

**Fachbereich Geowissenschaften**

**Institut für Meteorologie**

---

**Erste Untersuchungen der Nachtaufnahmen  
von Städten  
des neuen Satelliten Suomi NPP**

---

**Bachelorarbeit von Stefanie Garz**

Gutachter:  
Prof. Dr. Jürgen Fischer  
Dr. Christopher Kyba

10. März 2014



## Zusammenfassung

Die flächendeckende, durch Menschhand verursachte, künstliche Beleuchtung führt zu einer erheblichen Aufhellung des Nachthimmels, was Mensch und Tierwelt negativ beeinflussen kann. Zusätzlich trägt die energetische Produktion des künstlichen Lichts zur Verschmutzung der Umwelt und zu anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Daher ist es notwendig Reduzierungsmaßnahmen zu ergreifen und zu überprüfen in welchen Regionen solche Maßnahmen besonders wichtig wären, um gezielt unnötigem Lichtausstoß entgegen zu wirken. Mithilfe des Messinstrumentes VIIRS des neuen Forschungssatelliten Suomi NPP ist es möglich, die Lichter der Erde mit einer Auflösung von 750m zu detektieren. Diese Bachelorarbeit verfolgt das Ziel, mittels der nächtlichen Satellitenaufnahmen, die Helligkeit der hellsten Orte (Peak Radiance) der Megacities und der europäischen Hauptstädte zu ermitteln. Die Peak Radiances der zehn größten Flughäfen nach Passagieraufkommen weltweit wurden ebenfalls untersucht. Anhand eines Vergleichs der VIIRS-Bilder mit hochaufgelösten Aufnahmen am Tag, ließ sich die Lichtquelle der detektierten Peak Radiance feststellen. Dadurch wurde im Laufe der Arbeit erkannt, dass hauptsächlich die nächtliche Beleuchtung von Stadtzentren, Industrie- und Werbegebieten die hellsten Orte der untersuchten Städte bilden. Es wurde analysiert ob Zusammenhänge zwischen der Höhe der Peak Radiances und den Einwohnerzahlen der Städte bestehen. Dabei wurde festgestellt, dass eine Abhängigkeit zwischen diesen beiden Größen bei den Hauptstädten Europas vorhanden ist. Dieser Zusammenhang ließ sich für die Megacities nicht nachweisen. Jedoch wurde in der vorliegenden Arbeit eine Korrelation zwischen den Peak Radiances und den Entwicklungsständen (Human Development Index) der zugehörigen Länder der Megacities gefunden. Nachdem die Hauptstädte Europas ihren europäischen Ländergruppen zugeordnet wurden, wurde vor allem bei den mittel- (niedrige Peak Radiance) und westeuropäischen (hohe Peak Radiance) Hauptstädten ein Zusammenhang zwischen den Peak Radiances dieser Städte und der Ländergruppenzuteilung erkannt. Trotz geringer Unterschiede in den Passagierzahlen, konnten große Unterschiede zwischen den Peak Radiances (Faktor 5) der Flughäfen ermittelt werden. Abschließend werden Reduzierungsmaßnahmen vorgestellt, welche dazu beitragen können Energie zu sparen und Licht effektiver einzusetzen, ohne an Sicherheit oder Lebensqualität bei Nacht zu verlieren.

## Abstract

Artificial lighting leads to a significant brightening of the night sky in areas of human activity, and can have negative impacts on humans and other animals. In addition, the energy generated to produce this light often leads to environmental pollution and CO<sub>2</sub> emissions. For this reason, it is important to consider whether reduction in lighting is possible, and what areas should be targeted for reduction. The new instrument VIIRS on the Suomi NPP satellite detects the lights of Earth at night with a resolution of about 750 meters. This Bachelor thesis aims to examine the brightness of the brightest places (Peak Radiance) of a number of major cities (Megacities and of all the capitals in Europe) using nocturnal VIIRS images. The peak radiances of the ten largest airports by number of passengers were also examined. By comparing the VIIRS image to high resolution daytime imagery, it is possible to assess what type of region is responsible for the peak radiance in a city. It is found that the brightest areas of the examined cities are mainly located in city centers, industrial areas, and factories. The data from the complete set of cities is tested for relationships between peak radiance and population. A correlation is found for the European capitals, but not in the case of the Megacities. In the case of the Megacities, the relationship between peak radiance and development status (Human Development Index) of the countries is examined, and a correlation is found. Some similarities based on regional grouping were found for the European capitals, with Western European capitals being brightly lit, and Central European cities being lit most conservatively. Major differences (factor of 5) were found between the brightness of airports, despite small differences in the total number of passengers. The thesis concludes with recommendations for how energy could be saved and how light could be used more effectively without affecting the ability to safely use and enjoy lit areas at night.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Motivation</b>	<b>7</b>
<b>1.2. Ziel der Bachelorarbeit, Inhaltsübersicht</b>	<b>10</b>
<b>2. Künstliche Aufhellung der Nacht</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Auswirkungen auf</b>	<b>12</b>
2.1.1. Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre	12
2.1.2. Nitrat-Radikalanteil der Atmosphäre	13
2.1.3. Astronomie	14
2.1.4. Mensch / Tierwelt	15
<b>2.2. Ursache</b>	<b>16</b>
2.2.1. Allgemein, zwei Städte als Fallbeispiel	16
2.2.2. Straßenbeleuchtung	17
2.2.3. Gebäude- und Werbeflächenanstrahlung	19
2.2.4. Skybeamer	20
<b>3. Satellitenbeobachtung bei Nacht</b>	<b>22</b>
<b>3.1. Forschungssatellit Suomi NPP</b>	<b>23</b>
<b>3.2. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)</b>	<b>23</b>
<b>3.3. Fallbeispiel: Berlin bei Nacht</b>	<b>28</b>
<b>4. Analyse</b>	<b>30</b>
<b>4.1. Arbeitsziele und Methoden</b>	<b>30</b>
<b>4.2. Megacities</b>	<b>32</b>
4.2.1. Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und den Einwohnerzahlen der Megacities	32
4.2.2. Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und dem zugehörigen Entwicklungsstand der Länder der Megacities	36
4.2.3. Die hellsten Orte der Megacities	38
<b>4.3. Hauptstädte Europas</b>	<b>41</b>
4.3.1. Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und den Einwohnerzahlen der Hauptstädte Europas	41
4.3.2. Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und den zugehörigen Ländergruppen der Hauptstädte Europas	43
4.3.3. Die hellsten Orte der Hauptstädte Europas	45
<b>4.4. Die zehn größten Flughäfen weltweit nach Passagieraufkommen</b>	<b>47</b>
<b>5. Reduzierungsmaßnahmen</b>	<b>49</b>
<b>6. Zusammenfassung / Ausblick</b>	<b>53</b>
<b>7. Literaturverzeichnis</b>	<b>56</b>
<b>8. Abbildungsverzeichnis</b>	<b>58</b>
<b>9. Anhang</b>	<b>60</b>



## 1. Einleitung

### 1.1. Motivation

Vor tausenden von Jahren herrschte auf der Erde während der Nächte ohne Mondlicht noch absolute Dunkelheit. Bevor die Elektrizität, die Glüh- oder Petroleumlampen erfunden wurden, erwies es sich früher für die Menschen als sehr schwierig und aufwendig Licht ins Dunkel zu bringen. So war beispielsweise das Entfachen von Glut unter Verwendung von Feuersteinen und Zunder mit einem hohen Zeit- und körperlichen Kraftaufwand verbunden. Jedoch ermöglichte das Feuermachen, eines der ersten Versuche zur Erzeugung von künstlichem Licht, schon damals den Menschen sich nachts ähnlich sicher zu fühlen wie am Tag. Wäre es möglich gewesen eine Satellitenaufnahme von der Erde zu dieser Zeit oder noch früher bei einer Nacht ohne Mondlicht zu machen, würde die Aufnahme im übertriebenen Sinne komplett schwarz aussehen (Abb. 1).

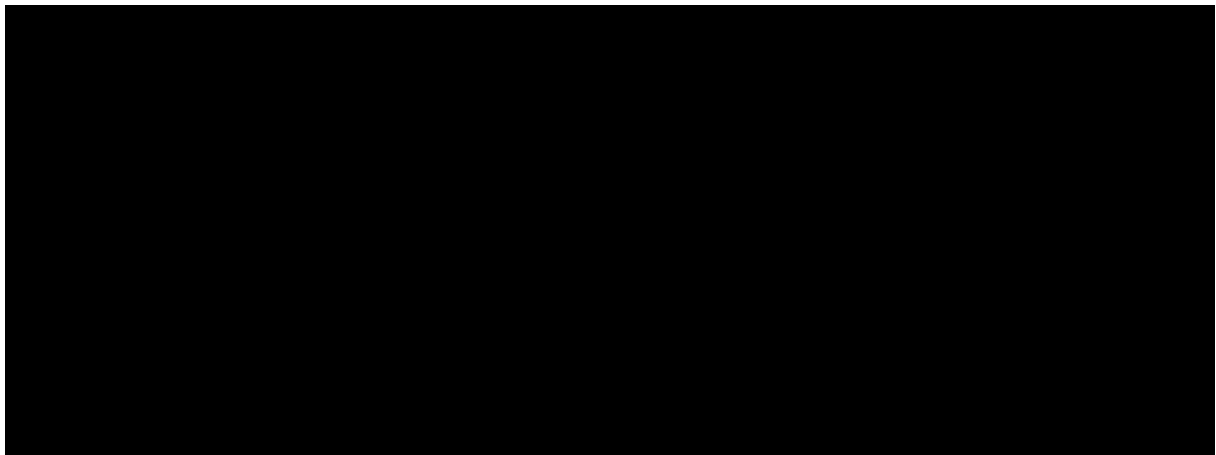


Abb. 1: das wäre das Satellitenbild der Erde bei einer Nacht ohne Mondlicht vor tausenden von Jahren

Im Laufe der Jahre und der Zeit entwickelte sich die Erzeugung von Licht sehr fortschrittlich und modernisiert sich noch stetig. Die Menschen nutzen die künstlich geschaffene Beleuchtung, um sich in der Nacht genauso sicher und heimisch zu fühlen wie am Tag. Mit den technischen Durchbrüchen im 19. Jahrhundert ergab sich erstmals die Möglichkeit die menschlichen Aktivitäten bis in die Nacht auszudehnen, denn mit dem Nachtleben verbinden die Menschen wirtschaftliche Dynamik, Fortschritt, Urbanität und Lebensfreude (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)). Des Weiteren dient künstliches Licht, zum Beispiel von Laternen, einer besseren Orientierung bei Nacht, vor allem auf jegliche Form von Wegen und im Straßenverkehr. Seit der Nutzbarmachung der Elektrizität haben die Menschen den Drang dazu, ihre Umgebung während der Nacht flächendeckend künstlich zu beleuchten. Diese flächendeckende künstliche Beleuchtung, wie sie heutzutage überall auf der Welt vorhanden ist, wird in der folgenden Satellitenaufnahme (Abb. 2) verdeutlicht. Es ist ein extremer Wandel zwischen der Erde bei einer Nacht ohne Mondlicht vor vielen tausend Jahren und der Erde bei Nacht heute festzustellen. Die einst dunkle Nacht wurde bereits und wird auch weiterhin immer mehr künstlich aufgehellt.



Abb. 2: Satellitenaufnahme eines Messinstruments des Suomi NPP der Erde heutzutage bei einer Nacht ohne Mondlicht (NOAA (2014))

Diese nächtliche Aufnahme in Abbildung 2 stammt von einem Messinstrument des neuen Forschungssatelliten namens Suomi NPP. Die weltweit verbreitete künstliche Beleuchtung sticht überwiegend in den Gebieten, wo sehr viele Großstädte vorhanden sind und somit auch sehr viele Menschen, heraus. Stark auffallend und sehr hell erleuchtet sind die Städte im Osten der USA, in Europa und Indien, im westlichen China und in Japan. Aber auch das Nildelta in Ägypten sowie diverse Küstenstädte Südamerikas, Afrikas und Australiens sind deutlich, aufgrund der hellen künstlichen Beleuchtung in der Nacht, auf diesem Satellitenbild erkennbar. Den Menschen war es nun gelungen ihr gesamtes Umfeld zu beleuchten und somit die andere Hälfte des Tages, die Nacht, vollständig für ihre Aktivitäten nutzbar zu machen.

Trotz der durchaus vielen positiven Aspekte des künstlich erzeugten Lichts, nimmt die extreme Entwicklung der künstlichen Beleuchtung erhebliche Ausmaße an (siehe Abb. 2) und bringt folglich auch sehr viele Probleme mit sich. Nicht nur der Wandel des Klimas, welcher durch den enormen Kohlenstoffdioxidausstoß, unter anderem auch verursacht durch künstlich erzeugtes Licht, stark beeinflusst wird, ist davon betroffen, sondern auch weitere chemische Prozesse in der Atmosphäre können sich durch den Einfluss von künstlichem Licht verändern. Die nächtliche künstliche Aufhellung wirkt sich teilweise auch negativ auf den Menschen sowie auf die Tier- und Pflanzenwelt aus, da die Nacht durch künstliches Licht zum Tag wird und somit der Tag- und Nacht- sowie Hell- und Dunkelrhythmus von Mensch, Tier und Natur gestört wird. Obendrein erschwert die künstliche Beleuchtung die Arbeit der Astronomen, überwiegend in der Nähe von Städten, erheblich, da das künstlich ausgestrahlte Licht, welches in der Atmosphäre an Dunst, Wolken, Luftmolekülen, Aerosolen und Ähnlichem gestreut wird, zur extremen Aufhellung des Nachthimmels und des Himmelshintergrundes führt. Infolgedessen wird die Sicht auf den Sternenhimmel stark beeinträchtigt. Dadurch, dass das natürliche Licht von Sonne, Mond und Sternen durch das künstliche von Menschenhand verursachte Licht „verschmutzt“ wird, spricht man bei der Aufhellung des Nachthimmels durch künstliche Lichtquellen auch von Lichtverschmutzung.



Die nachstehende Abbildung 3 verdeutlicht die erschwerte, durch künstliche Beleuchtung getrübe Sicht auf den auffallend erhellten Nachthimmel über einer Stadt. Durch die Streuung des künstlichen Lichts in der Atmosphäre bildet sich eine extreme Lichtglocke über der Stadt, welche so gewaltig ist, dass sie sogar mit dem Sonnenauf- oder Sonnenuntergang verwechselt werden könnte. Dieses Bild (Abb. 3) wurde von einem Strand aus aufgenommen und zeigt die enorme Lichtglocke über dem westlichen Stadtteil der türkischen Stadt Antalya.



Abb. 3: Lichtglocke über den westlichen Teil von Antalya vom Strand aus gesehen (Hänel, A. (2006))

## 1.2. Ziel der Bachelorarbeit, Inhaltsübersicht

Heutzutage ist künstliches Licht notwendig und aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Dennoch sollte die Welt in Maßen, energieeffizient und umweltfreundlich beleuchtet werden, da die nächtliche, flächendeckende Beleuchtung sehr viele Probleme aufwirft. Gezielte Reduzierungsmaßnahmen müssen getroffen werden, um die erheblichen Konsequenzen künstlicher Beleuchtung zu minimieren. Infolgedessen beschäftigt sich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema der künstlichen Aufhellung des Nachthimmels und der dadurch entstehenden Lichtverschmutzung, vor allem über Städten sehr intensiv. Die Lichtverschmutzung ist ebenso ein wichtiges Thema wie Umwelt- und Luftverschmutzung, Lärmbelästigung usw., welches nicht ignoriert werden darf. Mittels gezielt eingesetzter Reduzierungsmaßnahmen besteht das Potential die Energieeffizienz deutlich zu verbessern, den Kohlenstoffdioxidausstoß zu verringern sowie Rücksicht auf jegliche Lebewesen zu nehmen. Folglich kann, mithilfe eines effektvolleren und umweltbewussteren Einsatzes künstlicher Beleuchtung, ein großer Beitrag zum Schutz der Natur und des Klimas geleistet werden.

Zum Einen gilt es in dieser vorliegenden Bachelorarbeit die Ausmaße der künstlichen Beleuchtung und der dadurch erzeugten Lichtglocken von Städten im Detail zu präsentieren. Zum Anderen wird untersucht, wodurch das künstliche Licht im Allgemeinen verursacht wird und welche Reduzierungsmaßnahmen für eine umweltfreundlichere Beleuchtung getroffen werden könnten. Des Weiteren beschäftigt sich diese Arbeit erstmalig mit den Untersuchungen der Nachtaufnahmen von künstlich beleuchteten Städten des neuen Wetter- und Umweltsatelliten Suomi NPP. Dieser, im Oktober 2011 in Umlauf gegangene Forschungssatellit, ist unter anderem mit dem Messinstrument VIIRS ausgestattet, welches hochempfindliche Nachtaufnahmen der Erde mit einer Auflösung von 750m liefert (Miller, S. D. et al. (2013)). Zielsetzung der Bachelorarbeit ist es, mithilfe dieser Satellitendaten, den allerhellsten Ort einer Stadt ausfindig zu machen und herauszufinden, welche Lichtquelle diesen Ort erhellt. Die am stärksten beleuchteten Orte von verschiedensten Städten weltweit werden miteinander verglichen und es wird untersucht, ob die Helligkeit dieser Orte von bestimmten Faktoren, wie beispielsweise der Einwohnerzahl oder dem Entwicklungsstand der Länder der Städte abhängig ist. Erst mit dem Wissen, welche Beleuchtungsquelle sich genau hinter den hellsten Orten von Städten verbirgt, besteht die Möglichkeit gezielt Reduzierungsmaßnahmen anzuwenden, um die enorme Aufhellung des Nachthimmels zu minimieren.

Im Anschluss an diesen Einführungsbeitrag der vorliegenden Arbeit wird ausführlich auf die Folgen und Probleme, die die künstliche Aufhellung der Nacht mit sich bringen, eingegangen. Die Konsequenzen für den Kohlenstoffdioxidgehalt in der Atmosphäre, folglich auch für den Klimawandel, werden ebenso erläutert wie auch die Auswirkungen des künstlichen Lichts auf weitere atmosphärische Prozesse. Weiterhin werden die Konsequenzen für Mensch und Tierwelt sowie die Probleme der künstlichen Beleuchtung für die Astronomie aufgezeigt. In dem selbigen Kapitel wird auch die Frage beantwortet, woher das künstliche Licht, welches in der Nacht benötigt wird, im Allgemeinen stammt, denn die generellen Lichtquellen sind bekannt.

Dazu gehören unter anderem die Straßenlaternen, Lampen, Gebäude- und Werbeanstrahler, die Lichter von Fahrzeugen und die sogenannten Skybeamer.

Im vierten Abschnitt wird der Wetter- und Umweltsatellit Suomi NPP im Detail vorgestellt. Das Instrument VIIRS, eines der fünf Messinstrumente an Bord des Satelliten, welches die Datensätze für diese Bachelorarbeit liefert, wird ebenfalls präsentiert. Desweiteren beschäftigt sich dieser Teil der Arbeit mit den nächtlichen Satellitenaufnahmen von Berlin. Es erfolgt der Vergleich zwischen den Aufnahmen einer älteren Satelliten-Generation, den sogenannten DMSP-Satelliten, und den Bildern von Berlin bei Nacht des neuen Forschungssatelliten Suomi NPP. Zusätzlich werden auch die hellsten Orte von Berlin betrachtet.

Anschließend wird auf die Arbeitsziele und Fragestellungen für diese Bachelorarbeit, welche mithilfe der Satellitendaten untersucht und beantwortet werden können, eingegangen. Es folgen die Herangehensweise und die Methodik um zu verdeutlichen, wie die gestellten Aufgaben gelöst werden. Es werden zwei Kategorien von Städten weltweit in dieser Arbeit präsentiert. Dazu gehören die hellsten Orte (Peak Radiance) der europäischen Hauptstädte und die der Megacities. Des Weiteren werden die hellsten Orte der verschiedenen Städte sowie die Helligkeit dieser Orte in Form von Diagrammen aufgezeigt. Diese beiden Städtekategorien werden miteinander verglichen. Es wird unter anderem, auch mithilfe von Diagrammen, die Frage beantwortet, ob die Peak Radiances der vielen unterschiedlichen Städte von bestimmten Faktoren abhängig sind. Obendrein erfolgt eine Auswertung darüber, was sich hinter den allerhellsten Orten der verschiedenen Städte verbirgt. Als ein kleiner Zusatz werden auch die zehn größten Flughäfen weltweit nach Passagieraufkommen betrachtet und deren Helligkeit untersucht.

Im vorletzten Kapitel werden allgemeine Reduzierungsmaßnahmen erläutert, um die Beleuchtung mithilfe von künstlichem Licht zu mäßigen. In diesem Sinne werden effizientere, umwelt- und insektenfreundlichere Beleuchtungsmethoden vorgestellt.

Schlussendlich wird eine kurze Zusammenfassung über die gefundenen Ergebnisse gegeben und ein Ausblick erstellt, der aufzeigen soll, welche Themen im Bezug auf diese Bachelorarbeit für eine weitere Untersuchung interessant sein könnten.

## 2. Künstliche Aufhellung der Nacht

### 2.1. Auswirkungen auf ...

#### 2.1.1. Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre

Die aus Kohlenstoff und Sauerstoff zusammengesetzte chemische Verbindung Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) ist, mit einer Konzentration von 400ppm, ein natürlicher Bestandteil der Erdatmosphäre. Zum einen entsteht Kohlenstoffdioxid auf natürliche Weise als ein Nebenprodukt durch die Zellatmung von Lebewesen und Vegetation. Zum anderen wird  $\text{CO}_2$  durch die vollständige Verbrennung von frischer Biomasse und Objekten, Substanzen und Brennstoffen in der Industrie, welche zum größten Teil oder vollständig aus Kohlenstoff bestehen, freigesetzt. Dadurch, dass die  $\text{CO}_2$ -Entstehung auch durch Menschenhand verursacht wird, steigt der  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Atmosphäre stetig (Roedel, W. (2000)). Im Jahr 2013 wurde erstmalig sogar der Schwellenwert von 400 ppm überschritten (Jones, N. (2013)).

Da das Vorkommen von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre sehr hoch ist, beteiligt sich  $\text{CO}_2$  als ein sehr wichtiges Treibhausgas hauptsächlich an den Prozessen der Erderwärmung. Es verhindert, dass die ausgesandte Strahlung der Sonne wieder entweicht und wandelt die absorbierte Sonnenstrahlung in Wärmestrahlung um, welche wieder auf die Erdoberfläche trifft und diese erwärmt. Aufgrund der beständigen Erhöhung des  $\text{CO}_2$ -Anteils gelangt weniger Wärme zurück in die Atmosphäre und führt somit zu einem langsamen, stetigen Aufheizen der Erdoberfläche. Globale Erwärmung, das Schmelzen der Polkappen und ein allmählicher Wandel des Klimas sind die Konsequenzen (Roedel, W. (2000), Seemann, D. (2013)).

Infolge der stetigen Zunahme der Anzahl der Erdbewohner sowie ihrer Ansprüche, wächst die Industrie, der Personen- und Güterverkehr, der gesamte weltweite Energieverbrauch und aufgrund dessen auch die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid (Deutsche Stiftung Weltbevölkerung (1999), Roedel, W. (2000)). Zum Energieverbrauch weltweit sowie auch in jedem einzelnen Haushalt gehört auch das Verwenden von Strom für künstliche Beleuchtung. Der Stromverbrauch durch die gesamte innere und äußere Beleuchtung liegt weltweit bei 19%, dabei fließt allein die äußere künstliche Beleuchtung ungefähr zur Hälfte mit ein. Die USA liegt mit 25% an der Spitze des Stromverbrauches durch Beleuchtung und Deutschland mit 15% am unteren Ende. Dennoch werden allein durch die Beleuchtung in Deutschland jährlich 34 Megatonnen Kohlenstoffdioxid ausgestoßen (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)). Daran ist zu erkennen, dass auch die künstliche Beleuchtung, unter anderem die äußere künstliche Beleuchtung, zur Erhöhung des Kohlenstoffdioxidgehalts in der Atmosphäre beiträgt und somit auch eine von vielen Gefahrenquellen darstellt, die Auswirkungen auf den Klimawandel haben (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)).

### 2.1.2. Nitrat-Radikalanteil der Atmosphäre

Die äußere künstliche Beleuchtung, vor allem in Städten, wirkt sich während der Nacht negativ auf weitere chemische Prozesse der Atmosphäre aus. Im Folgenden wird in dieser Bachelorarbeit auf die Konzentrationsveränderung von Nitrat-Radikalen ( $\text{NO}_3^\times$ ) in der Atmosphäre aufgrund von nächtlicher künstlicher Beleuchtung eingegangen, denn diese Konzentrationsveränderung bringt Konsequenzen für den atmosphärischen Stickstoff- und Ozongehalt mit sich (Stark, H. et al. (2011)).

