Lichtmesskampagne
Zentralraum Oberösterreich

Erfassung des abgestrahlten Lichts mit einem nächtlichen Überflug

Oktober 2014 – Ende 2015

Eine Kooperation zwischen:

Amt der Oö. Landesregierung
Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft
Abteilung Umweltschutz

Freie Universität Berlin (FUB)
Institute for Space Sciences
Laboratory for Remote Sensing Instruments and Applications (LASIA)

Universität Wien
Institut für Astrophysik

Lichtmesskampagne Zentralraum Oberösterreich

Aircraft data acquisition report
FUB Cessna 207T

Thomas Ruhtz
Christopher CM Kyba
Thomas Posch
Johannes Puschnig
Helga Kuechly

Version: 1. Dezember 2015

Principle Investigator:	Amt der Oö. Landesregierung Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft Abteilung Umweltschutz Sigrid Sperker Heribert Kaineder Martin Waslmeier Kärntnerstraße 10-12 4021 Linz
Flugbesatzung:	Carsten Lindemann (Pilot) Christopher Kyba (Mission scientists) Thomas Ruhtz (Mission scientists) Freie Universitaet Berlin (FUB) Institute for Space Sciences Laboratory for Remote Sensing Instruments and Applications Carl-Heinrich-Becker Weg 6-10 12165 Berlin
Flugzeit:	26. Okt. 2014
Flugort:	Linz/Wels, Ober-Österreich
weitere Projektteilnehmer:	Universität Wien Institut für Astrophysik DDr. Thomas Posch Türkenschanzstraße 17 1180 Wien

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung und Ausblick....7
2 Einleitung....8
3 Planung des Fluges....9
4 Beschreibung der Instrumente....10
5 Durchgeführte Flüge....13
5.1 Testflug 10. Okt. 2014....14
5.2 Messflug Oberösterreich 26.Okt.2014....15
6 Auswertung der Messdaten....16
6.1 Beschreibung Prozesskette....16
6.2 Labormessungen....17
6.2.1 Offsetkorrektur....17
6.2.2 Linearität....18
6.2.3 Vignettierung....21
6.2.4 Barrel distortion (Kissenverzerrung)....22
6.3 Kalibration der Bestrahlungsstärke und Leuchtdichte....24
6.4 Abstrahlungsrichtung....24
6.5 Spektrum....24
6.6 Prozessierung des Navigationsdaten....24
6.7 Berechnung der Boresight angle (Einbaulagewinkel)....25
6.8 Orthorektifikation....25
6.9 Mosaikierung und Fehleranalyse....25
6.10 Vergleich von Daten des Mosaik und dem Satelliten DNB....26
6.11 Abschätzung der Gesamtenergie....27
7 Auswertung....28
7.1 Lichtemissionen der Gemeinden....29
7.2 Anteil der Lichtemissionen in den Nutzungsflächen pro Gemeinden....30
7.3 Vergleich der Lichtemissionen nach Nutzungsart zwischen den Gemeinden....34
8 Beispielmosaik....36
9 Referenzen....40
10 Anhang 1: Fehleranalyse Positionsfehler RMS f1.4....41
11 Anhang 2: Dunkelstrommessungen im Labor vom 24.02.2015....42
12 Anhang 3: Dunkelstrommessungen während des Messfluges am 26.10.2015....43
13 Anhang 4: Berechnung Gain für Pixel R (von R ,G1,G2,B)....45
14 Anhang 5: Berechnung Gain für Pixel G1 (von R ,G1,G2,B)....46
15 Anhang 6: Berechnung Gain für Pixel G2 (von R ,G1,G2,B)....47
16 Anhang 7: Berechnung Gain für Pixel B (von R ,G1,G2,B)....48

1 Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl das Land Oberösterreich, als auch die Freie Universität Berlin, sowie die Universität Wien beschäftigen sich schon länger eingehend mit der Thematik Lichtverschmutzung. Eine gemeinsame Kooperation ermöglichte nun einen nächtlichen Überflug des oberösterreichischen Zentralraumes. Der vorliegende Bericht umfasst

- eine Bestandsaufnahme der nächtlichen Lichtemission im oberösterreichischen Zentralraum,
- eine Beschreibung des eingesetzten Equipments, die Ergebnisse der Laborkalibration,
- eine Abschätzung der Gesamtenergie und
- die Analyse und Auswertung für die verschiedenen Gemeinden, Nutzungsarten und -flächen.

Das rund 400 km² große Gebiet mit knapp 400.000 Einwohnern wurde in der Nacht des 26. Oktobers 2014 überflogen. Das entstandene Mosaik aus den zusammengesetzten Aufnahmen liefert Informationen über Emittenten, Lichtfarbe und den Energieverbrauch. Es ist frei auf der Homepage des Landes Oberösterreich unter http://www.doris.ooe.gv.at/themen/umwelt/lichtverschmutzung.aspx verfügbar. Der Ursprung des emittierten Lichts nach oben wird damit eindrucksvoll bis ins Detail nachvollziehbar.

Geschätzt rund 5.7 MW oder etwa 24.8 GWh an Licht werden über dieser Fläche nach oben abgestrahlt. Dies entspricht dem Verbrauch von etwa 6.000 österreichischen Haushalten oder ca. 15 W/Einwohner. Zum Vergleich: Für Madrid, mit einer Einwohnerzahl von 6.2 Millionen, wurden in einer früheren Studie etwa 20 W/Person berechnet.

Mit dem frei verfügbaren Bildermosaik wird die Lichtverschmutzung nun auch für Architekten, Planer, Sachverständige, Anwender und interessierte Bürger noch verständlicher, greifbarer und einfacher nachvollziehbar.

Als erste Maßnahme können nun Emittenten im Überfluggebiet mit vergleichsweise großen Einsparungsmöglichkeiten aufmerksam gemacht werden. Künftig soll direktes Licht noch oben vermieden und Einsparungspotenzial genutzt werden. Dafür bietet der vorliegende Bericht eine gute Grundlage.

Die ermittelten Daten zeigen eine Momentaufnahme des 26. Oktobers 2014. In wie weit sich die Situation in naher Zukunft verändert, wird nicht zuletzt von Sensibilisierung, Beratung, Aufklärung und weiteren Projekten abhängig sein.

Für ein weiteres Vorankommen beim Erhalt des Nachthimmels wären auch Vergleiche zwischen Städten wie etwa Linz – Berlin von Bedeutung. Für dazu notwendige wissenschaftliche Studien kann auf Mosaikdaten, Daten aus Lichtmessstationen (z.B. Oberösterreichisches Lichtmessnetz) und Satellitendaten zurückgegriffen werden.

2 Einleitung

Fortschritte in der Erzeugung von Licht machen es Städten möglich, bei weitem mehr Licht als je zuvor zu produzieren. Eine unbeabsichtigte Folge davon ist die diffuse Beleuchtung von großen Flächen durch Lichtstreuung in der Erdatmosphäre (Skyglow). Das Ergebnis davon ist, dass es keine wirkliche Nacht über einem beträchtlichen Teil des europäischen Kontinents mehr gibt. Wahrscheinlich führt dies zu einem großflächigen Verlust des Lebensraums für nachtaktive Tiere, jedoch sind sowohl Lichtemissionen als auch die möglichen Auswirkungen auf die Umwelt wenig bekannt.

Ein Großteil des Lichts, das durch Städte und Gemeinden entsteht, wird aufgrund der benutzten Lampen-Designs oft ineffektiv verwendet. Beispielsweise wird ein Teil des Lichts oft direkt in den Himmel gerichtet, statt auf die Fläche, die zu beleuchten ist. Die Internationale Dark-Sky Association schätzt, dass die Kosten für die Verschwendung von Licht in Städten weltweit $ 110 Milliarden US-Dollar pro Jahr beträgt. Verbesserungen in der Beleuchtung können demzufolge zu einer Win-Win-Situation für die Städte führen. Auswirkungen auf das regionale Umfeld können eingedämmt werden, während gleichzeitig die Betriebskosten reduziert werden.

Seit 2009 hat das Institut für Weltraumwissenschaften der Freien Universität Berlin (FU) die urbane Beleuchtung in der Umgebung Berlin/Brandenburg untersucht. Neben anderen Studien hat die FU ein 391 km² großes Mosaikbild für Berlin bei Nacht erstellt. Über dieses Mosaik wurde eine Landnutzungskarte gelegt, um zu untersuchen, von welchen Nutzungsflächen verstärkt Licht direkt nach oben gerichtet wird.

Das Institut für Weltraumwissenschaften der Freien Universität ist sehr an der Erweiterung der Kenntnisse über Lichtemissionen verschiedener Städte interessiert und strebt daher ähnliche Studien in anderen Städten an. Vergleiche zwischen Städten unterschiedlicher Größe könnten ein erster Schritt in Richtung eines möglichen EU-Projekts im Rahmen des Programms Horizon 2020 sein.

Das Land Oberösterreich ist ebenfalls daran interessiert, die nächtliche Lichtemission des Zentralraumes zu verstehen und zu verbessern. Gemeinsam mit dem Institut für Astrophysik der Universität Wien wurde ein Lichtmessnetz für Oberösterreich aufgebaut. Ein Netzwerk von Lichtsensoren verteilt über ganz Oberösterreich, misst die Himmelsaufhellung während der Nachtstunden. Mit diesen Messungen trägt das Land Oberösterreich inhaltlich zum vorliegenden Projekt bei. Dieses Lichtmessnetz liefert einen guten zeitlichen Verlauf, kann jedoch keine Informationen zu einzelnen Lichtquellen innerhalb des Messgebietes bieten.

Die drei Projektpartner wollen in einer Forschungskooperation Luftbildaufnahmen vom Zentralraum Oberösterreich mittels Überflug erstellen, um ein Verständnis für die Hauptquellen der Lichtverschwendung zu erhalten.

3 Planung des Fluges

Der geplante Flug bestand aus sieben Tracks mit etwa 40 km in der Länge und mit etwa 1,8 km Abstand zwischen den Tracks. Ein achter Track wurde als Verbindung zum Quertrack nicht in der gesamten Länge geflogen. Das Gebiet des endgültigen Bildmosaiks ist etwa 400 km² groß und erstreckt sich über das Gebiet von Linz bis Wels.

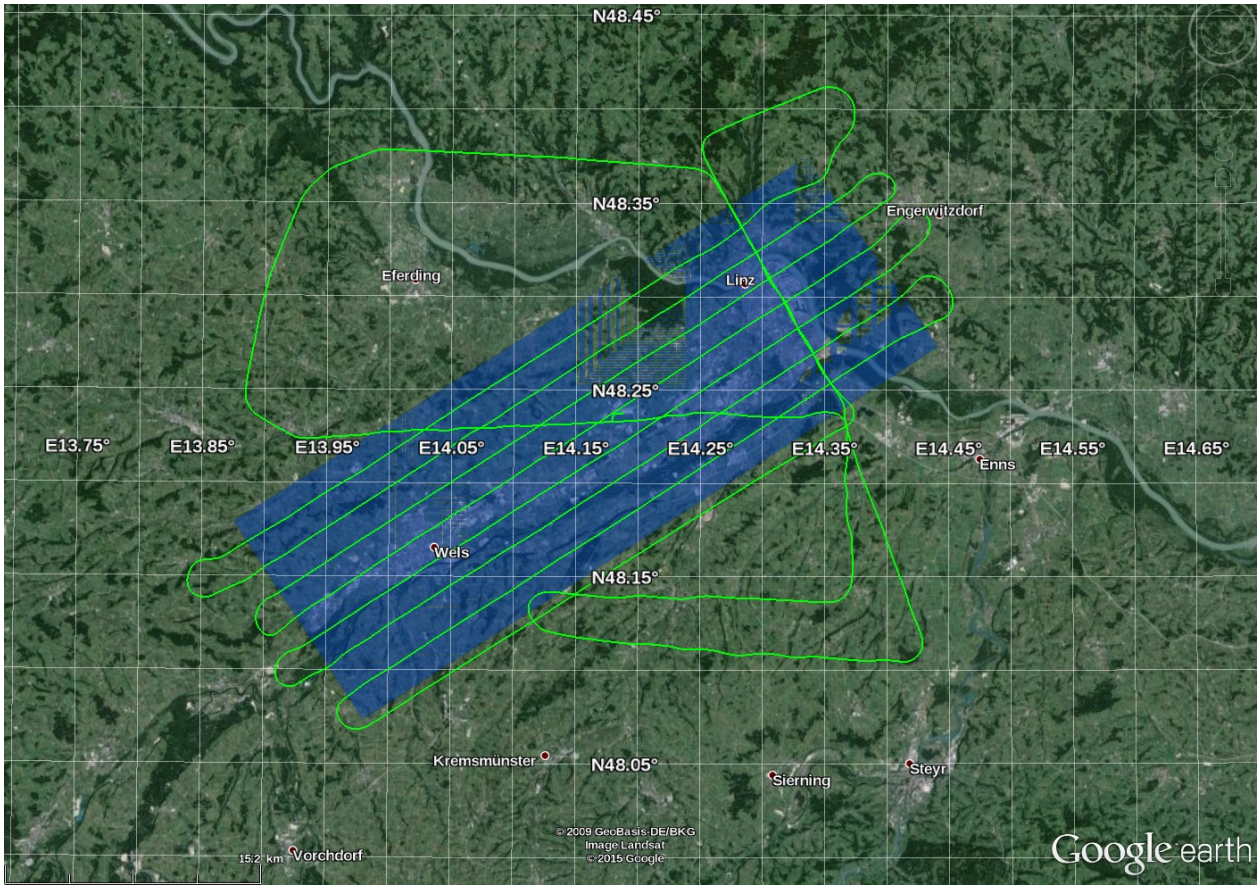


Abbildung 1: Fluggebiet und Flugroute

4 Beschreibung der Instrumente

Aircraft: CESSNA 207T (FUB)

Abbildung 2: Cessna am Flughafen Linz

Equipment:

- IGI Aerocontrol (Inertial Navigation System)
- GSM3000, stabilized instrument platform
- Nikon D4S, RGB camera + GPS module + Event trigger module

Abbildung 3: Cessna Messequipment

IGI Aerocontrol (Inertial Navigation System):

Das System IGI Aerocontrol dient der Aufzeichnung der Flugzeug Lage- und Positionsdaten. Gleichzeitig steuert dieses System die stabilisierende Instrumentenplattform GSM3000. Damit wird eine Minimierung, der durch die Bewegung des Fluggerätes erzeugten Bewegungen der Instrumente erreicht. Des Weiteren dient dieses System zur Synchronisation der Messdaten mit der Flugzeuglage und den Positionsdaten.

Nikon D4S:

Die Vollformat Spiegelreflexkamera Nikon D4S wurde zur Erfassung der nächtlichen Bildaufnahmen verwendet.

	Type
Type	Single-lens reflex digital camera
	Image sensor
Image sensor	36.0 x 23.9 mm CMOS sensor (Nikon FX format)
Total pixels	16.6 million
Dust-reduction system	Image sensor cleaning, Image Dust Off reference data (optional Capture NX 2 software required)
	Storage
Image size(pixels)	• FX format (36x24): 4928 x 3280 (L), 3696 x 2456 (M), 2464 x 1640 (S)
File format	• NEF (RAW): 14 bit, lossless compressed
	Lens
Lens	AF-S NIKKOR 50mm f/1.4G
	Exposure
Time	10 ms
Mode	aperture-priority auto (A)
ISO sensitivity	ISO 1600
ADL bracketing	3 frames → F1.4, F2.8, F5.6
	Focus
Focus lock	Manual Focus locked
	White balance
White balance	Auto (2 types), incandescent, fluorescent
Ethernet	RJ-45 connector
	Power source

AC adapter	EH-6b AC Adapter; requires EP-6 Power Connector (available separately)
	Dimensions / weight
Dimensions (W x H x D)	Approx. 160 x 156.5 x 90.5 mm/ 6.3 x 6.2 x 3.6 in.
Weight	Approx. 1350 g/ 2 lb 15.6 oz with battery and XQD memory card but without body cap and accessory shoe cover; approx. 1180 g/ 2 lb 9.6 oz (camera body only)
	Operating environment
Operating environment	Temperature: 0 to 40°C/32 to 104°F humidity: 85% or less (no condensation)

5 Durchgeführte Flüge

Folgende Flüge wurden im Rahmen dieses Projektes durchgeführt.

10.10.2014	0h43	Testflug
10.10.2014	0h20	Testflug
10.10.2014	0h18	Testflug
26.10.2014	2h23	Transferflug
26.10.2014	2h40	Messflug Oberösterreich
27.10.2014	2h32	Transferflug

Datenprodukte:

CESSNA 207T:

- Navigation data level0a (ASCII, KML, NetCDF)

Nikon D4S:

- RGB-Images (Nef, fits, Tiff, GeoTiff)

5.1 Testflug 10. Okt. 2014

Hauptaufgabe der Testflüge war ein Test des Gesamtequipments. Dabei wurden keine Störungen oder Fehler festgestellt. Es erfolgte keine weitere Auswertung der erfassten Daten.

