
	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report				
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023				
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page:	1/127

# CALEC


(Characterization of Artificial Light Emissions of Cologne)

2021 - 2023



	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 2/127

<b>FR (Final Report) / DAR (Data Acquisition Report) by</b>	
Lead Authors	
<b>Dr. Thomas Ruhtz</b> Freie Universität Berlin (FUB) Institute for Space Sciences Carl-Heinrich-Becker Weg 6-10 12165 Berlin <a href="mailto:Thomas.Ruhtz@fu-berlin.de">Thomas.Ruhtz@fu-berlin.de</a>	<b>Dr. Chris Kyba (GFZ)</b> Geoforschungs Zentrum Potsdam (GFZ) Remote Sensing Department Telegrafenberg 14473 Potsdam <a href="mailto:chris.kyba@gfz-potsdam.de">chris.kyba@gfz-potsdam.de</a>
Christian Hohmann (Dipl. Ing. GFZ)	Arne Dröge-Rothaar (Ruhr-Universität Bochum)
Yiğit Öner Altıntaş (Student Uni Potsdam)	Milagros Tunon (Student Uni Potsdam)

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 3/127

## Historie

Document Version	Date	Status	Reason for change	Originator
V01R00	20221109	Preparation	New Dokument	Th. Ruhtz
V02R01	20231107	Final	Final	Th. Ruhtz

## Beiträge zu diesem Dokument

Name	Section
Thomas Ruhtz	Draft version

## Inhaltsverzeichnis

1. Executive Summary.....	6
2. Beschreibung des Projektes.....	8
2.1 Einführung.....	8
2.2 Zweck des Dokumentes.....	10
2.3 Anwendbare Dokumente.....	10
2.4 Akkürzungsverzeichnis.....	11
2.5 Referenzen.....	12
2.6 Beschreibung des Systemsaufbaus.....	13
2.7 Beschreibung der Einzelkomponenten:.....	14
2.7.1 Nikon Z7.....	15
2.7.2 Nikon D4s.....	16
2.7.3 Teledyne ProEM-HS1024BX3.....	17
2.7.4 Teledyne Kinetix.....	18
2.7.5 Meinberg Lantime M1000.....	19
2.7.6 Labtops.....	21
2.7.7 IGI IMU (Inertial Measurement Unit).....	21
2.7.8 Nikon Trigger Box.....	22
2.7.9 LTE Router.....	22
2.7.10 Rpi (Raspberry Pi serial link data acquisition).....	22
2.7.11 GPS G18x5Hz.....	22
3. Labormessungen und Ermittlung Einstellparameter.....	23
3.1 Auswahl der Komponenten für den UV- und NIR-Bereich.....	23
3.2 Objektiv Spezifikationen.....	25
3.3 RGB-Kamera Spektralverlauf.....	26
3.4 UV-Kamera Spektralverlauf.....	26
3.5 NIR-Kamera Spektralverlauf.....	27
3.6 Test UV und NIR Filter.....	28
3.7 Ermittlung Belichtung- und Kameraeinstellungen.....	30
3.8 Labormessungen.....	34
3.8.1 Zoom Vergleich D4s und Z7.....	34
3.8.2 Test Zeiterfassung.....	35
3.8.3 Hot- und Bad Pixel.....	36
3.8.4 Offset (Bias).....	39
3.8.5 Linearität.....	41
3.8.6 Barrel distortion.....	45
3.8.7 Vigneting.....	49
3.8.8 Spektrale Empfindlichkeit.....	50
3.8.9 Photon Transfer Curve.....	50
4. Planungen Flugmesskampagnen.....	52
4.1 Planung Potsdam.....	52
4.2 Planung Berlin.....	55
4.3 Planung Köln.....	58



5. Datenbearbeitung, -analyse und Auswertung.....	62
5.1 Datenbearbeitung.....	62
5.1.1 Übersicht Datenprozessierung.....	63
5.1.2 Zeitsynchronisierung der Bilddaten (camera timing).....	66
5.1.3 Demosaicing.....	72
5.1.4 Georeferenzierung.....	73
5.1.5 Datenzusammenführung der Kameraaufnahmen.....	75
5.1.6 Beispiele Mosaik-Bilder.....	77
5.1.7 Datenformat.....	85
5.1.8 Auswertung Beleuchtungs- und Landnutzungsklassen.....	86
5.1.8.1 Ergebnis Köln für RGB-Bereich.....	87
5.1.8.2 Ergebnis aller Spektralbänder (UV,RGB,NIR).....	93
5.1.8.3 Ergebnis Gesamtflächenanalyse für den RGB-Bereich.....	97
5.1.9 Analyse der Abstrahlcharakteristik.....	100
5.1.10 Auswertung Potsdam.....	104
5.1.11 Auswertung Berlin.....	104
5.1.12 Ermittlung Flugparameter Köln.....	105
6. Anhang.....	106
6.1 Timing Test (20210319).....	106
6.2 Ground level Tests (20210308, 20210313).....	108
6.3 1st Nighttime Testflight Potsdam Center (20210330).....	111
6.4 Saturation analysis Potsdam Center (20210330).....	114
6.5 2nd Nighttime Testflight Berlin (20210331).....	117
6.6 Saturation Analysis (20210331).....	124

## 1. Executive Summary

Am Abend des 20. Dezember 2021, wurden nächtliche Luftbilder der Stadt Köln und der Umgebung in einer Flughöhe von etwa 3km (10.000 Fuß) aufgenommen. Die Bilder wurden in 5 verschiedenen spektralen Kanälen, im ultravioletten (UV: 350 - 400nm), sichtbaren (RGB: R: 575 - 675 nm, G: 450 - 600 nm, B: 400 - 500 nm) und nahen Infrarotbereich (NIR: 800 - 850nm) aufgenommen. Es wurde ein Programm zur automatischen Georeferenzierung der Bilder und Mosaikerstellung entwickelt. Die Gesamtfläche der erstellten Mosaike betrug etwa 1081 km<sup>2</sup> für UV und 765 km<sup>2</sup> für RGB und NIR. Diese Mosaike können in Programme für geografische Informationssysteme (GIS) eingelesen werden, um von der Unteren Umweltschutzbehörde oder anderen Behörden angezeigt und weitergehend analysiert zu werden. Die Mosaikebilder können z.B. zur Identifizierung sehr heller Lichtquellen oder z.B. Quellen mit einem hohem UV-Anteil verwendet werden. Dies ermöglicht die Betreiber dieser identifizierten Lichtquellen mit Verbesserungsvorschlägen zu kontaktieren und somit die Lichtverschmutzung im Raum Köln auf freiwilliger Basis zu minimieren oder zu beseitigen. Beispiele sind z.B. eine bessere Ausrichtung oder andere Beleuchtungskörper oder die Installation von Lichtabschirmungen.

Es wurde eine Analyse des Verhältnisses zwischen Lichtemissionen und Flächennutzung durchgeführt. Industrie- und Gewerbegebiete sind in der Analyse die Flächen, die für den größten relativen Anteil der Lichtemissionen verantwortlich sind:

- ➔ 36 % der Lichtemissionen von Industrie- und Gewerbegebiete entfallen auf 10 % der Fläche im Raum Köln

Der nächstgrößere Beitrag kommt von Straßen- und Parkflächen:

- ➔ 23 % der Lichtemissionen von Straßen- und Parkflächen entfallen auf 13 % der Fläche im Raum Köln

Den größten Beitrag im Verhältnis zur Fläche leistet der Kölner Flughafen

- ➔ 6 % der Lichtemissionen des Flughafens entfallen auf nur etwa 6 km<sup>2</sup> also 1,5 % der Fläche des Fluggebietes im Raum Köln

Wohngebiete hingegen nehmen 15 % der Fläche Kölns ein und emittieren 12 % des Lichts. Innerhalb der Flächennutzungsklassen wurden auch bestimmte Gebäudetypen untersucht. Die Lichtemission von Gebäudeflächen waren im Durchschnitt 67% heller als im gesamtstädtischen Durchschnitt, und zu den

hellsten Gebäudetypen gehörten Land- und Forstwirtschaft (7,2 mal heller als der Durchschnitt), Verkehrsgebäude (5,4), Gastronomie (4,0), Handel (3,9), Freizeit und Kultur (3,4) und Beherbergung (3,1).

Ein Vorteil der Erfassung von Daten in fünf spektralen Bändern besteht darin, dass die Arten von Lichtquellen leichter identifiziert werden können, wie z. B. Natriumdampf-Hochdrucklampen vs. Metallhalogenidlampen vs. LED-Lampen. Halogen-Metalllampen mit hohem UV-Anteil und Natriumdampf-Hochdrucklampen mit hohem NIR-Anteil wurden häufig mit der Flutlichtbeleuchtung in Verbindung gebracht, die für Gebäude, Schilder, Sportplätze und Arbeitsbereiche im Freien verwendet werden. Die Gebäudetypen, die im Vergleich zu ihren sichtbaren Emissionen große UV-Anteile aufwiesen, waren Beherbergung, Freizeit und Kultur, Gastronomie und religiöse Einrichtungen. Die nicht sichtbaren UV-Emissionen stimmen aber häufig nicht mit den Emissionen im sichtbaren Bereich überein. So betrug der Gesamtanteil des Landnutzungskatalogs Flugverkehr und der Bahnflächen an den UV-Emissionen nur 1,9 %, während der Anteil des sichtbaren Lichts im grünen Bereich bei 8,1 % lag. Im Gegensatz dazu wurden 5,8 % der UV-Emissionen mit Wasser- und Schiffsverkehrsflächen in Verbindung gebracht, die zusammen nur 1 % des Lichts im grünen sichtbaren Bereich ausmachten. Dies ist ein Bereich, der besonders sensibel ist, da Wasserflächen ein wichtiger Lebensraum für Insekten sind, und Insekten von ultravioletter Licht besonders angezogen werden.

Insgesamt bieten das Mosaik und dieser Bericht einen Maßstab für die Lichtemissionen von Köln am frühen Abend, an dem die künftige Entwicklung gemessen werden kann. Wir empfehlen den zuständigen Behörden, die Bereiche zu untersuchen, die mit UV Emissionen und besonders hellen Emissionen im sichtbaren Bereich in Verbindung stehen, da die Behandlung dieser Bereiche möglicherweise eine erhebliche Verringerung der Lichtverschmutzung mit weniger Aufwand als eine stadtweite Maßnahme ermöglichen kann.

## 2. Beschreibung des Projektes

### 2.1 Einführung


Nächtliche Lichtemissionen stellen im zunehmenden Maße eine ernste Beeinträchtigung der natürlichen Umgebungsbedingungen in der Natur dar. Das Projekt CALEC (Characterization of Artificial Light Emissions of Cologne) soll einen Beitrag zur Untersuchung des Istzustandes der nächtlichen Lichtemissionen im Raum Köln leisten. Gefördert wurde dieses Projekt von der unteren Naturschutzbehörde in Köln. Projektpartner waren in diesem Projekt das Geoforschungszentrum Potsdam und die Freie Universität Berlin.

Folgende Forschungsthemen wurden während diesem Projekt bearbeitet:

1. Instrumentenentwicklung, -auswahl und Zusammenstellung
2. Sensitivitätsstudien und -analysen der Instrumentenauswahl
3. Flugplanungen Potsdam, Berlin
4. Datenerfassungen in Testgebieten Potsdam und Berlin
4. Laborkalibrationen der Kamerasysteme
5. Analysen und erste Ergebnisse aus Testmessungen
6. Flugplanung Köln
7. Datenerfassung im Raum Köln
8. Datenbearbeitung
9. Datenanalyse und Zusammenstellung von Ergebnissen


Dieser Abschlussbericht wird einen Überblick über die während des CALEC Projektes (2021-2023) erfassten Daten geben und die im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten Ergebnisse zusammenfassen. Es wurden die aufwärts gerichteten Lichtemissionen mit einem zu diesem Zweck entwickelten flugzeuggestützten Kamerasystem in Berlin, Potsdam und Köln erfasst und ausgewertet. Das genutzte Kamerasystem wurde mit Spektralkanälen im UV (Ultra Violet 350-400nm), Standard-RGB (Blau: 400 – 500 nm, Grün: 450 – 600 nm, Rot: 575 – 675 nm, NIR (Nahes Infrarot): 800 – 850 nm ausgestattet. Die Standard-RGB-Kamera wurde bereits bei Studien in Berlin und Linz vor diesem Projekt verwendet und um eine zweite Weitwinkelkamera ergänzt. Es wurden Bilder, Mosaike und Auswertungen mit einer räumlichen Auflösung von ca. 1 m erstellt. Neu dazugekommen sind Kamerasysteme im UV und NIR. Dies war



	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 9/127

sehr experimentell und es ist nicht bekannt, dass diese Art der Lichtmessung für diese Anwendung in der Nacht vorher schon einmal durchgeführt wurde. Aufgrund der geringeren Anzahl von Pixeln der verfügbaren Sensoren ist die räumliche Auflösung der Bilder im UV und NIR geringer und wie zu erwarten, sind auf vielen Bildern nur einige schwache Lichtquellen erkennbar. Dies ist abhängig von der unbekannten Anzahl der Quellen und der Stärke der nach oben gerichteten UV- und NIR-Strahlung, zusammengesetzt aus direkter Emission und Reflexionen z.B. an Straßen und Gebäuden. Ein Schwerpunkt in der Datenbearbeitung war die Optimierung Kalibration, Georeferenzierung und der winkelabhängigen Berechnung der Strahlungsintensitäten. Im Weiteren wurde eine Analyse unterschiedlicher Lichtemissionen in verschiedenen Gebieten mit unterschiedlichen Lampentypen durchgeführt und erste Ergebnisse zur Klassifikation der Lichtquellen zusammengestellt.

Es ist geplant, dass die Inhalte dieses Projektes und die Ergebnisse in einem wissenschaftlichen Open-Access-Journal veröffentlicht und die gewonnenen Daten separat unter einer nicht kommerziellen Lizenz frei verfügbar gemacht werden.


	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 10/127

## 2.2 Zweck des Dokumentes

In diesem Dokument wird beschrieben, welche Arbeiten im Projekt CALEC durchgeführt, welche Daten erfasst und welche Ergebnisse während des Projektes erzielt wurden.


## 2.3 Anwendbare Dokumente

Keine

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 11/127

## 2.4 Akkürzungsverzeichnis

CALEC	Characterization of Artificial Light Emissions of Cologne
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
FUB	Freie Universität Berlin
GFZ	Geoforschungszentrum Potsdam
GPS	Global Positioning System
IGI	<a href="#">Integrated Geospatial Innovations</a> (IGI GmbH)
IMU	Inertial Measurement Unit (Inertialsystem)
IMS	Inertial Measurement System
LTE	Long Term Evolution (Mobilfunkstandard)
NMEA	National Marine Electronics Association (GPS data format Standard)
RGB	Rot, Grün, Blau (Kamera Spektralkanäle)
Rpi	Raspberry Pi computer board

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 12/127

## 2.5 Referenzen

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.

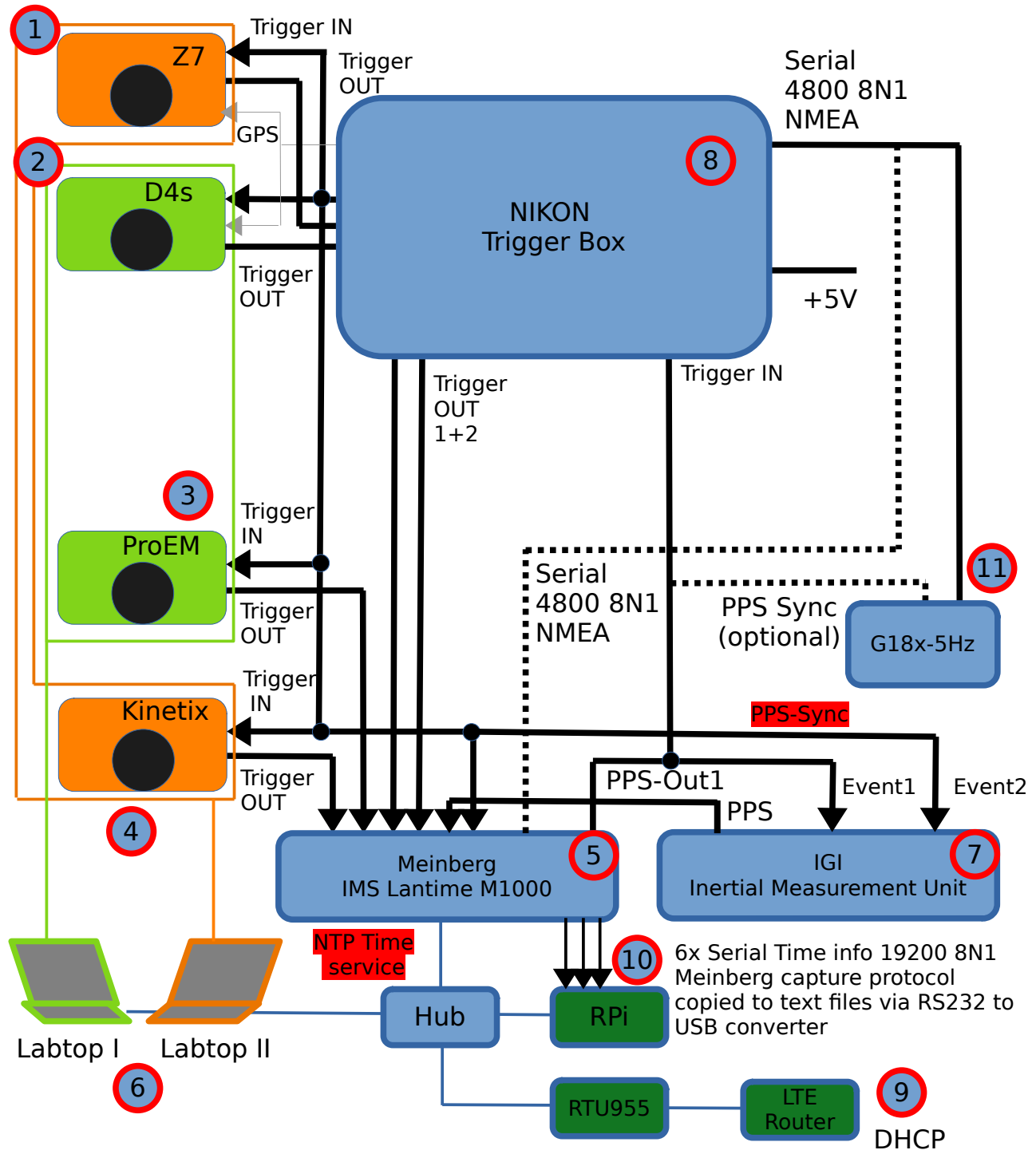
J. de Meester and Tobias Storch, Optimized Performance Parameters for Nighttime Multispectral Satellite Imagery to Analyze Lightings in Urban Areas, *MDPI Sensors* 2020; doi:10.3390/s20113313

R Celestre, M Rosenberger and G Notni, A novel algorithm for bad pixel detection and correction to improve quality and stability of geometric measurements, (2016), *Journal of physics / Conference Series*. - Bristol : IOP Publ. - 772, DOI: 10.1088/1742-6596/772/1/012002



## 2.6 Beschreibung des Systemsaufbaus

Die folgende Grafik gibt eine Übersicht des Systemsaufbaus:



**Abbildung 1:** Systemsaufbau

## 2.7 Beschreibung der Einzelkomponenten:

Im folgenden werden die im Projekt verwendeten Einzelkomponenten der Abbildung 1 Punkt 1 bis 11 beschrieben.



**Abbildung 2:** Systemzusammenstellung



**Abbildung 3:** Einbau im Flugzeug innen, mitte



**Abbildung 4:** Einbau im Flugzeug hinten

### 2.7.1 Nikon Z7

Objektiv Nikon Nikkor Z 20mm f/1.8S



Technische Daten:

Typ	Spiegellose Kamera
Bajonett	Nikon-Z-Bajonett
Bildsensor	FX (Vollformat), CMOS-Sensor, 35,9 mm × 23,9 mm
Gesamtpixelzahl	46,89 Millionen, 8256 x 5504 Pixel 4.3µm
Verschlusstyp	Elektronisch gesteuerter, vertikal ablaufender mechanischer Schlitzverschluss, Verschluss mit elektronischem Vorhang, elektronischer Verschluss
Belichtungszeit	1/8000 s bis 30 s (Schrittweite: 1/3 oder 1/2 LW)
Messbereich	-3 bis +17 LW (ISO 100, Objektiv mit Lichtstärke 1:2,0, 20°C)
Kamera-Bildstabilisator	Sensor-Shift-VR (Bildstabilisator mit beweglichem Bildsensor)
Objektiv-Bildstabilisator	Bildstabilisator mit beweglicher Linsengruppe (mit VR-Objektiven, Verwacklungskompensation in 5 Achsen)
ISO Auswahl	ISO 64 bis 25600 in Schritten von 1/3 oder 1/2LW)
Abmessungen	(H x B x T) ca. 100,5 x 134 x 67,5mm
Gewicht	ca. 675g mit Akku und Speicherkarte, jedoch ohne Gehäusedeckel; ca. 585g (nur Kameragehäuse)
Temperaturbereich	0°C bis 40°C
Betriebsbedingungen – Luftfeuchtigkeit	< 85% (nicht kondensierend)

## 2.7.2 Nikon D4s

Objektiv Nikon Nikkor 50mm f/1.4 AF-S



Technische Daten:

Typ	SLR - Kamera
Bajonett	Nikon-F-Bajonett
Bildsensor	FX (Vollformat), CMOS-Sensor, 36 mm × 24 mm
Gesamtpixelzahl	16.2 Millionen, 4928 x 3280 Pixel 7.3µm
Verschlusstyp	vertikal ablaufender mechanischer Schlitzverschluss
Belichtungszeit	1/8000 s bis 30 s (Schrittweite: 1/3 oder 1/2 LW)
Messbereich	-3 bis +17 LW (ISO 100, Objektiv mit Lichtstärke 1:2,0, 20°C)
Kamera-Bildstabilisator	kein optischer Bildstabilisator
Objektiv-Bildstabilisator	Bildstabilisator mit beweglicher Linsengruppe (mit VR-Objektiven, Verwacklungskompensation in 5 Achsen)
ISO Auswahl	ISO 100 bis 25600 in Schritten von 1/3 oder 1/2LW)
Abmessungen	(H x B x T) ca. 160 x 157 x 91 mm
Gewicht	1.350 g (betriebsbereit)
Temperaturbereich	0°C bis 40°C
Betriebsbedingungen - Luftfeuchtigkeit	< 85% (nicht kondensierend) Spritzwasserschutz



## 2.7.3 Teledyne ProEM-HS1024BX3



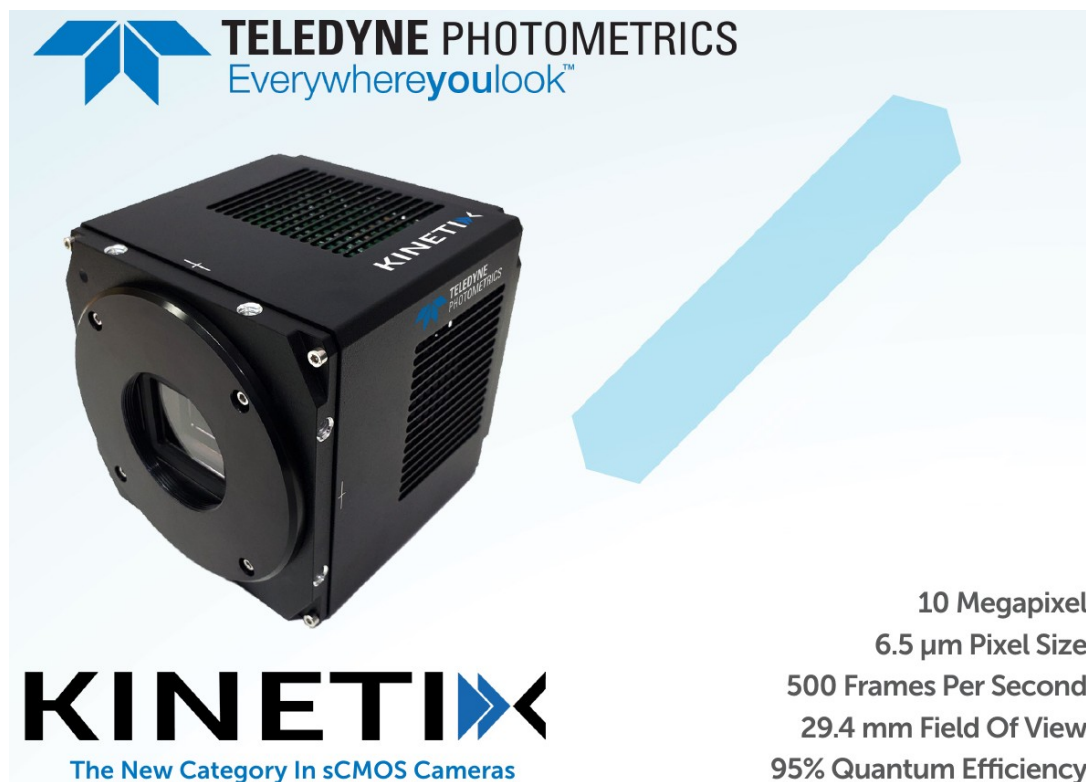
Part of the Teledyne Imaging Group



# ProEM<sup>®</sup>-HS:1024BX3

Model		ProEM-HS:1024BX3	
Sensor		Back-illuminated 1024 x 1024 eXcelon3 EMCCD, 13 x 13 μm pixels, 13.3 x 13.3 mm imaging area	
Shutter		25 mm shutter included	
ADC Speed		5, 10, 20, & 30 MHz (EM mode) 1 MHz & 100 KHz (Normal CCD mode)	
Read noise - EM mode (e <sup>-</sup> rms)		5 MHz                      30 e <sup>-</sup> (< 1 e <sup>-</sup> )* 10 MHz                    40 e <sup>-</sup> (< 1 e <sup>-</sup> )* 20 MHz                    80 e <sup>-</sup> (< 1 e <sup>-</sup> )* 30 MHz                    130 e <sup>-</sup> (< 1 e <sup>-</sup> )*	
* Effective read noise with on chip multiplication gain enabled.			
Read noise - Normal CCD mode (e <sup>-</sup> rms)		100 KHz                  3.5 e <sup>-</sup> 1 MHz                    4.0 e <sup>-</sup>	
Frame Rate		25 fps at 1Kx1K; >4,800 fps @ High Speed mode; >300,000 sps Spectra-Kinetics mode	
Linear full well - EM mode only		>500 ke <sup>-</sup> (output amplifier)	
Linear full well EM and normal CCD modes		80 ke <sup>-</sup> (single pixel)	
Deepest cooling temperature*	-55°C +/- 0.05°C (guaranteed) @ +20°C ambient; 10MHz ADC Maximum Cooling: -65°C (air), -65°C (+20°C liquid)		
Dark current	0.002 e <sup>-</sup> /p/sec (typical), 0.04 e <sup>-</sup> /p/sec (maximum) @ -55°C		
Vertical shift rate	700 nsec/row - 5 μsec/row (variable)		

## 2.7.4 Teledyne Kinetix



Specifications	Camera Performance
Sensor	Teledyne Photometrics Kinetix Sensor
Active Array Size	3200 x 3200 (10.24 Megapixel)
Pixel Area	6.5µm x 6.5µm (42.25µm²)
Sensor Area	20.8mm x 20.8mm 29.4mm diagonal
Peak QE%	>95%
Readout Mode	Rolling Shutter Effective Global Shutter <a href="#">Programmable Scan Mode</a>
Binning	2x2 Digital
Linearity	>99%
Cooling Options	Air Cooled Liquid Cooled

Camera Modes			
Specifications	Dynamic Range	Speed	Sensitivity (CMS)
Bit-Depth	16-bit	8-bit	12-bit
Frame Rate (Full Frame)	83 fps	500 fps	88 fps
Read Noise	1.6e <sup>-</sup>	2.0e <sup>-</sup>	1.2e <sup>-</sup>
Cooling	0° C	+5° C	0° C
Line Time	3.749 µsec/line (Dynamic Range)	0.625 µsec/line (Speed)	3.53125 µsec/line (Sensitivity)

## 2.7.5 Meinberg Lantime M1000

Der Meinberg Lantime M1000 stellt an Bord einen NTP-Service als eine einheitliche gemeinsame Zeitbasis für alle angeschlossenen Systeme zur Verfügung.



Es werden folgende Genauigkeitsoptionen angeboten:

(<https://www.meinberg.de/german/specs/gpsopt.htm>)

	TCXO	OCXO LQ	OCXO SQ	OCXO MQ	OCXO HQ	OCXO DHQ	Rubidium m (nur für 3 HE Gehäuse erhältlich )
<b>Kurzzeitstabilität (<math>\tau = 1</math> sec)</b>	$2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-11}$
<b>Genauigkeit des PPS (Sekundenimpuls)</b>	$< \pm 100$ nsec	$< \pm 100$ nsec	$< \pm 50$ nsec	$< \pm 50$ nsec	$< \pm 50$ nsec	$< \pm 50$ nsec	$< \pm 50$ nsec
<b>Phasenrauschen</b>	1Hz-60dBc/Hz 10Hz-90dBc/Hz 100Hz-120dBc/Hz 1kHz-130dBc/Hz	1Hz-60dBc/Hz 10Hz-90dBc/Hz 100Hz-120dBc/Hz 1kHz-130dBc/Hz	1Hz-70dBc/Hz 10Hz-105dBc/Hz 100Hz-125dBc/Hz 1kHz-140dBc/Hz	1Hz-75dBc/Hz 10Hz-110dBc/Hz 100Hz-130dBc/Hz 1kHz-140dBc/Hz	1Hz-85dBc/Hz 10Hz-115dBc/Hz 100Hz-130dBc/Hz 1kHz-140dBc/Hz	1Hz-80dBc/Hz 10Hz-110dBc/Hz 100Hz-125dBc/Hz 1kHz-135dBc/Hz	1Hz-75dBc/Hz 10Hz-89dBc/Hz 100Hz-128dBc/Hz 1kHz-140dBc/Hz

<b>Genauigkeit freilaufend, ein Tag</b>	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$ $\pm 1$ Hz (1)	$\pm 2 \cdot 10^{-8}$ $\pm 0.2$ Hz (1)	$\pm 5 \cdot 10^{-9}$ $\pm 50$ mHz (1)	$\pm 1.5 \cdot 10^{-9}$ $\pm 15$ mHz (1)	$\pm 5 \cdot 10^{-10}$ $\pm 5$ mHz (1)	$\pm 1 \cdot 10^{-10}$ $\pm 1$ mHz (1)	$\pm 2 \cdot 10^{-11}$ $\pm 0.2$ mHz (1)
<b>Genauigkeit freilaufend, 1 Jahr</b>	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$ $\pm 10$ Hz (1)	$\pm 4 \cdot 10^{-7}$ $\pm 4$ Hz (1)	$\pm 2 \cdot 10^{-7}$ $\pm 2$ Hz (1)	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$ $\pm 1$ Hz (1)	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ $\pm 0.5$ Hz (1)	$\pm 1 \cdot 10^{-8}$ $\pm 0.1$ Hz (1)	$\pm 5 \cdot 10^{-10}$ $\pm 5$ mHz (1)
<b>Genauigkeit GPS-synchron, 24h gemittelt</b>	$\pm 1 \cdot 10^{-11}$	$\pm 1 \cdot 10^{-11}$	$\pm 1 \cdot 10^{-11}$	$\pm 5 \cdot 10^{-12}$	$\pm 1 \cdot 10^{-12}$	$\pm 1 \cdot 10^{-12}$	$\pm 1 \cdot 10^{-12}$
<b>Genauigkeit der Zeit freilaufend, 1 Tag</b>	$\pm 4.3$ msec	$\pm 865$ $\mu$ s	$\pm 220$ $\mu$ s	$\pm 65$ $\mu$ s	$\pm 22$ $\mu$ s	$\pm 4.5$ $\mu$ s	$\pm 1.1$ $\mu$ s
<b>Genauigkeit der Zeit freilaufend, 7 Tage</b>	$\pm 128$ ms	$\pm 32$ ms	$\pm 9,2$ ms	$\pm 2,9$ ms	$\pm 1,0$ ms	$\pm 204$ $\mu$ s	$\pm 34$ $\mu$ s
<b>Genauigkeit der Zeit freilaufend, 30 Tage</b>	$\pm 1,1$ s	$\pm 330$ ms	$\pm 120$ ms	$\pm 44$ ms	$\pm 16$ ms	$\pm 3,3$ ms	$\pm 370$ $\mu$ s
<b>Genauigkeit der Zeit freilaufend, 1 Jahr</b>	$\pm 16$ s	$\pm 6.3$ s	$\pm 4.7$ s	$\pm 1.6$ s	$\pm 788$ ms	$\pm 158$ ms	$\pm 8$ ms
<b>Temperaturdrift freilaufend</b>	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$ (- 20...70°C)	$\pm 2 \cdot 10^{-7}$ (0...60°C)	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$ (- 10...70°C)	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ (- 20...70°C)	$\pm 1 \cdot 10^{-8}$ (5...70°C)	$\pm 2 \cdot 10^{-10}$ (5...70°C)	$\pm 6 \cdot 10^{-10}$ (- 25...70°C)

Note 1:

Die Genauigkeit in Hertz basiert auf der Normalfrequenz von 10MHz. Zum Beispiel: Genauigkeit des TCXO (freilaufend, ein Tag) ist  $\pm 1 \cdot 10^{-7} \cdot 10\text{MHz} = \pm 1$  HZ

### Ergebnis:

Für dieses Experiment wurde die OSXO-SQ Version gewählt. Mit dieser Wahl ist die zeitliche Genauigkeit von unter 1 [ms] ausreichend zur Berechnung einer Orts- bzw. Bodenauflösung von weit unter 1 [m].

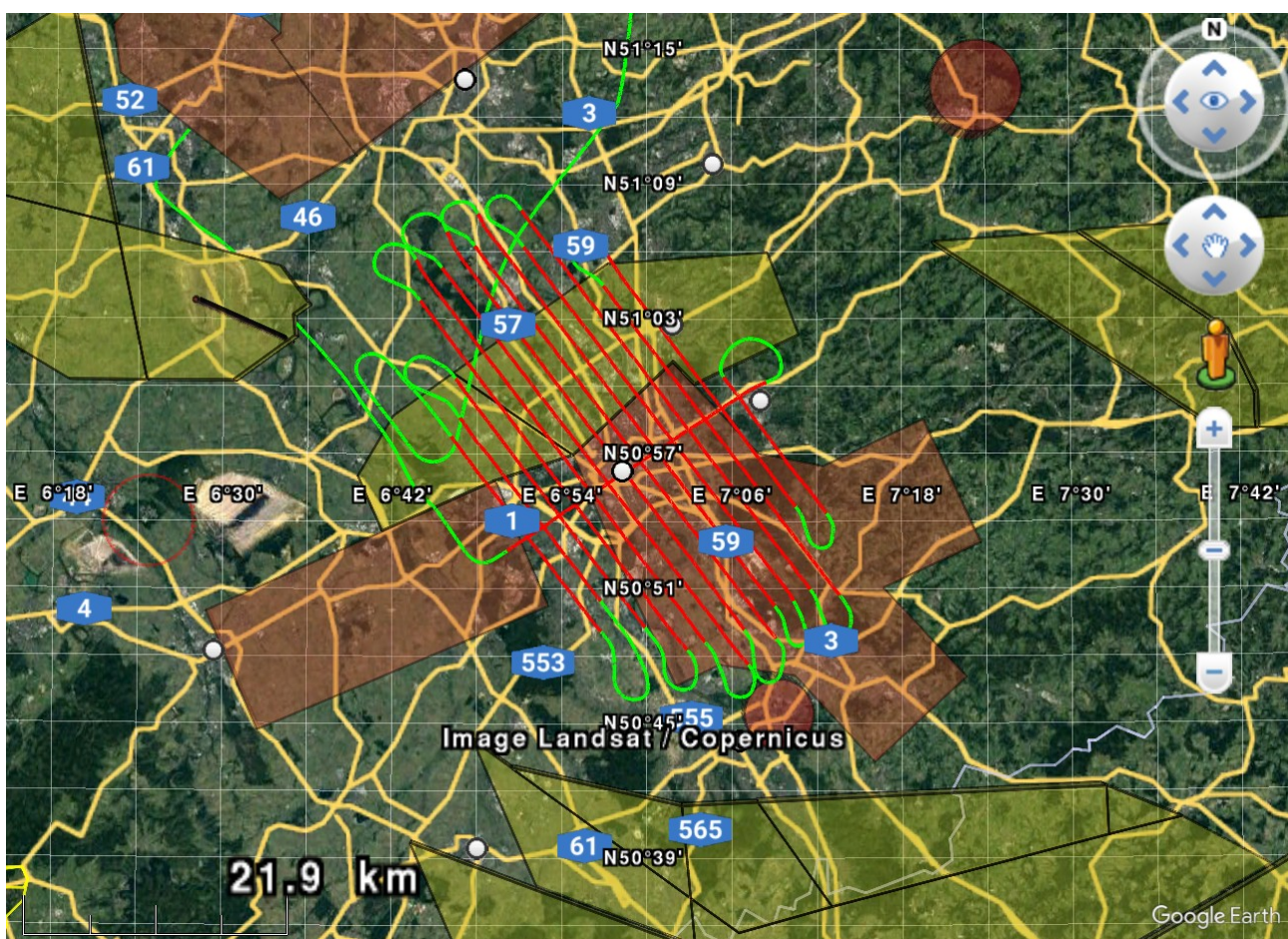


## 2.7.6 Labtops

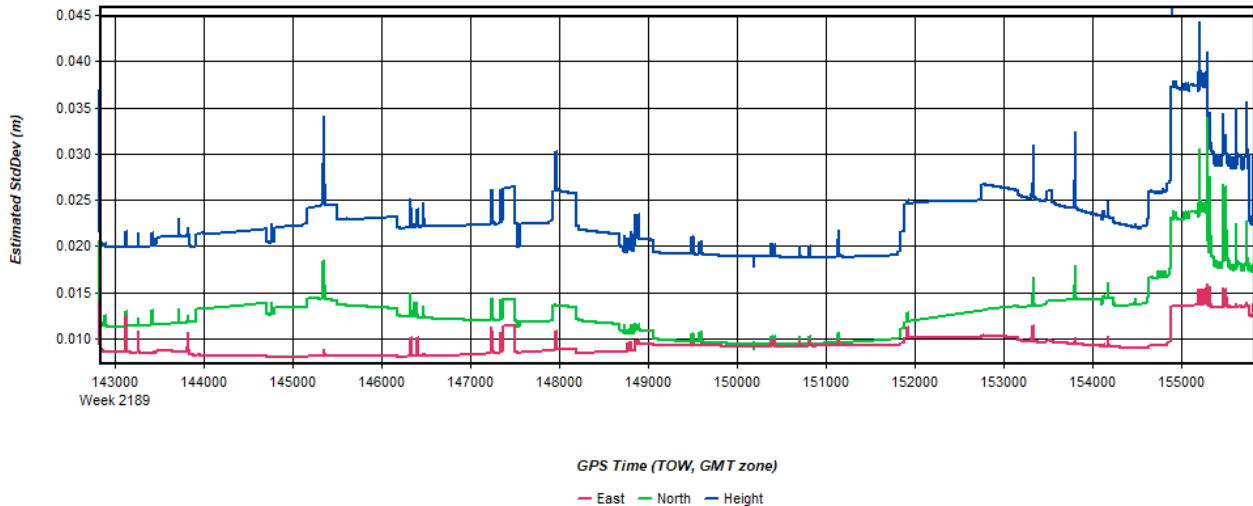
Standard Windows W11 Labtops.

