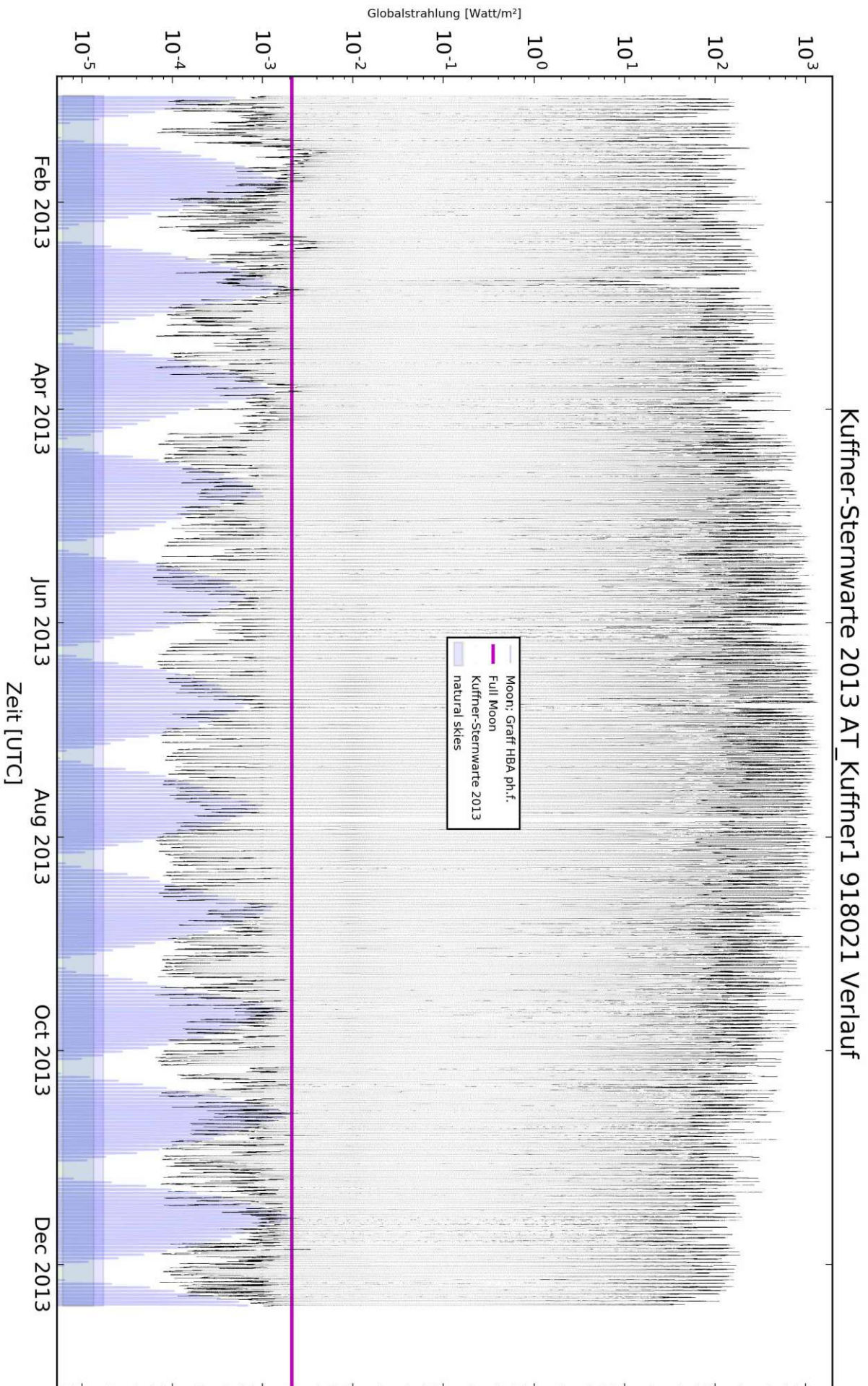


Abb. 54: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2013

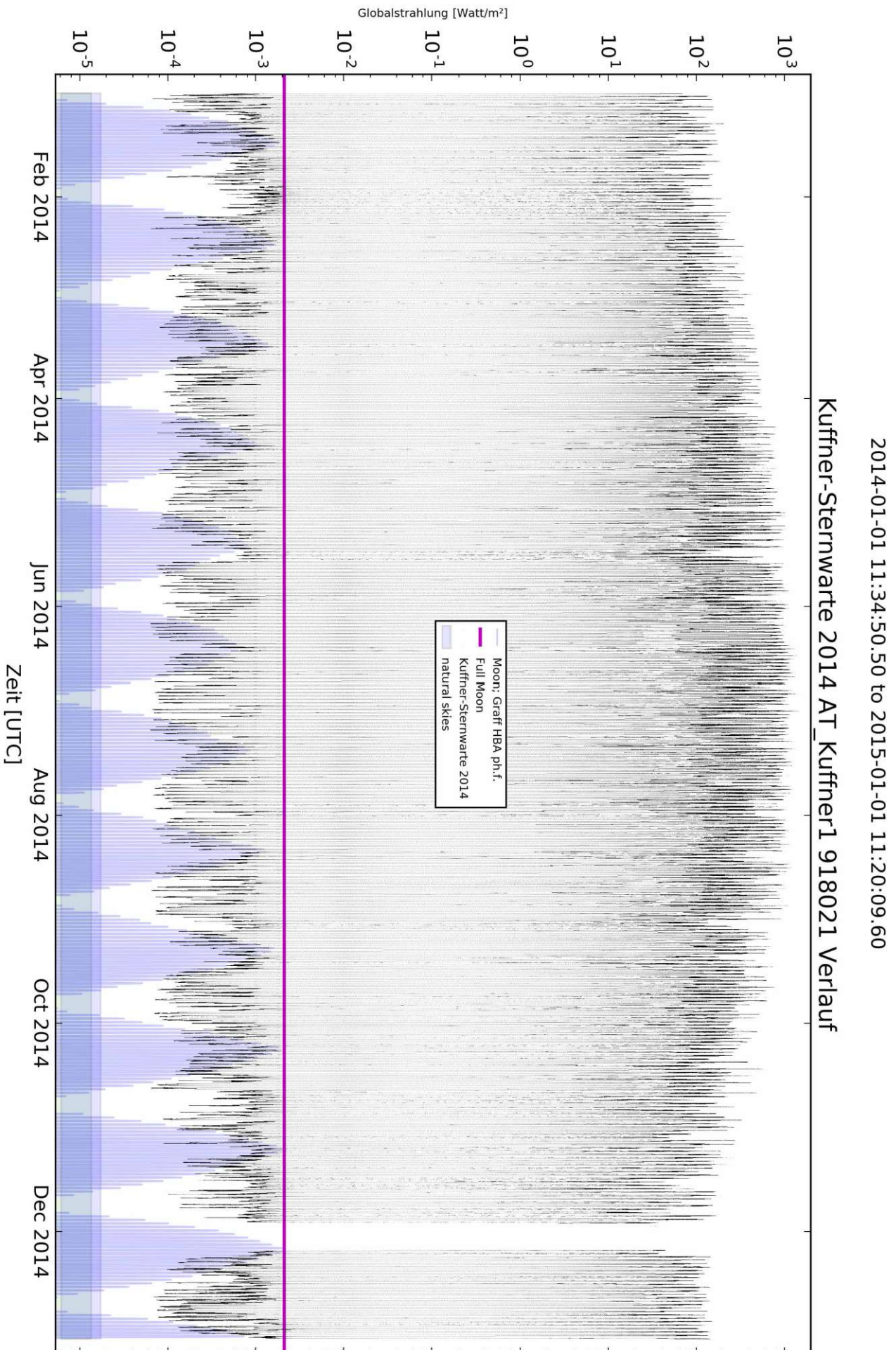


Abb. 55: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