



Licht über Wien

**Energieaufwand und Quellen
Erstellung eines exemplarischen Lichtkatasters**

Markus Reithofer (1), Günther Wuchterl (2), Andreas Chwatal (3), Thomas Posch (4), Felix Linhardt (1) und Manuela Kopper (1)

- (1) Kuffner-Sternwarte
- (2) Thüringer Landessternwarte Tautenburg, Kuffner-Sternwarte
- (3) Kuffner-Sternwarte und Universität Wien
- (4) Institut für Astronomie der Universität Wien

Inhalt

I. Licht über Wien – Energieaufwand und Quellen. Erstellung eines exemplarischen Lichtkatasters	3
1. Zusammenfassung	3
2. Ergebnisse	3
3. Motivation.....	4
II. Messverfahren	5
1. Messgeräte	5
2. Stationäre Messungen.....	6
3. Mobile Messungen	6
4. Kalibration der Lightmeter	6
III. Durchführung der Messungen	9
1. Messung der Wiener Lichtimmissionen	9
2. Messung nichtöffentlicher Lichtemittenten	10
3. Auswertung der Messdaten.....	10
4. Nachvermessung mit Luxmetern	11
IV. Messergebnisse	13
1. Stationäre Vermessung der Wiener Lichtglocke	13
2. Die zehn hellsten Orte der Wiener Stichprobe: Exemplarische Vermessung nichtöffentlicher Lichtquellen	16
3. Die zehn hellsten Orte eines Zehntels des Wiener Straßennetzes.....	17
V. Resümee	22
1. Schlussfolgerungen	22
2. Empfehlungen	22
3. Ausblick – Ermittlung der „fehlenden“ Lichtquellen von oben	22
4. Zusammenfassung	23
VI. Anhänge	24
1. Übersicht über die Messstrecken	24
2. Messprotokoll – Nachmessungen mit Handluxmeter	24
3. Elektrischer Leistungsaufwand für Licht im Vergleich	25

I. Licht über Wien – Energieaufwand und Quellen. Erstellung eines exemplarischen Lichtkatasters

**Markus Reithofer, Günther Wuchterl, Andreas Chwatal, Thomas Posch, Felix Linhardt und
Manuela Kopper**

Mit wichtigen Beiträgen von

Martin Brodicky (I,M), Katharina Grand (K,V), Manuela Kopper (K,V,L), Sebastian Kremshuber (K,V), Felix Linhardt (K,V,S,IK,M), Maryam Nikbakhti (K,V), Stefan Schober (K,V), Andreas Trawöger (I,S,B), Cornelia Wiesinger (K,V), Andreas Chwatal (WB), Thomas Posch (WB), Markus Reithofer (I,K,L,A,M), Günther Wuchterl (S,IK,PL,M)¹.

1. Zusammenfassung

Die vom Großraum Wien während der Nachtstunden in die Atmosphäre emittierte Licht-Energie wurde mithilfe mehrerer Messstationen ermittelt, wobei nach der gemeinsamen Messung, der Anteil der öffentlichen Beleuchtung von jenem der nichtöffentlichen Lichtquellen anhand der bekannten 23h-Halbschaltung getrennt wurde.

Um einen Hinweis auf die nichtöffentlichen Emittenten zu erhalten, wurde eine Stichprobe von 388,4 km, etwa 13% des Wiener Straßennetzes mit mobilen Messgeräten und einer räumlichen Auflösung von 3 Metern untersucht. In dieser Studie werden die zehn hellsten nichtöffentlichen Lichtemittenten aus der Stichprobe quantitativ präsentiert um eine Abschätzung der typischen Gruppen heller Lichtquellen in Wien zu erhalten.

Die Untersuchung gestattet Rückschlüsse auf die durch Lichtimmission bedingten Möglichkeiten zur Energieeinsparung sowie dem daraus ableitbaren CO₂-Äquivalent. Darüber hinaus zeigen die Beispiele für Gruppen typischer Lichtemittenten, in welchen Bereichen mit Energiesparmaßnahmen angesetzt werden kann.

2. Ergebnisse

- 1. Wien emittiert Licht in eine Ablicht-Glocke, für deren Aufrechterhaltung eine Leistung von zumindest 30 MW eingesetzt wird, was rund 100 000 t CO₂ pro Jahr entspricht.**
- 2. Die hellsten Lichtemittenten fallen klar in nur zwei Gruppen:**
 - a. Geschäftsbeleuchtungen – neun von zehn (Auslagen, Geschäftsschilder, Geschäftsportalbeleuchtungen);**
 - b. Stationsbereiche – einer von zehn.**

¹ K: Kartierung, S: Software, I: Instrumentierung, V: Videoanalyse, L: Vor Ort Luxmeter-Nachmessungen, IK: Instrumentenkalibration, WB: Wissenschaftliche Beratung, A: Abrechnung, M: Messnetz, PL: Projektleitung.

3. Motivation

Die Immission von Licht ist für Großstädte eine ebenso charakteristische Größe wie jene von Lärm und Luftschadstoffen. Im Gegensatz zu den beiden letztgenannten hat Lichtimmission nicht nur rein umweltrelevante Folgen, sondern bewirkt eine unmittelbare Verschwendung von Energie.

Grundsätzlich gilt: jedes Watt an Lichtenergie, das seinen Empfänger (z.B. Fahrbahn, Straßenverkehr, Betrachter 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*. Ablicht ist jener Teil des Lichts, der unkontrolliert in die Umwelt entweicht. Das Ablicht nimmt hier die Stelle des Abfalls ein – also eines merkbaren Nebeneffektes einer Nutzung. Wir unterscheiden es von jenem Teil des *Auflichts*, also des nach oben, über die Horizontale entweichenden Lichts, der direkt, großenteils senkrecht ins Weltall geht, auf Satellitenbildern sichtbar wird und ebenfalls Energie kostet. Die Summe des Ablichtes einer Stadt bildet die sogenannte „Lichtglocke“, siehe Abbildung 1.



Abbildung 1: Lichtglocke Wiens, Anblick von Großmugl/NÖ (ca. 34 km von der Messstation Wien-Zentrum), die Lichtquellen selbst sind durch Hügelketten verdeckt.

Neben dem energierelevanten Niederschlag der Lichtimmission existieren zahlreiche umweltrelevante Effekte, deren Auswirkungen zum Teil noch nicht vollständig erforscht sind. Eine quantitative Erfassung dieser Immission stellt daher auch für das Verständnis der komplexen biologischen und gesundheitlichen Zusammenhänge wertvolles Grundlagenwissen dar.

II. Messverfahren

1. Messgeräte

Für sämtliche Lichtmessungen wurden zwei unterschiedliche Messgeräte eingesetzt:

- Lightmeter² der Firma k2lights des Bautyps Mark 2.3L
- Luxmeter des Typs Voltcraft LX-1108



Abbildung 2: Lightmeter,
<http://lightmeter.astronomy2009.at>



Abbildung 3: Luxmeter Voltcraft LX-1108

Während das Lightmeter ein annähernd bolometrischer Empfänger ist, also alle emittierten Lichtfrequenzen ungefiltert erfassen kann, verfügt das Luxmeter über die gemäß der internationalen Definition für die Beleuchtungsstärke erforderlichen Filter und kann wahlweise mit den für typische Leuchtmittel charakteristischen Spektralverteilungen (Natrium- und Quecksilberdampf, Leuchtstoffröhre) betrieben werden.

Das Lightmeter eignet sich besser für die Bestimmung der über alle Lichtwellenlängen

2 Das „Jahr der Astronomie“-Lightmeter wurde zur effizienten Erfassung aller natürlicher Lichtniveaus im Rahmen des „Jahres der Astronomie 2009“ in einer Kooperation des Vereins Kuffner-Sternwarte und der Thüringer Landessternwarte entwickelt. Es ist rund um den Globus im Einsatz und wird aufgrund seiner herausragenden Qualität u.A. seitens der Europäischen Südsternwarte (ESO) für das Site-Testing der weltweit leistungsfähigsten Teleskope eingesetzt.

Licht über Wien, Freitag, 23. September 2011

abgegebenen Energie (Energiestromdichte), das Luxmeter ermöglicht hingegen eine einfache Messung der Beleuchtungsstärke und Angabe in der lichttechnisch gebräuchlichsten internationalen Maßeinheit [Lux].