## 2.7.7 IGI IMU (Inertial Measurement Unit)

Das IGI Inertialsystem CCNS4 wurde zur Erfassung der Navigations und Fluglagedaten genutzt. Die folgenden Grafiken geben eine Übersicht der erfassten Daten im Raum Köln.



**Abbildung 5:** Flug in Köln vom 20. Dez. 2021 (Overview KML shown with GoogleEarth)



**Abbildung 6:** Positionsgenauigkeit GPS-Position nach Postprocessing  
**Ergebnis:**

Die Positionsgenauigkeit der Flug navigationsdaten im Raum Köln wurde nach der “differential GPS” Prozessierung bzw. Korrektur mit unter 5 [cm] berechnet. Die Positions- und Fluglagedaten wurden mit 256 [Hz] aufgezeichnet.

### 2.7.8 Nikon Trigger Box

Die Nikon Trigger Box stellt ein optisch getrenntes Interface für die Steuersignale (Trigger In, Trigger Out, Serial GPS link) der RGB Kameras zur Verfügung. Dieses Interface wurde für dieses Projekt im Labor (LARSIA) der FUB entwickelt.

### 2.7.9 LTE Router

Der LTE-Router wurde vor und während des Fluges zur NTP Synchronisierung zu den Zeitservern der PTB genutzt. Damit konnte eine absolute Zeitbasis für die verschiedenen Computersysteme an Bord sichergestellt werden.

### 2.7.10 Rpi (Raspberry Pi serial link data acquisition)

Der Raspberry Pi diente zur Aufzeichnung der seriellen Ausgangsdatenströme des Meinberg NTP-Zeitserver. Die 3 seriellen Datenströme wurden über Konverter (RS-232 zu USB) als ASCII-dateien gespeichert.

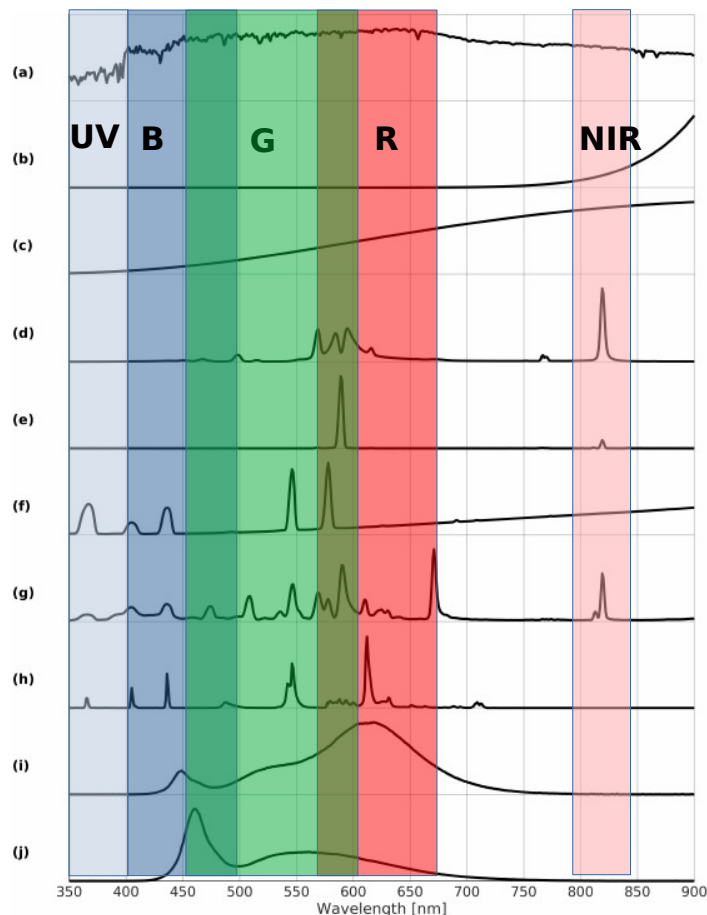
### 2.7.11 GPS G18x5Hz

Dieser GPS-Receiver stellte einen seriellen RS232-Datenstrom für die Nikon RGB-Kameras im Standard NMEA Format zur Verfügung.

### 3. Labormessungen und Ermittlung Einstellparameter

#### 3.1 Auswahl der Komponenten für den UV- und NIR-Bereich

Für dieses Projekt sollte der Spektralbereich der RGB-Kameras um den UV und NIR Bereich erweitert werden. Die folgende Grafik [Meester and Storch 2020] zeigt typische Emissionsspektren für verschiedene Lampentypen.



**Figure 2.** Typical normalized emission spectra by NOAA [17] and GUAIX [20] for different nighttime radiation sources (stacked offset for clarity): (a) cloud-free full moon; (b) fire, 700 K; (c) incandescent lamp; (d) high-pressure sodium lamp; (e) low-pressure sodium lamp; (f) mercury vapor lamp; (g) metal halide lamp; (h) fluorescent lamp; (i) warm-white LED lamp; (j) cold-white LED lamp.

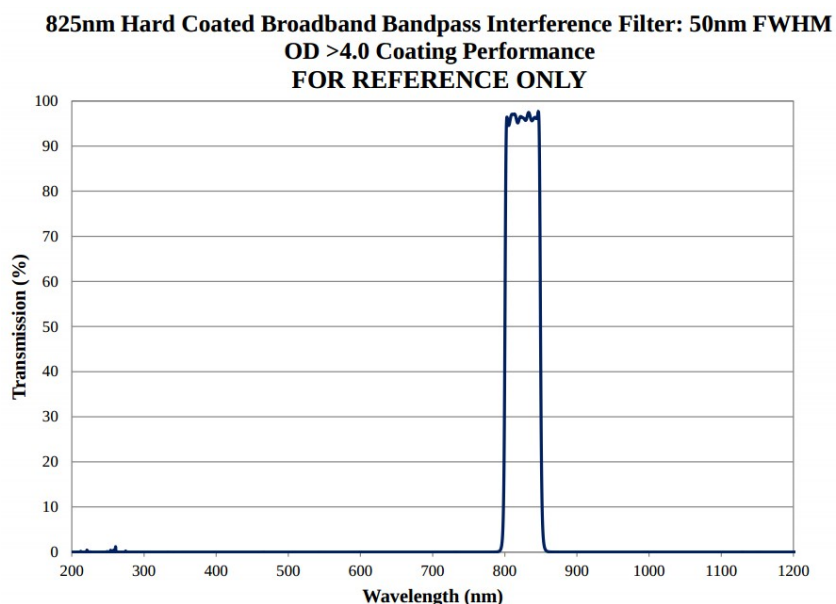
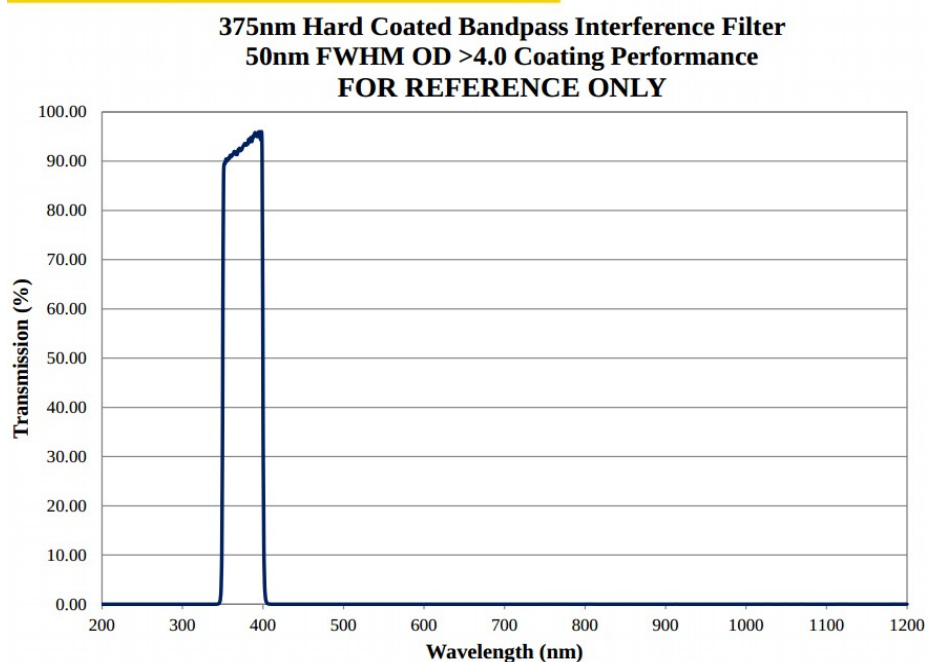
**Ergebnis:** Es wurden die folgenden Spektralkanäle ausgewählt, um die verschiedenen Lampentypen mit den entsprechenden spektralen Signaturen unterscheiden zu können:

UV: 350 – 400 nm

B: 400 – 500 nm, G: 450 – 600 nm, R: 575 – 675 nm

NIR: 800 – 850 nm

Die folgenden Grafiken zeigen die spektralen Verläufe der ausgewählten Interference Filter.



$OD4 = 10^{-4} = 1/10^4 = 0.0001 = 0.01\%$  light passing the Filter



### 3.2 Objektiv Spezifikationen

In diesem Projekt soll eine Bodenauflösung von 1 [m] mit der RGB-Kamera erreicht werden.

Nikon D4s	Nikon Z7
RGB-Kamera 50mm F1.4, 10ms	RGB-Weitwinkelkamera 20mm F1.8, 10 ms
<b>Image specification:</b> <b>4928 x 3280 pixel</b> ~ 0.44 x 1.00 m/pixel; => 10ms; FOV 2151 x 1436 m ~ 0.44 x 1.57 m/pixel; => 20ms; FOV 1979 x 1437 m	<b>Image specification:</b> <b>8256 x 5504 pixel</b> ~ 0.65 x 1.22 m/pixel; => 10ms; FOV 5383 x 3590 m ~ 0.65 x 1.78 m/pixel; => 20ms; FOV 5383 x 3590 m
<b>track distance:</b> <b>1506m with 30% overlap</b>	<b>track distance:</b> <b>3768 m with 30% overlap</b>
ProEM-HS1024BX3	Kinetix
UV-Lense 16mm F2.8, 40ms	NIR-Lense 24mm F1.8, 10ms
<b>Image size:</b> <b>1024 x 1024 pixel</b> ~ 2.43 x 4.7 m/pixel; => 40ms; FOV 2492 x 2495m ~ 2.43 x 3.0 m/pixel; => 10ms; FOV 2492 x 2493 m	<b>Image specification:</b> <b>3200 x 3200 pixel</b> ~ 0.81 x 3.08 m/pixel; => 40ms; FOV 2598 x 2601 m ~ 0.81 x 1.38 m/pixel; => 10ms; FOV 2598 x 2599 m
<b>track distance:</b> <b>1745m with 30% overlap</b>	<b>track distance:</b> <b>1819 m with 30% overlap</b>

#### Ergebnis:

Mit dem 50mm Objektiv für die Nikon D4s kann die geforderte Bodenauflösung von 1 [m] im spektralen RGB-Bereich erreicht werden. Daraus folgt ein Trassenabstand für die Flugplanung von ca 0,81 [nm] (1506 [m]) für eine Flughöhe von FL100 (3000 [m]), Geschwindigkeit 110 [kt] (204 [km/h]) und Belichtungszeit 10 [ms]. Für die Weitwinkelkamera Nikon Z7, im UV und NIR wird die Bodenauflösung erwartungsgemäß nicht erreicht. Im UV wurde eine 16mm Linse gewählt, da ansonsten mit einem noch geringeren Trassenabstand (1117 [m]) hätte geflogen werden müssen. Alle Angaben sind nur circa Werte, da diese sich während des Fluges leicht ändern können.

### 3.3 RGB-Kamera Spektralverlauf

**Example Nikon D5100 RGB-camera sensitivity curve**  
[\[http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.32.000381\]](http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.32.000381):

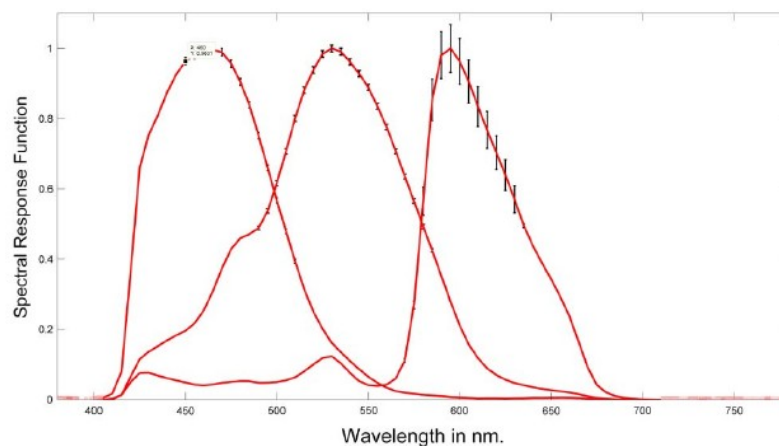
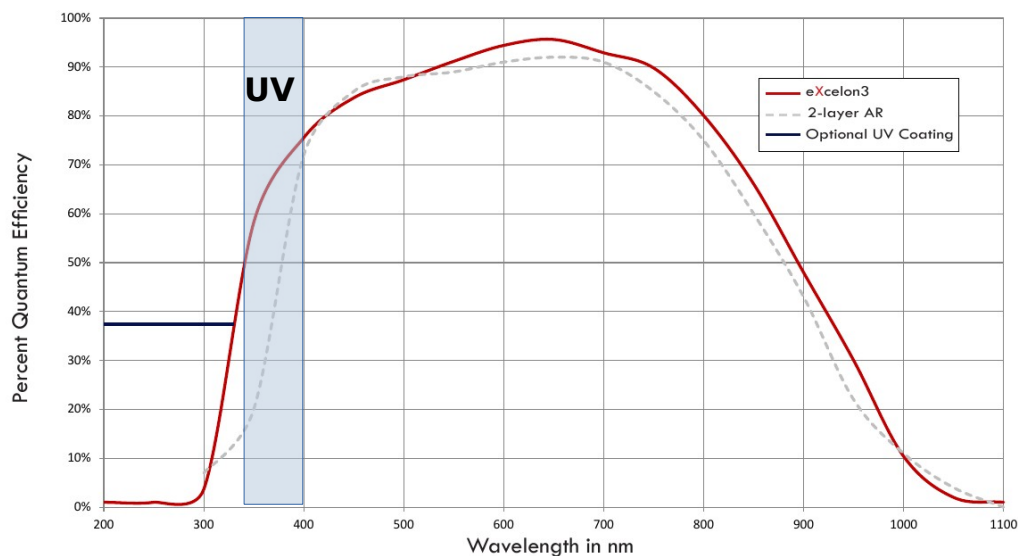


Fig. 4. Measured Nikon camera sensitivities from NPL calibration facility. Uncertainty levels over 0.5% are illustrated with black error bars across 450–650 nm.

### 3.4 UV-Kamera Spektralverlauf

Für den UV Bereich wurde die Kamera ProEM mit dem oben definierten UV Filter in der Eingangsoptik ausgerüstet. Die Kamera ProEM hat eine höhere Empfindlichkeit im UV, im Vergleich zur Kinetix.

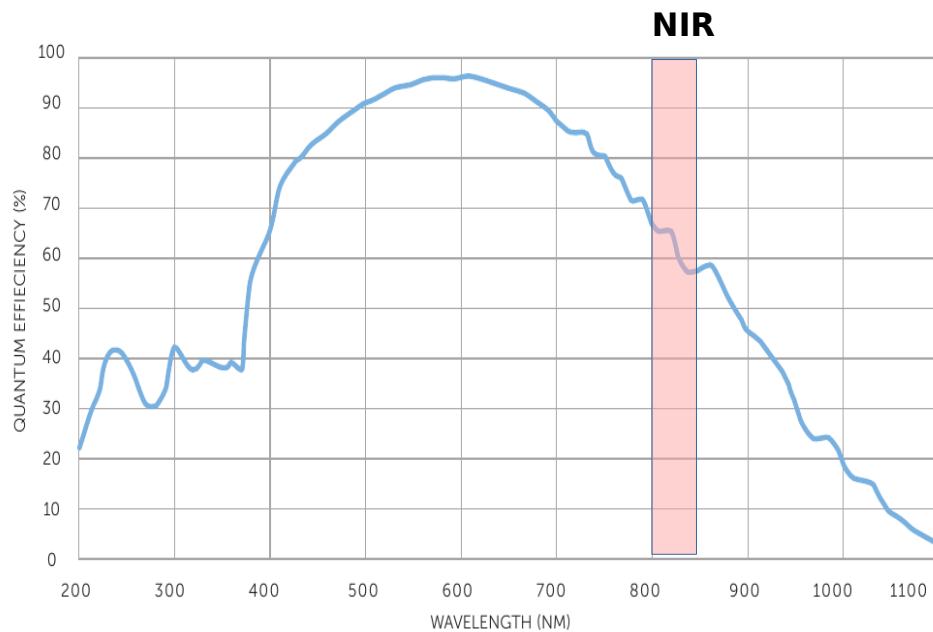


NOTE: Graph shows typical Quantum Efficiency (QE) data measured at + 25° C. Quantum Efficiency is a function of temperature and actual results will depend upon CCD temperature.



### 3.5 NIR-Kamera Spektralverlauf

Für den NIR-Bereich wurde die Kamera Kinetix mit dem oben definierten NIR Filter in der Eingangsoptik ausgerüstet.



### 3.6 Test UV und NIR Filter

Im folgenden werden die UV- und NIR Filter im Vergleich zur RGB-Kamera gezeigt:

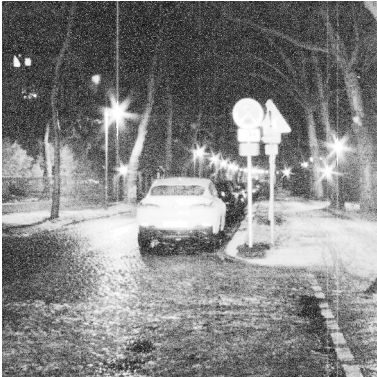
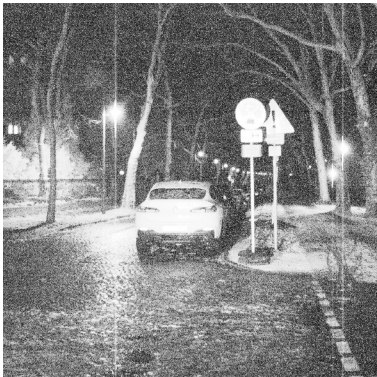
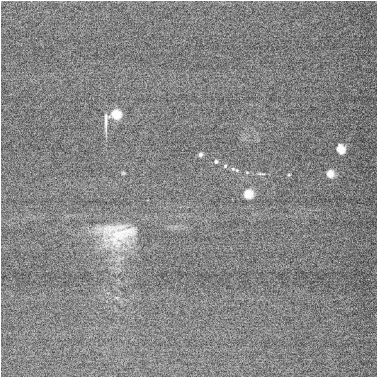


**Abbildung 7:** Daytime UV-Street lights @ Pückler Str. 3, Berlin (Iphone)



**Abbildung 8:** Nikon Z7 (ISO1600, F1.8, 200ms) Nighttime UV-Street lights @ Pückler Str. 3, Berlin

## ProEM-HS1024BX3, Nighttime UV-Street lights @ Pückler Str. 3, Berlin

		
No Filter	NIR-Filter	UV-Filter
EM=1, F16, 200ms	EM=1, F5.6, 200ms	EM=1, F2.8, 500ms
16bit 597-804 → 8bit	16bit 593-792 → 8bit	16bit 587-616 → 8bit

### Ergebnis:

Die 16bit Graustufen Bildaufnahmen wurden auf 8 bit skaliert, konvertiert und im Histogramm optimiert. Es zeigt sich, dass die Empfindlichkeit der ProEM-HS1024BX3 mit dem NIR-Filter im Vergleich zur RGB-Kamera (F1.8) bei gleicher Belichtungszeit und kleinerer Blendenöffnung (F5.6) ausreichend ist. Für den NIR-Filter würde die gleiche Blendenöffnung (F1.8) zu Übersteuerungen im Bild führen. Die Empfindlichkeit mit einem UV-Filter ist erwartungsgemäß geringer. Da als einziges verfügbares Objektiv für den UV-Bereich, nur ein C-Mount UV-Objektiv, mit 16mm Brennweite und einer Blendenöffnung von F2.8 verfügbar war, ist mit einem eingeschränkten Dynamikbereich im UV zu rechnen. Die erfassten Daten werden, voraussichtlich zur Detektion für die direkte Emission von Straßenlaternen ausreichen, aber insbesondere für die Auswertung der reflektierten Strahlung an Gebäuden und dem Erdboden nur eingeschränkt nutzbar sein.

### 3.7 Ermittlung Belichtung- und Kameraeinstellungen

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht von verschiedenen Lichtwerten (EV: Exposure Value). Daraus kann der Bereich ermittelt werden, der mit den Kameras abgebildet werden soll.

LW, EV (Exposure Value) [https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure\\_value](https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure_value)):

Exposure values (ISO 100)

Neonlichter und andere hell leuchtende Zeichen	9–10
Nachtsportarten	9
Brände und brennende Gebäude	9
Helle Straßenszenen	8
Nächtliche Straßenszenen und Schaufensterauslagen	7–8
Nächtlicher Fahrzeugverkehr	5
Jahrmärkte und Vergnügungsparks	7
Weihnachtsbaumbeleuchtungen	4–5
Beleuchtete Gebäude, Denkmäler und Springbrunnen	3–5
Weiter entfernte beleuchtete Gebäude	2

#### **Ergebnis 1:**

Aus den oben aufgeführten Lichtwerten ergibt sich ein Bereich von etwa EV: 2 bis 10. Da es bei vorhergehenden Flügen, außer den sehr dunklen Bereichen mit niedrigen Lichtwerten auch einzelnen Lampen mit direkter Abstrahlung nach oben gab, muß der Bereich nach oben erweitert werden. Dies kann durch Aufnahmen mit verschiedenen Blendenzahlen, die Einstellung der ISO Werte und der Variation der Belichtungszeit erreicht werden.



### Beispiel:

ISO100 → 3200, F1.8, F2.8, F5.6, t=20ms → 10ms Belichtungszeit

$EV_{100} = \log_2 (\#F^2 / t)$  mit F: F-Number (Blende) und t: Belichtungszeit [s]

F1.8	F2.8	F5.6
$\log_2(1.8^2 / 0.02)$	$\log_2(2.8^2 / 0.02)$	$\log_2(5.6^2 / 0.02)$
7.34	8.61	10.61
10ms		
$\log_2(1.8^2 / 0.01)$	$\log_2(2.8^2 / 0.01)$	$\log_2(5.6^2 / 0.01)$
8.33	9.62	11.61

**Ergebnis 2:** Die Halbierung der Belichtungszeit ergibt eine Erhöhung des Lichtwertes (LW, EV) um 1. Die Änderung der Blendenzahl von F1.8 auf F5.6 ergibt eine Erhöhung des Lichtwertes um ca 3.3.

Beispiel Konvertierung ISO Number: ISO100 → ISO3200:

$$EV_S = EV_{100} + \log_2 S/100$$

$$EV_{3200} = EV_{100} + \log_2 3200/100 = EV_{100} + 5.0$$

$$EV_{1600} = EV_{100} + \log_2 1600/100 = EV_{100} + 4.0$$

$$EV_{800} = EV_{100} + \log_2 800/100 = EV_{100} + 3.0$$

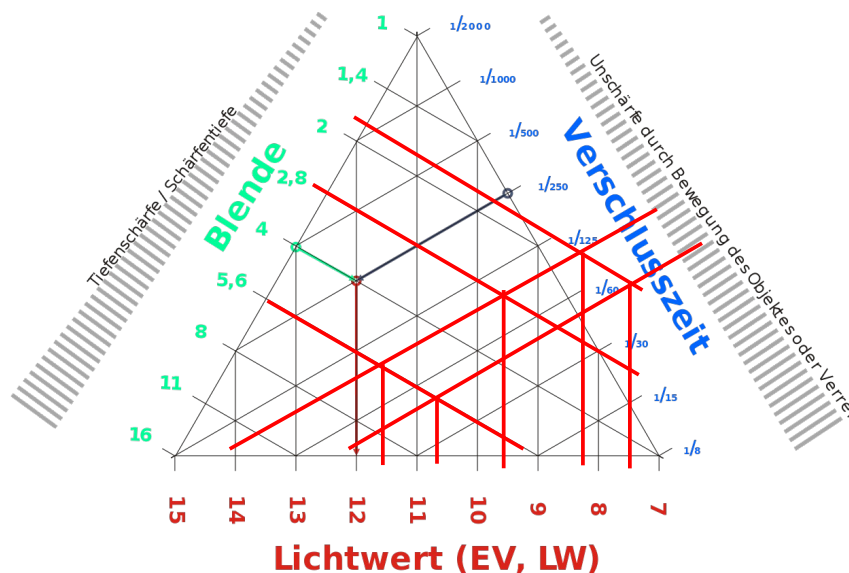
Exposure value vs. luminance (ISO 100, K= 12.5) and illuminance (ISO 100, C = 250)

([https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure\\_value](https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure_value))

EV <sub>3200</sub>	EV <sub>1600</sub>	EV <sub>800</sub>	EV <sub>100</sub>	Luminance		Illuminance
				cd/m <sup>2</sup>	FL	lx
1	0	-1	-4	0.008	0.0023	0.156
2	1	0	-3	0.016	0.0046	0.313
3	2	1	-2	0.031	0.0091	0.625
4	3	2	-1	0.063	0.018	1.25
5	4	3	0	0.125	0.036	2.5
6	5	4	1	0.25	0.073	5
7	6	5	2	0.5	0.146	10
8	7	6	3	1	0.292	20
9	8	7	4	2	0.584	40


10	9	8	5	4	1.17	80
11	10	9	6	8	2.33	160
12	11	10	7	16	4.67	320
13	12	11	8	32	9.34	640
16	13	12	9	64	18.7	1280
15	14	13	10	128	37.4	2560
16	15	14	11	256	74.7	5120
17	16	15	12	512	149	10,240
18	17	16	13	1024	299	20,480
19	18	17	14	2048	598	40,960
20	19	18	15	4096	1195	81,920
21	20	19	16	8192	2391	163,840

**Ergebnis 3:** Eine Verdoppelung der ISO-Zahl (100 → 200) entspricht einer Verdoppelung der Lichtempfindlichkeit. Bei gleicher Blende entspricht dies der halben Belichtungszeit für eine korrekte Belichtung. Die Erhöhung des ISO-Wertes von 100 auf 3200 ergibt z.B. eine Erhöhung der Lichtwertes (LW, EV) um 5. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Belichtungseinstellungen.




**Abbildung 9:** Belichtungseinstellungen  
(<https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtwert>)



	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 33/127

Es wird eine Einstellung der RGB-Kameras erfolgen, die mit 3 verschiedenen Blendenöffnungen eine hohe dynamische Abdeckung der zu erwartenden Lichtemissionen abdeckt. Bei den Testflügen in Potsdam (10+20ms, ISO1600 & ISO3200, F1.8(1.4 Z7), F2.8, F5.6) und Berlin (10 ms, ISO3200, F1.8(1.4 Z7), F2.8, F5.6) wurden verschiedene Settings getestet.

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 34/127


## 3.8 Labormessungen

### 3.8.1 Zoom Vergleich D4s und Z7

Im folgenden wird grober Vergleich des Zoom der beiden Kameras Nikon D4s und der Z7 untersucht. Die Z7 ist dabei mit einem 20mm Weitwinkelobjektiv und die D4s mit einem lichtstarken Standardobjektiv 50mm ausgerüstet.

Auswertung der Untersuchungen siehe Ground level Tests (20210308, 20210313) Seite 108.

**Ergebnis:** Beide Kameras erreichen am Tage ähnliche Ergebnisse. Bei Dunkelheit zeigt die Z7, aufgrund des Weitwinkelobjektivs und der geringeren Pixelgröße der Detektoreinheit (D4s 7.3µm; Z7 4.3µm) geringfügig schlechtere Ergebnisse bei der Schärfe im Zoom und dem Rauschverhalten. Die Auswahl beider Kameras ist mit den gewählten Objektiven für diesen Anwendungsfall und Projekt geeignet.

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 35/127

### 3.8.2 Test Zeiterfassung

Die Zeiterfassung der einzelnen Aufnahmezeitpunkte ist ein essentieller Teil für die eindeutige Zuordnung der Navigationsinformation und der Lagedaten zu den jeweiligen Bilddaten. Für dieses Projekt wurde dazu ein NTP-Server (Meinberg IMS Lantime 1000) genutzt und mit den jeweiligen Triggersignalen der einzelnen Kameras verbunden. Der NTP-Server war über ein LTE Modem auch während der Flüge mit externen NTP-Zeitservern der PTB verbunden. Zusätzlich war dieser mit einem eigenem GPS-Receiver (IMS-CLK GNS181-SQ) synchronisiert. Die Zeitgenauigkeit wird freilaufend für das OCXO-SQ Modul mit  $\pm 220\mu\text{s}$  für einen Tag angegeben und die des PPS Signals mit  $\pm 50\text{ns}$ .

Auswertung siehe Anhang Timing Test (20210319) Seite 106.

#### **Ergebnis:**

Dieser Versuch hat ergeben, dass die beiden RGB-Kameras ca 300 [ms] Verzögerung zum Aufnahmesignal aufweisen. Die ProEM und Kinetix haben i.d.R. nur wenige  $\mu\text{s}$  Verzögerung. Der Unterschied des Meinberg PPS-Signals und dem IGI Inertialsystem CCNS4 PPS liegt unter 100 [ns]. Davon ausgehend, dass eine Ortsgenauigkeit von  $<1$  [m] erreicht werden soll, sind die sich ergebenden Genauigkeiten in jeden Fall ausreichend.

### 3.8.3 Hot- und Bad Pixel

Die für den sichtbaren Spektralbereich verwendeten Sensoren Nikon D4s und Z7, sollten im Normalfall über den gesamten Detektorbereich einen proportional mit der Belichtungszeit steigenden Dunkelstrom Offset (DC) aufweisen. Dies gilt für die heute kommerziell eingesetzten Sensoren i.d.R nicht für alle Pixel. Einige Pixel weisen einen weitaus höheren Dunkelstrom auf und werden daher Hot- oder Bad Pixel genannt. Dieser Effekt kann mit verschiedenen Verfahren weitestgehend korrigiert werden [Celestre 2016]. Für die Analyse wurden die Daten zunächst in ein TIFF Format konvertiert. Dabei ist zu beachten, dass dabei das Nikon NEF Rohdatenformat (RGGB) in ein RGB-Tiff Format demosaiced wurde. Aufgrund der dabei zu verwendeten Python Einlese-Routinen kann dies zur Zeit nur für demosaiced NEF Dateien im RGB-Format erfolgen.

#### **Datenanalyse Z7:**

Es wurden am 29. Aug. 2022 für die Z7 insgesamt 57 Dunkelstrommessungen mit Kameraabdeckung und ohne Lichteinfall durchgeführt und die folgenden Werte ermittelt:

604598 Hot Pixel einheitlich für alle 57 Aufnahmen

unkorrigierte Werte:

RED: 0 Overall Mean: 0007.057 | Std:012.521 | Var: 0158.894 | Min: 0000.000 | Max: 15643.702

GREEN: 1 Overall Mean: 0001.888 | Std:004.424 | Var: 0019.758 | Min: 0000.000 | Max: 5903.561

BLUE: 2 Overall Mean: 0003.921 | Std:006.670 | Var: 0044.751 | Min: 0000.000 | Max: 5347.175

Korrigierte Werte:

RED: 0 Overall Mean: 0006.993 | Std:010.808 | Var: 0118.182 | Min: 0000.000 | Max: 0519.842

GREEN: 1 Overall Mean: 0001.874 | Std:003.604 | Var: 0012.989 | Min: 0000.000 | Max: 0147.088

BLUE: 2 Overall Mean: 0003.894 | Std:006.183 | Var: 0038.393 | Min: 0000.000 | Max: 0280.526

### ***Datenanalyse D4s:***

Es wurden am 29. Aug. 2022 für die D4s insgesamt 94 Dunkelstrommessungen mit Kameraabdeckung und ohne Lichteinfall durchgeführt und die folgenden Werte ermittelt:

Es wurden 281142 Hot Pixel einheitlich für alle 94 Aufnahmen ermittelt. Die gemessenen Werte wurden in 16bit Integer umgerechnet und die jeweiligen statistischen Werte ermittelt.

unkorrigierte Werte:

RED: 0 Overall Mean: 0017.801 | Std:018.270 | Var: 0339.803 | Min: 0000.000 | Max: 1726.883

GREEN: 1 Overall Mean: 0004.133 | Std:005.753 | Var: 0033.441 | Min: 0000.000 | Max: 1185.191

BLUE: 2 Overall Mean: 0008.362 | Std:009.210 | Var: 0085.546 | Min: 0000.000 | Max: 0859.415

Korrigierte Werte:

RED: 0 Overall Mean: 0017.705 | Std:018.158 | Var: 0335.691 | Min: 0000.000 | Max: 0468.298

GREEN: 1 Overall Mean: 0004.114 | Std:005.710 | Var: 0032.942 | Min: 0000.000 | Max: 0144.394

BLUE: 2 Overall Mean: 0008.310 | Std:009.161 | Var: 0084.640 | Min: 0000.000 | Max: 0215.394


### ***Datenanalyse Kinetix:***

Es wurden am 29. Aug. 2022 für die Kinetix insgesamt 50 Dunkelstrommessungen mit Kameraabdeckung und ohne Lichteinfall durchgeführt und die folgenden Werte ermittelt:

BW: Overall Mean: 0098.745 | Std:007.567 | Var: 0057.260 | Min: 0043.760 | Max: 0152.000

==> keine relevanten Hot Pixel

### ***Datenanalyse ProEM:***

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 38/127

Es wurden am 29. Aug. 2022 für die ProEM insgesamt 100 Dunkelstrommessungen mit Kameraabdeckung und ohne Lichteinfall durchgeführt und die folgenden Werte ermittelt:

BW: Overall Mean: 0565.701 | Std:021.620 | Var: 0467.427 | Min: 0466.140 | Max: 0707.500

==> keine relevanten Hot Pixel

### **Ergebnis:**

Die beiden wissenschaftlichen Kameras ProEM und Kinetix weisen nur eine geringe Variation in den berechneten statistischen Werten auf und somit kann auf die Korrektur der Hot-Pixel für diese beiden zunächst verzichtet werden. Die Nikon D4s hat zwar eine größere Anzahl von Hot-Pixel, aber der Maximalwert der erkannten Pixel liegt noch im unteren Bereich. Die Nikon Z7 hat eine wesentlich höhere Bildauflösung und verglichen zur D4s eine ähnliche hohe Anzahl von erkannten Hot-Pixel pro Anzahl von Sensoren, aber die Maximalwerte liegen insbesondere im roten Spektralbereich höher. Eine Korrektur könnte in zukünftigen Anwendungen näher betrachtet werden. Für dieses Projekt wurde, um den Einfluß auf die Originaldaten möglichst gering zu halten, auf die Korrektur der Hot- und Badpixel verzichtet.

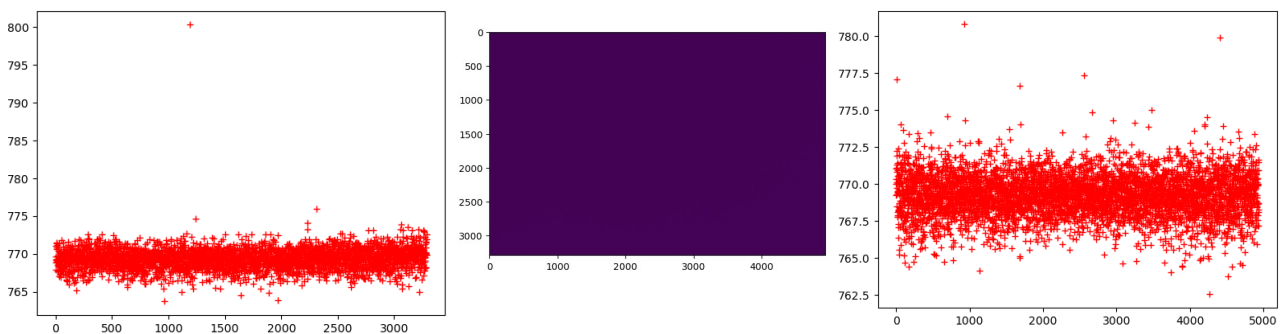


### 3.8.4 Offset (Bias)

Der Offset der Kameras wurde für jedes Pixel einzeln, als Mittelwert aus mehreren Aufnahmen berechnet (float 32bit) und in einem PGM-File und Tiff-File, zur Nutzung bei der späteren Korrektur der Bilddaten gespeichert. In den nächsten Abbildungen sieht man in der Mitte, das gemittelte Image der Offset-Messung und jeweils rechts und links ein vertikaler und horizontaler Schnitt abgebildet.