Nitrat-Radikale fungieren als wichtige atmosphärische Oxidationsmittel, sie sind dafür verantwortlich, dass sich die Atmosphäre sozusagen wieder selbst reinigen kann. Sie werden während der Nacht gebildet und entstehen durch die Reaktion von Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) und Ozon ( $\text{O}_3$ ). Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) ist ein weiteres Produkt, was ebenfalls aus dieser Reaktion hervorgeht (siehe Gleichung (1), Kyba, C. (2011), Stark, H. et al. (2011)).



Beim Auftreffen von UV-Strahlen auf Nitrat-Radikale zerfallen diese wieder. Die Konzentration von Nitrat-Radikalen tagsüber in der Atmosphäre verringert sich, da die Radikale eine große Instabilität bei Sonnenlicht aufweisen (Stark, H. et al. (2011)). Doch auch bei künstlicher Beleuchtung während der Nacht wurde festgestellt, dass sich die Konzentration von Nitrat-Radikalen in der Atmosphäre ändert. Durch den Vorgang der Photolyse, bei dem Photonen des künstlichen Lichts auf die Nitrat-Radikale stoßen, wird die Konzentration dieses Oxidationsmittels sogar bei Nacht verringert (Möller, D. (2003)). Diese Photolyse-Reaktionen laufen nach folgender Gleichung (2) (Kyba, C. (2011)) ab.



Die Photonenenergie ( $h\nu$ ) der künstlichen Beleuchtung trifft nachts auf das Oxidationsmittel  $\text{NO}_3^\times$ . Folglich zerfällt das Nitrat-Radikal wieder zu Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) und einem Sauerstoffatom ( $\text{O}$ ) (Möller, D. (2003)). Wenn es zur Reduzierung der  $\text{NO}_3^\times$ -Konzentration kommt, ist auch eine Abnahme des Ozongehaltes nachweisbar (Stark, H. et al. (2011)).

Wie hoch diese Konzentrationsveränderung des  $\text{NO}_3^\times$  in der Nacht genau ist und wie schwerwiegend sich das auf den Stickstoff- und Ozongehalt der Atmosphäre auswirkt, haben Stark et al. im Jahr 2010 feststellen können. Diese Wissenschaftler untersuchten mittels eines Forschungsflugzeuges im Mai und Juni 2010 den Verlust des atmosphärischen Nitrat-Radikalanteils in der Nacht über der amerikanischen Stadt Los Angeles.

Um sich ein genaues Urteil über den Verlust der Nitrat-Radikale bilden zu können, wurde der Anteil des Oxidationsmittels in der Atmosphäre an mehreren verschiedenen helleren und dunkleren Orten über Los Angeles bestimmt. Des Weiteren wurden die Nitrat-Radikalwerte

über einer weiteren, im Gegensatz zu Los Angeles sehr typisch hell erleuchteten Stadtmitte, welche mittels Satellitendaten ausfindig gemacht wurde, aufgenommen. Um den Vergleich zu vervollständigen, erfasste man ebenfalls den Nitrat-Radikalanteil über einem sehr dunklen Ort ohne Lichteinfluss in der Nähe dieser beiden Städte (Stark, H. et al. (2011)).

Diese Gegenüberstellung zeigt, dass ein geringerer Nitrat-Radikalwert und ein demzufolge höherer Stickstoffoxidanteil über der sehr hellen Stadtmitte nachts gemessen wurden als über Los Angeles und dem Ort ohne Lichteinfluss. Es liegt eine Reduzierung des  $\text{NO}_3^\times$ -Anteils von 4% und eine Erhöhung des NO-Anteils von 3,5% in der hell erleuchteten Stadtmitte im Gegensatz zum sehr dunklen Ort vor. Dies führt auch zu einer Ozonabnahme von 0,3% am nächsten Tag über der weitaus helleren Stadtmitte. Die Reduzierung des  $\text{NO}_3^\times$ -Anteils im weniger hellen Los Angeles im Vergleich zum Ort ohne Lichteinfluss liegt bei ca. 1% und auch der Stickstoffoxid-Anteil erhöht sich um 1% in der Nacht. Dieser Effekt der Reduzierung des Nitrat-Radikalanteils wurde verstärkt bei vor allem älteren und sehr trockenen Luftmassen über künstlich beleuchteten Stellen beobachtet (Stark, H. et al. (2011)).

Feststellend und zusammenfassend ist zu sagen, dass die künstliche Beleuchtung zu einem, wenn auch nur geringen, Anteil für den Verlust der atmosphärischen Nitrat-Radikale in der Nacht mit verantwortlich ist. An Orten, die sehr hell während der Nacht erleuchten, wurde ein höherer Verlust der Nitrat-Radikale festgestellt. Folglich beeinflusst künstliches Licht die Konzentration vom  $\text{NO}_3^\times$ , also das atmosphärische Oxidationsvermögen und somit den Ozon-gehalt der Atmosphäre sowie die atmosphärische Stickstoffdynamik (Stark, H. et al. (2011)).

### 2.1.3. Astronomie

Auch aus astronomischer Sicht stellt das künstliche Licht und die flächendeckende künstliche nächtliche Aufhellung, vor allem in Städten, ein großes Problem dar. Die Astronomie beschäftigt sich mit der Erkundung und Beobachtung des Sternenhimmels und ist bis heute eines der ältesten Kulturgüter der Menschheit. Mithilfe der astronomischen Beobachtungen konnten die Zeit bestimmt und Kalender erstellt werden. Mit Unterstützung der Astronomie konnten früher auch neue Länder und Kontinente entdeckt werden. Heutzutage ist das astronomische Wissen sehr wichtig und undenkbar für die Grundlagenforschung der Physik, denn mithilfe dieses Wissens können sehr viele komplexe Vorgänge im Himmel beobachtet werden, welche sich experimentell in einem Labor nicht durchführen oder darstellen lassen können. Des Weiteren wäre die Navigation oder Kommunikation ohne die Lehre der Astronomie niemals möglich gewesen (Patzner, B. (2013)).

Durch den Einfluss von künstlichem Licht, welches in der Atmosphäre an Dunst, Wolken und vielen weiteren Molekülen gestreut wird, wird die Beobachtung des Sternen- und Nachthimmels sowie der Milchstraße, vor allem in Großstädten, erschwert bzw. teilweise unmöglich gemacht. Durch die künstliche Beleuchtung entstehen riesige weitreichende Lichtglocken über den Städten, die die Sicht beeinflussen (Patzner, B. (2013)). Auch das Beobachten von

schwächeren Himmelsphänomenen, wie das Leuchten von Kometen, Gasnebel oder Galaxien, wird für die Astronomen beeinträchtigt (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)). Aufgrund der künstlichen Aufhellung der Nacht muss sich die professionelle Astronomie in weitabgelegene Gebiete, weitab von Großstädten und künstlicher Beleuchtung, zurückziehen um ihrer Arbeit weiterhin vernünftig nachgehen zu können. Die Astronomen arbeiten nun überwiegend auf Inseln, in der Wüste oder im Weltraum, was mit einem hohen, vor allem kostenintensiven Aufwand verbunden ist (Patzner, B. (2013), Riegel, K. W. (1973)).

Das Beispiel einer astronomischen Sternwarte des naturwissenschaftlichen Vereins Osnabrück, welche sich 20 km entfernt von Osnabrück befindet, verdeutlicht die Ausmaße der künstlichen Beleuchtung einer Stadt. Auch in einer sehr sternklaren Nacht behindert die gewaltige Lichtglocke über Osnabrück die astronomischen Beobachtungen des Nachthimmels und der Milchstraße an dieser Sternwarte, obwohl diese relativ weitabgelegen ist. Messungen ergaben, dass der Himmel im Zenit über der Sternwarte durch den Einfluss der Lichtglocke 2 ½ mal heller war als der natürliche Himmelshintergrund. Die Erkundung des Nachthimmels wird dadurch erheblich erschwert und beeinträchtigt (Hänel, A. (2014)).

#### **2.1.4. Mensch / Tierwelt**

Sogar für den Menschen und die Tierwelt erweist sich die flächendeckende künstliche Beleuchtung während der Nacht als störend und unangenehm. Das künstliche Licht beeinträchtigt in vielen Fällen den Tag- und Nacht sowie Hell- und Dunkelrhythmus. Die Nacht und die Dunkelheit dienen eigentlich dem Schlafen, der Entspannung und dem Regenerieren von Mensch und tagaktiven Tieren sowie der Fortpflanzung und Nahrungssuche von nachtaktiven Tieren (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)).

Doch das Orientierungsvermögen von Mensch und Tier leidet darunter, dass die Nacht durch ihre künstliche Aufhellung zum Tag gemacht wird. Beispielsweise wirkt das künstliche Licht auf bestimmte Tiere, wie Insekten oder Vögel, sehr anziehend und stellt somit eine große Gefahr für diese Tiere dar (Rich, C. et al. (2005)). Ein weiteres Beispiel zeigt, dass es neben der Sicherheitsfunktion von künstlicher Beleuchtung, vor allem bei schlechter oder ineffektiver Konstruktion, zur Blendung von Kraftfahrern kommen und somit zu einem großen Verkehrsrisiko führen kann (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)).

## 2.2. Ursachen

### 2.2.1. Allgemein, 2 Städte als Fallbeispiel

Die äußere künstliche Beleuchtung der Nacht wird aufgrund ihrer verschiedensten Ursachen von Held, M. (2013) in diverse Kategorien unterteilt. Dazu gehören zum Einen das *institutionelle Licht*, welches die systematisch errichteten Beleuchtungsanlagen von öffentlichen Institutionen, die Straßenbeleuchtung sowie die Beleuchtung von Verkehrsanlagen umfasst, und zum Anderen das *merkantile Licht*. Diese Art von Beleuchtung spiegelt das Erleuchten von Schaufenstern oder Werbeanlagen wieder, aber auch Skybeamer und öffentliche Screens fallen unter diese Kategorie. Eine weitere Quelle der künstlichen Beleuchtung ist das gesamte *Licht von Infrastruktur- und Gewerbeanlagen*, welches mit der Beleuchtung von Flughäfen, Bahnhöfen, Häfen, Tankstellen, Raffinerien, Baustellen, Sportanlagen, Arenen und Einkaufszentren gekoppelt ist. Auch privates Licht aus Wohn- oder Bürohäusern, zusammengefasst als *individuelles Licht*, unterstützt die nächtliche Aufhellung. Sehenswürdigkeiten, Kirchen, Schlösser oder Denkmäler werden heutzutage immer mehr angestrahlt. Diese Art von Beleuchtung wird in die Kategorie des *inszenierten Lichtes* eingeordnet. Mit dem *rituellem Licht* wird die Beleuchtung von Festen oder die gesamte Beleuchtung zur Weihnachtszeit bezeichnet. Das „Festival of Lights“, welches nach und nach Zuspruch in vielen Städten findet, fällt ebenso unter die Kategorie der rituellen Beleuchtung. Eine letzte Ursache der künstlichen Beleuchtung bildet das *mobile Funktionslicht*, welches sowohl die Scheinwerfer von Fahrzeugen als auch die Beleuchtung von öffentlichen Verkehrsmitteln beinhaltet (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)).

Zu welchen Anteilen sich die künstliche Beleuchtung aus verschiedenen Quellen zusammensetzt, variiert von Stadt zu Stadt, abhängig auch von deren Lage und Funktion. Beispielsweise ergibt die Untersuchung der Hauptursachen der künstlichen Beleuchtung der amerikanischen Stadt Flagstaff, einer Wintersportstadt im Bundesstaat Arizona, dass diese vorherrschend zu 36% kommerziell beleuchtet wird. Die beleuchteten Sportplätze von Flagstaff fließen zu 32% und Verkehrswege zu 9% in die nächtliche Helligkeitsstatistik ein. Weitere 9% der künstlichen Beleuchtung gehen auf die privaten Haushalte zurück (Luginbuhl et al. (2009)). Im Vergleich dazu wird ungefähr ein Drittel der künstlichen Beleuchtung in der deutschen Hauptstadt Berlin durch die Straßen verursacht, dazu gehören unter anderem die Straßenbeleuchtung selbst, die Scheinwerfer der Autos und auch Werbeanzeigen. 16% der künstlichen Beleuchtung von Berlin lassen sich auf die Industrie- und Werbegebiete zurückführen und weitere 9% resultieren aus der Beleuchtung der öffentlichen Gebäude (Kuechly, H. U. et al. (2012)).



### 2.2.2. Straßenbeleuchtung

Nach all den aufgezählten Ursachen der künstlichen Beleuchtung, bildet jedoch in den meisten Fällen die Straßenbeleuchtung die Hauptquelle für die Lichtglocke über einer Stadt. Nichtsdestotrotz wird Straßenbeleuchtung benötigt. Ohne Straßenlaternen wäre das nächtliche Leben undenkbar. Sie dienen der Orientierung, der eigenen Sicherheit und vor allem der Verkehrssicherheit. Dennoch sind Straßenlaternen oft schlecht konstruiert oder ineffektiv angebracht und in vielen Fällen sind sie während der gesamten Nacht voll erleuchtet. Folglich ist die Straßenbeleuchtung der Hauptgrund für die künstliche, nächtliche Aufhellung und mitverantwortlich für den enorm hohen Stromverbrauch einer Stadt (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)).



Abb. 4: Straßenlaternen strahlen direkt in den Nachthimmel (Giménez, S. M. (2013))

Die Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für schlecht konstruierte und ineffektiv angebrachte Straßenbeleuchtung. Die Laternen sind nicht abgeschirmt und strahlen voll erleuchtet direkt in den Nachthimmel. Unter den beiden Straßenlaternen befinden sich zwei Personen, welche sehr schwer und undeutlich zu erkennen sind. Dies beweist, dass der Einsatz dieser Laternen seinen Zweck nicht erfüllt, da der Himmel angeleuchtet wird und nicht die Straße, beziehungsweise die Menschen unter den Laternen.



Abb. 5: sinnloser Einsatz von Straßenlaternen (Giménez, S. M. (2013))

Ein weiteres Bild, Abbildung 5, stellt natürlich nicht den Normalfall dar. Aber auch solch einen, eher sinnlosen und nicht effizienten, Einsatz von Straßenlaternen gibt es zu entdecken. Diese Laternen sind zwar abgeschirmt und gut konstruiert, jedoch wurden sie auf einer Wiese platziert, auf der sich weder ein Gehweg noch ein Bürgersteig oder eine Straße befindet. Während der Nacht beleuchten diese Laternen eine Fläche, die im Normalfall nicht beleuchtet werden müsste.



Abb. 6: ineffektiver Einsatz von Laternen (Giménez, S. M. (2013))

Eine Reihe parkender Autos ist in Abbildung 6 erkennbar. Vor und hinter diesen Autos, ebenfalls auf einer Wiese, befinden sich sehr viele nicht abgeschirmte, voll erleuchtete Straßenlaternen. Sie strahlen aufgrund ihrer schlechten Konstruktion ihr Licht direkt in den Nachthimmel. Auch hier stellt sich die Frage, warum diese Fläche so hell beleuchtet werden muss und ob dieser Straßenlaterneneinsatz wirklich Sinn ergibt.



Abb. 7: linke Straßenlaterne schlecht konstruiert und ineffektiv, rechte Straßenlaterne abgeschirmt, sie strahlt nach unten (Hänel, A. (2013))

In der siebten Abbildung ist eine schlecht und eine gut konstruierte Straßenlaterne erkennbar. Auf der linken Seite des Bildes befindet sich die ineffektiv konstruierte Lampe, da diese nicht

abgeschirmt ist und somit nicht nur in den Nachthimmel strahlt, sondern auch in die umliegenden Fenster. Infolgedessen könnten sich Anwohner gestört fühlen. Dagegen ist die Laterne auf der rechten Seite der siebten Abbildung gut angebracht und besser konstruiert. Durch die Abschirmung des Lichts der Laterne, erkennbar durch den Lichtkegel, welcher nach unten zeigt, wird nur die Straße beleuchtet. Lichtstrahlen gelangen weder in den Himmel noch in die Fenster der Anwohner.

### 2.2.3. Gebäude- und Werbeflächenanstrahlung

Eine weitere extreme Quelle der künstlichen Beleuchtung ist das Anstrahlen von Objekten, Sehenswürdigkeiten, Gebäuden und Werbeflächen, welches dem Citymarketing und der Werbung dient. Die Werbung durch Licht nimmt stetig zu. Um mit der Konkurrenz mithalten zu können und nicht unterzugehen, wird immer mehr künstlich beleuchtet. Mehr Licht, vor allem helleres Licht, wird verwendet, um viel Aufmerksamkeit zu erregen. Viele Gebäude werden beleuchtet, teilweise auch die gesamte Nacht lang, damit sie einfach nur wahrgenommen werden und nicht in der Menge untergehen. Durch künstlich beleuchtete Gebäude wirkt eine Stadt attraktiver und lockt unter anderem auch Touristen an. Sogar Kirchtürme werden angestrahlt, obwohl sich gerade in älteren, abgelegenen Kirchtürmen Lebensräume für viele seltene nachtaktive Tiere befinden.

Wenn Gebäude- oder Werbeflächenstrahler schlecht konstruiert sind und zum Beispiel ein viel zu breites Lichtbündel besitzen oder schlecht ausgerichtet sind und somit nicht ausschließlich nur das Gebäude oder Werbeplakat anstrahlen, wird auch viel Licht direkt in den Nachthimmel gestrahlt. Durch die Streuung des Lichts an Wolken, Dunst, Luftmolekülen, Aerosolen, usw. wird der Himmelshintergrund aufgehellt.



Abb. 8: ineffektiv angestrahlttes Gebäude (Deschan, H. (2014))

Ein sehr hell beleuchtetes, jedoch ineffektiv angestrahltes Gebäude wird in Abbildung 8 gezeigt. Die Gebäudestrahler wurden sehr schlecht ausgerichtet. Infolgedessen gelangt sehr viel Licht in den Nachthimmel. Die Streuung dieses Lichtes verstärkt die Aufhellung des Himmelshintergrundes und trägt erheblich zur Lichtglocke der Stadt, in welcher sich das Gebäude befindet, bei.

Die nachstehende Abbildung 9 stellt ein Werbeplakat dar, welches extrem hell beleuchtet wird. Da die Strahler dieser Werbefläche jedoch schlecht ausgerichtet sind, strahlt auch dieses Licht in den Nachthimmel hinaus. Dazu kommt auch noch, dass die Lichter für dieses Werbeplakat direkt in ein Büro strahlen und es somit zur Störung und Blendung der Arbeitenden in diesem Büro führen kann.



Abb. 9: schlechte Konstruktion der Beleuchtungsanlage eines Werbeplakats (Kyba, C. (2014))

#### 2.2.4. Skybeamer

Auf eine letzte von vielen weiteren Ursachen für die künstliche nächtliche Aufhellung einer Stadt wird in dieser Bachelorarbeit noch eingegangen. Die sogenannten Projektionsscheinwerfer, auch Skybeamer genannt, werden tatsächlich absichtlich dafür eingesetzt sehr viel Licht direkt in den Nachthimmel zu strahlen. Skybeamer sind auffallende, aufmerksamkeits-erregende, lichtstarke, bündelnde Scheinwerfer, welche rotieren. Mit einer elektrischen Leistung von 1200 bis zu 7000 Watt strahlen die Scheinwerfer das Licht in den Nachthimmel. Durch die Streuung des Lichts in der Atmosphäre kommen die Skybeamer erst richtig zur Geltung. Skybeamer werden hauptsächlich für Werbemaßnahmen und Werbezwecken vor Diskotheken und großen Veranstaltungen, sowie feierlichen Anlässen eingesetzt, denn diese Projektionsscheinwerfer können sogar aus einer Entfernung von bis zu 30km beobachtet werden (Haas, R. et al. (1997)).

Für astronomische Zwecke können Skybeamer sehr störend sein, denn die Beobachtungsmöglichkeiten der Astronomen werden dadurch stark eingeschränkt. Des Weiteren sind Projektionsscheinwerfer eine Gefahr für Zugvögel und nachtaktive Tiere sowie Insekten, da diese

durch das grelle Licht abgelenkt, verwirrt und angezogen werden. Auch die Menschen, insbesondere Piloten, können durch Skybeamer stark abgelenkt werden. Abgelenkte Piloten stellen somit ein hohes Risiko für den Flugverkehr dar. Auf die Kraftfahrer trifft selbiges zu. Durch Skybeamer geblendete oder abgelenkte Fahrer tragen zu einem erhöhten Verkehrsrisiko bei (Schuler, L. D. (2013)).

Für den Einsatz von Skybeamern wird eine bauliche Genehmigung benötigt. Dennoch werden sie oft unerlaubt eingesetzt. In manchen Teilen Deutschlands, zum Beispiel in Hessen, wurde bereits ein Verbot für Skybeamer ausgesprochen, da diese einen negativen Einfluss auf Mensch und Tier haben und ihnen teilweise auch gefährlich werden können (Schuler, L. D. (2013)).



Abb. 10: Skybeamer rund um die Siegessäule in Berlin (Remitschka, F. (2014))

Die Siegessäule von Berlin wird in der zehnten Abbildung präsentiert. Rund um die Siegessäule wurden viele Skybeamer aufgestellt, welche direkt in den Nachthimmel von Berlin strahlen, das gestreute Licht verstärkt die Lichtglocke über Berlin.

### 3. Satellitenbeobachtung bei Nacht

Wenn das gesamte Beleuchtungsszenario vom Erdboden aus betrachtet wird, sind die Ursachen und Quellen für die sämtliche künstliche Beleuchtung auf unserer Erde natürlich bekannt. Aber welche Laterne, Lampe oder andere Beleuchtungsquelle an welchem Ort besonders viel Licht aussendet oder welcher Platz, welche Stelle und welches Gebäude einer Stadt mitverantwortlich für die extreme Aufhellung des Nachthimmels über sie ist, kann man vom Erdboden aus nicht feststellen. Jedoch wird das Wissen darüber was die Hauptursachen oder Hauptlichtquellen einer Stadt sind, benötigt, damit gezielt Reduzierungsmaßnahmen getroffen werden können, um somit der Lichtverschmutzung und dem unnötigen CO<sub>2</sub>-Ausstoß entgegen zu wirken. Um dieses Wissen zu erlangen, bedarf es einer anderen Sichtweise auf die Stadt.

Mithilfe von Satellitenaufnahmen, die wie in Abbildung 11 die Erde bei Nacht zeigen, oder Flugzeugmessungen, besteht heutzutage nun die Möglichkeit die extremen Lichtquellen auf der Welt zu ermitteln, da diese bereits sehr hell und vor allem flächendeckend künstlich beleuchtet wird. Laserlichter oder Skybeamer können nicht detektiert werden, da diese aus der Sicht von Satelliten oder Flugzeugen nur als kleine Lichtpunkte wiedergespiegelt werden. Im Falle dieser Bachelorarbeit werden erstmalig, mittels der Satellitenbilder der Messinstrumente des neuen Forschungssatelliten Suomi NPP (Abbildung 11), die allerhellsten Lichtquellen von diversen Städten untersucht.



Abb. 11: Satellitenaufnahmen der Erde bei Nacht der Messinstrumente des Forschungssatelliten Suomi NPP (NOAA (2014))

### 3.1. Forschungssatellit Suomi NPP

Der Satellit Suomi NPP ist ein neuer Forschungssatellit aus den Vereinigten Staaten, dessen Mission am 28. Oktober 2011 um 09:48 UTC begann. Im Januar 2012 wurde der Satellit getauft und nach dem Vater der Satellitenmeteorologie, Verner E. Suomi, benannt. Die Abkürzung NPP steht für National Polar-orbiting Partnership. Der neue Wetter- und Umweltsatellit Suomi NPP wird von der NASA (National Aeronautics and Space Administration) und der NOAA (The National Oceanic and Atmospheric Administration) betrieben. Mit einem Gewicht von 2270 Kilogramm umkreist der Suomi NPP die Erde 14 Mal am Tag. Die Lebensdauer des Satelliten beträgt sieben Jahre, wobei er davon fünf Jahre für Missionen eingesetzt werden wird. Der Satellit besteht aus einem Raumschiff, fünf Messinstrumenten, Simulatoren und weiterem Equipment, das den Kontakt zur Erde sichert (Miller, S. D. et al. (2013), NASA (2014)).