2014

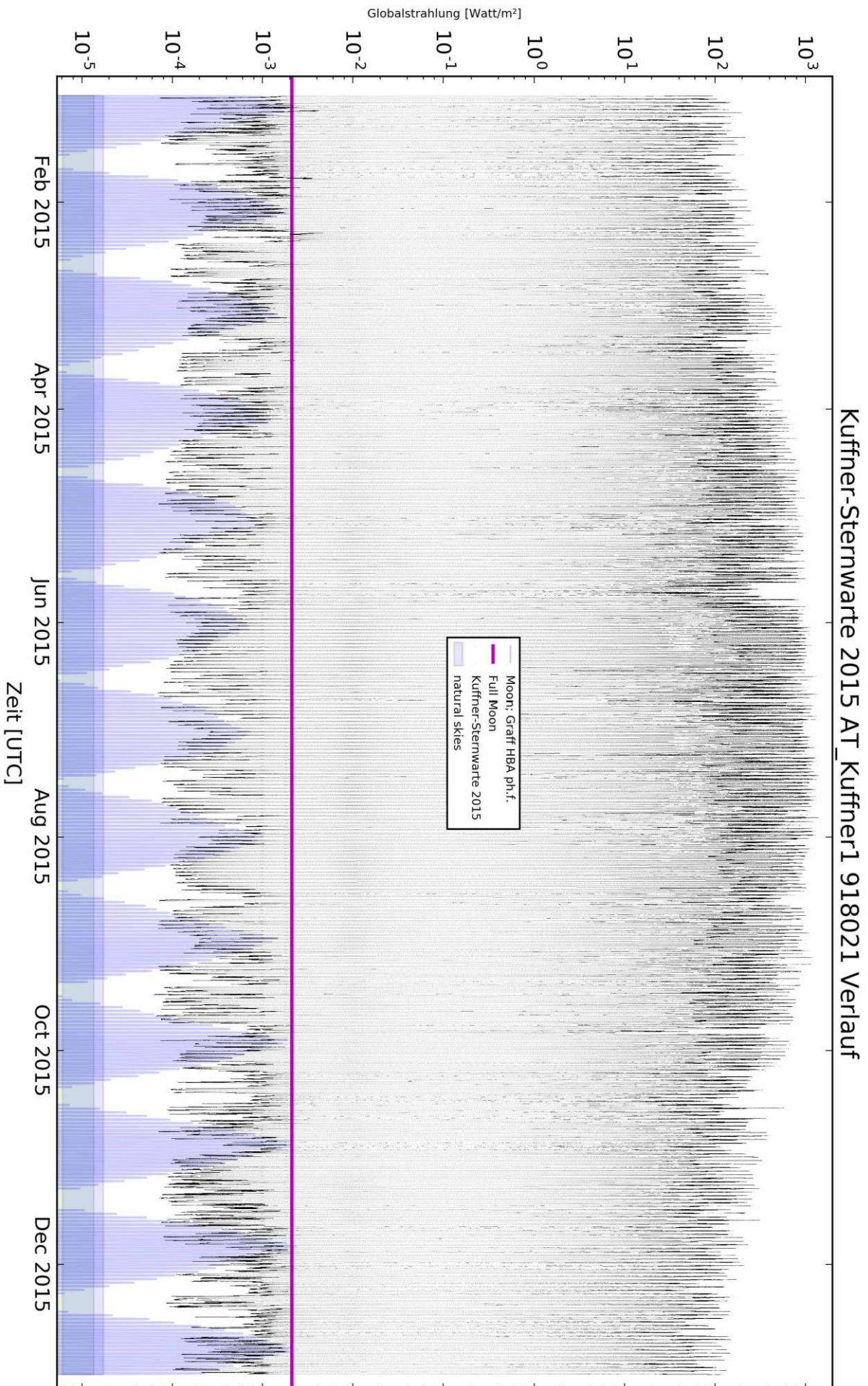


Abb. 56: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2015

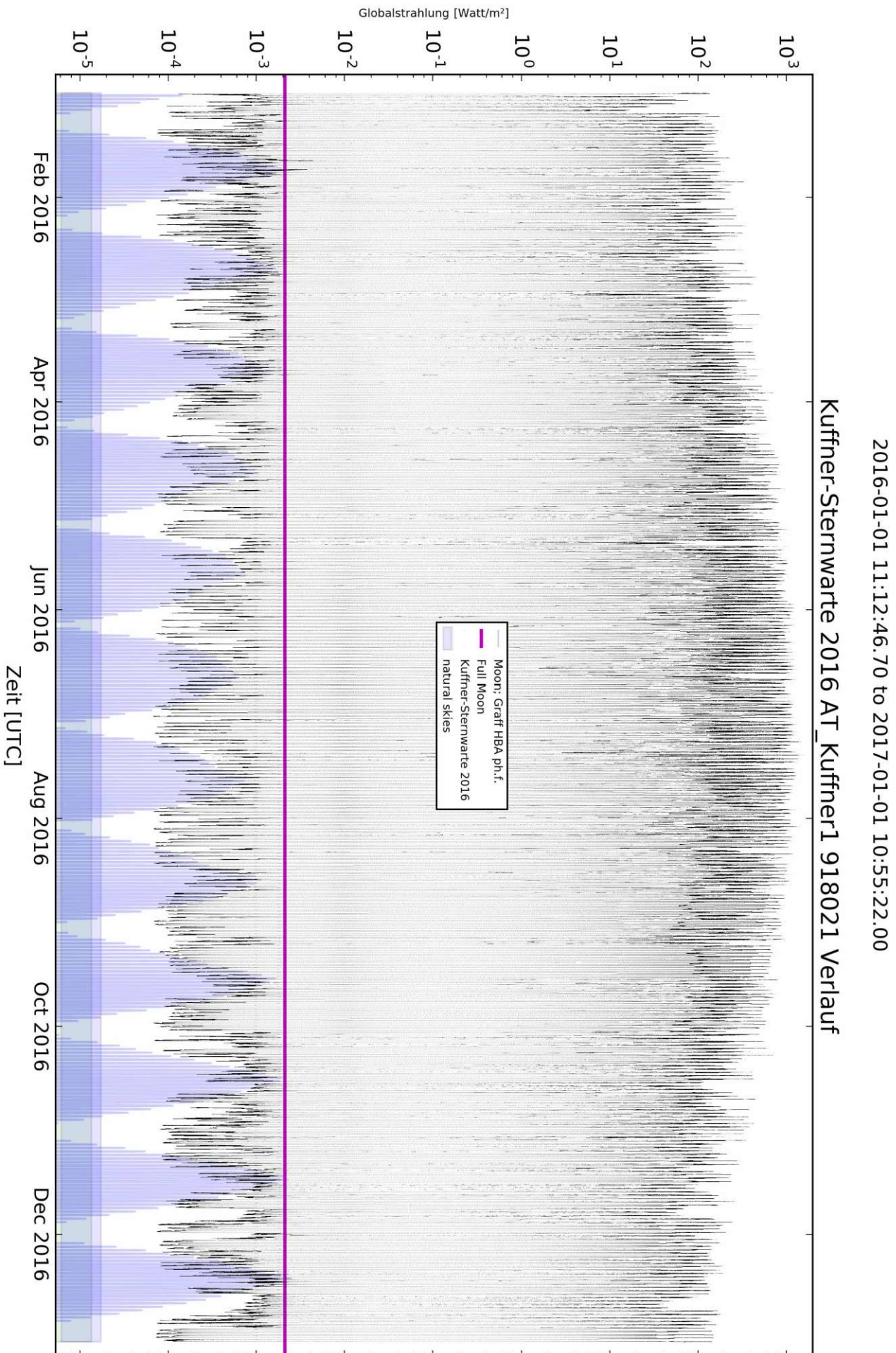