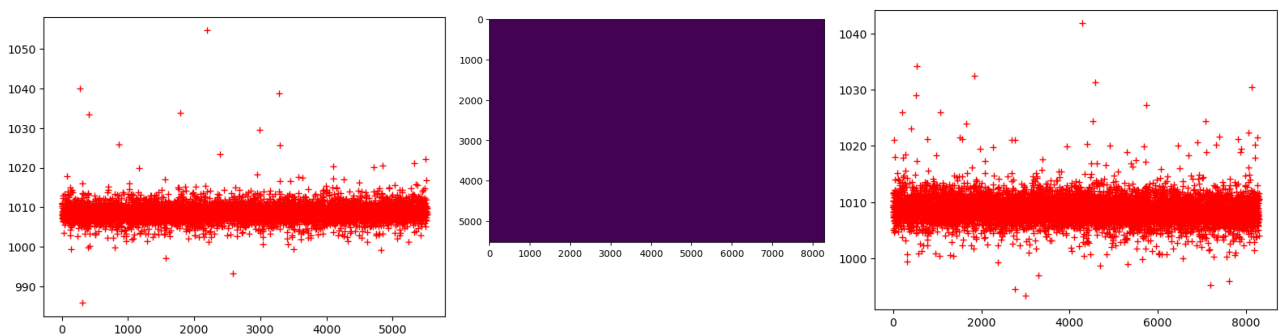
#### ***Nikon D4s (27 Aufnahmen von 20221115):***

Mean: 769.2602 Std: 1.9330492 Var: 3.736679 Min: 752.4815 Max: 4374.037



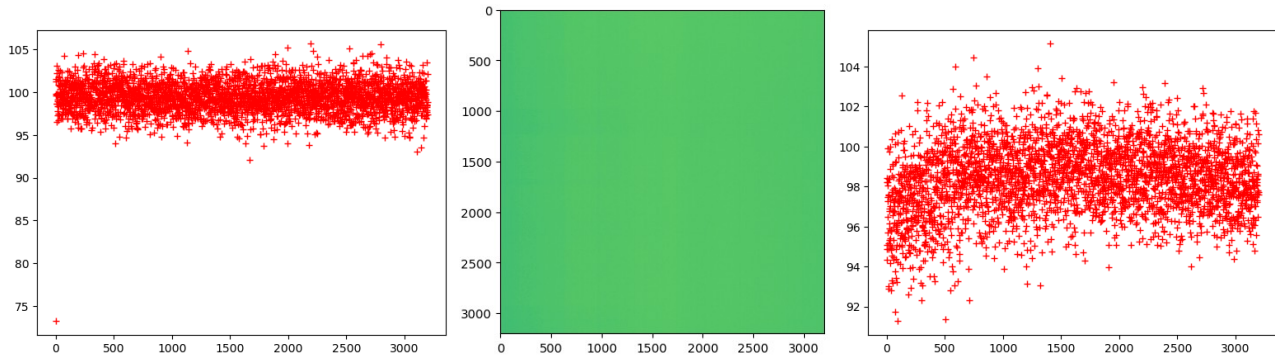
#### ***Nikon Z7 Bias (27 Aufnahmen von 20221115):***

Mean: 1008.6589 Std: 6.9272656 Var: 47.98701 Min: 931.85187 Max: 14537.63



### ***Kinetix (50 Aufnahmen von 20220829):***

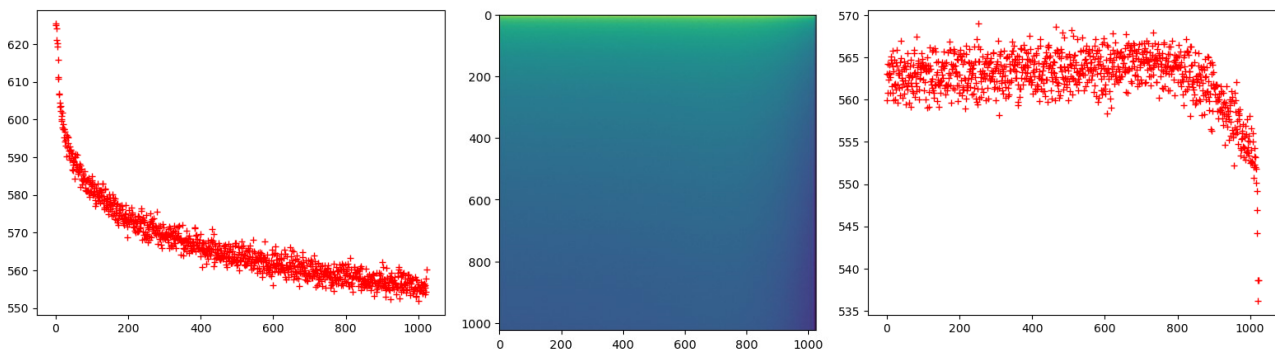
Mean: 98.7448 Std: 1.8269337 Var: 3.337687 Min: 55.14 Max: 114.98



### ***ProEM-HS1024BX3 (100 Aufnahmen von 20220829):***

Der Dunkelstrom hat, aufgrund des Auslesevorgangs, für diese Kamera eine besondere Charakteristik. Es wurden insgesamt 100 Aufnahmen aufgenommen und für jedes Pixel ein Mittelwert berechnet.

Mean: 565.7003 Std: 11.447017 Var: 131.0342 Min: 525.46 Max: 631.33



### 3.8.5 Linearität

Die Linearität der Nikon D4s wurde schon in vorhergehenden Messungen untersucht und bestimmt. Davon ausgehend werden für die anderen Kameras ähnliche Ergebnisse erwartet. Für die ProEM und Kinetix wurde daher die Untersuchung der Linearität nicht durchgeführt.

#### Ergebnisse Nikon D4s:

f1.8: (Slope, intercept, rval, pval, stderr, slerr)

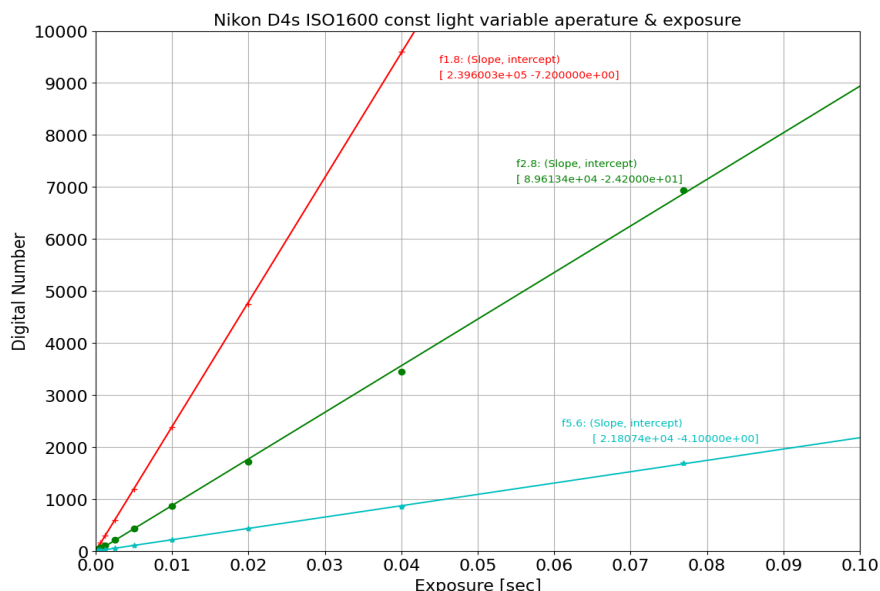
[ 2.39600e+05 -7.2000e+00 1.00000e+00 0.00000e+00 6.415000e+02]

f2.8: (Slope, intercept, rval, pval, stderr, slerr)

[ 8.96134e+04 -2.42000e+01 1.00000e+00 0.00000e+00 7.63900e+02]

f5.6: (Slope, intercept, rval, pval, stderr, slerr)

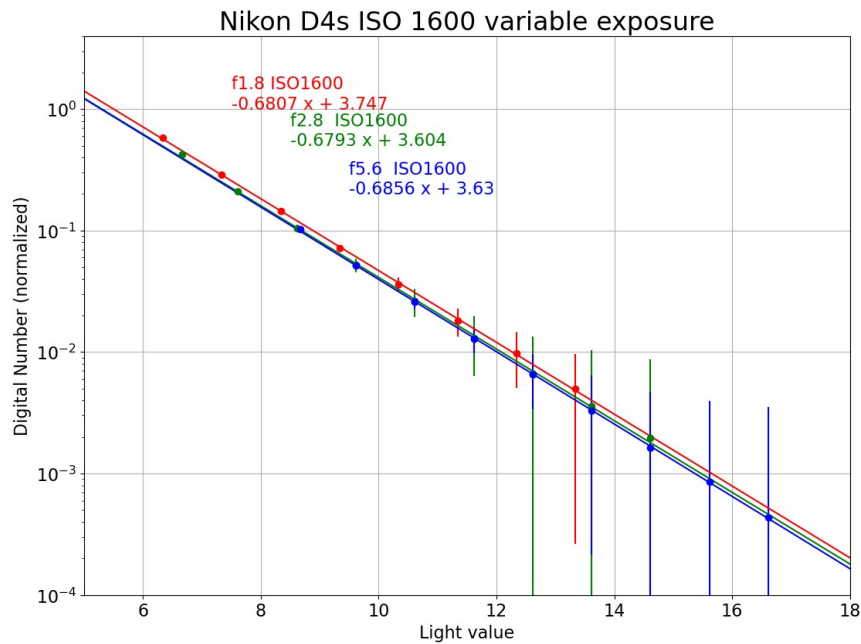
[ 2.18074e+04 -4.10000e+00 1.00000e+00 0.00000e+00 1.49300e+02]



**Abbildung 10:** Linearitätsmessungen Nikon D4s (F1.8 - F5.6 ISO1600)

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:

$$LV = \log_2 \left[ \frac{f_{\text{number}}^2}{\text{exposure time}} + \frac{100}{\text{ISO}} \right]$$



**Abbildung 11:** Linearitätsmessungen D4s

$\log(y(x)) = \text{slope } x + \text{intercept}$

slope    intercept    r\_value    p\_value    std\_err

f1.8 ISO1600: -0.68071    3.74741    -0.99986    0.00000    0.00472

f2.8 ISO1600: -0.67926    3.60395    -0.99965    0.00000    0.00675

f5.6 ISO1600: -0.68562    3.62955    -0.99993    0.00000    0.0031

## Ergebnisse Nikon Z7:

f1.8: (Slope, intercept, rval, pval, stderr, slerr)

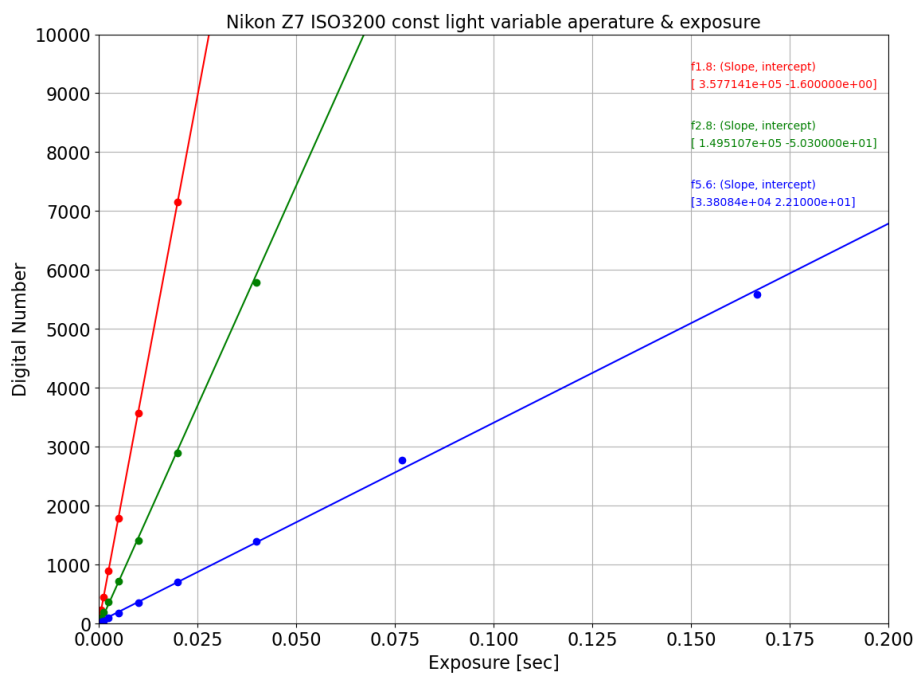
[ 3.57714e+05 -1.60000e+00 1.00000e+00 0.00000e+00 3.62700e+02]

f2.8: (Slope, intercept, rval, pval, stderr, slerr)

[ 1.49510e+05 -5.03000e+01 1.00000e+00 0.00000e+00 1.14220e+03]

f5.6: (Slope, intercept, rval, pval, stderr, slerr)

[3.38084e+04 2.21000e+01 1.00000e+00 0.00000e+00 4.11200e+02]



**Abbildung 12:** Linearitätsmessungen Nikon Z7 (F1.8 - F5.6 ISO1600)

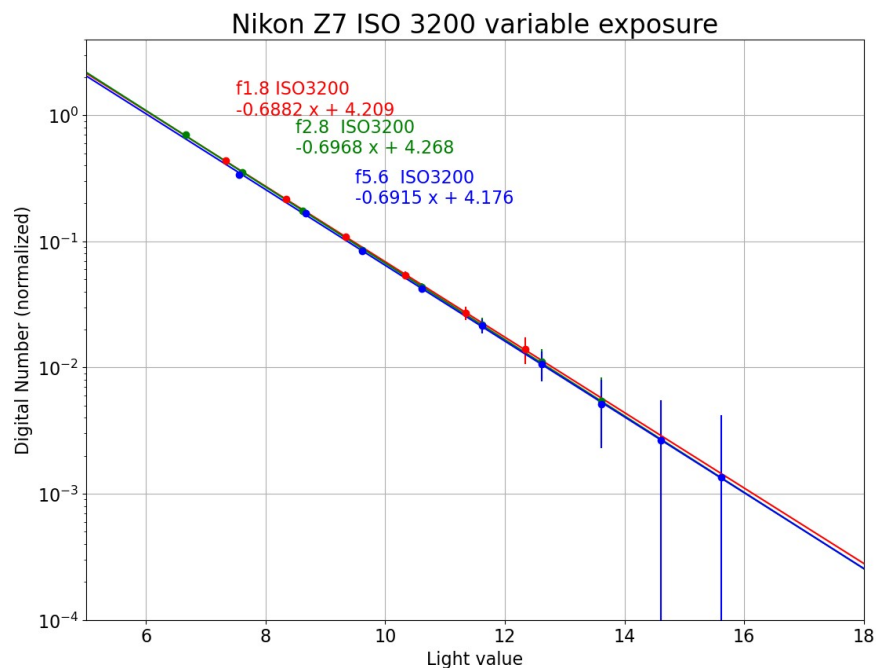
$\log(y(x)) = \text{slope } x + \text{intercept}$

slope    intercept    r\_value    p\_value    std\_err

f1.8 ISO3200: -0.68821    4.20894    -0.99995    0.00000    0.00338

f2.8 ISO3200: -0.69682    4.26838    -0.99995    0.00000    0.00292

f5.6 ISO3200: -0.69147    4.17599    -0.99994    0.00000    0.00285



**Abbildung 13:** Linearitätsmessung Nikon Z7 (F1.8-F5.6 ISO1600) mit variabler Belichtungszeit



### 3.8.6 Barrel distortion

Die Kissenverzerrung der Nikon Kameras ist auch ohne Korrektur sehr gering. Es wurden schon in vorhergehenden Projekten folgende Werte für die Nikon D4s im Labor ermittelt und die Aufnahmen entsprechend korrigiert (Beispiel unteres Bild links).

Ermittelter Fehler Berechnung Verzerrungsfehler:  $RMS = 4.59991413116$

Ermittelte Kamera-Matrix:

$$CM = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

CM =

$$\begin{bmatrix} 3.17274823e+04 & 0.00000000e+00 & 1.74754564e+03 \\ 0.00000000e+00 & 3.17476430e+04 & 2.41782510e+03 \\ 0.00000000e+00 & 0.00000000e+00 & 1.00000000e+00 \end{bmatrix}$$

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]])]

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

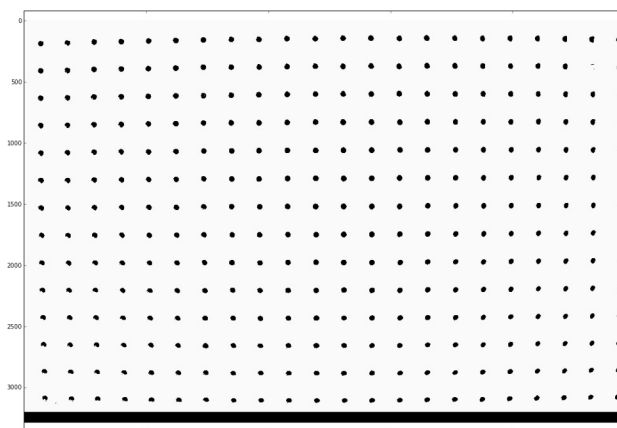
$$x_{corrected} = x + [2 p_1 xy + p_2 (r^2 + 2 x^2)]$$

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

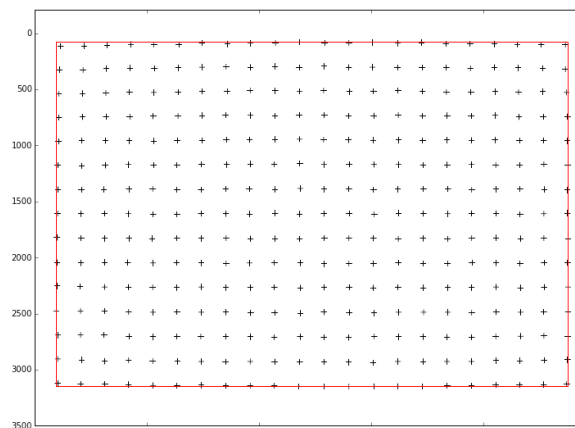
$$y_{corrected} = y + [p_1 (r^2 + 2 y^2) + 2 p_2 xy]$$

## Beispielbilder für die Korrektur der Kissenverzerrung

### Nikon D4s:

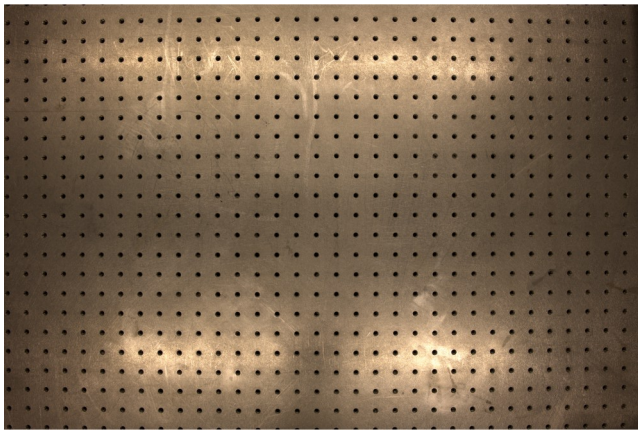


**Abbildung 14:** Beispiel Korrektur von SW-Bild

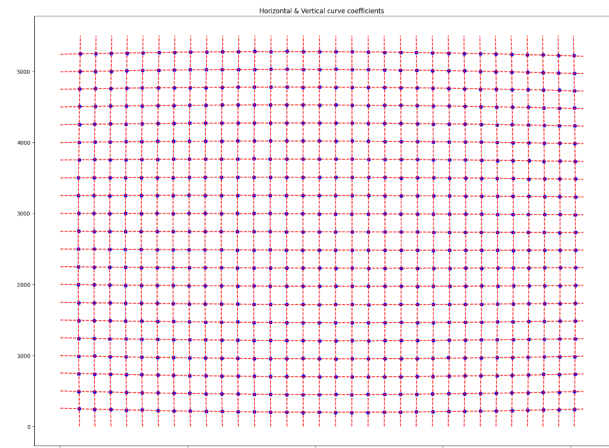


**Abbildung 15:** Beispiel Korrektur mit zusätzlichen roten Hilfslinien

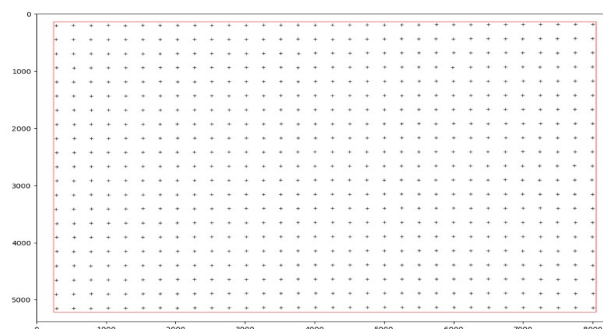
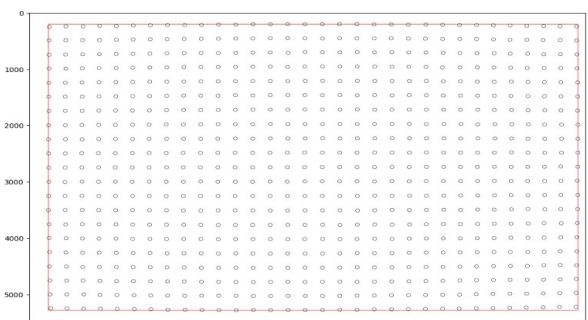
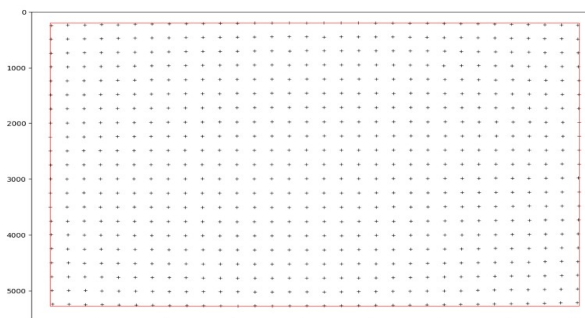
## Nikon Z7:



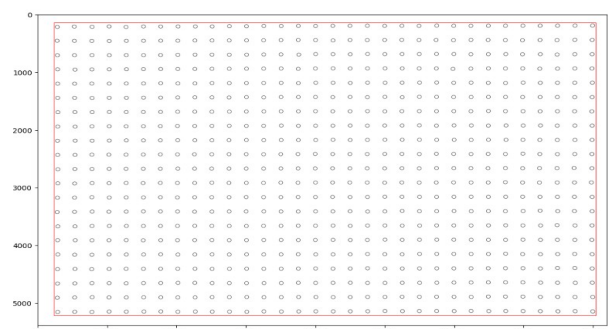
**Abbildung 16:** Beispiel Bild Nikon Z7 vor Korrektur




**Abbildung 17:** Beispiel Bild Nikon Z7 mit ermittelter Kissenverzerrung



**Abbildung 18:** Beispielbild Nikon Z7 mit und ohne Kissenverzerrung



**Abbildung 19:** Beispielbild Nikon Z7 mit und ohne Kissenverzerrung

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 48/127

Camera Matrix:	Distortion Parameter:
Mtx = [[4.47411875e+03 0.00000000e+00 4.12225361e+03] [0.00000000e+00 4.46934113e+03 2.74565533e+03] [0.00000000e+00 0.00000000e+00 1.00000000e+00]]	Dist = [[-0.025, 0.0, -0.0015, -0.00152, 0.001 ]]

### 3.8.7 Vignetting

Die Korrektur des Vigneting wurde aus vorhergehenden Untersuchungen übernommen. Für die Nikon Z7 wurde diese neu berechnet.

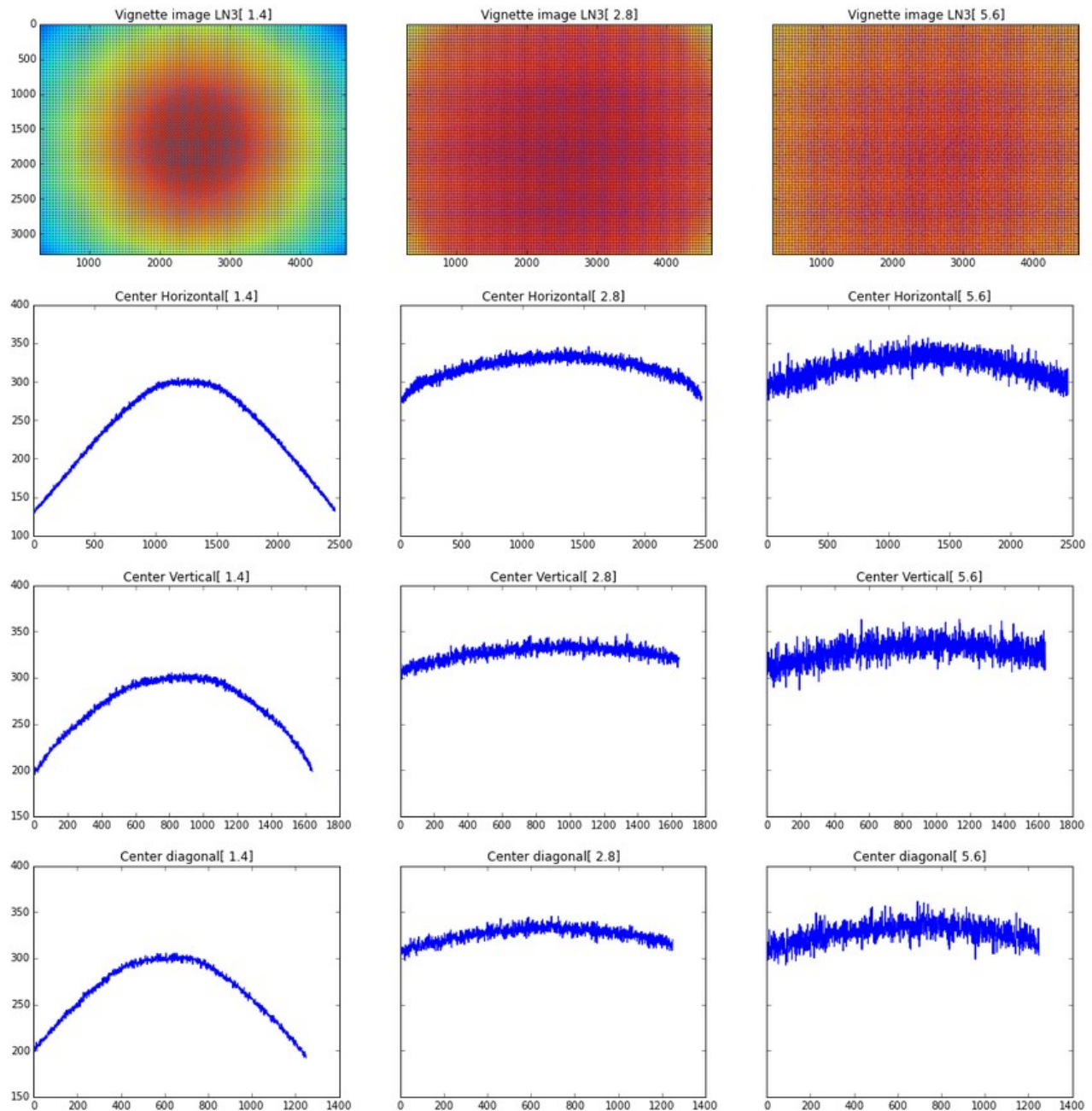


Abbildung 20: Beispiel für Vigneting Nikon D4s



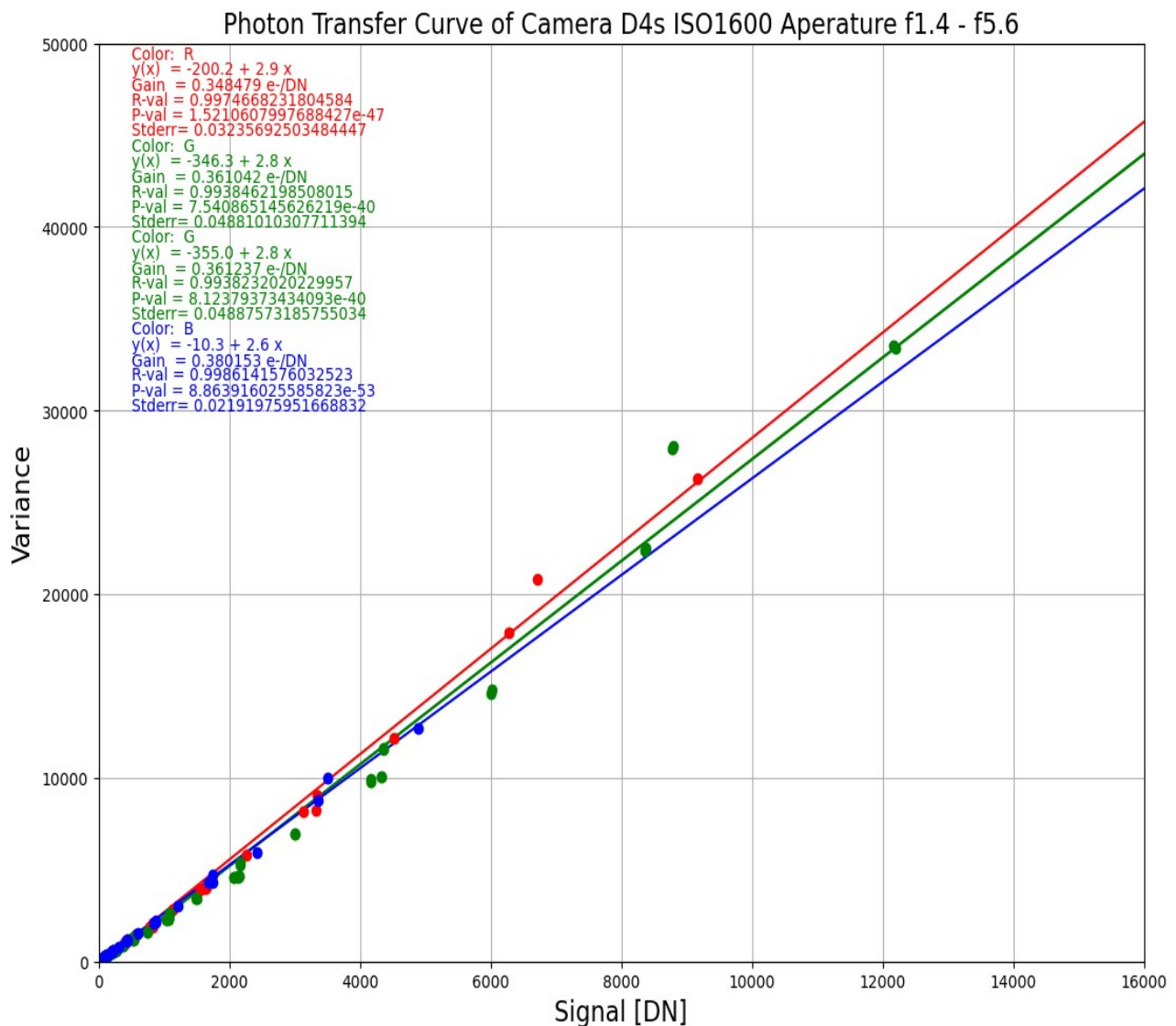
### 3.8.8 Spektrale Empfindlichkeit

Siehe dazu 3.3 , 3.4 , 3.5 . Es wurden im Labor keine weiteren Messungen zur spektralen Empfindlichkeit durchgeführt.

### 3.8.9 Photon Transfer Curve

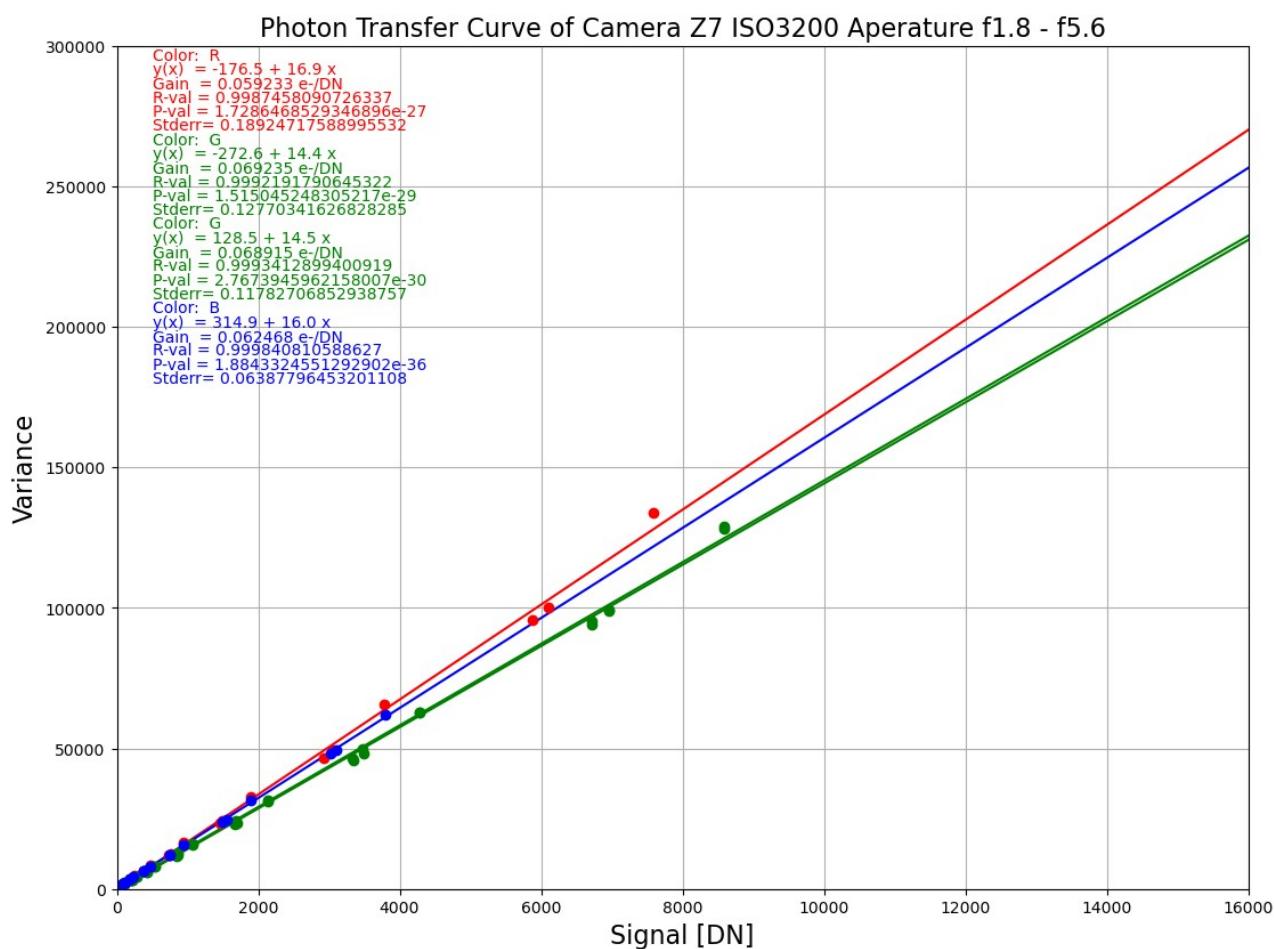
Die Aufnahmen der Nikon Kameras wurde für die folgenden Kurven zunächst mit den zuvor errechneten Offsetwerten für jedes Pixel korrigiert und nach den jeweiligen Farben der Bayer-Matrix (RGGB) getrennt. Die statistischen Werte wurden für einen homogenen Bereich im Zentrum der Bilder (+-100 x 100 Pixel) ermittelt.

#### Nikon D4s





## Nikon Z7:



Für die Kameras ProEM und Kinetix wurden die Werte für die Photon Transfer Curve nicht gesondert bestimmt.

## 4. Planungen Flugmesskampagnen

Im Rahmen dieses Projektes wurden Flüge in Potsdam, Berlin und Köln durchgeführt. Die Angaben der Zeiten sind in Lokalzeit angeben. Die Flüge in Potsdam und Berlin dienen zum Testen des Gesamtsystems und zum Optimieren der Kameraeinstellungen. Es folgte der geplante Messflug in Köln und ein abschließender Flug in der gleichen Konfiguration in Berlin.