Der Forschungssatellit Suomi NPP dient der kostengünstigen Fernerkundung. Er beobachtet fast die gesamte Erdoberfläche und den Wandel der Erde. Dabei werden viele Facetten der Erde betrachtet. Der Satellit erfasst Wetter- und Klimadaten, des Weiteren liefert er Daten und Bilder der Erde bei Nacht. Mithilfe der Aufnahmen und Informationen des Satelliten wird die Klimaforschung unterstützt und entscheidend vorangetrieben. Die Messinstrumente an Bord des Suomi NPP sind für die Messungen der atmosphärischen Temperatur und Feuchtigkeitskonzentration verantwortlich. Außerdem werden die Wolkendarstellung, die Meeresoberflächentemperatur sowie die Ozon- und Aerosolkonzentration der Atmosphäre gemessen (Miller, S. D. et al. (2013), NASA (2014)).

Zu den Messinstrumenten gehören im Einzelnen der *Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS)*. Dieser arbeitet im Mikrowellenbereich und misst mit einem 22-Kanal-Radiometer die Temperatur- und Feuchtigkeitsprofile der Atmosphäre. Der *Cross-track Infrared Sounder (CrIS)* ist ein Michelson-Interferometer, welcher die atmosphärische Temperatur- und Feuchtigkeitskonzentration misst. Die Ozonkonzentration wird von dem Messgerät *OMPS*, kurz für *Ozone Mapping and Profiler Suite*, angegeben. Ein 3-Kanal-Radiometer mit dem Namen *Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES)* dient der Albedobestimmung sowie der Bestimmung des Gesamtenergiehaushaltes der Erde. Das fünfte Messinstrument an Bord des Satelliten Suomi NPP ist *VIIRS*. VIIRS steht für die Abkürzung *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*. Es ist ein 22-Kanal-Radiometer, welcher der radiometrischen Messungen im sichtbaren und infraroten Bereich dient und Bilder der Erde liefert (NASA (2014)).

### 3.2. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)

Die Datensätze dieser Bachelorarbeit werden von dem Messinstrument VIIRS des Satelliten Suomi NPP geliefert. VIIRS ist ein Strahlenmessgerät für radiometrische Messungen im sichtbaren und infraroten Bereich. Die Eigenschaften von Wolken und Aerosolen, die Albedo der Erde, die Farbe der Ozeane sowie die Bewegung als auch Temperatur von Eis werden im Einzelnen mithilfe dieses Messgerätes ermittelt. Weiterhin ist VIIRS für die Bildaufnahmen von der Kryosphäre, Atmosphäre und von den Ozeanen verantwortlich. Zusätzlich nimmt es auch Bilder der Erde bei Nacht auf. Jeden zweiten Tag liefert dieses Messinstrument Daten, die die gesamte Erdoberfläche abdecken. Mit einer Masse von ungefähr 275kg ist VIIRS das weitaus schwerste Messgerät an Bord des Satelliten Suomi NPP (siehe Abbildung 12) (NASA (2014)).



Abb. 12: die fünf Messinstrumente des Suomi NPP (NASA (2014))

Für die Instrumente von Wettersatelliten, welche für Bildaufnahmen sorgen, ist es typisch, dass ihre Messungen im sichtbaren und infraroten Bereich erfolgen so wie auch im Fall von VIIRS. Dieser besitzt 22 Kanäle oder auch Bänder, die diese Bildaufnahmen ermöglichen. Eines der wichtigsten und fortschrittlichsten Kanäle von VIIRS ist das sogenannte Day/Night Band (DNB). Das DNB ist ein breitbandiger und höchstempfindlicher Sensor mit einer Durchlässigkeit für Wellenlängen von 500 bis 900nm. Somit deckt dieser Breitbandkanal hauptsächlich den sichtbaren, aber auch einen kleinen Teil des infraroten Bereiches ab. Die einzigartige Eigenschaft, dass das Day/Night Band vor allem auch die niedrigen Stufen des Lichts („low levels of Light“) hochintensiv detektieren kann, ist für die Forschung revolutionär. Infolgedessen liefert das DNB hochempfindliche Nachtaufnahmen unter anderem von meteorologischen Phänomenen, aber auch von Stadtlichtern, welche für die vorliegende Arbeit interessant sind, mit einer Auflösung von 750m. Mit dem sensiblen DNB, welches sogar das Licht eines einzelnen Schiffes feststellen kann, ist es außerdem möglich das nächtliche Licht der Atmosphäre widerzuspiegeln. Dieser breitbandige Kanal erhält deswegen den Na-



men Day/Night Band, da er nicht nur in der Nacht sondern am Tage hochempfindliche Bilder der Erde liefert (Miller, S. D. et al. (2013)).

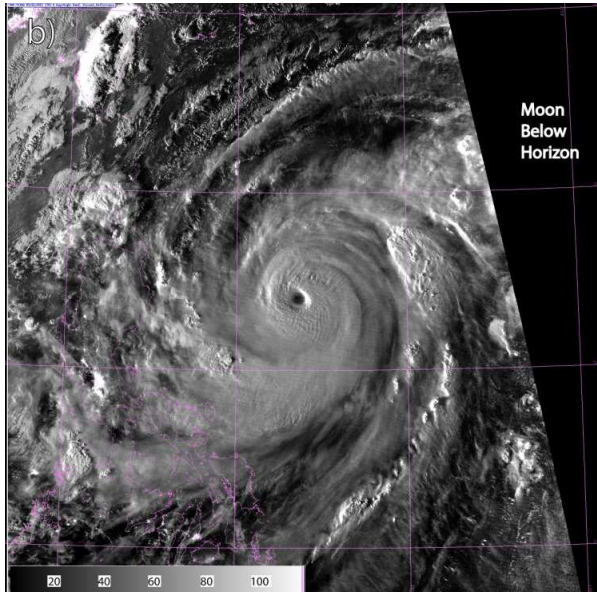


Abb. 13: hochempfindliche und hochaufgelöste Nachtaufnahmen des DNB des Messinstrumenten VIIRS: nächtliche Aufnahme des Taifuns Jelawat (25.11.2012, 1701 UTC) (Miller, S. D. et al. (2013))

Die nächtliche Aufnahme des Taifuns Jelawat, dargestellt in Abbildung 13, wurde von dem hochsensiblen Day/Night Band aufgenommen. Aufgrund seiner hohen Empfindlichkeit und der Low-Light-Sensoren ist es mithilfe des DNB möglich, trotz der nächtlichen Dunkelheit, eine sehr klare, prägnante, aussagekräftige und deutliche Aufnahme, dieses meteorologischen Phänomens zu erlangen.

Bereits vor 40 Jahren kamen diese sogenannten Low-Light-Sensoren bei den Messinstrumenten der DMSP-OLS-Satelliten, einer älteren Satellitengeneration, zum Einsatz, um ebenfalls schwaches Licht auf der Erde festzustellen und somit Bilder der Erde bei Nacht aufzunehmen. Die Abkürzung dieser Satelliten steht für Defense Meteorological Satellite Program and its Operational Linescan System. Die DMSP-Satelliten sind US-amerikanische Militärsatelliten mit denen zwar unter anderem Bilder der Erde bei Nacht mittels des OLS aufgenommen werden können, jedoch werden diese Aufnahmen eher für militärische Zwecke verwendet als beispielsweise für die Erforschung von meteorologischen Ereignissen oder zur Untersuchungen von Lichtquellen. Bei den militärischen Zwecken handelt es sich zum Beispiel darum, sich über Wettergeschehnisse und das kommende Wetter an einem bestimmten Ort, wo militärische Truppen eingesetzt werden sollen, zu erkundigen. Des Weiteren dienen diese Aufnahmen der Spionage. Die nachfolgende Tabelle in Abbildung 14 zeigt einen Vergleich zwischen den technischen Daten des Operational Linescan Systems der DMSP-Satelliten und des Day/Night Kanals des VIIRS-Instruments des Satelliten Suomi NPP (Miller, S. D. et al. (2013)).

Attribute	DMSP/OLS	VIIRS/DNB
Orbital Details	Sun-synchronous, ~850 km	Sun-synchronous, 824 km
Nighttime Nodal Overpass Time	~1930 UTC	~0130 UTC
Swath Width	3000 km	3000 km
Spectral Passband Bandwidth	Panchromatic 500–900 nm	Panchromatic 500–900 nm
Spectral Passband Center	~600 nm	~700 nm
Horizontal Sampling Interval	2.8 km (Nighttime “Smooth” Data)	0.740 ± 0.043 km (Scan) 0.755 ± 0.022 km (Track)
Horizontal Spatial Resolution	5 km (Nadir)/~7 km (Edge)	<0.770 km (Scan) <0.750 km (Track)
Geolocation Uncertainty	~450 m–5.4 km	266 m (Nadir), 1151 m (Edge)
Minimum Detectable Signal	$4 \times 10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	$3 \times 10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$
Noise Floor	$\sim 5 \times 10^{-6} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	$\sim 5 \times 10^{-7} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ (Nadir)
Radiometric Quantization	6 bit	13–14 bit
Accompanying Spectral Bands	1 (Thermal IR)	11 (Night)/21 (Day)
Radiometric Calibration	None	On-Board Solar Diffuser
Saturation, Stray Light Artifacts	Urban Cores, Substantial, Uncorrectable	None, Near-Terminator, Corrected

Abb. 14: Vergleich der technischen Daten zwischen dem OLS der DMSP-Satelliten und dem DNB von VIIRS (Miller, S. D. (2013))

Das DNB von VIIRS kann heutzutage das Licht der Nacht weitaus besser entdecken, wahrnehmen und empfindlicher auflösen als das OLS, diese Erkenntnis spiegelt der technische Vergleich in Abbildung 14 wieder. Beispielsweise liefert das OLS, mit einer Auflösung von rund 2,7km, sehr ungenaue Informationen, im Gegensatz zum DNB von VIIRS, welches zu einer Auflösung von 750m in der Lage ist. Auch die Bereiche in denen OLS und DNB scannen und welche Wellenlängen für sie durchlässig sind, können miteinander verglichen werden (siehe Abb. 14). Dieser Scanbereich der beiden Kanäle wird auch noch einmal in der nachstehenden Abbildung 15 aufgezeigt (Miller, S. D. et al. (2013)).

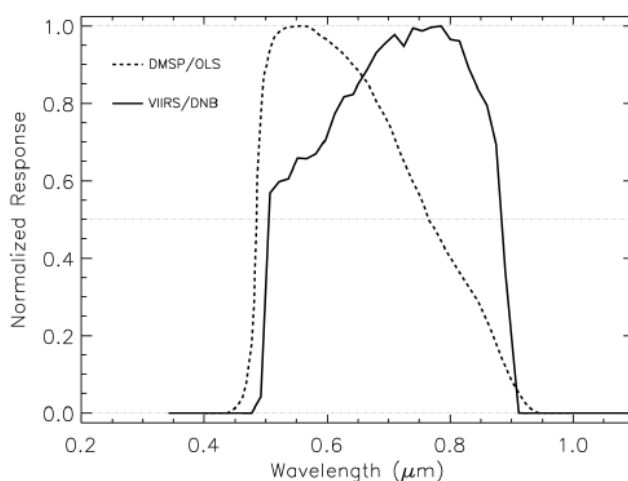


Abb. 15: Verhältnis der Wellenlängen in Mikrometern zur Empfindlichkeit, in der OLS und DNB in dem jeweiligen Wellenlängenbereichen messen können (Miller, S. D et al. (2013))

Wie in Abbildung 14 und 15 erkennbar, können beide Systeme OLS und DNB, in den Bereichen von 500 bis 900nm messen, jedoch ist der Messbereich vom DNB prägnanter und emp-

findlicher. Die Genauigkeit in der das DNB, vor allem im höheren sichtbaren Bereich als auch im infraroten Bereich, welcher signifikant für die Messungen bei Nacht ist, messen kann, ist weitaus höher als die des Operational Linescan Systems.

Aufgrund der großen technischen Unterschiede und der eindeutig besseren Auflösung und Empfindlichkeit vom DNB, werden die nächtlichen Satellitenaufnahmen von VIIRS den Datensatz für die vorliegende Bachelorarbeit liefern. Dieser Datensatz umfasst ein Satellitenbild der gesamten Erde bei Nacht. Dieses zu untersuchende Satellitenbild ist eine Zusammenstellung aus 312 Umläufen der Erde. Es fasst die wolkenlosen Nächte ohne Mondlicht aus den Beobachtungszeiträumen vom 18. – 26. April 2012 und vom 11. – 23. Oktober 2012 zusammen. Dieses Satellitenbild ist außerdem auch die erste globale Zusammenstellung der Welt über die Lichter in der Nacht von VIIRS (bereits gezeigt in Abb. 2) (NOAA (2014)). Die folgende Abbildung 16 verdeutlicht sehr genau wie intensiv VIIRS mit seinem Day/Night Kanal das künstliche Licht in der Nacht detektieren kann. Es wird deutlich, dass es mithilfe dieser Aufnahmen möglich ist, eine Georeferenz durchzuführen, um somit herauszufinden, welche Orte einer Stadt sich im Einzelnen hinter den extremen nächtlichen Lichtquellen verbergen.



Abb. 16: Aufnahme des DNB vom Messinstrument VIIRS: künstliche Lichter der Nacht über Europa und Nordafrika (Zoom Weltkarte (Abb. 2), NOAA (2014))

### 3.3. Berlin bei Nacht

Um zu zeigen, dass es mithilfe der Satellitenaufnahmen von VIIRS möglich ist die extremen Lichtquellen einer Stadt zu ermitteln, wurde in die vorangehende Abbildung 16 hinein gezoomt. Beispielsweise erhält man somit das nachstehende Satellitenbild (Abbildung 17) von der deutschen Hauptstadt Berlin bei Nacht.

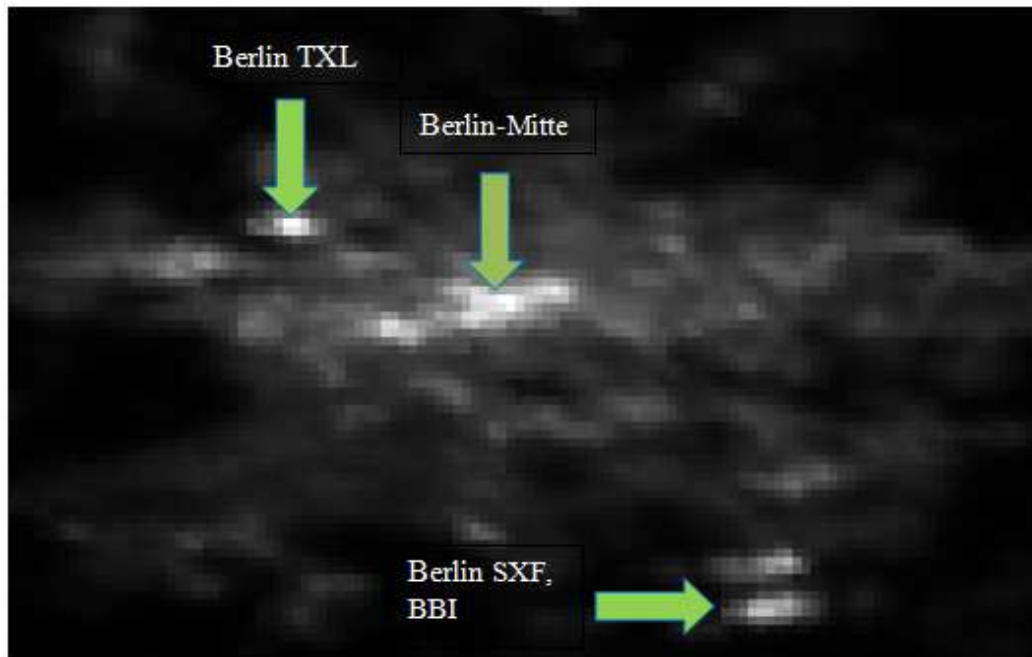


Abb. 17: Satellitenbild des Suomi NPP: die hellsten Orte Berlins bei Nacht, drei Beispielorte (Berlin TXL, Berlin-Mitte, Berlin SXF/BBI) wurden gekennzeichnet (Kyba, C. (2013))

Mit einer Auflösung von 750m (Miller, S. D. et al. (2013)) liefert diese Aufnahme sehr genaue Informationen über die hellsten, künstlich beleuchteten Orte von Berlin. Nachdem eine Georeferenz durchgeführt wird, kann man diese hell erleuchteten Orte auch beim Namen nennen. Folglich besteht die Möglichkeit mithilfe dieser Satellitenaufnahmen, des 2011 in Umlauf gegangenen Suomi NPP (Miller, S. D. et al. (2013)), herauszufinden, was sich hinter den Lichtquellen verbirgt. Zu den hellsten Orten Berlins gehören beispielsweise Berlin-Mitte, Berlin-TXL und Berlin SXF/BBI (siehe Abb. 17).

Abbildung 18 zeigt eine Aufnahme von Berlin bei Nacht, erstellt von der älteren Satellitengeneration DMSP-OLS. Mithilfe dieser Abbildung ist es wiederum möglich einen Vergleich zwischen den nächtlichen Aufnahmen von VIIRS und dem OLS der DMSP-Satelliten aufzuzeigen.

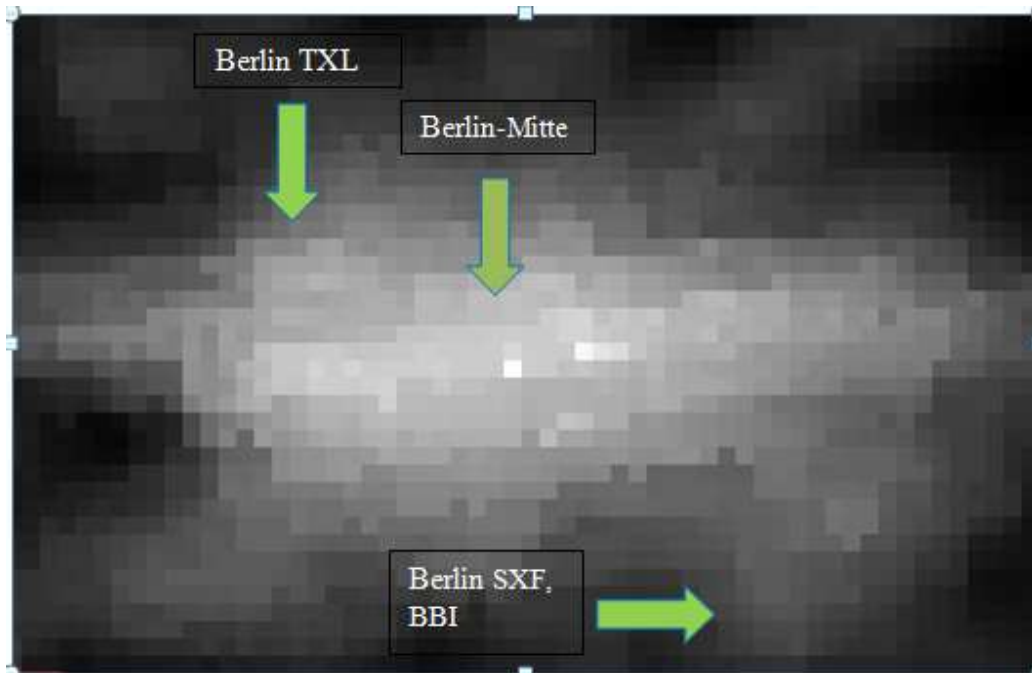


Abb. 18: Satellitenbild des DMSP-Satelliten: Berlin bei Nacht, die hellsten Orte Berlins sind nicht erkennbar, die drei Beispielorte (Berlin TXL, Berlin-Mitte, Berlin SXF/BBI) wurden zum besseren Vergleich gekennzeichnet (Kyba, C. (2013))

Mit einer Auflösung von 2700m (Miller, S. D. et al. (2013)) ist die Auflösung des OLS ca. viermal schlechter als die der Satellitenbilder des DNB von VIIRS. Demzufolge liefert die Aufnahme in Abbildung 18 sehr ungenaue Informationen für die Untersuchung von einzelnen Lichtquellen dieser Stadt. Folglich ist es nicht möglich die hellsten Orte von Berlin genau und eindeutig zu bestimmen. Um diese Erkenntnis bildlich zu verdeutlichen, wurden in der Abbildung 18 ebenso die drei hellsten Orte Berlin TXL, Berlin-Mitte und Berlin SXF/BBI eingetragen. Diese sind jedoch auf dieser Abbildung anhand ihrer Helligkeit nicht erkennbar, da laut der Aufnahme viele andere Orte in Berlin viel heller zu sein scheinen. Zudem können die Lichtquellen auf diesem Bild generell kaum unterschieden und einzeln erkannt werden, da nur ein einziger großer heller Lichtfleck mit vereinzelt Ausnahmen dargestellt ist.

Erneut feststellend ist zu sagen, dass die Bilder der DMSP-Satelliten aufgrund der schlechten Auflösung für die Untersuchung von den hellsten Lichtquellen ungeeignet sind und deswegen alle weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit mithilfe der VIIRS-Aufnahmen des Suomi NPP stattfinden werden. Dennoch basieren damalige mehrere hunderte Veröffentlichungen auf den Daten der DMSP-Satelliten, da die Daten des Suomi NPP erst seit kurzer Zeit für die Forschung verwendet werden können.

## 4. Analyse

### 4.1. Arbeitsziele und Methoden

Mittels der Satellitenaufnahmen des Day/Night Bands von VIIRS ist es möglich, die hellsten Orte verschiedener Städte der Erde zu bestimmen, um gezielt mittels Reduzierungsmaßnahmen gegen die künstliche Aufhellung der Nacht vorzugehen. Das Bestimmen der hellsten Orte ist auch das erste Arbeitsziel dieser vorliegenden Bachelorarbeit. Dazu wurden zwei Kategorien von Städten ausgewählt. Zu den untersuchenden Städten gehören die 46 Hauptstädte Europas und die 30 Megacities der Erde. Um diese 76 Städte auf ihre Helligkeit zu untersuchen, kann das Satellitenbild der Erde bei Nacht mithilfe von ENVI geöffnet, bearbeitet und ausführlich analysiert werden. Nachdem die Koordinaten einer ausgewählten Stadt (<http://tools.wmflabs.org>) in dem Location-Cursor von ENVI eingetragen wurden, konnte diese gefunden und mittels Zoom in ihre Helligkeitspixel, welche jeweils eine Fläche von 750m x 750m (Miller, S. D. et al. (2013)) eingrenzen, aufgelöst werden. Der sogenannte Pixel-Cursor von ENVI ermittelt die Helligkeit jedes einzelnen Pixels, folglich ist es möglich den allerhellsten Ort der jeweiligen Stadt ausfindig zu machen. Die Helligkeit der Pixel wird in Form einer digitalen Nummer mit der Einheit  $nW/(cm^2 \times sr)$  angegeben (NOAA (2014)). Somit kann auch das zweite Arbeitsziel, welches die Frage beinhaltet, wie hell der am meisten beleuchtete Ort einer Stadt wirklich ist, bearbeitet werden. Der größte Beleuchtungswert einer Stadt wird in der nachfolgenden Auswertung als Peak Radiance bezeichnet.

Ein weiterer Punkt dieser Arbeit galt der Untersuchung, ob die extreme Helligkeit der hellsten Orte der 76 ausgewählten Städte von bestimmten Faktoren wie dem Entwicklungsstand der Länder, der Einwohnerzahl oder der Lage der Stadt abhängig ist.

Zusätzlich gibt der Pixel-Cursor auch die Koordinaten jedes einzelnen Pixels an. Mittels der Koordinaten der hellsten Orte auf dem Satellitenbild kann nun eine Georeferenz durchgeführt und schließlich die Frage des vierten Arbeitsziels, was sich hinter den allerhellsten Ort einer Stadt verbirgt, beantwortet werden. Im Fall dieser Bachelorarbeit wurde mit dem virtuellen Globus Google-Earth gearbeitet. Die durch den Pixel-Cursor ermittelten Koordinaten wurden in Google-Earth eingetragen. Folglich konnte der hellste Ort einer Stadt ausfindig gemacht werden. Da die Suchnadel des virtuellen Globus nicht immer direkt auf ein Gebäude oder ein Platz, welcher vermutlich hell erleuchtet sein könnte, sondern teilweise direkt in einem Wald oder Feld eintraf, wurde in einem Umkreis von einem bis zwei Kilometern der Suchnadel nach einem Ort gesucht, der möglicherweise die Ursache der hellen künstlichen Beleuchtung darstellen könnte. Mithilfe dieser Georeferenz konnte der Fehler von VIIRS und somit die räumliche Genauigkeit der Satellitenbilder untersucht werden, da die Koordinaten des Satellitenbildes nicht immer exakt mit den Koordinaten von Google-Earth übereinstimmten. Die maximale räumliche Distanz zwischen den hellsten Punkten auf dem Satellitenbild und den zugehörigen Lichtquellen, die Google-Earth lieferte, lag bei rund 2,7 km. Diese „große“ Distanz ist jedoch nur einmal aufgetaucht. Alle weiteren räumlichen Distanzen fielen weitaus

geringer aus (siehe Anhang 9.4.). Demzufolge liefert VIIRS, trotz der minimalen Unterschiede, ziemlich exakte Werte. Nachdem die Lichtquellen der hellsten Orte der ausgewählten Städte mittels Google-Earth festgestellt werden konnten, wurde ein Vergleich zwischen den hellsten Lichtquellen der europäischen Hauptstädte und der Megacities gezogen.