Abb. 57: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2016

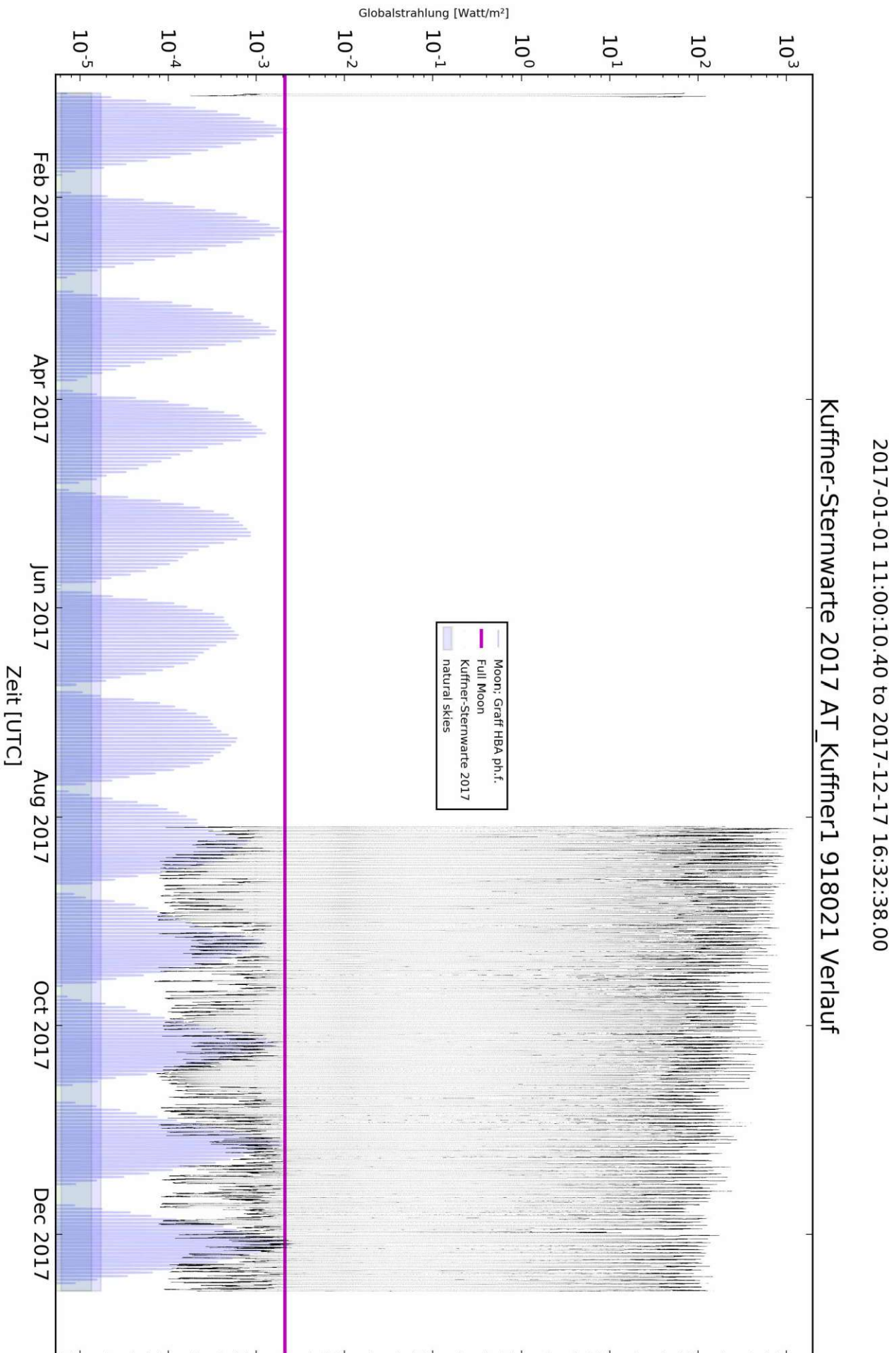


Abb. 58: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Kuffner Sternwarte 2017