Flugtage:

20210326 Daylight Testflight (Time frame @target Z7 16:29 – 17:19)  
 20210330 Potsdam Nighttime (Time frame @target D4s 17:55 – 19:09)  
 20210331 Berlin Nighttime (Time frame @target D4s 19:56 – 22:05)  
 20211122 Potsdam Nighttime (Time frame @target Z7 16:31 – 18:26)  
 20211220 Cologne Nighttime (Time frame @target D4s 17:16 – 19:57)  
 20220106 Berlin Nighttime (Time frame @target D4s 16:46 – 20:07)

### 4.1 Planung Potsdam

Flight parameters:

FL100, Swath distance 1500m, heading 325°, 30% overlap

Flight weather conditions:

1<sup>st</sup> priority:

Clear sky no moon

Cirrus & few clouds above are ok, moon with low elevation angles

#### Possible flight times:

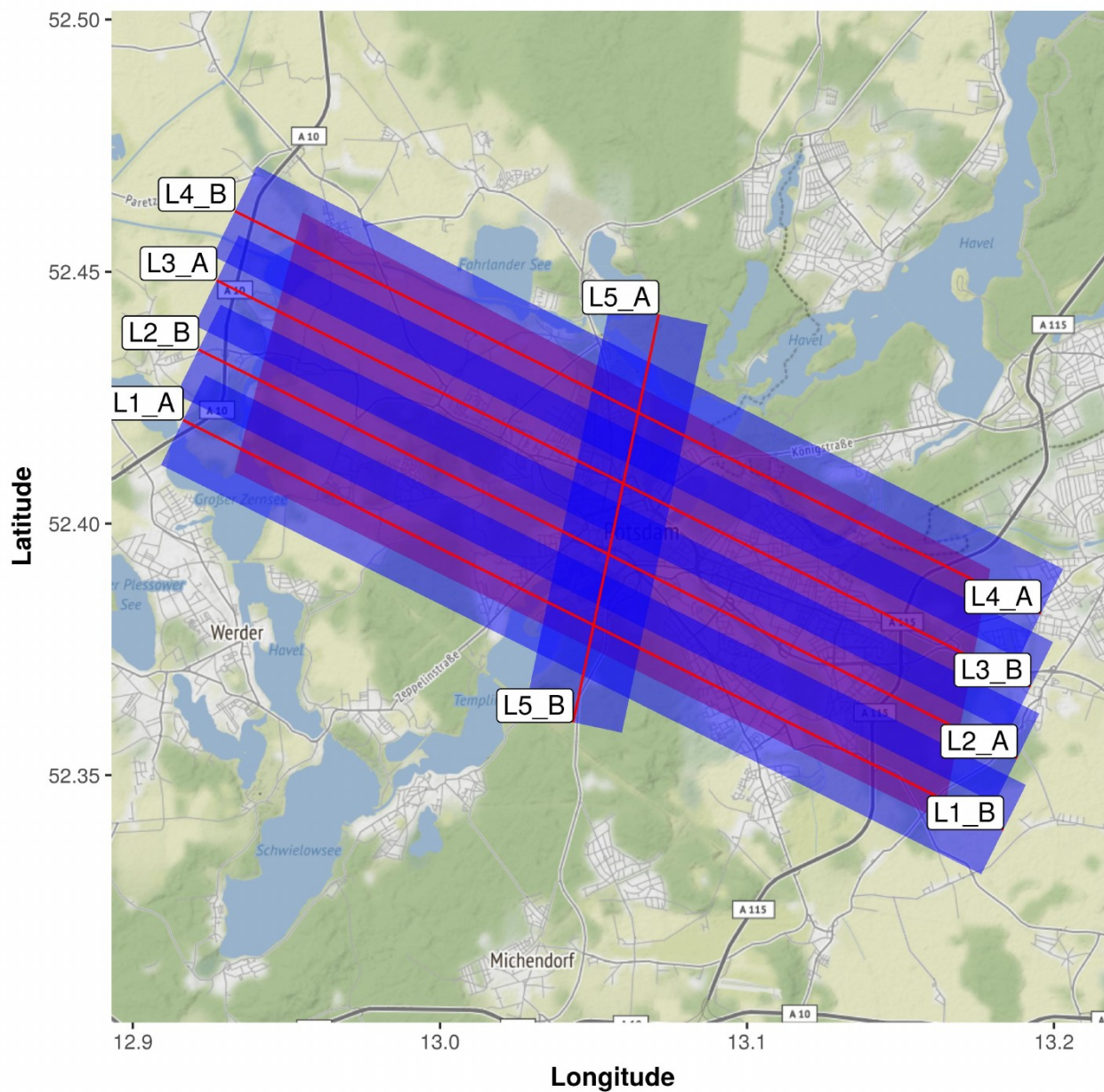
Potsdam

Date / Sunset / Astro twilight / Moon rise (set)

30.03.2021 / 19:39 / 20:13 / 22:10 UTC

=> optimal flight time at target 20:15 – 22:10 UTC

## Flight tracks:




## Flight tracks coordinates:

	ID	WPT name	No	Latitude	Longitude	X	Y
L1_A	PAOOOA	1	52.42056	12.91634	358308.0	5809858	
L1_B	PAOOOB	2	52.33919	13.18355	376249.5	5800318	
L2_A	PBOOOA	3	52.35339	13.18797	376590.3	5801889	
L2_B	PBOOOB	4	52.43456	12.92135	358693.6	5811405	
L3_A	PCOOOA	5	52.44829	12.92727	359139.8	5812920	
L3_B	PCOOOB	6	52.36758	13.19240	376931.1	5803461	
L4_A	PDOOOA	7	52.38212	13.19570	377196.7	5805072	

	ID	WPT name	No	Latitude	Longitude	X	Y
L4_B	PDOOOB	8	52.46202	12.93320	359586.0	5814436	
L5_A	PEOOOA	9	52.44158	13.07126	368904.1	5811904	
L5_B	PEOOOB	10	52.36051	13.04339	366766.0	5802938	

	Paramter	Value
Flight altitude [m agl]		3070
Flight time [min]		37.2
Flight speed [km/h]		198
Turn time		2
Swath width		2210.41
Overlap		0.3
Track distance		1547.29047724326
No. lines		5
Heading [°(0°=N)]		298
Ground resolution [m]		0.448541998273208
Sensor resolution [pixel across track]		4928
Sensor field of view [°]		39.598
Added crossing line		TRUE
Numerical precision		NA

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 55/127

## 4.2 Planung Berlin

### Flight parameters:

FL100, Swath distance 1500m, heading East-West, 30% overlap

Flight weather conditions:

1<sup>st</sup> priority:

Clear sky no moon

Cirrus & few clouds above are ok, moon with low elevation angles

### Possible flight times:

Date / Sunset / Astro twilight / Moon rise

31.03.2021 / 19:40 / 20:15 / 23:44 UTC

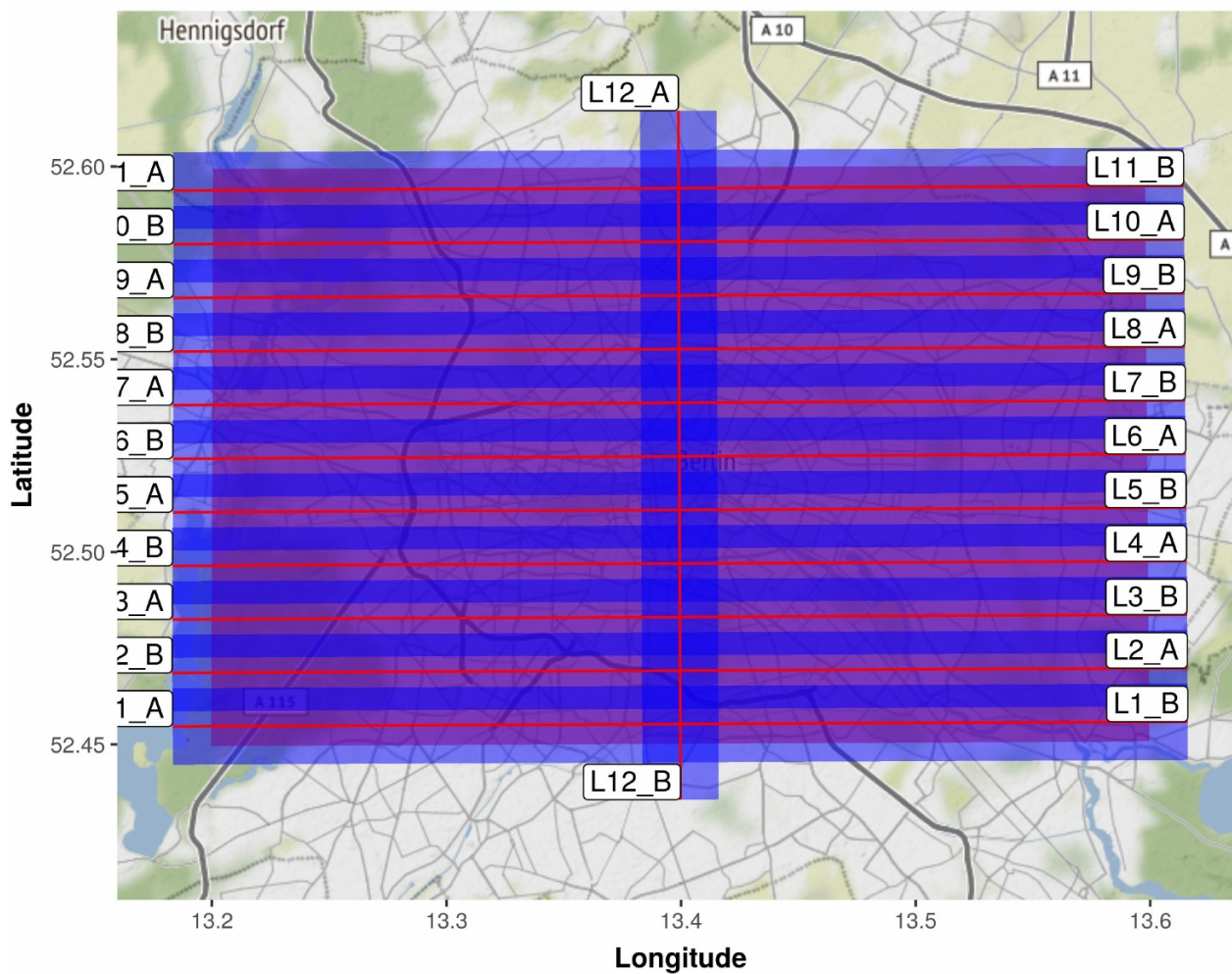
=> optimal flight time at target 20:15 - 23:44 UTC

06.01.2022 / 16:42 / 17:21 / (18:26) UTC (<20°)

=> optimal flight time at target 17:21 - UTC



## Flight tracks:






## Flight tracks coordinates:

	ID	WPT name	No	Latitude	Longitude	X	Y
L1_A	BAOOOA	1	52.45466	13.18324	376551.3	5813161	
L1_B	BAOOOB	2	52.45590	13.61603	405960.1	5812648	
L2_A	BBOOOA	3	52.46981	13.61585	405978.0	5814195	
L2_B	BBOOOB	4	52.46857	13.18308	376579.6	5814708	
L3_A	BCOOOA	5	52.48248	13.18315	376623.0	5816255	
L3_B	BCOOOB	6	52.48372	13.61568	405995.8	5815742	
L4_A	BDOOOA	7	52.49763	13.61551	406013.7	5817289	

	ID	WPT name	No	Latitude	Longitude	X	Y
L4_B	BDOOOB	8	52.49639	13.18322	376666.4	5817801	
L5_A	BEOOOA	9	52.51029	13.18328	376709.9	5819348	
L5_B	BEOOOB	10	52.51154	13.61533	406031.6	5818836	
L6_A	BFOOOA	11	52.52545	13.61516	406049.5	5820384	
L6_B	BFOOOB	12	52.52420	13.18335	376753.3	5820895	
L7_A	BHOOOA	13	52.53811	13.18342	376796.8	5822442	
L7_B	BHOOOB	14	52.53936	13.61499	406067.4	5821931	
L8_A	BIOOOA	15	52.55326	13.61481	406085.2	5823478	
L8_B	BIOOOB	16	52.55202	13.18348	376840.2	5823988	
L9_A	BKOOOA	17	52.56593	13.18355	376883.6	5825535	
L9_B	BKOOOB	18	52.56717	13.61464	406103.1	5825025	
L10_A	BLOOOA	19	52.58108	13.61446	406121.0	5826572	
L10_B	BLOOOB	20	52.57984	13.18362	376927.1	5827082	
L11_A	BMOOOA	21	52.59374	13.18368	376970.5	5828629	
L11_B	BMOOOB	22	52.59499	13.61420	406133.0	5828120	
L12_A	BPOOOA	23	52.61443	13.39883	391594.0	5830584	
L12_B	BPOOOB	24	52.43561	13.39973	391213.4	5810694	

Paramter	Value
Flight altitude [m agl]	3070
Flight time [min]	127.7
Flight speed [km/h]	198
Turn time	2
Swath width	2210.41
Overlap	0.3
Track distance	1547.29047724326
No. lines	12
Heading [°(0°=N)]	271
Ground resolution [m]	0.448541998273208
Sensor resolution [pixel across track]	4928
Sensor field of view [°]	39.598
Added crossing line	TRUE
Numerical precision	NA

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 58/127

### 4.3 Planung Köln

#### Flight parameters:

FL100, Swath distance 1500m, heading 325°, 30% overlap

Flight weather conditions:

1<sup>st</sup> priority:

Clear sky no moon


Cirrus & few clouds above are ok, moon with low elevation angles

#### Possible flight times:

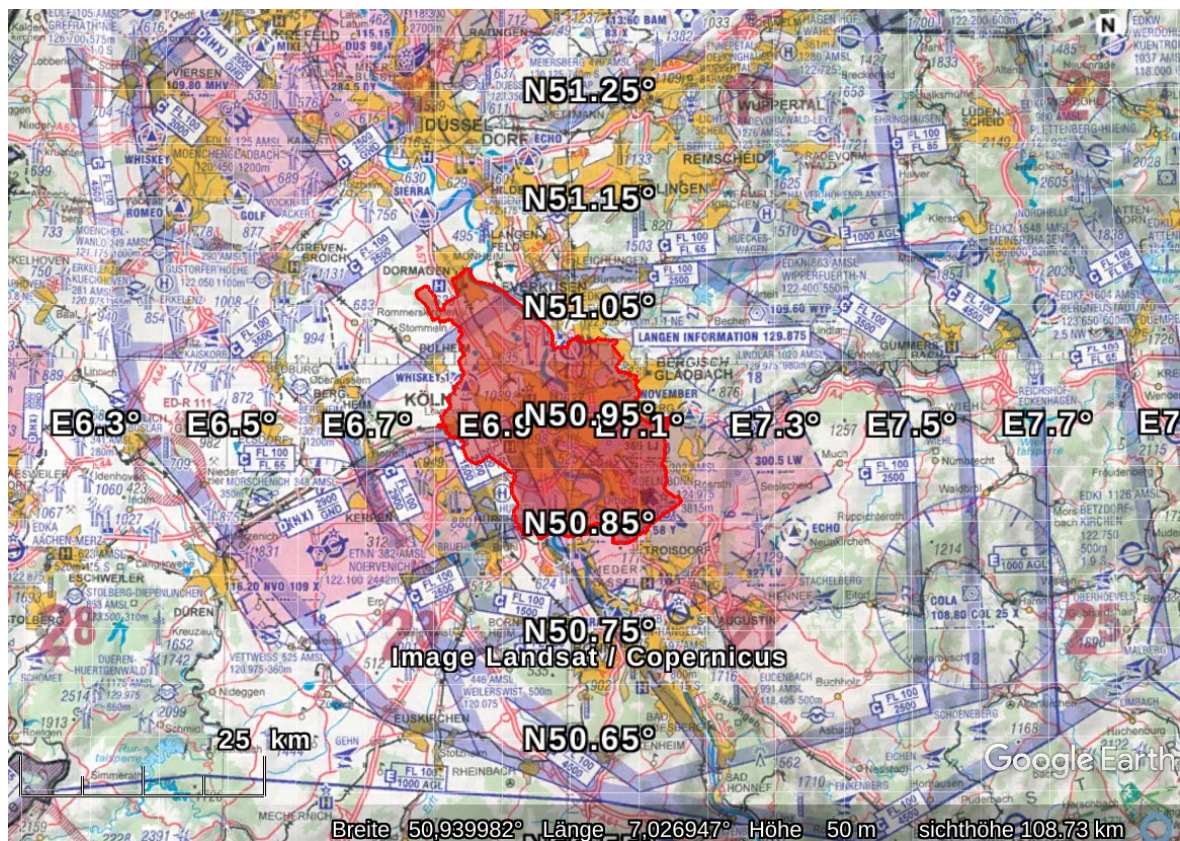
Date / Sunset / Astro twilight / Moon rise

20.12.2021 / 16:28 / 17:07 / 17:12 UTC

=> optimal flight time at target 17:00 - 20:00 (moon elevation <20°)

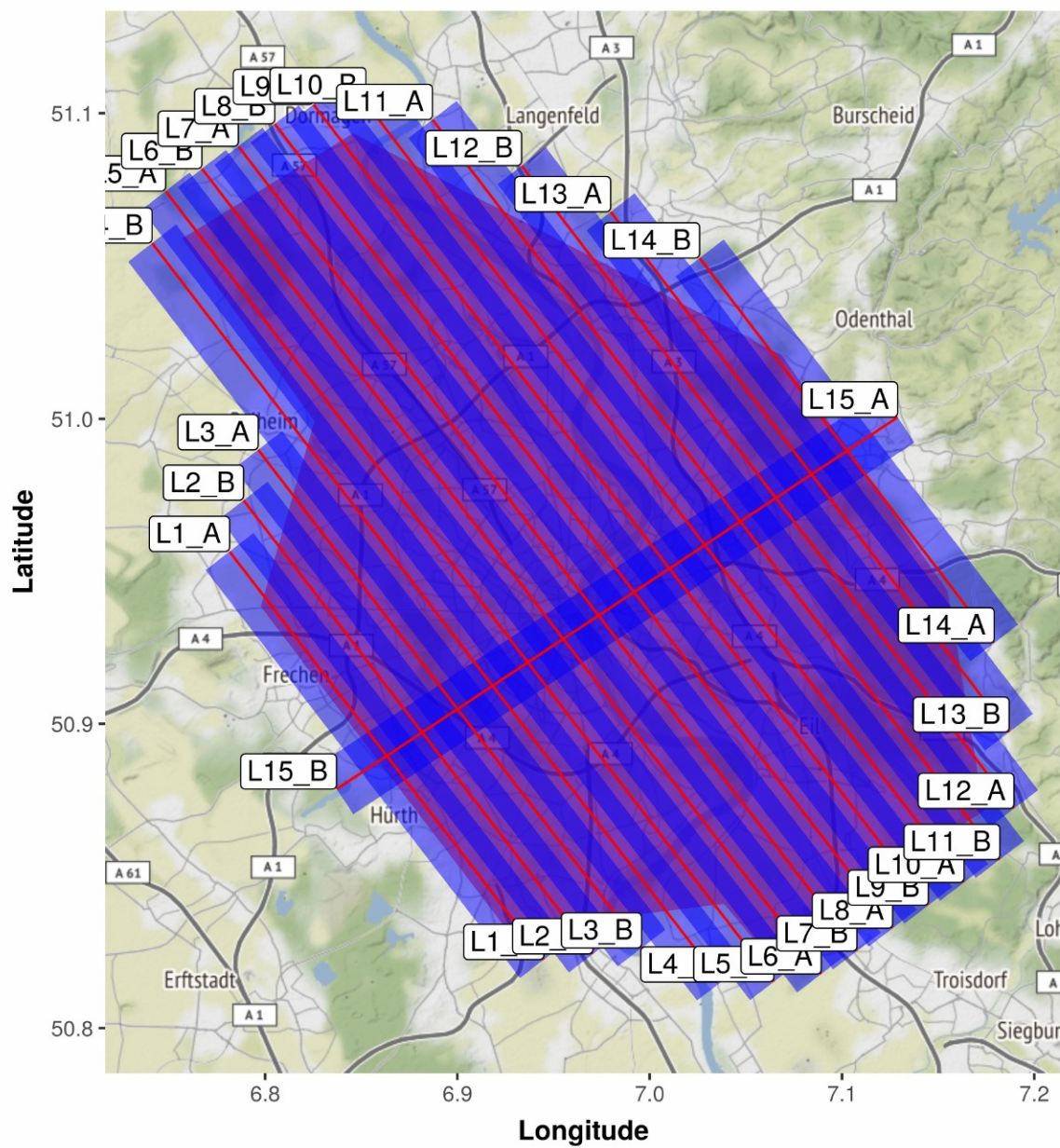
<div>Freie Universität  Berlin</div>	Institute for Space Sciences		Doc. name: 20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report	
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications		Date: 16. Nov 2023	
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision: 00 Page: 59/127

## Flight area Cologne:





Flight tracks (draft):



## Flight tracks coordinates:

	ID	WPT name	No	Latitude	Longitude	X	Y
L1_A	KAOOOA	1	50.95651	6.781541	344194.1	5647332	
L1_B	KAOOOB	2	50.82254	6.944994	355257.9	5632104	
L2_A	KBOOOA	3	50.82438	6.970473	357058.0	5632259	
L2_B	KBOOOB	4	50.97330	6.788823	344761.5	5649183	
L3_A	KCOOOA	5	50.98984	6.796414	345349.4	5651007	
L3_B	KCOOOB	6	50.82635	6.995795	358847.2	5632429	
L4_A	KDOOOA	7	50.81514	7.037087	361722.0	5631104	

	ID	WPT name	No	Latitude	Longitude	X	Y
L4_B	KDOOOB	8	51.05753	6.741249	341709.0	5658650	
L5_A	KEOOOA	9	51.07454	6.748271	342258.9	5660526	
L5_B	KEOOOB	10	50.81526	7.064623	363662.0	5631067	
L6_A	KFOOOA	11	50.81780	7.089227	365402.4	5631304	
L6_B	KFOOOB	12	51.08187	6.767191	343608.9	5661300	
L7_A	KHOOOA	13	51.08919	6.786118	344958.9	5662074	
L7_B	KHOOOB	14	50.82533	7.107788	366731.2	5632107	
L8_A	KIOOOA	15	50.83286	7.126356	368060.1	5632911	
L8_B	KIOOOB	16	51.09651	6.805050	346308.9	5662849	
L9_A	KKOOOA	17	51.10285	6.825192	347739.9	5663512	
L9_B	KKOOOB	18	50.84038	7.144930	369388.9	5633714	
L10_A	KLOOOA	19	50.84790	7.163509	370717.8	5634518	
L10_B	KLOOOB	20	51.10337	6.852472	349651.3	5663514	
L11_A	KMOOOA	21	51.09792	6.887067	352055.6	5662837	
L11_B	KMOOOB	22	50.85542	7.182095	372046.6	5635322	
L12_A	KPOOOA	23	50.87219	7.189501	372613.6	5637174	
L12_B	KPOOOB	24	51.08284	6.933408	355253.0	5661069	
L13_A	KQOOOA	25	51.06775	6.979719	358450.4	5659300	
L13_B	KQOOOB	26	50.89724	7.186903	372499.3	5639964	
L14_A	KROOOA	27	50.92653	7.179179	372036.4	5643233	
L14_B	KROOOB	28	51.05264	7.026001	361647.7	5657532	
L15_A	KSOOOA	29	51.00055	7.128988	368718.2	5651552	
L15_B	KSOOOB	30	50.87856	6.837217	347849.9	5638549	

Paramter	Value
Flight altitude [m agl]	3070
Flight time [min]	165.4
Flight speed [km/h]	198
Turn time	2
Swath width	2210.54
Overlap	0.3
Track distance	1547.37521400556
No. lines	15
Heading [°(0°=N)]	324
Ground resolution [m]	0.448566562501612
Sensor resolution [pixel across track]	4928
Sensor field of view [°]	39.6
Added crossing line	TRUE
Numerical precision	NA

## 5. Datenbearbeitung, -analyse und Auswertung

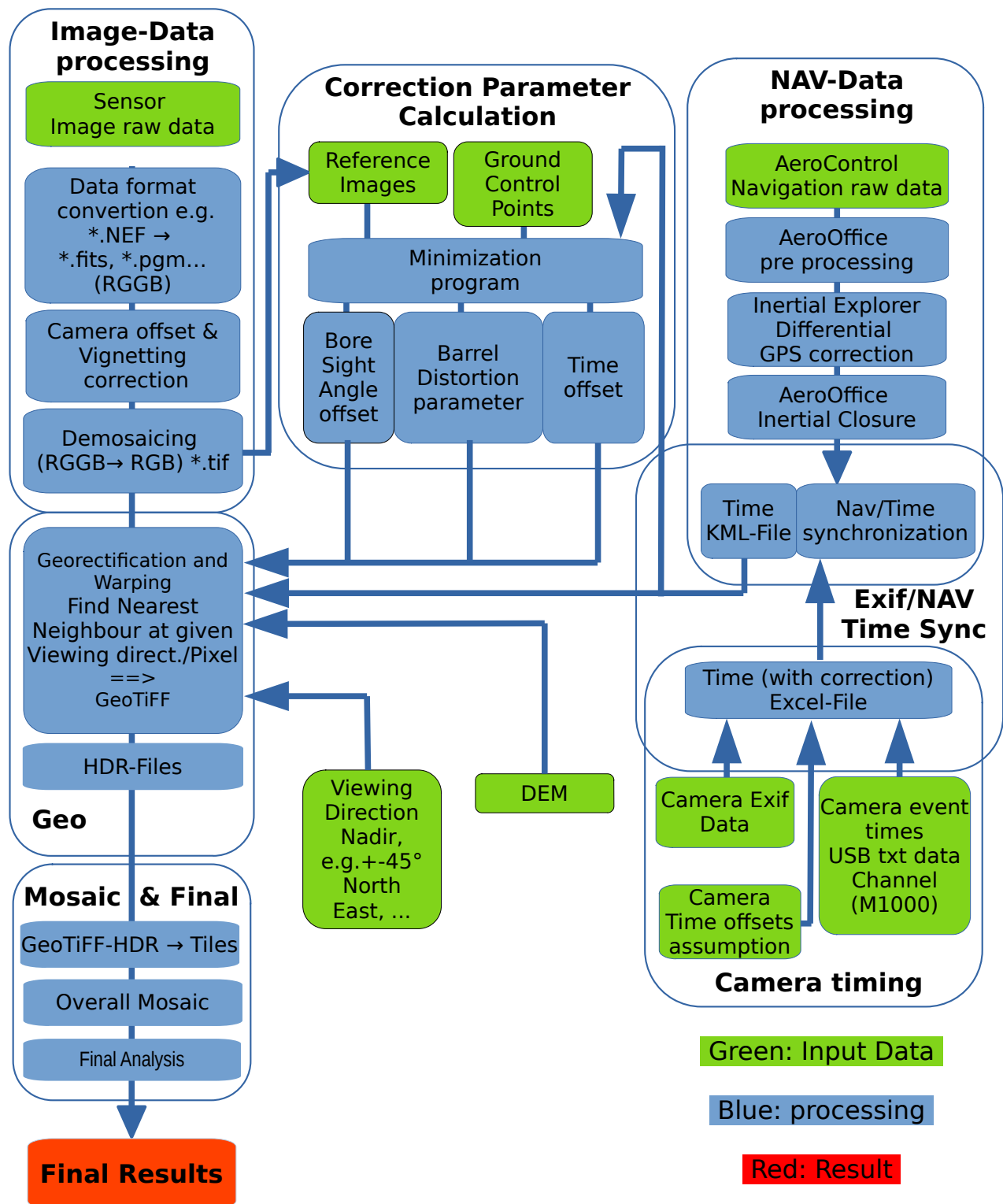
### 5.1 Datenbearbeitung

Die Datenbearbeitung der erfassten Bilddaten ist im Ablaufplan (siehe Übersicht Datenprozessierung 5.1.1 Seite 63) dargestellt. Sie teilt sich im groben in:

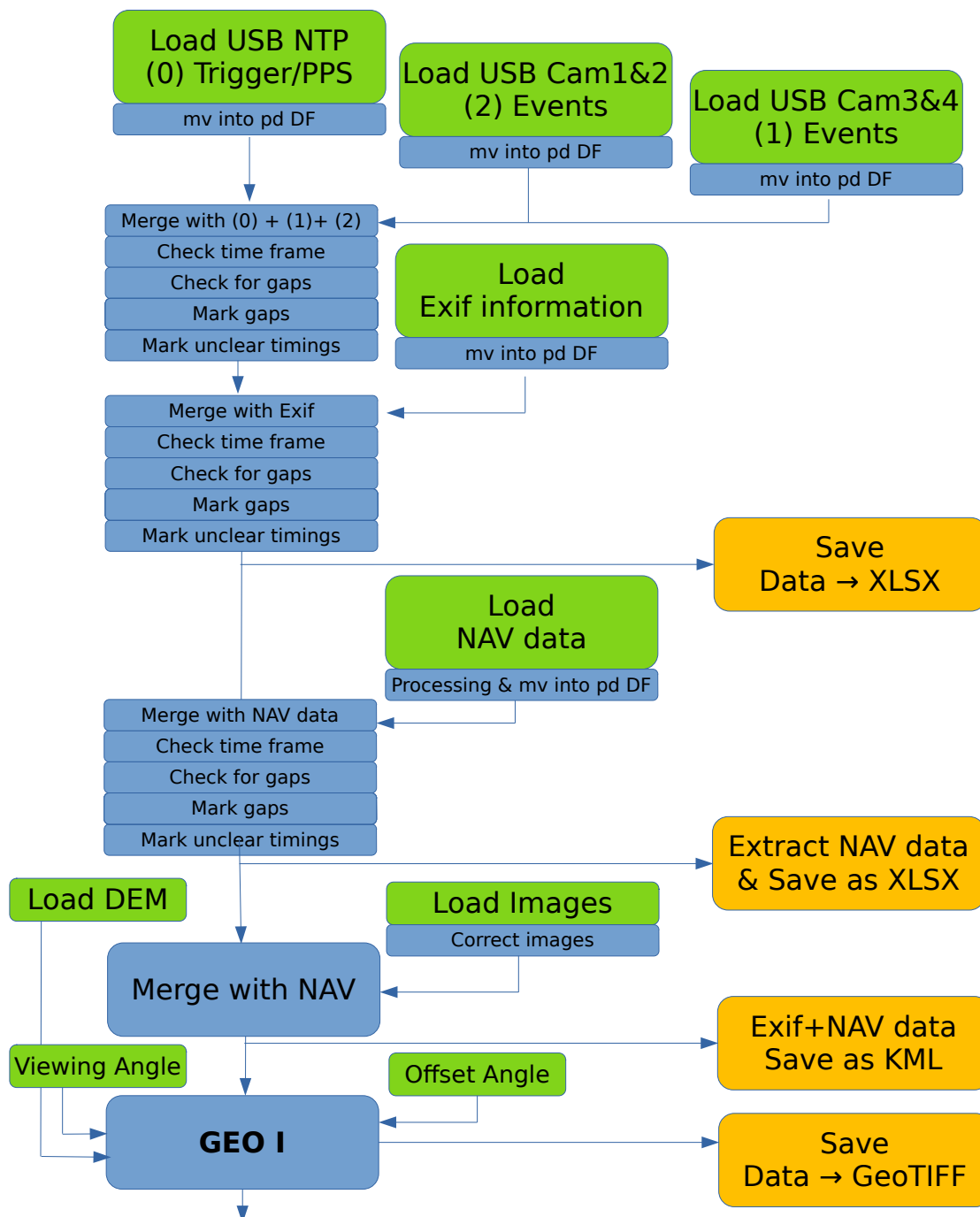
- Bilddatenprozessierung (Image-Data processing)
- Navigationsdatenprozessierung (Nav-Data processing)
- Kamera Aufnahmezeitpunkt und Zeitsynchronisierung (Camera timing)
- Georeferenzierung (Georectifying)
- Mosaikerstellung in Teilstücken (Tile warping)
- Erstellung Gesamtmosaik (Overall mosaic)
- Auswertung des Mosaik (Overall mosaic analysis)
- Darstellung des Ergebnisses (Final results)



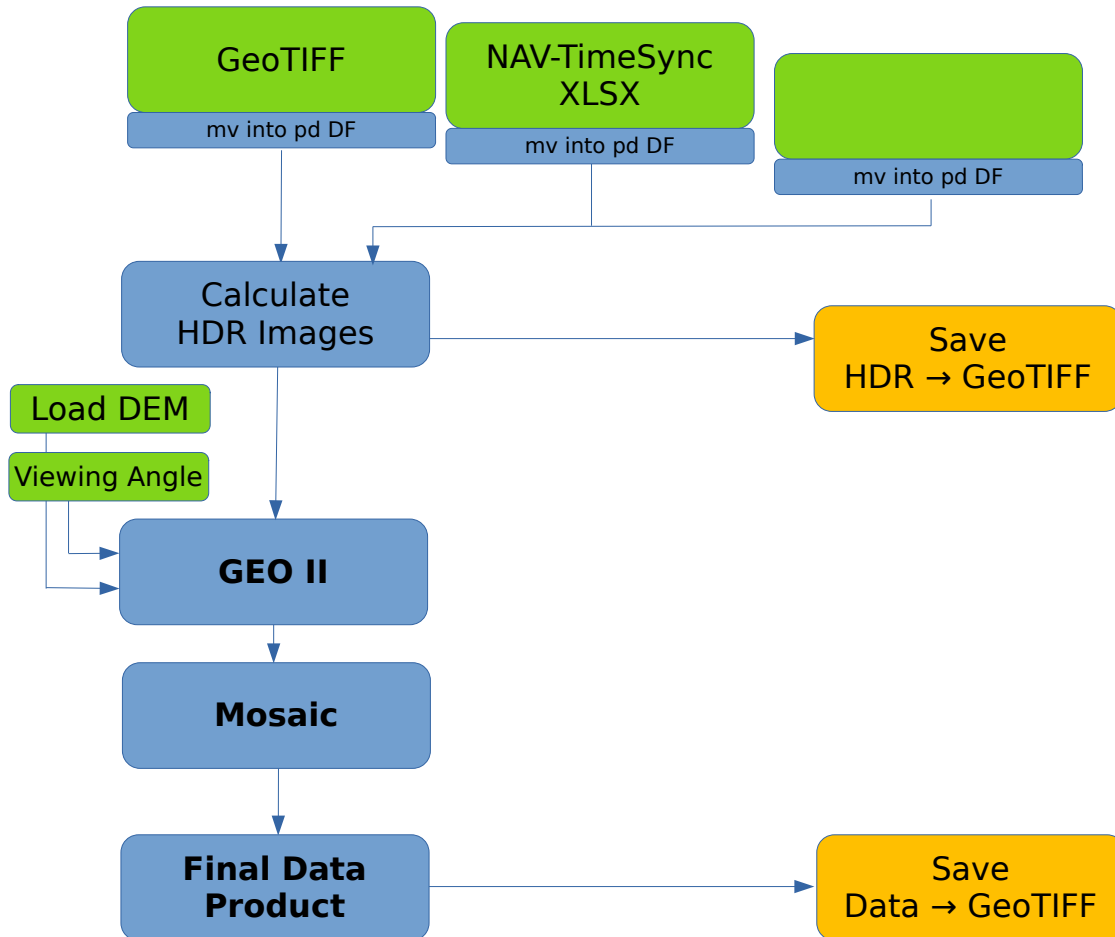
### 5.1.1 Übersicht Datenprozessierung



## Camera Timing Sync with NAV data:



## Final data procedure:



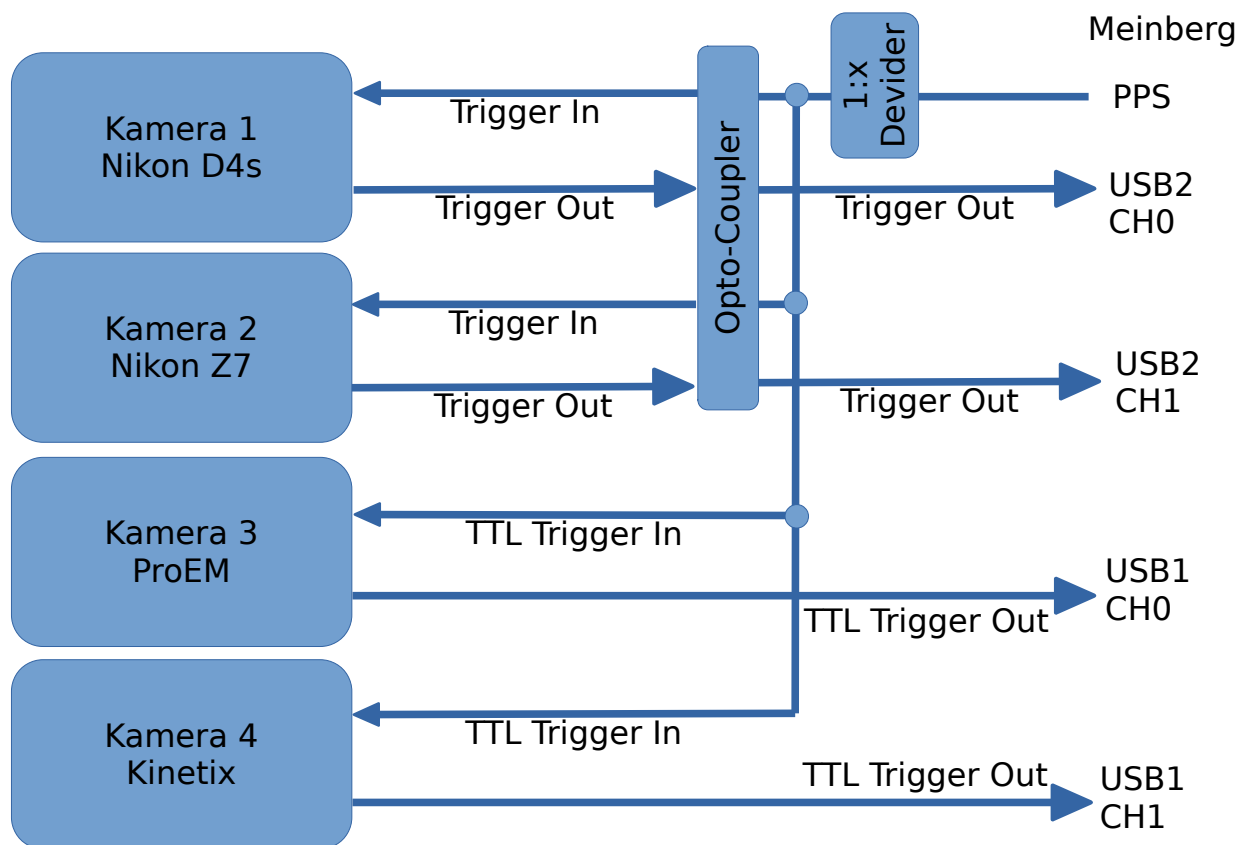
## 5.1.2 Zeitsynchronisierung der Bilddaten (camera timing)

Für jedes Kamerabild muß zur Generierung eines GeoTIFF ein Aufnahmezeitpunkt erfasst werden. Dieser wird aus der Zeiterfassung des Meinberg M1000 (NTP-Server), dem Zeitoffset aus der internen Kamerazeit und den Exif Informationen der Kameras ermittelt (siehe Übersicht Datenprozessierung 5.1.1 Seite 63). Aus dem Ergebnis wird zunächst eine CSV-Datei und im Anschluß eine KML-Datei erzeugt.

Im folgenden ist ein Auszug einer Zeitreihe mit den erfassten Meinberg NTP-Events aus den USB\*.txt Dateien als Beispiel dargestellt:

Time line																	
Counter	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6....
PPS [1/sec]	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —	°°  —
TTL-Devider 1:10 (74LS390)	°°°° 2sec	°°°°	 2sec	 2sec	°°°° 2sec	°°°°	 4sec	 4sec	 4sec	 4sec	°°°° 2sec	°°°°	 2sec	 2sec	°°°° 2sec	°°°°	 4sec
<b>USB0CH0</b> Time  Meinberg PPS-Signal	16:24:36.0436071	16:24:37.0436059	16:24:38.0436105	16:24:39.0436069	16:24:40.0436048	16:24:41.0436075	16:24:42.0436068	16:24:43.0436078	16:24:44.0436113	16:24:45.0436061	16:24:46.0436047	16:24:47.0436118	16:24:48.0436073	16:24:49.0436078	16:24:50.0436117	16:24:51.0436061	16:24:52.0436136
<b>USB0CH1</b> Time  Trigger Signal (after devider)	16:24:36.2000002				16:24:40.2000002						16:24:46.2000002				16:24:50.2000002		
<b>USB1CH0</b> Time  ProEM Trigger-Out	16:24:36.2000180				16:24:40.2000168						16:24:46.2000183				16:24:50.2000165		
<b>USB1CH1</b> Time  Kinetix negativ Trigger Input			16:24:38.2000129				16:24:42.2000238						16:24:48.2000405				16:24:52.2000513

USB2CH0 Time	16:24:36.2955998					16:24:40.2949544						16:24:46.2946235					16:24:50.2950292		
Nikon D4s																			
USB2CH1 Time	16:24:36.2811676					16:24:40.2817646						16:24:46.2822773					16:24:50.2807935		
Nikon Z7																			



**Abbildung 21:** Zeiterfassung Überblick (siehe auch Kapitel 2.6 Seite 13)

Ein Test der Zeiterfassung mit entsprechender Nikon Z7 Bildaufnahme ist im Anhang 6.1 Seite 106 zu finden. Das Trigger-Out Signal der Nikon Kameras entspricht dem Zeitpunkt der Erfassung nach der Speicherzeit. D.h. die

Aufnahme erfolgt mit dem Trigger-In Signal. Trotz einiger vorhergehender positiver Funktionstests, traten während des Fluges bei der Erfassung der Aufnahmezeitpunkte Probleme auf und es konnten nicht alle fehlerhaften Aufnahmezeitpunkte vollständig korrigiert werden. Zum einen war die Aufnahme-Intervallzeit nicht gleichmäßig bei 4[sec], sondern abwechselnd bei 4 und 6 [sec] (falscher TTL Frequenzteiler 74LS390→74LS393) und es wurde bei der Kinetix eine negative, statt einer positiven Triggerflanke konfiguriert. Während des Fluges traten wiederholt zusätzliche Trigger-Events auf, die zu zusätzlichen Zeiterfassungen führten. Auch dies konnte während des Fluges nicht behoben werden. Ein Großteil dieser Probleme konnte im Post-Prozessing und für den anschließenden Flug in Berlin gelöst bzw. korrigiert werden.

Anzahl der Aufnahmen:

**Nikon D4s:** 1935 davon gültige Aufnahmen: 1935

1st Frame time 16:16:16.2937071 (USB2 CH0 UTC)

1935th Frame 18:57:24.2944886 (USB2 CH0 UTC)

Read ot time ~90 [ms] (mean difference after Trigger)

Exposure time 1/100 [s] (Exif info: Exposure Time)

**Nikon Z7:** 1885 davon gültige Aufnahmen: 1864

1st Frame time 16:16:00.2809681 (USB2 CH1 UTC)

1885th Frame 18:57:34.3286545 (USB2 CH1 UTC)

Read ot time ~85 [ms] (mean difference after Trigger)

Exposure time 1/100 [s] (Exif info: Exposure Time)

### **Kinetix Kamera:**

Für die Kinetix Kamera wurde aufgrund der im Rohdatenformat fehlenden Exif Informationen eine andere Methode zur Erfassung des Aufnahmezeitpunkte erarbeitet. Dazu wurde aus dem ersten aufgenommenen Kinetix-Bild ein korrespondierendes Nikon Z7 Bild manuell gesucht und die Zeitdifferenz als offset Zeit verwendet. Für alle weiteren Aufnahmen wurde das jeweilige Meinberg USB\*.txt file genutzt.



In den Exif informationen existiert ein Counter der zur Zeiterfassung verwendet werden könnte. Dies ermöglicht eine weitere Methode zur Zeiterfassung für zukünftige Anwendungen. Leider startet der Timer mit jedem Programmstart neu. Es sind folgende Exif Informationen vorhanden:

Anzahl der Aufnahmen:

**Kinetix:** 1317 davon gültige Aufnahmen: 1317  
 (Exif info: frameNr)

1st Frame time 16:24:52.2000513 (USB1 CH1 UTC)  
 469890000 [µs] (Exif info: bofTime)

1317th Frame 18:57:20.2000410 (USB1 CH1 UTC)  
 598050000 [µs] (Exif info: bofTime)

Read out time 320 – 400 [ms] (Exif info: readoutTime)

Exposure time 40 [ms] (Exif info: expTime)

### **ProEM Kamera:**

Die Zeitsynchronisierung erfolgte nach der gleichen Methode wie für die Kinetix Kamera. Allerdings hat die ProEM keine weiteren ausreichende Information zur Zeiterfassung und es kann nur auf die Zeit-Informationen des Meinberg USB files zurückgegriffen werden.