Da bekannt ist, dass Flughäfen sehr hell beleuchtet sind, besteht ein zusätzliches Ziel dieser Arbeit darin, die Peak Radiance der zehn größten Flughäfen nach Passagieraufkommen weltweit, mithilfe des Satellitenbildes von VIIRS zu ermitteln und die Helligkeiten dieser Flughäfen untereinander zu vergleichen.

## 4.2. Megacities

Eine Megacity oder Megastadt ist eine Stadt mit mindestens zehn Millionen Einwohnern. Alternativ wird auch ein megaurbaner Raum, wie z.B. das Rhein-Ruhr-Gebiet, als Megacity bezeichnet. Auf der Erde existieren momentan 30 Megastädte (World Urbanization Prospects (2011)). Mithilfe der nächtlichen Satellitenaufnahmen konnten die Peak Radiances dieser 30 Städte untersucht und analysiert werden. Vorerst wird jedoch nur die Helligkeit dieser hellsten Orte aufgezeigt und es erfolgt eine Untersuchung, inwiefern eine Abhängigkeit zwischen der Peak Radiance der Megacities und den Einwohnerzahlen (World Urbanization Prospects (2011)) oder dem Entwicklungsstand der Länder (Malik, K. (2013)) der Megacities vorliegt. Im Anschluss werden die Ursachen der Lichtquellen, welche sich hinter den hellsten Orten der Megacities verbergen, präsentiert.

### 4.2.1. Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und den Einwohnerzahlen der Megacities

Zunächst stellt das nachstehende Diagramm 1 die 30 Megastädte der Erde dar. Die Städte sind absteigend nach der Anzahl ihrer Einwohner sortiert und werden in vier Gruppen unterteilt. Zu der ersten Gruppe, durch die schwarzen Balken gekennzeichnet, gehören die Städte mit mehr als 25 Millionen Einwohnern. Die Städte mit 20-25 Millionen Einwohnern werden durch die blauen und die Städte mit 15-20 Millionen Einwohnern durch die hellblauen Balken kenntlich gemacht. Abschließend stellen die roten Balken die Megastädte mit den wenigsten Einwohnern, 10-15 Millionen, dar.

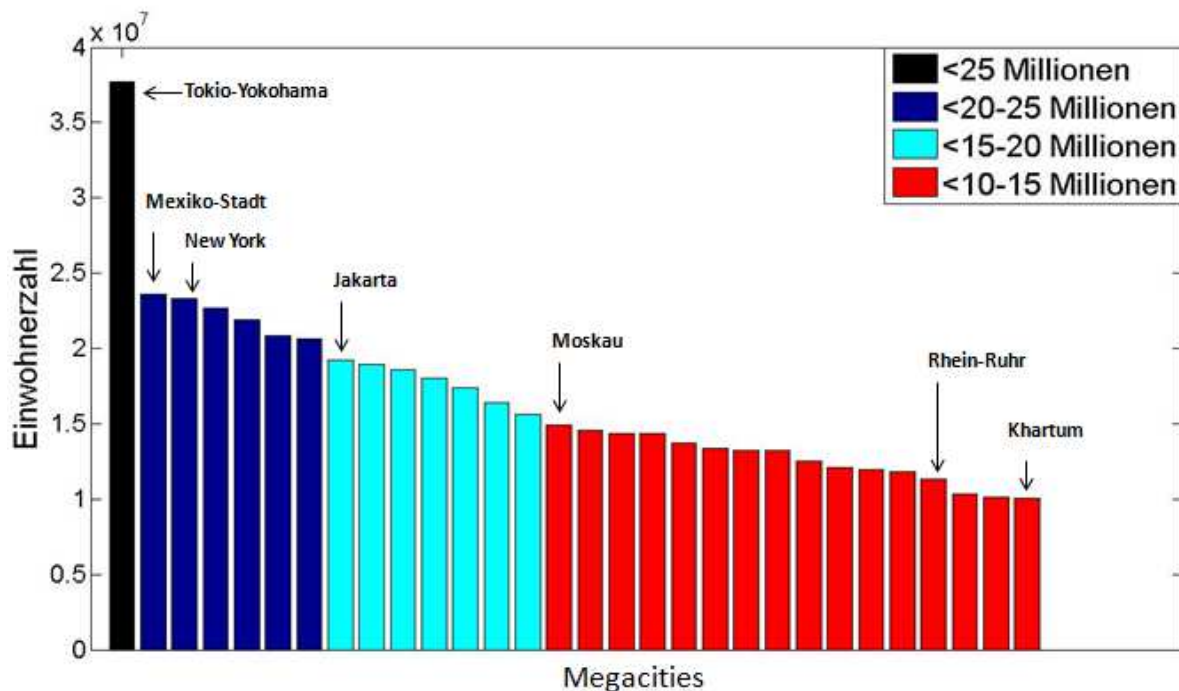


Diagramm 1: Balkendiagramm, 30 Megacities absteigend nach Einwohnerzahlen sortiert



Einzelne Städte werden im Diagramm 1 namentlich erwähnt (detaillierte Zuweisung siehe Anhang 9.1.), um einen Überblick zu bekommen, welche Städte mit mehr als zehn Millionen Einwohnern zu den Megacities dieser Welt gehören. Tokio-Yokohama gehört mit mehr als 37 Millionen Bewohnern zu den Städten mit der größten Anzahl an Einwohnern weltweit. Mexiko-Stadt und New York folgen mit 20-25 Millionen Einwohnern an zweiter und dritter Stelle. Das Schlusslicht der Megacities bildet die Hauptstadt des Sudans, Khartum, mit etwas mehr als zehn Millionen Einwohnern.

Nachdem die Helligkeitspixel der Megastädte in den Satellitenaufnahmen untersucht und folglich die allerhellsten Orte ausfindig gemacht wurden, werden nun den 30 Städten aus Diagramm 1 die Peak Radiances zugeordnet (siehe Diagramm 2). Sie bleiben weiterhin absteigend nach ihren Einwohnerzahlen sortiert.

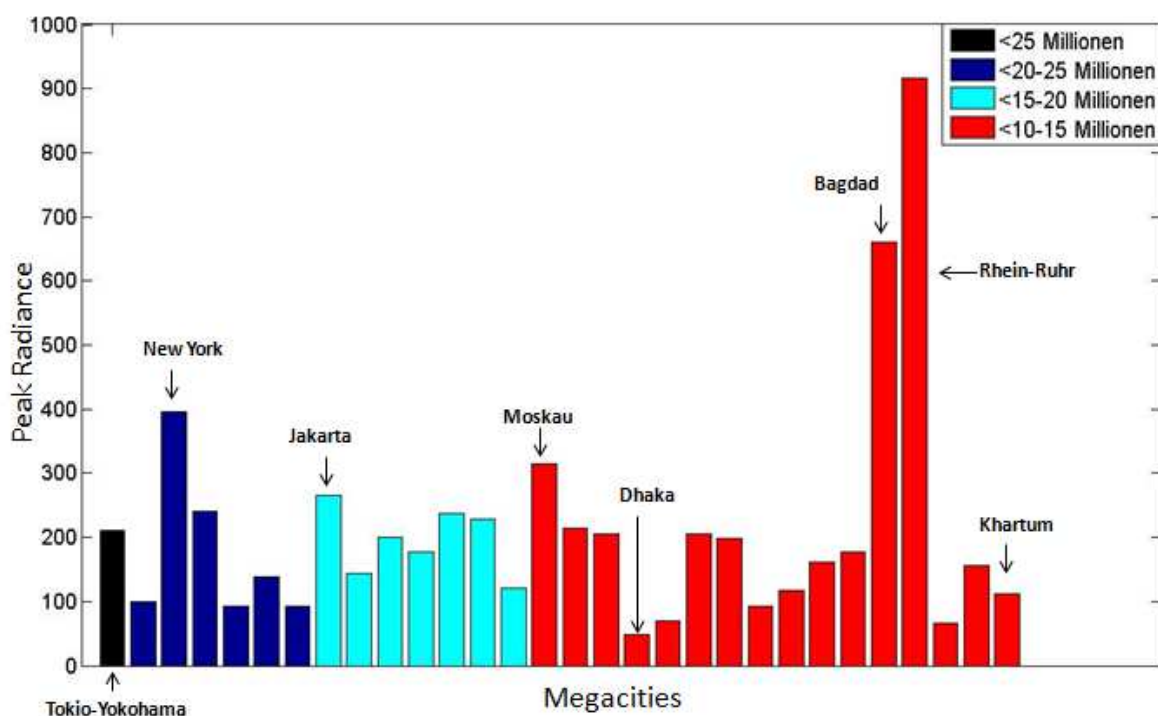


Diagramm 2: Balkendiagramm, Peak Radiance der 30 Megacities (in Form einer digitalen Nummer angegeben, Einheit  $nW/(cm^2 \times sr)$ )

In Diagramm 2 repräsentiert die x-Achse die Megacities und die y-Achse deren Peak-Radiances, ermittelt durch den Pixel-Cursor von ENVI. Das Rhein-Ruhr Gebiet weist mit einer absoluten Helligkeit von mehr als  $900 nW/(cm^2 \times sr)$  den allerhellsten Ort der 30 untersuchten Megastädte auf. Im Gegensatz zu Dhaka, der Hauptstadt von Bangladesch, als „dunkelsten hellsten Ort“, ist der hellste Punkt des Rhein-Ruhr Gebietes um mehr als das 19-fache heller erleuchtet. Tokio-Yokohama, die Stadt mit den meisten Einwohnern, besitzt eine Peak Radiance von etwas mehr als  $200 nW/(cm^2 \times sr)$ , wohingegen New Yorks hellster Ort fast doppelt so hell beleuchtet ist. Bagdad weist mit einer Helligkeit von mehr als  $600 nW/(cm^2 \times sr)$  den zweithellsten Ort aller 30 Megastädte auf.

Die Städte aus Diagramm 2 werden nun nach der Peak Radiance sortiert, dabei bleiben sie jedoch weiterhin in ihren jeweiligen Einwohnerkategorien eingefärbt (siehe nachfolgendes Diagramm 3). Mithilfe des Ordners der Städte nach den allerhellsten Orten kann nun untersucht werden, inwiefern eine Abhängigkeit zwischen der Peak Radiance und der Einwohnerzahl einer Megastadt vorliegt.

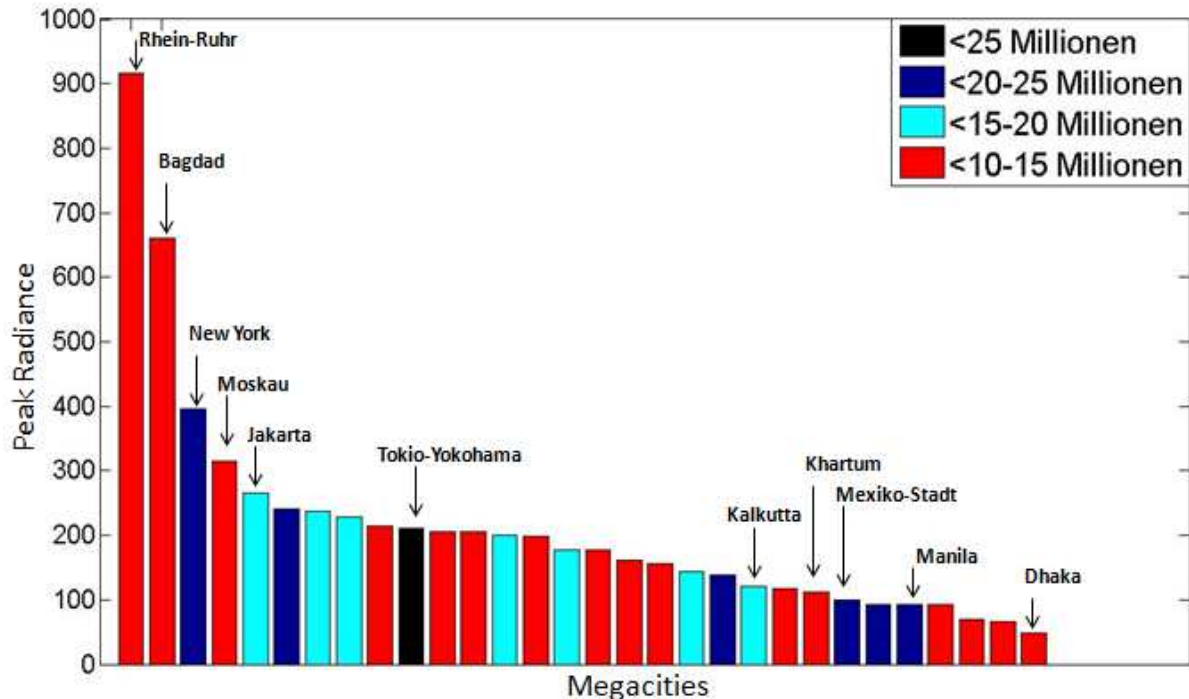


Diagramm 3: Balkendiagramm, 30 Megacities geordnet nach ihrer Peak Radiance

Das Diagramm 3 zeigt, dass das Rhein-Ruhr Gebiet, Bagdad und New York die weitaus am hellsten beleuchteten Orte besitzen, jedoch gehören vor allem die beiden erstgenannten Städte mit zu den Städten, die die wenigsten Einwohner umfassen (rot: <10-15 Millionen Einwohner). Die Stadt mit mehr als 25 Millionen Einwohnern Tokyo-Yokohama liegt dagegen mit ihrer Helligkeit erst an zehnter Stelle bei der Gegenüberstellung der hellsten Orte der 30 untersuchten Megacities. In Diagramm 3 ist weiterhin zu erkennen, dass die zwei Städte mit der höchsten Peak Radiance zur Kategorie der wenigsten Einwohnerzahlen gehören, genauso wie die vier mit der niedrigsten Peak Radiance, beispielsweise Dhaka. Die anderen rot eingefärbten Megastädte liegen verteilt mit ähnlich hohen Helligkeitswerten im Mittelfeld der Gegenüberstellung. Auch bei den Städten mit 20-25 Millionen Einwohnern (dunkelblau) lässt sich keine Gemeinsamkeit feststellen. Zwei dieser Städte besitzen eine hohe Peak Radiance, während die weiteren vier Städte, u.a. Manila, eine niedrige Peak Radiance aufweisen. Eine ähnliche Verteilung lässt sich auch bei den Städten mit 15-20 Millionen Einwohnern (hellblau) bemerken. Jakarta liegt mit einer sehr hohen Helligkeit an fünfter Stelle aller Megacities und im Vergleich dazu gehört Kalkutta mit einem weitaus „dunkleren hellsten Ort“ zu den zehn Städten mit der niedrigsten Peak Radiance. Die anderen hellblauen Städte sind ebenfalls im Mittelfeld verteilt vorzufinden. Feststellend ist zu sagen, dass sich mithilfe des dritten Diagramms keine große Abhängigkeit zwischen der Peak Radiance und der Einwohnerzahl der

Megastädte ableiten lässt. Diese Unabhängigkeit wird auch noch einmal im nachfolgenden Diagramm 4 dargestellt.

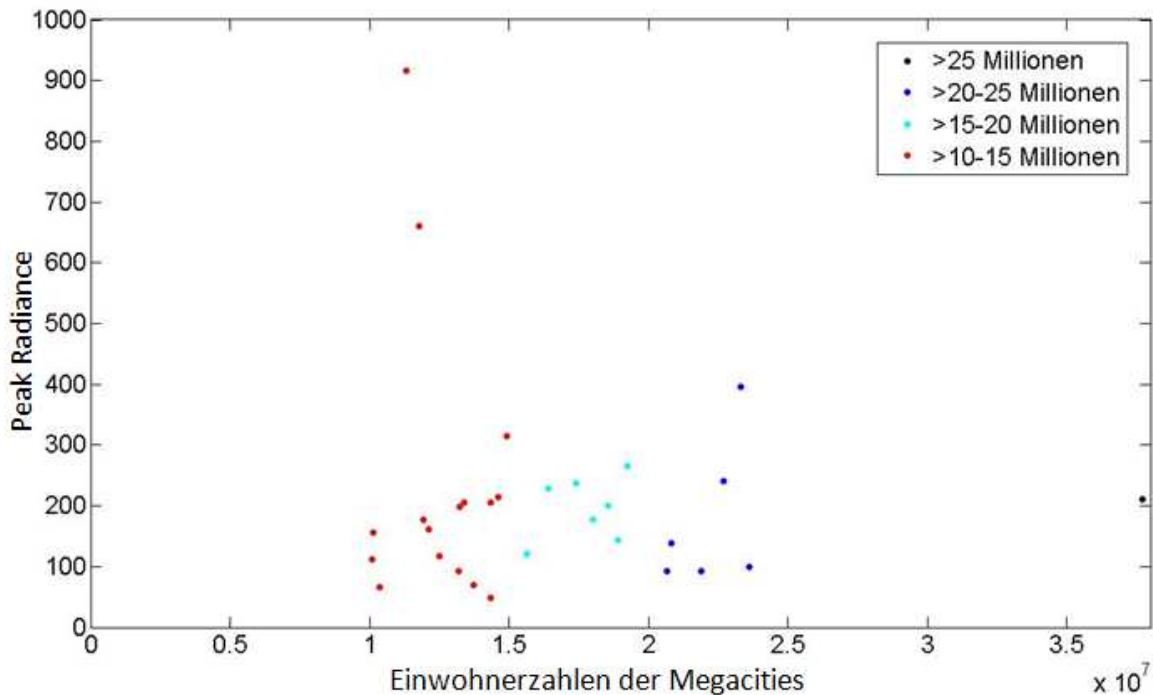


Diagramm 4: Scatterplot zum Verhältnis der Peak Radiance zur Einwohnerzahl der Megacities

Das Diagramm 4 veranschaulicht den nicht vorhandenen linearen Zusammenhang zwischen den Einwohnern und den hellsten Orten der Megacities. Aufgrund der sehr gestreuten Punktwolke ist bereits auf den ersten Blick kein linearer Zusammenhang erkennbar. Somit wird noch einmal deutlich, dass die Megastadt mit den meisten Einwohnern nicht den allerhellsten Ort und die Stadt mit den wenigsten Einwohnern nicht den „dunkelsten hellsten Ort“ im Vergleich zu den anderen untersuchten Megastädten besitzt. Der berechnete lineare Korrelationskoeffizient, zwischen der Peak Radiance und den Einwohnerzahlen der Megacities, von -0,1 bestätigt auf den zweiten Blick die Aussage, dass kein linearer Zusammenhang besteht. Anlässlich dieser Feststellung wurde geprüft ob sich ein einfacher logarithmischer Zusammenhang erkennen lässt. Doch auch der einfach-logarithmische Korrelationskoeffizient von 0,03 zeigt, dass die hellsten Orte und die Einwohnerzahlen der Megastädte nicht miteinander korrelieren und folglich auch keine exponentielle Abhängigkeit zwischen den beiden Größen besteht. Die Aussagekraft beider berechneten Korrelationskoeffizienten wurde mithilfe eines Signifikanztests überprüft. Der Signifikanzwert (p-Wert) ist in beiden Fällen sehr klein und geht stark gegen Null. Das bedeutet, dass die Korrelationskoeffizienten gegen die Nullhypothese sprechen und diese folglich verworfen wird. Dies bedeutet wiederum, dass beide Korrelationskoeffizienten statistisch signifikante Werte liefern.

#### 4.2.2. Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und dem zugehörigen Entwicklungsstand der Länder der Megacities

Aufgrund dessen, dass sich im vorangegangenen Kapitel keine Abhängigkeit zwischen der Peak Radiance und den Einwohnerzahlen der Megastädte feststellen lässt, wird nun in diesem Kapitel der Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und dem Entwicklungsstand des Landes einer Megastadt untersucht. Dazu wurden die Megastädte den Ländern zugeordnet, in denen sie sich befinden. Mithilfe des Human Development Index (HDI) ist es möglich den Entwicklungsstand (Industrie-, Schwellen-, Entwicklungsland) eines Landes zu erfahren (Malik, K. (2013)). 15 der untersuchten Megastädte gehören einem Industrieland an, zehn weitere einem Schwellenland und fünf Megastädte befinden sich in einem Entwicklungsland. Im nachstehenden Diagramm 5 wird den Megacities wiederum die Helligkeit ihrer hellsten Orte zugeordnet. Diesmal jedoch sind die Megacities entsprechend dem Entwicklungsstand des zugehörigen Landes eingefärbt.

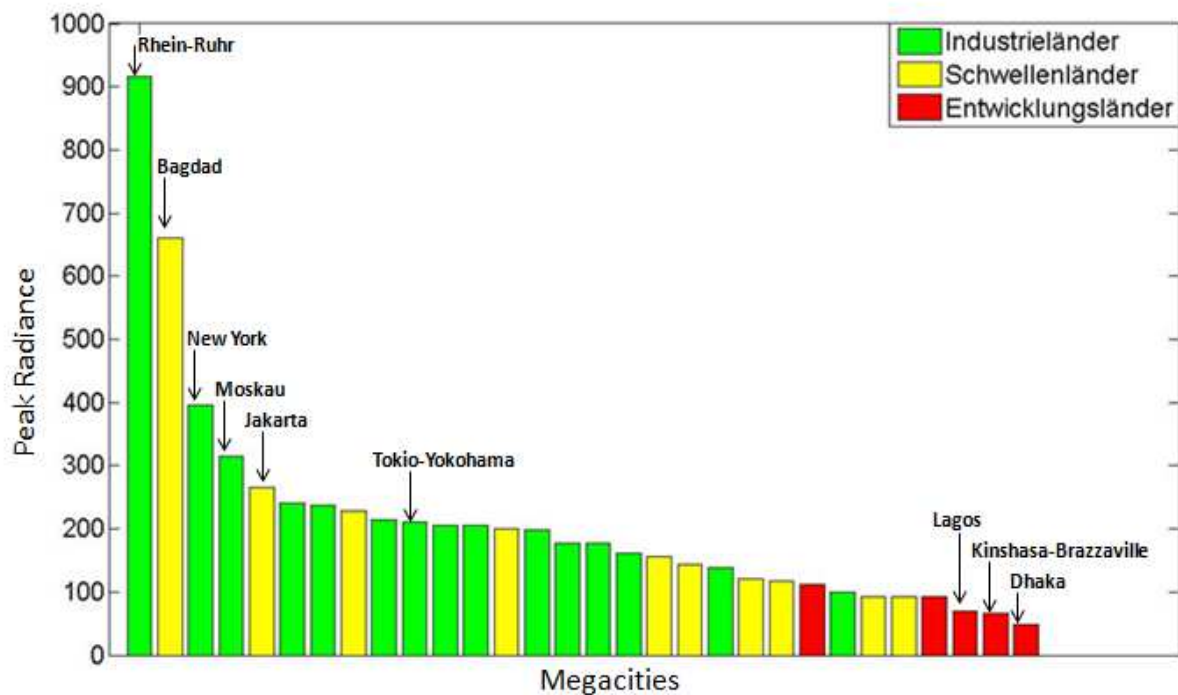


Diagramm 5: Balkendiagramm zum Verhältnis der Peak Radiances zu den Megacities, eingefärbt nach Entwicklungsstand

Von den ersten 17 Städten, ausgenommen Bagdad, Jakarta, Kairo und Shanghai, gehören 13 einem Industrieland an und weisen die allerhellsten Orte der 30 untersuchten Megacities auf. Zu diesen Städten gehören unter anderem das Rhein-Ruhr Gebiet, New York, Moskau und Tokio-Yokohama. Bagdad, Jakarta, Kairo und Shanghai befinden sich in den Schwellenländern Irak, Indonesien, Ägypten und China und bilden mit der hohen Peak Radiance Ausnahmen im Gegensatz zu den sechs anderen Städten in Schwellenländern, welche überwiegend sehr „dunkle hellste Orte“ aufzeigen. Lagos, Kinshasa-Brazzaville und Dhaka, befindlich in den Entwicklungsländern Nigeria, der Demokratischen Republik Kongo und Bangladesch, bilden das untere Ende in Diagramm 5 und weisen folglich die „dunkelsten hellsten Orte“ im

Vergleich zu allen weiteren Megacities auf. Bei unmittelbarer Betrachtung des fünften Diagramms ist ein Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und dem Entwicklungsstand der Länder der Megastädte erkennbar. Die meisten Megastädte mit einer hohen Peak Radiance gehören einem Industriestaat an. Die Megastädte, welche in einem Schwellenland zu finden sind, weisen eine mittlere bis niedrige Peak Radiance auf, während die fünf Städte der Entwicklungsländer, die schwächste Peak Radiance besitzen. Es wurde festgestellt, dass eine Abhängigkeit zwischen der Helligkeit der hellsten Orte einer Megastadt und dem Entwicklungsstand des zugehörigen Landes vorliegt. Aufgrund dessen, dass die hellsten Orte der Megastädte der Industrie- und Schwellenländer im Vergleich zu den Megastädten der Entwicklungsländer deutlich höher sind, tragen diese, nur allein schon durch das Ausmaß ihrer sehr hellen Orte, mehr zu den Lichtglocken dieser Städte bei als die Megastädte der Entwicklungsländer.