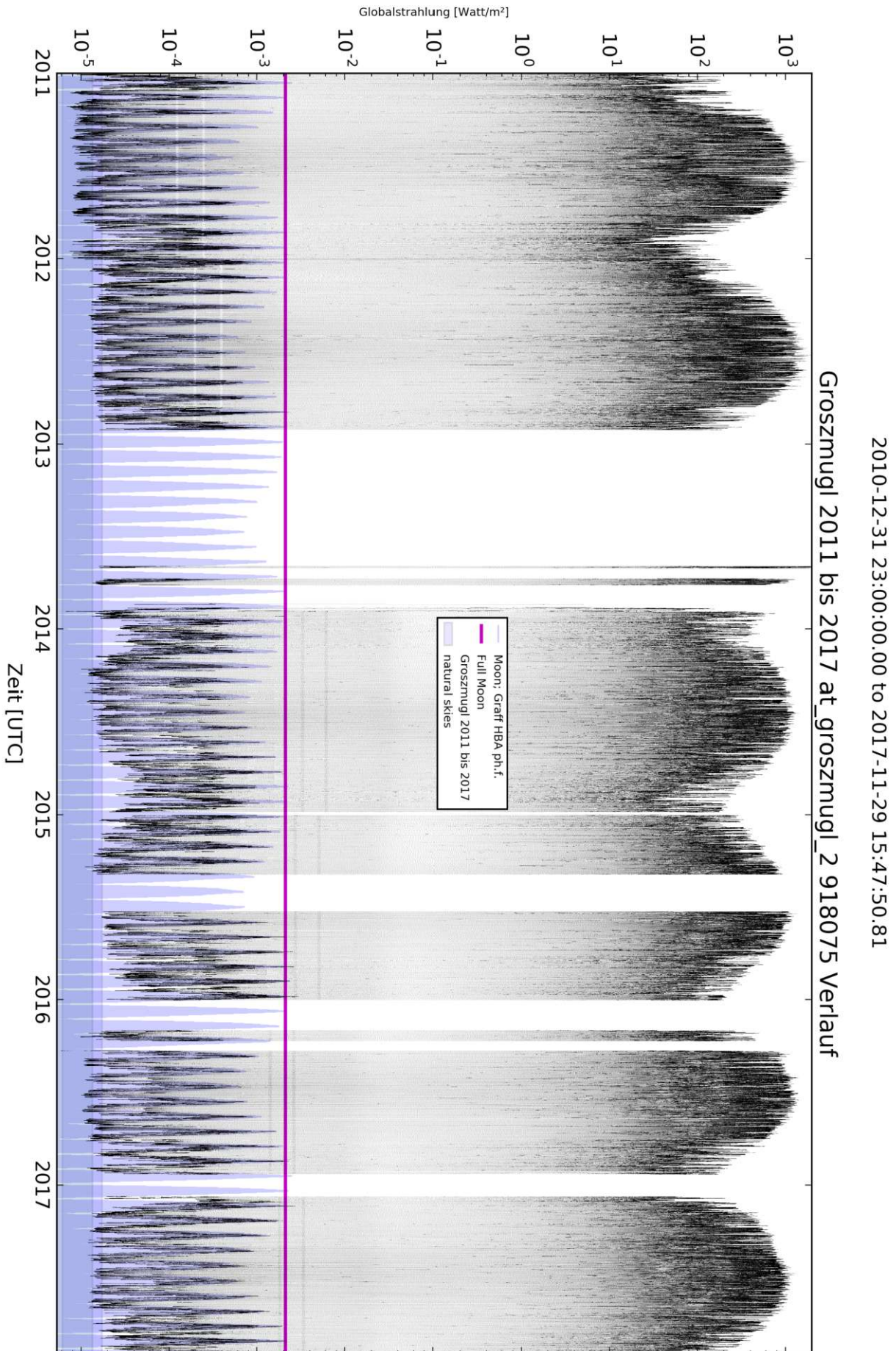


Abb. 59: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Großmugl 2011 bis 2017