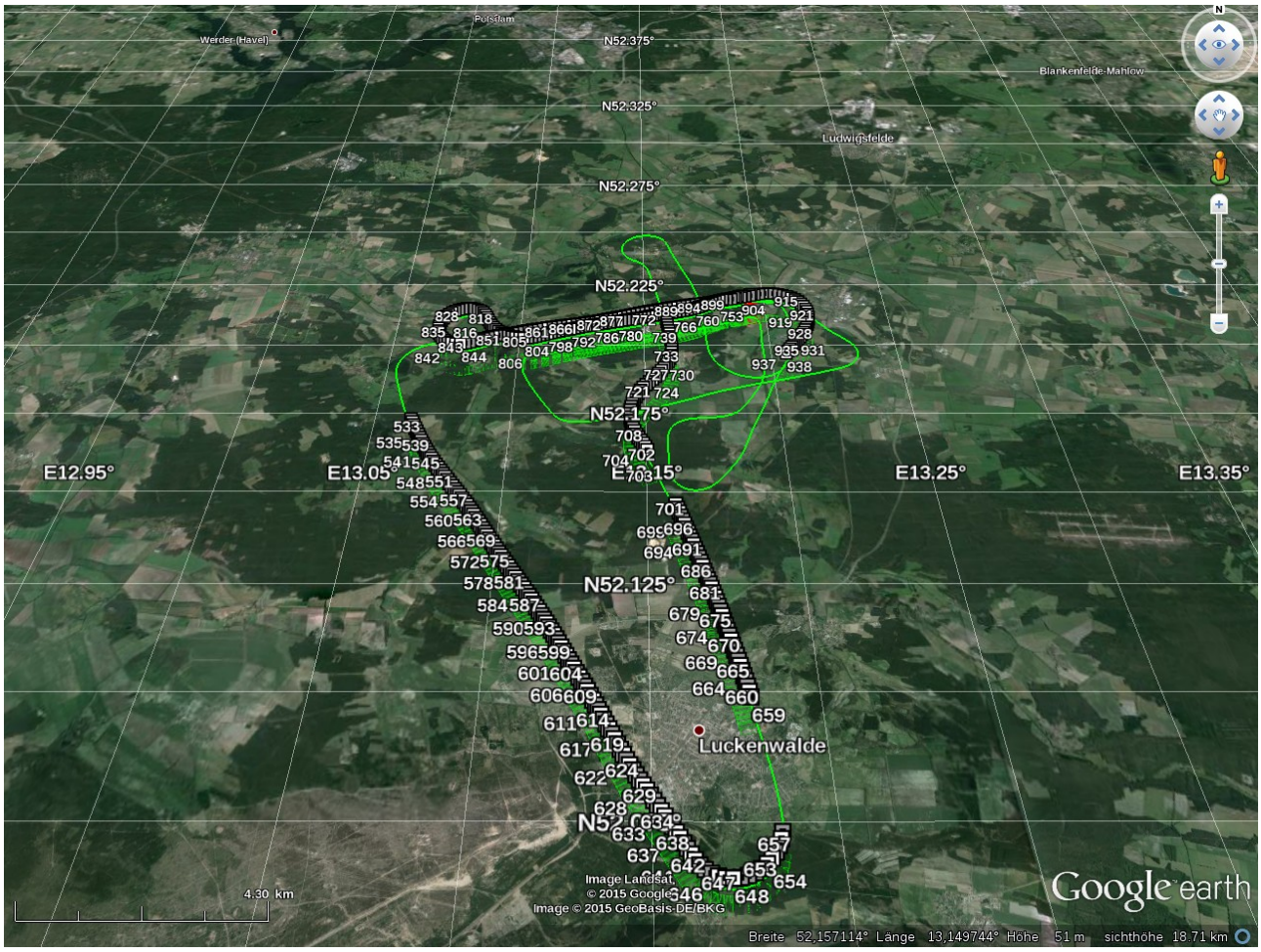


Abbildung 4: Testflugroute

5.2 Messflug Oberösterreich 26.Okt.2014

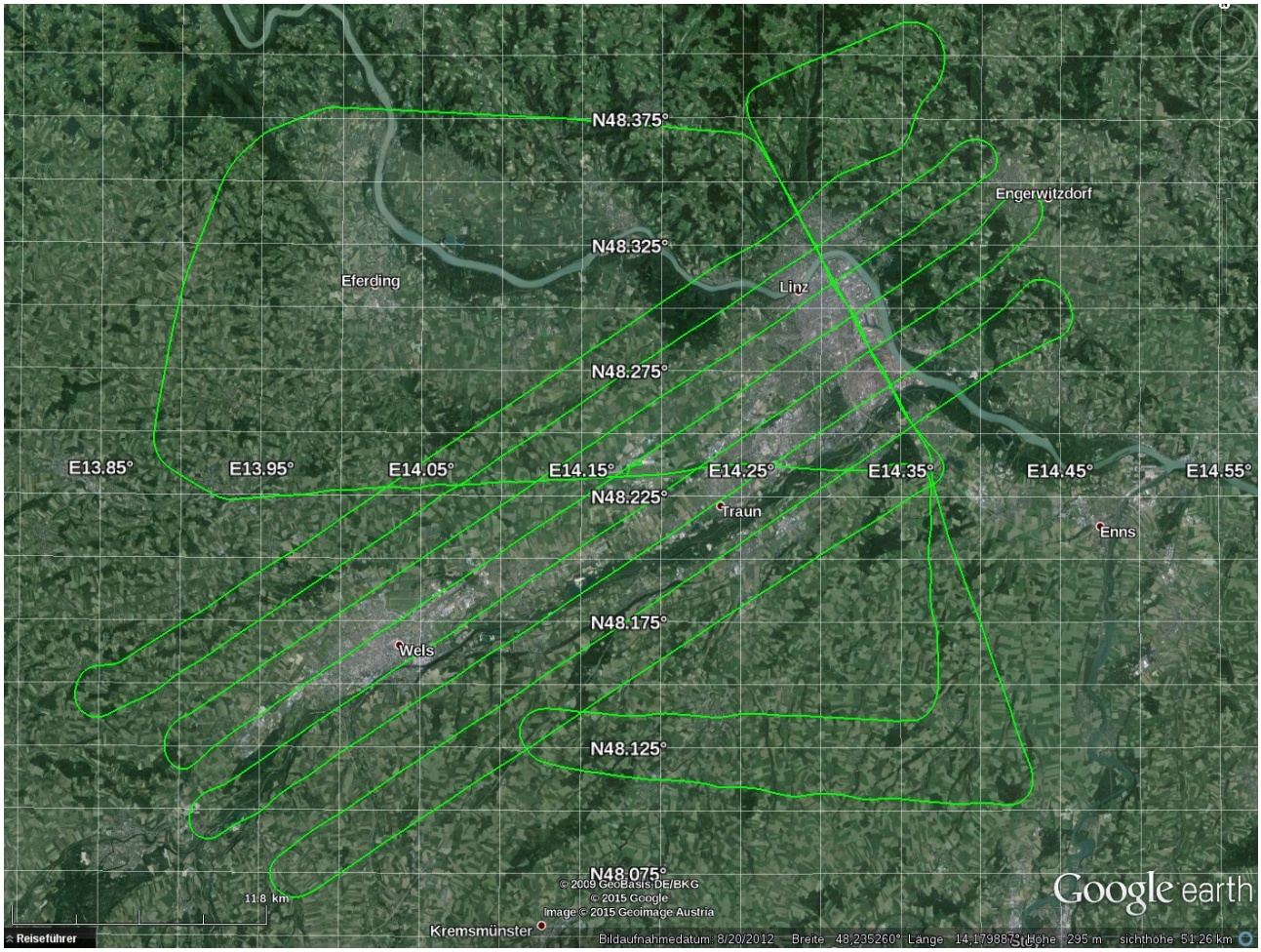


Abbildung 5: Flugroute 26.10.2014

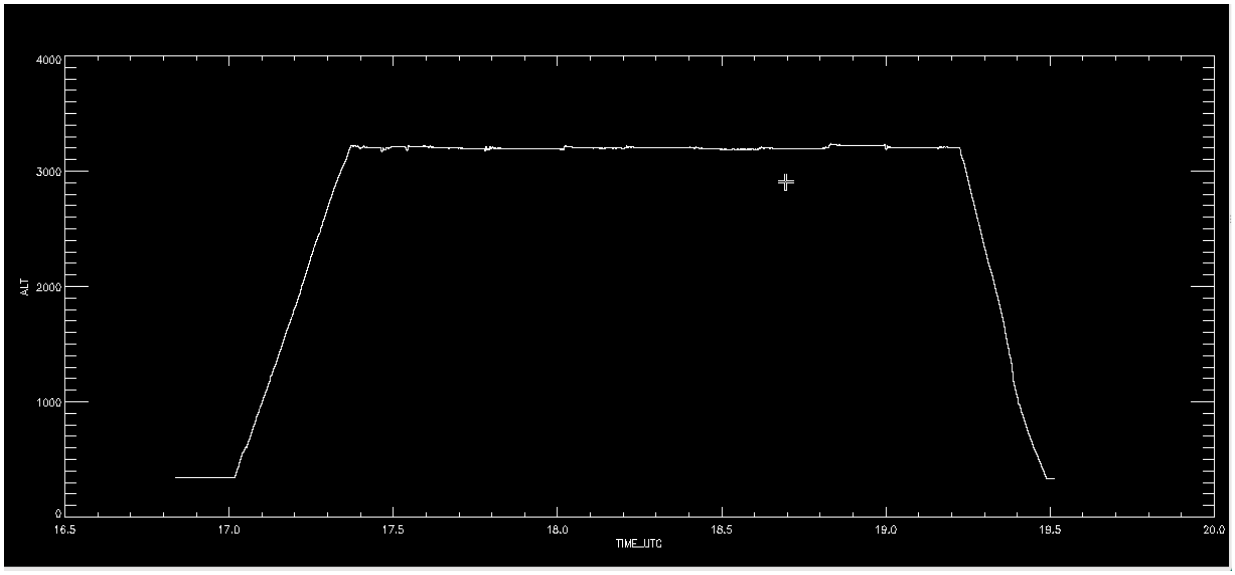
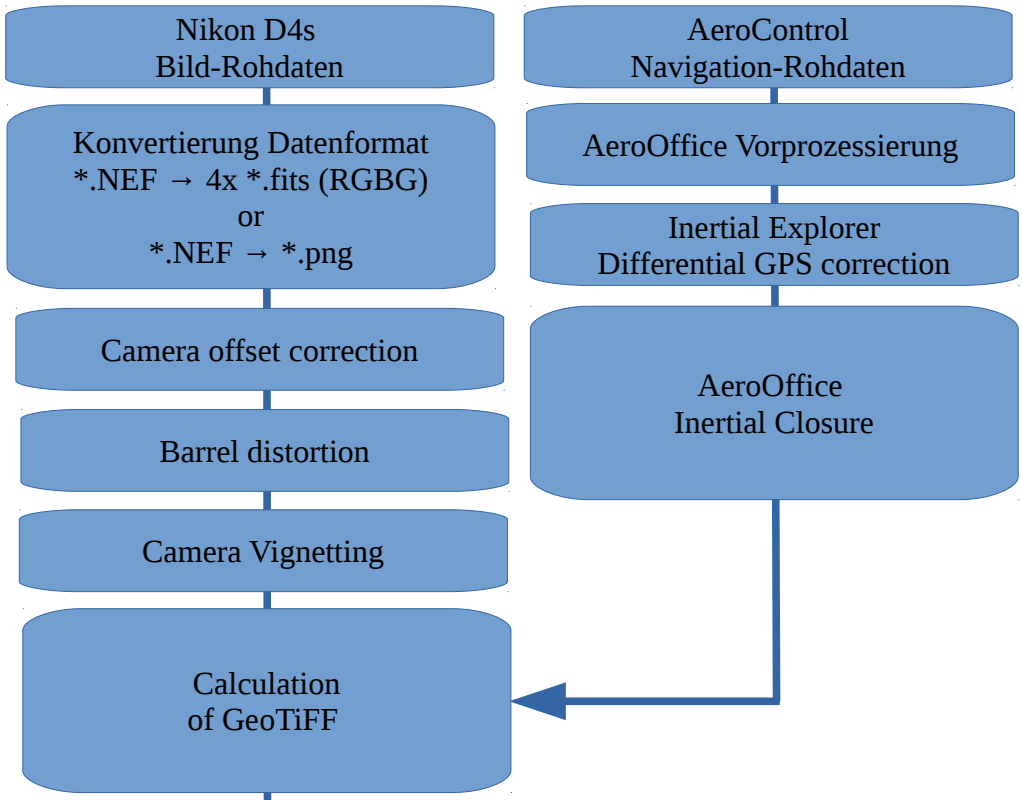


Abbildung 6: Flufhöhe Linz 26.10.2014

6 Auswertung der Messdaten

6.1 Beschreibung Prozesskette

Vorprozessierung:



Erstellung des Mosaik:

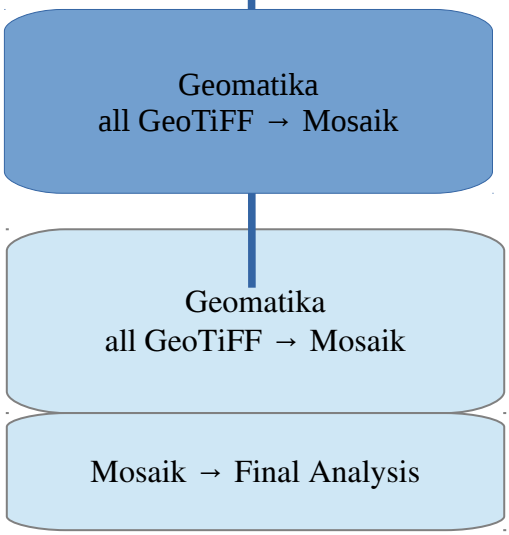


Abbildung 7: Prozesskette

6.2 Labormessungen

6.2.1 Offsetkorrektur

Die Kamera Nikon D4s hat einen werkseitig eingestellten Offset. Dieser ist in jedem Bild, unabhängig von der Beleuchtungsstärke additiv vorhanden und muss korrigiert werden. Um diesen Wert zu ermitteln, können Aufnahmen ohne Belichtung aufgenommen und ein vom Pixel abhängiger Wert ermittelt werden. Es wurden diese sogenannten Dunkelstrommessungen während des Auf- und des Abstieges des Messfluges und im Labor untersucht. Dazu wurde jeweils die Abdeckkappe am Objektiv der Kamera befestigt und somit ein Lichteinfall verhindert (Messwerte siehe Anhang 2 und 3).

Ergebnis:

Der Minimalwert unterscheidet sich nicht und liegt in beiden Fällen systembedingt bei: 744 DN

Die Maximalwerte schwanken im Labor stärker als während des Messfluges. Ein Grund hierfür wird weiter untersucht, ist für diese Arbeit aber nicht relevant. Auch die gelegentlichen hohen Maximalwerte erscheinen unsystematisch an verschiedenen Stellen der Pixelmatrix. Dies ist ein in der Literatur bekannter Effekt und wird auf das Auftreffen schwerer Partikel auf das Detektormaterial zurückgeführt. Der Mittelwert, die Standardabweichung und Varianz ändern sich nur minimal während des Auf- und Abstiegs. Damit ist anzunehmen, dass während des Fluges der Dunkelstrom, wie auch der elektronische Offset ausreichend stabil blieben und somit unabhängig von Druck und Temperatur sind und ausreichend gut intern korrigiert werden.

6.2.2 Linearität

In diesem Abschnitt wird die Linearität der Nikon D4s untersucht. Dazu wird eine Ulbrichtkugel mit angenommener konstanter Lichtintensität und homogener Leuchtfläche eingesetzt. Die Kamera wird mit der ISO-Einstellung (ISO 1600) bei verschiedenen Blendeneinstellungen und Belichtungszeiten vermessen. Zum Vergleich wurde auch eine Blende bei ISO-100 aufgenommen. Zu beachten ist die 14-Bit Auflösung der Kamera (DN: 2^14 ≙ 16384). Der RBI-Effekt (*residual bulk image)* wurde in dieser Analyse nicht berücksichtigt.

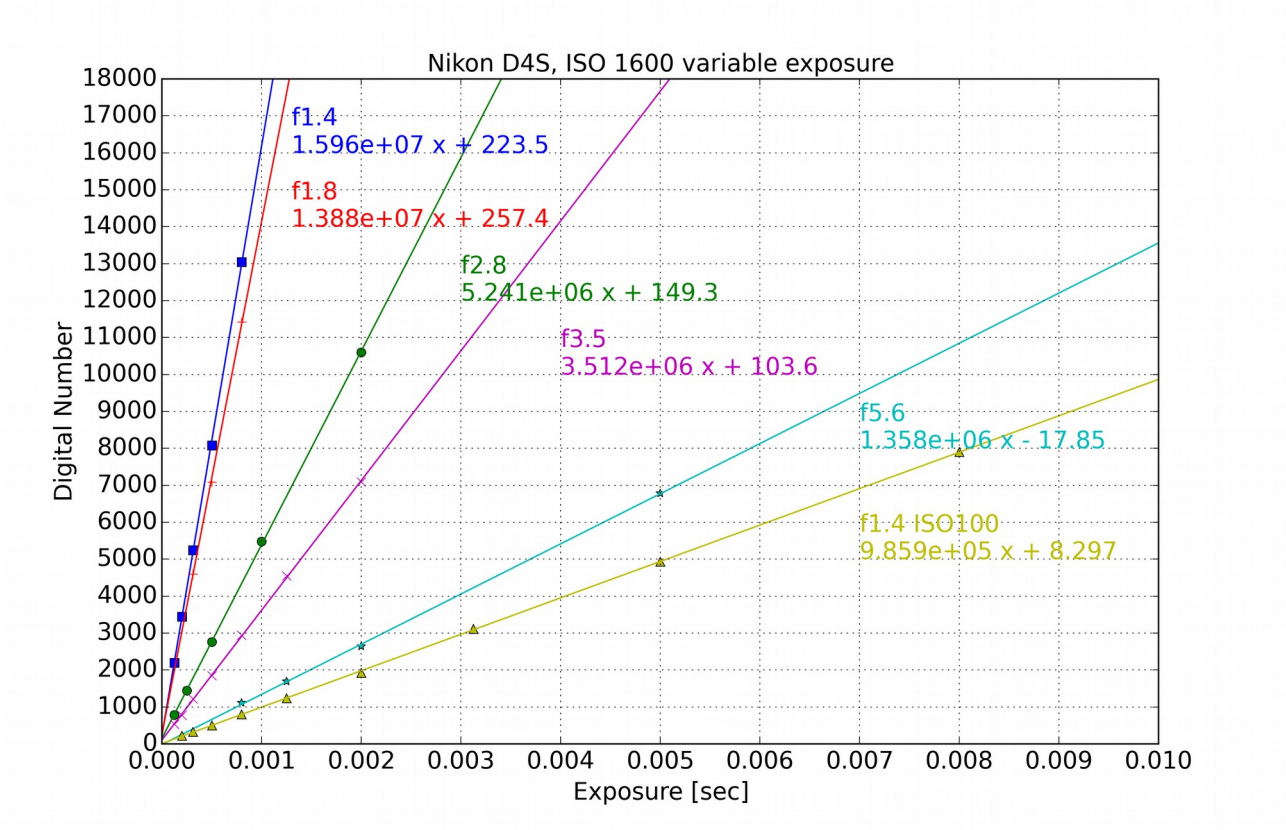


Abbildung 8: Lineritätsmessungen Belichtungszeit [sec] zu Signal [DN]

Eine weitere Untersuchung der gemessenen Daten mit der Ulbrichtkugel ergibt die logarithmisch linearen Abhängigkeiten der Kamera für verschiedene Lichtwerte. Dazu wurde der jeweilige Lichtwert mit folgender Formel berechnet:

$$LV = \frac{100}{ISO} \frac{f_{number}^2}{exposure\ time}$$

Die Geradengleichung ergibt sich zu

$$\log(y(x)) = slope\ x + intercept$$

Folgende Werte wurden für die verschiedenen Blendenwerte ermittelt. Die Eingangsdaten wurden Offset korrigiert (Dark current und Electronic offset) und normalisiert, sind aber nicht in ihren absoluten Werten korrigiert. Daher kommt es zu einem minimalen Offset (intercept Werte) bei verschiedenen Blendenwerten und konstanter ISO-Einstellung.

	slope	intercept	r_value	p_value	std_err
f1.4 :	-0.95339	7.19904	-0.99988	0.00000	0.00868
f1.8 :	-0.92760	7.32005	-0.99950	0.00001	0.01695
f2.8 :	-0.94381	7.36069	-0.99979	0.00000	0.01116
f3.5 :	-0.93883	7.32780	-0.99952	0.00000	0.01457
f5.6 :	-0.98778	7.74266	-0.99968	0.01618	0.02510
f1.4_100:	-0.97491	4.60872	-0.99979	0.00000	0.00748

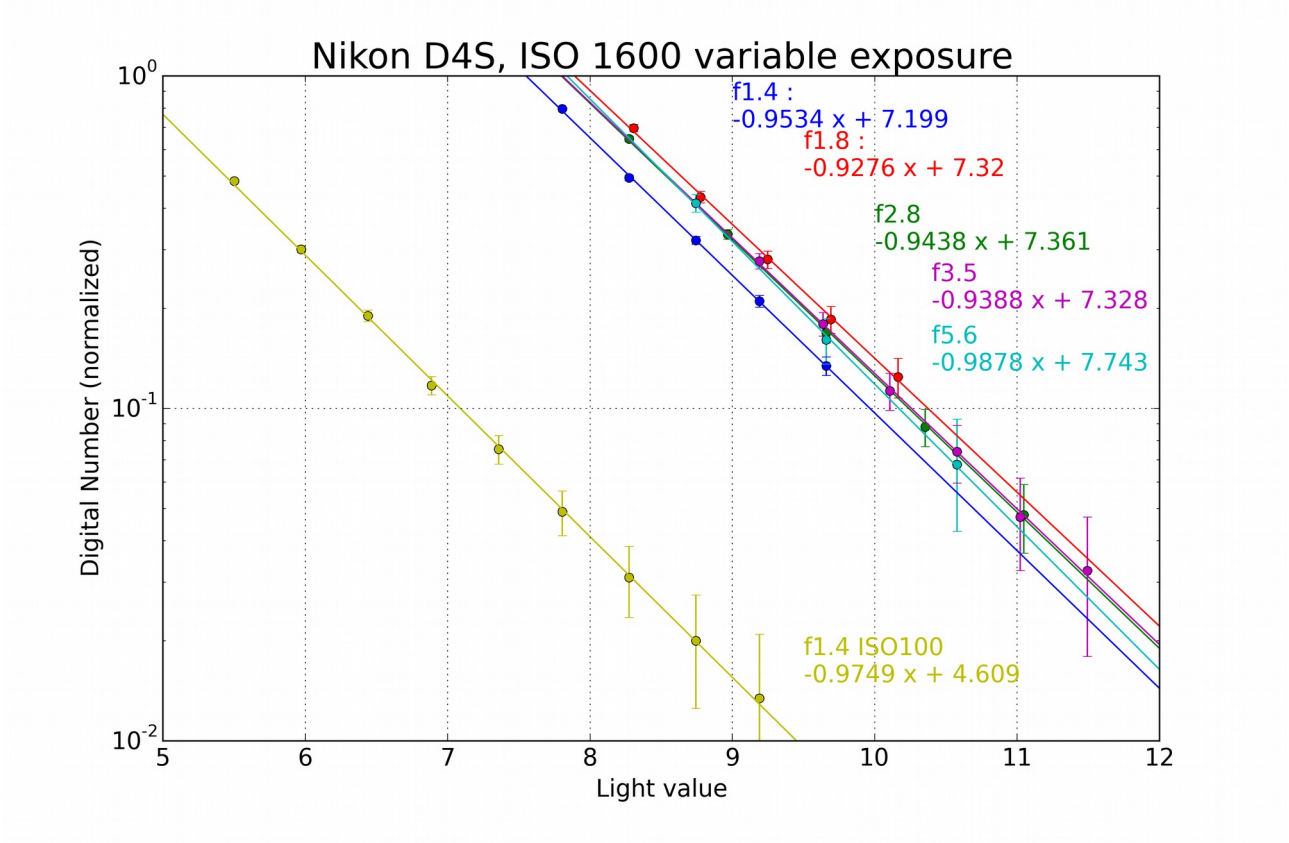


Abbildung 9: Lineritätsmessungen Lichtwert zu normalisiertem log-Signalwert [DN]

Im zweiten Versuch wurde mit Hilfe einer *Light Transfer curve* die *Variance* und der *Gain* für die Blende f1.4 und der Einstellung ISO1600 bestimmt. Dazu wurde eine Ulbrichtkugel mit homogener Leuchtfläche bei verschiedenen Helligkeiten vermessen und für die verschiedenen Farbkanäle des RGGB-Detektor Bayer-Filters ausgewertet.

Bilddifferenz: $BD = (Bild\,1 - offset_{median}) - (Bild\,2 - offset_{median})$

Bildsumme: $SU = \frac{(Bild\,1 - offset_{median}) + (Bild\,2 - offset_{median})}{2}$

Mittelwert aus SU: $SU_{Mean} = Mean(SU_{[100\,x\,100\,Pixel\,of\,image\,center]})$

Ausleserauschen: $RON = Stddev(BD_{[100\,x\,100\,Pixel\,of\,image\,center]})$

Varianz aus BD: $Var = Variance(BD_{[100\,x\,100\,Pixel\,of\,image\,center]})$

$Var = RON^2$

linear regression: $Var = f(SU_{Mean})$ ==> slope, interception

Gain: $Gain = \frac{SU_{Mean}}{VAR}$ or $Gain = \frac{1}{slope}$

Noise: $\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{RON}^2 + \left(\sqrt{\frac{SU_{Mean}}{Gain}}\right)^2 + (FPN * SU_{Mean})^2}$ (FPN: Fixed Pattern Noise)

(Messwertkurven siehe Anhang 4, 5, 6 und 7)

Ergebnis:

Die eingesetzte Kamera hat eine gute Linearität im gesamten Messbereich bis 2^14 DN und kann für diesen Anwendungsfall ohne Korrektur der Linearität eingesetzt werden.

6.2.3 Vignettierung

Die Vignettierung der Kamera wurde im Labor für verschiedene Blendeneinstellungen (f1.4, f2.8, f5.6) vermessen. Dazu wurde eine Ulbrichtkugel als homogene Leuchtfläche verwendet. Die Homogenität wurde mit Translations-Einheit und einem Einzeldetektor vermessen. Die Homogenität ist besser 5% für den gesamten Leuchtbereich. Die Belichtungszeiten und der ISO-Wert mussten entsprechend der weitaus helleren Szene der Ulbrichtkugel, im Vergleich mit den Nachtmessungen angepasst werden (1/800, ISO 100). Für die größte Blendenöffnung (f1.4) war die Vignettierung am Größten. Die Einzelaufnahmen jeder Blende wurden Offset-korrigiert und ein Korrekturwert für jedes Pixel errechnet. Diese Korrekturwerte wurden durch Division auf jede Aufnahme angewendet.

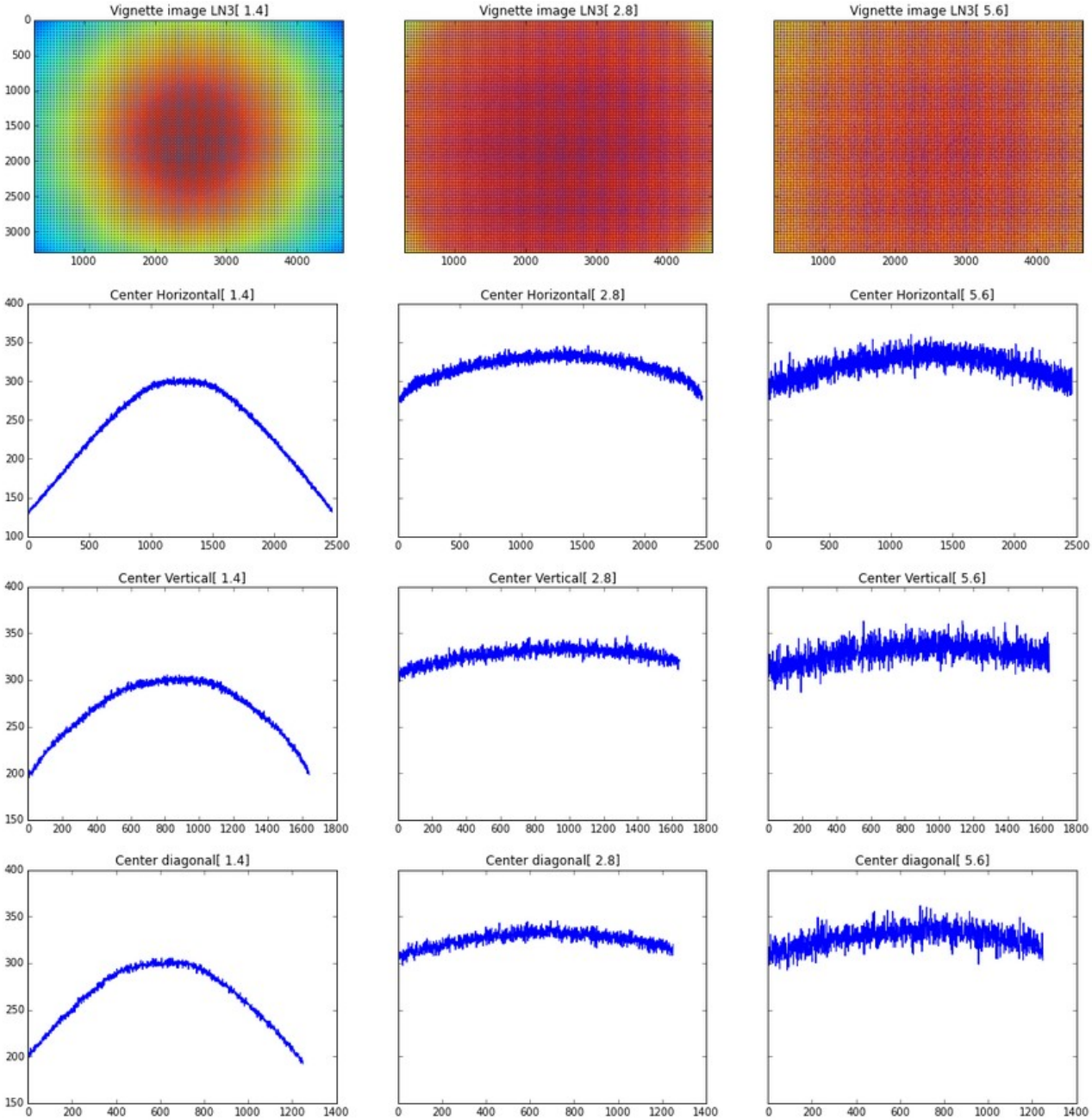


Abbildung 10: Vignettierung Nikon D4s

6.2.4 Barrel distortion (Kissenverzerrung)

Die Kissenverzerrung der Nikon Kamera ist auch ohne Korrektur sehr gering (Beispiel oberes Bild links). Es wurden folgende Werte im Labor ermittelt und die Aufnahmen entsprechend korrigiert (Beispiel unteres Bild links).

Ermittelter Fehler Berechnung Verzerrungsfehler: RMS = 4.59991413116

Ermittelte Kamera-Matrix: $$CM = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_x & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

CM = [[3.17274823e+04 0.00000000e+00 1.74754564e+03]
[0.00000000e+00 3.17476430e+04 2.41782510e+03]
[0.00000000e+00 0.00000000e+00 1.00000000e+00]]

Ermittelte Verzerrungskoeffizienten: $DistCoff = (k_1 k_2 p_1 p_2 k_3)$

DistCoff = [-3.46827949e+00 6.83255623e+01 -6.87874245e-02 5.77549906e-02 -2.77841573e+03]

Rotation Vektor:

rvect = [array([[0.12143155], [0.08133346], [-0.00475026]])]

Translation Vektor:

tvect = [array([[-7.24444278], [-9.85377444], [138.86459298]])]

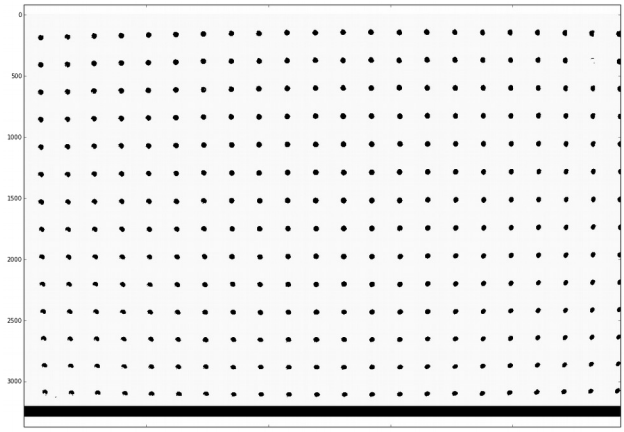
$$x_{corrected} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)$$

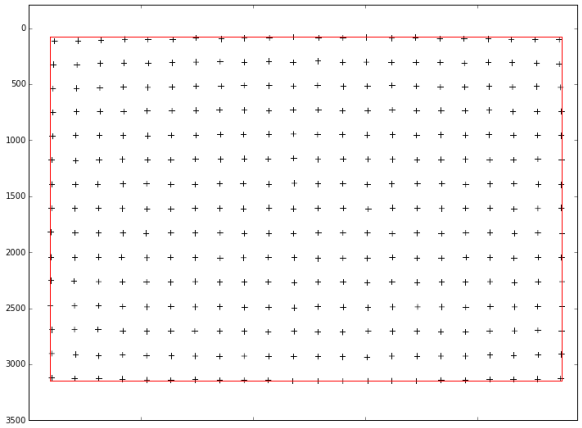
$$x_{corrected} = x + [2 p_1 xy + p_2 (r^2 + 2 x^2)]$$

$$y_{corrected} = y + [p_1 (r^2 + 2 y^2) + 2 p_2 xy]$$

$$y_{corrected} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)$$

Beispielbilder für die Korrektur der Kissenverzerrung Nikon D4s:





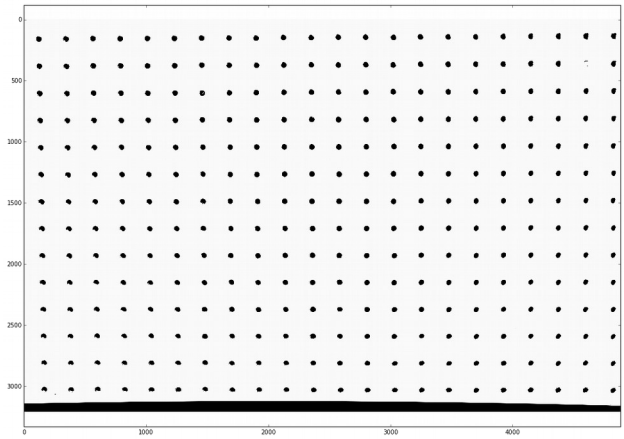


Abbildung 11: Beispiel Korrektur von SW-Bild

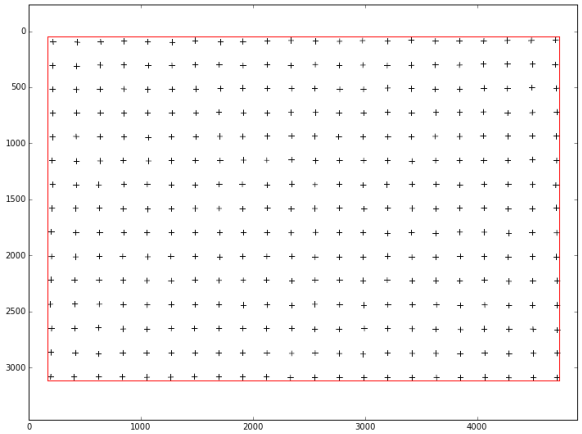


Abbildung 12: Beispiel Korrektur mit zusätzlichen roten Hilfslinien

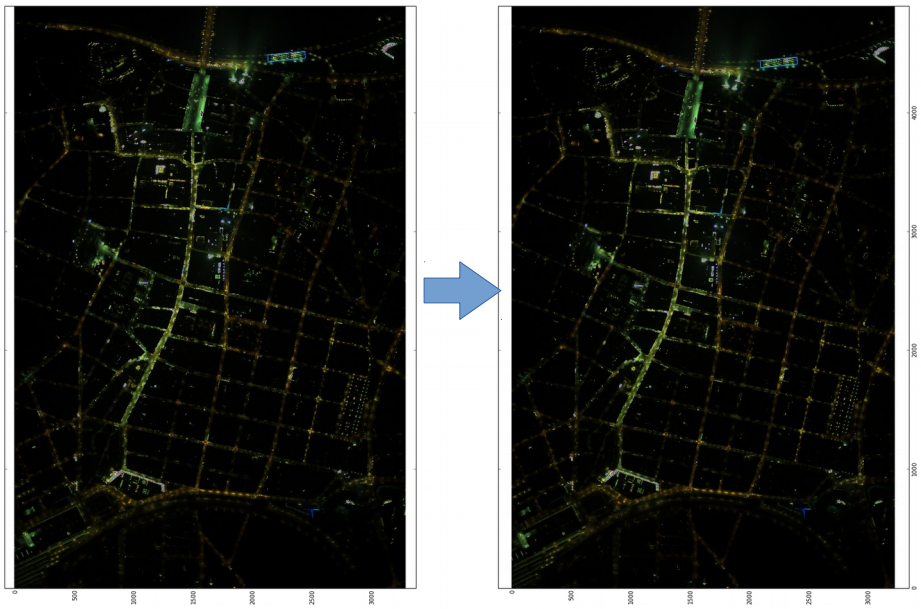


Abbildung 13: Beispiel Korrektur Einzelbild

6.3 Kalibration der Bestrahlungsstärke und Leuchtdichte

Die Bestimmung der Bestrahlungsstärke, erfordert die Messung der emittierten Strahlung oder auch der Strahldichte aus allen Richtungen. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, diese mit einem Satz von Aufnahmen, aus einer kleinen Anzahl von Aufnahmerichtungen, eindeutig zu bestimmen. Des Weiteren können einzelne Leuchtkörper bei einzelnen Aufnahmen durch Gebäude oder andere Objekte verdeckt sein. Diese Gründe behindern die exakte Bestimmung der spezifischen Ausstrahlung einer abstrahlenden Fläche. Mit einer Reihe von Annahmen ist nur eine ungefähre Abschätzung möglich und bildet nur die untere Grenze der gesamten abgegebenen Energie ab. Die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit Fernerkundung in der Nacht sind diskutiert in Kyba et al. (2014) und eine ähnliche Analyse in Cao & Bao (2014).

6.4 Abstrahlungsrichtung

Im idealen Fall strahlen Straßenlampen nur nach unten und nur ein kleiner Teil wird von der Erdoberfläche zurück in den Himmel reflektiert. Im Fall von trockenem Asphalt als reflektierende Fläche, kann man weitestgehend von einem Lambertschen Strahler ausgehen. Leider gestaltet sich die Strahlung in der Praxis nicht so einfach. Zunächst emittieren viele Lichter, Straßenbeleuchtung inbegriffen, einen Teil ihres Lichts direkt in die Atmosphäre. Falls dieses Licht in horizontaler Richtung strahlt, ist es für eine zum Nadir ausgerichtete Kamera nicht sichtbar. Ähnlich verhält es sich mit schmalen Kegelstrahlen (Bsp.: Scheinwerfer) die normalerweise für die Kamera nicht sichtbar sind und in dem unwahrscheinlichen Fall, dass sie es doch sind, äußerst hell erscheinen. Letztlich wird Licht, welches vom Boden in urbanen Gebieten strahlt, mit hoher Wahrscheinlichkeit weiter reflektiert oder durch Hindernisse wie zum Beispiel Gebäude oder Bäume blockiert. Aus diesen Gründen sind hier aufgeführten Energiefluss-Schätzungen nach oben begrenzt. Unter Annahme Lambertscher Emission, beträgt die Strahlungsintensität pi mal der Strahlung (siehe Cao & Bao (2014).

6.5 Spektrum

Breitband-Kanäle wie rot, grün und blau, welche die Kamera dieses Fluges benutzt, besitzen nicht genug spektrale Auflösung um die spektrale Ausstrahlung zu messen. Einen Blick auf das fertige Mosaik zeigt, dass die Landschaft mehrere unterschiedliche Lichtquellen umfasst. Des Weiteren ändert sich durch die Reflektion der Bodenoberfläche oder von Gebäudeflächen die spektrale Zusammensetzung des Lichts relativ zur originalen Quelle. Um eine Untergrenze für den oben gerichteten Energiefluss zu erhalten, vergleichen wir die Werte aus dem grünen Band im Mosaik, mit den Werten aus dem „Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day-Night Band“ (DNB) des Suomi NPP Satelliten von Oktober 2014. Das Satelliten-Instrument DNB liefert eine Radianz-Kalibration und entspricht weitestgehend der Luminazkurve V_λ des grünen Kanal der Nikon Kamera.

6.6 Prozessierung des Navigationsdaten

Die Navigations- und Fluglagedaten wurden während des Fluges mit dem System IGI-AeroControl aufgezeichnet. Die Kameraauslösung wurde über das GPS Zeitsignal PPS ausgelöst. Parallel wurde der Aufnahmezeitpunkt für jedes Bild GPS genau aufgezeichnet. Mit den Programmen Inertial-Explorer und GraphNav wurde jede GPS-Position mit Korrekturdaten des Österreichischen APOS-Systems differential-GPS korrigiert. Danach wurde eine Lösung aus Fluglagedaten und GPS berechnet. Die Lösung hat in der Regel ein RMS von < 0.25m für jede Position.

6.7 Berechnung der *Boresight angle (Einbaulagewinkel)*

Für die automatische Georeferenzierung der Bilder ist es notwendig, die Blickrichtung der Kamera relativ zu der Orientierung des Flugzeuges (Sichtlinienwinkel) bzw. zur Inertialeinheit zu kennen. Dies wurde durch manuelle Georeferenzierung mehrerer Bilder und Vergleich der berechneten Position mit einer Reihe von Kontrollpunkten (GCP: Ground control points) auf die manuell georeferenzierten Positionen ermittelt. Die verwendeten Bilder (und die Anzahl der Referenzpunkte) waren: 616 (30), 619 (30), 637 (50), 1762 (50), 2539 (30) und 3436 (20). Die Ziellinienwinkel, Kamera Einbauwinkel (Boresight-angle), die Kamera Verzerrungen, das Sichtfeld und die Offsetzeiten der Bildaufnahme zur GPS-Zeit wurden dabei ebenfalls ermittelt. Als Zentrum der Kamera-Ansicht wurde folgendes Pixel (ohne demosaicing des Bayer RGGB-Bildes) angenommen: Pixel 1.234,1 (x) und 822,1 (y). Die berechneten Einbaulagewinkel waren:

Roll = 0,47°, Pitch = -2,41°, Yaw = 89.72°.

Die Kameraverzerrung wurde als radial angenommen, wobei r ' = r (1 + k r2) mit dem Abstand r in Pixel vom Mittelpixel und dem Kameraverzerrungsparameter k. Der beste Fit ergab sich für k = 1.68x10-8. Für jedes Pixel kann eine verzerrungskorrigierte Pixelposition durch die Lösung der kubischen Gleichung ermittelt werden. Diese korrigierte Pixelposition wurde verwendet, um die Blickrichtung für ein gegebenes Pixel, mit einem Versetzungswinkel von 0,0160 Grad pro Pixel relativ zu der Kamerablickrichtung zu berechnen.

6.8 Orthorektifikation

Sobald die Kamera geometrisch kalibriert ist, ist es möglich, den Schnittpunkt eines jeden Pixels und jeder Blickrichtung am Boden zu finden. Dies wurde in einer ähnlichen Weise bei Kuechly et al (2012) durchgeführt, mit dem Zusatz von einem digitalem Höhenmodell (DEM: digital elevation model). Die Integration des DEM war notwendig, weil der Studien Bereich eine größere Orographie als das Berliner Untersuchungsgebiet enthält. Für diese Studie haben wir das DEM EPSG:32633 genutzt. Dieses Modell wurde auf ein Raster mit einer Auflösung von 10 Metern interpoliert. Die Boden-Schnittpunkte und die Position jedes einzelnen Pixels wurde zuerst für eine flache Ebene berechnet. Danach wurde ein neuer Schnittpunkt unter Einbeziehung der Geländehöhe an dieser Position neu berechnet. Dies ergab eine neue geschätzte UTM Position. Dies wurde ein weiteres Mal mit der neuen Position wiederholt, um die Konvergenz der wahren Höhe zu gewährleisten.

Ein Satz von 225 Kontrollpunkten (15x15) wurde jedem Bild zugeordnet. Die Blickrichtung relativ zu dem Mittelachsenwinkel wurde für jeden dieser Punkte zu Beginn der Berechnung berechnet. Bezogen auf die Position des Flugzeugs zum Zeitpunkt der Aufnahme wurden die Schnittpunkte für diese 225 Kontrollpunkte berechnet. Diese Punkte wurden dann verwendet, um das Bild vollständig zu entzerren und zu georeferenzieren. Als Endprodukt der Georeferenzierung für jedes einzelne Bild wurde ein GeoTIFF mit einer Auflösung von 1m gespeichert.

6.9 Mosaikierung und Fehleranalyse

Aus den georeferenzierten und orthorektifizierten Einzelbildern (GeoTIFF) mit einer Auflösung von einem Meter wurden mithilfe der Software GEOMATICA 2015 Orthoengine ein Mosaik erstellt. Passpunkte zwischen den Bildern wurden auf Grundlage minimaler Unterschiede in den Grauwerten gesetzt und über 3 Pixel an den Schnittflächen harmonisiert. Insgesamt hat das Mosaik im Vergleich zu den Daten der Landnutzungsdaten (Nutzungsart) eine Genauigkeit von 4,35m (RMS-Error siehe Anhang 1). Die meisten Passpunkte liegen bei unter 1m Ungenauigkeit, in einzelnen Bereichen sind aber bis zu 7m zu verzeichnen.

6.10 Vergleich von Daten des Mosaik und dem Satelliten DNB

Das DNB besitzt keine Sensitivität beim Lichteinfall unter 500 nm. Dies bedeutet, dass Licht von Lampen mit hohem Blaulichtanteil (Bsp.: LED Lampen) unterschätzt werden. Ausgehend von Cao & Bao (2014) gehen wir von einer Transmission von 84% aus. Ein großer Teil der Streuung durch Aerosol und Wasserdampf findet in niedrigeren Höhen, in der Grenzschicht, also unterhalb des Flugzeuges statt, daher wird der verbleibende Unterschied zwischen Satellit und Flugzeug in diesem Fall vernachlässigt.

Die Mosaikdaten aus dem grünen Bereich der Kamera wurden in das gleiche Koordinatensystem wie die monatlichen DNB-Daten neu projiziert und die Korrelation zwischen den beiden berechnet. Die Daten des DNB haben einen kleinen positiven Offset. Vermutlich liegt dies an einer ungenauen Fehlerabschätzung des Offsets oder/und an einem möglichen zusätzlichen „Skyglow"-Anteil. Um dies zu berücksichtigen wurde ein Wert von 0,528 nW/cm^{2}sr von den DNB-Daten subtrahiert. Abbildung 14 zeigt den Logarithmus der Kamera-Daten aus dem grünen Band als digitale Zahl (DN) und den Logarithmus der geschätzten Leistung von 1 Quadratmeter in den korrigierten DNB-Daten. Eine lineare Anpassung an die Daten ergab eine Konversion von 1 W zu 215.000 DN oder alternativ 1 DN entspricht 4,66 x 10^{-6} W. Dies würde für eine Transmission der Atmosphäre von 84% für 1DN = 5,55 x 10^{-6} W ergeben. Dieser Wert kann verwendet werden, um die nach oben gerichtete Energie des Lichts im Spektralbereich 500-900 nm abzuschätzen. Damit ergibt sich z.B. für eine Fläche von ca. 250 m², mit einem Durchschnitt von 750 DN, an der Kamera, ein Wert von ca. 1,04 W (typische Werte für Straßen in Linz). Dies ist der Wert der an der Bodenoberfläche nach oben reflektiert wird. Bei einer von Albedo etwa 10 % ergibt dies eine Energie von ca. 10,4 W die auf die zu messende Oberfläche von 250 m² fällt.

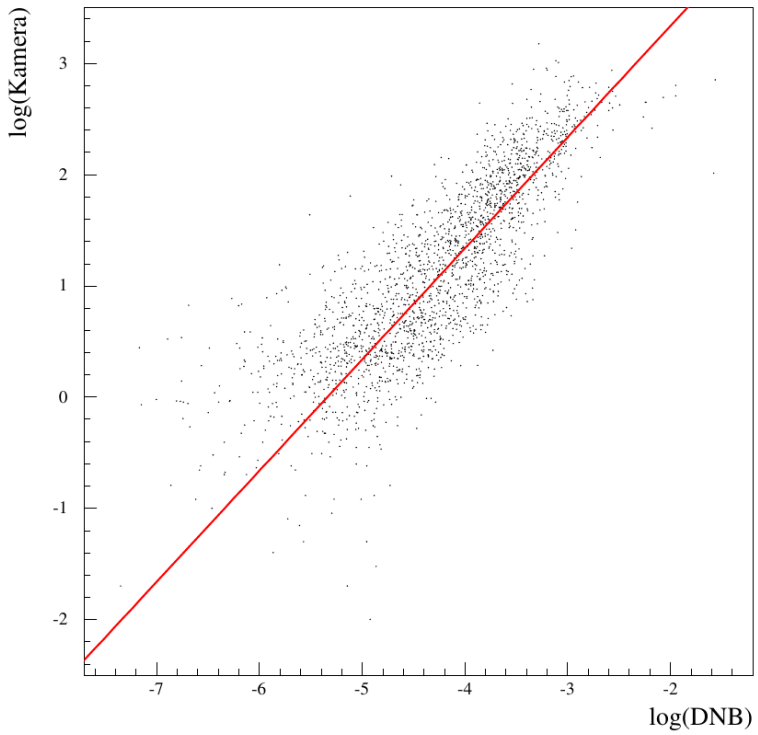


Abbildung 14: Korrelation zwischen digitaler Zahl (DN) im grünen Kanal der Nikon D4s für Blende f1.4 und der von dem DNB Sensor geschätzten aufwärts gerichteten Energie

Um den Verbrauch der Lampe die das Licht produziert abzuschätzen, sind ein paar zusätzliche Annahmen notwendig. Erstens fällt nicht das gesamte Licht auf die Oberfläche, da mit großer Wahrscheinlichkeit ein

Teil des Lichtes auf nahe Gebäude trifft (die in der Regel in Nadir Blickrichtung nicht sichtbar sind). Des Weiteren strahlen die meisten Lampen älteren Bautyps einen Teil ihres Lichtes zur Seite und nach oben (ULOR > 0) und dieses Licht ist in großen Teilen für die Nadir-Blickrichtung der Kamera nicht sichtbar. Auch Gasentladungslampen, insbesondere Quecksilberdampflampen erzeugen immer weniger Licht während sie altern. Nicht das gesamte von der Lampe erzeugte Licht entweicht der Leuchte, sondern stattdessen wird das Licht durch Reflektoren oder Glas, und Staub in der Lampe gestreut und absorbiert. Schließlich ist der DNB-Sensor nicht empfindlich bei Wellenlängen unter 500 nm, so dass alle Leuchten mit Ausnahme von Niederdruck-Natriumdampflampen dunkler erscheinen.

Eine konservative und ungefähre Korrektur dieser Faktoren wird mit 5% für Licht zur Seite und nach oben, 10% Blendung (nicht auf der Straße wenn Oberfläche glänzen), 30% Schotter, 30% Alter und Staub, 20% Absorption im inneren der Lampe, und 15% für die fehlende DNB Empfindlichkeit für blaues Licht angenommen (dies kann für LEDs mit hoher Farbtemperatur viel höher sein). Insgesamt entspricht das in etwa einem Faktor 5. In unserem Beispiel wird damit angenommen, dass eine Lampe etwa 52 W verbraucht. Basierend auf die Lampen die typischerweise in Österreich verwendet werden, ist diese Schätzung wahrscheinlich ein wenig zu niedrig, jedoch ausreichend für den Zweck der Angleichung des Energieverbrauchs von Gemeinden und einzelne Anlagen.

Daraus folgt, um einen Energieverbrauch eines Bereichs grob abzuschätzen, folgende Umrechnung:

- Für Licht das vom Boden gestreut wird: 1DN ~ 2.8 x 10^{-4} W

- Für Licht das direkt nach oben gestrahlt wird: 1DN ~ 2.8 x 10^{-5} W

6.11 Abschätzung der Gesamtenergie

Um die Gesamtenergie abzuschätzen benutzen wir die Umrechnungsfaktoren aus dem vorhergehenden Kapitel 5.6 (Direkt: 1DN ~ 2.8 x 10^{-5} W, reflektiert: 1DN ~ 2.8 x 10^{-4} W) und einen Schwellwert von DN=15000 zur Unterscheidung. Die Kalibration wurde für die Blende f1.4 im vorhergehenden Kapitel durchgeführt. Daraus ergibt sich eine Gesamtenergiemenge von 5.7 MW oder etwa 24.8 GWh. Dies entspricht dem Verbrauch von etwa 6000 österreichischen Haushalten oder bei der Annahme von 392400 Einwohnern im Untersuchungsgebiet von etwa 14,9 W / Person.

Es sei hier noch einmal darauf hingewiesen, dass vom Flugzeug aus, nicht das gesamte Licht, dass nach oben gestrahlt wird erfasst werden kann und aufgrund der vorher beschriebenen Annahmen leicht größere Fehler entstehen können. Sanchez de Miguel et al. (2013) haben mit Hilfe einer Auswertung aus Satellitendaten verschiedene Verbrauchswerte spanischer Städte verglichen. Sie errechnen z.B. für Madrid, mit einer Einwohnerzahl von 6.2 Millionen, einen Verbrauch von 550 GW/Jahr, bei einer Leistung von 126 MW und 20 W/Person.

7 Auswertung

Um die räumliche Verteilung der Beleuchtung aus unterschiedlichen Quellen in den Gemeindegebieten analysieren zu können wurde in ArcGIS 10.2 eine zonale Statistik für die drei Wellenlängenbereiche (R,G,B) durchgeführt. Dabei wurden die Summen des direkten und reflektierten Lichtes pro Nutzungsart (Landnutzung) in den einzelnen Gemeindeflächen bestimmt. Hieraus wurde die Helligkeit pro km² jeder Nutzungsart pro Gemeinde (Bundesamt Eich- und Vermessungswesen, Wien: Digitale Katastralmappe) und ihr prozentualer Beitrag an der Gesamtbeleuchtung in der Gemeinde berechnet. Um die Beleuchtungsintensität von Nutzungsarten zwischen den Gemeinden und anderen Städten gut miteinander vergleichen zu können wurde weiterhin ein sog. Helligkeitsfaktor angegeben, der sich aus der Division der Emissionen der einzelnen Nutzungsarten durch die mittlere Gesamtemission der Gemeinde ergibt. Der mittlere Helligkeitsfaktor beträgt eins, eine Nutzungsart mit dem Helligkeitsfaktor von zwei hat somit eine doppelt so hohe Beleuchtung wie die Durchschnittshelligkeit der Gemeinde.

Zu beachten ist hierbei, dass nicht alle betrachteten Gemeinden vollständig von der Überfliegung abgedeckt wurden, siehe folgende Abbildung und Tabelle:

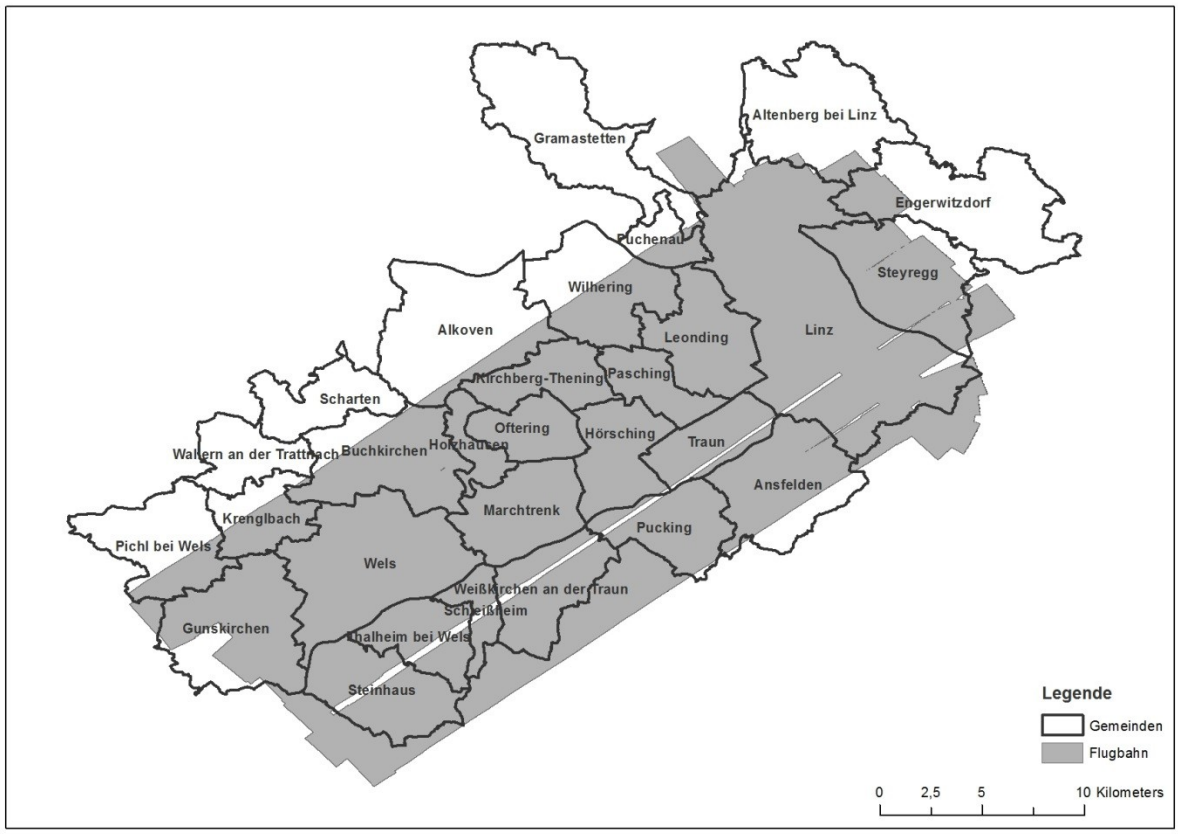


Abbildung 15: Abdeckung der Gemeindeflächen durch die nächtliche Überfliegung (grau): Linz 96%, Wels 100%, Alkoven 15%, Wallern an der Trattnach 0%, Ansfelden 76%, Hörsching 99%, Kirchberg-Thening 100%, Leonding 100%, Oftering 100%, Pasching 100%, Pucking 94%, Traun 93%, Wilhering, 56%, Altenberg bei Linz 8%, Engerwitzdorf 16%, Gramastetten, 1%, Puchenau 51%, Steyregg 87%, Buchkirchen 82%, Gunskirchen 79%, Holzhausen 100%, Krenglbach 62%, Marchtrenk 100%, Pichl bei Wels 28%, Schleißheim 93%, Steinhaus 95%, Thalheim bei Wels 92%, Weißkirchen an der Traun 93%

7.1 Lichtemissionen der Gemeinden

Die Verteilung der Gesamtemissionen in dem betrachteten Fluggebiet teilt sich wie folgt auf. Linz, die mit Abstand größte Gemeindefläche in dem Gebiet (19% der Gesamtfläche) hat einen Anteil der Gesamtemissionen von 21% im roten und grünen und 20% im blauen Lichtspektrum. Die nächst größte Gemeinde Wels (9% der Gesamtfläche) hat einen Anteil von 10% in allen drei Wellenlängenbereichen. An dritter Stelle stehen mit 6% der Gesamtemissionen jeweils die Gemeinden Steyregg (7% der Gesamtfläche), Gunskirchen (7%) und Buchkirchen (6%). 5% der Gesamtemissionen des reflektierten und emittierten Lichtes im Fluggebiet haben die Gemeinden Ansfelden (6% der Gesamtfläche), Marchtrenk (5%) und Steinhaus (5%). Danach folgen Hörsching (7% der Gesamtfläche), Pucking (4%) und Weißkirchen an der Traun (4%) mit 4% der Gesamtemissionen in allen drei Lichtspektren. 3% Anteil haben Kirchberg-Thening (8% der Gesamtfläche), Oftering (3%), Pasching (3%), Traun (3%) und Thalheim bei Wels (3%). Den geringsten Anteil der Gesamtemissionen von jeweils 2% haben zuletzt die Gemeinden Holzhausen (2% der Gesamtfläche) und Schleißheim (2%).

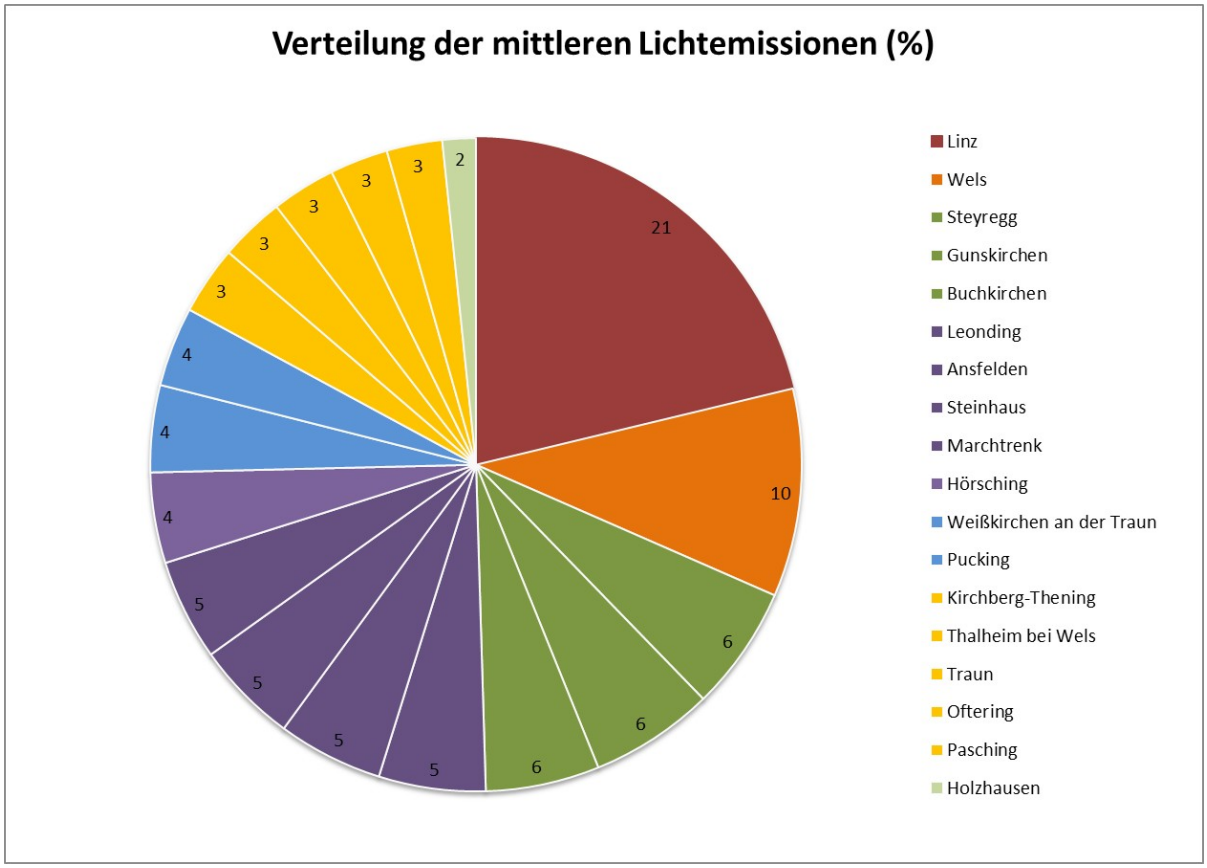


Abbildung 16: Verteilung der Lichtemissionen[%] nach Gemeinden

7.2 Anteil der Lichtemissionen in den Nutzungsflächen pro Gemeinden

Unterschiedliche Nutzungsarten, wie beispielsweise Gebäude, Straßen und Wälder wurden auf ihren Anteil an den gesamten emittierten und reflektierten Lichtemission untersucht und besonders helle Lichtquellen in den einzelnen Gemeindegebieten identifiziert. Dabei werden im Folgenden nur jene Gemeinden betrachtet, deren Flache zu mehr als 75% durch die Überfliegung abgedeckt wurde. Es wird zuerst auf die größten Gemeinden Linz und Wels eingegangen und im Folgenden alle anderen Gemeinden in alphabetischer Reihenfolge dargestellt. Alle Daten sind auch tabellarisch im Anhang aufgeführt.

In **Linz** sind 35% der Gemeindefläche bebaut, 20% landwirtschaftlich genutzt und 14% Wald. 34% der Gesamtemissionen im roten, 30% der grünen und 25% der blauen sind in Strassenverkehrsanlagen zu finden. Auch Betriebsflächen tragen zu knapp einem Viertel der Lichtemission von Linz bei. Jeweils über 10% sind in Gärten- und Gebäudeflächen, wobei beide Nutzungsarten ihre maximalen Anteile im blauen Wellenlängenbereich haben. Einen sehr geringen Anteil der blauen Gesamtemissionen haben dagegen Schienenverkehrsanlagen (3%) verglichen zu rund 6% in den anderen beiden Wellenlängenbereichen. Gebäudenebenflächen tragen zu rund 3% der Gesamtemissionen bei, alle anderen Nutzungsarten haben nur nur sehr geringe Lichtemissionen. Die hellsten Lichtquellen der Stadt sind Strassenverkehrsflächen, die rund dreimal heller als die Durchschnittshelligkeit von Linz sind. Ebenfalls rund dreimal heller sind Betriebsflächen, Verkehrsrandflächen und Schienenverkehrsflächen, wobei bei den letzteren beiden Nutzungsarten ein im blauen Wellenlängenbereich der Durchschnittshelligkeit entsprechen.

In **Wels** kommt gut ein Drittel der Gemeindemission jeweils von Strassenverkehrsanlagen und Betriebsflächen die zusammen 20% der GF ausmachen. Gärten (18% der GF) sind der drittgrößte Emittent mit 16% im roten, 18% im grünen und 20% im blauen Wellenlängenbereich. Aber auch Gebäude, die 10% der GF ausmachen, tragen noch zu über 10% der Gemeindeemissionen bei. Betrachtet man den HF sind Betriebs- und Gebäudeflächen doppelt so hell wie der Durchschnitt. Parkplätze und Strassenverkehrsanlagen sind bis zu viermal heller. Schienenverkehrsanlagen sind die hellsten Objekte mit einem sehr hohen HF Wert im roten Spektrum von 5 und geringeren HF von 2 im blauen Spektrum.

Gut ein Drittel der Flächen in **Traun** wird jeweils als Gärten und landwirtschaftliche Flächen genutzt. Gärten sind auch für knapp ein Drittel der Lichtemissionen in der Gemeinde verantwortlich, ein weiteres Drittel wird von Strassenverkehrsanlagen emittiert und reflektiert, die jedoch nur 9% der GF ausmachen. Über 10% der Emissionen kommen weiterhin von Gebäuden und Betriebsflächen. Letztere sind auch dreimal heller, wobei Gebäude der Durchschnittshelligkeit entsprechen. Bis zu viermal heller sind Verkehrsrandflächen und Strassenverkehrsanlagen. Über 5-mal heller sind Gebäudeflächen und Parkplätze wobei diese sogar das Achtfache über der Durchschnittshelligkeit von Traun im blauen Wellenlängenbereich liegen.

In **Ansfelden** tragen Straßenverkehrsanlagen in allen drei Farbbereichen (R,G,B) den größten Anteil an der Gemeindegesamtbeleuchung, gut ein Drittel (28%) der roten, 24% der grünen und 19% der blauen Lichtemissionen werden hier emittiert und reflektiert, wobei die Flächen nur 8% der Gesamtgemeindeflächen (GF) betragen. Weiterhin Emissionswerten von über 10% wurden in Gebäudeflächen (1% der GF), Betriebsflächen (2% der GF), Gebäuden (4% der GF) und Gärten (9% der GF) in allen drei Farbbereichen festgestellt. Parkplätze (0,3 % der GF) tragen mit über 5% zu den Gemeindeemissionen bei. Anzumerken ist hier, dass Parkplätze ihren maximalen Anteil im blauen Wellenbereich haben, so auch Gebäude, wobei Betriebsflächen und Strassenverkehrsanlagen mehr im roten und grünen Wellenlängenbereich emittieren und reflektieren. In landwirtschaftlich genutzte Flächen, die mit 54% den Großteil der GF ausmachen wurden 15% der Gesamtemissionen festgestellt. Waldflächen, die 13% der GF ausmachen, sowie alle anderen naturnahmen Nutzungsflächen haben nur einen geringen Anteil (<5%) der künstlichen Beleuchtung. Betrachtet man den flächenunabhängigen Helligkeitsfaktor (HF) liegen

landwirtschaftliche Flächen ein Drittel unter der mittleren Gemeindehelligkeit. Höhere Werte als der Durchschnitt wurden auf allen baulichen Strukturen sowie Friedhöfen, Freizeitflächen und Gärten festgestellt. Dreimal heller als der Mittelwert sind hierbei Gebäude, Straßen- und Schienenverkehrsanlagen. Betriebsflächen sind gut viermal heller und Gebäudeflächen sogar über 7-mal heller als die Durchschnittshelligkeit. Mit einem HF vom 18 im roten, 20 im grünen und 29 im blauen Wellenlängenbereich haben Parkplätze mit großem Abstand die höchsten Helligkeitswerte in Ansfelden.

Buchkirchen ist eine stark landwirtschaftlich geprägte Gemeinde (82% GF landwirtschaftlich genutzt, 10% GF Wald). Durch ihren großen Flächenanteil sind fast 50% aller Lichtemissionen auf diesen Flächen zu finden. Straßenverkehrsfläche dagegen betragen nur 3% der GF tragen jedoch zu 28% des roten, 29% des grünen und 15% des blauen Lichtanteils in der GF bei. Betrachtet man den HF sind hier Freizeitflächen, Abbauflächen, Halden und Deponien und fließende Gewässer knapp über der Gemeindedurchschnittshelligkeit. Fast dreimal heller sind Friedhöfe in dieser Gemeinde, wobei auch Gärten und Gebäudeflächen bis zu 5-mal mehr Licht emittieren und reflektieren. Gebäude sind über 7-mal heller im blauen und über 5-mal mal heller im grünen und roten Spektrumbereich. Die hellsten Objekte stellen mit einem HF von 10 um roten und grünen und HF von 5 im blauen Wellenlängenbereich Strassenverkehrsflächen da.

Ebenso landwirtschaftlich geprägt (70% der GF landwirtschaftlich genutzt, 12% Wald) ist **Gunskirchen**, wobei hier nur knapp über 30% der Lichtemissionen aus diesen Nutzungsflächen stammen. Strassenverkehrsflächen (4% der GF), Betriebsflächen (2% der GF) und Gärten (5% der GF) tragen jeweils zu 10-20% der Gemeindeemissionen bei. Auch Gebäude (2% der GF) emittieren und reflektieren circa 8% des Lichtes. Ähnlich zu Ansfelden sind Parkplatzflächen die hellsten Objekte der Gemeinde und über 10-mal heller als die Durchschnittshelligkeit in allen drei Farbbereichen. Ebenfalls 10-mal heller sind Betriebsflächen. Um 5-mal heller sind Verkehrsflächen, Friedhöfe, Freizeitflächen, Strassenverkehrsanlagen und Gebäude. Dreimal heller als der Durchschnitt sind Gebäudenebenflächen und Gärten.

In **Hörsching** sind neben 45% landwirtschaftlich genutzter Flächen auch 18% Betriebsflächen vorzufinden. Letzter tragen zu 57% der roten, 64% der grünen und 71% der blauen Gemeindeemissionen bei. Gefolgt sind diese von Straßenverkehrsanlagen (6% der GF) mit 21% der roten, 16% der grünen und 9% der blauen Lichtemissionen. Zwischen 5%-10% des reflektierten und emittierten Lichtes sind weiterhin jeweils von Gärten, landwirtschaftlich genutzt Flächen und Gebäuden. Betrachtet man die HF sind hier Gebäude nur knapp über der Durchschnittshelligkeit, wobei Verkehrsrandflächen, Parkplätze, Strassenverkehrsanlagen und Betriebsflächen 3-mal heller sind. Anzumerken ist die geringere Helligkeit der Strassenverkehrsanlagen im blauen Wellenlängenbereich (HF von 1,5) und hohen Blauanteil von Betriebsflächen (HF 4).

Eine weitere Gemeinde, in der die Landwirtschaft den Hauptteil der Nutzungsfläche ausmacht (85% landwirtschaftlich genutzt, 7% Wald) ist **Holzhausen**. Durch den hohen Flächenanteil tragen sie zu 40% der Gesamtemissionen im roten und grünen Wellenlängenbereich und 60% im blauen Wellenlängenbereich bei. Mit jeweils nur 3% der GF sind Strassenverkehrsanlagen und Gärten dennoch für über 20% der roten und grünen Lichtemissionen und 10% der blauen Lichtemissionen verantwortlich. Die hellsten Objekte sind in dieser Gemeinde Gebäude und Gebäudenebenflächen (HF um die 3), Gärten (HF rot 8, grün 7 und blau 4), ´sowie Strassenverkehrsanlagen (max HF rot 9, min HF blau 4) und Betriebsflächen, die rund 8 mal heller im roten und blauen und über 10 mal heller im grünen Wellenlängenbereich sind.

Auch **Kirchberg-Thening** hat eine hohe landwirtschaftliche Nutzfläche (77% und 11% Wald), die ebenfalls rund ein Drittel der Lichtvorkommen in der Gemeinde ausmacht. Daneben sind Strassenverkehrsanlagen (3% der GF) ebenfalls für knapp 30% der roten und grünen, sowie 17% der blauen Lichtemissionen verantwortlich. Gärten (7%) tragen weiterhin für über 10% , Schienenverkehrsanlagen für 6% und Gebäude für 8% der Gemeindeemissionen bei. Auffällig ist der geringe Blauanteil bei den Schienenverkehrslagen (3%). Die hellsten Lichtquellen in dieser Gemeinde sind Parkplätze, die bis zu 30-mal heller als die Gemeindedurchschnittshelligkeit sind (HF rot 25, grün 29, blau 18), gefolgt von Schienenverkehrsanlagen (HF rot 16, grün 14, blau 8) und Strassenverkehrsanlagen (HF rot und grün 10, blau 8). Drei bis achtmal so

hell sind weiterhin Gärten, Friedhöfe, Gebäude, Betriebsflächen und Gebäudenebenflächen.

Einen hohen Waldanteil mit 26% der GF hat **Leoning**, wobei auch hier die landwirtschaftlich genutzte Fläche noch 39% beträgt. Beide Nutzungsklassen haben zusammen um die 10% der Gemeindelichtemissionen, sind im Mittel aber gut ein Drittel dunkler als die Durchschnittshelligkeit. Mit über 15% haben auch Gärten (14% GF) und Betriebsflächen (3% GF) jeweils einen hohen Anteil der Gesamtemissionen. Strassenverkehrsanlagen (6%GF) sind hier der Hauptemittent mit 44% im roten, 39% im grünen und 27% im blauen Wellenlängenbereich. In Leoning sind im Vergleich zu den anderen Gemeinden eher ein geringer HF in allen Nutzungsklassen vorzufinden, was eine hohe „Grundhelligkeit oder -dunkelheit" der Gemeinde bedeuten kann. Verkehrsrandflächen stellen hier die hellsten Objekte mit einem HF von 8 im roten, 6 im grünen und 2 im blauen Wellenlängenbereich. Rund 5 mal heller sind Parkplätze, Betriebsflächen und Strassenverkehrsanlagen und knapp dreimal heller Gebäudenebenflächen und Schienenverkehrsanlagen.

Mit 55% landwirtschaftlich genutzter Fläche ist in **Marchtrenk** auffällig das diese nur rund 16% der roten und grünen und 22% der blauen Gesamtemssionen enthält. Über ein Viertel der Emissionen kommen von Strassenverkehrsanlagen (7% GF) und auch Schienenverkehrsanlagen (3% GF) tragen zu 20% der Gesamtemissionen bei, wobei bei letzteren der Anteil im blauen Spektrum deutlich geringer bei 9% liegt. Gut dreimal heller als die Durchschnittshelligkeit sind hier Betriebs- und Gebäudeflächen und Strassenverkehrsanlagen. Die hellsten Objekte im roten und grünen Spektrum sind Schienenverkehrsanlagen mit einem HF von 9 und 7, wobei der HF um blauen Wellenlängenbereich nur dreimal so hoch wie die Durchschnittshelligkeit ist. Hier wird der Maximalwert von 4 in den Gebäudenebenflächen erreicht.

Einen hohen landwirtschaftlich genutzten Anteil mit 82% der GF hat ebenfalls **Oftering**, die zu 34% der roten, 37% der grünen und sogar 63% der blauen Gemeindeemissionen enthalten. Einen geringen Anteil der blauen Gesamtemissionen haben dadurch Strassenverkehrsanlagen mit 8%, wobei sie im roten und grünen Wellenlängenbereich zu 27% und 22% der Gesamtemissionen beitragen. Dreimal so hell wie die Durchschnittshelligkeit sind hier Gebäudenebenflächen und Gebäude, sowie auch Gärten. Betriebsflächen, Verkehrsrandflächen und Friedhöfe sind bis zu 12-mal heller aus die Durchschnittshelligkeit, wobei jeweils das Maximum im grünen Wellenlängenbereich erreicht wird. Die hellsten Objekte im roten Wellenlängenbereich sind Strassenverkehrsanlagen (HF 11), im grünen Verkehrsrandflächen (HF 13) und im blauen Betriebsflächen (HF 10).

In **Pasching** mit 64% landwirtschaftlich genutzter Gemeindefläche tragen diese nur zu rund 15% der Gesamtemissionen bei wobei Betriebsflächen (4% der GF) gut ein Drittel der Emissionen enthalten. Strassenverkehrsanlagen tragen 21% der roten, 16% der grünen und 9% der blauen Gemeindeemissionen. Weiterhin rund 15% der Emissionen in den drei Wellenlängenbereichen sind durch Gebäude und Gärten verursacht. Gut dreimal heller als die Durchschnittshelligkeit der Gemeinde sind auf Freizeitflächen, Strassenverkehrsanlagen und Friedhöfen zu finden. Gebäudenebenflächen und Betriebsflächen sind über 5-mal heller und die hellsten Objekte der Gemeinde stellen Parkplätze dar (HF von 9 im roten, 13 im grünen und 14 im blauen Wellenlängenberiech).

Ebenfalls einen hohen Waldanteil von 21% hat **Pucking** und diese Gemeinde ist auch stark landwirtschaftlich geprägt (65%). Waldflächen haben jedoch einen geringen Anteil von unter 10% an den Gesamtemissionen, wobei landwirtschaftlich genutzte Flächen 60% des roten, 28% des grünen und 20% des blauen Lichtes in der Gemeinde emittieren und reflektieren. Strassenverkehrsanlagen (7% der GF) sind für rund ein Drittel der Gemeindeemissionen verantwortlich. Erstaunlich in dieser Gemeinde ist das Friedhöfe 84 mal heller im roten, 68 mal heller im grünen um immer noch 32 mal heller im blauen Lichtspektrum sind als die Durchschnittshelligkeit. Über 15-mal heller sind auch Betriebsflächen. Gebäudenebenflächen sind über 6-mal heller im roten und grünen und über 3-mal heller im blauen Lichtspektrum. Gut viermal heller sind ebenso Strassenverkehrsanlagen und Abbauflächen, Halden oder Deponien. Doppelt so hohe Helligkeitswerte wurden daneben auch auf Freizeitflächen, Gebäuden und in Gärten festgestellt.

Eine weitere landwirtschaftlich geprägte Gemeinde ist **Schleißheim** (63%GF) und auch hier tragen diese großen Flächen zu rund einem Drittel der Gesamtemissionen bei. Weiterhin knapp ein Drittel der Lichtemissionen sind auf Gartenflächen (6% GF) zu finden. Strassenverkehrsanlagen, die 4% der GF ausmachen sind zu 21% im roten, 17% im grünen und 7% der blauen Gemeindeemissionen zu finden. Rund dreimal heller als die Durchschnittshelligkeit sind Gebäude, fließende Gewässer, Betriebsflächen und Gärten. Strassenverkehrsanlagen sind die hellsten Lichtquellen im roten und grünen Wellenlängenbereich (HF 5 und 4), wobei sie nur doppelt so hell im blauen Lichtspektrum sind. In dem blauen Spektrum sind dagegen Betriebsflächen die hellsten Objekte der Gemeinde (HF 4).

Auch in der Gemeinde **Steinhaus** nimmt die landwirtschaftlich genutzte Fläche 80% der GF ein. Auf diesen Flächen sind auch 50% der gesamten Lichtemissionen zu finden. Weiterhin mit 19% im roten und grünen und 10% im blauen Lichtspektrum sind Strassenverkehrsanlagen (3% GF) einer der Hauptemittenten der Gemeinde. Weitere 12% im roten und grünen, sowie 7% im blauen Licht werden von Betriebsflächen emittiert und reflektiert. Betrachtet man die hellsten Lichtquellen so sind Betriebsflächen 13-mal heller im roten und 17-mal heller im grünen und blauen Lichtspektrum als die Durchschnittshelligkeit in der Gemeinde. Auch Friedhöfe sind über 10-mal heller im roten und grünen und 6-mal heller im blauen Lichtbereich. Fünfmal heller im roten und grünen und immer noch drei-mal heller im blauen Bereich sind Strassenverkehrsanlagen und Gärten. Freitzeitflächen und Gebäude emittieren und reflektieren die doppelte Durchschnittshelligkeit.

Auch **Streyegg** hat einen hohen Waldanteil von 45%, neben 36% landwirtschaftlich genutzten GF. Hauptemittent sind dennoch Strassenverkehrsanlagen mit 27% im roten, 24% im grünen und 15% im blauen Lichtspektrum, wobei sie nur 4% der GF ausmachen. Durch den hohen Flächenanteil sind in Wäldern und landwirtschaftlichen Flächen auch über 20% der Lichtemissionen zu finden. Mit über 10% sind auch Gärten weiterhin eine weitere Lichtquelle in der Gemeinde. Mit Abstand sind Parkplätze die hellsten Objekte in Streyegg (HF 14 im roten, 15 im grünen und 10 im blauen Lichtspektrum).Bis zu neun-mal heller als die Durchschnittshelligkeit sind auch Betriebsflächen und Gebäudeflächen. Schienen- (HF rot 4, grün 3, blau 2) und Straßenverkehrsanlagen (HF rot 7, grün 6, blau 4) sind weitere helle Objekte in der Gemeinde. Auch Gebäude, Gärten und Friedhöfe sind noch bis zu drei-mal heller als die durchschnittliche Gemeindefläche.

Thalheim bei Wels ist auch sehr landwirtschaftlich geprägt (69% landwirtschaftlich genutzte GF, 12% Wald). Auf diesen Flächen sind rund ein Drittel der Gesamtemissionen der Gemeinde vorzufinden. Weitere Hauptemittenten sind daneben Strassenverkehrsanlagen mit 31% im roten und grünen und 24% im blauen Wellenlängenbereich und Gärten mit rund 25%. Doppelt so hell als die Durchschnittshelligkeit in der Gemeinde sind Schienenverkehrsanlagen, Freizeitflächen und Gebäudenebenflächen. Dreimal heller sind Gebäude, Gärten und fließende Gewässer. Vegetationsarme Flächen erscheinen hier auch viermal so hell, evtl. schließt dies hell beleuchtete Bauflächen mit ein. Betriebsflächen sind über das 5 fache heller. Parkplätze in dieser Gemeinde sind 7-mal heller im roten, 6-mal heller im grünen und 4-mal heller im blauen Lichtspektrum. Hellste Lichtquelle der Gemeinde machen aber Strassenverkehrsanlagen aus, diese sind bis zu 8-mal heller im roten und grünen Bereich und immer noch 6-mal heller im blauen.

Eine ähnliche Gemeindenutzungsstruktur weißt **Weißkirchen an der Traun** auf (69% GF Landwirtschaft, 19% GF Wald), durch den hohen Flächenanteil sind hier über 40% der Lichtemissionen vorzufinden. Strassenverkehrsanlagen, die dagegen nur 4% der Fläche einnehmen sind für fast ein Drittel der Emissionen verantwortlich, gefolgt von bis zu 15% in Gärten und nahe 10% auf Betriebsflächen. Erstaunlich hohe Werte werden bei dem Helligkeitsfaktor in dieser Gemeinde beobachtet, was dazu schließen lässt das große Bereiche der Gemeinde mit sehr geringen Lichtemissionen relativ dunkel sind. Über 50 mal heller im roten und grünen Lichtspektrum und immer noch 37 mal heller im blauen Spektrum sind Betriebsflächen, aber auch Freizeitflächen sind um die 40 mal heller als die Durchschnittshelligkeit. Friedhöfe sind mit einem HF von 3 im blauen Spektrum relativ dunkel im Vergleich dazu dass sie 9-mal heller im roten und 7-mal heller im grünen Lichtspektrum sind. Auch Strassenverkehrsanlagen haben ein HF Minimum im blauen Bereich von 5 im Vergleich zu einem HF von 7 in den anderen beiden Wellenlängenbereichen. Gebäude und Gärten

sind über dreimal heller als die Durchschnittshelligkeit und auch Gebäudenebenflächen und Dauerkulturanalagen oder Erwerbsgärten sind doppelt so hell wie der Durchschnitt.

7.3 Vergleich der Lichtemissionen nach Nutzungsart zwischen den Gemeinden

Um die Lichtintensität der einzelnen Nutzungsflächentypen zwischen den Gemeinden besser vergleichen zu können und somit besonders helle Objekte in dem Untersuchungsgebiet identifizieren zu können, werden diese im Folgenden mit den mittleren Lichtemissionen pro km² aller betrachteten Gemeinden verglichen.

Straßenverkehrsanlagen haben im Durchschnitt einen Emissionsanteil von 23,5% in den Gemeinden, wobei sie nur durchschnittlich 5,3% der Gemeindeflächen einnehmen. In der Gemeinde Hörsching sind sie doppelt so hell wie in den anderen Gemeinden, ebenso in Leonding, Pasching und Wels. In Linz sind sie dreimal heller, als der Durchschnitt. In Ansfelden, Marchtrenk, Thalheim bei Wels und Traun spiegeln sie die durchschnittliche Helligkeit wieder und in den Gemeinden Bschkirchen, Holzhausen, Kirchberg-Thening, Oftering, Pucking, Schleißheim und Steinhaus liegen sie sogar darunter.

Bei den naturnahen Nutzungsarten fällt ihr großer Flächenanteil in den Gemeinden bei der Betrachtung der Lichtemissionen ins Gewicht. Durch Streulicht aus benachbarten Gebieten und Werten über Null in der Luftbildaufnahme kommen hier die hohen Werte zustande. **Landwirtschaftlich genutzte Flächen** wie Acker, Wiesen und Weiden machen im Durchschnitt 58,8% der Gemeindefläche aus und 25,5% der Lichtemissionen sind auf diesen Flächen zu finden. Überdurchschnittlich hell sind sie in Hörsching, Leoning, Traun, Wels und Linz mit einem HF von 2. Auch **Waldflächen** kommen im Durchschnitt zu 14,4% auf den Gemeinden vor und sind zu 5,1% von Lichtemissionen beeinträchtigt. Eine doppelt so hohe Helligkeit als der durchschnittliche Wald herrscht im roten Bereich in Thalheim bei Wels, im grünen Bereich in Traun und in allen drei Spektren in Wels. Mit einem HF von 3 ist der hellste Wald in Pasching anzutreffen.

Schienenverkehrsanlagen sind zu 3,3% an den Lichtemissionen bei einem Flächenanteil von 0,9% in den Gemeinden. Dreimal so hell wie durchschnittlich sind sie in Linz und Wels. In Marchtrenk ist der HF sehr heterogen (rot: 2, grün: 2, blau: 1).

Mit einem durchschnittlichen Gemeindeflächenanteil von 0,2% sind **Parkplätze** für 1,2% der Emissionen verantwortlich. In einigen Gemeinden werden sie im Vergleich heller beleuchtet als in anderen. So sind sie in Ansfelden dreimal so hell wie der Durchschnitt. In Linz dagegen sind sie nur im roten Spektrum doppelt so hell wie der Durchschnitt, in Pasching doppelt so hell im roten, dreimal so hell im grünen und sogar viermal so hell im blauen Wellenlängenbereich.

Verkehrsrandflächen haben im Durchschnitt einen Emissionsanteil von 0,4% bei einer Gemeindefläche von 0,2%. Im Vergleich sind sie doppelt so hell in Traun im roten und grünen Spektrum und dreimal so hell im blauen Spektrum. Doppelt so hell im roten und dreimal heller in den übrigen Spektren sind sie auch im in Hörsching. Ebenfalls einen HF von drei hat die Gemeinde Leonding im roten und grünen Wellellängenbereich. Viermal so hell im roten, dreimal so hell im grünen und doppelt so hell als der Durchschnitt im blauen Wellenlängenbereich sind Verkehrsrandanlagen in Linz.

Betriebsflächen haben im Mittel einen Anteil von 14,9% an den Gesamtemissionen bei 3,4% Anteil an der Gemeindefläche, nur in Wels mit 20% liegt dieser Anteil deutlich darüber. Überdurchschnittlich hell sind Betriebsflächen in der Gemeinde von Pasching (HF 3 im grünen und blauen, HF 2 im roten Spektrum). Doppelt so hell wie der Durchschnitt sind sie in Hörsching, Leonding, Linz (mit HF 3 im roten Spektrum) und Weißkirchen an der Traun.

Im Durchschnitt nehmen in den Gemeinden **Gebäude** einen Flächenanteil von 3,5% ein und betragen 7,5% der Emissionen, wobei dies in einzelnen Gemeinden wie Holzhausen, Linz, Pasching und Traun auch Werte

über 20% festgestellt wurden. Doppelt so hell als in der Durchschnittsgemeinde sind die Gebäude in Ansfelden, Hörsching und Wels (rotes und grüne Spektrum), in Linz im roten und grünen Spektrum sogar dreimal so hell und in Pasching sehr heterogen mit HF 2 im roten, HF 3 im grünen und HF 4 im blauen Spektralbereich. **Gebäudenebenflächen** sind durchschnittlich zu 1,4% an den Lichtemissionen einer Gemeinde beteiligt (bei 0,4% der Gemeindefläche). Betrachtet man die besonders hellen Gebäudenebenflächen so sind diese dreimal über dem Durchschnitt in Ansfelden und Traun, doppelt so hoch in Linz und Wels und in Pasching dreimal so hoch im roten und grünen und sogar viermal so hoch im blauen Wellenlängenbereich.

Gärten sind durchschnittlich mit 9,1% in den Gemeinden vertreten und tragen zu 16,2% der Emissionen bei, wobei dieser Wert in Schleinheim, Thalheim bei Wels und Traun noch übertroffen wird. Ob dies von der Flächengröße oder der künstliche Beleuchtung in den Gärten abhängig ist, müsste in folgenden Studien geklärt werden. Gärten sind doppelt so hell in der Gemeinde Linz und Wels und im blauen Wellenlängenbereich auch in der Gemeinde Pasching. **Friedhöfe** tragen dagegen nur 0,2% der Lichtemissionen in einer Gemeinde, haben aber auch einen geringeren durchschnittlichen Flächenanteil von 0,2%. Heller als der Durchschnitt sind sie in Pasching (HF von 3 im roten und grünen und 4 im blauen Bereich). Bis zu sieben mal heller als der durchschnittliche Friedhof im Untersuchungsgebiet ist der Friedhof in Pucking, der sich in unmittelbarer Nähe zur Kirche befindet.

Freizeitflächen sind mit 0,9% an den Lichtemissionen beteiligt bei einer durchschnittlichen Flächengröße von 0,7% in den Gemeinden. Besonders hell sind diese Flächen in Pasching (HF von 3 im roten, 4 im grünen und 5 im blauen Spektrum), sowie in Weißkirchen an der Traun (HF rot und grün 5, blau 6). Doppelt so hell sind sie weiterhin im roten Spektralbereich in Wels, in Linz dagegen entsprechen sie der durchschnittlichen Helligkeit aller Gemeinden.

Abbauflächen, Halden und Deponien haben im Durchschnitt nur 0,2% Anteil an den Gesamtemissionen der Gemeinden (bei 0,5% Flächenanteil). Vergleicht man nun den mittleren Helligkeitsfaktor (HF=1) fällt auf das Abbauflächen, Halden und Deponien in Wels über 5-mal heller und in Pucking doppelt so hell im roten und blauen und dreimal heller im grünen Wellenlängenbereich als in den anderen Gemeinden sind.

Dauerkulturanlagen oder Erwerbsgärten machen im Durchschnitt 0,1% der Gesamtemissionen der Gemeinden aus, wobei sie auch nur 0,2% der durchschnittlichen Nutzungsfläche einnehmen. Doppelt so hell wie im Durchschnitt sind sie in den Gemeinden Ansfelden und Thalheim bei Wels, wobei sie sogar bis zu viermal heller in Traun beleuchtet sind (HF rot 4, grün 3, blau 2).

Fließende Gewässer haben durch ihre Uferverbauung und Streulicht von benachbarten beleuchteten Gebieten, Brücken etc. einen Anteil von 1,1% an den Gesamtemissionen einer Gemeinde (durchschnittlicher Flächenanteil 1,8%). Überdurchschnittlich hell beleuchtet sind sie vor allem in Pasching (HF rot 6, grün 4 und blau3). Und auch in Wels sind sie im grünen und blauen viermal und roten Spektrum dreimal so hell wie der Durchschnitt. In Linz sind sie doppelt so hell im Vergleich zum Durchschnitt aller Fließgewässer im Untersuchungsgebiet und auch in Thalheim bei Wels (HF rot 3, grün 3 und blau 2).

Stehende Gewässer dagegen sind nur zu 0,2% von künstlicher Beleuchtung beeinträchtigt, wobei sie auch einen kleineren Flächenanteil von 0,6% an den Gemeindeflächen ausmachen. Vergleicht man die Durchschnittshelligkeit zwischen den Gemeinden so wird ein doppelt so hoher HF im grünen und blauen Bereich in Leonding und im blauen Bereich in Pasching festgestellt. Sehr hell sind stehende Gewässer in Ansfelden mit einem HF von 5 im roten und grünen und 3 im blauen Bereich.

Feuchtgebiete sind nur in sechs Gemeinden vertreten und sind durch ihre geringe Flächengröße von 0,03% nur zu einem geringen Anteil von 0,01% von Lichtemissionen beeinträchtigt. Diese sind in drei Wellenlängenbereichen recht unterschiedlich. So liegen die Werte für Feuchtgebiete in Linz im grünen und blauen Bereich beim Durchschnitt, im roten Bereich hingegen werden sie doppelt so hell beleuchtet. In Marchtrenk liegen sie im blauen Bereich sogar unter dem Durchschnitt, im roten nahe dem Durchschnitt und

im grünen bei doppelt so hohen Werten.

8 Beispielmosaik

Im folgenden werden Beispiele für die Stadt Linz, Flughafen Linz und der Stadt Wels im Doris-Portal gezeigt (http://doris.ooe.gv.at/). Die Transparenz der Mosaike wurde leicht herabgesetzt, damit Straßenverläufe der unterlegten Karte sichtbar werden.

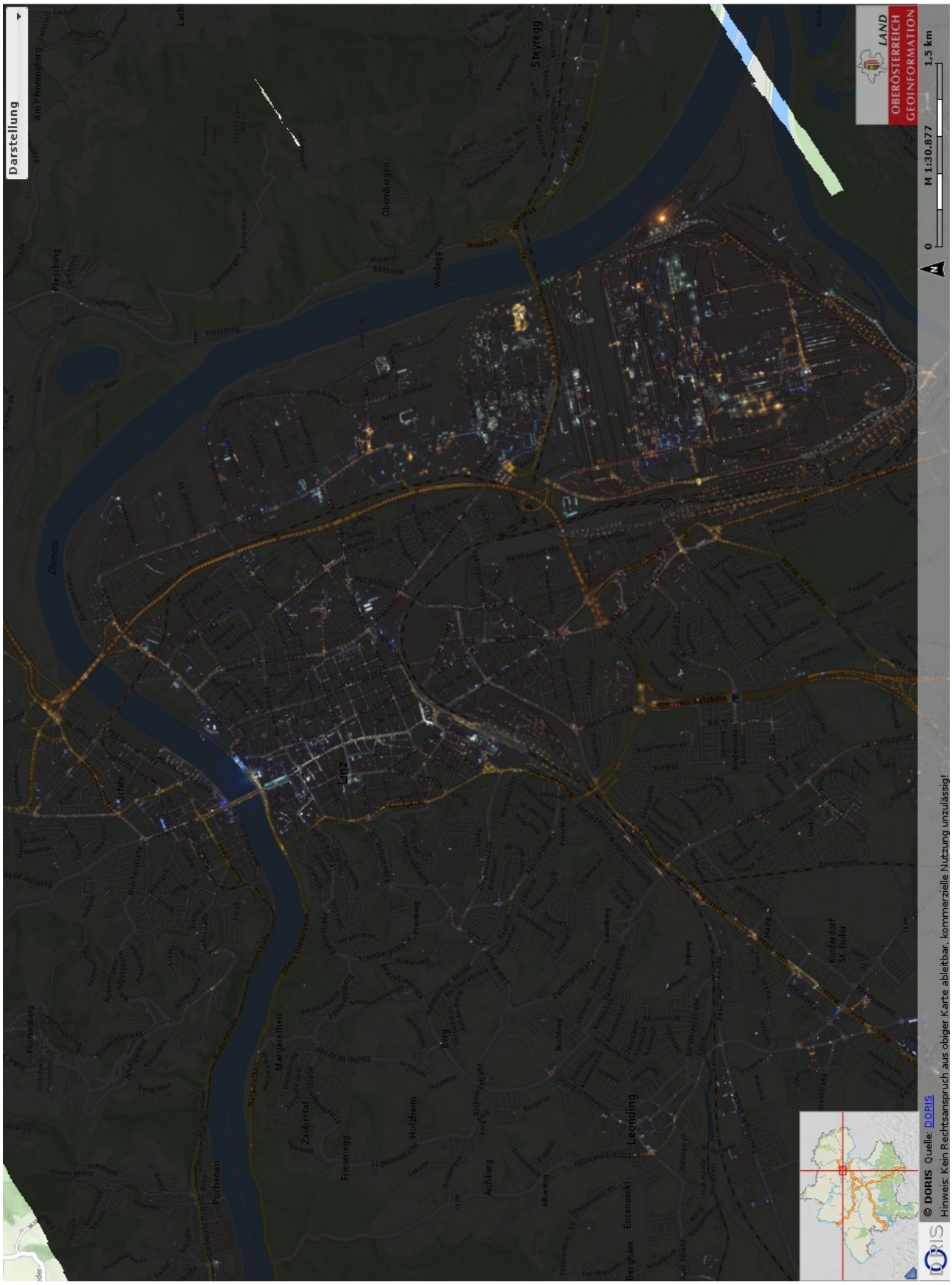


Abbildung 17: Beispielbild Stadt Linz

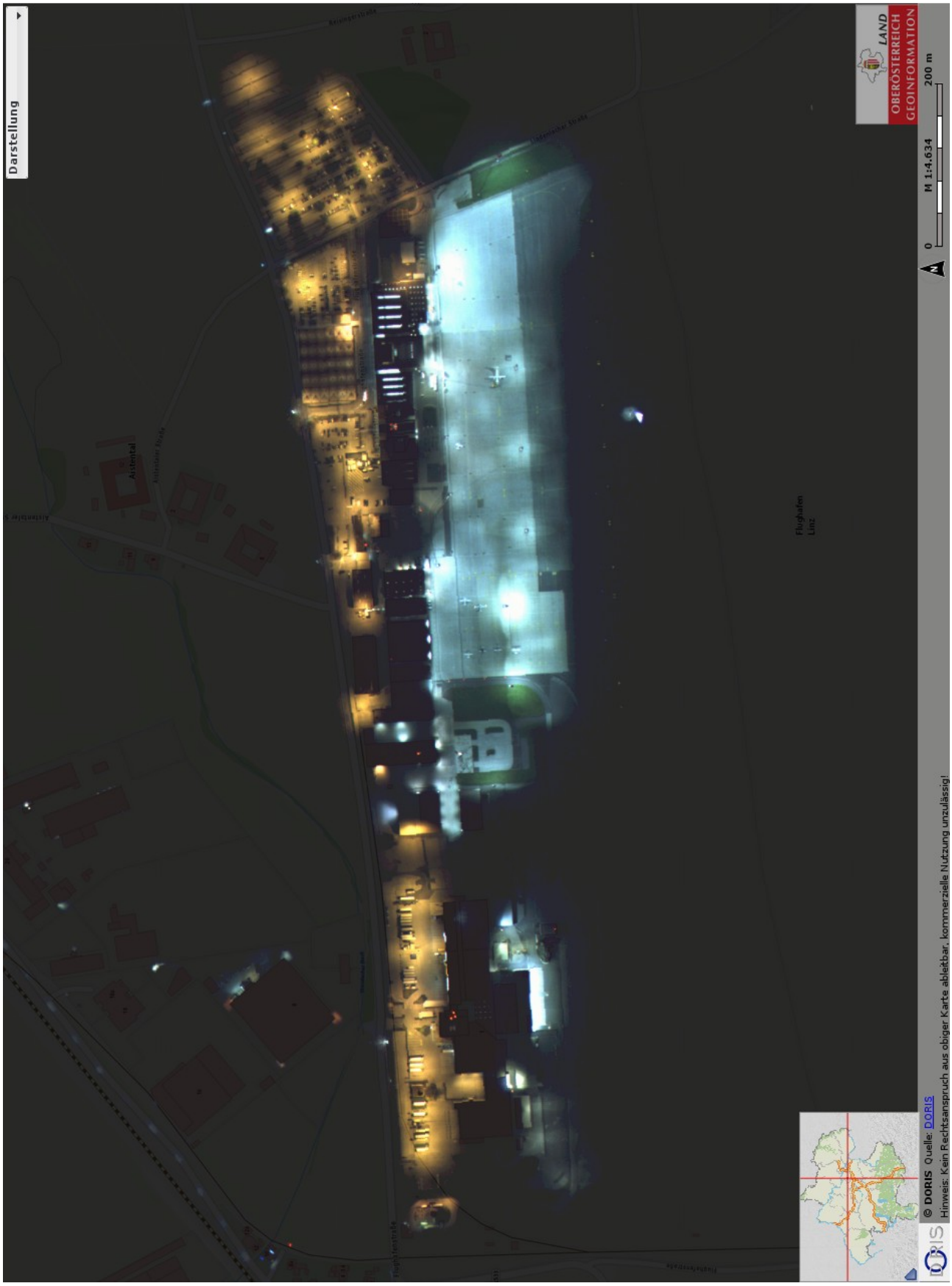


Abbildung 18: Beispielbild Flughafen Linz

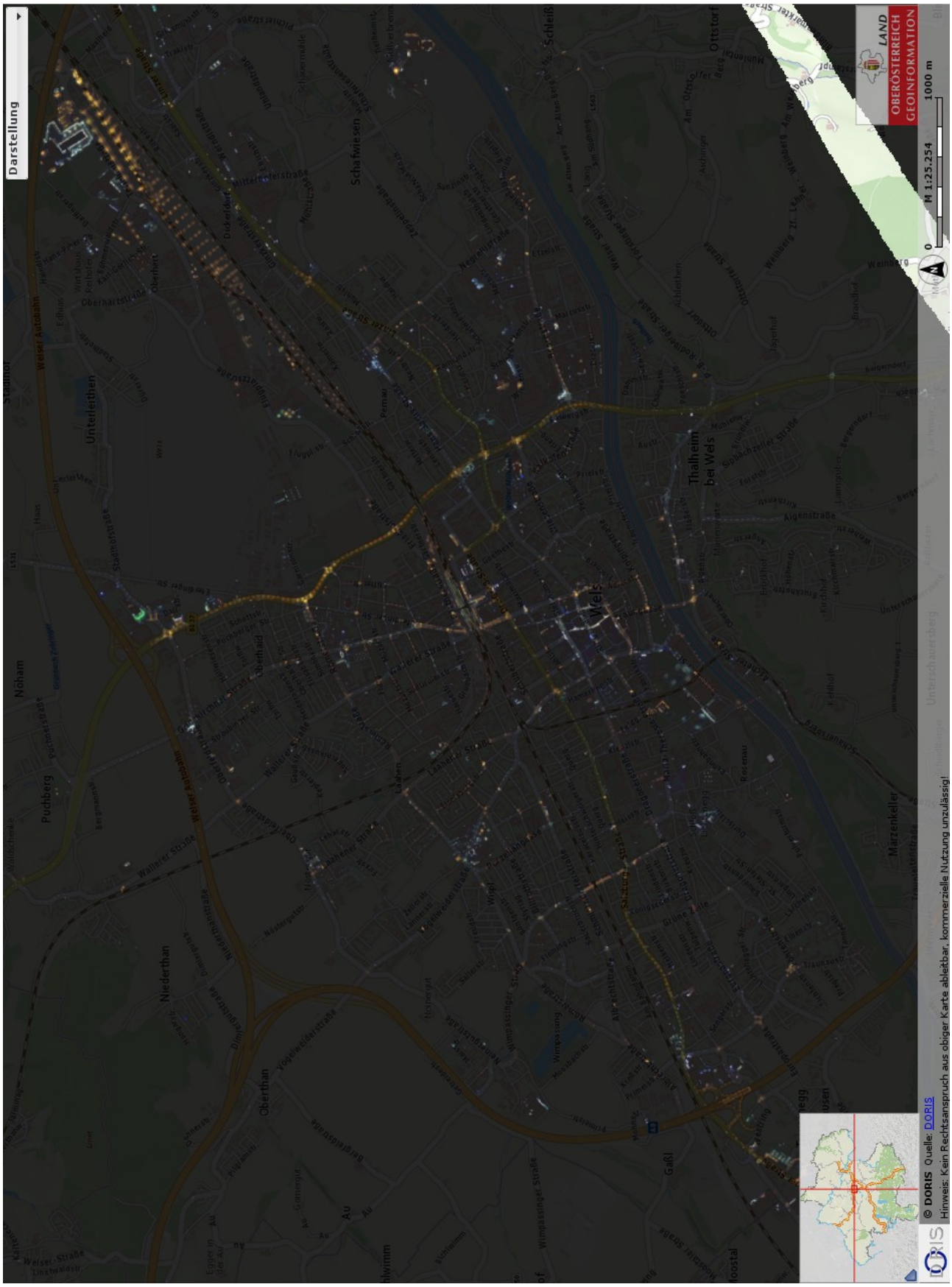


Abbildung 19: Beispielbild Stadt Wels

9 Referenzen

Cao, C., & Bai, Y. (2014). Quantitative Analysis of VIIRS DNB Nightlight Point Source for Light Power Estimation and Stability Monitoring. Remote Sensing, 6(12), 11915-11935.

Kuechly, H. U., Kyba, C. 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., Garz, S., Kuechly, H., de Miguel, A. S., Zamorano, J., Fischer, J., & Hölker, F. (2014). High-Resolution Imagery of Earth at Night: New Sources, Opportunities and Challenges. Remote Sensing, 7(1), 1-23.

de Miguel, A. S., Zamorano, J., Castaño, J. G., & Pascual, S. (2014). Evolution of the energy consumed by street lighting in Spain estimated with DMSP-OLS data. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, *139*, 109-117.

10 Anhang 1: Fehleranalyse Positionsfehler RMS f1.4

X-Koordinate f1.4	Y-Koordinate f1.4	X-Koordinate f1.4	Y-Koordinate f1.4	X Residuum	Y Residuum
443547,262893	5341526,90318	443547,696234	5341519,312768	-0,43	7,59
448203,474608	5344128,805495	448209,905049	5344123,939625	-6,43	4,87
427043,915765	5335631,88981	427043,451707	5335629,082811	0,46	2,81
444520,532733	5342072,991012	444516,922075	5342068,54281	3,61	4,45
446919,039317	5351319,197949	446914,701053	5351315,21277	4,34	3,99
448596,232225	5353182,86153	448593,87834	5353178,87635	2,35	3,99
441030,814775	5345654,624394	441031,023562	5345651,061621	-0,21	3,56
447926,310082	5349030,547539	447926,998911	5349026,430067	-0,69	4,12
427795,306166	5335895,572647	427793,084572	5335893,042679	2,22	2,53
452933,947907	5343620,704616	452951,675937	5343616,957562	-17,73	3,75
449025,035787	5349653,069735	449022,86711	5349650,222266	2,17	2,85
444239,459664	5339582,852282	444235,1214	5339580,05773	4,34	2,79
446426,689711	5347290,453034	446426,320205	5347287,923066	0,37	2,53
447073,294844	5344328,567917	447069,750332	5344325,773365	3,54	2,79
443671,430769	5343157,529839	443670,030688	5343155,614841	1,40	1,91
427246,382845	5335622,059079	427246,079485	5335621,910366	0,30	0,15
444370,414178	5347462,490941	444373,870968	5347461,344947	-3,46	1,15
445171,995208	5344138,596704	445176,388212	5344137,389655	-4,39	1,21
449307,425751	5344855,059378	449308,897442	5344853,490623	-1,47	1,57
427799,948639	5334923,04449	427799,579133	5334923,424944	0,37	-0,38
429610,988716	5335545,445877	429612,673695	5335545,709585	-1,68	-0,26
425582,533368	5333718,014235	425581,634694	5333718,659273	0,90	-0,65
443646,687957	5341338,012309	443640,655492	5341337,012938	6,03	1,00
434349,099793	5338253,35234	434350,936541	5338253,491884	-1,84	-0,14
446966,267537	5351492,235795	446965,501155	5351491,822498	0,77	0,41
425014,683482	5333426,777958	425014,843144	5333427,952163	-0,16	-1,17
442396,444772	5341137,515614	442396,718086	5341137,397816	-0,27	0,12
442038,738034	5341145,163665	442036,781025	5341145,171745	1,96	-0,01
444741,375251	5339190,738998	444743,588717	5339190,36774	-2,21	0,37
448296,859781	5350571,087078	448294,10902	5350571,070656	2,75	0,02
451156,911439	5343896,889056	451156,012765	5343896,158258	0,90	0,73
422188,364098	5338291,064763	422189,605586	5338293,660524	-1,24	-2,60
440087,69454	5341838,563558	440090,883806	5341839,425868	-3,19	-0,86
428198,020164	5334636,4286	428198,290893	5334638,493901	-0,27	-2,07
423544,210802	5332788,329099	423538,689874	5332790,928872	5,52	-2,60
448408,385332	5353282,783038	448406,428323	5353283,957244	1,96	-1,17
427027,991989	5329682,739165	427032,318846	5329684,90556	-4,33	-2,17
440444,482186	5345273,560844	440445,646913	5345275,231199	-1,16	-1,67
448760,538803	5351633,96996	448765,460974	5351635,144166	-4,92	-1,17
446953,840519	5346297,58176	446955,190808	5346298,755965	-1,35	-1,17
447419,967295	5341614,418104	447418,169036	5341615,274809	1,80	-0,86
449605,399174	5347910,128485	449609,064571	5347911,30269	-3,67	-1,17
448319,284792	5351135,877076	448318,386118	5351137,474616	0,90	-1,60
448094,82429	5347233,081233	448099,065782	5347234,875288	-4,24	-1,79
447505,879047	5346503,513251	447509,875175	5346505,481208	-4,00	-1,97
447961,10286	5350615,934043	447959,145851	5350618,298876	1,96	-2,36
437643,894664	5339523,157	437646,237142	5339526,646314	-2,34	-3,49
444840,603921	5343926,268155	444843,409421	5343930,220491	-2,81	-3,95
446970,573681	5345107,551486	446971,362242	5345111,471262	-0,79	-3,92
438122,593017	5339833,976893	438125,133933	5339839,119856	-2,54	-5,14

11 Anhang 2: Dunkelstrommessungen im Labor vom 24.02.2015

Nr.	Mean	Std.	Var.	Min	Max	File
00:	0769.809	0005.8	000033.786	744.000	869.000	DSC_2637.pgm
01:	0770.139	0006.4	000040.324	744.000	9103.000	DSC_2638.pgm
02:	0769.090	0006.0	000035.662	744.000	4298.000	DSC_2639.pgm
03:	0768.291	0006.0	000035.499	744.000	3387.000	DSC_2640.pgm
04:	0768.065	0005.9	000034.766	744.000	2639.000	DSC_2641.pgm
05:	0768.916	0005.9	000034.862	744.000	2443.000	DSC_2642.pgm
06:	0768.125	0005.9	000034.931	744.000	1927.000	DSC_2643.pgm
07:	0770.014	0005.9	000034.992	744.000	2070.000	DSC_2644.pgm
08:	0769.152	0005.9	000034.693	744.000	1873.000	DSC_2645.pgm
09:	0768.651	0005.9	000034.552	744.000	1931.000	DSC_2646.pgm
10:	0769.000	0005.9	000034.689	744.000	1930.000	DSC_2647.pgm
11:	0769.109	0005.9	000034.579	744.000	1645.000	DSC_2648.pgm
12:	0768.928	0005.9	000034.579	744.000	1689.000	DSC_2649.pgm
13:	0769.304	0005.9	000034.552	744.000	1861.000	DSC_2650.pgm
14:	0769.101	0005.9	000034.549	744.000	1812.000	DSC_2651.pgm
15:	0769.226	0005.9	000034.616	744.000	1720.000	DSC_2652.pgm
16:	0767.639	0005.8	000033.966	744.000	878.000	DSC_2653.pgm
17:	0770.343	0006.3	000039.866	744.000	8275.000	DSC_2654.pgm
18:	0767.848	0006.0	000035.641	744.000	3685.000	DSC_2655.pgm
19:	0768.790	0006.0	000035.431	744.000	2809.000	DSC_2656.pgm
20:	0770.059	0005.9	000035.197	744.000	2408.000	DSC_2657.pgm
21:	0769.621	0005.9	000035.251	744.000	2182.000	DSC_2658.pgm
22:	0768.754	0005.9	000035.161	744.000	2091.000	DSC_2659.pgm
23:	0767.579	0006.0	000035.483	744.000	2118.000	DSC_2660.pgm
24:	0769.272	0005.9	000034.599	744.000	1879.000	DSC_2661.pgm
25:	0768.711	0005.9	000034.666	744.000	1930.000	DSC_2662.pgm
26:	0769.202	0005.9	000034.625	744.000	1865.000	DSC_2663.pgm
27:	0768.637	0005.9	000034.631	744.000	2093.000	DSC_2664.pgm
28:	0768.984	0005.9	000034.689	744.000	1801.000	DSC_2665.pgm
29:	0768.991	0005.9	000034.621	744.000	1799.000	DSC_2666.pgm
30:	0768.937	0005.9	000034.633	744.000	1857.000	DSC_2667.pgm
31:	0768.941	0005.9	000034.615	744.000	1992.000	DSC_2668.pgm
32:	0769.095	0005.9	000034.831	744.000	2097.000	DSC_2669.pgm

Overall Mean: 0768.979 | Std:005.927 | Var: 0035.137

12 Anhang 3: Dunkelstrommessungen während des Messfluges am 26.10.2015

(Original Files haben falsches Datum)

Nr.	Mean	Std.	Var.	Min	Max	File
00:	0769.285	0005.9	000034.389	744.000	971.000	Ni20141015_00531.pgm
01:	0769.217	0005.9	000034.353	744.000	941.000	Ni20141015_00532.pgm
02:	0769.161	0005.9	000034.455	744.000	971.000	Ni20141015_00533.pgm
03:	0769.137	0006.3	000040.285	744.000	960.000	Ni20141015_00534.pgm
04:	0769.058	0005.9	000034.341	744.000	938.000	Ni20141015_00535.pgm
05:	0769.023	0005.9	000034.337	744.000	957.000	Ni20141015_00536.pgm
06:	0769.320	0006.4	000040.473	744.000	962.000	Ni20141015_00537.pgm
07:	0769.106	0005.9	000034.583	744.000	939.000	Ni20141015_00538.pgm
08:	0769.349	0005.9	000034.385	744.000	927.000	Ni20141015_00539.pgm
09:	0769.411	0006.4	000040.372	744.000	957.000	Ni20141015_00540.pgm
10:	0768.780	0005.9	000034.412	744.000	938.000	Ni20141015_00541.pgm
11:	0769.492	0005.9	000034.570	744.000	931.000	Ni20141015_00542.pgm
12:	0769.634	0006.4	000040.501	744.000	965.000	Ni20141015_00543.pgm
13:	0769.332	0005.9	000034.488	744.000	939.000	Ni20141015_00544.pgm
14:	0769.370	0005.9	000034.543	744.000	992.000	Ni20141015_00545.pgm
15:	0769.148	0006.4	000040.557	744.000	957.000	Ni20141015_00546.pgm
16:	0769.126	0005.9	000034.386	744.000	969.000	Ni20141015_00547.pgm
17:	0769.012	0005.9	000034.708	744.000	978.000	Ni20141015_00548.pgm
18:	0769.040	0006.4	000040.616	744.000	953.000	Ni20141015_00549.pgm
19:	0768.831	0005.9	000034.652	744.000	952.000	Ni20141015_00550.pgm
20:	0768.938	0005.9	000034.674	744.000	944.000	Ni20141015_00551.pgm
21:	0769.326	0006.4	000040.622	744.000	971.000	Ni20141015_00552.pgm
22:	0769.001	0005.9	000034.489	744.000	957.000	Ni20141015_00553.pgm
23:	0769.012	0005.9	000034.565	744.000	944.000	Ni20141015_00554.pgm
24:	0769.430	0006.4	000040.722	744.000	988.000	Ni20141015_00555.pgm
25:	0768.751	0005.9	000034.542	744.000	973.000	Ni20141015_00556.pgm
26:	0769.238	0005.9	000034.641	744.000	977.000	Ni20141015_00557.pgm
27:	0768.894	0006.4	000040.646	744.000	959.000	Ni20141015_00558.pgm
28:	0769.334	0005.9	000034.533	744.000	974.000	Ni20141015_00559.pgm
29:	0768.917	0005.9	000034.679	744.000	942.000	Ni20141015_00560.pgm
30:	0769.387	0006.4	000040.690	744.000	998.000	Ni20141015_00561.pgm
31:	0768.889	0005.9	000034.497	744.000	946.000	Ni20141015_00562.pgm
32:	0768.636	0005.9	000034.673	744.000	947.000	Ni20141015_00563.pgm
33:	0768.814	0006.4	000040.557	744.000	942.000	Ni20141015_00564.pgm
34:	0769.219	0005.9	000034.576	744.000	992.000	Ni20141015_00565.pgm
35:	0769.191	0005.9	000034.756	744.000	957.000	Ni20141015_00566.pgm
36:	0769.224	0006.4	000040.696	744.000	991.000	Ni20141015_00567.pgm
37:	0769.254	0005.9	000034.622	744.000	968.000	Ni20141015_00568.pgm
38:	0769.223	0005.9	000034.559	744.000	953.000	Ni20141015_00569.pgm
39:	0769.144	0005.9	000034.655	744.000	958.000	Ni20141015_05070.pgm
40:	0769.511	0006.4	000040.717	744.000	986.000	Ni20141015_05071.pgm
41:	0768.891	0005.9	000034.852	744.000	968.000	Ni20141015_05072.pgm
42:	0769.351	0005.9	000034.810	744.000	967.000	Ni20141015_05073.pgm

43:| 0769.495 | 0006.4 | 000040.623 | 744.000 | 1012.000 | Ni20141015_05074.pgm
44:| 0769.216 | 0005.9 | 000034.719 | 744.000 | 1003.000 | Ni20141015_05075.pgm
45:| 0769.210 | 0005.9 | 000034.738 | 744.000 | 980.000 | Ni20141015_05076.pgm
46:| 0769.328 | 0006.4 | 000040.695 | 744.000 | 993.000 | Ni20141015_05077.pgm
47:| 0769.332 | 0005.9 | 000034.809 | 744.000 | 992.000 | Ni20141015_05078.pgm
48:| 0769.519 | 0005.9 | 000034.750 | 744.000 | 967.000 | Ni20141015_05079.pgm
49:| 0769.478 | 0006.4 | 000040.807 | 744.000 | 987.000 | Ni20141015_05080.pgm
50:| 0769.049 | 0005.9 | 000034.871 | 744.000 | 958.000 | Ni20141015_05081.pgm
51:| 0769.429 | 0005.9 | 000034.724 | 744.000 | 978.000 | Ni20141015_05082.pgm
52:| 0769.374 | 0006.4 | 000040.745 | 744.000 | 1025.000 | Ni20141015_05083.pgm
53:| 0769.096 | 0005.9 | 000034.714 | 744.000 | 965.000 | Ni20141015_05084.pgm
54:| 0769.473 | 0005.9 | 000034.762 | 744.000 | 998.000 | Ni20141015_05085.pgm
55:| 0769.657 | 0006.4 | 000040.711 | 744.000 | 970.000 | Ni20141015_05086.pgm
56:| 0769.065 | 0005.9 | 000034.579 | 744.000 | 980.000 | Ni20141015_05087.pgm
57:| 0769.160 | 0005.9 | 000034.694 | 744.000 | 961.000 | Ni20141015_05088.pgm
58:| 0769.320 | 0006.4 | 000040.805 | 744.000 | 976.000 | Ni20141015_05089.pgm
Overall Mean: 0769.197 | Std:006.041 | Var: 0036.541

13 Anhang 4: Berechnung Gain für Pixel R (von R ,G1,G2,B)

Mit dem Median EO-offset = 768.566442311 ergibt sich

Gain = [0.1929764566291555, 0.20282593647597322, 0.20219556754170381, 0.20428357407565434]

Mean = [12435.643, 8999.8154, 5628.8916, 2760.9729],

Var = [64441.242, 44372.113, 27838.848, 13515.394]

Std_err = [253.8528, 210.6469, 166.84978, 116.25572]

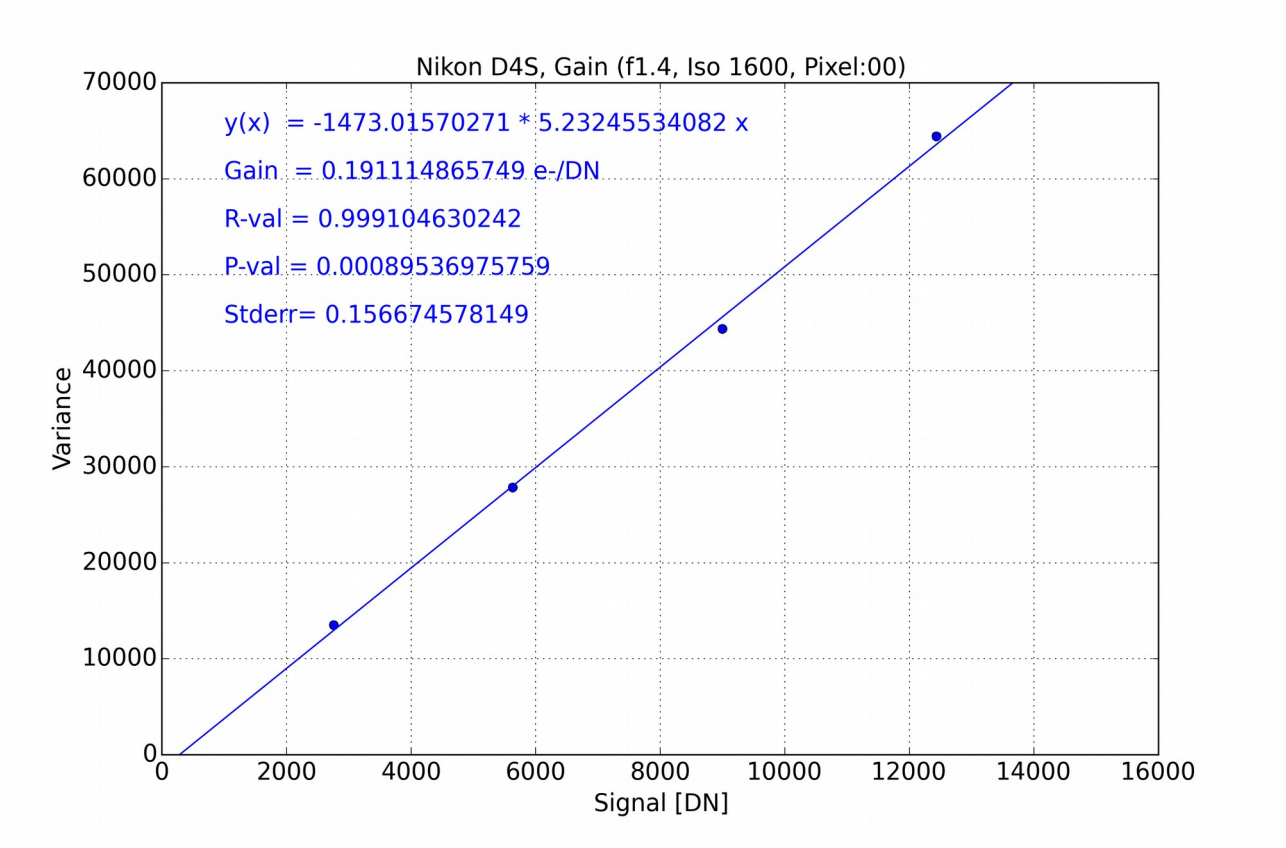


Abbildung 20: Linearität Blende f1.4 ISO1600 Farbpixel Rot

14 Anhang 5: Berechnung Gain für Pixel G1 (von R ,G1,G2,B)

Mit dem Median EO-offset = 768.566442311 ergibt sich

Gain = [0.21719604491272332, 0.21757434668919989, 0.21743822849699793, 0.21790138339536841]

Mean = [14032.741, 10164.643, 6350.3569, 3109.3855],

Var = [64608.641, 46718.02, 29205.338, 14269.691]

Std_err = [254.1823, 216.14351, 170.89569, 119.45581]

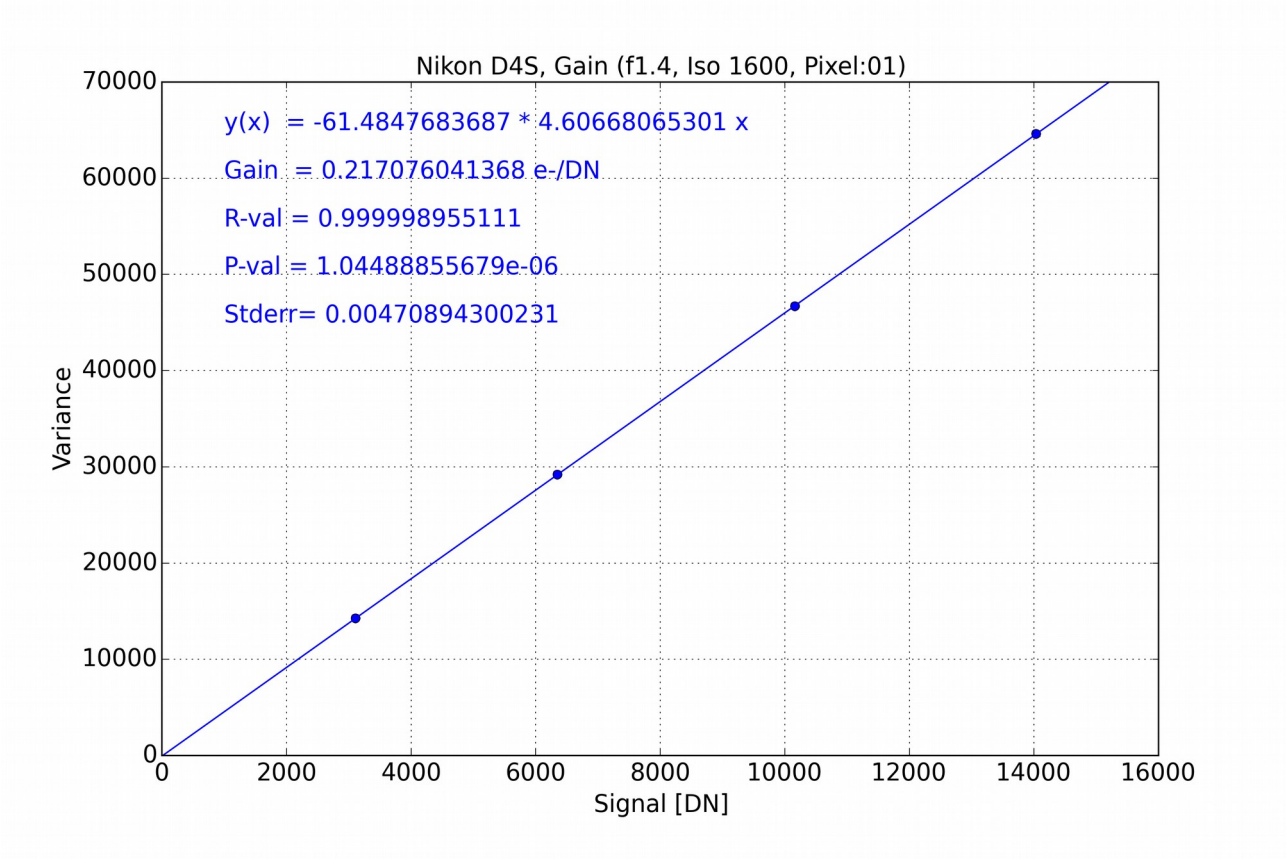


Abbildung 21: Linearität Blende f1.4 ISO1600 Farbpixel Grün1

15 Anhang 6: Berechnung Gain für Pixel G2 (von R ,G1,G2,B)

Mit dem Median EO-offset = 768.566442311 ergibt sich

Gain = [0.2135363198781518, 0.21803857663556159, 0.22300760066020334, 0.22511802792656693]

Mean = [14024.208, 10154.729, 6343.52, 3107.5112]

Var = [65675.984, 46573.082, 28445.309, 13803.92]

Std_err = [256.27325, 215.80797, 168.65736, 117.49008]

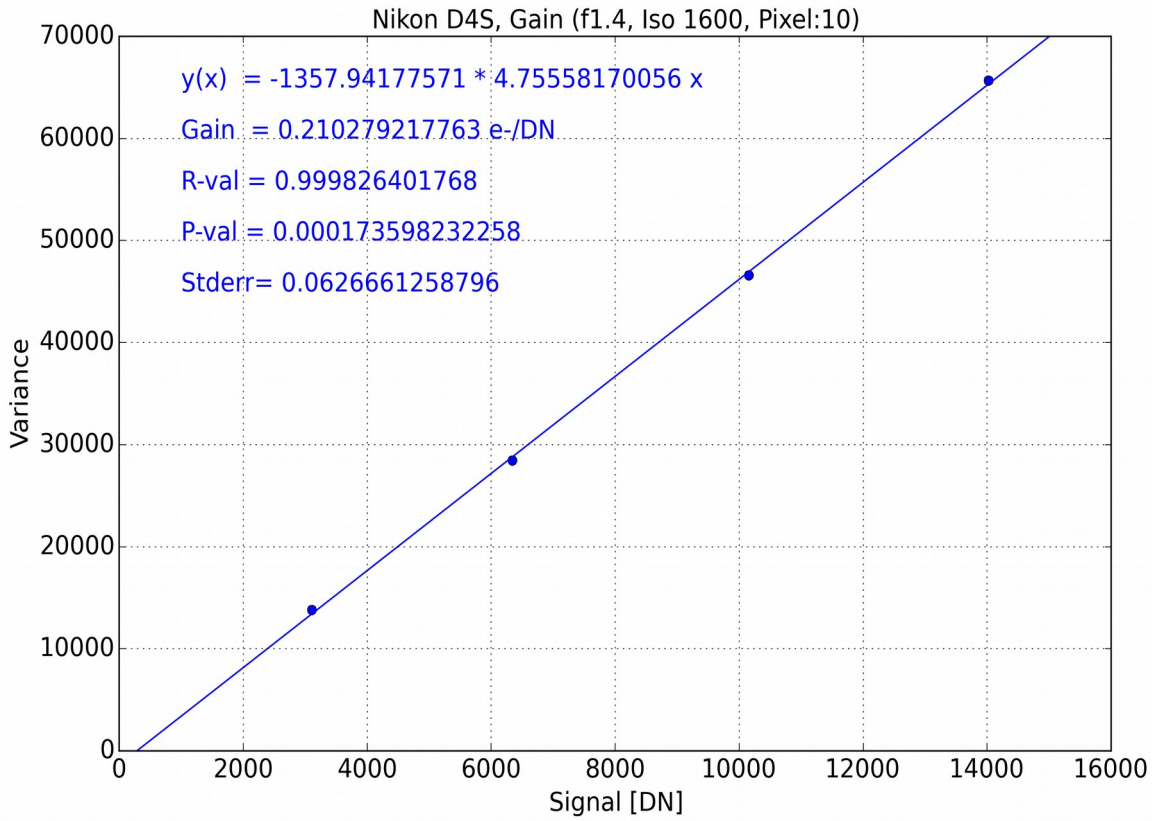


Abbildung 22: Linearität Blende f1.4 ISO1600 Farbpixel Grün 2

16 Anhang 7: Berechnung Gain für Pixel B (von R ,G1,G2,B)

Mit dem Median EO-offset = 768.566442311 ergibt sich

Mean EO-offset = 768.566442311

Gain = [0.19314541924112946, 0.19883086187482732, 0.20070729171281129, 0.20004552767094941, 0.19817109875608641, 0.20148799288490049, 0.20352326420702496, 0.20856543137955574, 0.19987895800757624]

Mean = [12694.908, 10310.694, 10052.619, 8942.3398, 6590.625, 4603.5044, 3348.8811, 2102.6416, 1034.3724]

Var = [65727.203, 51856.609, 50085.969, 44701.523, 33257.246, 22847.537, 16454.537, 10081.448, 5174.9941]

Std_err = [256.37317, 227.72046, 223.79895, 211.42735, 182.36569, 151.15402, 128.27524, 100.40642, 71.937431]

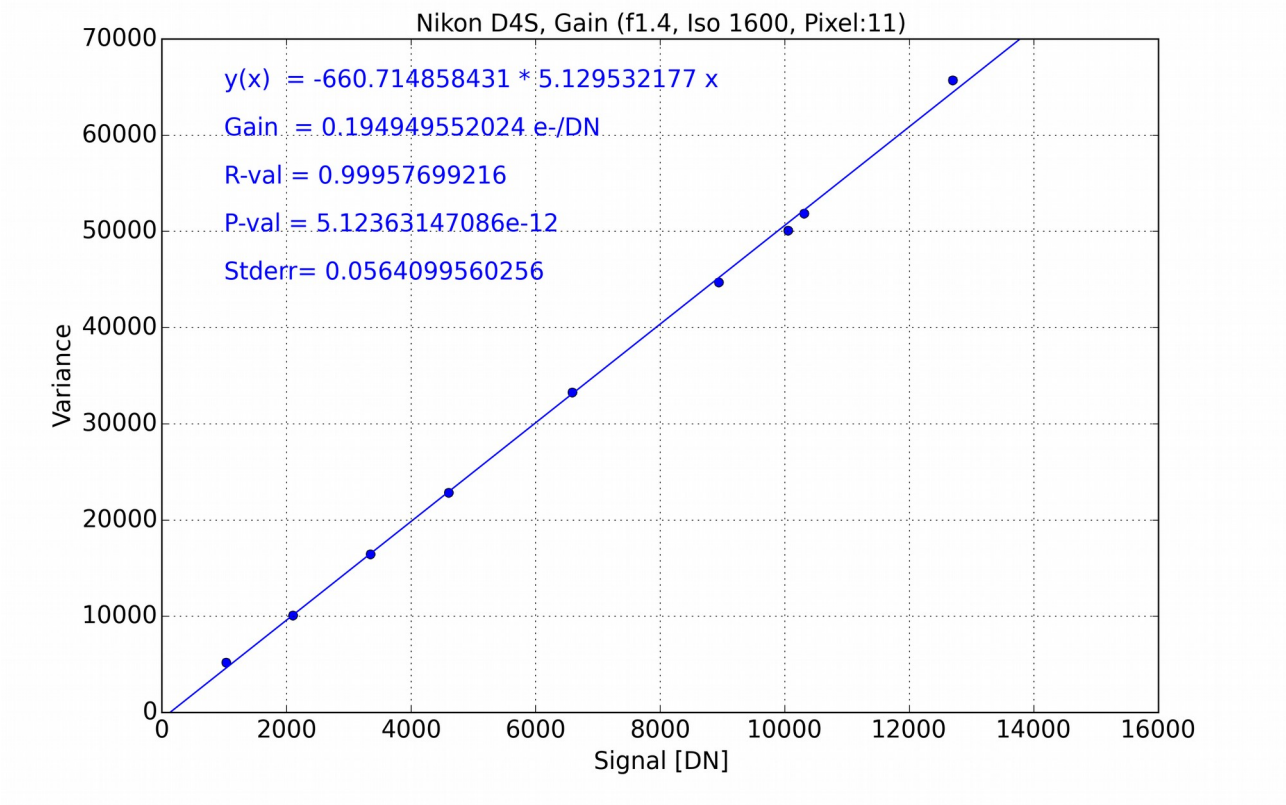


Abbildung 23: Linearität Blende f1.4 ISO1600 Farbpixel Blau