Die mobilen Messungen wurden zunächst mit mehreren Lightmetern durchgeführt, deren Messwerte anschließend mit Luxmetern nachgemessen wurden. Die stationären Messungen zur Erfassung der Gesamtimmission über Wien erfolgte ausschließlich mit Lightmetern.

Für die exakte Ortsbestimmung wurden handelsübliche GPS-Empfänger verwendet, für die Videodokumentation der mobilen Messungen kamen High-Definition-Videokameras mit hoher Lichtempfindlichkeit zum Einsatz.

2. Stationäre Messungen

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 (keine Abschattungs- oder Störlichteffekte in unmittelbarer Nachbarschaft) Hausdächern montiert.

Mit diesen Lightmetern wurde mit einer Messfrequenz von 1 Hz über mehrere Monate hinweg bei allen Wetterlagen die aktuelle „Gesamthelligkeit“³ des lokalen Himmels gemessen und für die Weiterverarbeitung gespeichert. Insgesamt liegen per September 2011 bereits mehr als 50 Millionen Einzelmesswerte vor.

3. Mobile Messungen

Für die Erfassung der unmittelbar auf die Straße gerichteten Lichtmenge und die Zuordnung zu den Verursachern wurden zwei Messfahrzeuge ausgestattet. Für die Lichtmessung befanden sich je ein Lightmeter auf dem Dach und den beiden hinteren Seitenscheiben des Messfahrzeugs (herkömmlicher Pkw). Die Messgeräte waren normal zur Fahrtrichtung in einer Linie angeordnet, um eine gleichzeitige Messung der während der Fahrt passierten Lichtquellen nach oben und zu beiden Seiten zu gewährleisten.

Um die Fahrtroute anschließend auszuwerten, befanden sich auf den Dächern der Messfahrzeuge GPS-Empfänger, deren Daten zusammen mit den Messungen der Lightmeter auf handelsüblichen Mobilcomputern gespeichert wurden,

Für die visuelle Dokumentation der Messfahrten wurde eine lichtempfindliche High-Definition-Kamera eingesetzt, deren Videodaten mit einem von den Lightmetern unabhängigen Mobilcomputer aufgezeichnet wurden.

4. Kalibration der Lightmeter

Die eingesetzten Lightmeter sind die derzeit empfindlichsten Messgeräte zur Erfassung der Nachthimmelshelligkeit und wurde zur Messung der horizontalen und vertikalen Bestrahlungsstärke (mobile Geräte) und der Globalstrahlung (stationäre Geräte) kalibriert. In beiden Fällen wird eine Energiestromdichte, in $[W/m^2]$ gemessen. Das ermöglicht einen sehr direkten Zugang zu

3 Physikalisch – Umweltmesstechnisch handelt es sich um die Globalstrahlung ausgedrückt in $[W/m^2]$.

Licht über Wien, Freitag, 23. September 2011

Energieaufwand und damit verbundenem CO₂-Äquivalent.

Ort	Periode	Gefittete Pkt.	Rel. Sigma	Lux → W/m ²	Koeffizienten (hier c_Lux)
Höflein a/D.	Frühjahr	5855	15,00%	108,9	a,b,c,x0,d=1.249e+05,2.752e-02,2.495e-07,-3.201e-03,5.198e-03
Wien Zentrum	Frühjahr	1802	17,30%	106,0	a,b,c,x0,d=1.214e+05,3.952e-02,1.248e-07,-1.833e-02,5.393e-03
Wien Zentrum	Sommer	5138	7,80%	110,9	a,b,c,x0,d=2.501e+05,3.681e-03,3.637e-06,-1.094e-02,4.075e-03
Großmugl	-Immer-	1769	2,89%	110,0	a,b,c,x0,d=1.303e+05,1.696e-02,1.713e-07,-1.232e-03,5.046e-03
Kuffner StW.	Sommer	5791	7,59%	110,8	a,b,c,x0,d=1.957e+05,1.872e-03,1.158e-06,-5.949e-03,5.579e-03

Tabelle 1: Kalibrationsfaktoren der einzelnen Instrumente des Stationsnetzes und ihre relativen Fehler

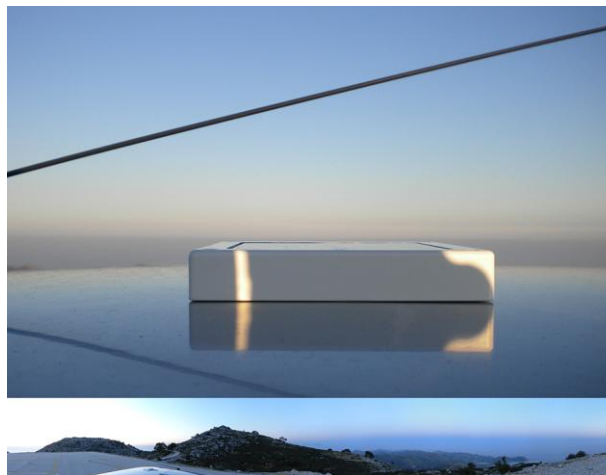


Abbildung 4: Lightmeter während der Kalibration auf der Insel Lastovo/HR

Durch das formulativ bekannte Messverhalten der eingesetzten Lightmeter, mussten diese nur noch unter wolkenlosem Himmel den zeitlichen Verlauf der Himmelselligkeit (Sonne, Mond, Dämmerung) aufzeichnen. Aus dem Vergleich dieser Daten mit einem meteorologischem Globalstrahlungsmodell konnten für jedes Gerät fünf Koeffizienten ermittelt werden, welche die direkte Rückrechnung des Messwertes auf die reale Energiestromdichte in [W/m²] ermöglichen.

Licht über Wien, Freitag, 23. September 2011

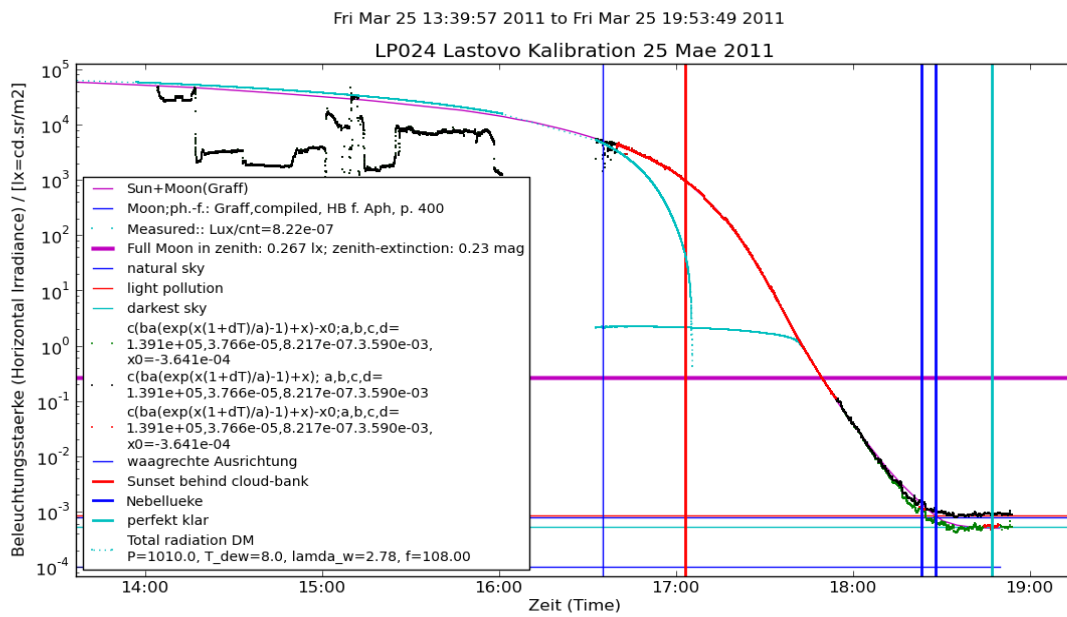


Abbildung 5: Beispiel für eine Kalibrationskurve; Abenddämmerung

Ort	Periode	Geogr. Breite	Geogr. Länge	Höhe	Datenbeginn	Datenende
Höflein a/D.	Frühjahr	48° 21' 5,13" N	16° 15' 49,58" O	180m	13/03/11	30/04/11
Wien Zentrum	Frühjahr	48° 12' 33,35" N	16° 22' 54,32" O	209m	17/03/11	31/05/11
Wien Zentrum	Sommer	48° 12' 33,35" N	16° 22' 54,32" O	209m	09/08/11	03/09/11
Großmugl	Immer-	48° 29' 17,5" N	16° 13' 22,8" O	217m	01/03/11	02/09/11
Kuffner StW.	Sommer	48° 12' 46,13" N	16° 17' 28,75" O	280m	20/07/11	03/09/11