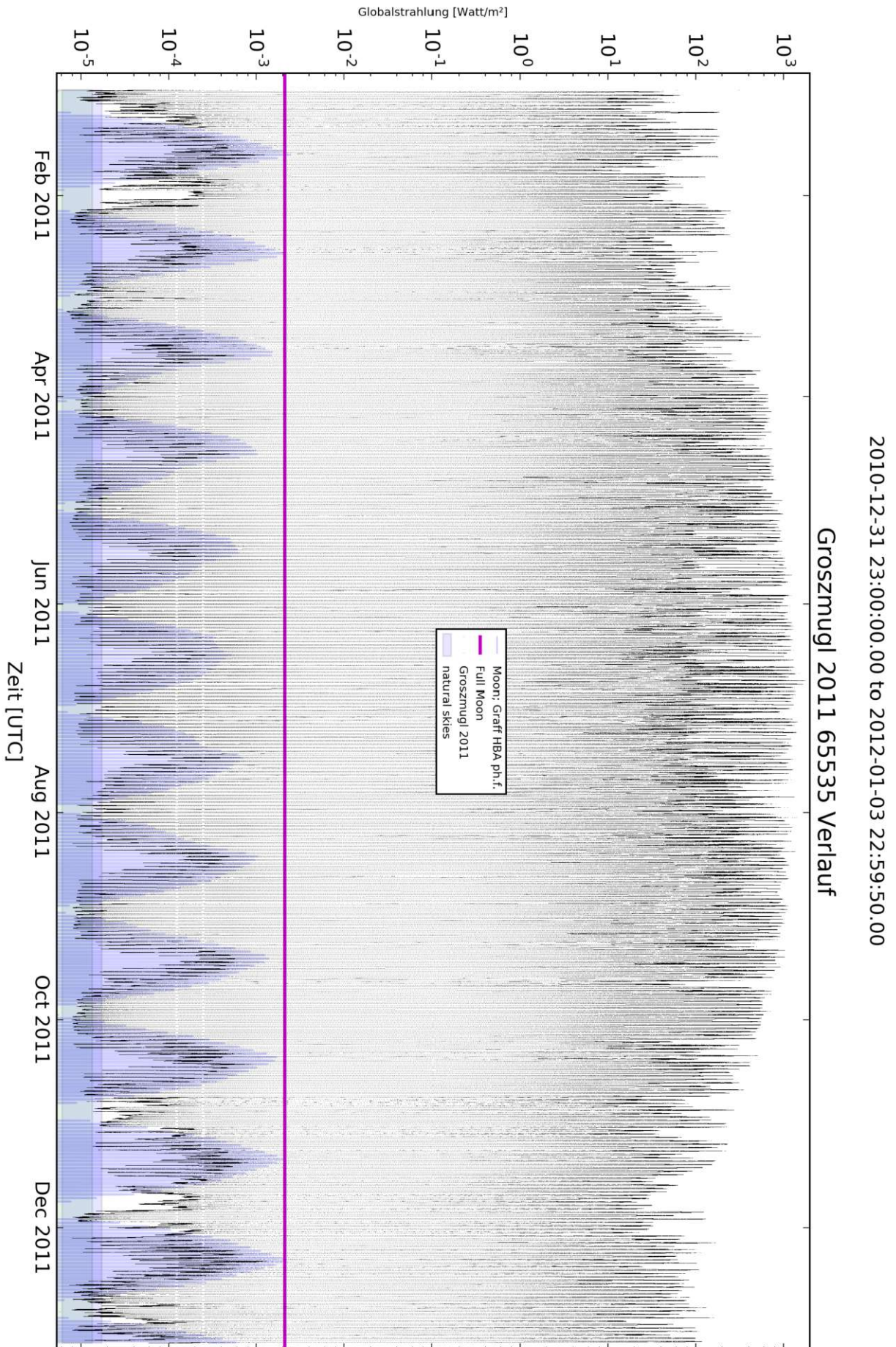


Abb. 60: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Großmugl 