Diese Feststellung wird noch einmal mithilfe einer linearen und einfach-logarithmischen Korrelation zwischen der Peak Radiance und dem Entwicklungsstand überprüft. Das folgende Diagramm 6 zeigt den linearen Zusammenhang beider Größen.

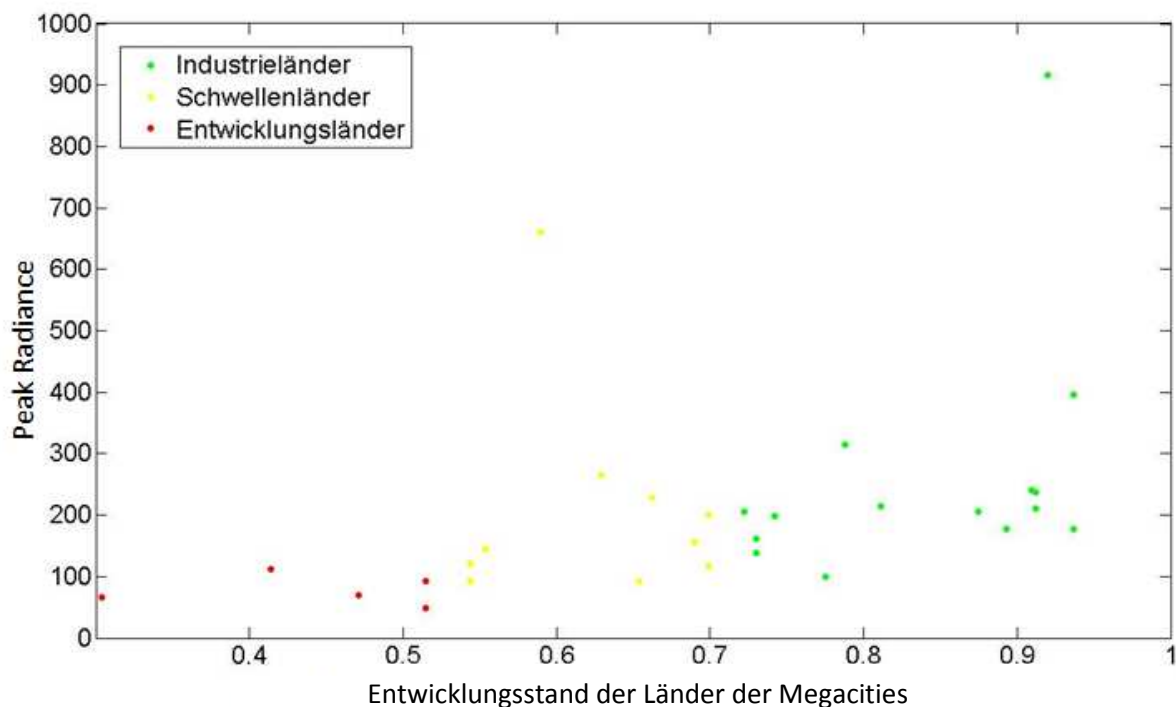


Diagramm 6: Scatterplot des Verhältnisses der Peak Radiance zum Entwicklungsstand der Länder der Megacities

Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,41 ist durchaus eine lineare Abhängigkeit zwischen den beiden Größen vorhanden. In Diagramm 6 ist unmittelbar erkennbar, dass die Megastädte der Entwicklungsländer (rot) eine weitaus schwächere Peak Radiance aufweisen als die der Schwellen- (gelb) und Industrieländer (grün). Analog dazu zeigt das Diagramm, dass die Helligkeit der hellsten Orte der Megastädte, befindlich in Schwellenländern, überwiegend „dunkler“ ist als die der Städte der Industrieländer, aber auch eindeutig „heller“ als

die der Entwicklungsländer. Zusätzlich zu der linearen Abhängigkeit wurde auch noch eine einfach-logarithmische Abhängigkeit zwischen den beiden Größen untersucht. Mit einem berechneten Korrelationskoeffizienten von 0,61 wird sogar ein größerer einfachlogarithmischer als linearer Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und den Entwicklungsständen der Länder der Megacities festgestellt, was bedeutet, dass diese beiden Größen eher exponentiell voneinander abhängig sind. Der Wert des linearen Korrelationskoeffizienten wird nach der Überprüfung auf Signifikanz als statistisch signifikant eingestuft, da der P-Wert auch in diesem Fall stark gegen 0 geht. Selbiges trifft auch auf den einfach-logarithmischen Korrelationskoeffizienten zu.

#### 4.2.3. Die hellsten Orte der Megacities

Nachdem die Peak Radiance der 30 Megacities ermittelt und diverse Zusammenhänge zwischen der Peak Radiance und den Einwohnerzahlen der Megastädte sowie dem Entwicklungsstand der Länder der Megacities untersucht worden sind, folgt nun in diesem Kapitel die Antwort auf die Frage, welche Beleuchtungsquellen sich hinter den hellsten Orten dieser Städte verbergen. Wie bereits im Kapitel 4.1 der Arbeitsmethodik erwähnt, wurde die Zuweisung der Beleuchtungsursache zu den hellsten Orten mit dem virtuellen Globus Google-Earth vorgenommen. Das Programm ENVI lieferte hierfür die Koordinaten. Schließlich lässt sich nach der Georeferenz das nachfolgende Diagramm 7, welches die verantwortlichen Beleuchtungsquellen für die allerhellsten Orte der 30 Megastädte prozentual aufzeigt, darstellen.

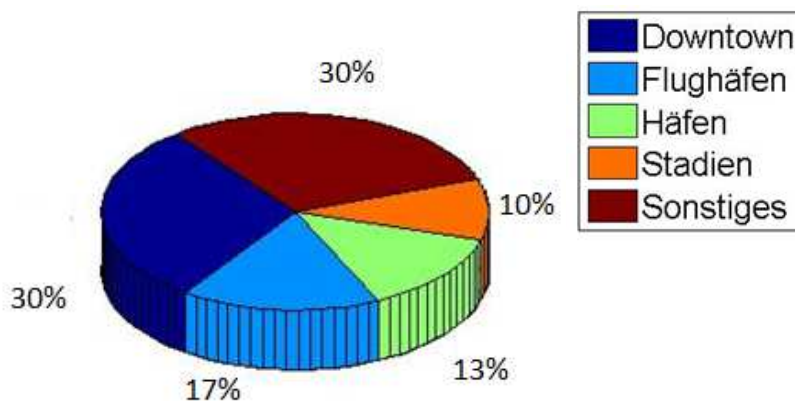


Abb. 7: Kreisdiagramm über die prozentuale Verteilung der Beleuchtungsquellen der Megacities

Das Stadtzentrum (dunkelblau) mit seiner hohen Helligkeit liefert in 30% der Megastädte den allerhellsten Ort. Moskau, New York, Bangkok, Kinshasa-Brazzaville und Mexiko-Stadt sind beispielsweise Megastädte in denen das Stadtzentrum den hellsten Ort widerspiegelt. Weitere 30% der Megastädte besitzen Gewerbegebiete, Fabriken, Öl-Raffinerien, Bahnhöfe oder Sehenswürdigkeiten, unter Sonstiges (weinrot) zusammengefasst, als hellsten Ort. Zu diesen Megacities gehören unter anderem Bagdad, Tokio-Yokohama und Jakarta. Der hellste Ort des Rhein-Ruhr-Gebiets, also auch der allerhellste Ort aller 30 untersuchten Megastädte, gehört ebenfalls in diese Kategorie. Genauer gesagt wird diese enorm hohe Peak Radiance durch Industriefabriken verursacht. In 17% der Megastädte ist der Flughafen (hellblau) am stärksten

beleuchtet. Manila, Mumbai und Dhaka sind beispielsweise Megastädte, in denen der Flughafen am hellsten beleuchtet wird und folglich zu einem großen Anteil zur Lichtglocke über diesen Städten beiträgt. In 13% der Megastädte ist der Hafen (grün), der am hellsten beleuchtete Ort, also derjenige, welcher die Peak Radiance dieser Städte aufzeigt. Dazu gehören Städte wie Shanghai, Buenos Aires und Lagos. Diverse Sportstadien (orange) bilden in den letzten 10% der Megacities die hellsten Orte. Diese durch die Beleuchtung von Stadien verursachten hellsten Orte sind in den Megastädten Peking, London und Seoul vorzufinden.

Im Anschluss an die in Diagramm 7 dargestellte prozentuale Betrachtung der Beleuchtungsquellen der hellsten Orte, erfolgt nun in Diagramm 8 eine absolute Betrachtung jener Quellen.

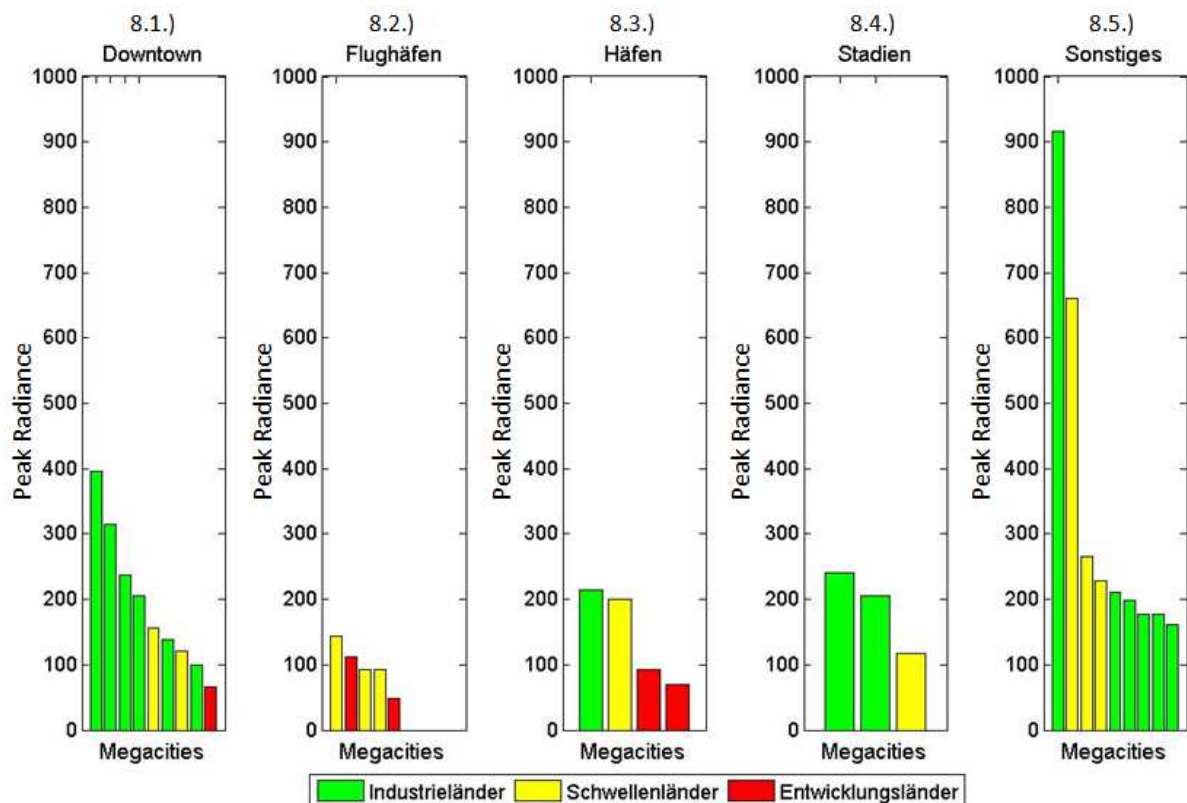


Diagramm 8: Balkendiagramme zur Einteilung der Beleuchtungsursachen, Verhältnis von Peak Radiance zu den Megacities

Das Diagramm 8.1. zeigt die neun Megastädte, in denen das Stadtzentrum am hellsten beleuchtet ist. Die Städte mit den höchsten Helligkeiten gehören zum größten Teil Industrieländern an. Die Megastadt mit der niedrigsten Peak Radiance des Stadtzentrums befindet sich dagegen in einem Entwicklungsland. Im Diagramm 8.2. ist zu erkennen, dass lediglich fünf Megastädte innerhalb eines Schwellen- oder Entwicklungslandes einen Flughafen als hellsten Ort besitzen. Der weitaus am hellsten beleuchtete Flughafen dieser fünf Städte befindet sich in einem Schwellenland. Dieser Flughafen ist ca. dreimal so hell beleuchtet wie der Flughafen, welcher die niedrigste Peak Radiance aufweist und einem Entwicklungsland angehört. Die vier Städte mit einem Hafen als hellsten Ort sind in Diagramm 8.3. dargestellt. In diesem Diagramm spiegelt sich die Abhängigkeit zwischen den hellsten Orten und dem Entwick-

lungsstand der Länder der Megacities eindeutig wieder. Die beiden Häfen der Städte in einem Industrie- und Schwellenland besitzen Peak Radiances die mehr als doppelt so hell sind wie die der beiden Häfen in den Megastädten eines Entwicklungslandes. Diagramm 8.4. zeigt, dass Stadien als hellste Orte der Megacities nur in Industrie- oder Schwellenländern vorzufinden sind. In diesem Diagramm ist zu erkennen, dass die beiden Stadien der Industrieländer weitaus heller beleuchtet sind als das Stadion eines Schwellenlandes. Die neun Megastädte im Diagramm 8.5., in denen Industriegebiete, Fabriken oder Sehenswürdigkeiten am hellsten beleuchtet sind, gehören ebenfalls nur Industrie- oder Schwellenländern an. Der weitaus am hellsten beleuchtete Ort mit der größten Peak Radiance liegt in einem Industrieland. Bevor jedoch weitere hellste Orte von Städten in Industrieländern folgen, gehören die Megastädte mit der zweit-, dritt- und viertgrößten Peak Radiance dieser Kategorie zu den Megastädten in einem Schwellenland.

Feststellend ist zu sagen, dass die meisten am hellsten beleuchteten Orte der Megastädte entweder die Stadtzentren dieser Städte sind oder einzelne Fabriken, Industriegebiete usw. (Sonstiges). Diese beiden Kategorien weisen auch im Gesamtvergleich größtenteils die höchsten Peak Radiances auf (siehe Diagramm 8.1. und 8.5.). Im Großen und Ganzen spiegeln diese fünf einzelnen Diagramme die Resultate der Diagramme 5 und 6 wieder. Die Megastädte, welche sich in einem Industrie- oder Schwellenland befinden, besitzen eine weitaus höhere Peak Radiance als die Megastädte von Entwicklungsländern und tragen nur aufgrund dessen mehr zu den Lichtglocken dieser Städte bei als die hellsten Orte der Megastädte, die einem Entwicklungsland angehören. Folglich ist eine Abhängigkeit zwischen dem Ausmaß der hellsten Orte und dem Entwicklungsstand der Länder der Megastädte erkennbar. Alle hellsten Orte der 30 Megastädte tragen enorm zu einem hohen Kohlenstoffdioxidausstoß und zur Lichtverschmutzung bei. Es besteht nun aufgrund des Wissens darüber, was sich genau hinter diesen hellsten Orten verbirgt, die Möglichkeit gezielt Reduzierungsmaßnahmen anzuwenden um diesen hohen Lichtausstoß und -verbrauch einzuschränken und somit der Lichtverschmutzung entgegen zu wirken. Auf diverse Reduzierungsmaßnahmen wird im nachstehenden Kapitel 5 eingegangen.



### 4.3. Hauptstädte Europas

#### 4.3.1. Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und den Einwohnerzahlen der Hauptstädte Europas

Wie auch bei den Megacities werden in diesem Kapitel mithilfe der nächtlichen Satellitenaufnahmen der Erde von VIIRS die hellsten Orte der 46 europäischen Hauptstädte untersucht. Es wird ebenfalls überprüft, ob eine Abhängigkeit zwischen der Peak Radiance und den Einwohnerzahlen der europäischen Hauptstädte vorliegt (Capital Cities of the World (2012), detaillierte Zuweisung siehe Anhang 9.2.). Das nachfolgende Diagramm 9 stellt die Helligkeit der hellsten Orte der Hauptstädte Europas in Form eines Balkendiagrammes dar.

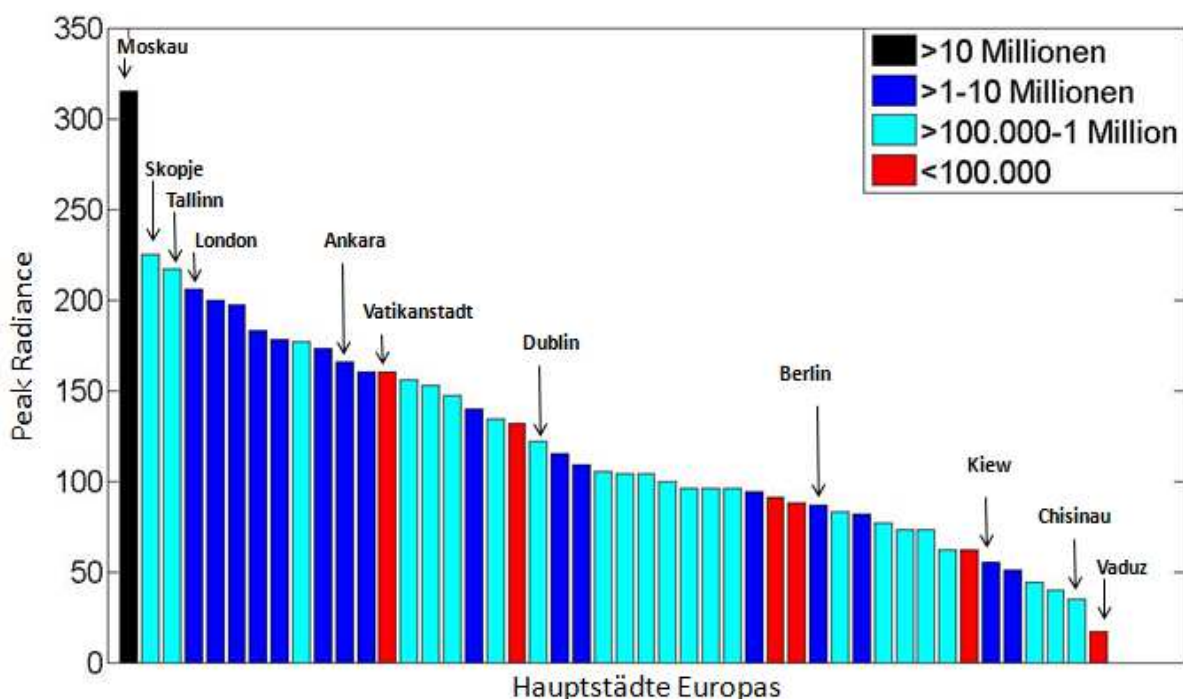


Diagramm 9: Balkendiagramm zum Verhältnis der Peak Radiance zu den Hauptstädten Europas, eingefärbt entsprechend ihrer Einwohnerzahl

Auf den ersten Blick sticht in Diagramm 9 Russlands Hauptstadt Moskau heraus. Moskau besitzt mit mehr als zehn Millionen Einwohnern (schwarz) die meisten Einwohner unter den europäischen Hauptstädten und weist mit Abstand den am stärksten beleuchteten hellsten Ort mit mehr als  $300 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \times \text{sr})$  auf. Die hellsten Orte von Skopje und Tallin, Städte mit etwas mehr als 400000 Einwohnern (hellblau), liegen mit einer hohen Peak Radiance an zweiter und dritter Stelle. Viele weitere Städte mit dieser Einwohnerkategorie, wie beispielsweise Dublin, befinden sich ansonsten mit der Helligkeit ihrer hellsten Orte im Mittelfeld des Diagramms. Die acht letzten hellblauen Städte des Diagramms, unter anderem Chisinau, zeigen mit einer schwachen Peak Radiance vergleichsweise „dunkle hellste Orte“ auf. Die meisten Städte mit ein bis zehn Millionen Einwohnern (dunkelblau) befinden sich mit hoher Helligkeit, wie z.B. London und Ankara, auf der linken Seite des Diagrammes. Berlin, Kiew und weitere vereinzelte Städte dieser Einwohnerkategorie weisen im Vergleich dazu, schwache Peak Radiances

auf. Der „dunkelste hellste Ort“ befindet sich in Liechtensteins Hauptstadt Vaduz, einer Stadt mit weniger als 100000 Einwohnern (rot). Im Gegensatz dazu ist der hellste Ort von Moskau mehr als 20-mal heller beleuchtet. Eine weitere Stadt mit weniger als 100000 Einwohnern, Vatikanstadt, weist mit ihrem hellsten Ort die höchste Peak Radiance der Hauptstädte in dieser Einwohnerkategorie auf. Insgesamt steht diese jedoch nur an 13. Stelle im Vergleich zu allen untersuchten europäischen Hauptstädten. Die weiteren vier Städte mit weniger als 100000 Einwohnern sind mit deutlich schwächerer Helligkeit eher im Mittelfeld und auf der rechten Seite im neunten Diagramm verzeichnet.

Schon allein mithilfe dieses 9. Diagramms lässt sich eine Abhängigkeit zwischen der Peak Radiance und der Einwohnerzahl der europäischen Hauptstädte vermuten, da die Stadt mit den meisten Einwohnern die höchste Peak Radiance aufweist und auch die Städte mit mehr als einer bis zehn Millionen Einwohnern die meisten hellsten Orte mit einer sehr hohen Peak Radiance besitzen. Die hellblauen Hauptstädte zeigen im Gegensatz dazu größtenteils eher „dunklere hellste Orte“ auf. Auch die hellsten Orte der Städte mit weniger als 100000 Einwohnern sind, bis auf zwei Ausnahmen, deutlich dunkler als die anderen Hauptstädte Europas. Der „dunkelste hellste Ort“ insgesamt lässt sich auch in einer Stadt dieser Einwohnerkategorie vorfinden.

Diese Vermutung der Abhängigkeit zwischen der Peak Radiance und den Einwohnerzahlen der Hauptstädte lässt sich ebenfalls mithilfe von Korrelationsberechnungen überprüfen. Der lineare Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Größen Peak Radiance und Einwohnerzahl liefert einen Wert von 0,57. Dieser Wert wird nach der Durchführung des Signifikanztests als statistisch signifikant angesehen. Somit ist tendenziell ein linearer Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen vorhanden. Auf eine Abbildung dieser linearen Korrelation wird jedoch in diesem Fall verzichtet, da die Einwohnerzahlen der europäischen Hauptstädte sich um einige Größenordnungen voneinander unterscheiden und folglich kein aussagekräftiges Diagramm erzeugt werden kann. Um dennoch die Verteilung der Werte anschaulich zu zeigen, wird anstelle des linearen Zusammenhangs ein Scatterplot mit einer logarithmierten x-Achse (Einwohnerzahlen der Hauptstädte) dargestellt. Dieser Scatterplot ist im nachstehenden Diagramm 10 zu erkennen.