Tabelle 2: Licht-Messnetz Wien: Geographische Positionen der stationären Messgeräte mit Beginn und Ende der verwendeten Datenreihen

III. Durchführung der Messungen

1. Messung der Wiener Lichtimmissionen

Für die Bestimmung der von Wien ausgehenden Lichtimmission wurden drei Zugänge gewählt um etwaige Fehler abschätzen zu können:

1. Es wurde der jeweilige Median der (von den stationären Lightmetern im Verlauf von mehreren Monaten gemessenen) Nachthimmelshelligkeit herangezogen. Mithilfe des Abstands der Messstationen vom Zentrum wurde ein geometrisches Modell der Lichtglocke so angenähert, dass die Messwerte linear miteinander verbunden werden. Dazu wird axiale Symmetrie um das Zentrum angenommen. Es entsteht ein Lichtkegel der die Wiener Lichtglocke annähert. Aus dem Volumen dieses Kegels kann direkt die darin enthaltene Energie berechnet werden;
2. Das gleiche geometrische Modell für den Lichtkegel: Das Volumen des Kegels wird aber sekundlich bestimmt und zeitabhängig analysiert statt anhand der Mediane;
3. Wie 2. aber mit einer unterschiedlichen Konfiguration des Messnetzes zur Bestimmung des Lichtkegels:
 - a. Konfiguration (August 2011):
 1. Wien-Zentrum
 2. Kuffner-Sternwarte
 3. Großmugl
 - b. Konfiguration (März-April 2011, simultan zur Straßen-Lichtkartierung):
 1. Wien-Zentrum
 2. Höflein an der Donau
 3. Großmugl

Für die Unterscheidung des öffentlichen vom nichtöffentlichen Immissionsanteils diente die so genannte Halbschaltung⁴ der öffentlichen Beleuchtung sowie deren von der MA 33 angegebene Anteil an der Gesamtbeleuchtung nach Lichtquellen und Energie. Die zum Zeitpunkt der Halbschaltung (23.00 Uhr) von den Lightmetern gemessene Abnahme der Gesamthelligkeit der Lichtglocke ermöglichte die Berechnung des durch nichtöffentliche Emittenten verursachten Anteils an der Gesamthelligkeit und Lichtleistung (Energieverbrauch).

⁴ Die Halbschaltung bezeichnet das Ausschalten eines der beiden Lichteiner doppelt bestückten Leuchte. Nicht alle Leuchten sind für die Halbschaltung ausgerüstet. Wir gehen von den Informationen seitens der MA 33 aus, nach denen die Summe aller im Rahmen der Halbschaltung ausgeschalteten Lichtquellen einer Leistung von 1,96 MW entspricht.



Abbildung 6: Stationäre Messstationen inner- und außerhalb von Wien

2. Messung nichtöffentlicher Lichtemittenten

Für die exemplarische Vermessung nichtöffentlicher Emittenten waren zwei identisch ausgestattete Messfahrzeuge (Pkw) an elf Tagen im Wiener Straßennetz ab 23.00 Uhr (nach der Halbschaltung der öffentlichen Beleuchtung) unterwegs und haben dabei rund 800 Kilometer messtechnisch erfasst. Aus den 800 km wurde eine 388,4 km Stichprobe (13% des Wiener Straßennetzes) anhand der Stabilität der Wetterverhältnisse, insbesondere der Konstanz des Bedeckungsgrades, ausgewählt um den Einfluss von Veränderungen der Himmelhelligkeit und Lichtstreuung während der Fahrten zu minimieren.

Insgesamt wurden dafür 6 Lightmeter eingesetzt, deren Datenstrom mit einer Frequenz von 10 Hz aufgezeichnet wurde, was in Summe zu mehreren Millionen Einzelmessungen führte. Durch die Korrelation mit den Positionsdaten aus den GPS-Empfängern können die Messdaten auf einer topographischen Karte dargestellt werden.

3. Auswertung der Messdaten

Ausgangspunkt ist die 13% Stichprobe, also die Messwerte von 388,4 km des Wiener Straßennetzes. Mithilfe einer eigens programmierten Software wurden diese Messungen nach besonders hellen Lichtquellen durchsucht, deren Koordinaten ermittelt und die Verursacher anhand des Zeitpunkts der Messung auf der Videoaufzeichnung identifiziert.

Über die Videoanalyse wurde auch ermittelt, ob es sich um öffentliche oder nichtöffentliche Lichtquellen handelt. Anschließend wurden aus einer Stichprobe der Messfahrten die zehn hellsten nichtöffentlichen Quellen mit dem Luxmeter vermessen.

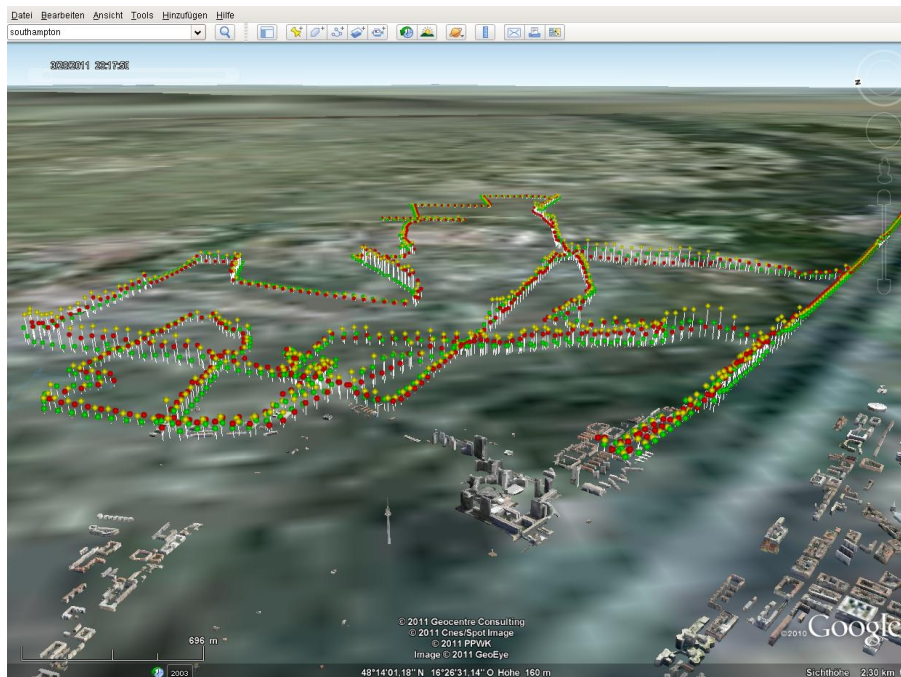


Abbildung 7: Eine der Messfahrten in 1220 Wien; Rote grüne und gelbe Punkte markieren durch ihre Höhe die jeweiligen Werte der drei Lightmeter: in Fahrtrichtung links (rot), rechts (grün), oben (gelb).

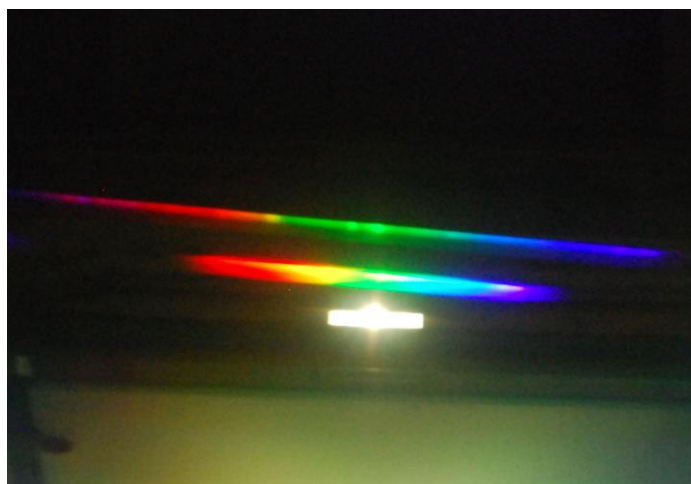
4. Nachvermessung mit Luxmetern

Die für die Nachvermessung ausgewählten Lichtquellen wurden ab 23.00 Uhr (nach der Halbschaltung der öffentlichen Beleuchtung) mit dem Voltcraft-Luxmeter auf mehrere Arten gemessen:

- an der Position, wo zuvor das Messauto mit den Lightmetern vorbeigefahren war
- an der Gehsteigkante mit horizontalem Sensor
- an der Gehsteigkante mit vertikalem Sensor

Der Abstand aller Positionen zur jeweiligen Lichtquelle in [Meter] wurde mit einem Maßband ermittelt. Die Art der Lichtquelle (Leuchtstoff, Halogen, Na-Dampf, Hg-Dampf, etc.) wurde über das mittels eines optischen Gitters erzeugte Spektrum bestimmt (vgl. Abbildung 8). Wo dies möglich war, wurde anschließend auch die Beleuchtungsstärke in dem für die jeweilige Lichtquelle charakteristischen Spektralbereich gemessen.

In einigen Fällen konnte durch die Nähe einer öffentlichen Beleuchtung vor Ort keine eindeutige Trennung zwischen dem Anteil der öffentlichen und der nichtöffentlichen Lichtquellen bei der Nachvermessung mit dem Luxmeter erzielt werden. In zwei Fällen waren zum Zeitpunkt der Nachmessung Teile der Beleuchtung deaktiviert (Beleuchtungskörper innerhalb von Geschäftsauslagen beispielsweise ab Mitternacht teilweise abgeschaltet).



*Abbildung 8: Spektrum einer nichtöffentlichen
Lichtquelle*

IV. Messergebnisse

1. Stationäre Vermessung der Wiener Lichtglocke

Die von außerhalb Wiens sichtbare Lichtglocke enthält eine bestimmte (verschwendete) Energie, welche direkt in der Einheit Megawatt angegeben werden kann und auf entsprechende Einsparpotenziale hinweist. Da die Lightmeter die Helligkeit in $[W/m^2]$ messen, kann diese Energie damit bestimmt werden.

Dazu wurde mit fünf stationären Lightmetern über mehrere Monate hinweg kontinuierlich die am jeweiligen Aufstellungsort gemessene Himmelhelligkeit aufgezeichnet. Für die Extremwerte (hellster Ort im Stadtzentrum und äußerster Rand der Lichtglocke) wurden je ein Lightmeter auf einem Hausdach an der Wiener Ringstraße und im niederösterreichischen Ort Großmugl eingesetzt. Über diese beiden Werte wurde zusammen mit den dazwischen lokalisierten Lightmetern die geometrische Form eines Lichtkegels rechnerisch angenähert. Um eine sichere *Untergrenze* für den Energiegehalt zur berechnen, wurde der Beitrag außerhalb des Messnetzes vernachlässigt und mit der Nordrichtung nach Großmugl ein nach Satellitenbildern und visueller Inspektion als sehr steil zu erwartender Lichtkegelverlauf für die Charakterisierung der Lichtglocke verwendet.

Aus dem Volumen dieses Kegels ergibt sich die darin enthaltene Energie. Das Resultat ist die *Boden-Ablichtleistung* Wiens, also jener Anteil des Energiestroms des Wiener Lichtes, der von der Atmosphäre auf den Boden zurückgestrahlt wird. Die Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse für Ende März - Anfang April 2011 (zeitlich parallel zu den Messfahrten). Dargestellt ist der Verlauf in mondlosen Nächten, um natürliche Beiträge zur Gesamthelligkeit möglichst gering zu halten.

An klaren Tagen ergeben sich Werte um 0,3 MW. Bei anderen Wetterlagen (Bewölkung) sind die Werte um einen Faktor von mehr als 10 höher, also etwa 3 bis 4 MW.

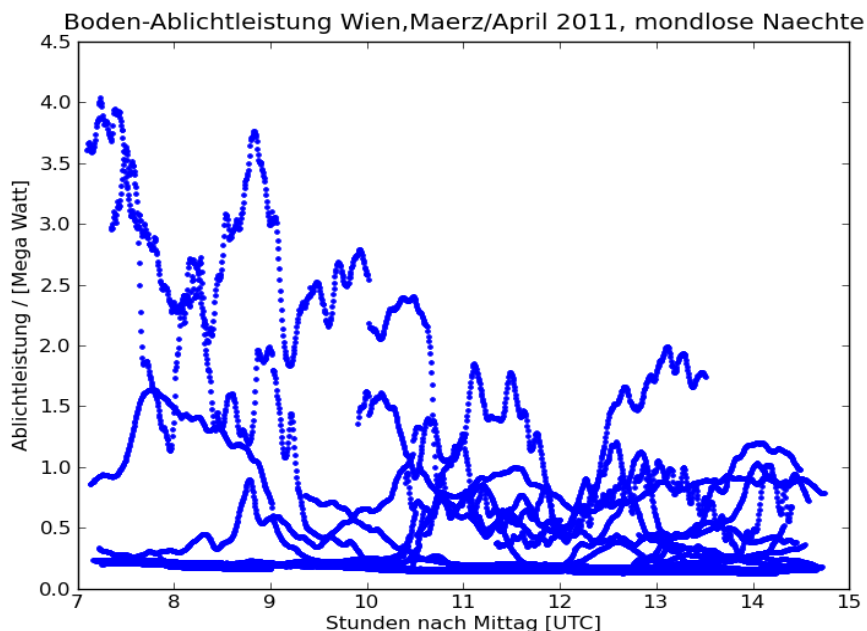


Abbildung 9: Die Boden-Ablichtleistung mehrerer mondloser Nächte übereinander gezeichnet. Auffällig sind die Überhöhungen in Schlechtwetternächten.

Licht über Wien, Freitag, 23. September 2011

Um von der Boden-Ablichtleistung auf die Lichtemission und die damit verbundene Leistung des in die Umwelt abgegeben Lichtes zu schließen und öffentliche und nicht-öffentliche Quellen zu unterscheiden, wird die bekannte Leistung der halbschalteten Lichtpunkte Wiens verwendet (Information durch die MA 33). Diese Halbschaltung erfolgt um 23.00 Uhr gesetzlicher Zeit und wird von allen Stationen des Messnetzes als kleine Stufe täglich um 21.00 Uhr Weltzeit (UTC) erfasst (Abbildung 10).

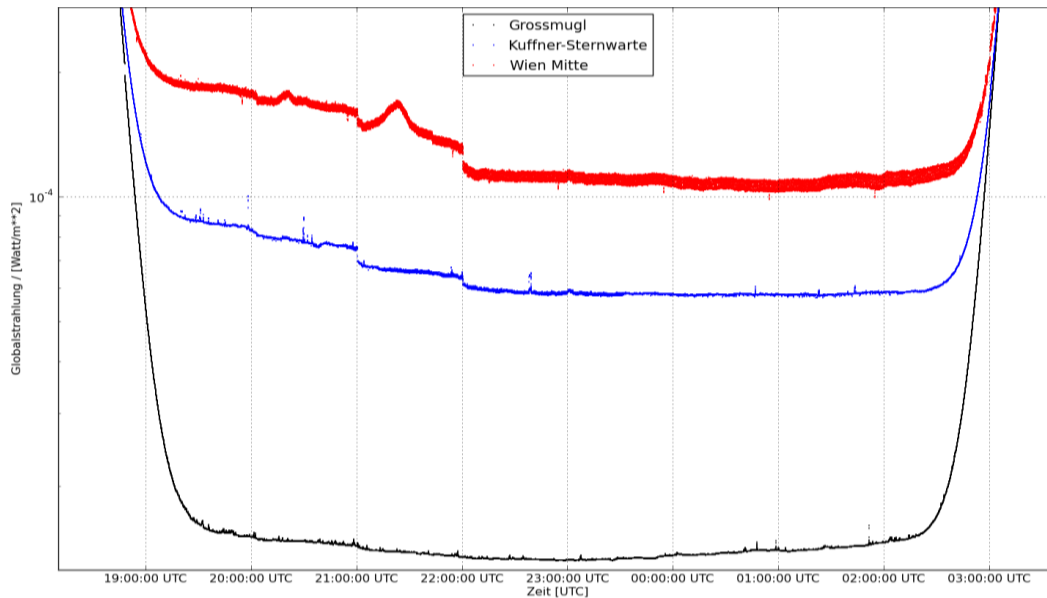


Abbildung 10: Für jede Messstation einzeln: die Nacht vom 28. auf 29. August 2011 (grüne Kurve in Abb. 11)

Aus dem Vergleich der bekannten Leistung von 1,96 MW (14% der öffentlichen Lichtleistung) für die gemessene Halbschaltungs-Stufenhöhe kann die Gesamt-Außenlicht-Leistung Wiens über einen Faktor aus der Boden-Ablichtleistung errechnet werden (Abbildungen 11 und 12).

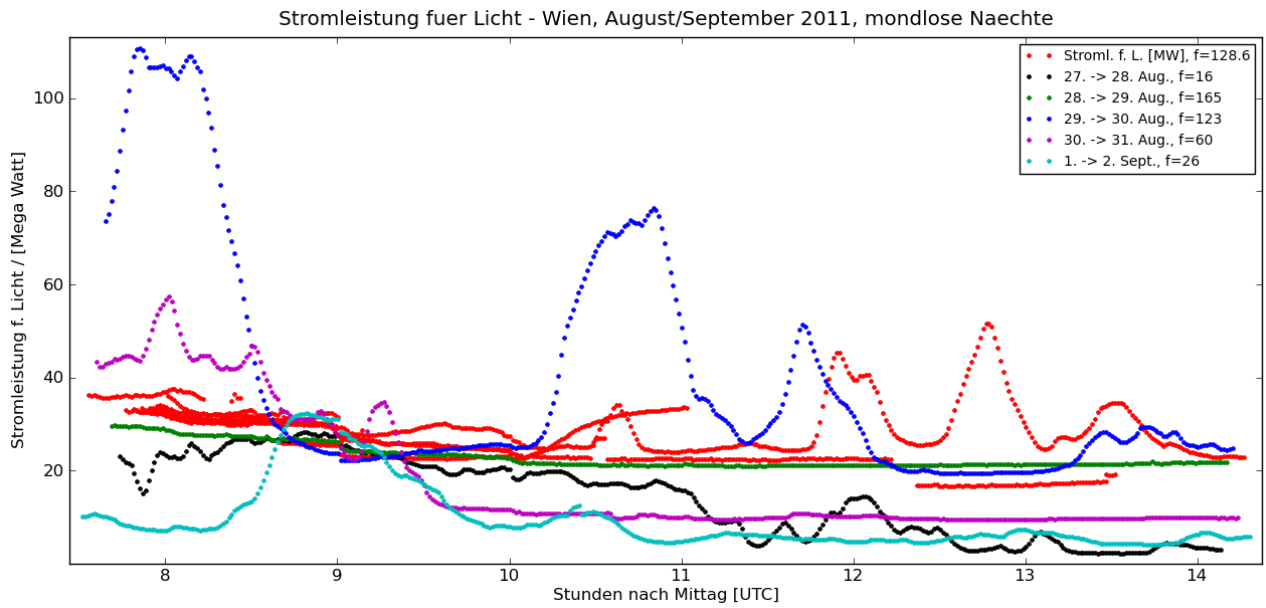


Abbildung 11: Rot: klare Nächte wurden mit dem Median-Außenlichtfaktor korrigiert. Für alle andersfarbigen Kurven wurde der Faktor einzeln bestimmt.

In klaren Nächten (rote und grüne Punkte in Abbildung 11) ergeben sich Werte von typischerweise 30 MW, mit Variationen von 50 bis 20 MW wobei die Minima in der zweiten Nachthälfte erreicht werden.

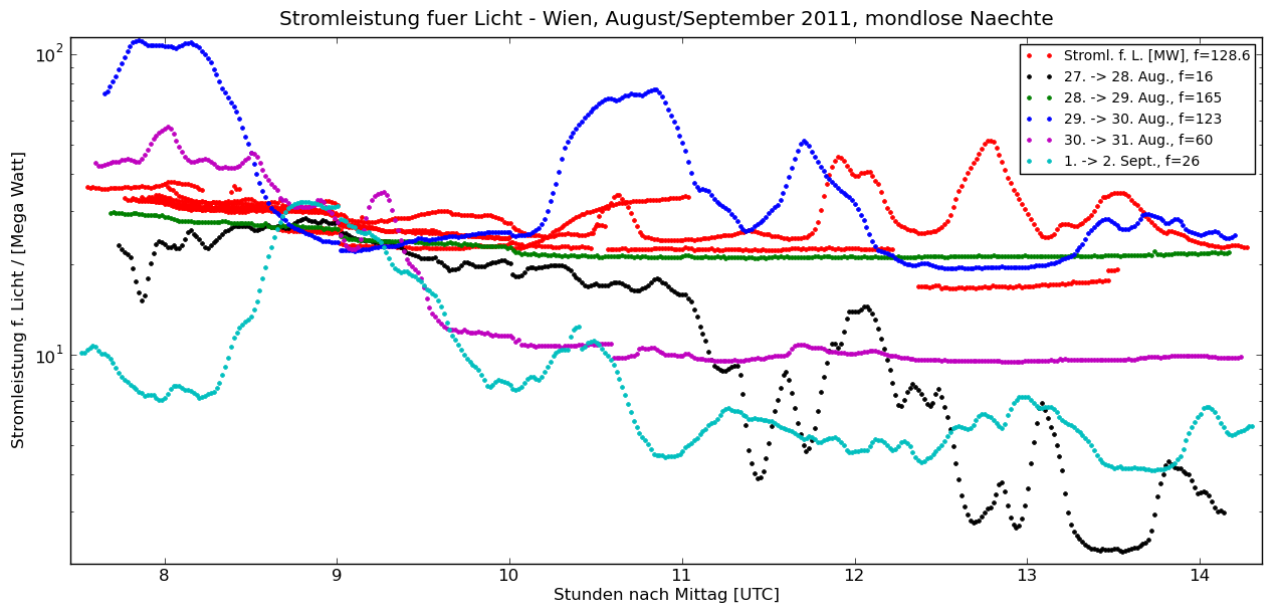


Abbildung 12: Wie Abbildung 11, Ordinate logarithmisch; Gut erkennbar: Der errechnete Korrekturfaktor gilt bei labiler Wetterlage (Schlechtwetter, blaue, schwarze, cyan und magenta Punkte) nur in einem beschränkten Zeitraum um 21.00 Uhr UTC. Bei stabilem Schönwetter (rote und grüne Punkte) wird die nächtliche Entwicklung des Stadtlichts deutlich.

Bei anderen Wetterlagen, mit erhöhter Rückstreuung zum Boden (Dunst, beleuchtete Wolken, in den Abbildungen 11 und 12 blau, schwarz, cyan und magenta markiert), ergeben sich wesentlich höhere Werte bis zu über 100 MW. Der errechnete Faktor zur Bestimmung der Gesamt-

Licht über Wien, Freitag, 23. September 2011

Außenlichtleistung besitzt jedoch nur zu den exakten Wolkenverhältnissen um 21.00 Uhr (UTC) Gültigkeit; auf Veränderungen der Wetterlage im Verlauf der Nacht wird nicht Rücksicht genommen, weswegen die Kurven vor und nach 21.00 Uhr (UTC) auseinander streben. Die Interpretation dieser „Schlechtwetter“-Werte sollte jedoch zurückgestellt werden bis eine stabile Hochnebel-Lage eine detaillierte Untersuchung zulässt. Wahrscheinlich handelt es sich um eine wesentlich vollständigere Rückreflexion des Ablichtes von gerichteten Quellen und daher ein kompletteres Licht-Inventar. In Frage kommen aber auch lokale Verstärkungen, etwa angeleuchtete Wolken nahe bei den oder „Nebelschwaden“ um die Messgeräte.

Ein Vergleich der August-Werte für die mit der Basis-Netzkonfiguration (Zentrum, Kuffner-Sternwarte, Großmugl) gemessene Boden-Ablichtleistung bestätigt die Frühjahrs-Ergebnisse (Zentrum, Höflein, Großmugl) (zum Vergleich Abbildungen 13 und 14).

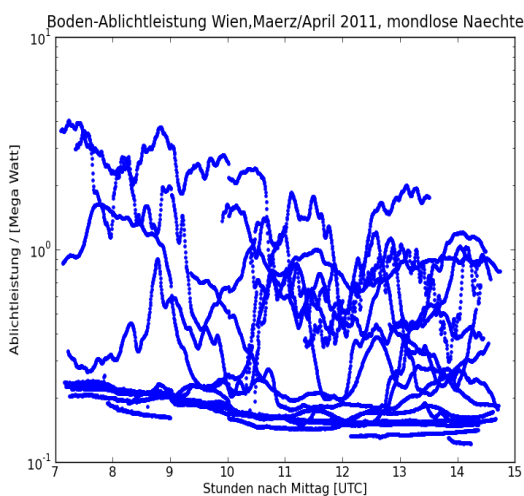


Abbildung 14: Boden-Ablichtleistung März/April 2011

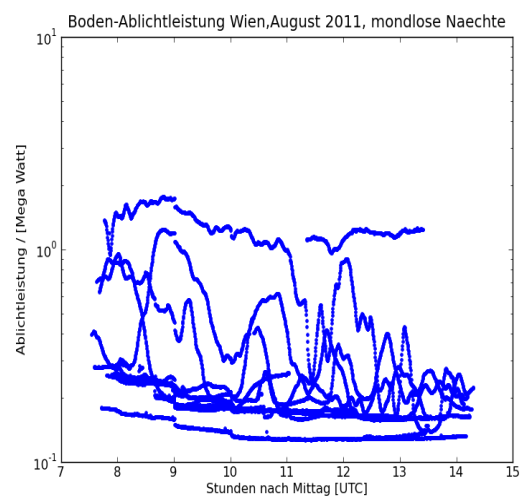


Abbildung 13: Boden-Ablichtleistung August 2011

Gegenwärtig sollte man deshalb von den Klar-Himmels-Werten von mindestens 30 MW als Untergrenze für die Wiener Außen-Lichtleistung ausgehen.

2. Die zehn hellsten Orte der Wiener Stichprobe: Exemplarische Vermessung nichtöffentlicher Lichtquellen

388,40 km des Wiener Straßennetzes wurde mit einer Frequenz von 10 Hz, entsprechend einer räumlichen Auflösung von 3 Metern vermessen. Die Bestrahlungsstärke wurde nach lokalen Spitzen durchsucht und nach Spitzenwerten geordnet. Anhand der Videodaten wurden mit der öffentlichen Straßenbeleuchtung assoziierte Maxima sowie Maxima in Unterführungen und überdachten Bereichen gestrichen. Die verbleibenden nichtöffentlichen Spitzen wurden zur Vor-Ort Kontrolle und Bilddokumentation sowie zur Nachmessung mit Handluxmetern gereiht. Nach Verifikation der Quellen und Reihung nach der Beleuchtungsstärke ergibt sich die Liste der nicht-öffentlich erleuchteten hellsten Orte einer 13% Stichprobe Wiens, Tabelle 3.

Platz	Adresse	Messposition Abstand [m]	[W/m ²]	Maximalwert direkt - Autoposition [lx]
1	Liliengasse (Hartmann, Optiker)	3,0	0,643	72
2	Neulerchenfelderstraße/Gürtel (Babylon Mode)	3,1	0,551	55
3	Rotenturmstraße 22 (T-Mobile)	8,5	0,691	55
4	Straßenbahnstation "Dr. Karl Renner Ring"	4,5	0,560	53
5	Rotenturmstraße 12 (Bise, Boutique)	8,0	0,448	53
6	Lichtensteg/Rotenturmstraße (Kent-Bekleidung)	3,5	0,639	53
7	Alserstraße 11 (Hassler Teppichböden)	4,1	0,557	46
8	Wagramerstraße 100 (Copyshop)	4,7	0,477	43
9	Wattgasse/Wilhelminenstraße (Zielpunkt)	3,8	0,430	43
10	Lugeck 7 (Zanoni, Eissalon)	8,5	0,507	27

Tabelle 3: Auszug aus den Daten der Nachvermessungen (Details siehe unten)

3. Die zehn hellsten Orte eines Zehntels des Wiener Straßennetzes

Gereiht wurden die Orte, deren Beleuchtung zum überwiegenden Teil nicht durch die öffentliche Straßenbeleuchtung bedingt war und die weder überdacht waren (unter Brücken oder in Unterführungen) noch auf Stadtautobahnen oder Schnellstraßen lagen (Nachmessung aus Sicherheitsgründen nicht durchgeführt), nach der gemessenen Beleuchtungsstärke in [Lux] an der Stelle des vorbeifahrenden Messwagens.

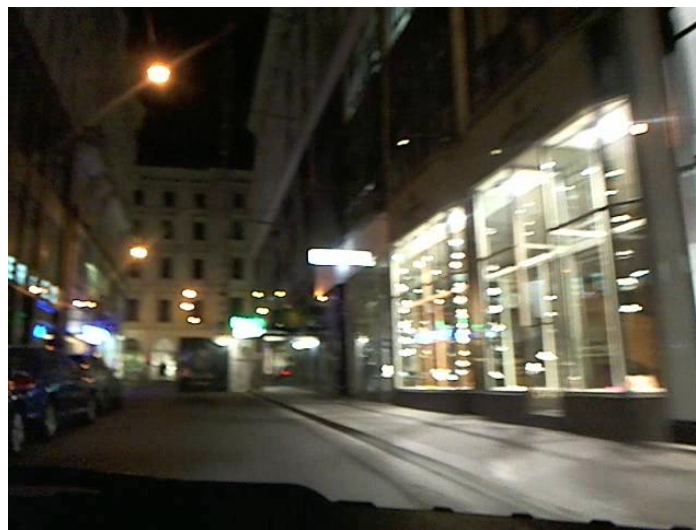
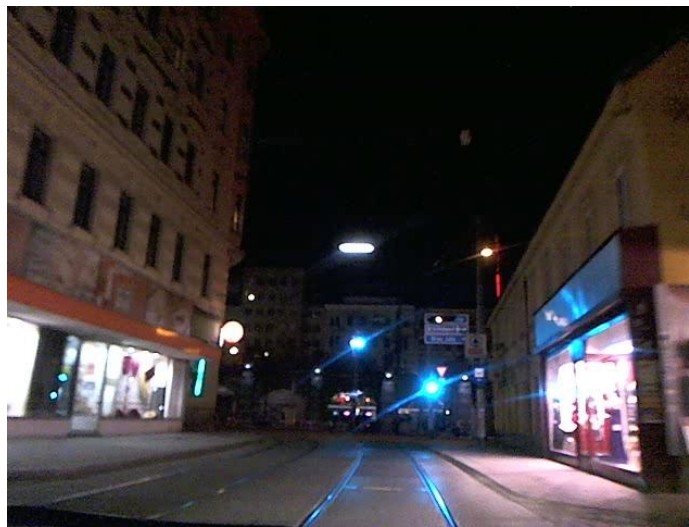
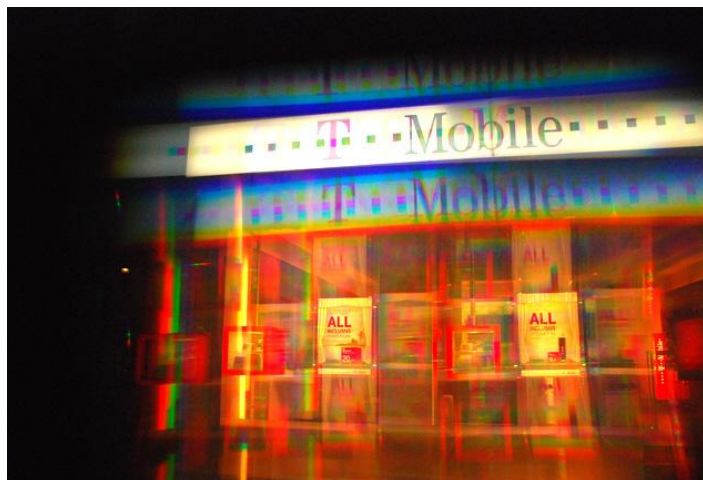


Abbildung 15: 1010, Liliengasse; zahlreiche Halogenspots, die mehrheitlich in Richtung Straße gerichtet sind



*Abbildung 16: 1160, Neulerchenfelderstraße/Gürtel;
mehrere Quecksilberdampf-Lampen mit hoher
Leistung, leicht in Richtung Straße geneigt*



*Abbildung 17: 1010, Rotenturmstraße 22 (Beispiel für
eine Spektralaufnahme);
Auslagenbeleuchtung mit einer Mischung aus
Leuchtstoffröhren und Halogenspots, teilweise direkt
in Richtung Straße leuchtend*



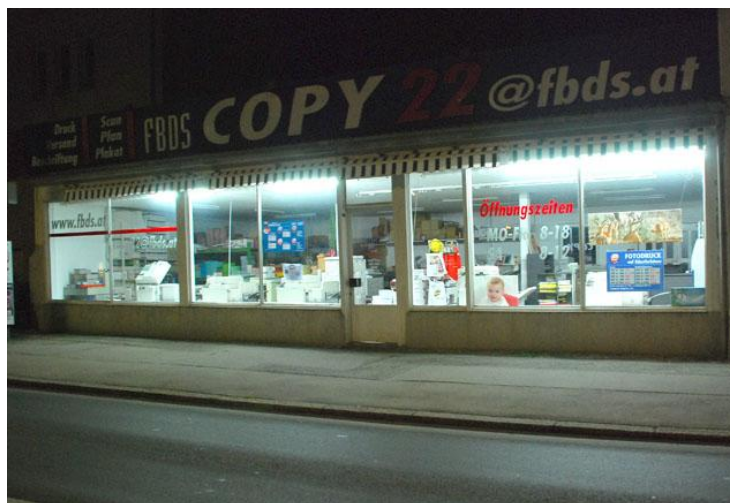
*Abbildung 18: 1010, Dr. Karl Renner Ring,
Straßenbahnhaltestelle;
durchgängige Zeile aus Leuchtstoffröhren mit geringer
Abdeckung Richtung Himmel*



*Abbildung 19: 1010, Rotenturmstraße 12;
Auslagenbeleuchtung durch Quecksilberdampf lampen
mit sehr hoher Leistung*



*Abbildung 20: 1010, Lichtensteg/Rotenturmstraße;
Auslagenbeleuchtung mit zahlreichen
Halogenspots, die teilweise Richtung Straße geneigt
sind.*



*Abbildung 21: 1210, Wagramerstraße 100;
Geschäftsinnenbeleuchtung und Auslagenbeleuchtung
mit bis zu acht Leuchtstoffröhren*



*Abbildung 22: 1080, Alserstraße 11;
Portal- und Fassadenbeleuchtung mit
leistungsstarken Quecksilberdampflampen*



*Abbildung 23: 1010, Lugeck 7;
Geschäftsinnenbeleuchtung, Auslagenbeleuchtung und
Fassadenbeleuchtung. Primär zahlreiche Halogenspots,
durchgängige Zeile mit Leuchtstoffröhren (Abschattung
nach oben)*

V. Resümee

1. Schlussfolgerungen

1. Das Licht-Energie-Volumen Wiens beträgt mindestens dreißig Megawatt. Das entspricht mehr als 2% des Wiener Elektrizitätsverbrauchs und rund 100 000 t CO₂ pro Jahr.
2. Zwei Drittel der Wiener Lichtglocke werden durch nichtöffentliche Lichtquellen verursacht, ein Drittel durch öffentliche.
3. Die hellsten Lichtquellen der 400 km Stichprobe des Wiener Straßennetzes sind zu zwei Dritteln der öffentlichen Straßenbeleuchtung zuzuordnen, zu einem Drittel sind sie nicht öffentlich.
4. Die zehn hellsten nichtöffentlichen Lichtquellen teilen sich in folgende zwei Gruppen auf:
 - Geschäftsbeleuchtungen (neun)
 - Stationsbereiche (einer)
5. Mögliche Gründe für die unterschiedlichen nicht-öffentlichen Anteile an der Wiener Lichtglocke und an den Wiener Lichtquellen sind:
 - Die öffentliche Straßenbeleuchtung Wiens ist effizient und trägt daher bei den bodennahen Straßenvermessungen wesentlich mehr bei als zur Lichtglocke über der Stadt;
 - Die Autobahnen könnten zur Lichtglocke beitragen, aber sicher nicht zur aktuellen Straßen-Stichprobe, da sie aus Sicherheitsgründen, die die Vor-Ort-Nachmessungen betreffen, davon ausgeschlossen wurden. Autobahnen tragen aber nur einen relativ geringen Kilometeranteil zum Wiener Gesamtstraßennetz bei;
 - Ein wesentlicher Teil des Lichtes könnte direkt in die Glocke gestrahlt werden und wäre dann nicht mit den Messwägen erfassbar. In Frage kämen Hochhausfenster, Fassadenstrahler und ähnliche Quellen die zum überwiegenden Teil direkt nach oben strahlen.

2. Empfehlungen

1. Ausweitung der Halbschaltung um zumindest einige Stunden lang zu einer Halbierung des Ablichts nach 22.00 Uhr (MEZ) zu gelangen (Ruhestunden analog zum Lärmschutz),
2. Geschäfts- und Werbebeleuchtungen nur zu Geschäftszeiten und
3. Bewirtschaftung der gewerblichen Lichtabgabe in den öffentlichen Raum um die Werbe-Lichtspirale zu bremsen.

3. Ausblick – Ermittlung der „fehlenden“ Lichtquellen von oben

Die öffentlichen Quellen dominieren die Straßenvermessung, aber nur ein Drittel der Wiener Lichtglocke kann ihnen zugeordnet werden. Es ist deshalb davon auszugehen dass weitere wichtige Quellengruppen existieren, die überwiegend nach oben strahlen und bei Straßenmessungen, also „von unten“ nicht erfasst werden können. Eine Vermessung der Wiener Lichtquellen von oben

Licht über Wien, Freitag, 23. September 2011

würde deshalb deren Verteilung vervollständigen. Gleichzeitig würde ein erhebliches Energiespar-Potential im wahrsten Sinne des Wortes lokalisiert. Die entsprechenden Einsparungen betreffen dann Licht dessen Wirksamkeit am Boden so gering ist, dass es überraschenderweise in der aktuellen Studie gar nicht relevant wurde.

4. Zusammenfassung

Wien emittiert Licht in eine Ablicht-Glocke, für deren Aufrechterhaltung eine Leistung von zumindest 30 MW eingesetzt wird.

Unter den zehn hellsten Lichtquellen von rund 400 km des Wiener Straßennetzes befinden sich – nach Aussortierung der öffentlichen Straßenbeleuchtung – neun Schaufensterbeleuchtungen und eine Straßenbahnstation.

VI. Anhänge

1. Übersicht über die Messstrecken

Datum	Auto	km	Ungefähre Wegbeschreibung
25./26.03.	Auto 2	85,00	Ring, Donaukanal, Donauuferautobahn & Donaubrücken, Tangente, Verteilerkreis Favoriten, Schönbrunn
28./29.03.	Auto 1	72,90	22. Bezirk: Wagramerstraße, Industriestraße, Telefonweg-Siedlungen, Thujagasse, Aspernstraße
29./30.03.	Auto 1	47,50	16. & 17. Bezirk: Flötzersteig, Ottakringerstraße, Neulärchenfelderstraße, Brunnenmarkt, Höhenstraße
29./30.03.	Auto 2	80,00	18. & 19. Bezirk: Gersthoferstraße, Gymnasiumstraße, Döblinger Hauptstraße, Heiligenstätter Straße
30./31.03.	Auto 1	43,00	1., 8. & 9. Bezirk: Franz-Josefs-Kai, Singerstraße, Wollzeile, Freyung, Alser Straße, Julius-Tandler-Platz
30./31.03.	Auto 2	60,00	14. Bezirk: Hadikgasse, Wiener Straße, Hadersdorf-Weidlingau, Hütteldorfer Straße

Summe: 388,40

Tabelle 4: Übersicht der Messfahrten mit den jeweils gefahrenen Kilometern

2. Messprotokoll – Nachmessungen mit Handluxmeter

Adresse	Quelle	Art der Quelle (Leuchtmittel)	Messposition Abstand [m]	[W/m ²]	Maximalwert direkt - Auto position [lx]	Breitband horizontal [lx]	Breitband vertikal [lx]	spezifisch horizontal [lx]	spezifisch vertikal [lx]	spezifisch direkt [lx]
Liliengasse (Hartmann, Optiker)	Geschäftsbeleuchtung	Halogen	3,0	0,643	72	114,8	110,4			
Neulerchenfelderstraße/Gürtel (Babylon Braut- und Abendmode)	Geschäftsbeleuchtung	Hg	3,1	0,551	55	76,7	114,9	80	119,4	57,2
Rotenturmstraße 22 (T-Mobile)	Geschäftsbeleuchtung. Störquelle öffentl. Na	Ne + Halogen	8,5	0,691	55	51,6	34			
Straßenbahnstation "Dr. Karl Renner Ring"	durchgängige Neonbalken. Störquelle öffentl. Hg	Ne	4,5	0,560	53,2	103	43	97	40	49,2
Rotenturmstraße 12 (Bise, Boutique)	Geschäftsbeleuchtung. Störquelle öffentl. Hg	Hg	8,0	0,448	53	34,5	21	38,2	21,7	56
Lichtensteg/Rotenturmstraße (Kent-Bekleidung)	Geschäftsbeleuchtung	Halogen	3,5	0,639	52,5	49,6	83,5			
Alserstraße 11 (Hassler Teppichböden)	Geschäftsbeleuchtung	Halogen, wenig Ne	4,1	0,557	46,3	51,8	50			
Wagramerstraße 100 (Copyshop)	Geschäftsbeleuchtung	Ne (50% abgeschaltet)	4,7	0,477	43,2	32,3	41	39,95	37,4	
Wattgasse/Wilhelminenstraße (Zielpunkt)	Eingangsbeleuchtung	Ne	3,8	0,430	42,7	28,7	26	26,3	24,7	38,4
Lugeck 7 (Zanoni, Eissalon)	Geschäftsbeleuchtung über Eingang. Störquelle öffentl. Na	Hg	8,5	0,507	27	157	125	163	128	Mix aus Na und Hg

Tabelle 5: Ergebnisse der Handluxmetermessungen

3. Elektrischer Leistungsaufwand für Licht im Vergleich

Von Thomas Posch, Institut für Astronomie

Abschätzung der Größenordnung der elektrischen Leistung, die in Wien insgesamt in die Freisetzung von Licht fließt

Das Ziel dieses Anhangs ist es, mit Hilfe von Daten, die von unserer Studie unabhängig sind, die von uns ermittelte Größenordnung der elektrischen Leistung, die in Wien insgesamt in die Freisetzung von Licht fließt, plausibel abzuschätzen. D.h. es soll gezeigt werden, dass die von uns ermittelten Werte mit dem gegenwärtigen Wissensstand über den Wiener Gesamtstromverbrauch, sowie mit Satellitenmessungen der ins Weltall direkt abgestrahlten Lichtleistung konsistent sind.

- (1) *Vergleichende Betrachtung mit der effektiven mittleren Strom-Anschlussleistung von Wien* (rd. **926 MW**; ermittelt aus

www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energieplanung/zahlen/energieverbrauch.html,

und zwar aus der Angabe für 2009: 8 113 **GWh** Jahresstromverbrauch an elektrischer Energie, das Jahr hat 8 760 Stunden)

Größenordnungsmäßig werden in den Industriestaaten 1-2% der elektrischen Energie in öffentliche Außenbeleuchtung, 10% in Beleuchtung überhaupt (innen + außen, privat + öffentlich) investiert. Nur in Entwicklungsländern ist der Anteil der elektrischen Energie, welcher in Beleuchtung fließt, wesentlich höher.

Die MA 33 gibt an, etwa 14 MW in die öffentliche Beleuchtung zu „investieren“.

(Quelle: <http://www.wien.gv.at/verkehr/licht/beleuchtung/oeffentlich/zahlen.html>)

14 MW sind rund 1,5% von 926 MW, das ist also sehr plausibel.

Wir nehmen also an, dass in Wien rund 1,5% der verfügbaren elektrischen Energie in öffentliche Außenbeleuchtung fließen.

Abschätzen wollen wir nun rechnerisch-statistisch, wie viel Stromleistung insgesamt in künstliche Beleuchtung in Wien (also inklusive der nichtöffentlichen Beleuchtung) fließt und wie sich dies mit unseren Messwerten deckt.

Wenn 10% der elektrischen Energie in Beleuchtung fließen, ist dies 10% dividiert durch 1,5% mal mehr als die 14 MW für die öffentliche Beleuchtung. Dies sind dann also hochgerechnet: $6,66 \text{ mal } 14 \text{ MW} = \underline{93,3 \text{ MW}}$ (Beleuchtung innen + außen, privat + öffentlich).

Wie viel von dieser Gesamt-Stromleistung für öffentliche plus private Beleuchtung wird im zeitlichen Mittel in den Außenraum dringen? Hier ist wirklich nur eine grobe Abschätzung möglich: Wir nehmen an, das mindestens 50% der künstlichen Beleuchtung ganz auf Innenräume beschränkt bleibt. Dann kommen wir auf $93,3 \text{ MW} \text{ geteilt durch } 2 = \underline{46,7 \text{ MW}}$ als maximale „außen-relevante“ Stromleistung für Licht in Wien. Dies ist konsistent mit den mittleren Werten, die in dieser Studie aus Messungen eruiert wurden (20-50 MW, typischerweise 30 MW).

- (2) *Vergleich mit der „Lunarkonstante“*

Analog zur Solarkonstante kann man eine Lunarkonstante definieren: Wie viel W/m^2 erreichen die Erde bei Vollmond, wenn dieser im Zenit steht?

Dieser Wert beträgt $\underline{0,0026 \text{ W/m}^2}$ und entspricht $\underline{0,25 \text{ lux}}$ als horizontale Beleuchtungsstärke.

Setzen wir die oben abgeschätzte maximale „außen-relevante“ Stromleistung für Licht in Wien gerundet gleich 47 MW. In Einklang mit Schätzungen der International Dark Sky Association nehmen wir an, dass im Mittel 30% des Lichts nach oben entweichen: 15% durch Reflexion am Asphalt, 15% durch direkte Abstrahlung (weil der ULOR-Wert bei weitem nicht gleich Null ist, jedenfalls bei den meisten Lampen). Dann haben wir eine „Verlust-Stromleistung für Licht“ von $0,3 \text{ mal } 47 \text{ MW} = 14,1 \text{ MW}$ nach oben (Richtung Weltall).

Was erwarten wir bei einer angenommenen mittleren Wolken-Albedo von 50% (gültig als Mittelwert und gut zutreffend auf Stratus-Wolken) und daraus resultierender Rückstreuung als diffuse Himmelshelligkeit im Vergleich zur Lunarkonstante?

Wien hat eine Fläche von rund 415 km^2 . Daher: $14,1 \text{ MW} / 415 \text{ km}^2 = 0,034 \text{ W/m}^2$. Die $0,034 \text{ W/m}^2$ lassen wir nach oben entweichen. Bei 50% Albedo der Wolken müssten $0,017 \text{ W/m}^2$ zurückkommen. Dieser Wert entspricht dem 6,5fachen der Lunarkonstante oder 1,6 lux. Ein Teil der Strahlung wird jedoch seitlich, nicht vertikal nach unten zurückgestreut. Der effektiv zu erwartende Wert liegt daher unter 1,6 lux, jedoch nicht wesentlich darunter – in der Größenordnung von 1 lux.

Ergebnis tatsächlicher Luxmeter-Messungen für die diffuse Himmelshelligkeit in Wien (bedeckter Himmel) stimmen damit überein.

Daraus ergibt sich wiederum, dass eine Gesamt-Stromleistung für öffentliche plus private Beleuchtung in Wien in der Größenordnung von 47 MW und eine nach oben entweichende „Verlust-Stromleistung für Licht“ in der Größenordnung von 14 MW plausibel sind.

(3) *Vergleich mit älteren Satellitenmessungen der aus Wien bei klarem Himmel ins Weltall entweichenden Strahlung*

Isobe und Hamamura (2001) ermittelten aus Satelliten-Daten einen „Light Energy Loss [into space]“ der Stadt Wien von rund 2 MW (genauer: 7,2 GWh, das entspricht 2 MW bei gängigen Annahmen über die effektive Einschaltdauer der Straßenbeleuchtung).

Dies ist nur ein Siebentel der oben ermittelten maximalen „Verlust-Stromleistung für Licht“ von 14 MW.

Diese Differenz hat zwei Gründe:

- a) Die von Isobe und Hamamura verwendeten DMSP-Daten sind veraltet (1997). Nimmt man die jährliche Wachstumsrate der Lichtverschmutzung in Einklang mit einschlägiger Literatur mit 6% an, so muss man die DMSP-Daten bereits um einen Faktor von $1,06 \text{ hoch } 14 = \underline{2,3}$ nach oben skalieren. Die Differenz verringert sich dann von einem Faktor Sieben auf einen Faktor $7/2,3 = 3,04$.
- b) Die DMSP-Messwerte haben ein Problem mit der Überbelichtung (Saturation) der Detektoren im Bereich der Zentren der großen Städte (also auch Wien). Somit wird nach den DMSP-Daten die ins Weltall entweichende Strahlung nochmals unterschätzt.

In Summe unterstützen also auch die Satelliten-basierten Werte von Isobe und Hamamura (2001), wenn man die Punkte a) und b) berücksichtigt, die Größenordnung der „Verlust-Stromleistung für Licht“ von 14 MW für Wien und die Größenordnung der Gesamt-Stromleistung für öffentliche plus private Beleuchtung von 30 MW.