2011

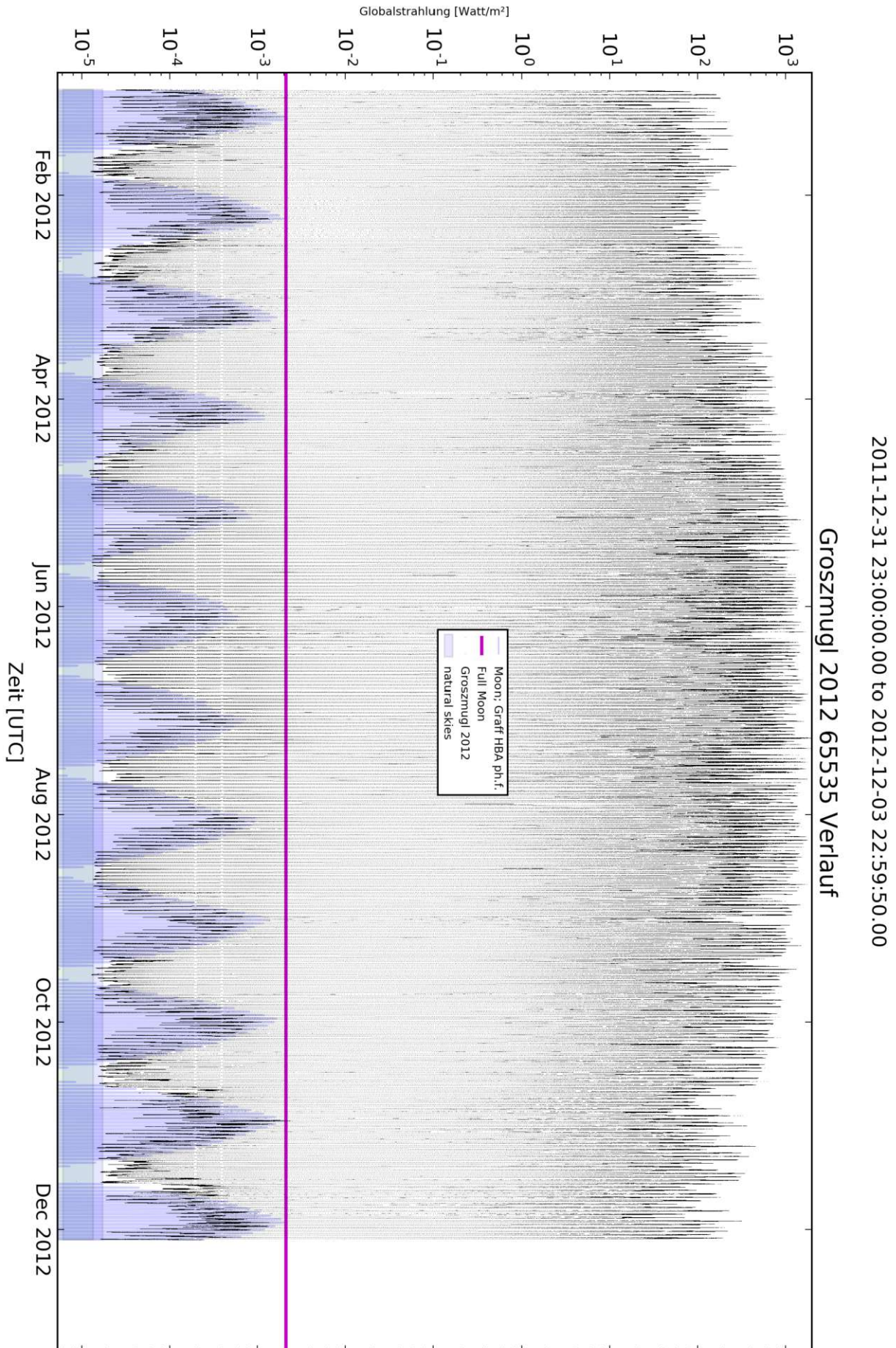
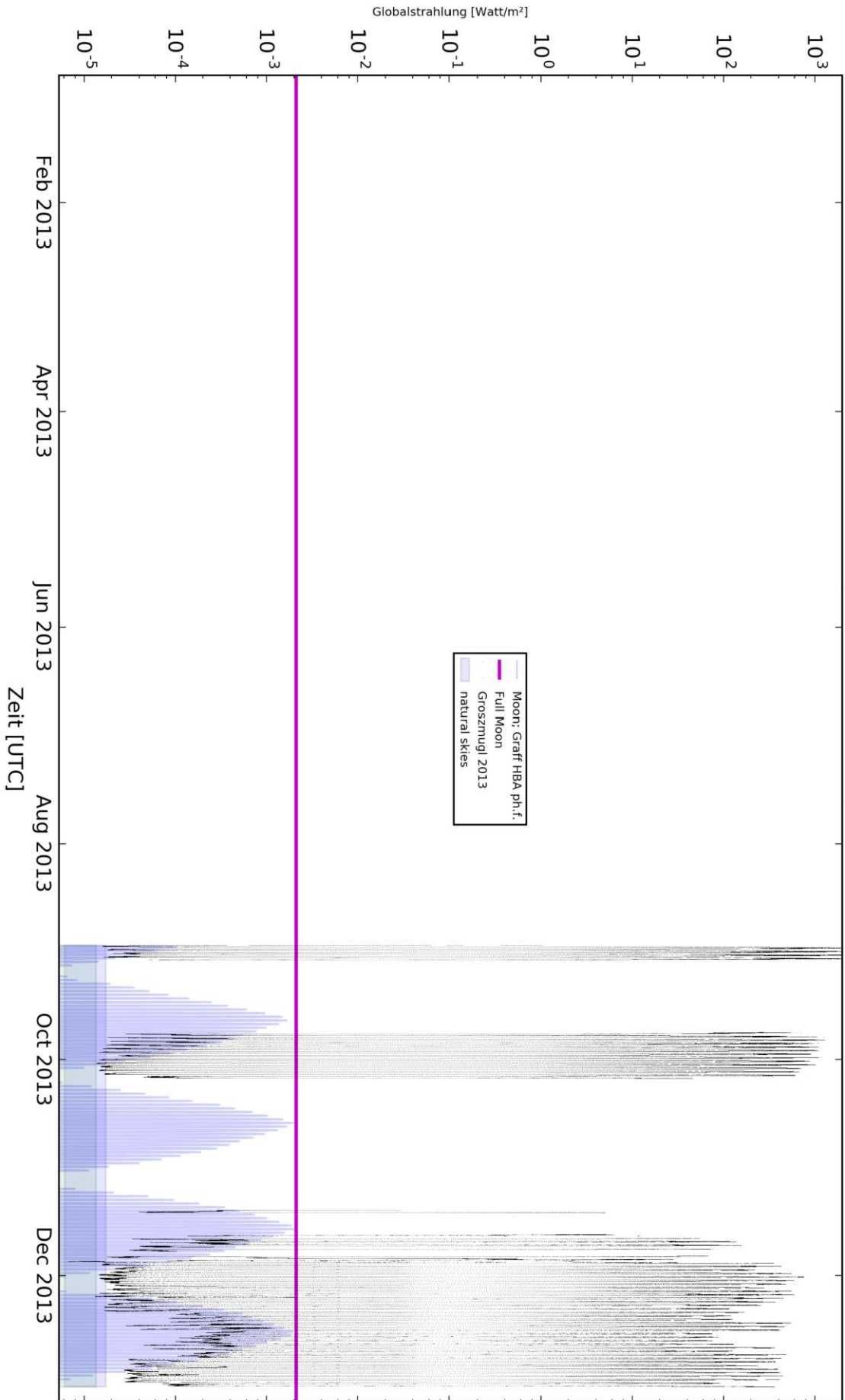


Abb. 61: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Großmugl 2012

2013-08-29 17:51:18.50 to 2014-01-01 13:11:36.40

Groszmugl 2013 Format Lightrouter Verlauf



Günther Wuchterl, S

Abb. 62: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Großmugl 2013

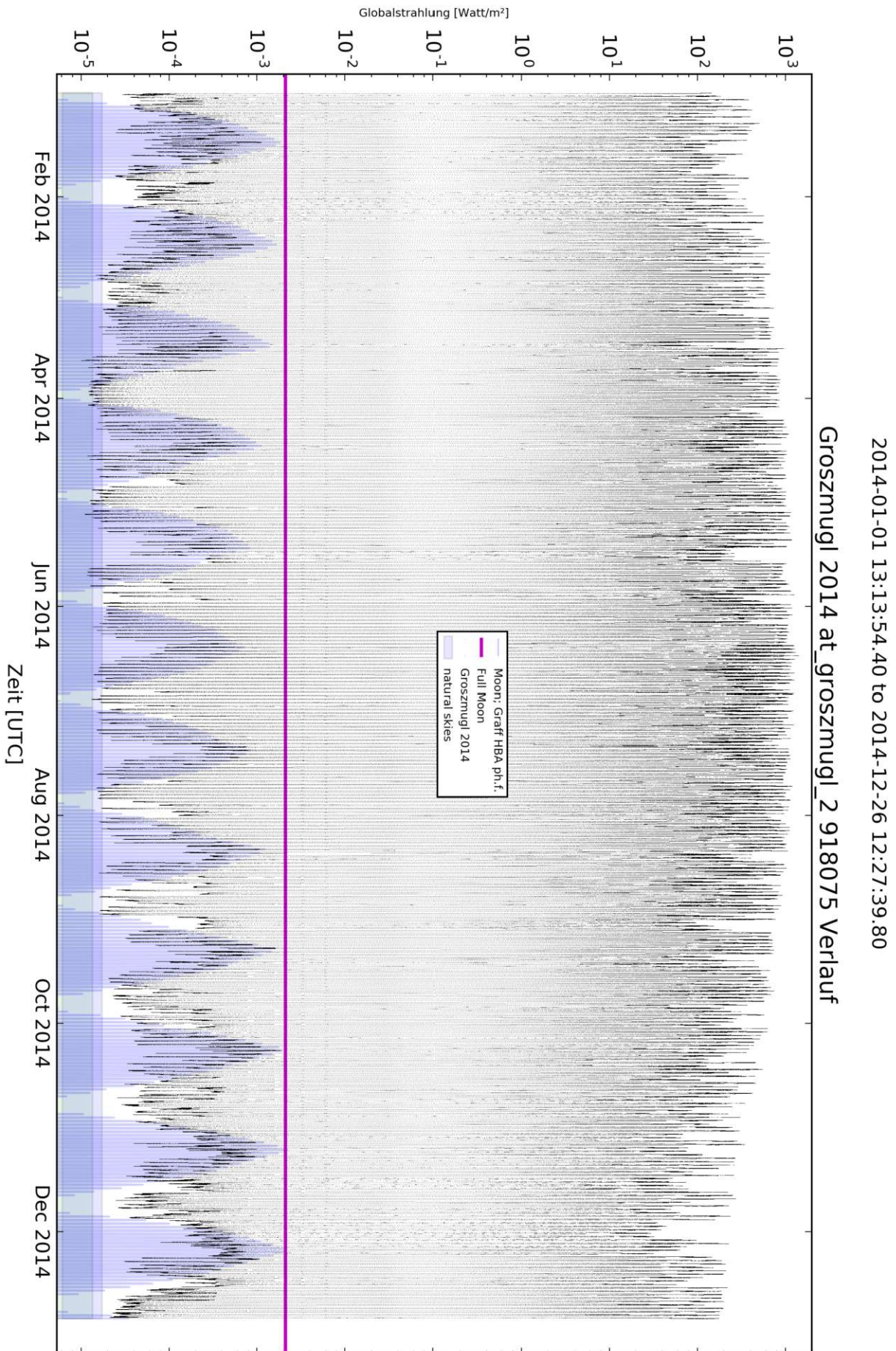


Abb. 63: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Großmugl 2014

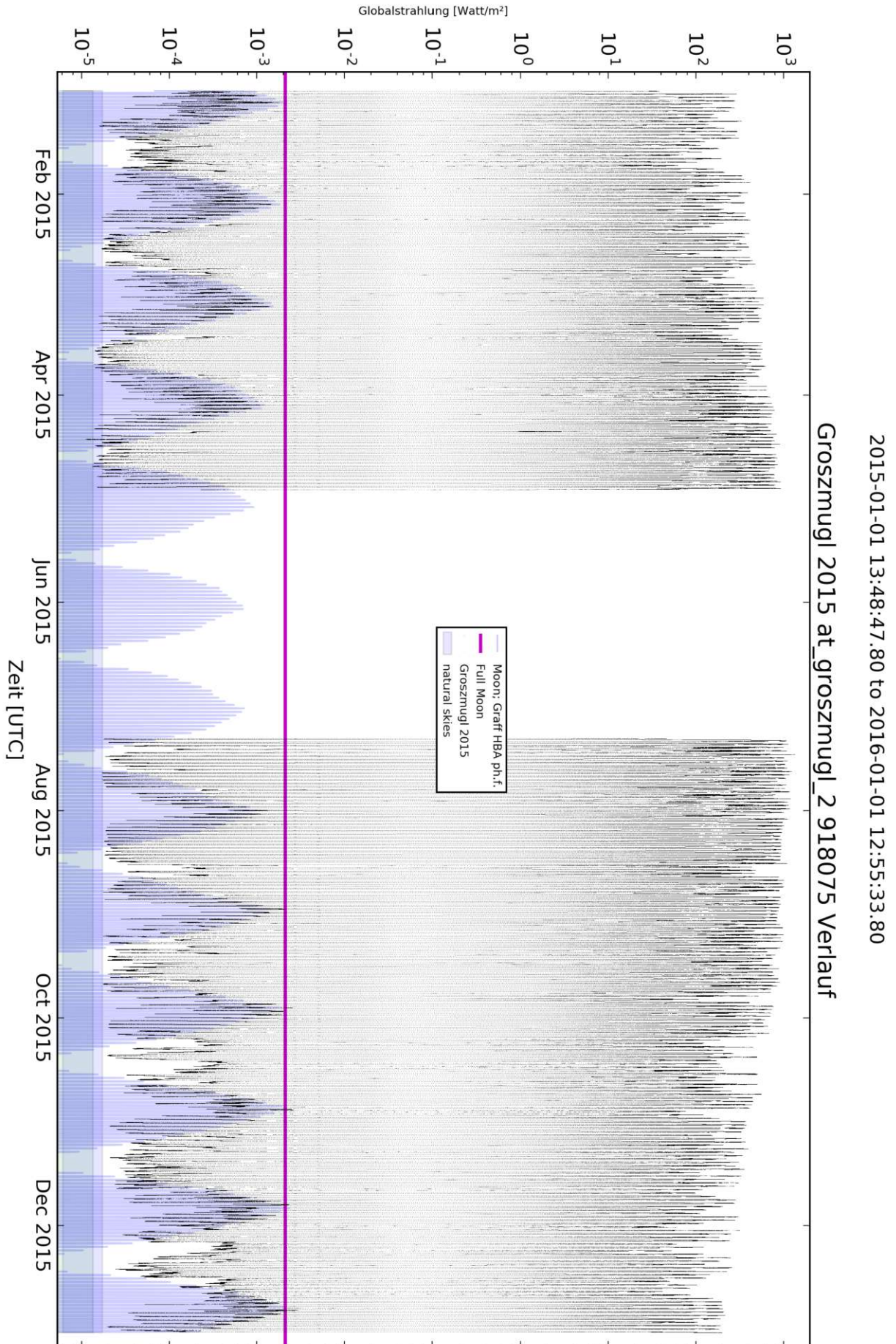


Abb. 64: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Großmugl 2015

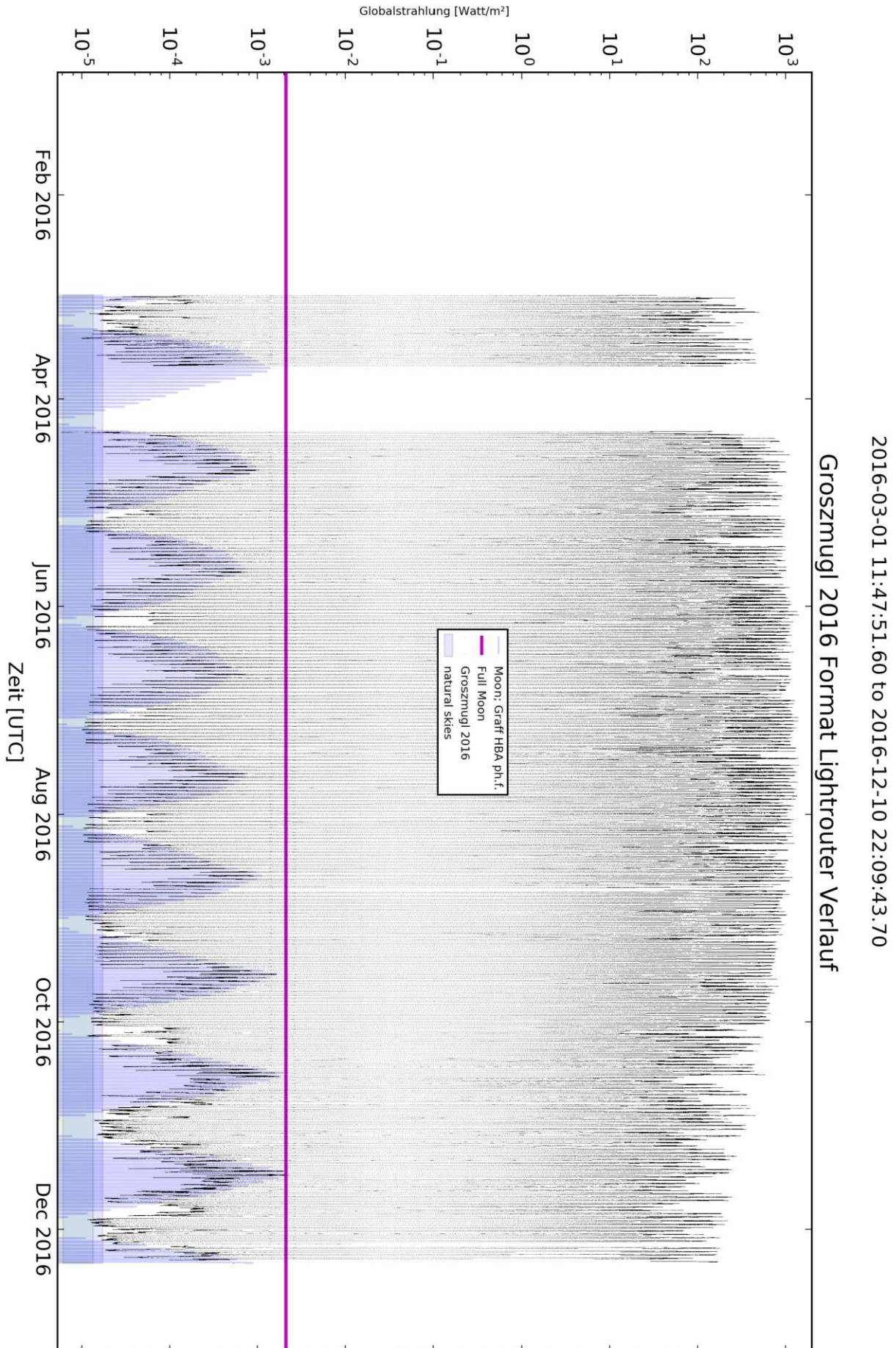


Abb. 65: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Großmugl 2016

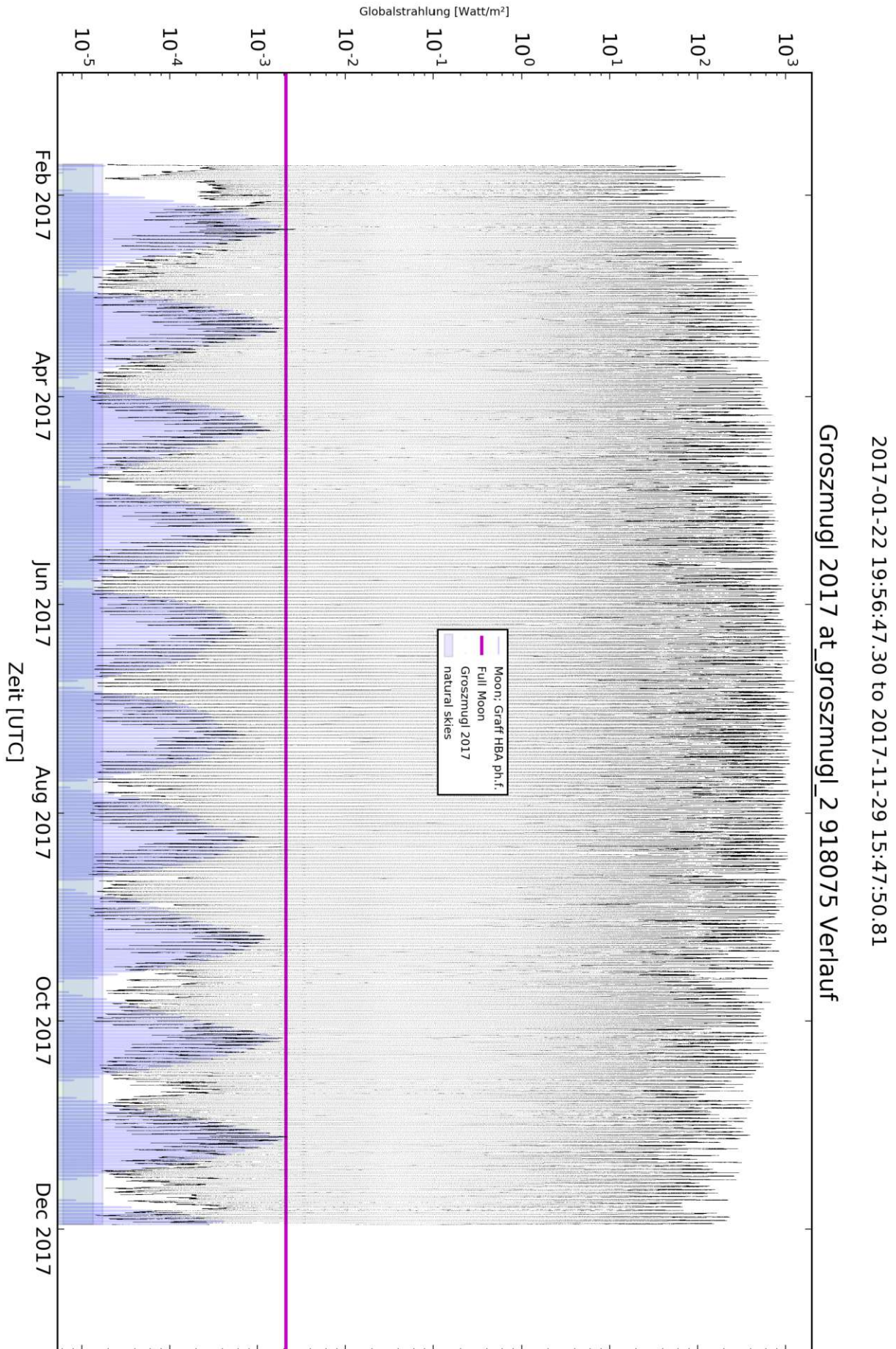


Abb. 66: Zeitlicher Verlauf der Mess-Daten, Großmugl 2017