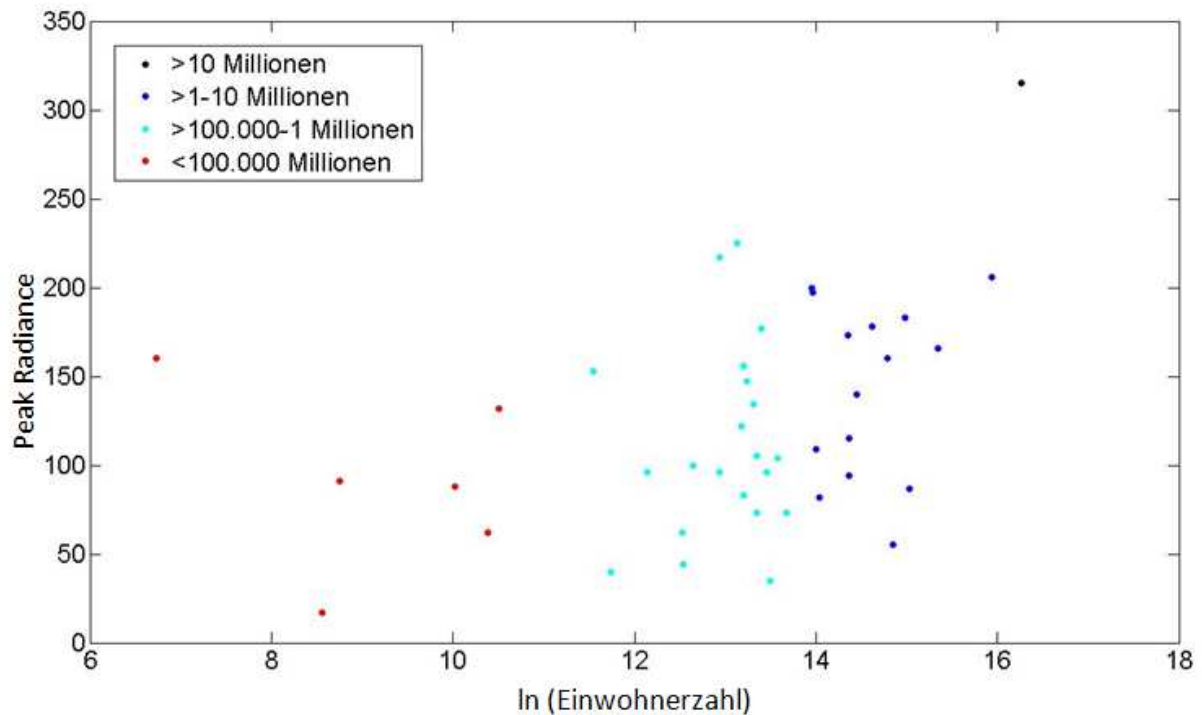


Diagramm 10: Scatterplot zur Peak Radiance der Hauptstädte Europas gegenüber dem natürlichen Logarithmus der Einwohnerzahlen der europäischen Hauptstädte

Dieser abgebildete einfach-logarithmische Zusammenhang liefert einen Korrelationskoeffizienten von 0,37. Auch dieser Wert ist aufgrund des stark gegen Null gehenden p-Wertes statistisch signifikant. Da jedoch der lineare Korrelationskoeffizient höher ist, lässt sich eher eine lineare Abhängigkeit zwischen der Helligkeit der hellsten Orte und den Einwohnerzahlen der Hauptstädte Europas feststellen als eine exponentielle Abhängigkeit.

#### 4.3.2. Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und den zugehörigen Ländergruppen der Hauptstädte Europas

Bei den europäischen Hauptstädten wurde ebenfalls ein weiterer möglicher Zusammenhang untersucht. In diesem Kapitel erfolgt eine Überprüfung ob eine Abhängigkeit zwischen der Peak Radiance der Hauptstädte Europas und den zugehörigen Ländergruppen (Westeuropa, Mitteleuropa, Nordeuropa, Osteuropa und Südeuropa (Altemüller, F. et al. (2003))) vorhanden ist. Eine Abhängigkeitsuntersuchung zwischen der Peak Radiance und dem Entwicklungsstand der zugehörigen Länder der Hauptstädte ist in diesem Fall wenig sinnvoll, da alle europäischen Staaten Industrieländer sind (Malik, K. (2013)). Das nachstehende Diagramm 11 zeigt erneut das Helligkeitsdiagramm von Diagramm 9. Doch diesmal sind die 46 Hauptstädte entsprechend der Farben ihrer zugehörigen Ländergruppen eingefärbt.

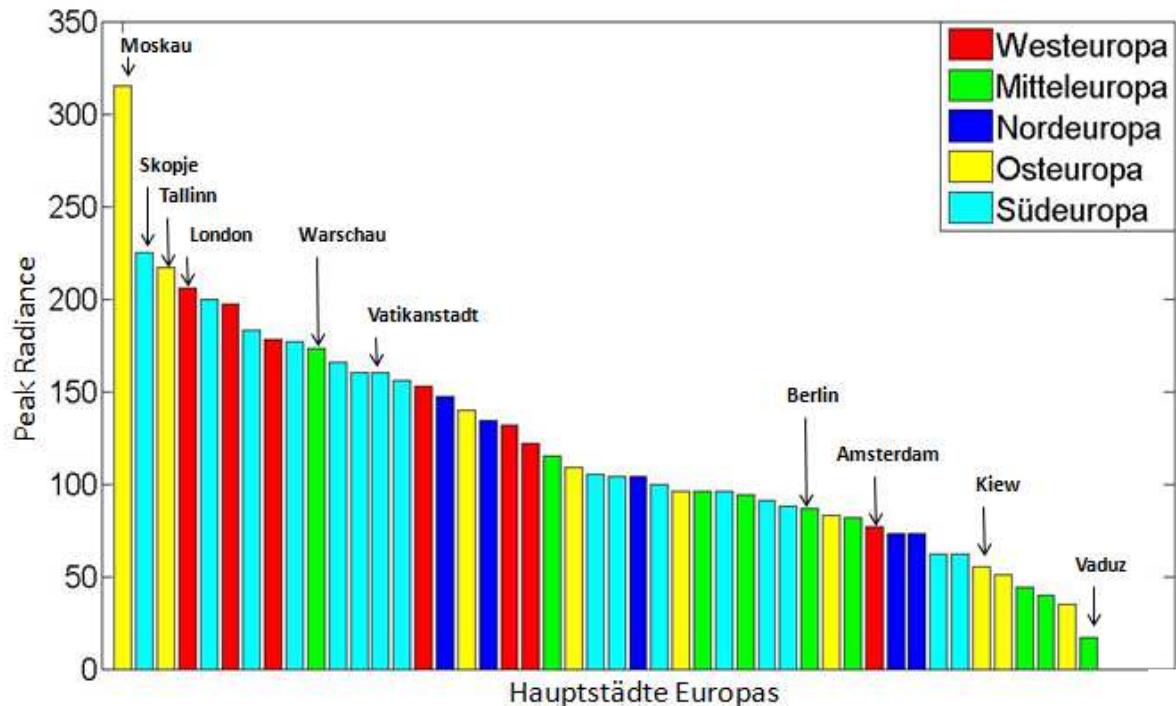


Diagramm 11: Balkendiagramm zum Verhältnis der Peak Radiance zu den Hauptstädten Europas, eingefärbt entsprechend ihrer Ländergruppen

Die hellsten Orte der osteuropäischen Städte Moskau und Tallinn besitzen die höchste und dritthöchste Peak Radiance im Vergleich zu den anderen Hauptstädten Europas. Vier osteuropäische Städte weisen mittlere Peak Radiances auf. Kiew und zwei weitere Städte dieser Ländergruppe besitzen dagegen sehr „dunkle hellste Orte“. Folglich sind die Peak Radiances der osteuropäischen Städte über die gesamte Skala verteilt. Selbige Verteilung trifft auch auf die Hauptstädte Südeuropas zu, obwohl Südeuropa ungefähr doppelt so viele Hauptstädte besitzt. Der hellste Ort von Skopje ist gleichzeitig auch der hellste Ort aller südeuropäischen Hauptstädte. Die Anzahl der südeuropäischen Städte mit einem sehr „hellen hellsten Ort“ entspricht auch ungefähr der Anzahl der Hauptstädte Südeuropas mit einer niedrigen Peak Radiance. Vatikanstadt und viele weitere Städte des europäischen Südens zeigen überwiegend mittlere Peak Radiances auf. Feststellend zu den Hauptstädten von Ost- und Südeuropa ist somit zu sagen, dass sich kein Zusammenhang zwischen der Peak Radiance und den Ländergruppen dieser Städte erkennen lässt.

Ein anderes Ergebnis weist diese Abhängigkeitsbetrachtung bei den west- und mitteleuropäischen Städten auf. Bis auf Amsterdam verfügen die anderen sechs Hauptstädte Westeuropas über hellste Orte mit einer hohen Peak Radiance, mit London als Spitzenreiter. Gegenteiliges zeigen die mitteleuropäischen Hauptstädte auf. Mit Ausnahme des sehr „hellen hellsten Ortes“ von Warschau, besitzen die acht weiteren Hauptstädte, so wie Berlin, eher mittlere und so wie Vaduz sehr schwache Peak Radiances. Folglich ist zu sagen, dass bis auf Warschau und Amsterdam die hellsten Orte der westeuropäischen Hauptstädte weitaus stärker beleuchtet sind als die hellsten Orte der Hauptstädte Mitteleuropas. Eine Abhängigkeit zwischen diesen

beiden Ländergruppen und den Helligkeiten der hellsten Orte der zugehörigen Hauptstädte lässt sich somit durchaus vermuten.

Eine ähnliche Verteilung wie die der mitteleuropäischen Hauptstädte ist auch bei den nordeuropäischen Hauptstädten zu erkennen. Die hellsten Orte dieser Städte zeigen ebenso lediglich mittlere bis niedrigere Peak Radiances auf. Dies ist natürlich positiv zu bewerten, da somit zumindest anhand der hellsten Orte der Hauptstädte die Aussage getroffen werden kann, dass die mittel- und nordeuropäischen Hauptstädte, im Vergleich zu den anderen, deutlich weniger zur Lichtverschmutzung beitragen. Eine Überprüfung dieser Feststellung mithilfe einer Korrelationsberechnung ist in diesem Fall jedoch nicht möglich, da in diesem Kapitel die Peak Radiances qualitativ bewertet werden.

#### 4.3.3. Die hellsten Orte der Hauptstädte Europas

Nach der Betrachtung der Peak Radiance der europäischen Städte und den Zusammenhangsuntersuchungen zu den Einwohnerzahlen und den zugehörigen Ländergruppen, erfolgen nun Informationen zu den Beleuchtungsquellen der hellsten Orte der Hauptstädte. Diese Beleuchtungsquellen, welche sich hinter den hellsten Orten verbergen, sind prozentual im nachfolgenden Kreisdiagramm 12 vorzufinden.

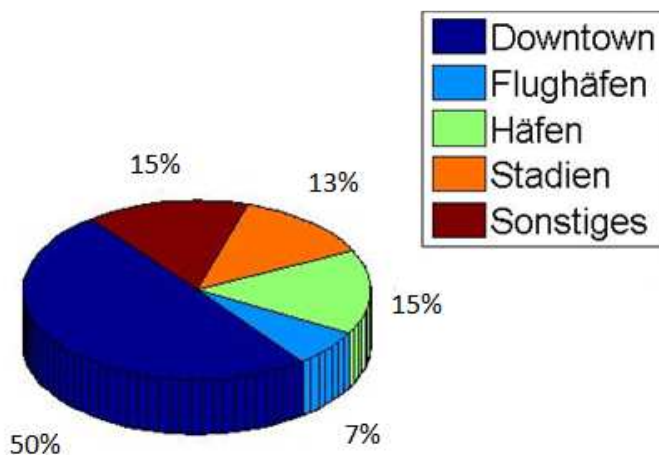


Diagramm 12: prozentuale Betrachtung der Beleuchtungsquellen der hellsten Orte der europäischen Hauptstädte

Die Hälfte aller europäischen Hauptstädte weist als hellsten Ort das Stadtzentrum (dunkelblau) selbst auf. Dazu gehören beispielsweise Russlands Hauptstadt Moskau und Vatikanstadt. Die hellsten Orte der anderen 23 Hauptstädte Europas werden durch die Beleuchtung von Flughäfen, Häfen, Stadien oder Sonstigem verursacht. Zu jeweils 15% gehen die Häfen (grün) und Sonstiges (weinrot) in diese Statistik ein. Amsterdam und Tallinn sind u.a. zwei Städte die über einen Hafen als hellsten Ort verfügen. Vaduz' und Warschaus Peak Radiances werden durch die Beleuchtung diverser Werbe- und Industriegebiete verursacht. 13% der europäischen Hauptstädte besitzen ein stark beleuchtetes Stadion (orange) als hellsten Ort, wie etwa Skopje, London und Kiew. Die wenigsten Städte (nur 7%) haben einen sehr hell be-

leuchteten Flughafen (hellblau) als hellsten Ort. Zu diesen Städten gehört die deutsche Hauptstadt Berlin, in welcher beispielsweise der Flughafen Berlin Tegel den hellsten Ort dieser Stadt ausmacht.

Der Vergleich der Diagramme 7 und 12, welche die Beleuchtungsquellen der hellsten Orte der Megacities und der Europäischen Hauptstädte beinhalten, zeigt, dass die meisten hellsten Orte der untersuchten Städte die Stadtzentren dieser Städte sind. Das könnte daran liegen, dass die Bevölkerungsdichte in einem Stadtzentrum durchschnittlich höher ist als in der Peripherie und dass das Stadtzentrum mit beleuchteten Hotels, Bürohäusern, Restaurants, Bars, Discotheken, Theater, Werbeflächen etc., die Stadt repräsentiert. Natürlich fließt auch allgemein die Straßenbeleuchtung als große Beleuchtungsquelle des Stadtzentrums mit ein. An zweiter Stelle der beiden Statistiken in Diagramm 7 und 12 folgt die Beleuchtung von Industriegebieten, Fabriken, Bahnhöfen, Sehenswürdigkeiten etc., welche in der Kategorie Sonstiges zusammengefasst sind. Zu ungefähr gleichen Anteilen gehen die Häfen und Stadien als hellste Orte einiger Städte, sowohl bei den Hauptstädten Europas als auch bei den Megacities, ein. Einen großen Unterschied bei diesem Vergleich weisen jedoch die Flughäfen als hellste Orte auf. Im Gegensatz zu den 17% der Megastädte, welche über einen Flughafen als hellsten Ort verfügen, zeigen nur 7% der Hauptstädte Europas als Peak Radiance einen Flughafen auf. Dies könnte vermutlich daran liegen, dass die Megacities große internationale Flughäfen besitzen, welche zusätzlich die Funktion haben die Stadt zu repräsentieren. Des Weiteren wird an diesen Flughäfen ununterbrochen Flugverkehr abgefertigt, also auch nachts, was zwangsläufig zu einer intensiveren Beleuchtung zur Sicherung des Flugverkehrs führt. Jedoch lassen sich auch im Bereich der Flughafenbeleuchtung Reduzierungsmaßnahmen einführen, um dem hohen Beleuchtungsanstoß entgegenzuwirken. Diese und weitere Reduzierungsmaßnahmen für Stadien, Häfen, Straßenbeleuchtung und Beleuchtung von Gebäuden erfolgen in Kapitel 5.

#### 4.4. Die zehn größten Flughäfen weltweit nach Passagieraufkommen

Die nächtlichen Satellitenaufnahmen von VIIRS ermöglichen es, die Helligkeiten aller Orte weltweit zu untersuchen. Dieser Abschnitt der vorliegenden Bachelorarbeit befasst sich mit den Helligkeitsuntersuchungen der zehn größten Flughäfen weltweit nach Passagieraufkommen. Wiederum werden nur die Peak Radiances dieser Flughäfen betrachtet. Die zehn größten Flughäfen nach Passagieraufkommen werden in dem nachfolgenden Diagramm 13 mit dem jeweiligen Passagieraufkommen vom Jahr 2012 dargestellt (The Port Authority of New York and New Jersey (2012), detaillierte Tabelle siehe Anhang 9.3.).

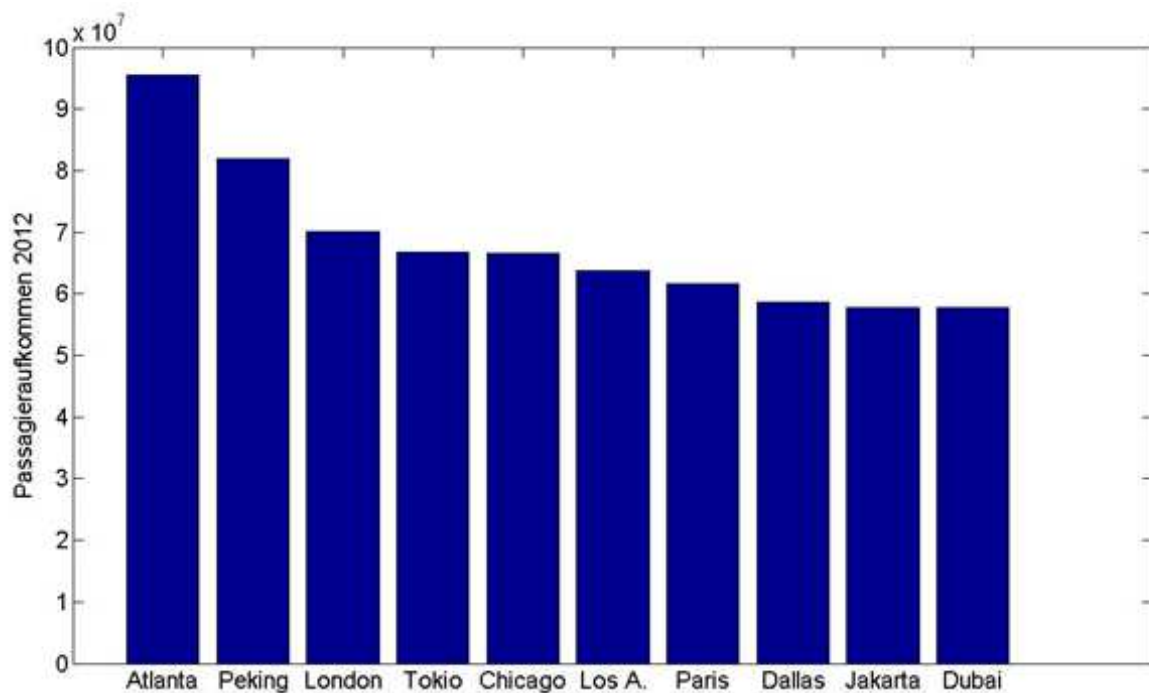


Diagramm 13: Flughäfen geordnet nach ihrem Passagieraufkommen (2012)

Mit mehr als 95 Millionen beförderten Passagieren am Hartsfield-Jackson Flughafen in Atlanta und mit einem Passagieraufkommen von mehr als 81 Millionen des Beijing-Capital Flughafens in Peking, verfügten diese beiden Flughäfen im Jahr 2012 mit Abstand über weitaus mehr Passagiere als die weiteren acht Flughäfen. Der Heathrow Flughafen in London liegt mit über 70 Millionen Passagieren an dritter Stelle dieser Gegenüberstellung. Den zehnten Platz der Flughäfen, deren Peak Radiance nach diesem Abschnitt untersucht wird, belegt der internationale Flughafen Dubais. Dieser verfügte über ein Passagieraufkommen im Jahr 2012 von ungefähr 57 Millionen Personen (The Port Authority of New York and New Jersey (2012)). Im nachstehenden Diagramm 14 werden diesen zehn größten Flughäfen weltweit nach Passagieraufkommen ihre Peak Radiances zugeordnet.

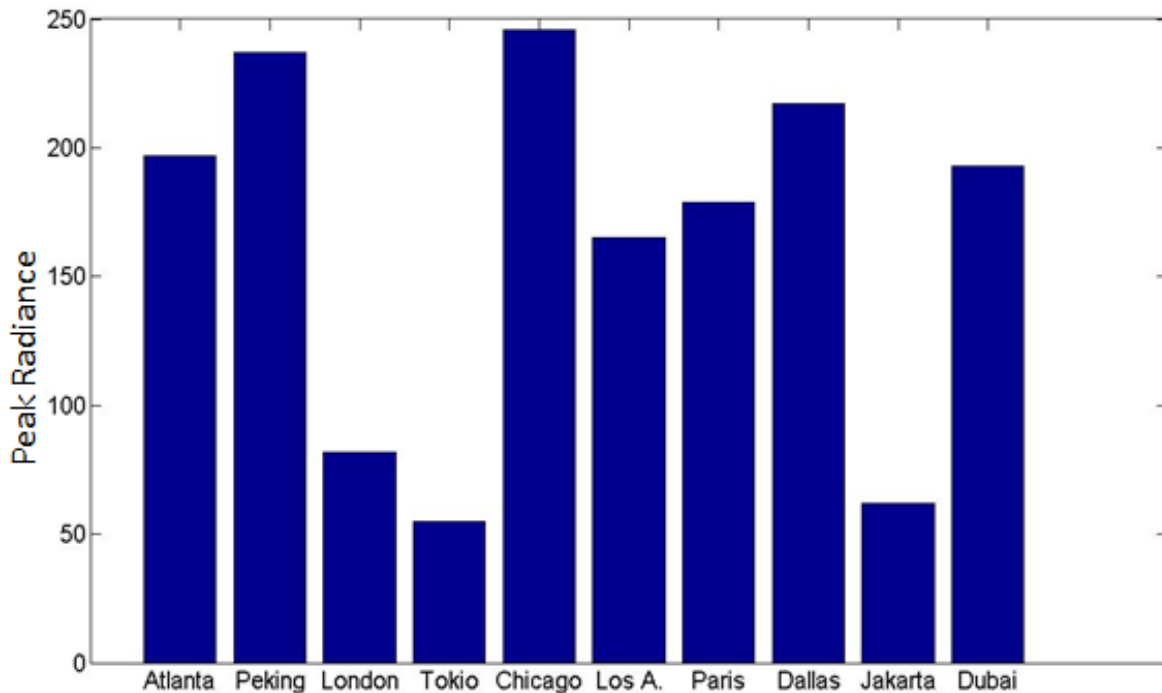


Diagramm 14: Peak Radiances der zehn größten Flughäfen, absteigend sortiert nach Passagieraufkommen (2012)

Das Diagramm 14 stellt nach der Analyse des Satellitenbildes von VIIRS das Ergebnis der hellsten Orte dieser zehn Flughäfen dar. Chicagos internationaler Flughafen O'Hare besitzt mit  $246 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \times \text{sr})$  die höchste Peak Radiance. Im Gegensatz dazu weist der Flughafen Tokio-Haneda, mit mehr beförderten Passagieren im Jahr 2012, die schwächste Peak Radiance mit  $55 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \times \text{sr})$  auf. Demzufolge ist die Peak Radiance des Flughafens in Chicago knapp fünfmal so hoch, wie die des Flughafens in Tokio. Atlantas Flughafen, welcher mit Abstand die meisten Passagiere im Jahr 2012 beförderte, liegt, im Vergleich zu den anderen Flughäfen, mit einer Peak Radiance von  $197 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \times \text{sr})$  an vierter Stelle. Eine ähnliche Peak Radiance besitzt auch der Flughafen in Dubai und dieser hatte das geringste Passagieraufkommen im Jahr 2012 bei dieser Gegenüberstellung. Londons Flughafen sticht mit einer hohen Passagierbeförderung und einer niedrigen Peak Radiance, ebenfalls wie Tokios Flughafen, positiv heraus. Diese Helligkeitsanalyse zeigt, vor allem bei den Vergleichen der Extreme Tokio – Chicago und Jakarta – Dubai, obwohl nur die Peak Radiances der Flughäfen miteinander verglichen werden, dass auch ein extrem hohes Passagieraufkommen mit einer reduzierten Beleuchtungsstärke, ohne der Vernachlässigung der Sicherheitsstandards, bewältigt werden kann. In Chicago und Dubai dagegen, wird, vermutlich aus Prestige-Gründen, regelrecht Licht „verschwendet“. Würden alle Flughäfen ihre Beleuchtungen auf das Maß von beispielsweise Tokios Flughafen reduzieren, könnte ein erstes Entgegenwirken der künstlichen Aufhellung der Nacht und dem hohen Kohlenstoffdioxidausstoß erfolgen.



## 5. Reduzierungsmaßnahmen

Wie bereits mehrfach erwähnt, folgen in diesem Kapitel der Arbeit diverse Reduzierungsmaßnahmen, die die Möglichkeit bieten, das hohe Ausmaß an Lichtausstoß zu verringern und somit dem enormen Kohlenstoffdioxidausstoß und der gesamten Lichtverschmutzung entgegenzuwirken. Heutzutage werden bereits 0,72% des Bruttoinlandproduktes nur für die Erzeugung und Nutzung von künstlichem Licht verbraucht (Tsao, J. Y. et al. (2010)). Dieser Wert entspricht der gesamten Innen- und auch Außenbeleuchtung. In dieser Arbeit wird jedoch lediglich auf die Reduzierungsmaßnahmen der äußeren künstlichen Beleuchtung eingegangen.

Das Prinzip der Reduzierung von Licht ist bei hell beleuchteten Häfen oder Flughäfen sehr einfach, da es nur einer einzigen Entscheidung bedarf, um den Lichtausstoß während der Nacht zu minimieren und somit gering zu halten. Diese Entscheidung liegt bei den Hauptverantwortlichen dieser Einrichtungen. Flughäfen und Häfen müssen natürlich aus Sicherheits- und Arbeitsgründen nachts beleuchtet sein. Dennoch sollte das Beleuchtungsausmaß nicht Überhand nehmen und das Licht nicht aus Prestige-Gründen „verschwendet“ werden. Das Beispiel der Peak Radiance der Flughäfen in Kapitel 4.3. zeigt sehr gut, dass Flughäfen unter hohen Sicherheitsstandards, wie beispielsweise London, Tokio und Jakarta, viele Passagiere abfertigen und befördern können, ohne dass es zu einem enormen Lichtausstoß kommen muss. Auch bei Sportplätzen, Stadien und vielen weiteren Einrichtungen auf dieser Welt entscheiden die Hauptverantwortlichen, wie stark das Stadion oder der Platz beleuchtet werden soll und ob dies die gesamte Nacht über oder nur während Veranstaltungen geschieht. Die beiden nachfolgenden Abbildungen 19 und 20 zeigen das Ausmaß eines hell beleuchteten Flughafens und Stadions in der dunklen Nacht.