Anzahl der Aufnahmen

**ProEM:** 1935 davon gültige Aufnahmen: 1935

1st Frame 16:16:36.2000188 (USB1 CH0)

1935th Frame 18:57:20.2000171 (USB1 CH0)

Exposure time 40 [ms]  
 (Exif info: Camera.Shutter.Timing.ExposureTime)

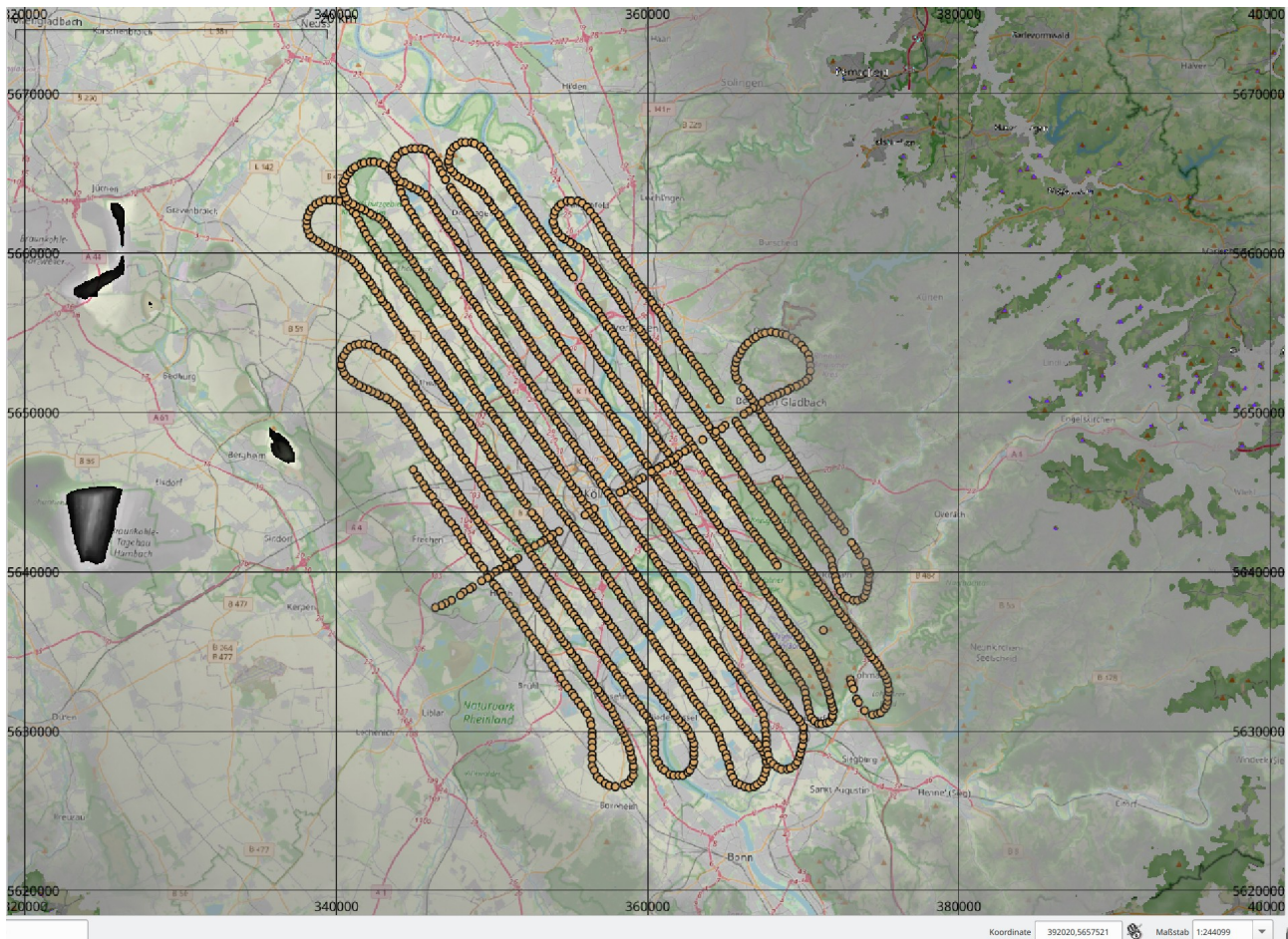
Read out time 1,2 [µs] (Vertical shift rate)

Exposure time 40 [ms]

Date	City	Inertial file	Camera returns file	Channel	Camera	Time diff (in hours) with EXIF times
20210330	Potsdam	20210330_Calec_continuousPPS-Meinberg.txt	USB0	CH0	Z7	2
			USB0	CH1	D4s	2
			USB1	CH0	ProEM	No operation
			USB1	CH1	Kinetix	0
			USB2	CH0	PPS-IGI	UTC
			USB2	CH1	Camera Trigger	UTC
20210331	Berlin	20210330_Calec_continuous_1PPS-Meinberg.txt	USB0	CH0	ProEM	No operation
			USB0	CH1	Kinetix	0
			USB1	CH1	D4s	2
			USB1	CH0	Z7	2
			USB2	CH0	PPS-IGI	UTC
			USB2	CH1	Camera Trigger	UTC
20211122	Potsdam	20211122_Calec_Continuous.txt	USB0	CH0	PPS-IGI	UTC
			USB0	CH1	Camera Trigger	UTC
			USB1	CH0	ProEM	1
			USB1	CH1	Kinetix	1
			USB2	CH0	D4s	1
			USB2	CH1	Z7	1
20211220	Koeln	20211220_CALEC_Continuous_UTM_ETRS89_Zone2.txt	USB0	CH0	PPS-IGI	UTC
			USB0	CH1	Camera Trigger	UTC

			USB1	CH0	ProEM	+1
			USB1	CH1	Kinetix	+2
			USB2	CH0	D4s	+1
			USB2	CH1	Z7	0
20220106	Berlin	20220106_CALEC_ContinuousTrigger.txt.	USB0	CH0	PPS-IGI	UTC
			USB0	CH1	Camera Trigger	UTC
			USB1	CH0	ProEM	0
			USB1	CH1	Kinetix	0
			USB2	CH0	D4s	0
			USB2	CH1	Z7	0

**Tabelle 1:** Die Tabelle zeigt eine Liste der Flüge und den dazu gehörenden Dateien für die Zeit-, Position und Lageerfassung. Für die Testflüge in Potsdam und Berlin haben sich die Schnittstellen und damit die zugehörigen USB\*.txt files geändert.



**Abbildung 22:** QGIS KML file mit Aufnahmezeitpunkten (Z7) und unterlegtem digitalen Geländemodell in UTM Koordinaten

### 5.1.3 Demosaicing

Für das Demosaicing der Bayermatrix des Sensor (RGGB → RGB) wurde folgendes Python Programm genutzt:

demosaic.py - converts color-filter-array images to RGB images

Copyright (c) 2013, Joe Futrelle (jfutrelle@whoi.edu)

Zur Konvertierung wurde als Methode „hq\_linear“ verwendet.



### 5.1.4 Georeferenzierung

Für die Georeferenzierung wurde folgendes digitale Gelände Modell (DEM) verwendet:

GeoTIFF: EU-DEM (raster) - version 1.1, Apr. 2016

Beschreibung:

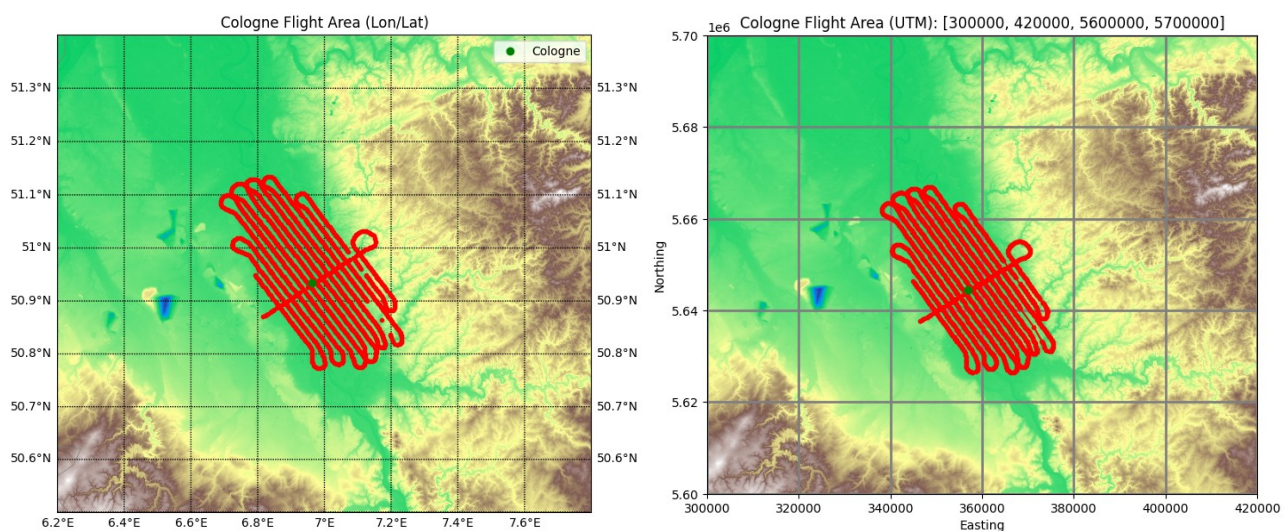
<https://land.copernicus.eu/user-corner/publications/eu-dem-flyer/view>

Daten:

<https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view>


MapView:

<https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1/view>



**Abbildung 23:** Übersicht Fluggebiet (DEM & Flightdata Quicklook)


Die Georeferenzierung arbeitet mit einem Satz von Pixelkoordinaten eines jeden Bildes und wird aus den entsprechenden Navigationskoordinaten und Flugzeuglagedaten berechnet. Dazu werden zusätzlich eine Reihe von Parametern berechnet, die sich auf die Position und Ausrichtung des Flugzeugs, die Bodenhöhe sowie die Ausrichtung und Verzerrung der Kamera beziehen. Die Position und die Ausrichtung des Flugzeugs werden ermittelt, indem der

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 74/127

Zeitpunkt der Aufnahme des Bildes ermittelt und die Informationen aus den Inertialdaten zu diesem Zeitpunkt interpoliert werden.

Zur Minimierung der Restfehler bei der Georeferenzierung, werden bei der endgültigen Orthorektifizierung manuell ermittelte Bodenkontrollpunkte verwendet. Es wird eine kleine Anzahl von Bildern (~10-15) von Hand in QGIS georeferenziert wird, um Bodenkontrollpunkte (GCPs) zu erhalten. Mit Hilfe einer Funktionsminimierung berechnet ein Programm die unbekannten Parameter, damit die Bodenkoordinaten der Bilder mit den GCPs übereinstimmen. Im folgendem kann das Orthorektifizierungsprogramm (main\_RawtoGeoTIFF.py) mit Hilfe der Bodenkoordinaten eines Maschengitters die Pixelkoordinaten für alle Bilder berechnen und so eine Georeferenzierung für das endgültige Mosaik erstellen.




	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 75/127

### 5.1.5 Datenzusammenführung der Kameraaufnahmen

Vor der Georeferenzierung wurden zwei Bildkorrekturen vorgenommen. Zunächst wurde eine Nullpunktkorrektur vorgenommen, um sicherzustellen, dass in unbeleuchteten Gebieten die Nullzählung dem Nulllicht entspricht. Leider war es aufgrund des Aufbaus nicht möglich, während des Fluges Bilder mit aufgesetztem Objektivdeckel aufzunehmen. Aus diesem Grund wurden 10 große unbeleuchtete Gebiete in der Region Köln (z. B. Waldgebiete) definiert und die Bilder dieser Gebiete verwendet, um den "dunklen" Subtraktionswert zu bestimmen. Leider werden diese Gebiete in gewissem Maße durch Streulicht (Skyglow) anderer Lichtquellen beeinflusst, so dass unsere Korrektur wahrscheinlich etwas höher ausfällt, als es bei einer echten Dunkelstromsubtraktion der Fall wäre.

Die zweite Korrektur betrifft die Vignettierung des Objektivs, d. h. eine geringere Empfindlichkeit (Verdunkelung) in den Bildecken. Die Bilddaten wurden für jede der verwendeten Blenden mit einer Ulbricht-Kugel aufgenommen, um ein homogen beleuchtetes Feld zu erhalten. Diese Bilder wurden dann gemittelt, um eine pixelweise Korrekturfunktion zu erstellen. Alle Pixelempfindlichkeiten wurden so angepasst, dass sie im Durchschnitt die gleiche radiometrische Empfindlichkeit (in digitalen Zahlen) auf das gleiche Strahlungssignal haben. In der Praxis wird das dunkelkorrigierte Bild mit dieser Maske multipliziert. Nach der Vignettierungskorrektur wurden die Pixelwerte um einheitlich +300 Zähler erhöht, um sicherzustellen, dass nur positive Werte vorhanden sind (eine Anforderung des Ausgabedatenformates GeoTiff).

Die Bilder wurden einzeln georeferenziert, indem automatisch eine Reihe von Verknüpfungspunkten erstellt wurde, die die Bildkoordinaten mit den Koordinaten im Boden verbinden. Der erste Schritt dieses Prozesses bestand darin, eine Reihe von Bildern von Hand zu georeferenzieren, um eine Reihe von mehreren hundert Verknüpfungspunkten zu erhalten. Als Nächstes verwendeten wir die Flugzeugposition (über GPS) und die Kameraausrichtung (über das Inertialsystem), um Strahlen vom Kamerazentrum auf die Oberfläche zu projizieren (unter Berücksichtigung der Höhe der Oberfläche mit einem digitalen Höhengeländemodell). Diese Projektion hängt von der Beziehung zwischen Pixelabstand und -winkel ab und ist im Prinzip nichtlinear. Wir gehen von einer tonnenförmigen Verzeichnungsbeziehung der Form  $r' = r + kr^3$  aus, wobei  $r'$  der effektive Pixelradius (relativ zum Kamerazentrum) für ein korrigiertes Bild ist, bei dem der Pixelradius direkt mit dem Abbildungswinkel (relativ zum Winkel der Kamerabohrung) skaliert. Die Werte von  $k$  und der

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 76/127

Proportionalitätsfaktor zwischen  $r'$  und Winkel werden durch Minimierung der Differenz der Bodenschnittpunkte der projizierten Strahlen mit den entsprechenden von hand georeferenzierten Bodenkoordinaten angepasst. Die Anpassung umfasst auch den Winkel des Bohrlochs (relativ zum Nadir) und einen Term, der mögliche Zeitverzögerungen zwischen den von der Kamera gemeldeten Zeiten relativ zur Hälfte der Aufnahmen berücksichtigt. Sobald diese Anpassungswerte vorliegen, werden alle Bilder automatisch georeferenziert (einschließlich derjenigen, die ursprünglich von Hand georeferenziert wurden).


### 5.1.6 Beispiele Mosaik-Bilder

Nachdem die Bilder georeferenziert worden waren, bestand die nächste Aufgabe darin, sie zu Mosaikbildern zusammenzusetzen. Während des Georeferenzierungsprozesses wurde eine zusätzliche Datendatei erstellt, in der der Emissionswinkel (vom Boden zum Flugzeug) für jede Oberflächenposition des Bildes gespeichert wurde. Diese wurden im GeoTiff-Format zusammen mit den georeferenzierten Bildern gespeichert. Für jede beliebige Position am Boden suchte die Mosaiksoftware nach dem Bild, dessen reprojiziertes Pixel am ehesten mit der gewünschten Emissionsrichtung übereinstimmt (z. B. Zenit oder 45 Grad Zenitwinkel mit dem Azimutwinkel nach Norden). In der Praxis bedeutet dies, dass für das Nadir-Mosaik das resultierende Bild aus Stücken der Mittelpunkte der einzelnen Bilder zusammengesetzt wird.

Der Abstand zwischen den einzelnen Flugspuren war trotz vorhergehender Test zu groß und bedeutete, dass es nur wenige oder keine Überlappungen zwischen den D4s-Bildern von einer Spur zur nächsten gab. Für das Nadir-Mosaik haben wir daher diese Daten mit Bildern der Z7-Kamera aufgefüllt, die im Durchschnitt einen etwas schlechteren Fokus hatten. Der Einfachheit halber wurden für die Schrägwinkelmosaik ausschließlich die Z7-Daten verwendet.

Für die Mosaik im UV und NIR-Bereich wurden alle Daten mit einer einzigen Blende aufgenommen. Im sichtbaren RGB-Bereich wurden jedoch vier verschiedene Blenden verwendet (f1.4 (nur D4s), f1.8 (nur Z7), f2.8 und f5.6). Die Bilder mit den verschiedenen Blenden weisen unterschiedliche Empfindlichkeiten auf (f1.4 und f1.8 sind am empfindlichsten) und sind anfällig für Sättigung (f1.4 und f1.8 sind am ehesten gesättigt). Um den dynamischen Bereich zu erweitern, haben wir ein endgültiges Mosaik (Nadir) erstellt, das auf der Kombination aller Blenden basiert. Anhand von Flachfeldmessungen im Labor wurde für jede Blende (separat für jedes Farbband) ein Korrekturfaktor in Bezug auf die Blende f1,8 ermittelt. Diese Korrektur hat die Form  $\frac{1}{3} * ((F_{1.4} - 300)/a + (F_{2.8} - 300)/b + (F_{5.6} - 300)/c) + 300$ , wobei  $F_x$  der Pixelwert des jeweiligen Mosaiks ist und a, b und c die laborgestützten Korrekturfaktoren sind.

Bei diesem Verfahren gibt es drei Probleme. Erstens wurden die Bilder mit unterschiedlichen Blenden nicht vom selben Standort aus aufgenommen, sondern liegen mehrere hundert Meter auseinander. Das bedeutet, dass nicht immer dieselben Lichter zu sehen sind (z. B. aufgrund der Abschirmung durch Gebäude oder Vegetation) und dass die Position von Lichtern, die im Verhältnis zum Boden stark erhöht sind, verschoben wird. Infolgedessen gibt es im

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 78/127

endgültigen Mosaik einige Positionen, an denen eine einzelne hoch gelegene Lichtquelle an mehreren (nahegelegenen) Positionen erscheint. Zweitens neigt die Korrektur dazu, das Rauschen in unbeleuchteten Bereichen zu verstärken, da das Schussrauschen im f5,6-Bild verstärkt wird. Drittens ist die resultierende Strahldichte niedriger als sie sein sollte, wenn ein Bild in den Bildern mit großer Blende gesättigt ist. Letztendlich haben wir uns entschieden, dass diese Korrektur dennoch den besten Kompromiss für die Landnutzungsanalyse darstellt, da sie eine Gewichtung der hellsten Lichter aufgrund der Sättigung im Bild mit großer Blende vermeidet, während die Empfindlichkeit in schwach beleuchteten Bereichen erhalten bleibt.

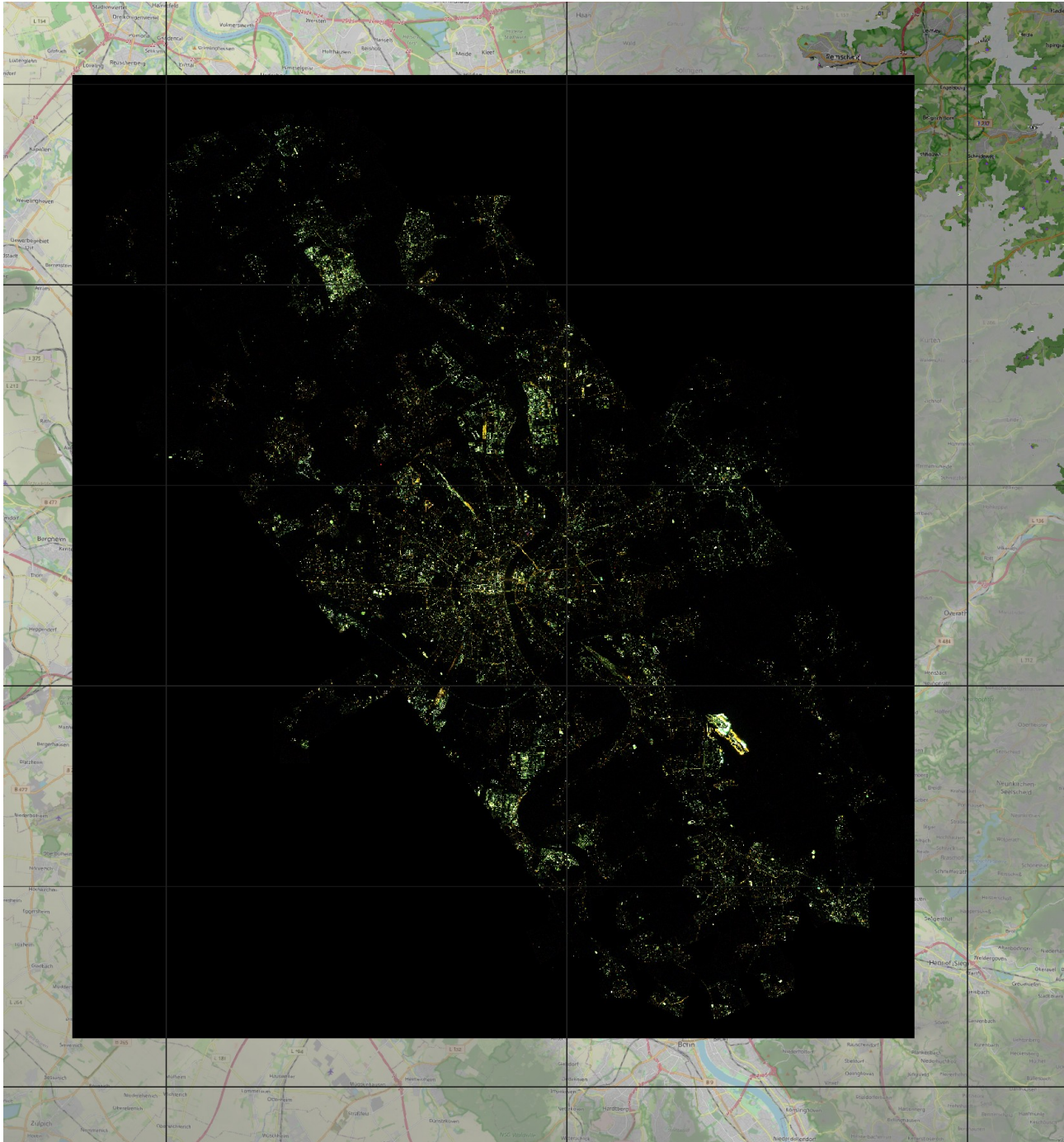


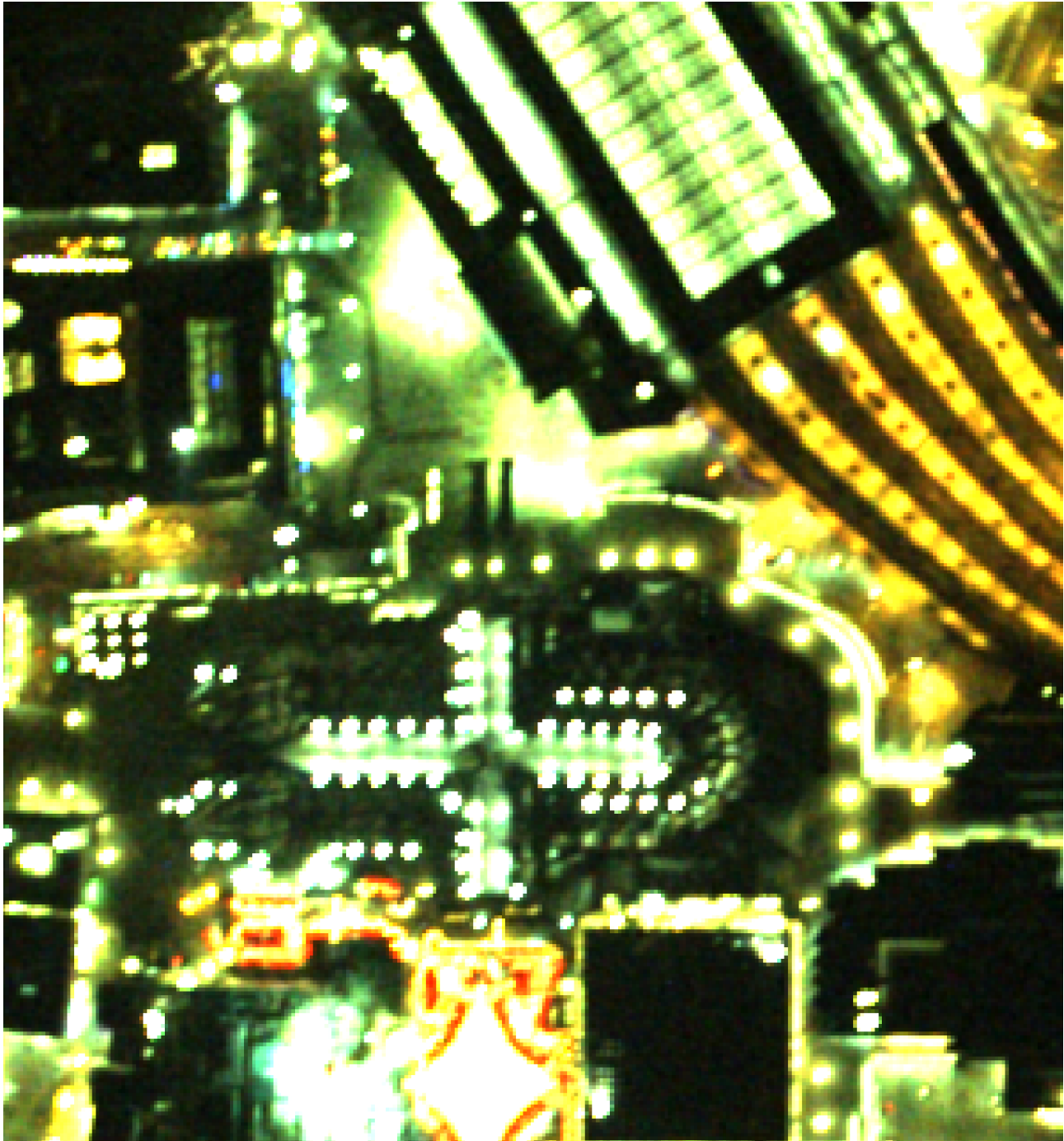
Abbildung 24: RGB D4s f2.8 gesamtes Fluggebiet Köln (XMIN-YMAX: 300-1000)



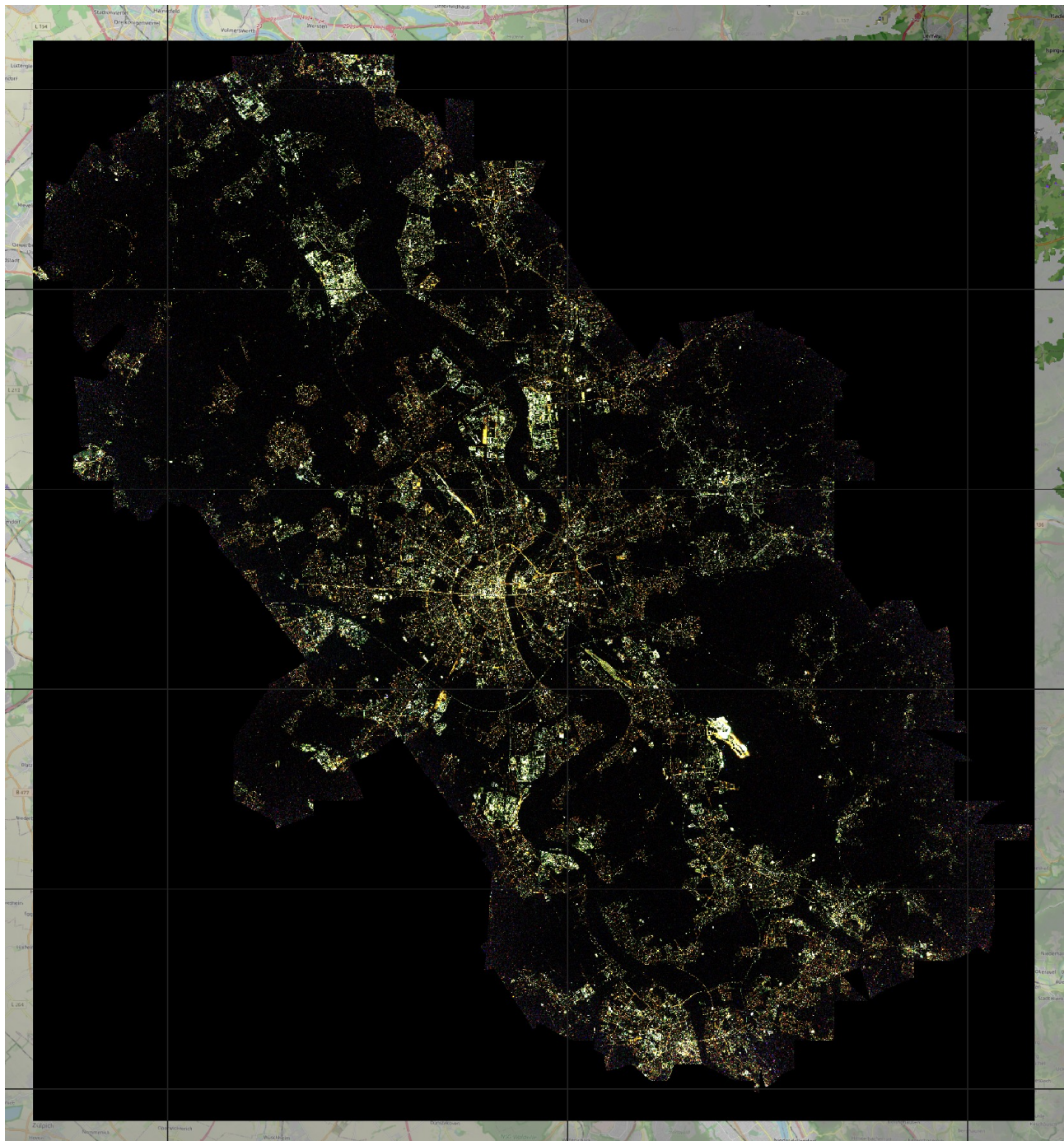


**Abbildung 25:** RGB D4s f2.8 Köln Zentrum (XMIN-XMAX: 300-1000), Maßstab 1:7500



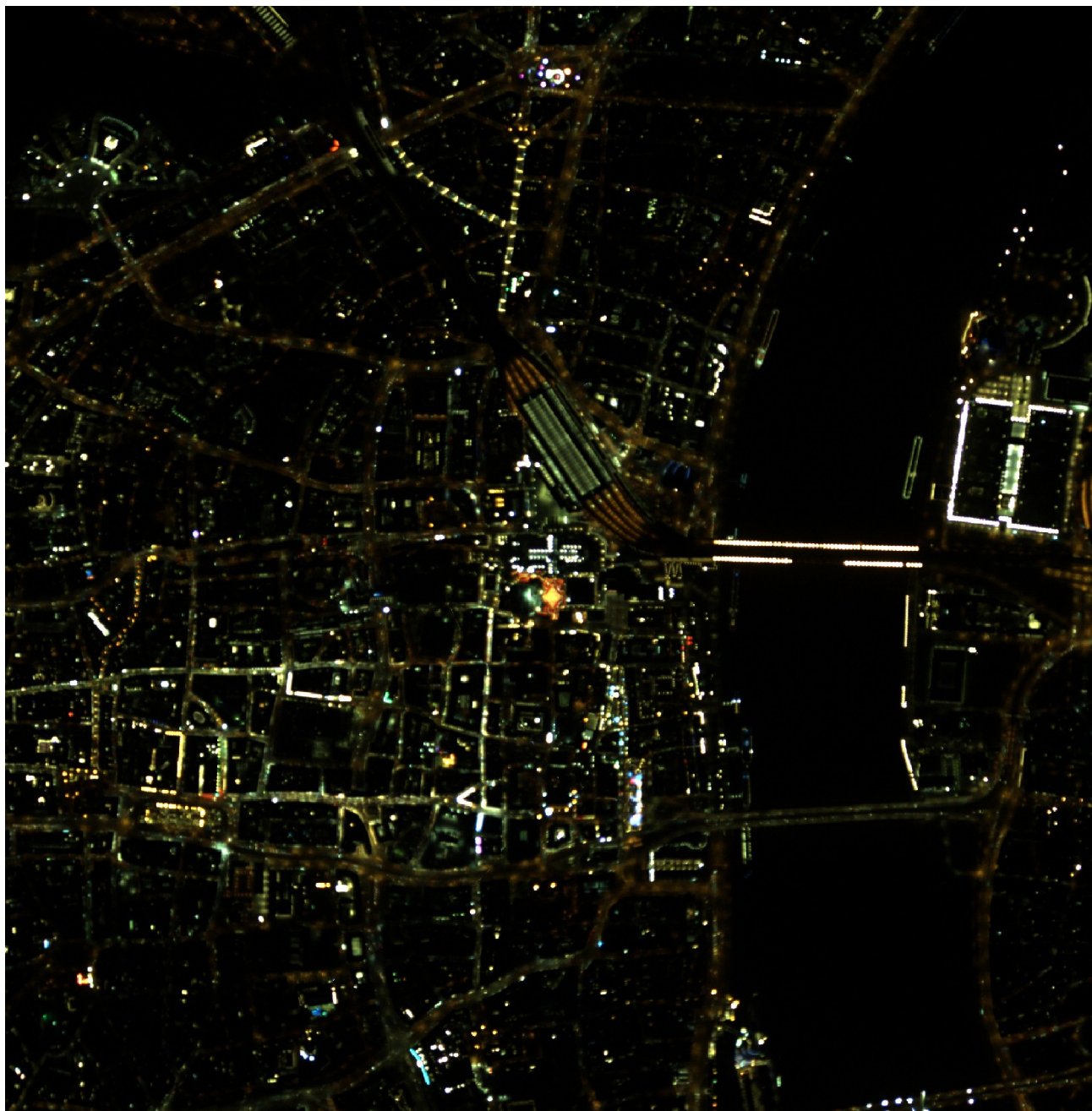


**Abbildung 26:** RGB D4s f2.8 Köln Zentrum (XMIN-XMAX: 300-10000), Maßstab 1:1000



**Abbildung 27:** RGB Z7 f1.8 gesamtes Fluggebiet Köln (XMIN-YMAX: 300-1500)

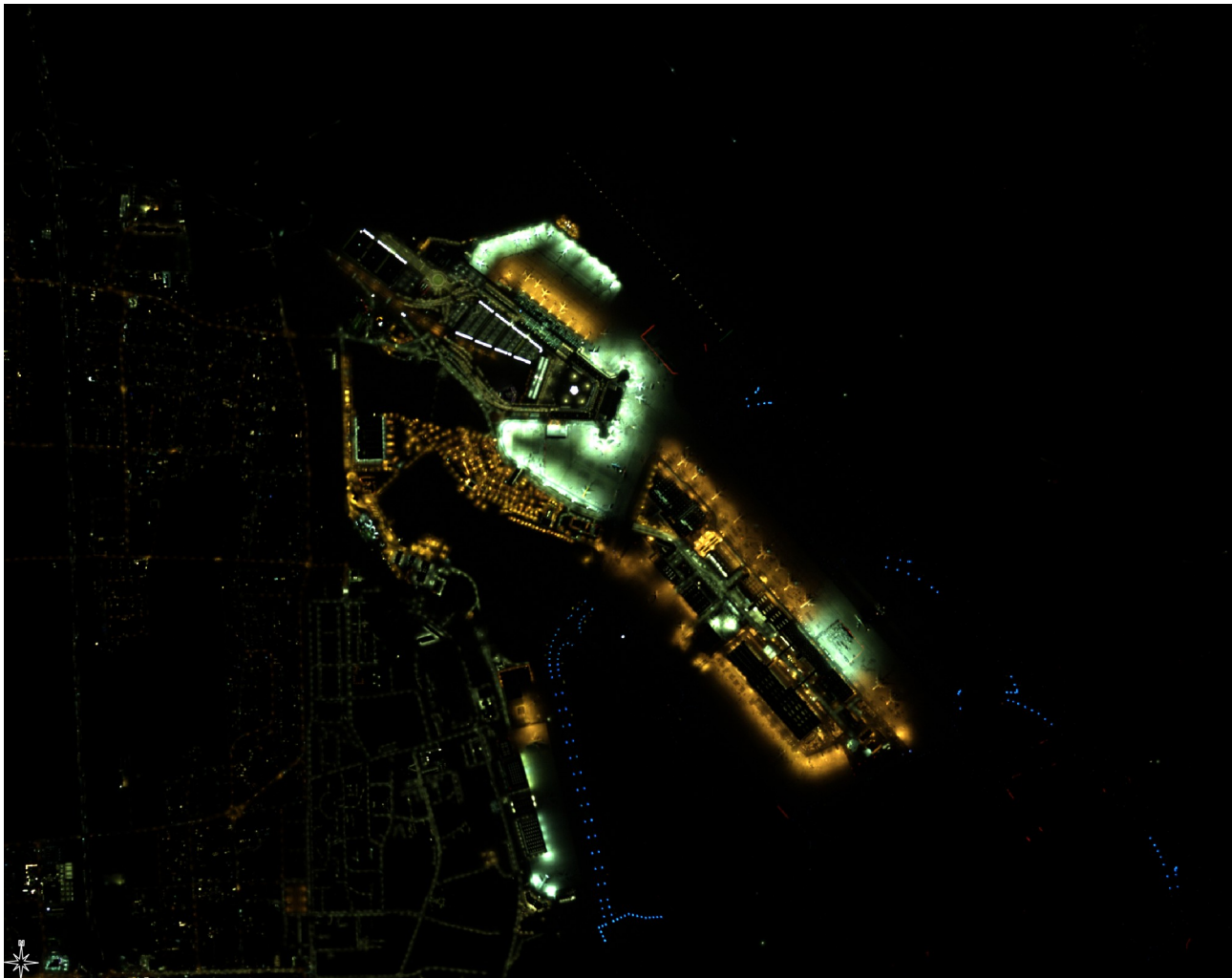




**Abbildung 28:** RGB Z7 f1.8 Köln Zentrum (XMIN-XMAX: 300-15000)



**Abbildung 29:** RGB Z7 f1.8 Köln Zentrum (XMIN-XMAX: 300-10000), Maßstab 1:1000



**Abbildung 30:** RGB Z7 f1.8 Köln Flughafen (XMIN-XMAX: 300-15000), Maßstab 1:10009

### 5.1.7 Datenformat

Das Ausgabeformat erfolgt in GeoTIFF.



### 5.1.8 Auswertung Beleuchtungs- und Landnutzungsklassen

In diesem Abschnitt vergleichen wir die relativen Lichtemissionen von verschiedenen Landflächen und Gebäudetypen. Da das überflogene Gebiet größer ist als das Gebiet der Stadt Köln und die verschiedenen Kameras (UV,RGB,NIR) nicht genau das gleiche Gebiet erfasst haben, werden drei Ergebnisse präsentiert.

1. Ergebnisse für die Stadt Köln allein im sichtbaren RGB-Bereich ( 5.1.8.1 )
2. Ergebnisse für das Gebiet, in dem sich alle fünf Kamerabänder überschneiden ( 5.1.8.2 )
3. Ergebnisse für das gesamte von den Kameras im RGB-Bereich erfasste Gebiet ( 5.1.8.3 )

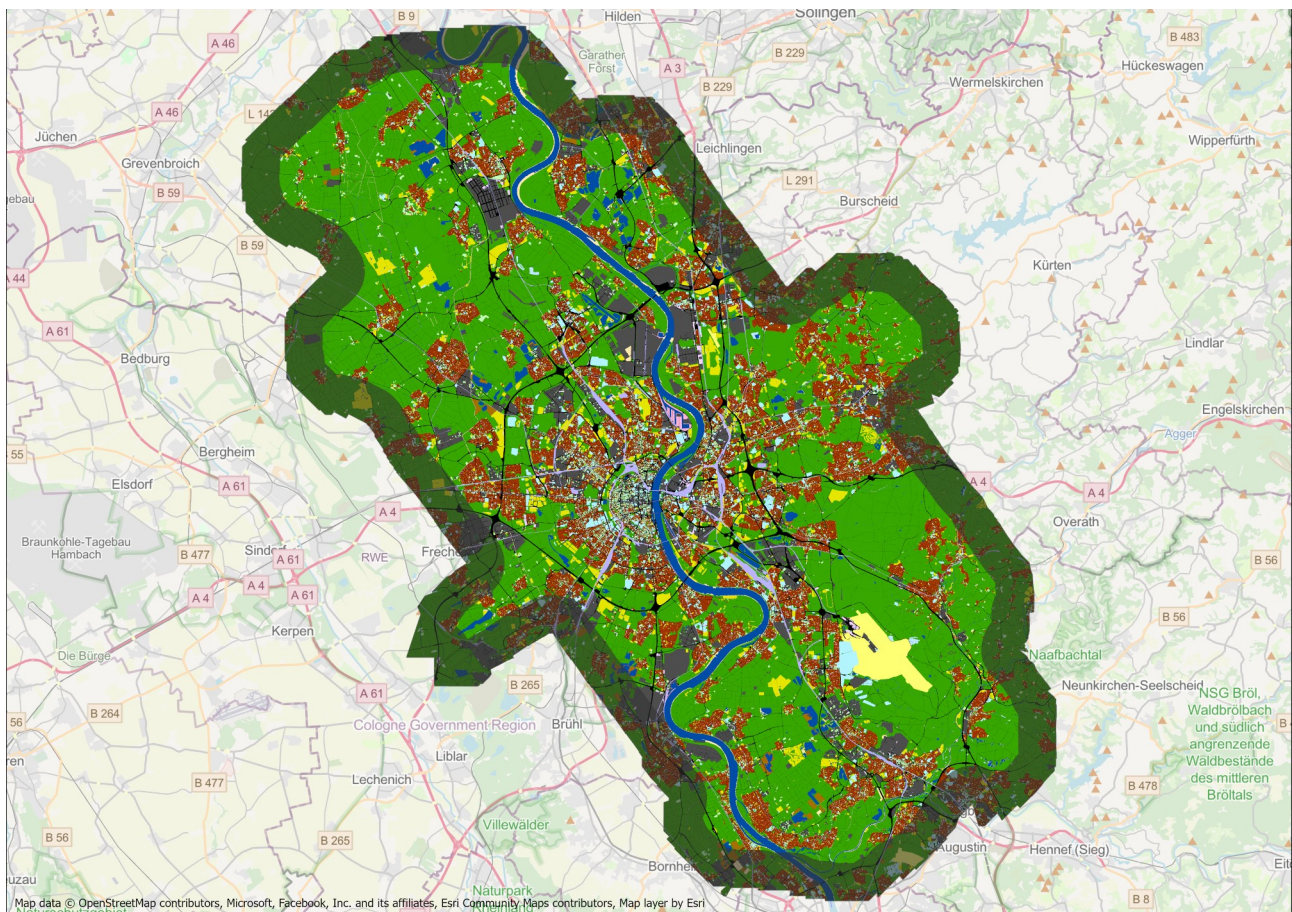


Abbildung 31: Landnutzungsklassifizierung



### 5.1.8.1 Ergebnis Köln für RGB-Bereich

Der Großraum Köln wurde durch die Überlappungsbereiche der Luftbilder definiert. Das Gebiet der Stadt Köln wurde durch Extraktion der Gemeindegrenzen aus dem Datensatz "Verwaltungsgebiete 1:250.000" des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) definiert. Die Landnutzungskategorien wurden durch Reklassifizierung des "Digitalen Basis-Landschaftsmodells (Basis-DLM)" in 15 für unsere Zwecke geeignete Kategorien definiert. Mit dem Geoinformationsprogramm QGIS wurden die gesamten Lichtemissionen jeder dieser Kategorien mit Hilfe der Funktion "Zonale Statistik" summiert. Anschließend haben wir den auf das Mosaik angewandten Offset (300DN) korrigiert, um negative Werte zu vermeiden.

Die erste Gruppe von Ergebnissen ist in Tabelle 2 dargestellt. Mehr als die Hälfte (57,7 %) aller Lichtemissionen im grünen Bereich entfallen auf Gewerbe-, Industrie- und Verkehrsflächen. Dies ist relativ ähnlich zu den Ergebnissen für Berlin, wo Gewerbe-, Industrie-, Verkehrs- und Dienstleistungsflächen für 47,4 % der gesamten Lichtemissionen in diesem Spektralbereich verantwortlich waren. Allerdings waren die relativen Beiträge der beiden wichtigsten Bereiche in den beiden Städten umgekehrt: In Berlin waren Straßen und Autobahnen für 31,8 % der Lichtemissionen verantwortlich, während Gewerbe-, Industrie- und Dienstleistungsflächen 15,6 % verursachten.

Die Wohngebiete sind die zweitwichtigste Quelle der gesamten Lichtemissionen. Dies ist jedoch hauptsächlich auf ihre große Fläche im Vergleich zu anderen Landnutzungsklassen zurückzuführen. Die durchschnittliche Lichtemission von Wohngebieten lag sogar unter dem Durchschnitt der Gesamtfläche von Köln (siehe Tabelle 2). Dies steht in starkem Kontrast zur nächstgrößeren Lichtquelle, dem Flugverkehr. Der Flughafen trägt fast halb so viel zum Gesamtlicht bei, wie alle Wohngebiete zusammen, obwohl er nur etwa ein Zehntel der Gesamtfläche einnimmt.

Es wurde festgestellt, dass der Beitrag zur Gesamtlichtemission der Stadt im blauen Bereich für die Landnutzungsclassse „Grünflächen“ negativ ist. Dieses unphysikalische Ergebnis ist höchstwahrscheinlich auf eine kleine Überkorrektur in unserer Kalibrierung des Dunkelstroms zurückzuführen. Da Grünflächen hauptsächlich unbeleuchtet sind und fast die Hälfte der Fläche Kölns ausmachen, kann ein kleiner Fehler in der Dunkelstromkorrektur große Auswirkungen auf die Summe haben, da der Fehler mit der Gesamtfläche multipliziert wird. Der angegebene Beitrag von Grünflächen aus den anderen Bändern sollte daher ebenfalls so verstanden werden, dass der Beitrag gering ist, nicht genau 2.1 % wie im Fall des grünen Spektralbandes. Noch deutlicher wird dies in Tabelle 3, aus der hervorgeht, dass jeder Quadratmeter Grünfläche im Durchschnitt höchstens ein Zwanzigstel der Helligkeit des Durchschnitts

über die gesamte Fläche Kölns ausmacht. Ähnlich verhält es sich mit den Feuchtgebieten, die nicht nur praktisch unbeleuchtet sind, sondern auch nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtfläche Kölns ausmachen.

Land use type (Landnutzungstyp)	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)	R (%)	G (%)	B (%)
industry and commerce (Industrie und Gewerbe)	41.1	10.1	33.1	36.3	40.9
Traffic (Verkehr)	47.1	11.6	25.2	21.4	19.6
residential area (Wohngebiete)	62.2	15.3	13.1	12.2	12.1
air traffic (Luftverkehr)	6.3	1.5	6.02	6.25	7.51
special function (sonstiges)	13.5	3.3	5.78	5.85	6.30
sports, leisure, recreation (Freizeit und Sport)	20.1	4.9	3.96	4.77	4.36
Railways (Bahnverkehr)	10.5	2.6	4.85	4.24	3.46
mixed use (Gemischte Gebiete)	11.9	2.9	3.42	3.44	3.85
green area (Grünflächen)	167.4	41.1	1.06	2.14	-1.21
Parking (Parkflächen)	4.2	1.0	2.26	2.02	1.83
Water (Wasserflächen)	19.4	4.8	0.69	0.89	0.73
ship traffic (Schiffsverkehr)	0.75	0.18	0.47	0.46	0.44
Bareland (unbebautes Land)	1.3	0.32	0.06	0.07	0.06
Mining (Bergbau)	0.80	0.20	0.016	0.031	0.008
Wetlands (Feuchtgebiete)	0.44	0.11	-0.004	-0.002	-0.02
TOTAL	406.9	100	100	100	100

**Tabelle 2:** Die Tabelle beschreibt den Beitrag zu den gesamten Lichtemissionen der Stadt Köln für jeden Flächennutzungstyp, sortiert nach dem Beitrag des grünen Spektralbandes der RGB Kamera

Land use type (Landnutzungstyp)	Area (km <sup>2</sup> )	Red HF	Green HF	Blue HF
industry and commerce (Industrie und Gewerbe)	41.1	3.28	3.59	4.05
Traffic (Verkehr)	47.1	2.17	1.85	1.69
residential area (Wohngebiete)	62.2	0.86	0.80	0.79
air traffic (Luftverkehr)	6.3	3.92	4.07	4.89
special function (sonstiges)	13.5	1.74	1.76	1.90
sports, leisure, recreation (Freizeit und Sport)	20.1	0.80	0.97	0.89
Railways (Bahnverkehr)	10.5	1.89	1.65	1.34
mixed use (Gemischte Gebiete)	11.9	1.17	1.18	1.32
green area (Grünflächen)	167.4	0.03	0.05	-0.03
Parking (Parkflächen)	4.2	2.20	1.96	1.78
Water (Wasserflächen)	19.4	0.15	0.19	0.15
ship traffic (Schiffsverkehr)	0.7	2.58	2.52	2.39
Bareland (unbebautes Land)	1.3	0.20	0.20	0.18
Mining (Bergbau)	0.8	0.08	0.16	0.04
Wetlands (Feuchtgebiete)	0.4	-0.03	-0.02	-0.18
<b>TOTAL</b>	<b>406.9</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

**Tabelle 3:** Helligkeit der verschiedenen Landnutzungsgebiete im Vergleich zum Durchschnitt für ganz Köln. HF steht für Helligkeitsfaktor. Dieser Wert kann berechnet werden, indem der Gesamtlichtbeitrag aus Tabelle 2 durch die Gesamtfläche geteilt wird.

Die beiden Tabellen 2 und 3 können verwendet werden, um die Bedeutung relativer Gebiete im Hinblick auf Bemühungen zur Reduzierung von Lichtemissionen zu bewerten. Gebiete mit einem hohen Helligkeitsfaktor HF in Tabelle 3 sind im Vergleich zu ihrer Umgebung wahrscheinlich sehr hell, und es kann von großem lokalem Nutzen sein, sich mit ihnen zu befassen (z. B. Flug-

und Schiffsverkehrsgebiete). Was hingegen die gesamten Lichtemissionen (und auch die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen) in Köln betrifft, so sind die größten Verursacher von Flächennutzungen am Anfang der Tabelle 2 zu finden.

Als nächstes betrachten wir die Lichtemissionen der Kölner Gebäude. Die Gebäudetypen sind dem ALKIS (Amtliches Liegenschafts-Kataster Informations-System) entnommen. Diese Beschreibungen sind sehr detailliert und daher haben wir eine Reihe kleinerer Gebäudetypenklassen zu übergreifenden Klassen zusammengefasst. Stadion" und "Sporthalle" sind beispielsweise zusammen mit anderen Typen in der Kategorie "Sport" zusammengefasst. Insgesamt bedecken Gebäude 11% der Fläche Kölns (44,9 km<sup>2</sup>, Tabelle 4) und sind für 19%, 17% bzw. 15% der gesamten roten, grünen und blauen Emissionen der Stadt verantwortlich. Gebäude haben im Durchschnitt deutlich größere Emissionen als die Landfläche Kölns insgesamt, sie stehen mit Helligkeitsfaktoren von 1,60, 1,67 und 1,98 für rote, grüne bzw. blaue Emissionen (Tabelle 5).

Ähnlich wie bei den Ergebnissen für die Flächennutzung stellen wir fest, dass Gewerbe- und Industriegebäude für den größten Beitrag des Lichts verantwortlich sind, wenn Gebäude allein betrachtet werden. Allerdings sind die Helligkeitsfaktoren für Gewerbe- und Industriegebäude geringer als für Industrie- und Gewerbegebiete insgesamt (z. B. 1,8 für Gebäude gegenüber 3,6 für Landnutzung im grünen Spektralband). Dies bedeutet, dass innerhalb von Industrie- und Gewerbegebieten die Bereiche um die Gebäude (z. B. Parkplätze, Arbeitsbereiche im Freien) im Durchschnitt heller sind als die Gebäude selbst. Ein ähnliches Muster ist bei Wohngebäuden zu beobachten, dem Gebäudetyp mit der größten Grundstücksfläche und den zweithöchsten Emissionen als Gebäudeklasse. In diesem Fall ist der Unterschied jedoch nicht ganz so groß (0,64 für Wohngebäude im Vergleich zu 0,80 für Wohngebiete im grünen Spektralband), und im Gegensatz zu fast allen anderen Gebäudetypen sind die Wohngebäude weniger hell als die durchschnittlichen Emissionen von Köln als Ganzes.

Einige der größten Helligkeitsfaktoren treten bei Gebäuden mit sehr kleinen Flächen auf (z. B. 7,2 in grün für Land- und Forstwirtschaft) und sagen daher möglicherweise mehr über ein einzelnes Gebäude oder sogar eines einzelnen Leuchtkörpers aus, als über diese Klasse insgesamt. Unter den Klassen mit größeren Flächen sind Handel, Garage und Gastronomie im Vergleich zu Köln insgesamt besonders hell. Ein überraschendes Ergebnis, zumindest im Vergleich zu den früheren Ergebnissen aus Berlin, ist, dass Historische Gebäude und Religiöse Einrichtungen im Vergleich zur durchschnittlichen Emission für die Stadt nicht sehr hell beleuchtet sind.

Class	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)	Red (%)	Green (%)	Blue (%)
Gewerbe und Industrie	10.3	23.0	31.5	33.5	33.7
Wohngebäude	20.0	44.5	18.4	16.8	14.6
Handel	1.7	3.8	9.2	8.9	9.1
Tiefgarage	2.0	4.6	8.2	7.8	8.1
Lagerung	2.1	4.6	5.7	6.4	6.4
Garage	2.7	6.0	5.6	5.4	5.1
Gastronomie	0.89	2.0	4.8	4.7	4.9
Verkehrsgebäude	0.55	1.22	3.6	4.0	4.2
Versorgung & Entsorgung	0.57	1.28	1.84	1.96	2.03
Bildung und Forschung	1.4	3.1	1.80	1.79	1.58
Land-und Forstwirtschaft	0.17	0.38	1.85	1.66	1.85
Freizeit und Kultur	0.36	0.81	1.92	1.63	2.16
Öffentliches Gebäude	0.86	1.92	1.61	1.52	1.46
Sport	0.38	0.85	1.10	1.31	1.39
Religiöse Einrichtung	0.35	0.78	1.13	0.97	1.26
Gesundheitswesen	0.29	0.64	0.67	0.69	0.66
Beherbergung	0.11	0.25	0.46	0.45	0.56
Historische Gebäude	0.10	0.23	0.24	0.18	0.19
Beherbergung	0.031	0.07	0.14	0.14	0.20
Total	44.86	100	100	100	100

**Tabelle 4:** Die Tabelle zeigt den relativen Beitrag jeder Gebäudetyp-Kategorie zu den gesamten Lichtbeiträgen von Gebäuden in Köln, sortiert in der Reihenfolge der Beiträge im grünen Bereich. Dies ist analog zu Tabelle 2, aber hier wird nur das Licht von Gebäuden berücksichtigt, nicht von der gesamten Landfläche Kölns.

Class	Area (%)	Red HF	Green HF	Blue HF
Beherbergung	0.027	2.96	3.07	4.51
Bildung und Forschung	0.34	0.93	0.97	1.02
Freizeit und Kultur	0.089	3.80	3.38	5.32
Garage	0.67	1.48	1.49	1.68
Gastronomie	0.22	3.83	3.98	4.92
Gesundheitswesen	0.070	1.69	1.81	2.05
Gewerbe und Industrie	2.53	2.19	2.43	2.91
Handel	0.41	3.88	3.93	4.78
Historische Gebäude	0.025	1.68	1.34	1.61

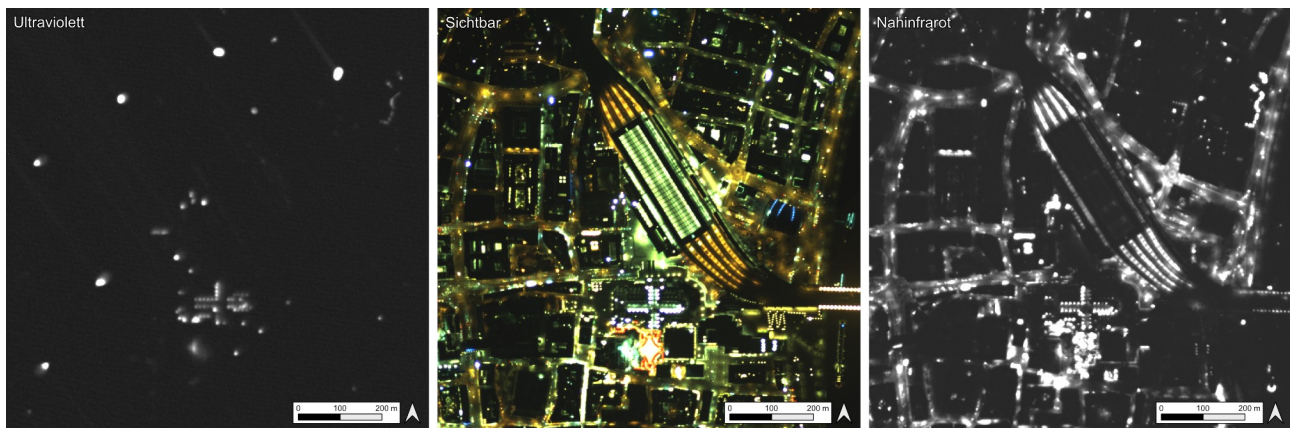
Lagerung	0.51	1.97	2.31	2.75
Land-und Forstwirtschaft	0.042	7.70	7.20	9.53
Öffentliches Gebäude	0.21	1.34	1.32	1.51
Religiöse Einrichtung	0.086	2.33	2.08	3.22
Sonstiges	0.020	4.01	4.12	7.41
Sport	0.094	2.06	2.57	3.23
Tiefgarage	0.50	2.88	2.85	3.54
Verkehrsgebäude	0.13	4.73	5.43	6.76
Versorgung & Entsorgung	0.14	2.30	2.56	3.16
Wohngebäude	4.91	0.66	0.63	0.65
Total	11	1.60	1.67	1.98

**Tabelle 5:** Die Tabelle zeigt die Helligkeit der verschiedenen Gebäudetypen relativ zum Durchschnitt für ganz Köln, alphabetisch sortiert. HF steht für Heligkeitsfaktor und bezieht sich in Tabelle 3 auf den Durchschnitt für die Flächennutzung in Köln, nicht auf das durchschnittliche Gebäude.



### 5.1.8.2 Ergebnis aller Spektralbänder (UV,RGB,NIR)

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem Teil des Fluges untersucht, für die Daten aus allen Wellenlängenbereichen (UV, Blau, Grün, Rot und Nahinfrarot, Abbildung 32) vorliegen. Dieses Gebiet umfasst sowohl Flächen innerhalb als auch außerhalb des Kölner Stadtgebiets. Wie im obigen Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse für die Emissionen von verschiedenen Landflächen erörtert und dann die Gebäude betrachtet. Vor der Betrachtung der Ergebnisse sollte darauf hingewiesen werden, dass verschiedene Beleuchtungsarten unterschiedlich zu den verschiedenen Wellenlängenbereichen beitragen. So werden beispielsweise Gebiete, die im sichtbaren Bereich orange, im IR-Bereich hell und im ultravioletten Bereich nicht vorhanden sind, wahrscheinlich von Natriumhochdruckquellen beleuchtet. Bereiche, die im Sichtbaren vorhanden, aber sowohl im UV als auch im IR dunkel sind (z. B. der Bahnhof), werden wahrscheinlich von LEDs beleuchtet. Und bei den hellen Punktlichtquellen im UV-Bereich handelt es sich höchstwahrscheinlich um Halogenmetall dampflampen. Abgesehen von den Lichtern auf dem Kölner Dom scheinen die meisten dieser hellen UV-Lichter auf schlecht ausgerichtete Flutlichter zurückzuführen zu sein (was durch die Untersuchung von Google Street View-Bildern bestätigt wird).



**Abbildung 32:** Der Kölner Hauptbahnhof und seine Umgebung sind im ultravioletten (links), sichtbaren (Mitte) und nahen Infrarotbereich (rechts) dargestellt.

Tabelle 2 zeigt, dass die relativen Beiträge von rotem und blauem Licht zwar nicht identisch mit dem grünen Spektralband sind, aber im Allgemeinen ähnlich wie diese. Dieses Muster gilt nicht für UV (ultraviolettes) und NIR (nahinfrarotes) Licht, bei denen die relativen Beiträge im Vergleich zum grünen Band oft um ein Vielfaches höher sind (Tabelle 6). So stammt beispielsweise fast die Hälfte aller NIR-Emissionen aus Verkehrs- und Wohngebieten, während


nur etwa ein Fünftel der UV-Emissionen aus solchen Gebieten stammt. Gebiete mit hohen Werten in der Spalte UV/G in Tabelle 6 haben wahrscheinlich einen überdurchschnittlich hohen Anteil an Halogenmetalllampen-Flutlichtlampen, während Gebiete mit hohen Werten in der Spalte NIR/G wahrscheinlich einen überdurchschnittlich hohen Anteil an Natriumdampf-Hochdrucklampen haben. Sport-, Freizeit- und Erholungsgebiete weisen in beiden Kategorien einen außergewöhnlich hohen Anteil auf, was mit der Verwendung dieser beiden Technologien für die Flutlichtbeleuchtung übereinstimmt. Eisenbahnbereiche weisen den bei weitem geringsten relativen Beitrag an UV-Emissionen im Vergleich zu Grünflächen auf. Im Gegensatz dazu haben Wasser- und Schiffsverkehrsflächen einen sehr hohen UV-Anteil im Vergleich zu Grünflächen. Diese beiden Bereiche sollten bei der Identifizierung und dem Ersatz von UV-emittierenden Lichtquellen wahrscheinlich als vorrangig angesehen werden, da Insekten mit Wasserflächen in Verbindung gebracht werden und von UV-Lichtquellen stärker angezogen werden.

Land use type (Landnutzungstyp)	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)	UV (%)	Green (%)	NIR (%)	UV/G	NIR/G
industry and commerce (Industrie und Gewerbe)	57.87	7.8	32.8	34.3	18.8	0.96	0.55
Traffic (Verkehr)	72.29	9.7	15.3	23.3	29.6	0.66	1.27
residential area (Wohngebiete)	106.34	14.3	5.8	13.8	16.0	0.42	1.16
air traffic (Luftverkehr)	18.43	2.5	8.8	5.5	4.7	1.61	0.87
special function (sonstiges)	27.30	3.7	13.5	5.5	9.8	2.47	1.80
sports, leisure, recreation (Freizeit und Sport)	9.62	1.3	1.2	4.9	3.5	0.24	0.71
Railways (Bahnverkehr)	17.99	2.4	3.8	3.6	3.2	1.05	0.88
mixed use (Gemischte Gebiete)	11.92	1.6	0.71	3.2	3.9	0.22	1.23
green area (Grünflächen)	6.69	0.90	3.8	2.7	3.0	1.45	1.14
Parking (Parkflächen)	374.78	50.5	7.5	2.3	6.2	3.31	2.73
Water (Wasserflächen)	31.55	4.3	4.5	0.67	0.65	6.74	0.97
ship traffic	0.70	0.09	1.3	0.32	0.38	4.11	1.17

(Schiffsverkehr)							
Bareland (unbebautes Land)	4.15	0.56	0.75	0.08	0.14	9.36	1.78
Mining (Bergbau)	1.40	0.19	0.10	0.010	0.006	9.13	0.59
Wetlands (Feuchtgebiete)	0.71	0.10	0.14	-0.001	0.012	-104	-9.3
TOTAL	741.7	100	100	100	100	1	1

**Tabelle 6:** Die Tabelle zeigt den relativen Beitrag jedes Landnutzungstyps zur Gesamtlichtleistung im UV-, G (grünes Spektralband) und NIR-Band in der Region, für die Daten aus allen drei Bändern verfügbar sind, sortiert nach dem Beitrag im grünen Band. Die Verhältnisse des relativen Beitrags der UV- und NIR-Band-Gesamtwerte zum grünen Gesamtwert sind ebenfalls dargestellt. Der große negative Wert für Feuchtgebiete ist unphysikalisch und wahrscheinlich auf eine Überkorrektur des Dunkelstroms zurückzuführen, wie weiter oben beschrieben.

Class	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)	UV (%)	Green (%)	IR (%)	UV/G	IR/G
Gewerbe & Industrie	14.89	23.4	19.3	32.63	18.27	0.59	0.56
Wohngebäude	28.96	45.5	10.7	20.31	28.72	0.53	1.41
Handel	2.64	4.1	6.6	10.51	7.26	0.63	0.69
Sonstiges	1.75	2.7	3.0	5.72	3.40	0.53	0.60
Tiefgarage	1.91	3.0	16.0	5.36	7.60	2.98	1.42
Garage	3.87	6.1	10.2	5.26	4.89	1.94	0.93
Lagerung	2.01	3.1	0.67	4.32	1.50	0.15	0.35
Verkehrsgebäude	0.96	1.51	1.93	3.55	1.96	0.54	0.55
Sport	0.67	1.05	2.58	2.28	13.32	1.13	5.85
Versorgung & Entsorgung	0.72	1.13	1.68	1.99	1.18	0.85	0.59
Bildung und Forschung	1.79	2.80	2.20	1.64	1.50	1.34	0.91
Freizeit und Kultur	0.55	0.86	9.81	1.57	4.05	6.26	2.58
Öffentliches Gebäude	1.01	1.59	1.87	1.47	1.55	1.27	1.06
Religiöse Einrichtung	0.45	0.70	3.80	0.89	1.25	4.28	1.41
Land-und Forstwirtschaft	0.89	1.40	0.09	0.83	1.72	0.11	2.08
Gesundheitswesen	0.39	0.61	0.53	0.75	0.47	0.71	0.63
Beherbergung	0.15	0.24	7.29	0.60	0.86	12.20	1.44
Historische Gebäude	0.09	0.14	0.19	0.20	0.32	0.96	1.65
Gastronomie	0.04	0.06	1.50	0.16	0.16	9.43	1.03
Total	63.72	100	100	100	100	1.00	1.00

	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 96/127

**Tabelle 7:** Die Tabelle zeigt den relativen Beitrag jeder Gebäudeklasse zur Gesamtlichtleistung im UV-, Grün- und NIR-Band in der Region, für die Daten aus allen drei Bändern verfügbar sind, sortiert nach dem Beitrag im grünen Band. Die Verhältnisse des relativen Beitrags der UV- und NIR-Band-Gesamtwerte zum grünen Gesamtwert sind ebenfalls dargestellt.

### 5.1.8.3 Ergebnis Gesamtflächenanalyse für den RGB-Bereich

Der Vollständigkeit halber und zum Vergleich mit den Ergebnissen für die Stadt Köln zeigen die Tabellen 8 bis 10 die relativen Beiträge des Lichts für das gesamte von den Kameras im sichtbaren Bereich aufgenommene Gebiet. Sie sind analog zu den Tabellen 2 bis 4.

Land use type (Landnutzungstyp)	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)	R (%)	G (%)	B(%)
industry and commerce (Industrie und Gewerbe)	98.72	7.6	31.9	35.2	40.4
Traffic (Verkehr)	122.94	9.4	24.3	21.5	20.1
residential area (Wohngebiete)	186.40	14.3	18.4	16.7	16.2
air traffic (Luftverkehr)	46.48	3.6	4.66	5.42	4.81
special function (sonstiges)	27.27	2.1	5.08	5.16	5.52
sports, leisure, recreation (Freizeit und Sport)	689.24	53.0	3.30	3.97	0.61
Railways (Bahnverkehr)	29.78	2.3	3.65	3.63	4.02
mixed use (Gemischte Gebiete)	9.64	0.74	2.62	2.73	3.26
green area (Grünflächen)	17.13	1.32	2.86	2.50	2.14
Parking (Parkflächen)	10.14	0.78	2.35	2.22	2.14
Water (Wasserflächen)	50.05	3.8	0.48	0.62	0.42
ship traffic (Schiffsverkehr)	0.82	0.06	0.22	0.22	0.21
Bareland (unbebautes Land)	7.09	0.54	0.108	0.109	0.090
Mining (Bergbau)	4.52	0.35	0.028	0.041	0.030
Wetlands (Feuchtgebiete)	0.80	0.06	-0.002	0.000	-0.009
<b>TOTAL</b>	<b>1301.02</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

**Tabelle 8:** Die Tabelle zeigt den Beitrag zu den gesamten Lichtemissionen der gesamten beobachteten Fläche (einschließlich der Flächen außerhalb von Köln) für jede Landnutzungsart, sortiert nach dem Beitrag des grünen Spektralbandes.

Land use type (Landnutzungstyp)	Area (km <sup>2</sup> )	Red HF	Green HF	Blue HF
industry and commerce (Industrie und Gewerbe)	98.72	4.21	4.64	5.33
Traffic (Verkehr)	122.94	2.57	2.27	2.13
residential area (Wohngebiete)	186.40	1.28	1.17	1.13
air traffic (Luftverkehr)	46.48	1.31	1.52	1.35
special function (sonstiges)	27.27	2.42	2.46	2.63
sports, leisure, recreation (Freizeit und Sport)	689.24	0.06	0.07	0.012
Railways (Bahnverkehr)	29.78	1.59	1.59	1.76
mixed use (Gemischte Gebiete)	9.64	3.53	3.69	4.39
green area (Grünflächen)	17.13	2.17	1.90	1.62
Parking (Parkflächen)	10.14	3.02	2.85	2.75
Water (Wasserflächen)	50.05	0.12	0.16	0.11
ship traffic (Schiffsverkehr)	0.82	3.53	3.48	3.33
Bareland (unbebautes Land)	7.09	0.20	0.20	0.17
Mining (Bergbau)	4.52	0.08	0.12	0.09
Wetlands (Feuchtgebiete)	0.80	-0.03	-0.0003	-0.14

**Tabelle 9:** Die Tabelle zeigt die Helligkeit der verschiedenen Landnutzungsgebiete im Verhältnis zum Durchschnitt des gesamten beobachteten Gebiets. HF steht für Helligkeitsfaktor. Dieser Wert kann berechnet werden, indem der Gesamtlichtbeitrag aus Tabelle 10 durch die Gesamtfläche.



Class	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)	Red (%)	Green (%)	Blue (%)
Gewerbe und Industrie	24.53	23.2	30.6	32.9	34.4
Wohngebäude	48.81	46.19	27.0	24.2	21.4
Handel	3.94	3.73	10.6	10.5	10.8
Sonstiges	2.89	2.73	5.0	5.1	5.3
Garage	6.39	6.04	4.5	4.4	4.1
Lagerung	4.09	3.87	3.9	4.4	4.7
Tiefgarage	2.91	2.75	4.5	4.3	4.5
Verkehrsgebäude	1.33	1.26	2.2	2.4	2.6
Sport	1.17	1.10	2.1	2.3	1.96
Versorgung und Entsorgung	1.28	1.21	1.86	2.0	2.3
Bildung und Forschung	2.67	2.53	1.64	1.66	1.52
Land-und Forstwirtschaft	1.94	1.83	1.51	1.37	1.35
Öffentliches Gebäude	1.35	1.28	1.29	1.25	1.22
Freizeit und Kultur	0.80	0.75	1.23	1.14	1.49
Religiöse Einrichtung	0.65	0.62	0.80	0.70	0.84
Gesundheitswesen	0.53	0.50	0.57	0.60	0.59
Beherbergung	0.19	0.18	0.37	0.37	0.52
Historische Gebäude	0.15	0.143	0.21	0.17	0.20
Gastronomie	0.07	0.064	0.146	0.146	0.18
Total	105.67	100	100	100	100

**Tabelle 10:** Die Tabelle zeigt den relativen Beitrag jeder Gebäudetyp-Kategorie zu den gesamten Lichtbeiträgen von Gebäuden im gesamten beobachteten Gebiet, sortiert in der Reihenfolge der Beiträge im grünen Bereich. Dies ist analog zu Tabelle 8. Es ist aber zu beachten, dass hier nur das Licht von Gebäuden betrachtet wird, nicht von der gesamten analysierten Landfläche.

### 5.1.9 Analyse der Abstrahlcharakteristik

Eine weitere Frage die bearbeitet und untersucht wurde, war die Emissionscharakteristik verschiedener Lampentypen und ob der Beitrag in verschiedene Emissionswinkel von den Landnutzungsklassen abhängt. Dafür wurden aus dem vorhandenen Datenmaterial der RGB-Kameras Mosaik für verschiedene Emissionswinkel erstellt. Als Zielwinkel wurde ein Elevationswinkel von 45 Grad und eine Reihe von Azimutalwinkeln, die den 8 Haupthimmelsrichtungen entsprechen, ausgewählt. Für jeden Mosaik-Datenpunkt wurde aus der diskreten Anzahl von Fotos das Pixel ausgewählt, dass der 45-Grad-Emission für diese Himmelsrichtung am nächsten kam. Nach der Erstellung der Mosaik wurde am Rand eine 2 km lange Pufferregion aus der Analyse entfernt, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die Daten in dieser Pufferregion fast immer aus einer sehr begrenzten Anzahl von Winkeln aufgenommen wurden.

Außerdem wurden die 9 Mosaik (8 Himmelsrichtungen und Zenit) nur auf der Grundlage der Z7-Kamera und nicht der Kombination aus DS4- und Z7-Kamera erstellt, da diese ein größeres Sichtfeld und damit mehr überlappende Bildbereiche hat.

Bevor die Ergebnisse vorgestellt werden, ist es wichtig zu beachten, dass die winkelabhängigen Daten überwiegend in den äußeren Bildbereichen aufgenommen wurden, wo die Vignettierungskorrektur am größten ist. Dies bedeutet, dass die Kalibrierungsfehler in diesem Bereich am größten sind. Insbesondere in Regionen mit wenig Kunstlicht wird ein Fehler bei der Nullpunktkorrektur oder das Vorhandensein von Skyglow durch die Vignettierungskorrektur verstärkt.

Die mittlere Strahldichte in korrigierten digitalen Zahlen ist für das grüne Spektralband in Tabelle 11 dargestellt. Für alle Landnutzungsklassen beobachten wir eine größere Emission in Richtung der schrägen Winkel, im Vergleich zur Richtung des Zenits. Interessanterweise ist dieses Verhältnis bei Parkplätzen und Flugbetriebsflächen am geringsten. Dies deutet darauf hin, dass das nach oben gerichtete Licht in erster Linie durch diffuse (lambertsche) Reflexion von der Oberfläche und nicht durch tatsächliche direkt nach oben gerichtete Emissionen verursacht wird. Wenn das Verhältnis zwischen Neigung und Zenit zunimmt, bedeutet dies, dass ein größerer Anteil des Lichts direkt in den Himmel abgestrahlt wird, anstatt von der Bodenoberfläche reflektiert zu werden.

Landnutzungsklassen	Area (km <sup>2</sup> )	Mean zenith	Mean slant	Slant/zenith
Wetlands (Feuchtgebiete)	0.70	5.3	10.7	2.02
green area (Grünflächen)	434.81	8.2	13.6	1.66
Bareland (unbebautes Land)	4.43	16.4	24.4	1.48
Mining (Bergbau)	2.67	11.4	16.8	1.47
Water (Wasserflächen)	39.04	17.4	22.9	1.31
mixed use (Gemischte Gebiete)	20.87	138	170	1.23
special function (sonstiges)	19.26	213	237	1.11
residential area (Wohngebiete)	122.71	100	109	1.10
industry and commerce (Industrie und Gewerbe)	68.11	415	449	1.08
sports, leisure, recreation (Sport und Freizeit)	33.43	135	143	1.06
Traffic (Verkehrsflächen)	83.31	212	223	1.05
ship traffic Schiffsverkehr	0.75	322	337	1.05
Railways (Bahnverkehr)	13.13	192	199	1.04
air traffic (Luftverkehr)	8.73	359	371	1.03
Parking (Autoparkflächen)	7.20	254	259	1.02
Total	859.14	95.1	105.2	1.11

*Tabelle 11: Verhältnis zwischen der Lichtemission im Zenit und der Lichtemission bei großen Neigungswinkeln für verschiedene Landnutzungsklassen. Die Tabelle ist vom größten zum kleinsten Verhältnis zwischen Schräg- und Zenitwerten geordnet. Der im vorigen Abschnitt verwendete "Helligkeitsfaktor" kann durch Division der Werte für jede Landnutzung durch den Mittelwert in der Gesamtspalte ermittelt werden.*

Die größten Verhältnisse zwischen Schräg- und Zenitemissionen treten in den dunkelsten Regionen auf. Hierfür gibt es zwei mögliche Erklärungen. Erstens könnte es sich einfach um ein Artefakt handeln, das, wie oben erwähnt, durch systematische Fehler verursacht wird. Zweitens könnte es auf die Streuung des Lichts in der Atmosphäre (Skyglow) in die Sichtlinie der Kamera zurückzuführen sein. Dieser Effekt würde sich in schwach beleuchteten Gebieten relativ stark auswirken, da das Streulicht im Vergleich zum direkten Licht recht schwach ist. In Anbetracht der Grenzen der Methode sind wir derzeit nicht in der Lage, zwischen diesen beiden Effekten zu unterscheiden. Wir stellen jedoch fest, dass der Unterschied zwischen den Werten für die Neigung und den Zenit den gleichen Wert von 5.4 für Feuchtgebiete, Grünflächen, Bergbau und Wasserflächen hat, so dass das Verhältnis für diese Klassen wahrscheinlich eher auf einen dieser systematischen Effekte zurückzuführen ist als auf einen

Unterschied zwischen dem nach unten zur Erde und dem nach oben zum Himmel abgestrahlten Licht.

Das Verhältnis zwischen schrägen und Zenit-Emissionen ist bei einzelnen Gebäuden etwa doppelt so groß (1.21 im grünen Spektralbereich) wie bei der Flächennutzung (1.11). Dies ist zu erwarten, da Schilder, Fenster und fehlgeleitete Flutlichter alle einen Teil ihres Lichts direkt in die Atmosphäre abstrahlen. Es ist etwas überraschend, dass Herbergen und Gastronomie im Vergleich zu anderen Gebäuden relativ niedrige Neigungs-/Zenit-Verhältnisse aufweisen, da diese Gebäude anscheinend häufig Flutlichter verwenden. Im Vergleich zu den anderen Gebäudetypen weisen diese beiden Klassen jedoch auch die größte Standardabweichung (relativ zu ihrem Mittelwert) bei der Helligkeit in den acht Himmelsrichtungen auf, mit besonders großen Emissionen in Richtung Südosten und Westen (für Herbergen) sowie Süden, Südosten und Osten (für Gastronomie). Es könnte also sein, dass schlecht ausgerichtete Scheinwerfer sowohl in Richtung Nadir als auch in Richtung großer Schrägwinkel emittieren, oder dass diese Gebäude zusätzlich zu den Scheinwerfern zusätzlich Fassadenscheinwerfer verwenden, die direkt nach oben strahlen. Der einzige Gebäudetyp mit einem Verhältnis zwischen Neigung und Zenit von weniger als eins war die Religiöse Einrichtung, was auf einen beträchtlichen Einsatz von auf den Zenit gerichteten Scheinwerfern, also Fassadenscheinwerfern, schließen lässt.

Class	Area (km <sup>2</sup> )	Mean zenith	Mean slant	Slant/ zenith
<b>Gesundheitswesen</b>	0.37	240	353	1.47
<b>Bildung und Forschung</b>	1.99	114	166	1.47
<b>Wohngebäude</b>	33.45	87	123	1.41
<b>Öffentliches Gebäude</b>	1.05	171	240	1.41
<b>Historische Gebäude</b>	0.12	230	289	1.26
<b>Lagerung</b>	2.88	245	301	1.23
<b>Gewerbe und Industrie</b>	16.69	283	337	1.19
<b>Versorgung und Entsorgung</b>	0.80	316	371	1.17
<b>Handel</b>	2.86	485	564	1.16
<b>Verkehrsgebäude</b>	0.89	469	537	1.14
<b>Gastronomie</b>	0.05	404	448	1.11
<b>Sport</b>	0.78	451	498	1.10
<b>Tiefgarage</b>	2.40	362	385	1.07
<b>Land-und Forstwirtschaft</b>	1.14	193	205	1.06


Garage	4.70	169	177	1.05
Herbergen	0.17	435	449	1.03
Sonstiges	1.97	407	417	1.02
Freizeit und Kultur	0.58	333	337	1.01
Religiöse Einrichtung	0.48	256	214	0.83

**Tabelle 12:** Verhältnis zwischen der Lichtemission in Richtung Zenit im Vergleich zur Lichtemission bei großen Schrägwinkeln für verschiedene Gebäudetypen. Die Tabelle ist vom größten zum kleinsten Verhältnis zwischen Schräg- und Zenitwerten geordnet.

### Ergebnis:

- Schräge Emission ist im Durchschnitt 11 % heller als Nadir (in grün)
- Das Verhältnis Schräge/Nadir ist bei weniger hell beleuchteten Gebieten höher (evtl. ein systematischer Fehler, aufgrund von sehr kleinen Signallevel)
- Park- und Flugplätze sind die dem Lambertschen Prinzip am nächsten kommenden Abstrahlflächen
- Insgesamt nur wenig Veränderung des Beleuchtungsanteils in Abhängigkeit von der Flächennutzung



	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 104/127

### 5.1.10 Auswertung Potsdam

Die Auswertung der Bildaufnahmen aus Potsdam bezieht sich ausschliesslich auf eine Bildauswertung zur Belichtungseinstellung. Siehe

Anhang Kapitel 6.2 und für Belichtungssteuerung Kapitel 6.4.

#### Ergebnis:

Dieser Flug wurde zum Testen von verschiedenen ISO und Belichtungseinstellungen durchgeführt. Es wurden jeweils für verschiedene Einstellungen die Unter- (Blau) und Übersteuerungen (Rot) analysiert. Allgemein ist die nach oben gerichtete Beleuchtung im Raum Potsdam geringer als in Berlin, aber es ist trotzdem für einige Gebäude und deren Beleuchtungsstärke ein hoher Dynamikbereich nötig. Es ist zu empfehlen, für einen optimierten Dynamikbereich, unterschiedliche Einstellungen für beide Städte zu nutzen. Die beiden Nikon Kameras zeigen aufgrund der unterschiedlichen Sensor Pixelgrößen eine unterschiedliche Empfindlichkeit und Rauschverhalten. Es ist davon auszugehen das auch hier unterschiedliche Belichtungseinstellungen nötig sind.

### 5.1.11 Auswertung Berlin

Die Auswertung Bildaufnahmen aus Berlin bezieht sich ausschliesslich auf eine Bildauswertung zur Belichtungseinstellung. Siehe

Bildauswertung zum Auflösungsvermögen siehe Anhang Kapitel 6.2 und 6.5.

Bildauswertung zur Übersteuerung siehe Anhang Kapitel 6.6.

#### Ergebnis:

Für diesen Flug wurden einheitliche Belichtungseinstellungen für beide NIKON Kameras ausgewählt. Es zeigt sich sehr deutlich, das die Kamera Nikon D4s eine höhere Empfindlichkeit hat. Beide Kameras können für Aufnahmen bei einer helleren Beleuchtungsumgebung, wie Berlin, mit einer geringeren Belichtungszeit (1/100 sec) genutzt werden. Es sollte für die Kamera Nikon D4s ein anderer ISO von 1600 gewählt werden. Bei der Analyse des Auflösungsvermögen zeigt sich im Zoom ein ähnliches Auflösungsvermögen beider Nikon Kameras, trotz des sehr viel größeren Öffnungswinkels bzw. kleinerer Brennweite der Nikon Z7. Lediglich bei kleineren Blendenöffnungen ist ein höherer Rauschanteil bei der Nikon Z7 sichtbar.

### 5.1.12 Ermittlung Flugparameter Köln


#### Ergebnis:

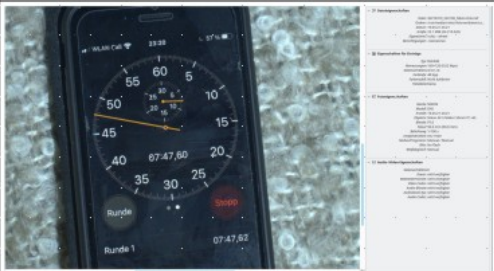

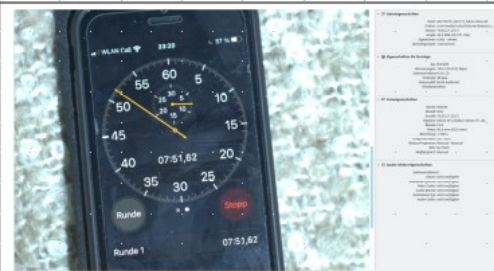

Wie schon vorher zur Bestimmung der Objektive wurden folgende Parameter zur Kamerakonfiguration für Köln ermittelt:

Nikon D4s	Nikon Z7
RGB-Kamera 50mm F1.4, 10ms	RGB-Weitwinkelkamera 20mm F1.8, 10 ms
<b>Image specification:</b> <b>4928 x 3280 pixel</b> ~ 0.44 x 1.00 m/pixel; => 10ms; FOV 2151 x 1436 m ~ 0.44 x 1.57 m/pixel; => 20ms; FOV 1979 x 1437 m	<b>Image specification:</b> <b>8256 x 5504 pixel</b> ~ 0.65 x 1.22 m/pixel; => 10ms; FOV 5383 x 3590 m ~ 0.65 x 1.78 m/pixel; => 20ms; FOV 5383 x 3590 m
<b>track distance:</b> <b>1506m with 30% overlap</b>	<b>track distance:</b> <b>3768 m with 30% overlap</b>
ProEM-HS1024BX3	Kinetix
UV-Lense 16mm F2.8, 40ms	NIR-Lense 24mm F1.8, 10ms
<b>Image size:</b> <b>1024 x 1024 pixel</b> ~ 2.43 x 4.7 m/pixel; => 40ms; FOV 2492 x 2495m ~ 2.43 x 3.0 m/pixel; => 10ms; FOV 2492 x 2493 m	<b>Image specification:</b> <b>3200 x 3200 pixel</b> ~ 0.81 x 3.08 m/pixel; => 40ms; FOV 2598 x 2601 m ~ 0.81 x 1.38 m/pixel; => 10ms; FOV 2598 x 2599 m
<b>track distance:</b> <b>1745m with 30% overlap</b>	<b>track distance:</b> <b>1819 m with 30% overlap</b>

## 6. Anhang

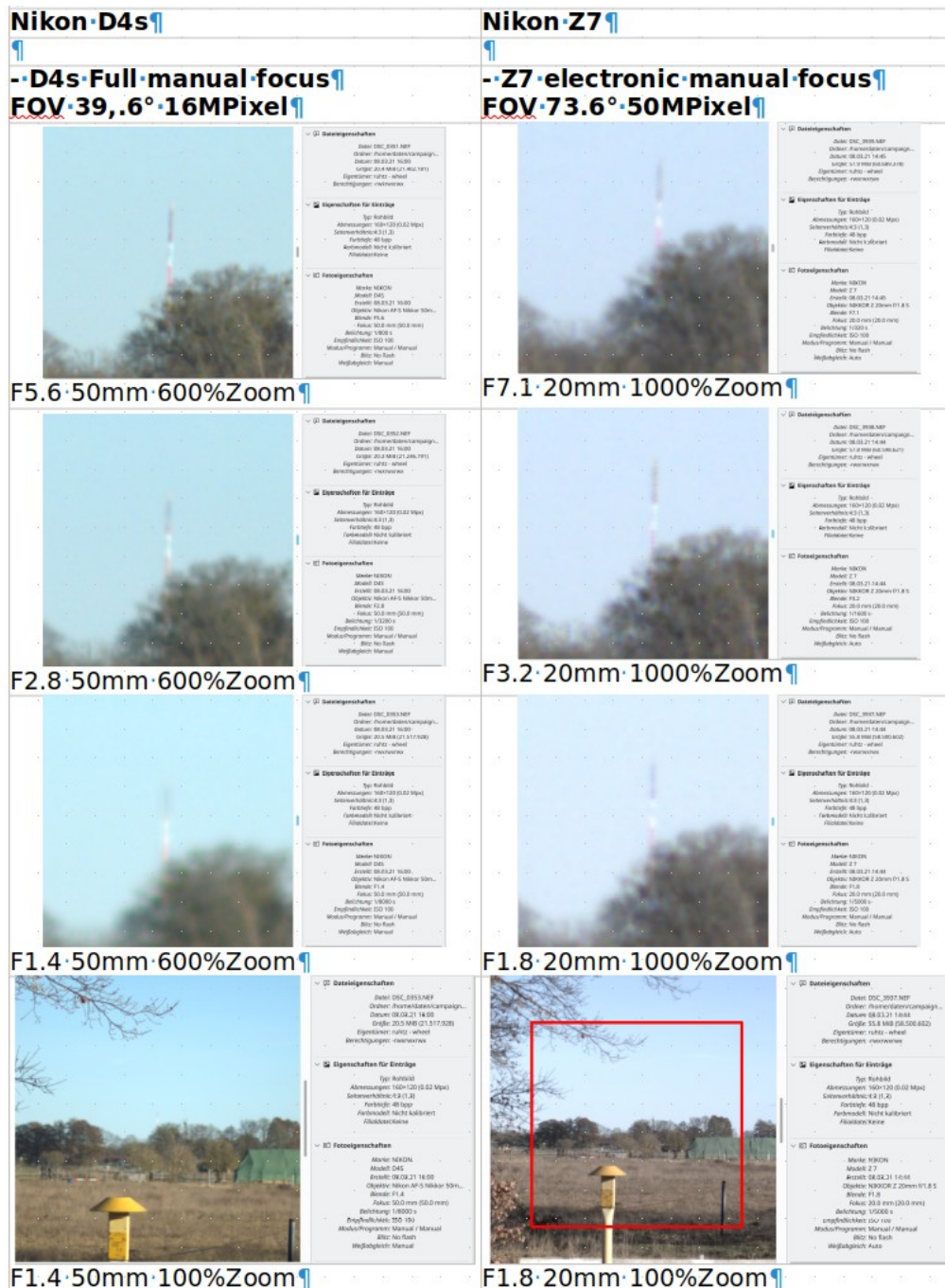
### 6.1 Timing Test (20210319)

Nikon D4s	Nikon Z7
<p>Meinberg capture time server protocol  usb0.txt Ch0: D4s  usb1.txt Ch0: ProEM  usb2.txt Ch0: Meinberg PPS</p>	<p>Ch1: Z7 (channels maybe mismatched)  Ch1: Kinetix  Ch1: PPS time /4</p>
 <p>USB0:  CH0 19.03.21 22:20:56.2830165  USB1:  CH0 19.03.21 22:20:56.2000003  USB2:  CH0 19.03.21 22:20:20.0000000</p>	 <p>CH1 19.03.21 22:20:56.2929148  CH1 19.03.21 22:20:56.2000346  CH1 19.03.21 22:20:20.2000001</p>
 <p>CH0 19.03.21 22:21:00.2807319  CH0 19.03.21 22:21:00.2000056  CH0 19.03.21 22:20:21.0000000</p>	 <p>CH1 19.03.21 22:21:00.2932960  CH1 19.03.21 22:21:00.2000384  CH1 19.03.21 22:20:20.2000001</p>
 <p>CH0 19.03.21 22:21:04.2800250  CH0 19.03.21 22:21:04.2000054  CH0 19.03.21 22:21:04.0000050</p>	 <p>CH1 19.03.21 22:21:04.2929447  CH1 19.03.21 22:21:04.2000351  CH1 19.03.21 22:21:04.2000051</p>


Nikon-D4s	Nikon-Z7
 <p>CH0 19.03.21 22:21:08.2808585</p> <p>CH0 19.03.21 22:21:08.2000003</p> <p>CH0 19.03.21 22:21:08.0000000</p>	 <p>CH1 19.03.21 22:21:08.2930421</p> <p>CH1 19.03.21 22:21:08.2000338</p> <p>CH1 19.03.21 22:21:08.2000001</p>
 <p>CH0 19.03.21 22:21:12.2820106</p> <p>CH0 19.03.21 22:21:12.2000003</p> <p>CH0 19.03.21 22:21:12.0000000</p>	 <p>CH1 19.03.21 22:21:12.2925398</p> <p>CH1 19.03.21 22:21:12.2000305</p> <p>CH1 19.03.21 22:21:12.2000001</p>

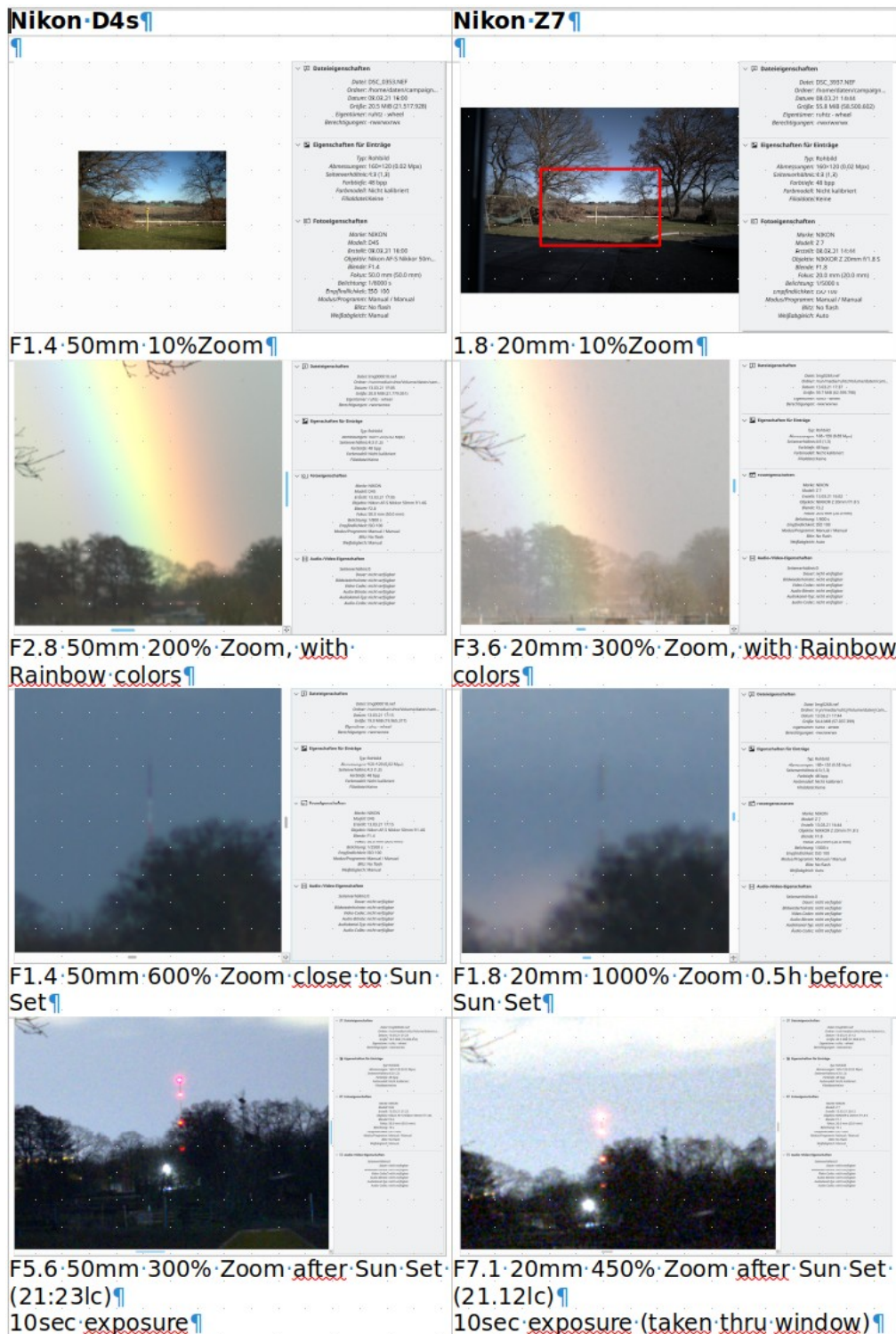


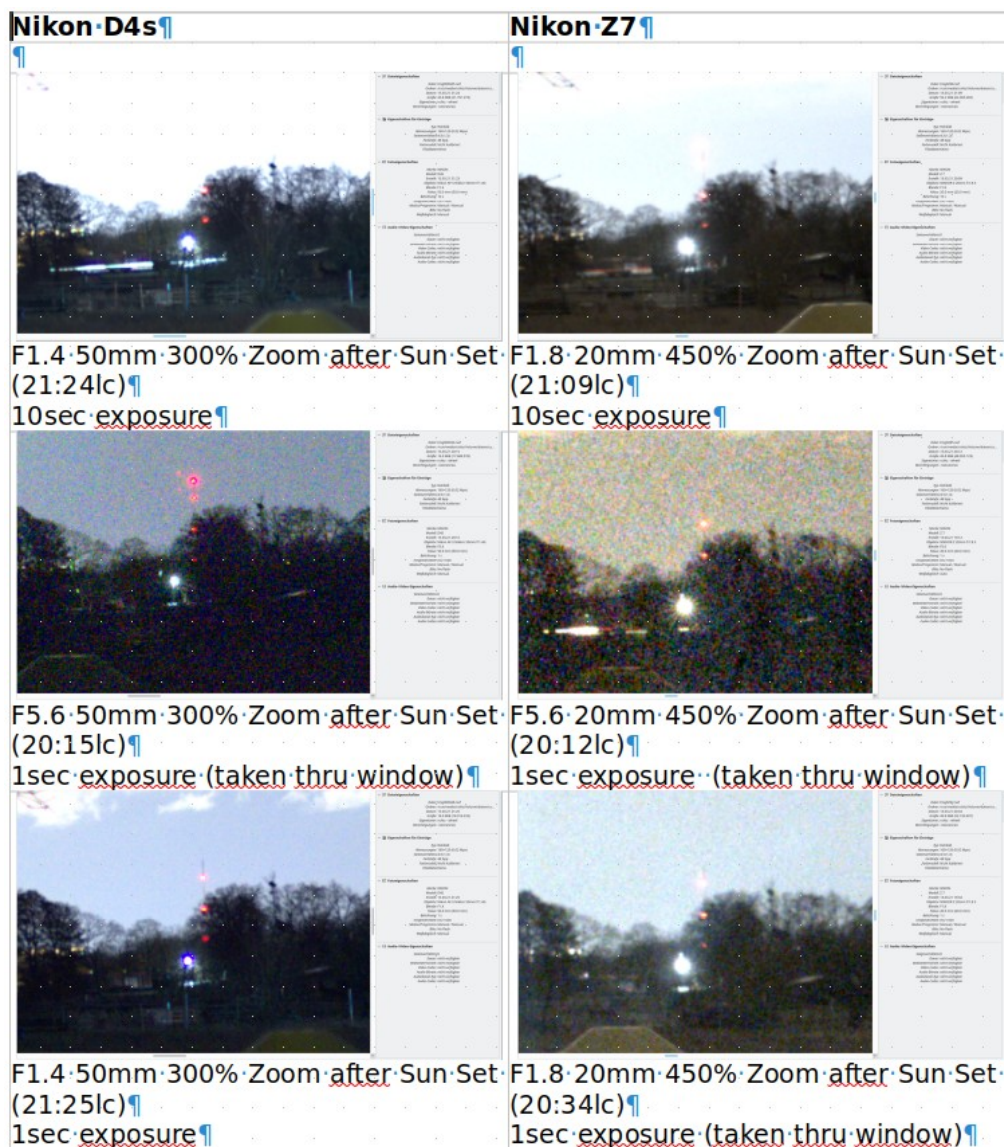
## 6.2 Ground level Tests (20210308, 20210313)





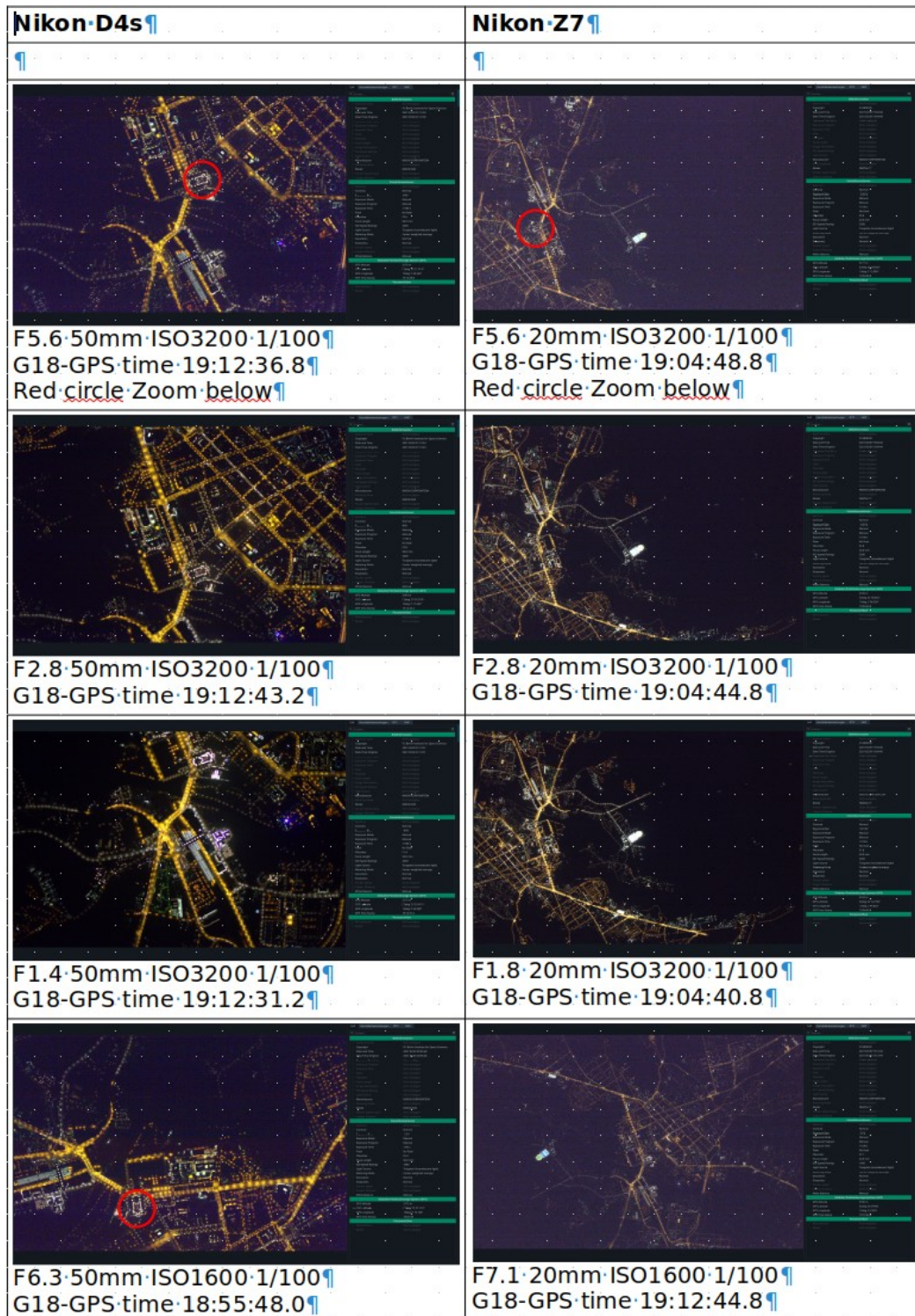
<div>Freie Universität  Berlin</div>	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 109/127







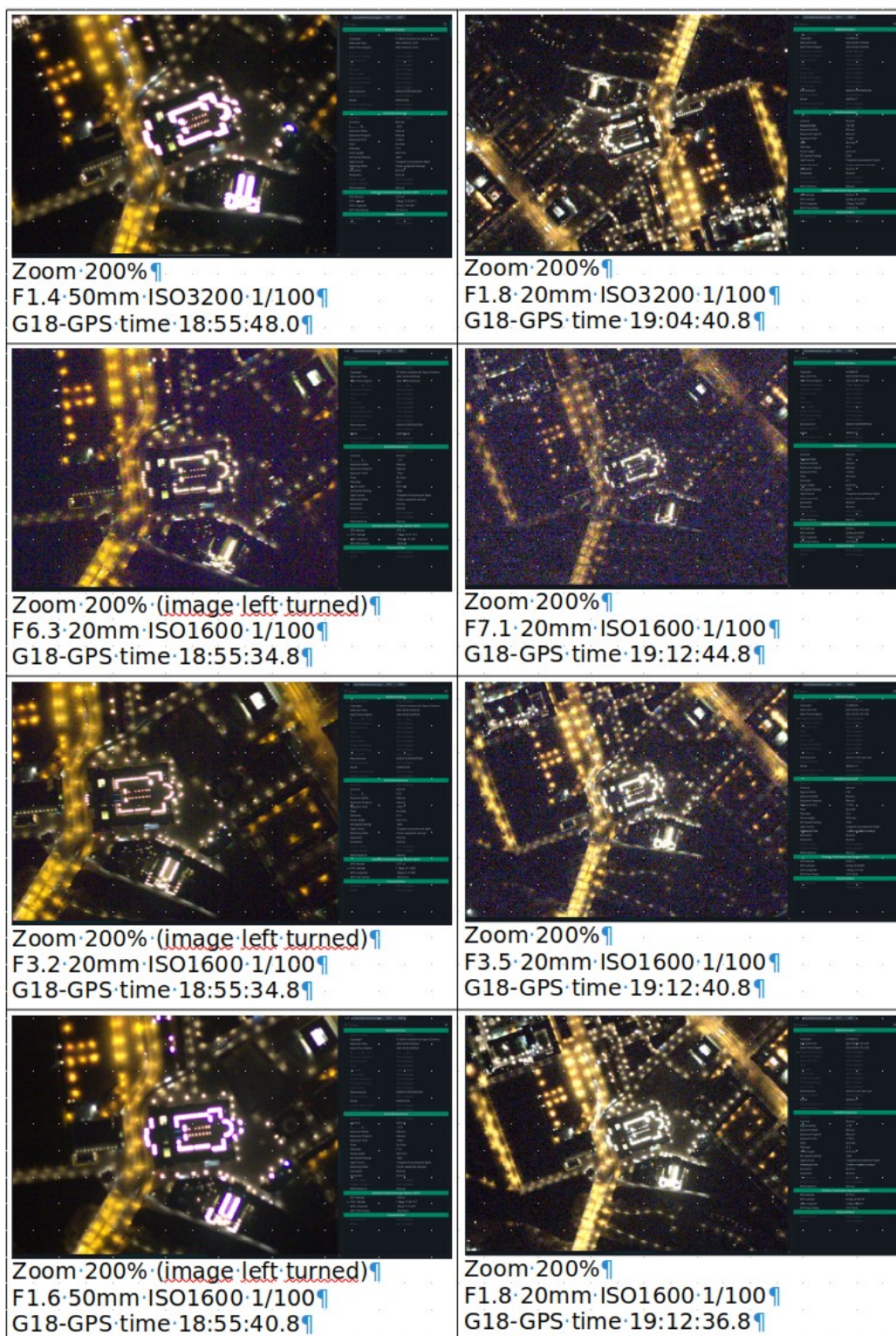
## 6.3 1st Nighttime Testflight Potsdam Center (20210330)





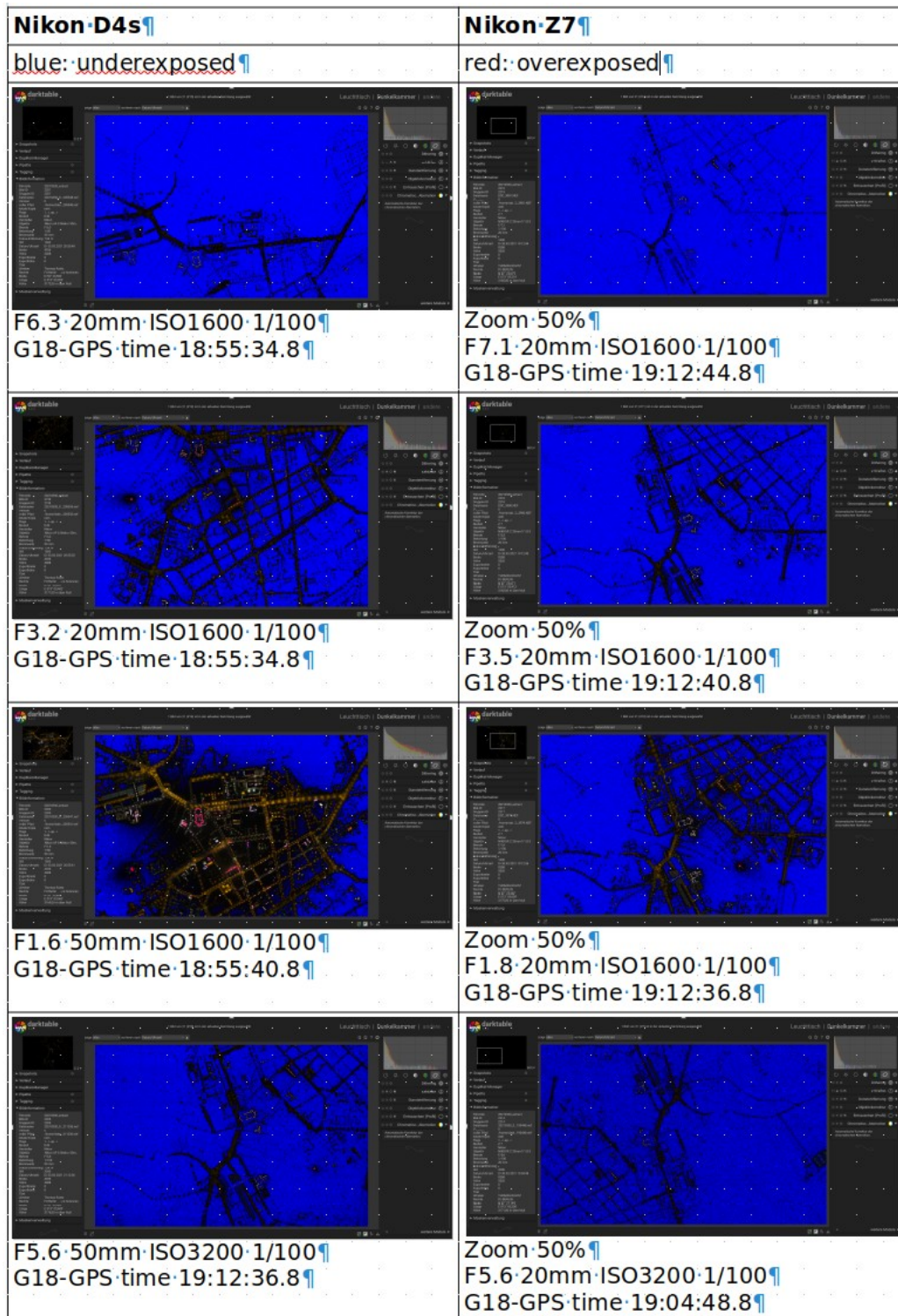


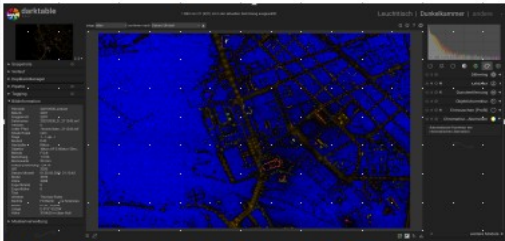
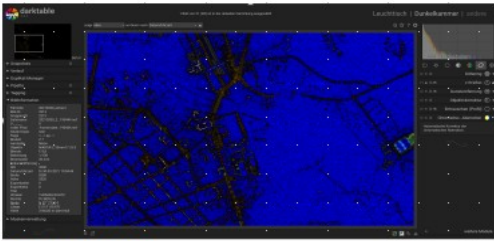
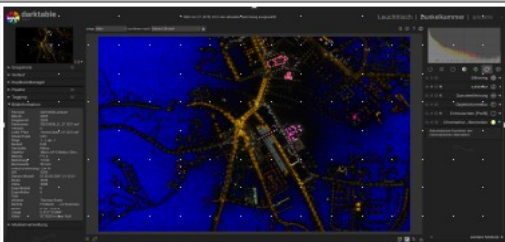
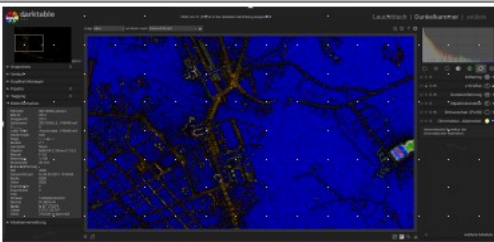
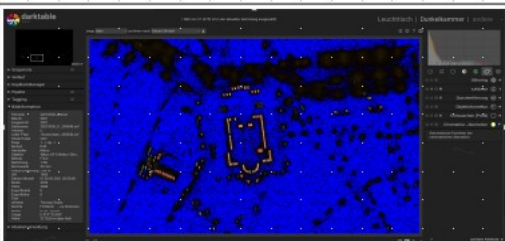
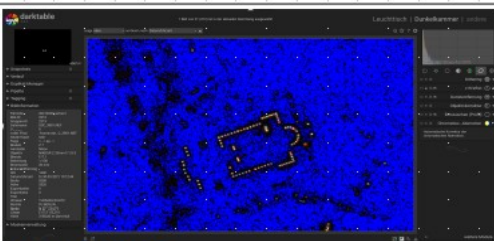
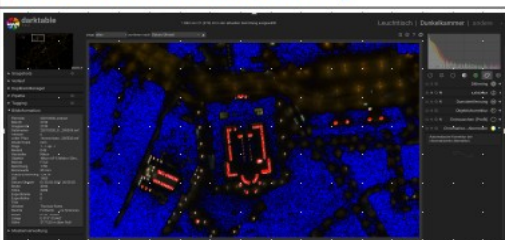
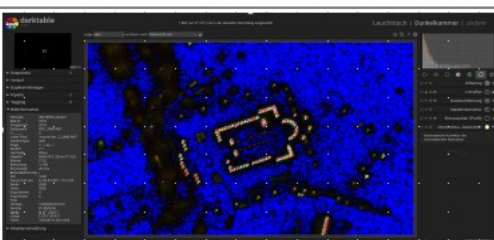




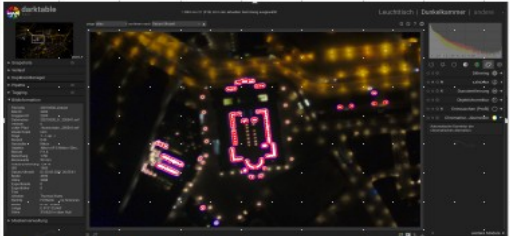
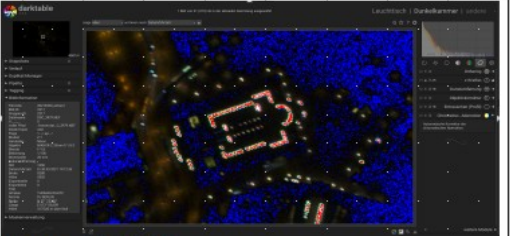
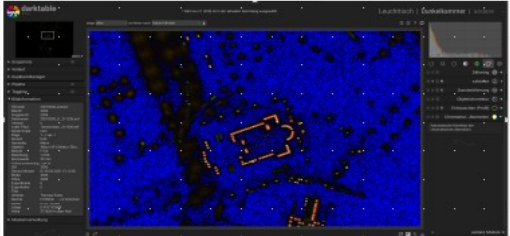
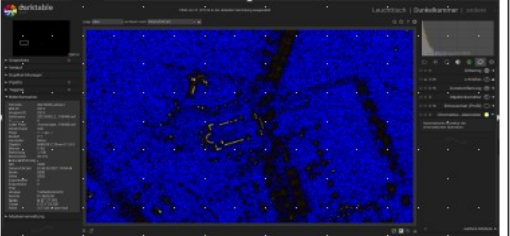
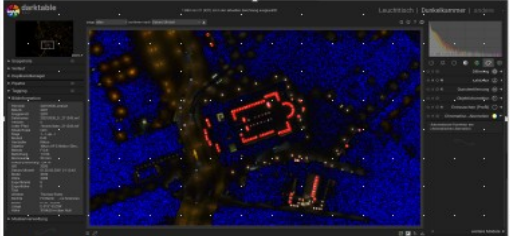
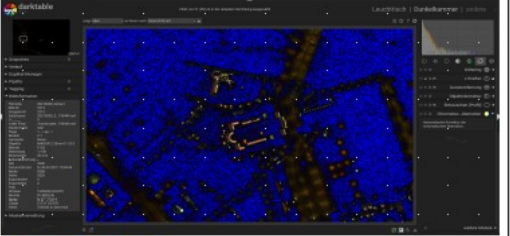
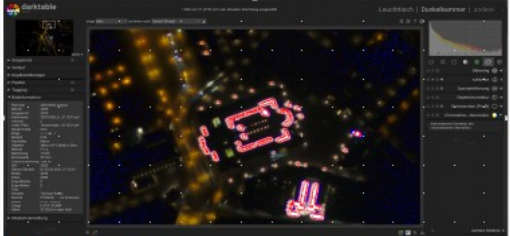
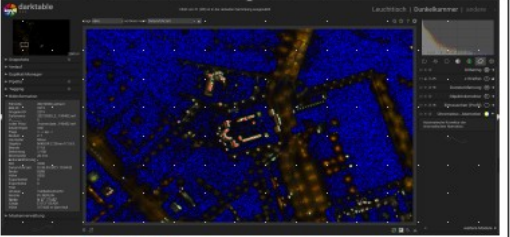


## 6.4 Saturation analysis Potsdam Center (20210330)




Nikon D4s	Nikon Z7
blue: underexposed	red: overexposed
 <p>F2.8 50mm ISO3200 1/100 G18-GPS time 19:12:43.2</p>	 <p>Zoom 50% F2.8 20mm ISO3200 1/100 G18-GPS time 19:04:44.8</p>
 <p>F1.4 50mm ISO3200 1/100 G18-GPS time 19:12:31.0</p>	 <p>Zoom 50% F1.8 20mm ISO3200 1/100 G18-GPS time 19:04:40.8</p>
 <p>Zoom 200% F6.3 20mm ISO1600 1/100 G18-GPS time 18:55:34.8</p>	 <p>Zoom 200% F7.1 20mm ISO1600 1/100 G18-GPS time 19:12:44.8</p>
 <p>Zoom 200% F3.2 20mm ISO1600 1/100 G18-GPS time 18:55:34.8</p>	 <p>Zoom 200% F3.5 20mm ISO1600 1/100 G18-GPS time 19:12:40.8</p>



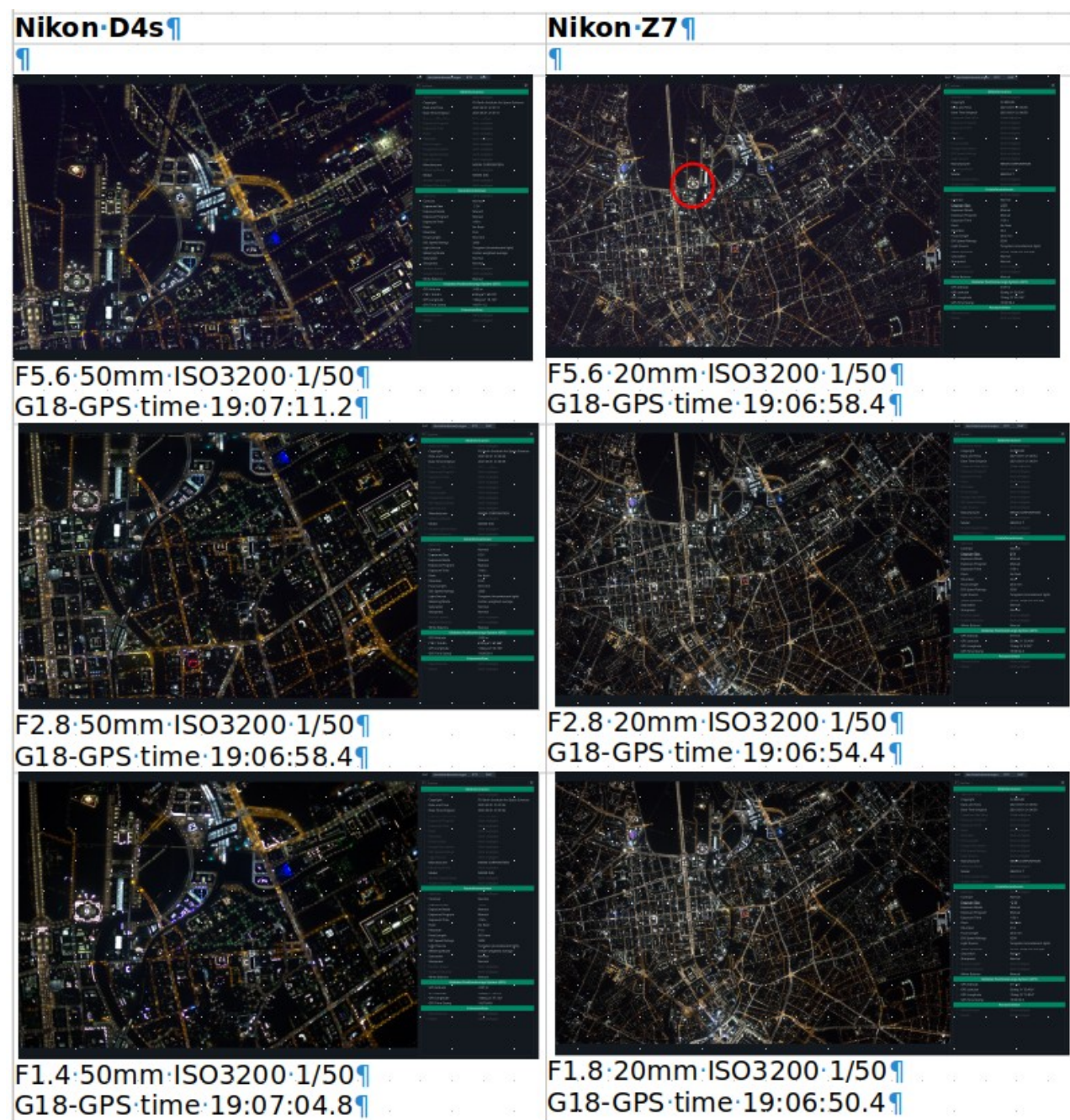
Nikon D4s	Nikon Z7
blue: underexposed	red: overexposed
	
Zoom 200% F1.6 50mm ISO1600 1/100 G18-GPS-time 18:55:40.8	Zoom 200% F1.8 20mm ISO1600 1/100 G18-GPS-time 19:12:36.8
	
Zoom 200% F5.6 50mm ISO3200 1/100 G18-GPS-time 19:12:36.8	Zoom 200% F5.6 20mm ISO3200 1/100 G18-GPS-time 19:04:48.8
	
Zoom 200% F2.8 50mm ISO3200 1/100 G18-GPS-time 19:12:43.2	Zoom 200% F2.8 20mm ISO3200 1/100 G18-GPS-time 19:04:44.8
	
Zoom 200% F1.4 50mm ISO3200 1/100 G18-GPS-time 19:12:31.0	Zoom 200% F1.8 20mm ISO3200 1/100 G18-GPS-time 19:04:40.8



<div>Freie Universität  Berlin</div>	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 117/127

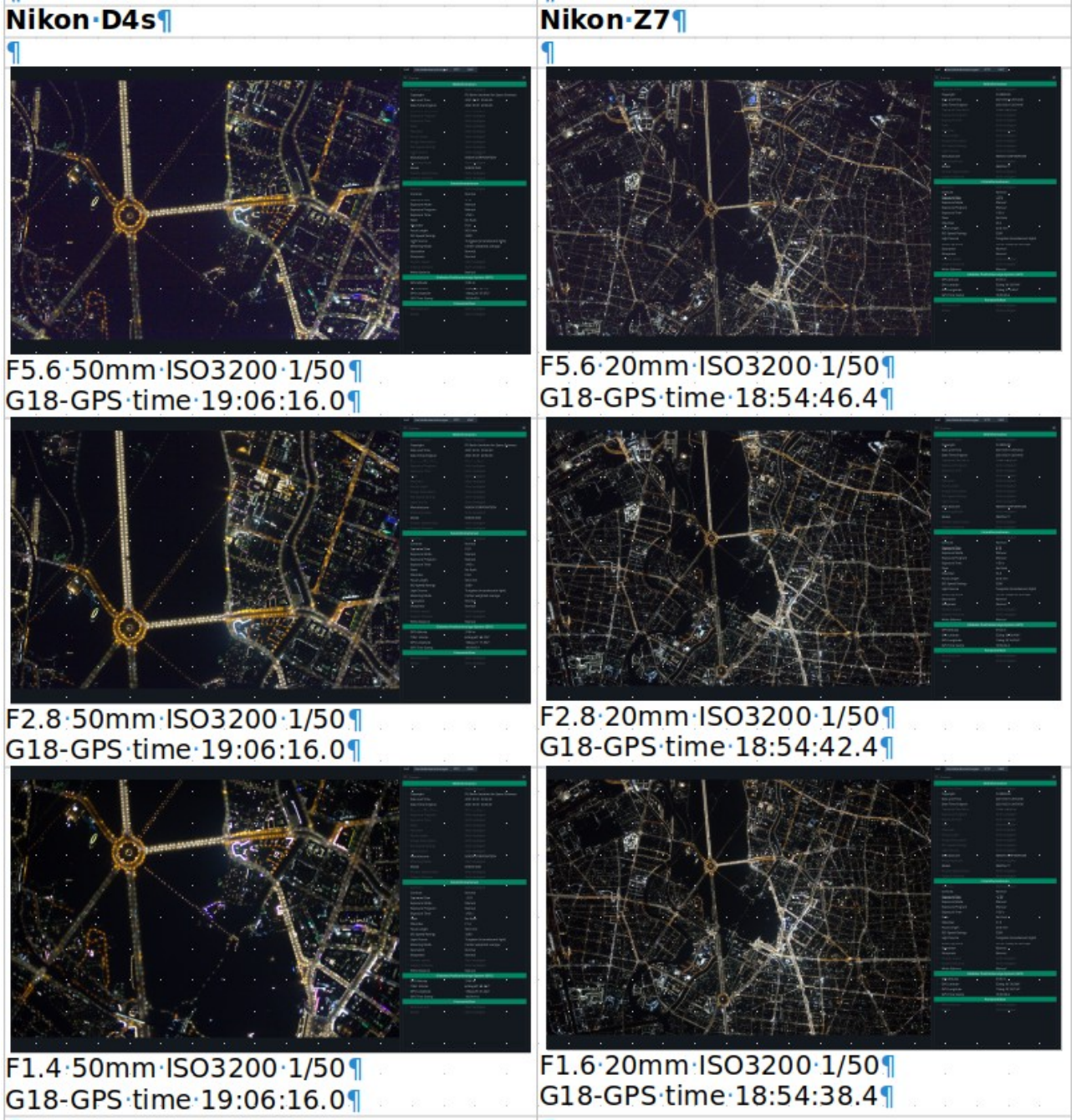
## 6.5 2nd Nighttime Testflight Berlin (20210331)

Reichstag, Kanzleramt, Hauptbahnhof:



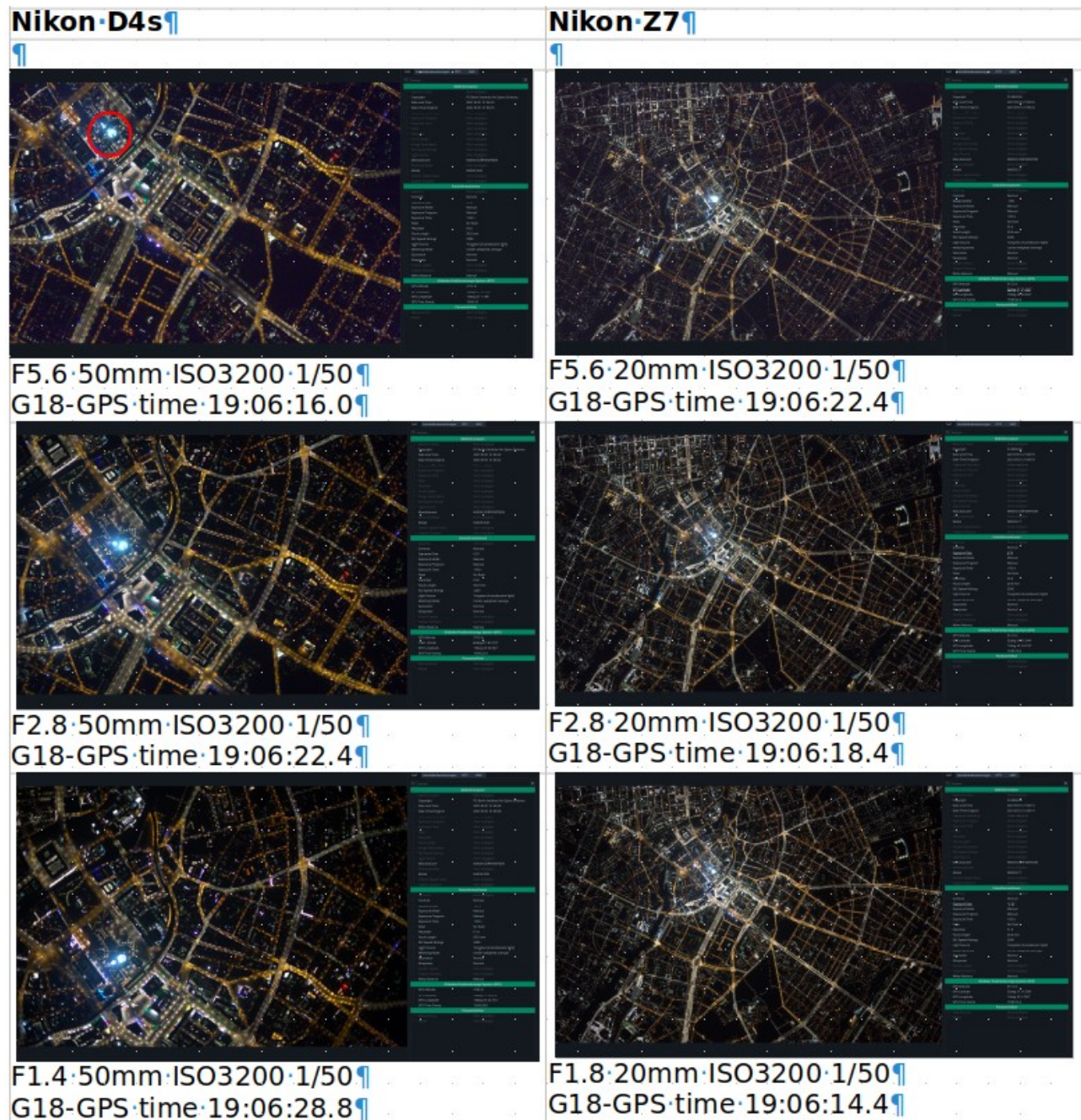


Großer Stern:






## Fernsehturm:

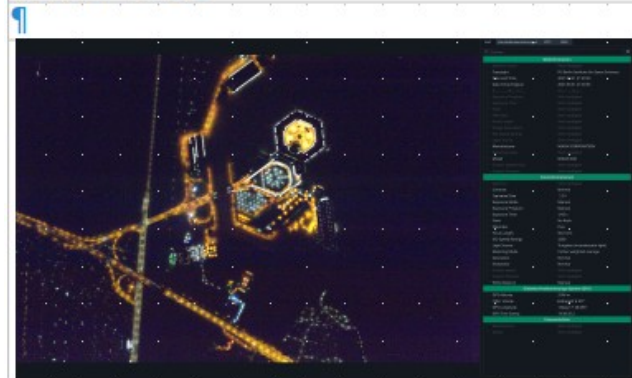




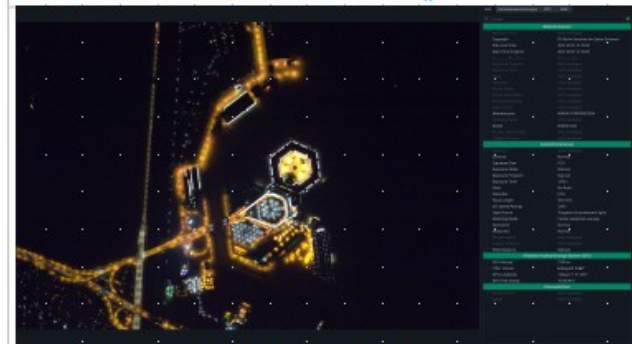
<div>Freie Universität  Berlin</div>	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report				
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023				
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page:	120/127

## Flughafen Tegel:

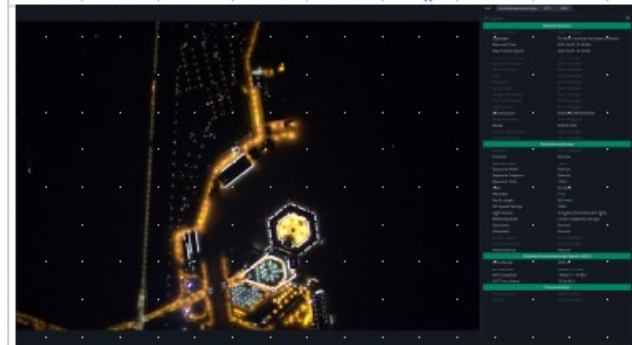
### Nikon-D4s



F5.6·50mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS-time 19:30:35.2

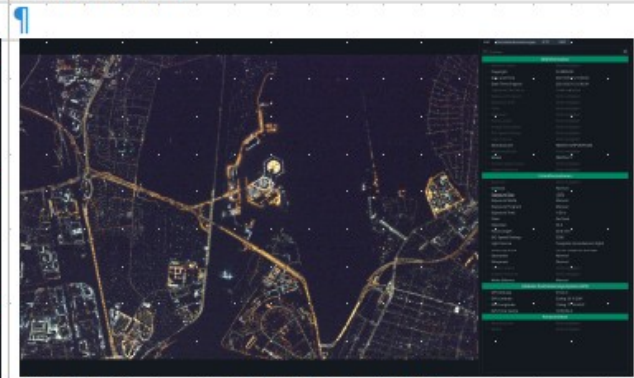


F2.8·50mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS-time 19:30:40.8

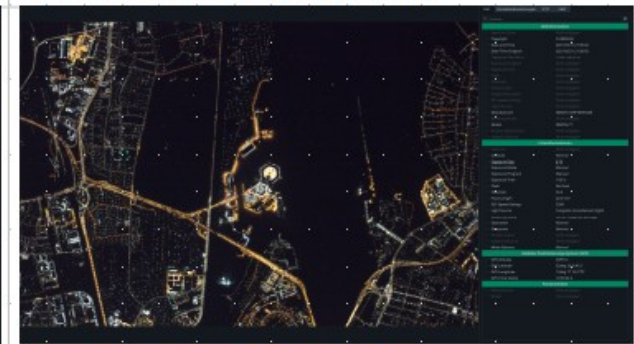


F1.4·50mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS-time 19:30:46.4

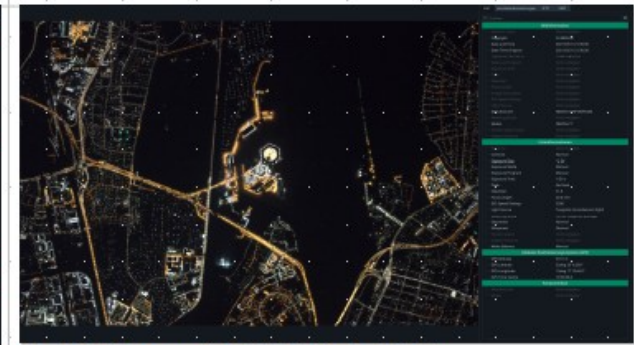
### Nikon-Z7



F5.6·20mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS-time 19:30:34.4



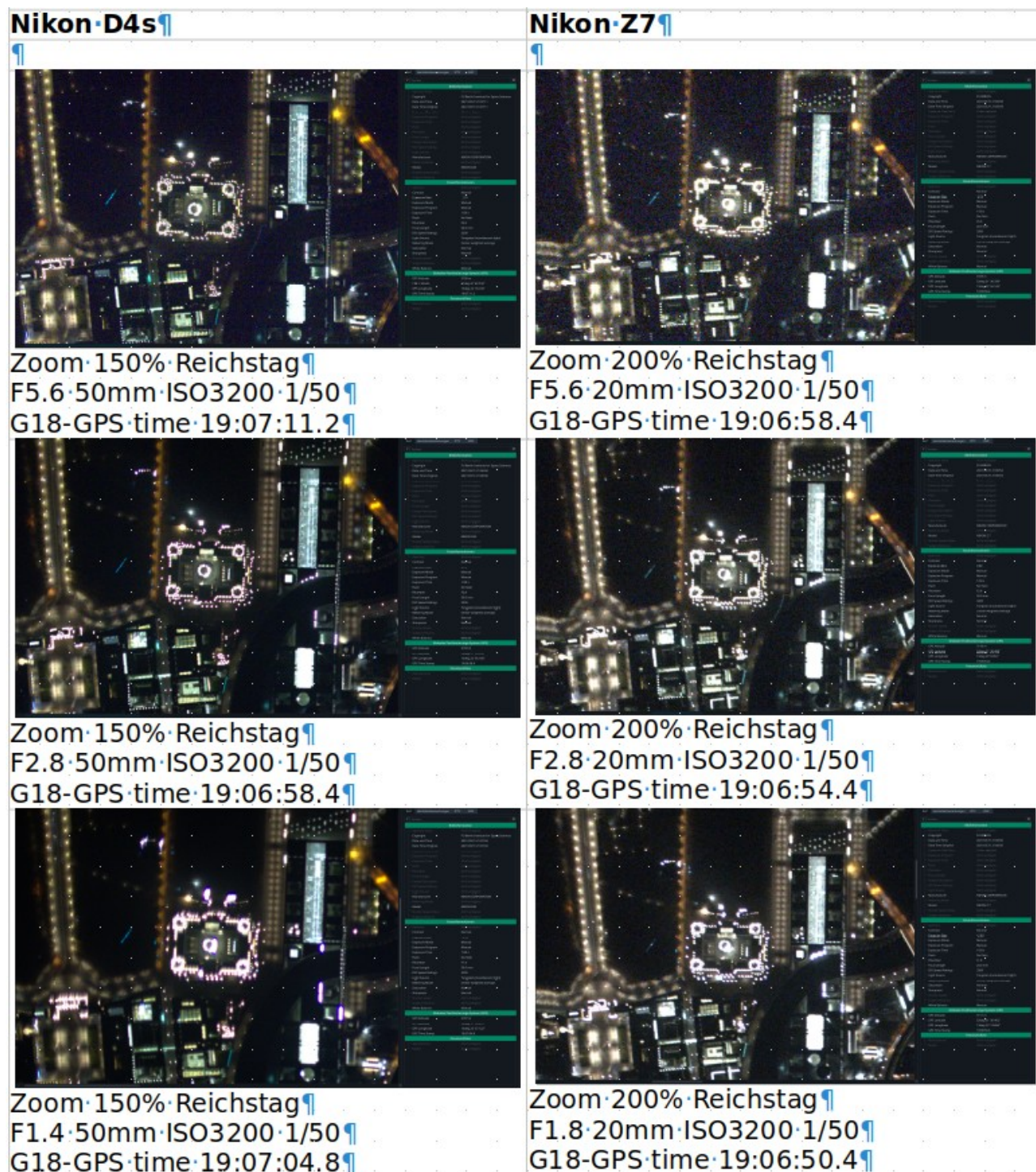
F2.8·20mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS-time 19:30:42.4



F1.8·20mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS-time 19:30:38.4



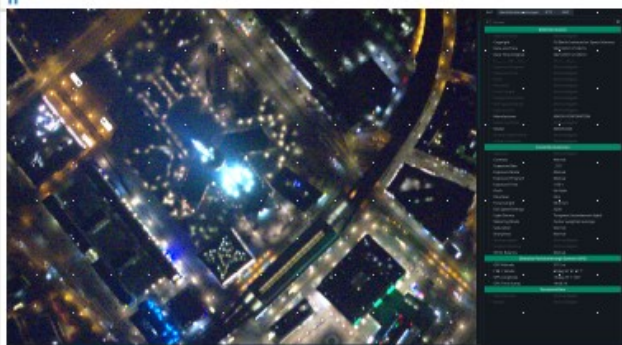
## Reichstag Zoom:



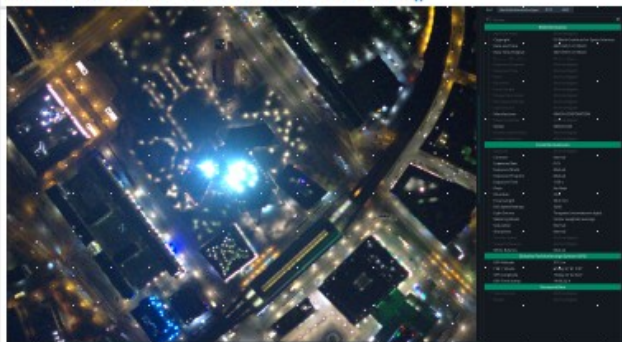


## Fernsehturm Zoom:

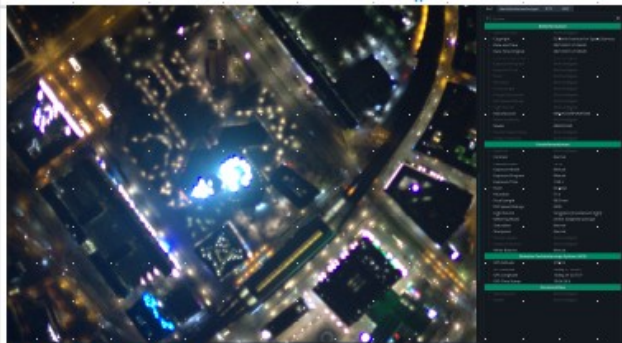
### Nikon D4s



Zoom 150%  
F5.6 50mm ISO3200 1/50  
G18-GPS time 19:06:16.0



Zoom 150%  
F2.8 50mm ISO3200 1/50  
G18-GPS time 19:06:22.4

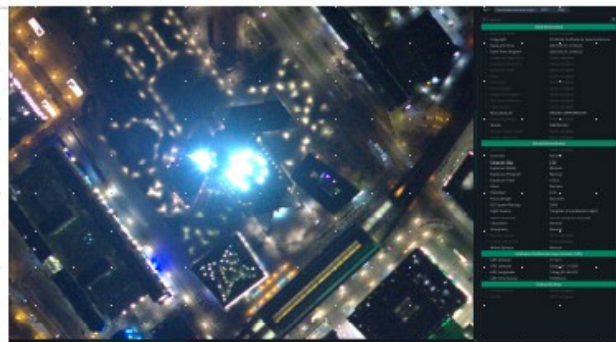


Zoom 150%  
F1.4 50mm ISO3200 1/50  
G18-GPS time 19:06:28.8

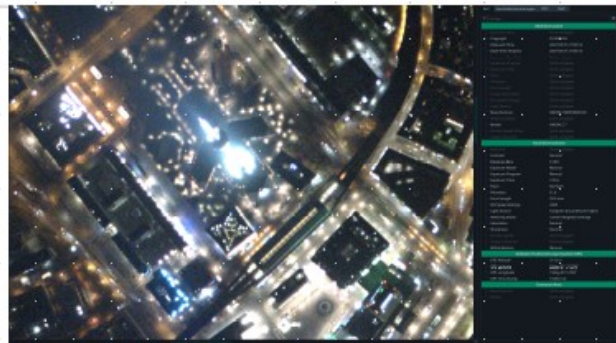
### Nikon Z7



Zoom 200% (saturated, direkt light)  
F5.6 20mm ISO3200 1/50  
G18-GPS time 19:06:22.4




Zoom 200%  
F2.8 20mm ISO3200 1/50  
G18-GPS time 19:06:18.4



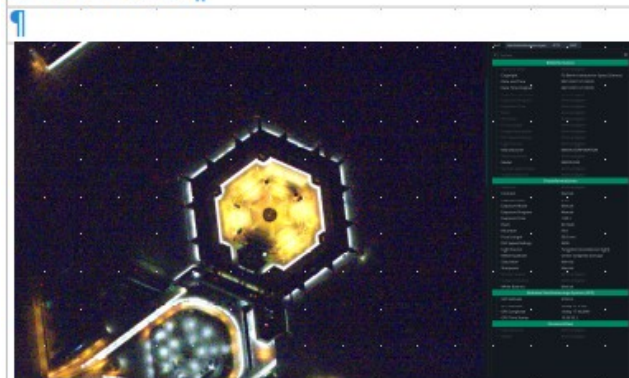
Zoom 200%  
F1.8 20mm ISO3200 1/50  
G18-GPS time 19:06:14.4



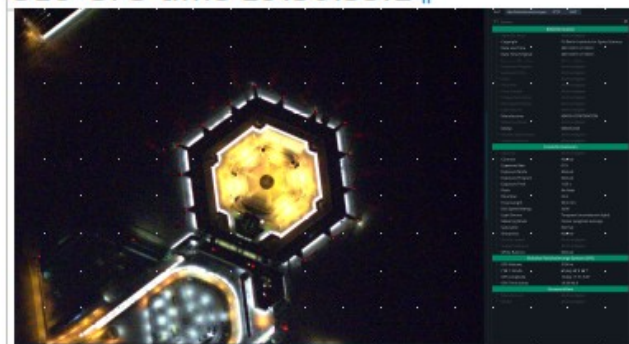
Freie Universität  Berlin	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 123/127

## Flughafen Tegel Zoom:

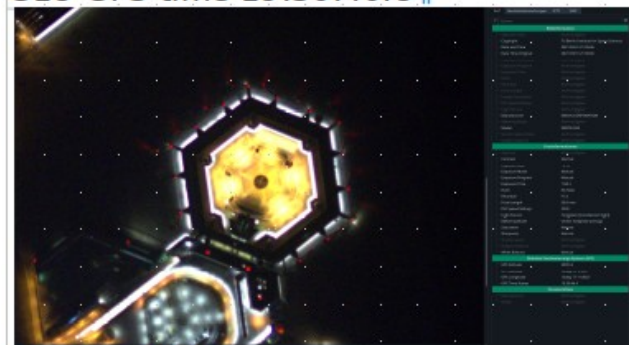
### Nikon·D4s



Zoom·150%  
F5.6·50mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS·time·19:30:35.2

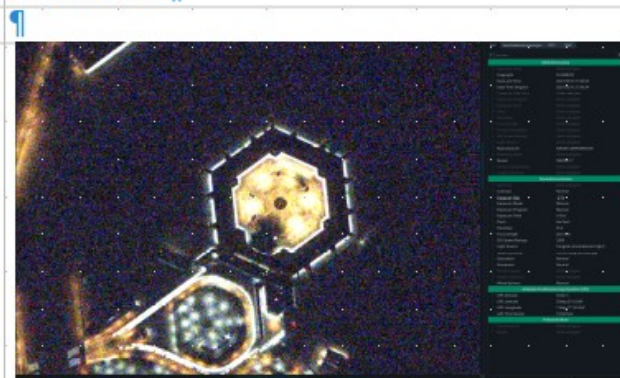


Zoom·150%  
F2.8·50mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS·time·19:30:40.8

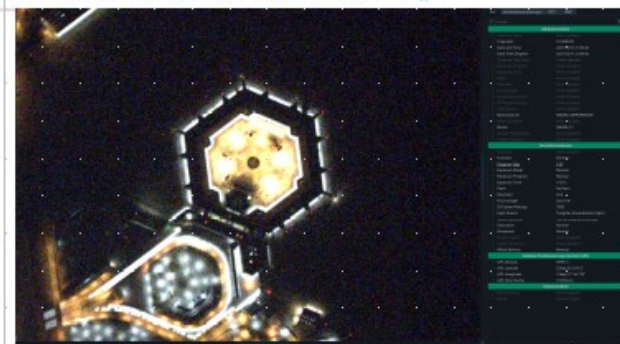


Zoom·150%  
F1.4·50mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS·time·19:30:46.4

### Nikon·Z7



Zoom·200%  
F5.6·20mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS·time·19:30:34.4



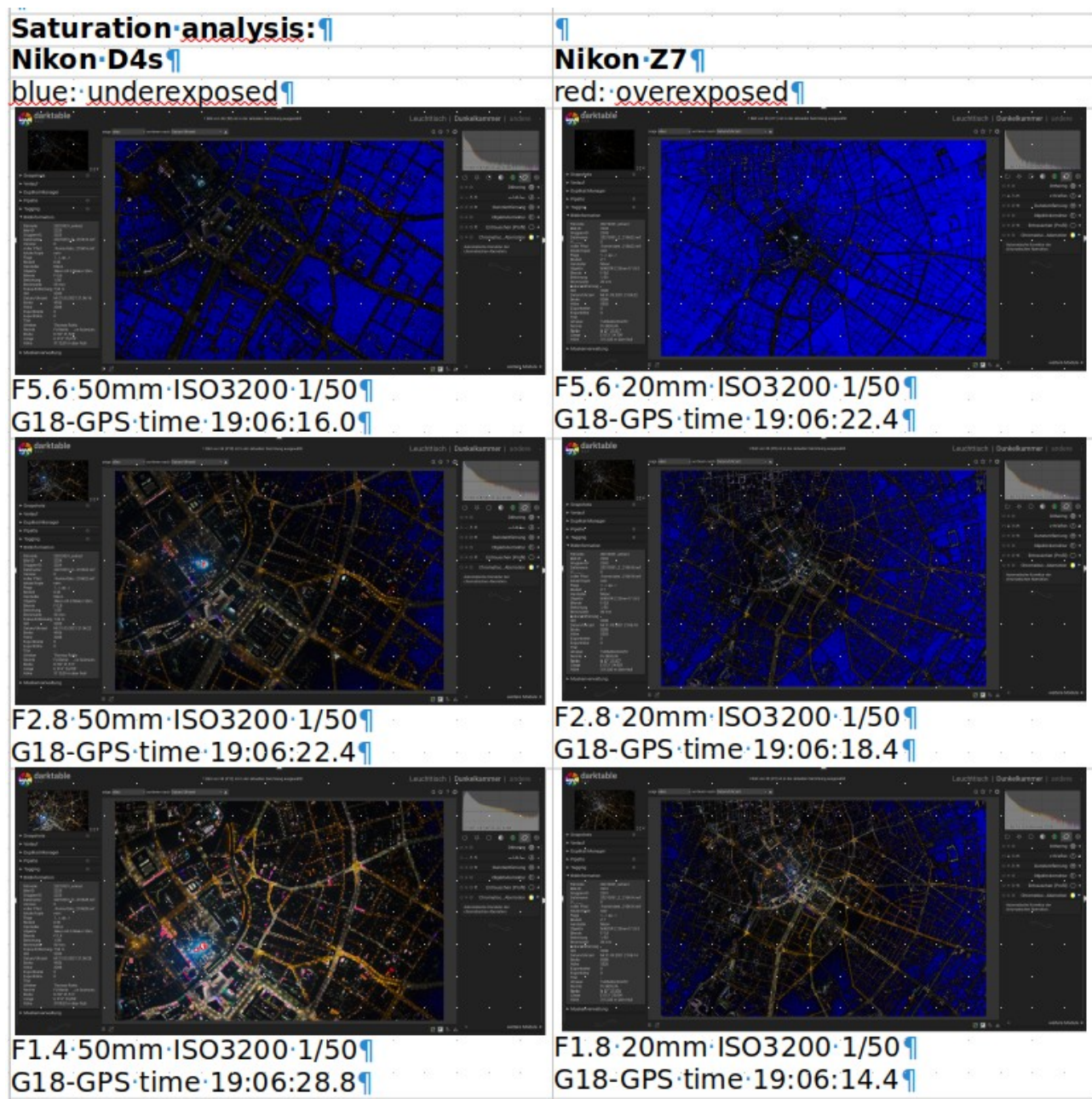
Zoom·200%  
F2.8·20mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS·time·19:30:42.4



Zoom·200%  
F1.8·20mm·ISO3200·1/50  
G18-GPS·time·19:30:38.4



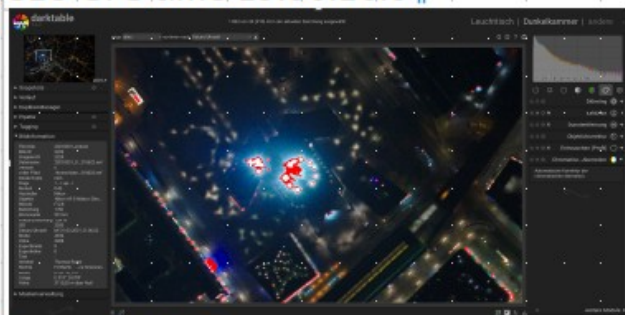
## 6.6 Saturation Analysis (20210331)



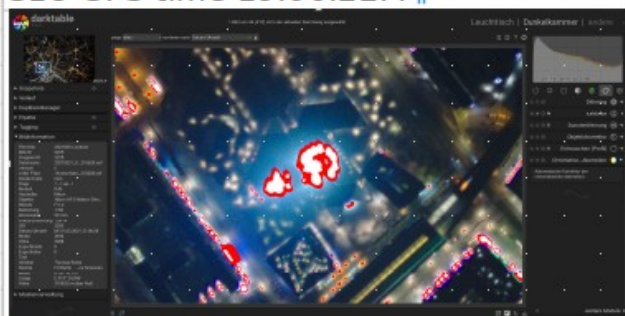
**Fernsehturm·Alexander·Platz·**  
**Saturation analysis:**  
**Nikon·D4s**  
 blue: underexposed



Zoom·200%  
 F5.6·50mm·ISO3200·1/50  
 G18-GPS time 19:06:16.0

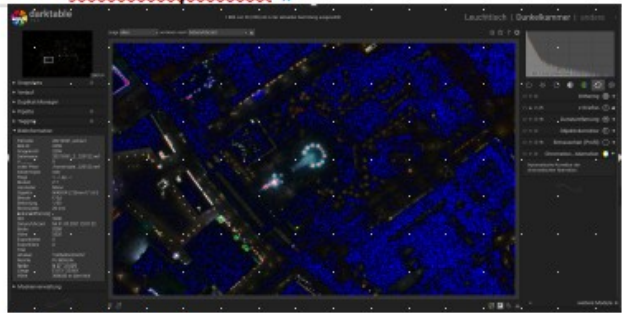


Zoom·200%  
 F2.8·50mm·ISO3200·1/50  
 G18-GPS time 19:06:22.4

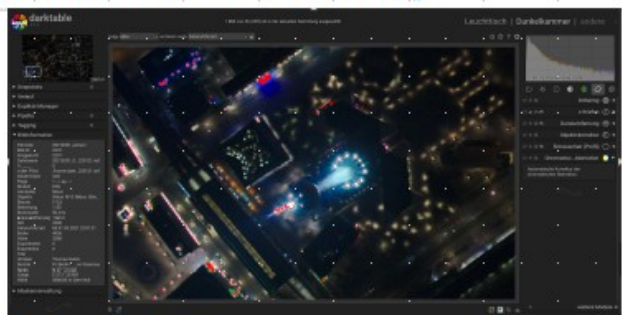


Zoom·200%  
 F1.4·50mm·ISO3200·1/50  
 G18-GPS time 19:06:28.8

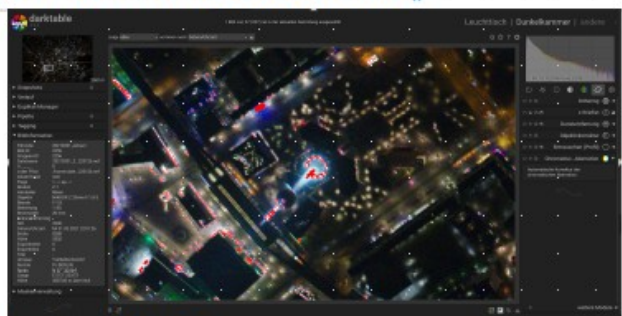
**Zoom:**  
**Nikon·Z7**  
 red: overexposed



Zoom·200%  
 F5.6·20mm·ISO3200·1/50  
 G18-GPS time 20:01:22.4



Zoom·200%  
 F2.8·20mm·ISO3200·1/50  
 G18-GPS time 20:01:21.6




Zoom·200%  
 F1.8·20mm·ISO3200·1/50  
 G18-GPS time 20:01:26.4



Nikon D4s	Nikon Z7
<b>Saturation Instrument Analysis:</b>	
<b>D4s:</b> → ok ISO3200, 1/100, (F1.4, F2.8, F5.6) not much different to ISO1600, 1/100, (F1.6, F3.2, F6.3) try ISO3200, 1/50, (F1.4, F2.8, F5.6)	<b>Z7:</b> → ok, but could be more sensitive → 1/50 but this increases pixel size and possibility to blur the image ISO3200 slightly better (F1.8, F2.8, F5.6 ok)
<b>ProEM:</b> No operation, software not working Zoom ?, Exposure ?	<b>Kinetix:</b> Zoom ?, Exposure ?
<b>Trigger:</b> - D4s was not triggered automatically → triggered manually by program → check Hardware ProEM → ok	Z7 → ok Kinetix → ok
<b>Meinberg Sync:</b> USB0: Ch0: D4s → ok USB1: Ch0: ProEM → missing USB2: Ch0: PPS IGI → ok USB3: NMEA GPS G18x-5Hz → ok	Ch1: Z7 → ok Ch1: Kinetix → ok Ch1: Camera trigger → ok



	Institute for Space Sciences	Doc. name:	20231116_LARSIA_CALEC_Final_Report			
	LARSIA: Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications	Date:	16. Nov 2023			
	Design organization LBA.21J.0023	Issue:	01	Revision:	00	Page: 127/127

---