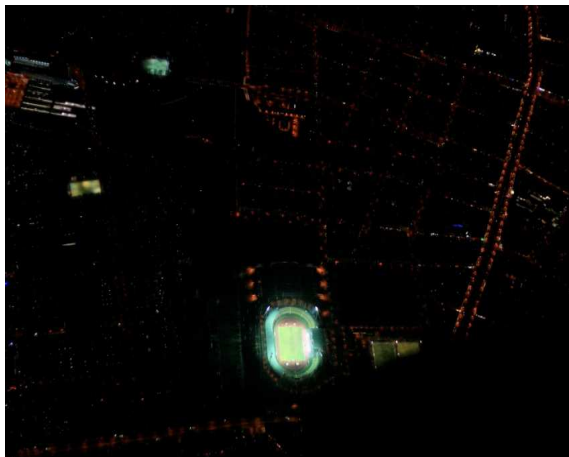


Abb. 19: beleuchtetes Stadion in Berlin  
(Kyba, C. (2011))

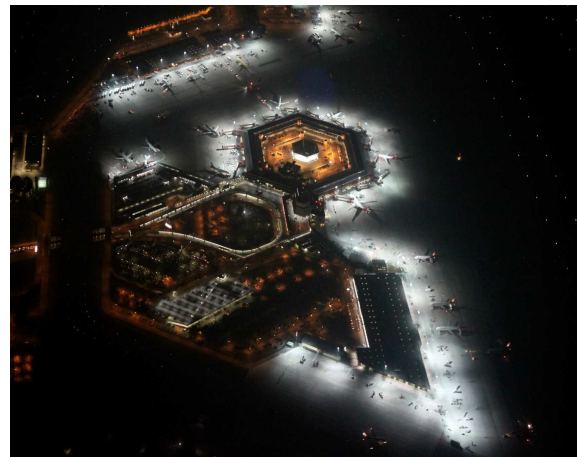


Abb. 20: Flughafen Berlin-Tegel bei Nacht  
(Kyba, C. (2011))

Das Berliner Stadion und auch der Flughafen sind nachts taghell beleuchtet, während es in näherer Umgebung sehr dunkel ist. Diese beiden Einrichtungen tragen folglich enorm zur Lichtglocke über Berlin bei. Der Flughafen Berlin-Tegel ist sogar der hellste Ort von Berlin

und umfasst ungefähr 3% des Gesamtlichtes von Berlin (Kuechly, H. U. et al. (2012)). Mit  $87\text{nW}/(\text{cm}^2 \times \text{sr})$  ist die Peak Radiance des Berliner Flughafens sogar höher als die Peak Radiances der Flughäfen London, Tokio und Jakarta, obwohl diese zu den zehn größten Flughäfen weltweit gehören. Mit einem Passagieraufkommen von etwas mehr als 19 Millionen im Jahr 2012 (FBB (2014)), liegt der Flughafen Berlin-Tegel weit unter dem des im Diagramm 14 zehntplatzierten Flughafens. Demzufolge muss den Hauptverantwortlichen solcher stark und teilweise „verschwenderisch“ beleuchteten Einrichtungen bewusst werden, was sie mit der Entscheidung über die Beleuchtungsreduzierung erreichen können, denn gezielte Einsparungen des Ausstoßens von Licht wirken der Lichtverschmutzung entgegen.

Bei den vielen Beleuchtungsquellen der Stadtzentren gestaltet es sich jedoch als weitaus schwieriger Reduzierungsmaßnahmen anzuwenden. Eine enorme Hauptbeleuchtungsquelle der Stadtzentren etlicher Städte ist die Straßenbeleuchtung durch Straßenlaternen an sich. In Kapitel 2.2.2. wurde sich bereits mit dem Thema Straßenbeleuchtung auseinandergesetzt. Es wurden diverse Beispiele vorgestellt, in denen das Licht der Laternen direkt in den Nachthimmel gestrahlt wird und somit erheblich zur künstlichen Aufhellung der Nacht beiträgt. Folgende Reduzierungsmöglichkeiten bei Modernisierungsarbeiten oder dem Neubau von Anlagen zur Straßenbeleuchtung können das Ausstrahlen des Lichts in den Nachthimmel minimieren und auch die „Verschwendung“ von Licht verringern. Um die künstliche Aufhellung der Nacht und dessen Auswirkungen auf Mensch, Tier, Natur, Umwelt und Atmosphäre einzudämmen, muss effizienter, umwelt- und insektenfreundlicher beleuchtet werden (Gaston, K. J. (2013)) (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)). Streulicht und das Strahlen des Lichts in den Nachthimmel kann mithilfe von gut konstruierten und vollabgeschirmten Straßenlaternen (siehe Abbildung 21 und 22) vermieden werden.



Abb. 21: komplett abgeschirmte Straßenlaterne (2014)

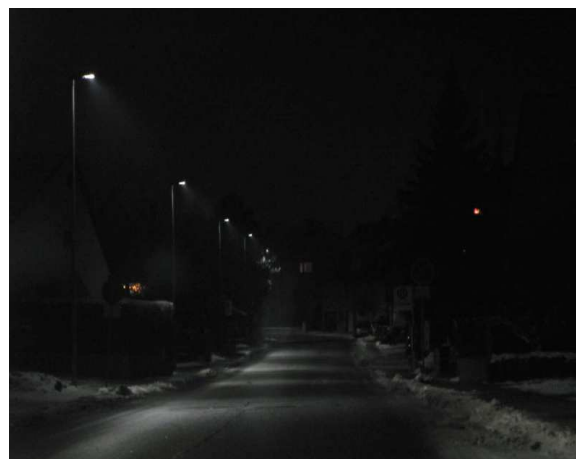


Abb. 22: vollabgeschirmte Straßenbeleuchtung (2014)

Durch die Abschirmung von Straßenlaternen strahlt das Licht nur noch nach unten und beleuchtet so nur die Fläche, die wirklich beleuchtet werden muss. Dies zeigt die Straßenbeleuchtung in Abbildung 22. Es wird aufgrund guter Konstruktion und Ausrichtung der Laternen nur die zu befahrene Straße beleuchtet. Durch diese Vermeidung von Streulicht wird nicht nur das Anstrahlen des Nachthimmels verringert, sondern auch die Störung von An-

wohnern oder die Blendung von Autofahrern. Infolgedessen kann sogar die Verkehrssicherheit erhöht werden. Des Weiteren sollte das Licht der Straßenlaternen effizienter erzeugt werden, beispielsweise durch die Verwendung von LED-Lampen. Natürlich würden diese Umrüstungen bei Modernisierungsarbeiten erhebliche Kosten mit sich bringen, jedoch wären diese Umrüstungskosten in spätestens zehn bis 20 Jahren bezahlt, da die Verwendung von LED-Lampen, im Vergleich zu herkömmlichen Glühlampen, sehr viel Energie und somit auch viele Kosten einspart (Gaston, K. J. (2013)). Auch das Dimmen der Straßenbeleuchtung während der Nacht würde Strom- und Energieeinsparungen mit sich bringen, denn es sollte nur so viel Licht ausgestrahlt werden wie tatsächlich benötigt wird. In diversen deutschen Kleinstädten und Gemeinden werden seit einigen Jahren Pilotprojekte zur Einsparung von Energie bei der nächtlichen Straßenbeleuchtung erprobt. Über Nacht abgeschaltete Beleuchtung auf wenig begangenen Wegen, kann via Kurznachricht, gegen eine geringe Gebühr, für die Dauer der Benutzung des Weges angeschaltet werden (Peters, M. (2007)). Infolge der Reduzierungsmaßnahmen können Ressourcen geschont, der Kohlenstoffdioxidausstoß verringert und somit auch die Umwelt geschont werden (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)).

Aufgrund von schlechter Ausrichtung und Konstruktion der Beleuchtung von Gebäuden, Werbeflächen, Sehenswürdigkeiten, Kirchtürmen und vielen weiteren Objekten, tragen diese enorm zur künstlichen Aufhellung der Nacht und somit zur Lichtverschmutzung bei. Auch bei der Anstrahlung von Gebäuden ist es, zukunftsorientiert gesehen, kostengünstiger und energiesparender LED-Leuchten zu verwenden (Gaston, K. J. (2013)). Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt eine Reduzierungsmaßnahme, welche zu einem optimalen Beleuchtungskonzept der Gebäudeanstrahlung führt, damit möglichst wenig Licht direkt in den Nachthimmel gestrahlt wird.



Abb. 23: links: optimales Beleuchtungskonzept, das Licht strahlt von oben nach unten; rechts: ineffektives Konzept, da das Licht direkt in den Nachthimmel strahlt (2014)

Um das Ausmaß der Lichtglocke einer Stadt und somit die Aufhellung der Nacht zu reduzieren, sollten die Lichtkegel der Gebäudestrahler nicht über den Gebäuderand hinweg ragen. Das optimale Beleuchtungskonzept ist es, die Gebäude, wenn sie schon angestrahlt werden müssen, von oben nach unten zu beleuchten, damit kein Licht in den Himmel gestrahlt und folglich der Himmelshintergrund aufgehellt wird (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)). Die Verantwortlichen für die Beleuchtung eines Gebäudes sollten ebenfalls darauf achten, ein

Gebäude nicht die gesamte Nacht voll zu beleuchten. Auch sollte eine Anstrahlung von hellen und reflektierenden Fassaden sowie von Metall- oder Glaswänden vermieden werden. Diese und viele weitere Reduzierungsmaßnahmen können detaillierter und ausführlicher u.a. in den wissenschaftlichen Ausführungen von Falchi, F. et al. (2011), Gaston, K. J. (2013) und Held, M., & für Naturschutz, B. (2013) nachgelesen werden.

## 6. Zusammenfassung/Ausblick

Der 2011 in Umlauf gegangene Satellit Suomi NPP, ist nicht nur ein Wetter- und Umweltsatellit, der mithilfe seiner fünf Messinstrumente an Bord für die kostengünstige Fernerkundung der Erde und der Erfassung von Wetter- und Klimadaten verantwortlich ist. Dieser Forschungssatellit nimmt auch Bilder der Erde am Tag und vor allem in der Nacht auf, um die Lichtquellen der Erde zu detektieren. Für diese Bildaufnahmen ist das Messinstrument VIIRS an Bord des Satelliten zuständig. VIIRS ist mit einem breitbandigen und hochempfindlichen Sensor, dem Day/Night Band (DNB), ausgestattet, der mit einer Durchlässigkeit für Wellenlängen von 500 bis 900nm, einer Auflösung von 750m und mittels eingebauter „Low-Light Sensoren“ sogar die niedrigsten Stufen des ausgesandten Lichts und die kleinsten künstlichen Lichtquellen auf der Erde registrieren kann (Miller, S. D. et al. (2013)). Das DNB ermöglicht eine hochintensive nächtliche Lichterkennung, was für die Forschung revolutionär ist, da das Thema künstliches Licht während der Nacht eine umstrittene und problematische Angelegenheit ist.

Das von Menschenhand erzeugte und genutzte künstliche Licht ist notwendig und aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Um das Leben, wie es tagsüber von Statten geht, auch nachts genauso so sicher und lebendig zu führen, beleuchtet der Mensch die Erde flächendeckend. Doch die Ausmaße und Konsequenzen der flächendeckenden künstlichen Beleuchtung sind enorm, da das ausgesandte Licht an diversen Aerosolen und Molekülen in der Atmosphäre gestreut wird und es somit zur regelrechten künstlichen Aufhellung der Nacht kommt. Die künstliche Aufhellung der Nacht führt zur Lichtverschmutzung und bringt folglich viele Probleme mit sich (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)). Zum Einen wird der Kohlenstoffdioxid ausstoß erheblich erhöht, was schwerwiegende Konsequenzen für die Entwicklung und den Wandel des Klimas zur Folge hat. Zum Anderen werden natürliche chemische Prozesse, welche in der Atmosphäre stattfinden, durch künstliche geschaffene Photolyse gestört und beeinflusst. Beispielsweise verändert künstliches Licht die Konzentration des Oxidationsmittels  $\text{NO}_3^\times$  (Nitrat-Radikal), was sich wiederum auf den Ozongehalt der Atmosphäre wieder spiegelt (Stark, H. et al. (2011)). Die künstliche Aufhellung der Nacht stört nicht nur atmosphärische Prozesse, sie wirkt sich auch negativ auf Mensch, Tier, Natur und Umwelt aus, da der Tag- und Nacht- sowie Hell- und Dunkelrhythmus der Menschen und Tiere gestört wird. Künstliches Licht kann durch schlechte Ausrichtung sogar zur Gefahrenquelle werden (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013)).

Mithilfe der Satellitenaufnahmen von VIIRS wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit die hellsten Orte (Peak Radiance) diverser Städte (Megacities, Hauptstädte Europas) und Flughäfen ausfindig gemacht. Das Durchführen einer Georeferenz mittels Google-Earth ermöglichte es herauszufinden, welche Lichtquellen sich hinter den Peak Radiances der jeweiligen Städte verbergen. Im Großteil der untersuchten Städte ist das Stadtzentrum, der am hellsten beleuchtete Ort. Stark beleuchtete Industrie-, Werbegebiete und Fabriken sowie Flughäfen, Häfen und Stadien bilden die Peak Radiances aller weiteren untersuchten Mega- und Hauptstädte.

Des Weiteren wurde in dieser vorliegenden Arbeit untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen den Einwohnerzahlen und der Peak Radiance der Städte besteht. Dabei wurde festgestellt, dass eine lineare Abhängigkeit zwischen den Einwohnerzahlen der europäischen Hauptstädte und deren Peak Radiance vorhanden ist. Mit steigender Einwohnerzahl nimmt, in den meisten Städten, auch die Stärke der Peak Radiance zu. Diese Erkenntnis wurde bei den Megacities nicht gemacht, da keine Abhängigkeit zwischen den Peak Radiance und den Einwohnerzahlen festgestellt werden konnte.

Bei den Untersuchungen, ob eine Abhängigkeit zwischen den Peak Radiance der Megastädte und den Entwicklungsständen der zugehörigen Länder dieser Städte vorliegt, wurde ein exponentieller Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen ermittelt. Mit steigendem Human Development Index der Länder der Megastädte, steigen die Peak Radiance dieser Städte exponentiell an. Dementsprechend sind die meisten hohen Peak Radiance in den Megacities, welche sich in Industrieländern befinden, anzutreffen. Die Megastädte der Entwicklungsländer weisen, zum größten Teil, niedrige Peak Radiance auf.

Weiterhin wurde überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen der Höhe der Peak Radiance der europäischen Hauptstädte und der zugehörigen europäischen Ländergruppe erkennbar ist. Es wurde ein großer Unterschied zwischen den Hauptstädten der west- und mitteleuropäischen Länder festgestellt. Die Peak Radiance der Hauptstädte von Mitteleuropa sind insgesamt deutlich niedriger, als die der westeuropäischen Hauptstädte. Auch die nordeuropäischen Hauptstädte besitzen weitaus „dunklere hellste Orte“ als die westeuropäischen. Bei den süd- und osteuropäischen Hauptstädten besteht dagegen eine gleichmäßige Verteilung zwischen hohen, mittleren und niedrigen Peak Radiance. Demzufolge konnte bei diesen Städten keine Abhängigkeit zwischen deren Peak Radiance und den zugehörigen Ländergruppen ermittelt werden.

Die Untersuchung der Peak Radiance der zehn größten Flughäfen nach Passagieraufkommen hat ergeben, dass die meisten Flughäfen hohe Peak Radiance besitzen. London, Tokyo und Jakarta bilden hier jedoch die Ausnahme. Sie weisen im Vergleich signifikant niedrigere Peak Radiance auf und beweisen damit, dass es möglich ist, viele Passagiere unter gleichen Sicherheitsbestimmungen und ohne „Lichtverschwendung“ abzufertigen.

Mit dem Wissen, was die Lichtquellen hinter den allerhellsten Orten diverser Städte und Plätze dieser Welt sind, besteht die Möglichkeit gezielt Reduzierungsmaßnahmen anzuwenden. Das Abschirmen und die richtige Ausrichtung von Laternen sowie das Dimmen der Beleuchtungen von verschiedenen Einrichtungen als auch das Verwenden von energiesparenden LED-Lampen, können erste Maßnahmen sein, um der künstlichen Aufhellung der Nacht durch Vermeidung unnötigen Lichtausstoßes entgegenzuwirken (Held, M., & für Naturschutz, B. (2013), Gaston, K. J. (2013)).

Die Abhängigkeitsuntersuchungen zwischen den Peak Radiances der Megacities und der europäischen Hauptstädte zu bestimmten Faktoren, lieferten sehr aufschlussreiche und informative Ergebnisse. Jedoch würden die Ergebnisse noch mehr an Konsistenz und Aussagekraft gewinnen, wenn auch die zweit- und dritthellsten Orte oder sogar die gesamte durchschnittliche, flächendeckende Beleuchtungsstärke dieser Städte untersucht werden würden. Folglich könnten auch noch weitere interessante Zusammenhänge zwischen den Helligkeitswerten und beispielsweise dem Energie- und Stromverbrauch oder dem Bruttoinlandsprodukt dieser Städte, überprüft werden. Je mehr über die, zur extremen künstlichen Aufhellung der Nacht beitragenden, Lichtquellen in Erfahrung gebracht werden kann, desto gezielter und weitreichender könnten Reduzierungsmaßnahmen bei Neubauten oder Modernisierungsarbeiten von Beleuchtungsanlagen in Angriff genommen werden. Um eine noch stärkere Verringerung des künstlich erzeugten Lichtausstoßes zu bewirken und somit der Lichtverschmutzung konsequent entgegenzuwirken, bedarf es noch vielen weiteren Helligkeitsuntersuchungen von den zahlreichen Städten auf dieser Welt.

## 7. Literaturverzeichnis

- Altemüller, F. et al. (2003), Alexander Schulatlas, Klett-Perthes
- Capital Cities of the World - with population (2012),  
<http://www.worldatlas.com/capcitys.htm#.Uxm6nM6oSSp>
- Deutsche Stiftung Weltbevölkerung (1999), Das Bevölkerungswachstum trägt zur Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei, Newsletter 6
- Falchi, F., Cinzano, P., Elvidge, C. D., Keith, D. M., & Haim, A. (2011), Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility, *Journal of environmental management*, 92(10), 2714-2722
- FBB, Erfolgreiches Jahr 2013: Berliner Flughäfen legen gegen den Markttrend 4,2 Prozent zu, <http://www.berlin-airport.de>, Zugriffsdatum: 23.02.2014
- Gaston, K. J. (2013), A green light for efficiency, *Nature* 497, 560–561
- Haas, R., Kräling, W., & Boulois, R. (1997), Lichtkontamination, *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 9(1), 24-24
- Hänel, A., Das Ausmaß der Lichtverschmutzung, [www.lichtverschmutzung.de](http://www.lichtverschmutzung.de), Zugriffsdatum: 20.01.2014
- Held, M., & für Naturschutz, B. (2013), Schutz der Nacht-Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft: Grundlagen, Folgen, Handlungsansätze, Beispiele guter Praxis
- Jones, N. (2013), Troubling milestone for CO<sub>2</sub>, *Nature Geoscience*, 6(8), 589-589
- Kuechly, H. U., Kyba, C., Ruhtz, T., Lindemann, C., Wolter, C., Fischer, J., & Hölker, F. (2012), Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany, *Remote Sensing of Environment*, 126, 39-50
- Kyba, C. (2011), A Connection Between Light and Air Pollution, unpublished colloquium presentation
- Kyba, C. (2013), New sources of Skyglow data, unpublished colloquium presentation
- Luginbuhl, C. B., Lockwood, G. W., Davis, D. R., Pick, K., & Selders, J. (2009), From the ground up I: Light pollution sources in Flagstaff, Arizona, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121(876), 185-203
- Malik, K. (2013), Human Development Report 2013, The rise of the South: Human progress in a diverse world



- Miller, S. D., Straka III, W., Mills, S. P., Elvidge, C. D., Lee, T. F., Solbrig, J., ... & Weiss, S. C. (2013), Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band, *Remote Sensing*, 5(12)
- Möller, D. (2003), *Luft*, De Gruyter Berlin, New York
- NASA, About Suomi NPP; Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), <http://npp.gsfc.nasa.gov/>, Zugriffsdatum: 15.01.2014
- NOAA, VIIRS Nighttime Lights-2012 (Two months composite), <http://ngdc.noaa.gov/>, Zugriffsdatum: 02.02.2014
- Patzer, B. (2013), Vorlesung - Einführung in die Astronomie und Astrophysik, Freie Universität Berlin
- Peters, M. (2007), Straßenbeleuchtung per SMS, [www.focus.de](http://www.focus.de)
- Rich, C., & Longcore, T. (Eds.), (2005), *Ecological consequences of artificial night lighting*, Island Press
- Riegel, K. W. (1973), Light Pollution Outdoor lighting is a growing threat to astronomy, *Science*, 179(4080), 1285-1291
- Roedel, W. (2000), *Physik unserer Umwelt - Die Atmosphäre*, Springer-Verlag
- Schuler, L. D. (2013), Dark-Sky Switzerland für einleuchtende Dunkelheit, *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 158(1/2), 1-10
- Stark, H., Brown, S. S., Wong, K. W., Stutz, J., Elvidge, C. D., Pollack, I. B., ... & Parrish, D. D. (2011), City lights and urban air, *Nature Geoscience*, 4(11), 730-731
- The Port Authority of New York and New Jersey (2012), *Airport Traffic Report*
- Tsao, J. Y., Saunders, H. D., Creighton, J. R., Coltrin, M. E., & Simmons, J. A. (2010), Solid-state lighting: an energy-economics perspective, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(35), 354001
- World Urbanization Prospects, the 2011 Revision (2011), <http://esa.un.org/unup/CD-ROM/Urban-Agglomerations.htm>

## 8. Abbildungsverzeichnis

- **Abb. 2:** Satellitenaufnahme der Welt von VIIRS, NOAA, Zugriffsdatum: 02.02.2014
- **Abb. 3:** <http://www.home.uni-osnabrueck.de/ahaenel/sofi06/img2163.jpg>,  
Fotoaufnahme von Hänel, A. (2006)
- **Abb. 4:** [http://lossofthenight.blogspot.de/2013/09/the-view-from-your-app\\_16.html](http://lossofthenight.blogspot.de/2013/09/the-view-from-your-app_16.html),  
Fotoaufnahme von Giménez, S. M., veröffentlicht von Kyba, C. (2013)
- **Abb. 5:** [http://lossofthenight.blogspot.de/2013/09/the-view-from-your-app\\_16.html](http://lossofthenight.blogspot.de/2013/09/the-view-from-your-app_16.html),  
Fotoaufnahme von Giménez, S. M., veröffentlicht von Kyba, C. (2013)
- **Abb. 6:** [http://lossofthenight.blogspot.de/2013/09/the-view-from-your-app\\_16.html](http://lossofthenight.blogspot.de/2013/09/the-view-from-your-app_16.html),  
Fotoaufnahme von Giménez, S. M., veröffentlicht von Kyba, C. (2013)
- **Abb. 7:** [http://lossofthenight.blogspot.de/2013/09/the-view-from-your-app\\_18.html](http://lossofthenight.blogspot.de/2013/09/the-view-from-your-app_18.html),  
Fotoaufnahme von Hänel, A., veröffentlicht von Kyba, C. (2013)
- **Abb. 8:** [http://www.lichtverschmutzung.de/foto/nuernb\\_gr.jpg](http://www.lichtverschmutzung.de/foto/nuernb_gr.jpg),  
Fotoaufnahme von Deschan, H, Zugriffsdatum: 01.02.2014
- **Abb. 9:** Fotoaufnahme von Kyba, C. (2014)
- **Abb. 10:** [http://remitschka-design.de/images/promotion\\_hummerNight.jpg](http://remitschka-design.de/images/promotion_hummerNight.jpg),  
Remitschka, F., Zugriffsdatum: 20.01.2014
- **Abb. 11:** <http://www.extremetech.com/wp-content/uploads/2012/12/black-marble-europe-africa-asia.jpg>,  
NOAA, Zugriffsdatum: 17.01.2014
- **Abb. 12:** <http://suomi.gsfc.nasa.gov/images/spacecraftrendering-small.jpg>  
NASA, Zugriffsdatum: 17.01.2014
- **Abb. 13:** Miller, S. D. et al. (2013)
- **Abb. 14:** Miller, S. D. et al. (2013)
- **Abb. 15:** Miller, S. D. et al. (2013)
- **Abb. 16:** <http://www.planeterde.de/Members/holgerkroker/1212/MENA-2012.jpg>,  
NOAA, Zugriffsdatum: 17.01.2014
- **Abb. 17:** Powerpoint-Präsentation „New sources of skyglow data“,  
Kyba, C. (2013)

- **Abb. 18:** Powerpoint-Präsentation „New sources of skyglow data”,  
Kyba, C. (2013)
- **Abb. 19:** <http://userpage.fu-berlin.de/~kyba/images/Stadium.jpg>,  
Kyba, C. (2011)
- **Abb. 20:** <http://userpage.fu-berlin.de/~kyba/images/TXL2.jpg>  
Kyba, C. (2011)
- **Abb. 21:** [http://www.sternenpark-schwaebische-  
alb.de/richtigbeleuchten/beleuchtungsbeispiele/optimale-leuchten.html](http://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/richtigbeleuchten/beleuchtungsbeispiele/optimale-leuchten.html),  
Zugriffsdatum: 26.02.2014
- **Abb. 22:** [http://www.sternenpark-schwaebische-  
alb.de/richtigbeleuchten/beleuchtungsbeispiele/optimale-leuchten.html](http://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/richtigbeleuchten/beleuchtungsbeispiele/optimale-leuchten.html),  
Zugriffsdatum: 26.02.2014
- **Abb. 23:** <http://www.hellenot.org/was-koennen-sie-tun/gebaeudeanstrahlung/>  
Zugriffsdatum: 25.02.2014

## 9. Anhang

### 9.1. Megacities

Megacities			Die hellsten Orte der Megacities					
			VIIRS			Google-Earth		
Megastadt	Land	Einwohner	Lat	Lon	P. R.	Lat	Lon	Lichtquelle
Rhein-Ruhr	Deutschland	11.316.429	50,8437	6,9481	916	50,8437	6,9481	Gewerbegebiet, Fabriken
Bagdad	Irak	11.786.000	33,2854	44,4273	661	33,2718	44,4228	Ölraffinerie (Dora Refinery)
New York	USA	23.313.000	40,7604	-73,9937	396	40,7604	-73,9937	Downtown
Moskau	Russland	14.927.000	55,7604	37,6106	315	55,7604	37,6106	Downtown
Jakarta	Indonesien	19.232.000	-6,1313	107,0231	266	-6,1328	107,0288	Fabriken
Seoul	Südkorea	22.693.000	37,5729	127,0065	241	37,567	127,01	Dongdaemun Stadion
Osaka (Kansei)	Japan	17.410.000	34,6729	135,4982	237	34,6729	135,4982	Downtown
Kairo	Ägypten	16.429.000	30,1437	31,2939	228	30,1437	31,2939	Fabriken
Buenos Aires	Argentinien	14.598.000	-34,6022	-58,377	215	-34,6022	-58,377	Hafen, Fabriken
Tokio-Yokohama	Japan	37.730.000	35,6979	139,6981	211	35,6962	139,7	Bahnhof
Istanbul	Türkei	14.350.000	41,0146	28,9523	206	41,0146	28,9523	Downtown
London	Großbritannien	13.377.000	51,5604	-0,2852	206	51,556	-0,2796	Wembley Stadion
Shanghai	China	18.573.000	31,3229	121,6648	200	31,3229	121,6648	Hafen
Teheran	Iran	13.236.000	35,6229	51,3731	198	35,6229	51,3731	Fabriken
Los Angeles	USA	18.014.000	34,1062	-118,3437	178	34,1062	-118,3437	Hollywood Hills Hotel
Ile-de-France	Frankreich	11.950.000	48,8729	2,298	178	48,8729	2,298	Triumphbogen
Rio de Janeiro	Brasilien	12.128.000	-22,9063	-43,2103	162	-22,9086	-43,208	Bahnhof
Bangkok	Thailand	10.133.000	13,7562	100,4898	156	13,7562	100,4898	Downtown
Delhi	Indien	18.917.000	28,5604	77,0815	143	28,5604	77,0815	Flughafen DEL
Sao Paulo	Brasilien	20.831.000	-23,5897	-46,6894	139	-23,5897	-46,6894	Downtown
Kalkutta	Indien	15.644.000	22,5812	88,3565	121	22,5812	88,3565	Downtown
Peking	China	12.523.000	39,8687	116,4773	117	39,8711	116,4777	Stadion
Khartum	Sudan	10.083.000	15,5979	32,5439	112	15,5979	32,5439	Flughafen KRT
Mexiko-Stadt	Mexiko	23.610.000	19,4395	-99,1395	100	19,4395	-99,1395	Downtown
Mumbai	Indien	21.901.000	19,102	72,869	93	19,09	72,8688	Flughafen BOM
Manila	Philippinen	20.654.000	14,5229	121,0148	93	14,5229	121,0148	Flughafen MNL
Karatschi	Pakistan	13.205.000	24,827	66,9731	92	24,827	66,9731	Hafen
Lagos	Nigeria	13.722.000	6,452	3,3939	70	6,452	3,3939	Hafen
Kinshasa-Brazzaville	Dem.Rep. Kongo	10.346.000	-4,3146	15,2731	67	-4,3146	15,2731	Downtown
Dhaka	Bangladesch	14.327.000	23,852	90,3981	48	23,852	90,3981	Flughafen DAC

Tabelle 1: Übersicht zu den Daten der hellsten Orte der Megacities, Land der Megacity entsprechend des Entwicklungsstandes nach vordefinierten Kategorien eingefärbt, Einwohnerzahlen entsprechend der vordefinierten Kategorien eingefärbt, P. R. → Peak Radiance (Einheit: nW/(cm<sup>2</sup>×sr))

## 9.2. Hauptstädte Europas

Hauptstädte Europas			Die hellsten Orte der Hauptstädte Europas					
			VIIRS			Google-Earth		
Hauptstadt	Land	Einwohner	Lat	Lon	P. R.	Lat	Lon	Lichtquelle
Moskau	Russland	11.503.501	55,7604	37,6106	315	55,7604	37,6106	Downtown
Skopje	Mazedonien	506.926	42,0021	21,4272	225	42,0055	21,4258	National Arena
Tallinn	Estland	417.150	59,4396	24,7439	217	59,4396	24,7439	Bahnhof, Hafen
London	Großbritannien	8.308.369	51,5604	-0,2852	206	51,556	-0,2796	Wembley Stadion
Belgrad	Serbien	1.154.589	44,8146	20,4564	200	44,8146	20,4564	Downtown
Brüssel	Belgien	1.160.478	50,8521	4,3481	197	50,8521	4,3481	Downtown
Madrid	Spanien	3.198.645	40,4562	-3,6894	183	40,4523	-3,6895	Stadion Santiago Bernabeu
Paris	Frankreich	2.243.833	48,8729	2,2981	178	48,8738	2,295	Triumphbogen
Athen	Griechenland	655.790	37,9604	23,5897	177	37,9604	23,5897	Hafen
Warschau	Polen	1.715.517	52,2354	20,9981	173	52,2301	21,0027	Einkaufszentrum
Ankara	Türkei	4.630.735	39,9187	32,8481	166	39,9187	32,8481	Downtown
Rom	Italien	2.638.842	41,9062	12,4897	160	41,9006	12,5028	Downtown
Vatikan	Vatikan	836	41,9062	12,4897	160	41,9006	12,5028	Downtown
Lissabon	Portugal	545.245	38,7187	-9,1478	156	38,7187	-9,1478	Downtown
Luxemburg	Luxemburg	103.641	49,6021	6,1231	153	49,5997	6,1343	Downtown
Kopenhagen	Dänemark	559.440	55,7062	12,5647	147	55,7027	12,5722	Sportarena Sankt Jakob
Bukarest	Rumänien	1.883.425	44,4354	26,094	140	44,4354	26,094	Downtown
Helsinki	Finnland	604.380	60,1729	24,9356	134	60,171	24,9415	Bahnhof Helsinki
Monaco	Monaco	36.371	43,7347	7,4324	132	43,7347	7,4324	Yachthafen
Dublin	Irland	527.612	53,3396	-6,2352	122	53,3396	-6,2352	Hafen
Wien	Österreich	1.741.246	48,1229	16,5522	115	48,1229	16,5522	Flughafen VIE
Sofia	Bulgarien	1.204.685	42,6979	23,3231	109	42,6979	23,3231	Downtown
Tirana	Albanien	624.642	41,3312	19,8147	105	41,3312	19,8147	Downtown, Museen, Hotels
Zagreb	Kroatien	790.017	45,8146	15,9689	104	45,8146	15,9689	Downtown
Reykjavik	Island	119.547	-21,879	64,1434	104	-21,902	64,1354	Stadion Laugardalsvöllur
Sarajewo	Bosnien & Herzegowina	311.161	43,8604	18,3939	100	43,8604	18,3939	Downtown
Riga	Lettland	699.203	56,9521	24,1022	96	56,9521	24,1022	Downtown
Bratislava	Slowakei	413.192	48,1271	17,1772	96	48,1271	17,1772	Fabriken, Bahnhof
Podgorica	Montenegro	185.937	42,4437	19,2522	96	42,4437	19,2522	Downtown
Budapest	Ungarn	1.733.685	47,4354	19,2522	94	47,433	19,2624	Flughafen BUD
Valetta	Malta	6295	35,8979	14,5022	91	35,8979	14,5022	Hafen
Andorra la Vella	Andorra	22.398	42,5104	1,5272	88	42,5104	1,5272	Downtown
Berlin	Deutschland	3.375.222	52,5604	13,2814	87	52,5604	13,2814	Flughafen TXL
Wilna	Litauen	542.932	54,6896	25,2606	83	54,6896	25,2606	Downtown
Prag	Tschechien	1.246.780	50,0771	14,5314	82	50,0771	14,5314	Einkaufszentren, Fabriken
Amsterdam	Niederlande	799.345	4,8939	52,3812	77	4,8939	52,3812	Hafen

Stockholm	Schweden	868.141	59,3396	18,0647	73	59,3396	18,0647	Downtown
Oslo	Norwegen	626.953	59,9146	10,7356	73	59,9146	10,7356	Hafen
Nikosia	Zypern	276.410	35,1729	33,3523	62	35,1729	33,3523	Downtown
San Marino	San Marino	32.471	43,9396	12,4439	62	43,9396	12,4439	Downtown
Kiew	Ukraine	2.816.504	50,4354	30,5189	55	50,4334	30,5219	National Sports Komplex
Minsk	Weißrussland	1.904.300	27,5564	53,9062	51	27,5564	53,9062	Downtown
Ljubljana	Slowenien	278.638	46,0562	14,4939	44	46,0562	14,4939	Downtown, Einkaufszentrum
Bern	Schweiz	125.681	46,9521	7,4397	40	46,9521	7,4397	Bahnhof
Chisinau	Moldawien	723.500	47,0271	28,8314	35	47,0271	28,8314	Downtown
Vaduz	Liechtenstein	5236	47,1771	9,5064	17	47,1771	9,5064	Fabrik

Tabelle 2: Übersicht zu den Daten der hellsten Orte der Hauptstädte Europas, Land der Hauptstadt entsprechend der vordefinierten Ländergruppe eingefärbt, Einwohnerzahlen entsprechend der vordefinierten Kategorien eingefärbt, P. R. → Peak Radiance (Einheit: nW/(cm<sup>2</sup>×sr))

### 9.3. Zehn größten Flughäfen nach Passagieraufkommen

Zehn größten Flughäfen nach Passagieraufkommen 2012					Der hellste Ort der Flughäfen		
Stadt	Flughafen	Google Earth		Passagiere 2012	VIIRS		
		Lat	Lon		Lat	Lon	P. R.
Atlanta	Flughafen ATL	33,6392	-84,4278	95.462.867	33,6437	-84,4437	197
Peking	Flughafen PEK	40,0801	116,5846	81.929.359	40,0854	116,5773	237
London	Flughafen LHR	51,4775	-0,4614	70.037.417	51,4771	-0,4728	82
Tokio	Flughafen HND	35,5523	139,7797	66.795.178	35,5479	139,7898	55
Chicago	Flughafen ORD	41,9786	-87,9048	66.633.503	41,9812	-87,9103	246
Los Angeles	Flughafen LAX	33,9425	-118,4081	63.688.121	33,9479	-118,4062	165
Paris	Flughafen CDG	49,0128	2,55	61.611.934	49,0104	2,5772	179
Dallas/Fort Worth	Flughafen DFW	32,8968	-97,038	58.591.842	32,902	-97,0437	217
Jakarta	Flughafen CGK	-6,1256	106,6559	57.772.762	-6,123	106,6565	62
Dubai	Flughafen DXB	25,2528	55,3644	57.684.550	25,2479	55,3564	193

Tabelle 3: Übersicht zu den Daten der zehn größten Flughäfen nach Passagieraufkommen, P. R. → Peak Radiance (Einheit: nW/(cm<sup>2</sup>×sr))

**9.4. Distanz zwischen VIIRS- und Google-Earth-Koordinaten**

→ räumliche Genauigkeit der Satellitenbilder

**9.4.1. Megacities**

Megacities					
Stadt	VIIRS		Google-Earth		Distanz in m
	Lat	Lon	Lat	Lon	
Rhein-Ruhr	50,8437	6,9481	50,8437	6,9481	0
Bagdad	33,2854	44,4273	33,2718	44,4228	1569
New York / Manhattan	40,7604	-73,9937	40,7604	-73,9937	0
Moskau	55,7604	37,6106	55,7604	37,6106	0
Jakarta	-6,1313	107,0231	-6,1328	107,0288	652
Seoul	37,5729	127,0065	37,567	127,01	725
Osaka (Kansei)	34,6729	135,4982	34,6729	135,4982	0
Kairo	30,1437	31,2939	30,1437	31,2939	0
Buenos Aires	-34,6022	-58,377	-34,6022	-58,377	0
Tokio-Yokohama	35,6979	139,6981	35,6962	139,7	255
Istanbul	41,0146	28,9523	41,0146	28,9523	0
London	51,5604	-0,2852	51,556	-0,2796	624
Shanghai	31,3229	121,6648	31,3229	121,6648	0
Teheran	35,6229	51,3731	35,6229	51,3731	0
Los Angeles	34,1062	-118,3437	34,1062	-118,3437	0
Ile-de-France, Paris	48,8729	2,298	48,8729	2,298	0
Rio de Janeiro	-22,9063	-43,2103	-22,9086	-43,208	348
Bangkok	13,7562	100,4898	13,7562	100,4898	0
Delhi	28,5604	77,0815	28,5604	77,0815	0
Sao Paulo	-23,5897	-46,6894	-23,5897	-46,6894	0
Kalkutta	22,5812	88,3565	22,5812	88,3565	0
Peking	39,8687	116,4773	39,8711	116,4777	269
Khartum	15,5979	32,5439	15,5979	32,5439	0
Mexiko-Stadt	19,4395	-99,1395	19,4395	-99,1395	0
Mumbai	19,102	72,869	19,09	72,8688	1335
Manila	14,5229	121,0148	14,5229	121,0148	0
Karatschi	24,827	66,9731	24,827	66,9731	0
Lagos	6,452	3,3939	6,452	3,3939	0
Kinshasa-Brazzaville	-4,3146	15,2731	-4,3146	15,2731	0
Dhaka	23,852	90,3981	23,852	90,3981	0

Tabelle 4: Übersicht der räumlichen Distanz der hellsten Orte der Megacities zwischen den Koordinaten von VIIRS und Google-Earth, 0-Werte entsprechen weitläufigeren Gebieten (z.B. Downtown, Industriegebiete), Abweichungen entstehen durch punktuelle Zuordnungen (Flughäfen, Sehenswürdigkeiten)

**9.4.2. Hauptstädte Europas**

<b>Hauptstädte Europas</b>					
<b>Stadt</b>	<b>VIIRS</b>		<b>Google-Earth</b>		<b>Distanz in m</b>
	<b>Lat</b>	<b>Lon</b>	<b>Lat</b>	<b>Lon</b>	
Moskau	55,7604	37,6106	55,7604	37,6106	0
Skopje	42,0021	21,4272	42,0055	21,4258	395
Tallinn	59,4396	24,7439	59,4396	24,7439	0
London	51,5604	-0,2852	51,556	-0,2796	624
Belgrad	44,8146	20,4564	44,8146	20,4564	0
Brüssel	50,8521	4,3481	50,8521	4,3481	0
Madrid	40,4562	-3,6894	40,4523	-3,6895	434
Paris	48,8729	2,2981	48,8738	2,295	248
Athen	37,9604	23,5897	37,9604	23,5897	0
Warschau	52,2354	20,9981	52,2301	21,0027	667
Ankara	39,9187	32,8481	39,9187	32,8481	0
Rom	41,9062	12,4897	41,9006	12,5028	1250
Vatikan	41,9062	12,4897	41,9006	12,5028	1250
Lissabon	38,7187	-9,1478	38,7187	-9,1478	0
Luxemburg	49,6021	6,1231	49,5997	6,1343	850
Kopenhagen	55,7062	12,5647	55,7027	12,5722	610
Bukarest	44,4354	26,094	44,4354	26,094	0
Helsinki	60,1729	24,9356	60,171	24,9415	398
Monaco	43,7347	7,4324	43,7347	7,4324	0
Dublin	53,3396	-6,2352	53,3396	-6,2352	0
Wien	48,1229	16,5522	48,1229	16,5522	0
Sofia	42,6979	23,3231	42,6979	23,3231	0
Tirana	41,3312	19,8147	41,3312	19,8147	0
Zagreb	45,8146	15,9689	45,8146	15,9689	0
Reykjavik	-21,879	64,1434	-21,902	64,1354	2687
Sarajewo	43,8604	18,3939	43,8604	18,3939	0
Riga	56,9521	24,1022	56,9521	24,1022	0
Bratislava	48,1271	17,1772	48,1271	17,1772	0
Podgorica	42,4437	19,2522	42,4437	19,2522	0
Budapest	47,4354	19,2522	47,433	19,2624	812
Valetta	35,8979	14,5022	35,8979	14,5022	0
Andorra la Vella	42,5104	1,5272	42,5104	1,5272	0
Berlin	52,5604	13,2814	52,5604	13,2814	0
Wilna	54,6896	25,2606	54,6896	25,2606	0
Prag	50,0771	14,5314	50,0771	14,5314	0
Amsterdam	4,8939	52,3812	4,8939	52,3812	0
Stockholm	59,3396	18,0647	59,3396	18,0647	0
Oslo	59,9146	10,7356	59,9146	10,7356	0
Nikosia	35,1729	33,3523	35,1729	33,3523	0
San Marino	43,9396	12,4439	43,9396	12,4439	0



Kiew	50,4354	30,5189	50,4334	30,5219	308
Minsk	27,5564	53,9062	27,5564	53,9062	0
Ljubljana	46,0562	14,4939	46,0562	14,4939	0
Bern	46,9521	7,4397	46,9521	7,4397	0
Chisinau	47,0271	28,8314	47,0271	28,8314	0
Vaduz	47,1771	9,5064	47,1771	9,5064	0

Tabelle 5: Übersicht der räumlichen Distanz der hellsten Orte der europäischen Hauptstädte zwischen den Koordinaten von VIIRS und Google-Earth, 0-Werte entsprechen weitläufigeren Gebieten (z.B. Downtown, Industriegebiete), Abweichungen entstehen durch punktuelle Zuordnungen (Flughäfen, Sehenswürdigkeiten)

### 9.4.3. Zehn größten Flughäfen nach Passagieraufkommen

Zehn größten Flughäfen nach Passagieraufkommen					
Flughafen	VIIRS		Google-Earth		Distanz in m
	Lat	Lon	Lat	Lon	
Flughafen ATL	33,6437	-84,4437	33,6392	-84,4278	1555
Flughafen PEK	40,0854	116,5773	40,0801	116,5846	856
Flughafen LHR	51,4771	-0,4728	51,4775	-0,4614	791
Flughafen HND	35,5479	139,7898	35,5523	139,7797	1036
Flughafen ORD	41,9812	-87,9103	41,9786	-87,9048	539
Flughafen LAX	33,9479	-118,4062	33,9425	-118,4081	626
Flughafen CDG	49,0104	2,5772	49,0128	2,55	2002
Flughafen DFW	32,902	-97,0437	32,8968	-97,038	786
Flughafen CGK	-6,123	106,6565	-6,1256	106,6559	297
Flughafen DXB	25,2479	55,3564	25,2528	55,3644	972

Tabelle 6: Übersicht der räumlichen Distanz der hellsten Orte der zehn größten Flughäfen nach Passagieraufkommen zwischen den Koordinaten von VIIRS und Google-Earth

### 9.4.4. Zusammenfassung aller untersuchten hellsten Orte: Räumliche Genauigkeit der Satellitenbilder von VIIRS - Tabellenform

Anzahl der untersuchten hellsten Orte	räumliche Distanz in m
55	0
9	bis 500
14	bis 1000
3	bis 1500
2	bis 2000
1	bis 2500
1	bis 3000

Tabelle 7: Kategorisierung der Anzahl der untersuchten hellsten Orte zur räumlichen Distanz in Metern, Berechnung der räumlichen Distanz aus den Unterschieden der VIIRS- und Google-Earth-Koordinaten

#### 9.4.5. Zusammenfassung aller untersuchten hellsten Orte: Räumliche Genauigkeit der Satellitenbilder von VIIRS - Balkendiagramm

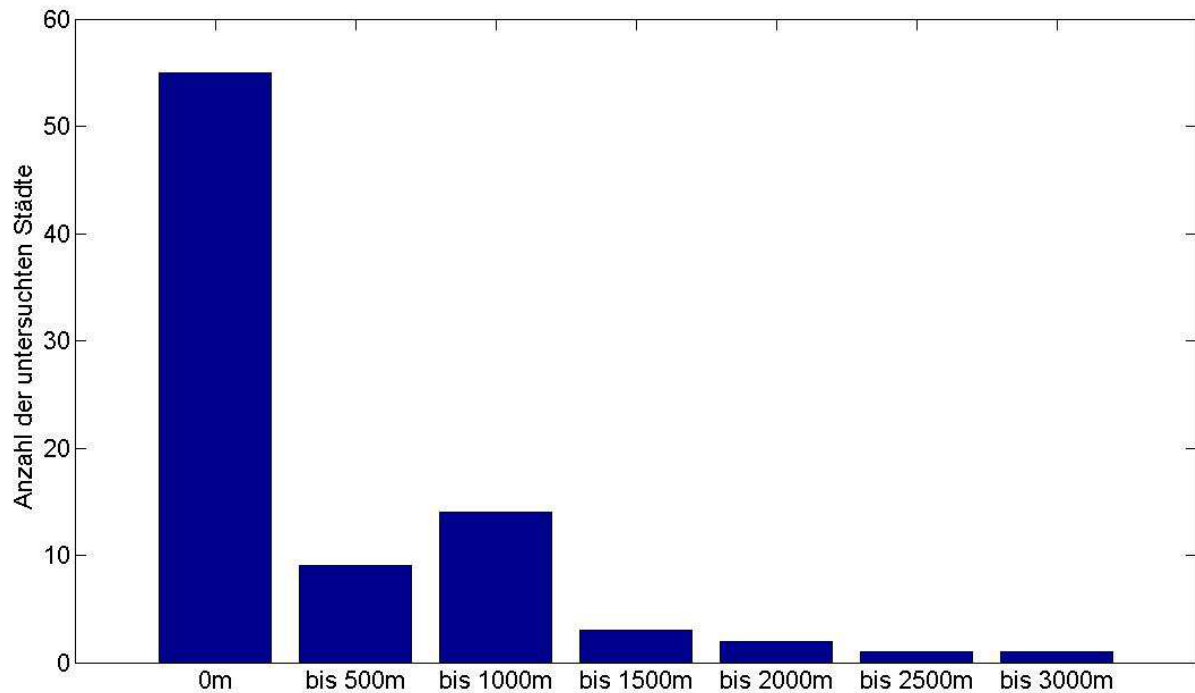


Diagramm 15: Verhältnis der Anzahl der untersuchten hellsten Orte zur räumlichen Distanz in Metern, Berechnung der räumlichen Distanz aus den Unterschieden der VIIRS- und Google-Earth-Koordinaten

## **Eidesstattliche Erklärung zur Bachelorarbeit**

Name: Garz

Vorname: Stefanie

Ich versichere, die Bachelorarbeit selbstständig und lediglich unter Benutzung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben.

Ich erkläre weiterhin, dass die vorliegende Arbeit noch nicht im Rahmen eines anderen Prüfungsverfahrens eingereicht wurde.

Berlin, den

Unterschrift: