

Qualitätsuntersuchungen UAV-getragener Kamerasysteme am Testfeld Bochum

**ANSGAR GREIWE¹, VOLKER SPRECKELS², ANDREAS SCHLIENKAMP²,
RAINER BRECHTKEN¹ & SIMON DAMBERG¹**

Zusammenfassung: Oberflächenmodelle können zum Beispiel aus diskreten stereoskopischen Messungen, Bildkorrelation oder Structure from Motion (SfM) erzeugt werden. Im photogrammetrischen Normalfall werden per stereo-Betrachtung und der Bildkorrelation die Genauigkeiten durch Kenngrößen der Bündelblockausgleichung nachgewiesen. Für einen Genauigkeitsnachweis der automatisierten SfM-Verfahren reicht diese klassische Betrachtungsweise allerdings nicht aus. Hier hängt das Dense Matching zusätzlich von der Bildqualität der eingesetzten Sensorik ab. Somit ist neben den Ergebnissen der Bündelblockausgleichung ein Vergleich mit Referenzflächen oder Referenzgeometrien erforderlich.

Dieser Beitrag ist zweigeteilt, denn über eine Untersuchung der optischen Eigenschaften eines eingesetzten Kamerasystems können bereits vorab im Labor Vorhersagen zur Qualität einer resultierenden Punktwolke getroffen werden. Diese werden dann im Praxiseinsatz betrachtet, wobei drei UAV-getragene Kamerasysteme am neu eingerichteten UAV-Testfeld der Hochschule Bochum untersucht und deren Einfluss auf die erzeugte Punktwolke bzw. das Oberflächenmodell dargestellt wird.

1 Hintergrund, Motivation, Problemstellung

Werden digitale Oberflächenmodelle zur Deformationsüberwachung einer Geländeoberfläche eingesetzt, so sind klare Genauigkeitsvorgaben gegeben, insbesondere im Hinblick auf die Höhengenaugigkeit der erzeugten Punkte (SPRECKELS et al. 2016).

Oberflächenmodelle können zum einen aus diskreten Messungen, wie zum Beispiel aus einer stereoskopischen Punktmessung erzeugt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der automatisierten Generierung des Oberflächenmodells durch Structure from Motion (SfM), hier insbesondere per Dense Image Matching. Im Falle der zuerst genannten manuellen Bestimmung von Oberflächenpunkten wird der eingangs geforderte Genauigkeitsnachweis durch Kenngrößen der Bündelblockausgleichung nachgewiesen. Hierzu gehören die Angaben zu den erreichten Standardabweichungen an Pass- und Kontrollpunkten, bei vorliegender oder im Felde durchgeführter Kamerakalibrierung zudem die Standardabweichungen der inneren Orientierung. Die Standardabweichung eines (manuell gemessenen) Kontrollpunktes wird dann ebenso für die zu messenden Neupunkte verwendet.

Im zweiten Fall, der Ableitung von Oberflächenpunkten durch Dense Image Matching, repräsentiert dieser Genauigkeitsnachweis jedoch nicht Qualität (Rauschen) und Auflösung

¹ Hochschule Bochum, Labor für Optische 3D-Messtechnik,
Am Hochschulcampus 1, D-44801 Bochum, E-Mail: Ansgar.Greiwe@hs-bochum.de

² RAG Aktiengesellschaft, Unternehmensbereich Standort-/Geodienste, K-SG-NG Geodaten-Fernerkundung, Im Welterbe 10, D-45141 Essen

(Detailreichtum) der erzeugten Punktwolke. Diese Parameter sind in erster Linie von der Zuverlässigkeit des eingesetzten Interest Operators abhängig - und dieser wiederum von der Bildqualität. So zeigen GREIWE et al. (2017), dass die Ableitung einer Geländeoberfläche aus Bilddaten durch SfM im hohen Maße von der Bildqualität des verwendeten Kamerasystems abhängt.

2 Kontrastauflösung als Maß für die Bildqualität

Die Leistungsfähigkeit – und damit die Bildqualität - eines optischen Systems ist für den Betrachter immer dann offensichtlich, wenn scharfe Kanten oder feine Strukturen in einer Aufnahme unscharf erscheinen. Werden äußere Einflüsse wie die Bewegungsunschärfe bei Verwendung des Sensors auf einer bewegten Plattform ausgeschlossen, so sind entweder Abbildungsfehler der Optik (Aberration, Astigmatismus) oder das Auflösungsvermögen des eingesetzten Sensors die limitierenden Faktoren für eine scharfe Abbildung (NASSE 2008).

Das Auflösungsvermögen – und damit die optische Leistungsfähigkeit eines digitalen Kamerasystems – lässt sich durch die Bestimmung der Modulationstransferfunktion (MTF) bestimmen (CUNNINGHAM & FENSTER 1987; REICHENBACH et al. 1991). Hierbei wird die Modulation als Quotient des Kontrastes eines Signals zum Kontrast im Bild ermittelt. Eine Modulation von 10% entspricht ungefähr dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges, einen Hell-Dunkel-Wechsel von „strukturlosem Grau“ zu unterscheiden (NASSE 2008).

Die MTF gibt den Verlauf der Modulation über die Ortsfrequenz eines Signals an. Die Messung der MTF kann durch die Verwendung von Siemens-Stern-Charts erfolgen (MEIßNER et al. 2018). Die sich ändernde Ortsfrequenz wird hierbei durch die stetig breiter werdenden Strahlen des Siemenssterns realisiert. Die Ermittlung der MTF kann jedoch nur an den Stellen im Bild erfolgen, in denen auch ein Siemensstern platziert ist. MEIßNER et al. (2018) ermitteln so für unterschiedliche Kameras die MTF im Zentrum und über eine Hauptdiagonale im aufgenommenen Bild (Abb. 1).

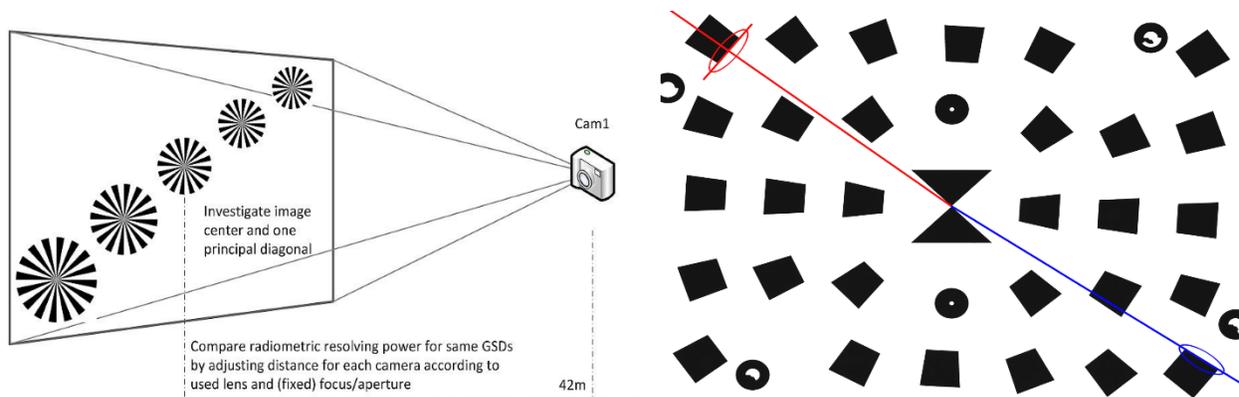


Abb. 1: Testcharts zur Bestimmung der MTF-Kurve: Siemensstern (links aus MEIßNER et al. 2018) und Slant-Edge Testchart (rechts, eigene Aufnahme)

Eine alternative Methode ist die Verwendung eines "Slant-Edge"-Charts nach ISO 12233. Hierbei wird der Kontrast an schräg verlaufenden Linien auf einem homogenen Hintergrund ermittelt. Die Änderung der Ortsfrequenz des Signals wird durch die schrägen Linien realisiert, welche die Pixel

des Sensors in stetig steigendem Maße schneiden. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Möglichkeit, die MTF flächenhaft über die gesamte Sensorfläche mit einer einzigen Aufnahme zu ermitteln, da als Testmuster deutlich mehr Kanten als Siemenssterne auf einem Testchart platzierbar sind.

Die MTF-Messung in Richtung des Bildradius (sagittal) erfolgt an den in Abbildung 1 blau dargestellten Kanten, die tangentiale (meridionale) MTF an den rot hervorgehobenen Kanten. Die Ortsfrequenz kann für eine MTF durch den Quotienten Linienpaare pro Millimeter (lp/mm) angegeben werden. Je größer der Quotient, desto höher die Ortsfrequenz resp. desto feiner die Strukturen im Bild. So kann für eine gegebene Ortsfrequenz der Verlauf des Auflösungsvermögens über die Sensorhöhe (Bildradius) dargestellt werden (Abb. 2).

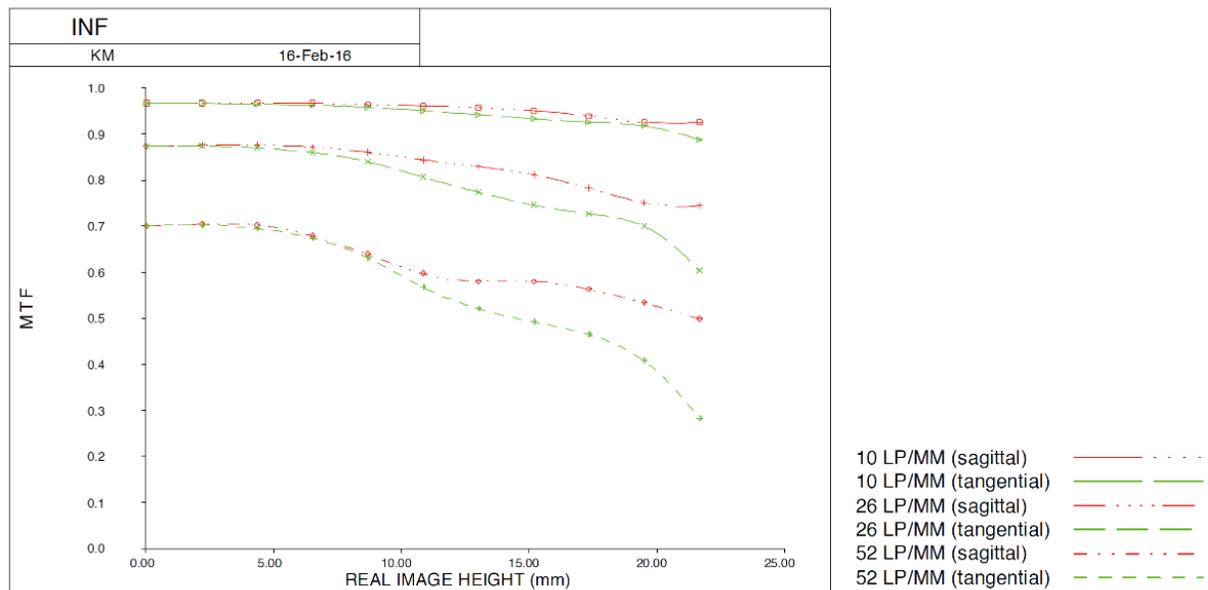


Abb. 2: MTF-Kurve des Sensors P1 (DJI) mit Objektiv DL 50 mm F2.8 LS (aus: DJI 2021)

Bei einer geringen Ortsfrequenz von 10 lp/mm ist über das gesamte Bild eine hohe Kontrastauflösung zu beobachten. Wird eine hohe Ortsfrequenz mit 52 lp/mm vorgegeben, so lassen sich zwei Effekte beobachten: Zum einen nimmt die Kontrastauflösung wie erwartet zum Bildrand hin ab, zum anderen ist zwischen einer sagittalen und tangentialen (meridionalen) Bestimmung der MTF ein Unterschied erkennbar.

Mit dieser Betrachtung lassen sich Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit von Objektiven zu, was im Folgenden vorgestellt wird.

2.1 Fokus

Zunächst beeinflusst die Fokuseinstellung eines Objektivs die MTF eines Kamerasystems (siehe BOREMANN 2001). In einem Laborversuch konnte dieser Effekt dadurch nachgewiesen werden, dass das Testchart außerhalb des Schärfentiefebereiches der eingesetzten Vollformatkamera positioniert wurde. Bei kleinformatischen Sensoren wird die Verwendung eines Autofokus zur photogrammetrischen Aufnahme als „zuverlässig und gut“ bezeichnet (ZUHORST & HUDASCH 2020). Bei der Verwendung größerer Voll- oder Mittelformatsensoren sollte durch Verwendung

eines manuellen Fokus diese Fehlerquelle aber ausgeschlossen und zudem der Schärfentiefebereich beachtet werden. So besitzt die Ausrüstung von GHASSOUN et al. (2021) bestehend aus einer Mittelformatkamera und einem Objektiv mit 150 mm Brennweite eine Schärfentiefe von 14 m bei einer fokussierten Dingweite von 35 m.

2.2 Datenformat

UAV-getragene Kamerasysteme bieten dem Nutzer unter Umständen mehrere Möglichkeiten zur Speicherung der Bilddaten. Das RAW-Format zeichnet die Daten verlustfrei auf, es ist jedoch proprietär und bedarf einer digitalen Entwicklung in ein anderes, verlustfreies Datenformat (z.B. TIFF), bevor die Daten für die Auswertesoftware lesbar sind. Andere Systeme führen eine kamerainterne Prozessierung der Bilddaten und die Speicherung im JPEG-Format durch. Die Prozessierung in das verlustbehaftete JPEG-Format führt jedoch zu Artefakten und einer messbaren Verschlechterung der Bildqualität. Es sollte also für die Ableitung von Oberflächenmodellen vermieden werden (VERHOEVEN 2010): „*For strictly scientific photography, such as airborne remote sensing, shooting RAW is mandatory practice because it is the only way to assess the originally captured DN's, [...]*“. Einige Kamerasystemhersteller lassen aus diesem Grund keine Speicherung im JPEG zu, sollte sie dem Nutzer angeboten werden, ist sie zu deaktivieren.

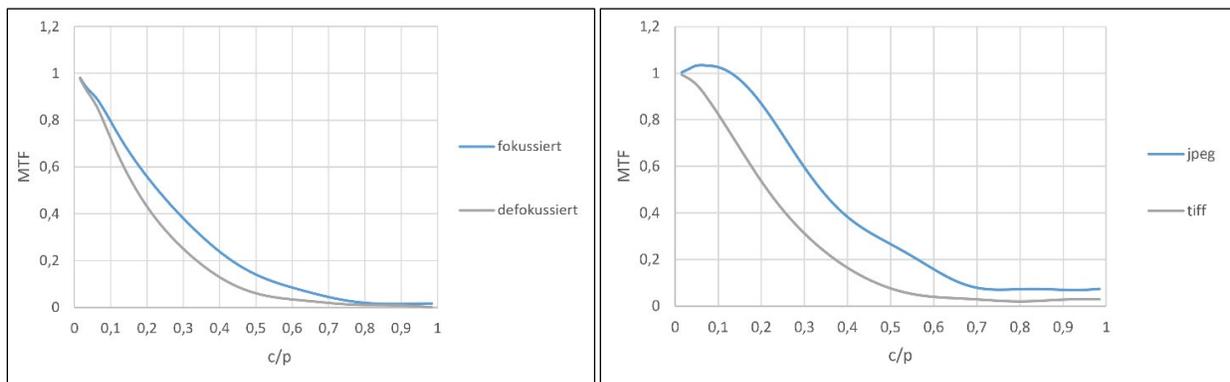


Abb. 3: Einfluss von Fokus (links) und Datenformat (rechts) auf die MTF. Im Gegensatz zur Angabe lp/mm wird hier die MTF in Cycle/Pixel (c/p) angegeben. Eine Ortsfrequenz in Pixelgröße (Nyquist) entspricht 0,5 c/p.

Oft wird bei einer kamerainternen JPEG-Konvertierung auch eine Nachschärfung der Bilddaten vorgenommen, die neben den Kompressionsartefakten über diesen Bildverarbeitungsschritt zu weiteren unerwünschten Bildinhalten führt. Besonders deutlich zu erkennen ist dieses Phänomen an signalisierten Passpunkten, denn das Schachbrett erscheint nun an den Kanten besonders dunkel oder hell. Diese Artefakte erzeugen MTF-Werte über 100% (die Aufnahme ist schärfer als das Signal, Abb. 3 rechts).

2.3 Blende

Je nach Güte des Objektivs treten unterschiedliche Abbildungsfehler auf, die das Kontrastaufklärungsvermögen beeinflussen. Hierbei kann herstellenseitig die chromatische Aberration durch spezielle Linsenkonstruktionen unterschiedlicher Dispersion (achromatischer

oder dichromatischer Aufbau) begrenzt werden. Durch Abblenden verringern sich die Einflüsse der sphärischen Aberration, bei der achsferne Strahlen keinen gemeinsamen Brennpunkt besitzen, sowie des Astigmatismus, bei dem horizontale und vertikale Strahlen zwei Brennlinien anstelle eines Brennpunktes besitzen.

Im Rahmen dieser Untersuchung sind diese Effekte in einer Messreihe mit einer Sony Alpha 7 R IV für drei Objektive nachgewiesen worden.

Hierbei wurde jeweils eine Blendenreihe unter identischen Laborbedingungen durchgeführt, für zwei Festbrennweitenobjektive (Zeiss Loxia 50 mm und Sony FE 50 mm F1.8) sowie für ein Zoom-Objektiv (Sony FE 24-70 mm F2,8), eingestellt auf 50 mm Brennweite. Für diese drei Objektive wurde jeweils eine Blendenreihe aufgenommen und die MTF flächig über den gesamten Bildbereich sowohl sagittal als auch meridional bestimmt (Abb. 4). Die dargestellten MTF-Kurven zeigen deutlich, dass die Objektive für die Blenden f 5.6 (Zeiss) bzw. f 8 (Sony) optimiert sind.

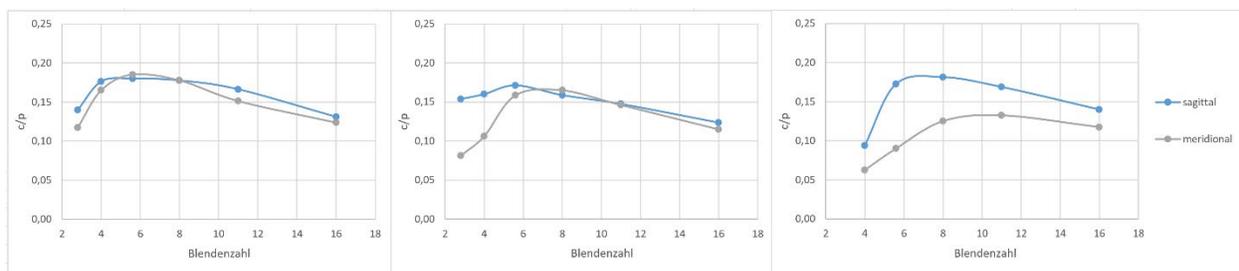


Abb. 4: MTF-Kurven Zeiss Loxia (links), Sony FE-50 mm (Mitte) und Sony FE 24-70 mm (rechts).

Zudem lässt sich aus den unterschiedlichen Messergebnissen in sagittaler und meridionaler Richtung der Einfluss des Astigmatismus ableiten. Das Zoom-Objektiv in Abbildung 4 rechts weist die geringste Bildqualität auf, die als Folge des Optikdesigns über die unterschiedlichen Brennweiten gewertet werden kann. Die Aussage, dass „[...] moderne Optiken auch bei nahezu voller Blendenöffnung gute Leistungsdaten bieten.“, (PRZYBILLA 2022), ist somit nicht allgemeingültig. Je nach Güte der Objektive sind Aufnahmen mit Offenblende zu vermeiden, um die Abbildungsfehler insbesondere am Bildrand zu verringern. Einige Hersteller erlauben in der Kameraansteuerung aus diesem Grund lediglich f 5.6 als größte Blendenöffnung.

2.4 ISO

Bewegungsunschärfen während der Aufnahme wirken sich negativ auf die Modulationsübertragung aus. Die tolerierbare Bildwanderung $\Delta s'_{max}$ kann als Funktion des Auflösungsvermögens AV (in lp/mm) eines Sensors ausgedrückt werden und wird für Anwendungen in der Aerophotogrammetrie nach LUHMANN (2018) vorgegeben durch:

$$\Delta s'_{max} = 1.5 AV^{(-1)} \quad (1)$$

Die maximal zulässige Bildwanderung der DJI P1 mit einem Auflösungsvermögen von 52 lp/mm (MTF 30% am Bildrand, Abb. 2) beträgt demnach 2,88 μm , was ungefähr 0,66 Pixel entspricht. Bei einem GSD von 9 mm und einer Fluggeschwindigkeit von 2 m/s ist die Belichtungszeit also kürzer 1/333 s zu wählen.

Die Phase One iXU erreicht ein Auflösungsvermögen von 104 lp/mm bei vergleichbarer MTF (Kap. 2.5) und verlangt somit 1/640 s um Bewegungsunschärfen während des Fluges bei 2 m/s zu vermeiden.

Wird die Blendeneinstellung fixiert, kann bei wechselnden Beleuchtungsverhältnissen durch die variable Wahl der Lichtempfindlichkeit des Sensors (ISO) eine korrekte Belichtung sichergestellt werden. In der Praxis wird dieses Vorgehen insbesondere bei Kamerasystemen mit ausschließlicher JPEG-Kompression (s. Kap. 2.2) durchgeführt.

Oft reicht die visuelle Beurteilung einer Aufnahme mit hoher ISO nicht aus, um Einstellungen bis ISO 800 zuzulassen (PRZYBILLA 2022). Um diesen Effekt zu untersuchen, wurden MTF-Testcharts aufgenommen, wobei eine aktuelle Kamera mit geringem Rauschverhalten Sony Alpha 7 R IV mit dem Zeiss Loxia Objektiv eingesetzt wurde. Variiert wurden ISO und Belichtungszeit. Insbesondere in hochfrequenten Bilddetails, also feinen Strukturen mit < 0.5 c/p, wird bereits ab ISO 200 ein messbarer Einfluss auf die Bildqualität festgestellt (Abb. 5).

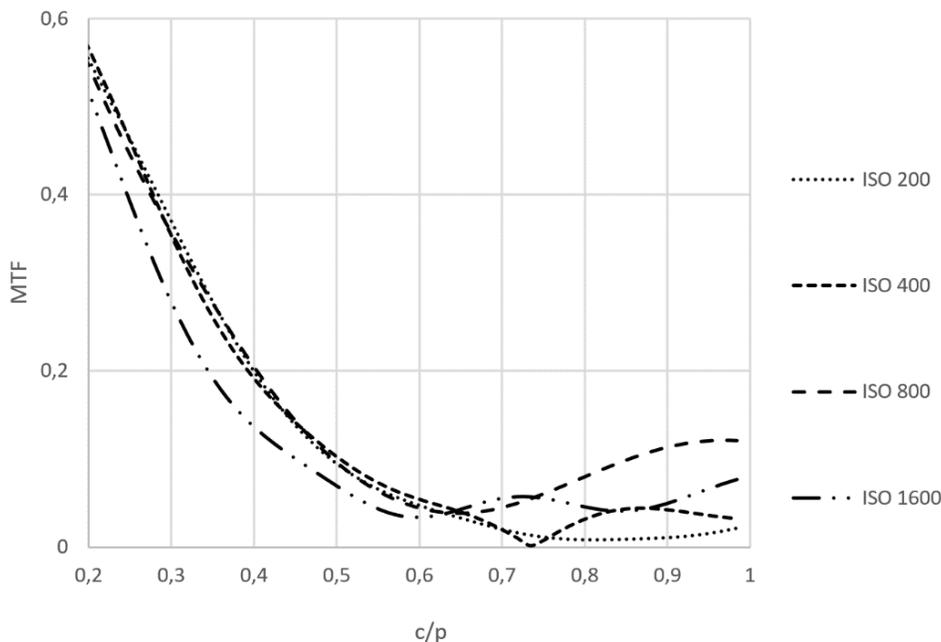


Abb. 5: MTF-Testchart: Artefakte, hervorgerufen durch hohe ISO-Einstellungen

2.5 Objektiv und Sensor

Die einzelnen Hersteller von UAV geben meist durch spezielle Halterungen oder durch eine feste Montage das jeweilige Kamerasystem vor. In der Praxis bleibt dem Anwender meist nur die oben beschriebenen Einstellungen am Kamerasystem optimal einzustellen, um das Auflösungsvermögen möglichst nicht zu verschlechtern.

In einzelnen Fällen ist durch die Halterung zwar das Kamerasystem (Body) gesetzt, der Anwender kann jedoch das einzusetzende Objektiv (im Rahmen gewisser Gewichtsbeschränkungen) frei wählen.

Als Kriterien für einen solchen Objektivwechsel zählt neben der Festbrennweite (Vermeidung von Zoom, Abb.4) auch die Verfügbarkeit eines manuellen Fokus, um Unschärfen im praktischen Einsatz zu vermeiden (Abb. 3 links). Das Zeiss Loxia 50 mm entspricht diesen Anforderungen. Es wurde im Labor unter optimalen Bedingungen (ISO 100, Blende f 5.6) analog zur Darstellung von DJI aus Abbildung 2 untersucht und mit dem Phase One RSM 80 mm f 5.6 an der iXM100 verglichen. Aufgrund des unterschiedlichen Sensorformates wurde für den Mittelformatsensor iXM eine längere Brennweite verwendet, um einen vergleichbaren Öffnungswinkel zu realisieren.

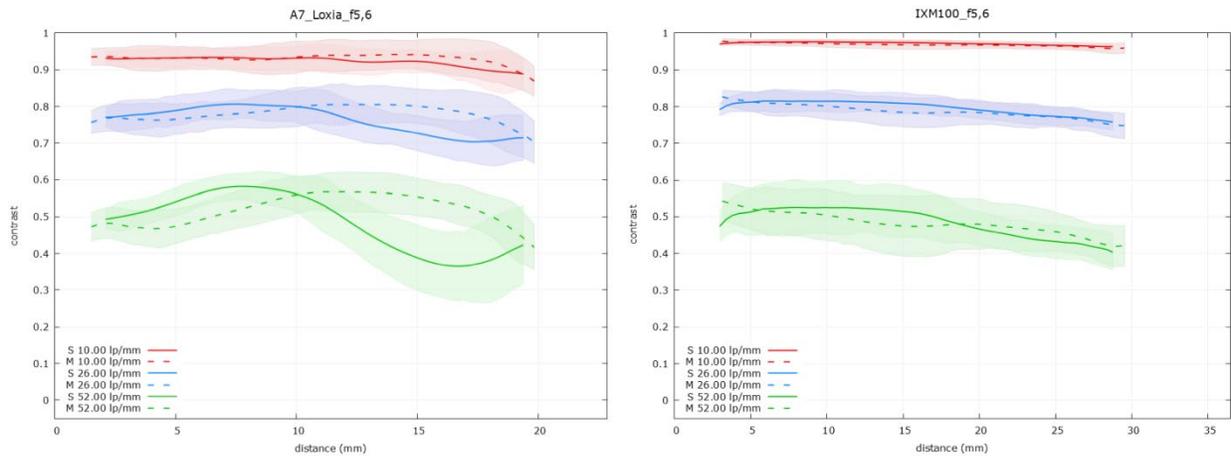


Abb. 6: Sagittale und meridional bestimmte MTF für die Sony A7 (links), rechts die Phase One iXM

Aus Abbildung 6 (links) ist ersichtlich, dass bei einem Vollformatsensor das Loxia 50 mm in der Bildmitte schlechtere Werte aufweist als das DJI DL 50 mm (Abb. 2.) Zudem weist der Unterschied zwischen sagittaler und meridionaler MTF auf einen Astigmatismus hin, der insbesondere bei feinen Strukturen zum Bildrand hin auftritt. Bessere Werte über einen, zudem größeren Bildradius, erreicht die iXM-100 von Phase One. Dieses Kamerasystem erreicht ein Auflösungsvermögen von 104 lp/mm bei MTF 30% und 156 lp/mm für eine MTF von 10%. Objektive, die vom Hersteller speziell für den Sensor gerechnet werden, weisen darüber hinaus eine geringe chromatische Aberration auf im Vergleich zu solchen Objektiven, die durch Dritthersteller gefertigt werden. Dies zeigt der Vergleich der chromatischen Aberration des Zeiss Loxia 50 mm, des Phase One RSM 80 mm und des fest mit der Sigma DP2 Merrill verbauten 30 mm Objektivs, dargestellt in der folgenden Abbildung.

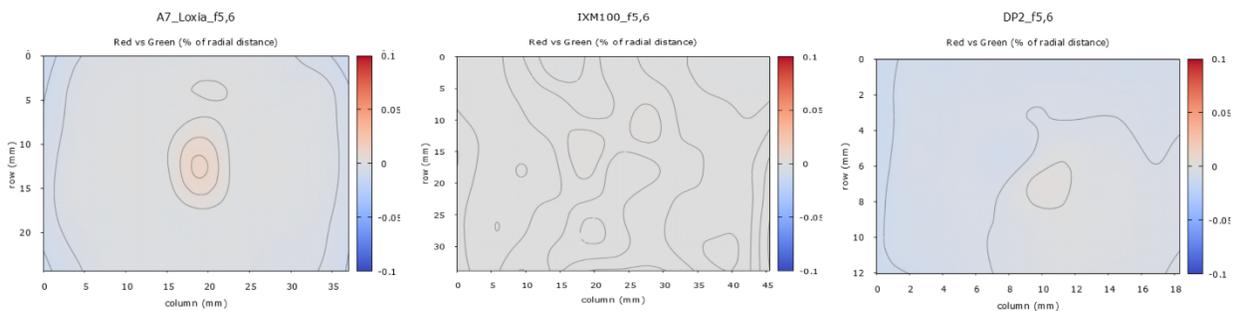


Abb. 7: Chromatische Aberration. Der Versatz roter vs. grüner Pixel ist in % des Bildradius angegeben. Links: SonyA7/Loxia, PhaseOne iXM-100 (Mitte) und Sigma DP2 Merrill (rechts).

Neben der Auswahl eines alternativen Objektivs bieten einige Hersteller ein modulares Nutzlastkonzept. Austauschbare Halterungen ermöglichen den Wechsel des Kamerasystems. Die DJI M300 kann sowohl die P1 (Vollformat) oder den Mittelformatsensor P3 tragen. Ein vergleichbares Setup wäre ein Hexapilots HP-T970 mit einer Sony Alpha 7 oder einer Phase One iXU-100.

Das Auflösungsvermögen eines digitalen Kamerasystems wird jedoch in erster Linie nicht vom Objektiv sondern vom Sensor bestimmt. Ein Beispiel hierfür sind die ausschließlich von Sigma verbauten Foveon Sensoren (GREIWE & GEHRKE 2013). Diese weisen gegenüber Sensoren mit Tiefpassfilter und Bayer-Farbfiler die höchsten MTF-Werte auf (Abb. 8).

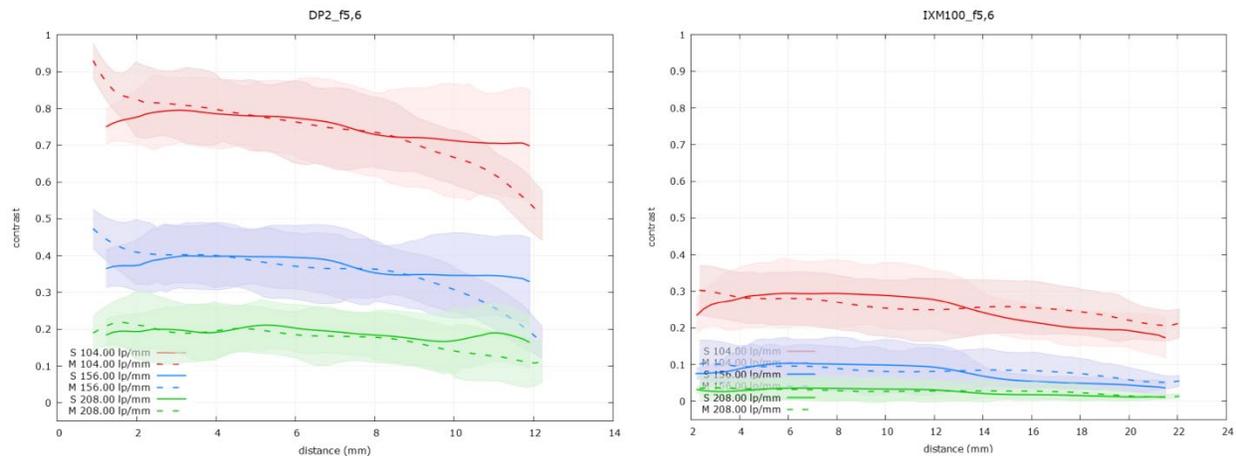


Abb. 8: MTF für Foveon-Sensor (Sigma DP2 Merrill, links) und für Bayer-Pattern (Phase One iXM, rechts).

Als Zwischenfazit kann aus den Laboruntersuchungen abgeleitet werden:

1. Der Fokus sollte vor dem Einsatz auf die Flughöhe angepasst und die Schärfentiefe berücksichtigt werden, insbesondere bei der Verwendung hochauflösender Systeme mit Normalbrennweite (ab 50 mm Kleinbild). Ein mechanischer, manueller Fokus ist immer zu bevorzugen, insbesondere wenn die Kamera nach dem Einschalten (Akkuwechsel) den Fokus erneut verstellt (z.B. Kit-Objektive Fa. Sony oder fest verbaut wie Sony RX-1).
2. Die Daten sollten im RAW-Format aufgezeichnet werden, eine Konvertierung in verlustbehaftete Formate wie JPEG sollte – wenn überhaupt – mit der Software des Herstellers erfolgen, jedoch nicht in der Kamera.
3. Objektive sollten auf ihre Abbildungsqualität hin untersucht werden. Ein einfaches Abblenden (meist von f 2.8 auf f 4.0) verbessert insbesondere am Bildrand die Bildqualität deutlich. Lediglich fest montierte, vom Hersteller auf den Sensor abgestimmte Optiken erreichen mit großer Blende ebenfalls eine gute MTF (Abb. 7).

Das Sensorsystem FOVEON wird seit fast 10 Jahren nicht mehr gefertigt. Welche Systeme heute in der Lage sind, vergleichbare Punktwolkenqualitäten zu erzeugen, ist Gegenstand im folgenden beschriebenen Praxistests am Testfeld der Hochschule Bochum.

3 HsBo 2021 Kampagne

3.1 Zielstellung

Im Jahr 2021 war durch die digitale Lehre im sogenannten COVID-Lockdown die Möglichkeit geboten, an vielen Wochentagen³ ein neu eingerichtetes Testfeld auf dem Campus der Hochschule Bochum zu befliegen. Hochschuleigene Copter und Systeme von externen Dienstleistern wurden verwendet, um eine Auswahl an Sensoren von der Sony RX-0 bis zur Phase One iXU-100 durchzuführen. Schwerpunkt der Auswertung ist jedoch nicht der Vergleich der Ergebnisse aus einer Bündelblockausgleichung. Vielmehr soll aufbauend auf die Kapitel 1 und 2 nun die Qualität der resultierenden 3D-Punktwolken hinsichtlich Auflösung, geometrischer Genauigkeit und Vollständigkeit betrachtet werden.

3.2 Testfeld der Hochschule Bochum

Das Testfeld umfasst große Teile des Campus der Hochschule Bochum und hat eine Ausdehnung von ca. 230 m x 200 m. Auf dem Gelände befinden sich zwei Gebäude mit 26 und 35 m Höhe, deren Dachflächen, teilweise in unterschiedlichen Geschosshöhen, begehbar sind (Abb. 9).

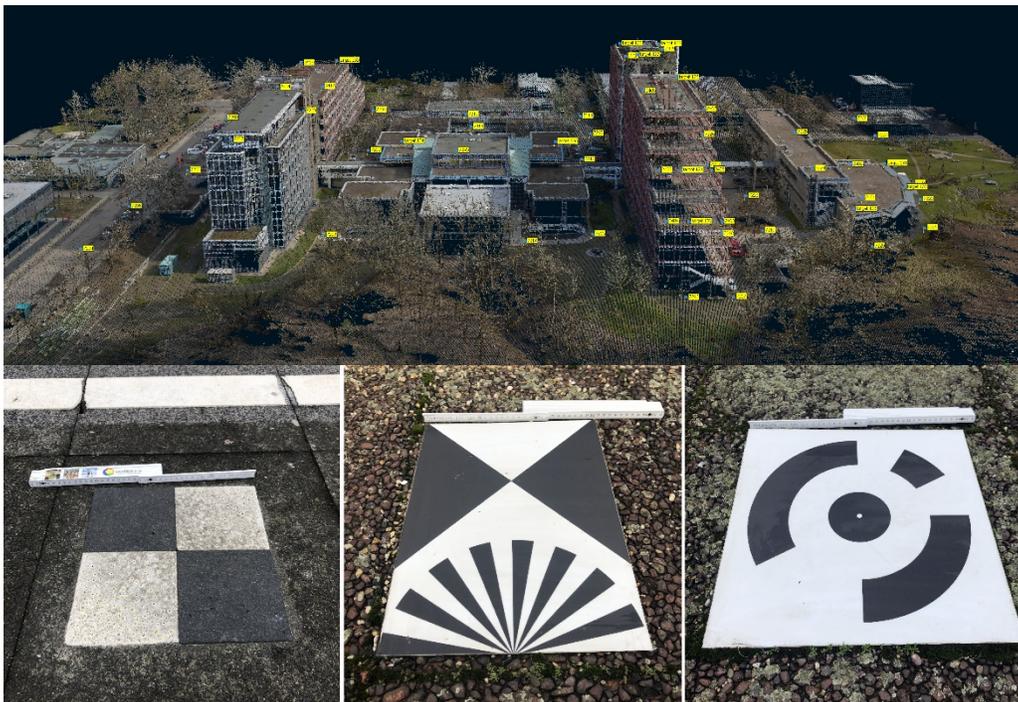


Abb. 9: Testfeld der Hochschule Bochum (oben) mit dauerhaft signalisierten Passpunkten (unten).

Neben 31 Punkten auf der Geländeoberfläche (Schachbrettmuster aus thermoplastischem Kunststoff) sind weitere 14 Punkte über Schachbrettmarken mit integriertem Siemensstern und 13 codierten Marken dauerhaft signalisiert.

³ Luftfahrtrechtlich ist der Flug über „unbeteiligte Personen“ strikt untersagt. Der Einsatz von UAV für photogrammetrische Aufnahmen erfolgte in Absprache mit der zuständigen Luftaufsichtsbehörde nach den derzeit üblichen Regularien.

Die Koordinaten der Punkte wurden in einer tachymetrischen 3D-Netzmessung im November 2020 mit einer Standardabweichung von 3 mm in Lage und Höhe bestimmt. Somit stehen 56 Punkte als Pass- oder Kontrollpunkte zur Verfügung, die das Messvolumen vollständig umschließen. Testfelder, die nicht über diese räumliche Ausprägung verfügen, erlauben keine sichere Bestimmung der Inneren Orientierung im Rahmen einer in situ Kalibrierung (FRASER 2018). So kann ein Kamerasystem einerseits in einer Laborkalibrierung an einem 3D-Testfeld eine stabile Innere Orientierung aufweisen und andererseits bei einer in situ Kalibrierung auf dem Testfeld andere Werte aufweisen. Die Ergebnisse aus CRAMER et al. (2017) lassen den Schluss zu, dass auch mit einer kreuzweisen Befliegung in unterschiedlichen Höhen die Kamerakonstante nicht zuverlässig geschätzt werden kann (Abb. 10).

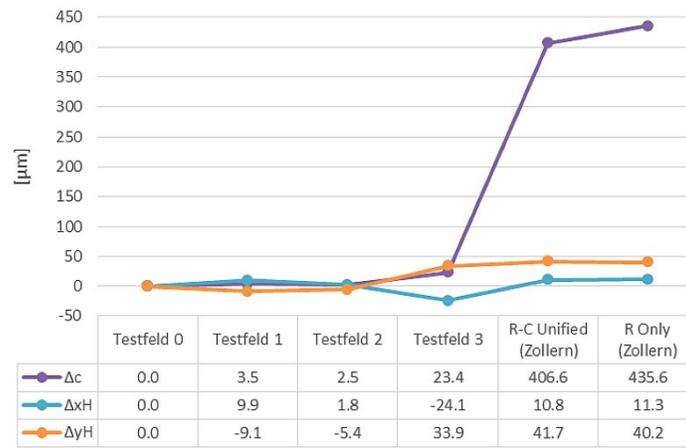


Abb. 10: Vergleich der Parameter der Inneren Orientierung zwischen Labortestfeld (3D) und in situ Kalibrierung mit Bodenpasspunkten (aus: CRAMER et al. 2017)

Diese fehlerhafte Bestimmung der Kamerakonstante durch systematische Höhenabweichungen an den Kontrollpunkten konnte am Testfeld Bochum dadurch nachgewiesen werden, da zur in situ Kalibrierung nur die 31 Punkte auf der Geländeoberfläche verwendet wurden und die 27 Punkte auf den Gebäuden als Kontrollpunkte (Abb. 11).

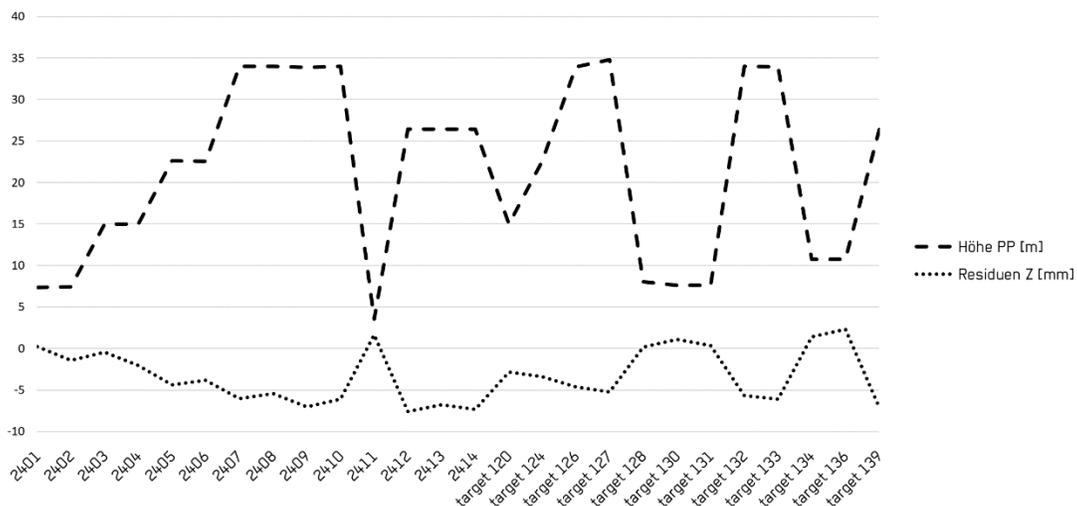


Abb. 11: Höhenabweichungen an Kontrollpunkten in Abhängigkeit von der Höhe des Kontrollpunktes

3.3 Kampagnen

Der Schwerpunkt der vorgestellten Arbeiten liegt jedoch nicht in der Untersuchung von Aufnahmeanordnungen und deren Auswirkung auf die Ergebnisse einer Bündelblockausgleichung. Vielmehr sollten mit möglichst vielen unterschiedlichen Sensoren, mit unterschiedlichen Einstellungen und unter Verwendung von allen Passpunkten die zugehörigen hochdichten Punktwolken erzeugt werden. Die einzelnen Systeme und Missionsparameter sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tab. 1: Systeme und Missionsparameter Kampagne HsBo2021

	Phantom 4 RTK SDK Edition	Sony RX-0	Sigma DP2 Merrill (DP2Mlo)	Sigma DP2 Merrill (DP2Mhi)	DJI P1	Sony Alpha 7R IV	Phase One iXM-100
Datum	16.06.2021	16.04.2021	10.06.2021	16.06.2021	10.06.2021	10.06.2021	19.03.2021
Bildmaterial	JPEG	RAW	RAW	RAW	JPEG	RAW	RAW
Belichtungsmodus	Automatik, ISO fest	manuell	manuell	manuell	Automatik	manuell	shutter priority
ISO	100	100	100	100	variabel	100	variabel
Blende	variabel	4,0	2,8	2,8	5,6	4	5,6
Belichtungszeit [1/s]	400	1000	1000	1000	1000	2000	1000
Pixel Size [μm]	2,41	2,41	10,30	5,10	4,39	3,79	3,76
Brennweite [mm]	8,8	8,1	30,0	30,0	35,0	35,0	35,0
Flughöhe [m]	70	50	50	50	70	85	80
GSD [mm]	19	15	18	9	9	9	8
Fluggeschwindigkeit	5,6	4,3	3,9	1,8	1,1	4,8	4,5
Bewegungsunschärfe [pix]	0,7	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3	0,5
RMS Bildmessung [pix]	0,17	0,87	0,18	0,17	0,15	2,73	0,13
Einbau der Kamera	quer	längs	längs	längs	quer	quer	quer
Längsüberdeckung	79	93	77	75	93	92	92
Querüberdeckung	78	78	60	60	77	79	88
Bildanzahl	188	858	488	415	698	577	635

Trotz der unterschiedlichen Sensorgrößen und Gewichten der Nutzlasten (Gimbal+Kamera) wurde durch Anpassung der Flughöhe für die kleineren Sensorformate (Phantom4, Sony Rx0) ein GSD von ca. 20 mm und für die APS-C bzw. Voll- oder Mittelformatsensoren ein GSD von ca. 10 mm geplant. Als maximale Einsatzzeit eines Systems wurden 60 Minuten über dem Testfeld zugelassen, um mehrere Systeme an einem Tag einsetzen zu können. Die Unterschiede in der Bildanzahl und damit auch der Überdeckungsparameter wird als Folge in Kauf genommen.

Die Aufnahmeeinstellungen wie ISO, Blende und Belichtungszeit wurden für die Systeme vorgegeben. Die Flüge der iXM-100 und der DJI P1 wurden von externen Projektpartnern

durchgeführt, welche eigene Kameraeinstellungen verwendet haben. So ist bei der iXM-100 die ISO freigegeben (Abb. 12), bei der DJI P1 neben der ISO zusätzlich die JPEG-Konvertierung in der Kamera aktiviert, so dass keine Rohdaten für das Post Processing vorlagen.

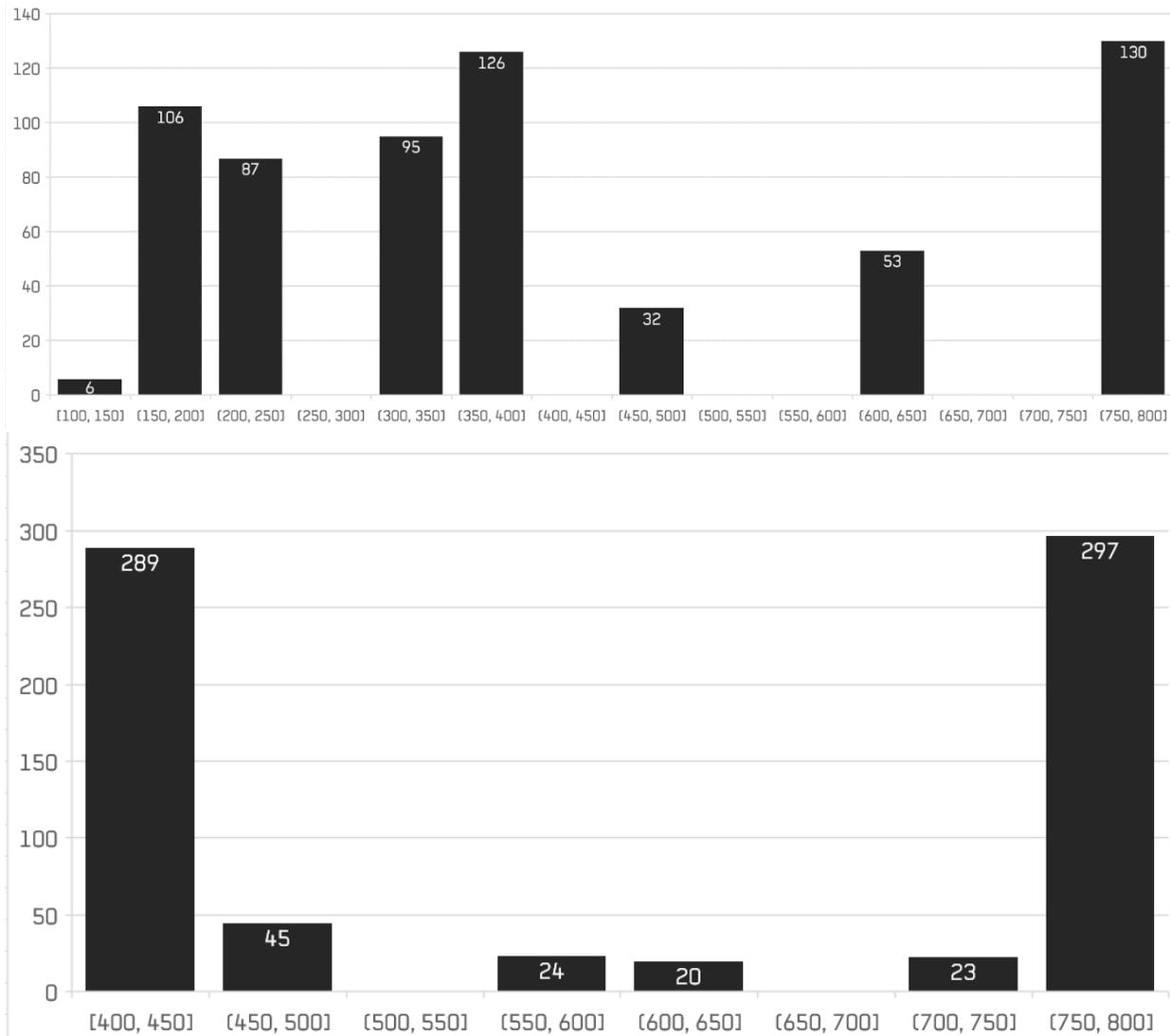


Abb. 12: Verteilung der variabel eingestellten ISO während des Fluges der iXU (oben) und der P1 (unten)

Die Punktwolken wurden in der höchsten Auflösung mit der Software Metashape erzeugt. Zur Orientierung der Bildverbände wurden alle Aufnahmen und alle vorhandenen Passpunkte verwendet, Verknüpfungspunkte nur dann zugelassen, wenn sie in drei Aufnahmen vorhanden waren. Zur Erzeugung der 3D-Punktwolke wurden Filterungen vermieden (Einstellung „mild“), im Endprodukt jene Punkte behalten, welche aus mindestens drei Tiefenbildern ermittelt wurden (Confidence-Level = 2).

4 Ergebnisse

Für den Vergleich der erzeugten Punktwolken wurden drei Orte auf dem Campus ausgewählt, die durch eine Detailstruktur das Auflösungsvermögen der Sensoren und die Auswirkungen der unterschiedlichen Aufnahmeeinstellungen verdeutlichen. Da die Flächen nicht mit einem Referenzsystem wie einem TLS flächig erfasst wurden, wird an dieser Stelle ein qualitativer Vergleich der Punktwolkenprofile vorgenommen.



Abb. 13: Testgebiete: "Platten" (links), "Metalldach" (Mitte) und "Zahnrad" (rechts)

4.1 Steinplatten

Auf einem Dach, in einer Höhe von etwa 4,5 m über dem Gelände, befinden sich in Stufen gestapelte „Waschbetonplatten“, die während der gesamten Kampagne unverändert blieben. Mit dem GSD der Sensoren von 10 bis 20 mm (Tab. 1) ist dieser Stapel mit Stufen von deutlich über 10 cm also dazu geeignet, Kanten im Oberflächenmodell nachzuweisen.

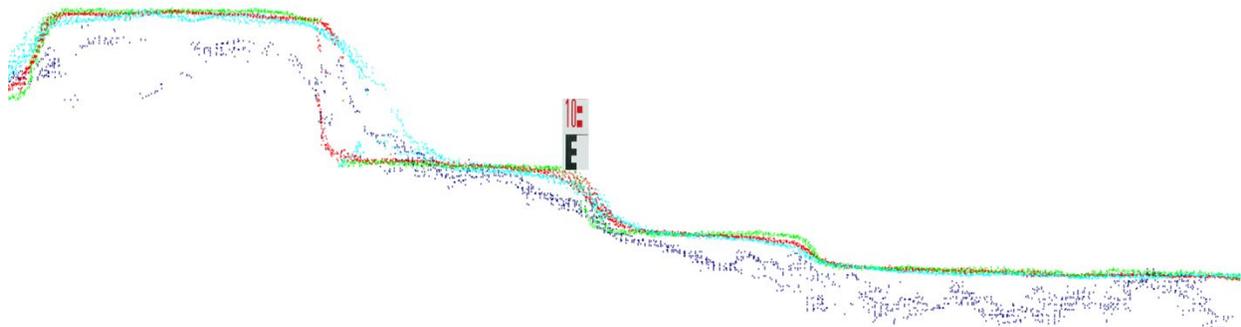


Abb. 14: Steinplatten im Profil, iXM (rot), Sony A7 (blau), DJI P1 (cyan), Sigma DP2Mhi (grün). Höhe des Maßstabs 10 cm, mit 1cm-Teilung.

In der Profildarstellung der Punktwolken (Abb. 14) weist der Datensatz der iXM aufgrund der geringen GSD die meisten Punkte und eine vollständige Erfassung der Stufen auf. Der Datensatz der Sigma DP2M weist weniger Punkte aber tendenziell schärfere Kanten auf, obwohl der Überdeckungsgrad deutlich geringer war (Tab. 1). Die Daten der DJI P1, insbesondere der Sony A7 erfassen die Stufen deutlich schlechter.

Von den Datensätzen mit dem größeren GSD (15mm bis 19 mm, Tab. 1) werden die Stufen im Vergleich zur iXM, die in Abbildung 15 als Referenz dient, zwar erfasst, allerdings wird die Kante im rechten Bereich aufgrund dieses geringen GSD nicht gut abgetastet.

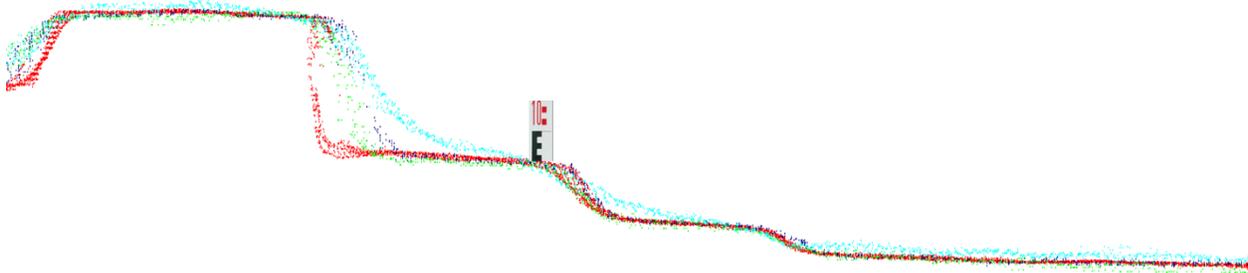


Abb. 15: Steinplatten im Profil, iXM (rot), Sigma DP2Mlo (blau), Sony RX-0 (cyan), DJI P4 (grün). Höhe des Maßstabs 10 cm, mit 1cm-Teilung.

4.2 Metaldach

Die Strukturen am Metaldach eines Fahrradständers sind wesentlich feiner und einhergehend mit der hellen Dachfärbung auch eine Herausforderung an die Dynamik des aufnehmenden Sensors. Hier schneidet die DJI P1 besser ab als an den Steinplatten (Abb. 14), obwohl die ISO in beiden Fällen für die entsprechenden Aufnahmen bei 800 lag. Die Sony A7 weist auch hier wiederum die schlechteste Abtastung der Oberfläche auf.

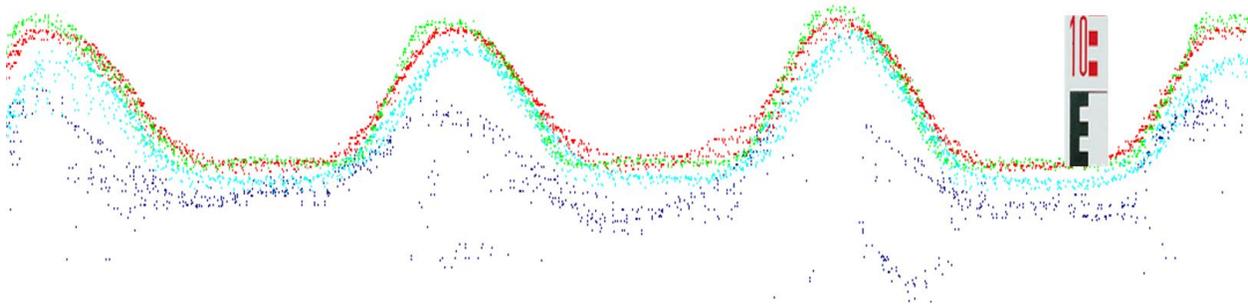


Abb. 16: Metaldach im Profil, iXM (rot), Sony A7 (blau), DJI P1 (cyan), Sigma DP2Mhi (grün). Höhe des Maßstabs 10 cm, mit 1cm-Teilung.

Im Vergleich zur Referenz (iXM, Abb. 17) weist die Sigma DP2Mlo die beste Abtastung auf, die Phantom 4 erscheint ein wenig gefiltert. Die RX-0 weist eine noch stärkere Filterung auf, die sich wie ein Höhenfehler auf die resultierende Punktwolke auswirkt.

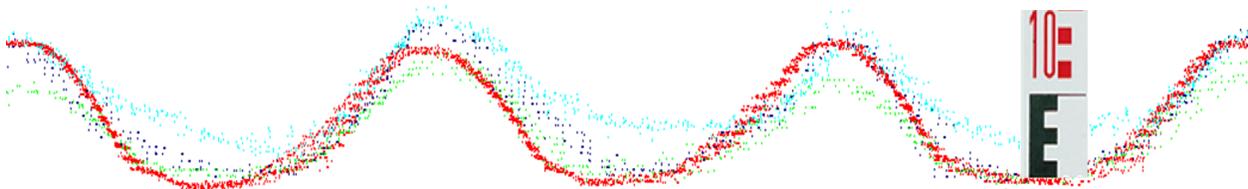


Abb. 17: Metaldach im Profil, iXM (rot), Sigma DP2Mlo (blau), Sony RX-0 (cyan), DJI P4 (grün). Höhe des Maßstabs 10 cm, mit 1cm-Teilung.

4.3 Zahnrad

Vor der Hochschule Bochum ist ein Industrieanlagen-Zahnrad in den Boden eingelassen, das einen Durchmesser von 7 m aufweist. Die Zahnhöhe beträgt 10 cm, die Zahnteilung ca. 20 cm. Durch den stahlgrauen Anstrich ist die Oberfläche texturarm. Eine hohe ISO-Einstellung und eine Nachschärfung von Bilddaten fällt an dieser Stelle im Untersuchungsgebiet besonders schnell auf, wie die Abbildung 18 zeigt. Die Daten der Sigma DP2 Merrill (rechts oben) werden als Rohdaten mit ISO 100 aufgezeichnet, wo hingegen die Datenaufzeichnung der DJI P1 mit variabler ISO (in diesem Fall 400) und JPEG-Konvertierung in der Kamera erfolgt, was durch die nachgeschärften Kanten in Abbildung 18 rechts unten erkennbar ist. Diese Bildartefakte führen dann zu fehlerhaften Punktwolkenprofilen.



Abb. 18: Gemessene Zahnhöhe (links), Aufnahme der Sigma DP2M (oben) und der DJI P1 (unten), beide GSD ca. 10 mm.

Aus Abbildung 19 ist ersichtlich, dass selbst die iXM die Zahnhöhe von 10 cm nicht vollständig erfasst, dies gelingt lediglich der Sigma DP2 Merrill (DP2Mhi) mit gleichem GSD von ca. 10 mm. Die Daten der DJI P1 und die Sony A7 erfassen die Geometrie nicht.

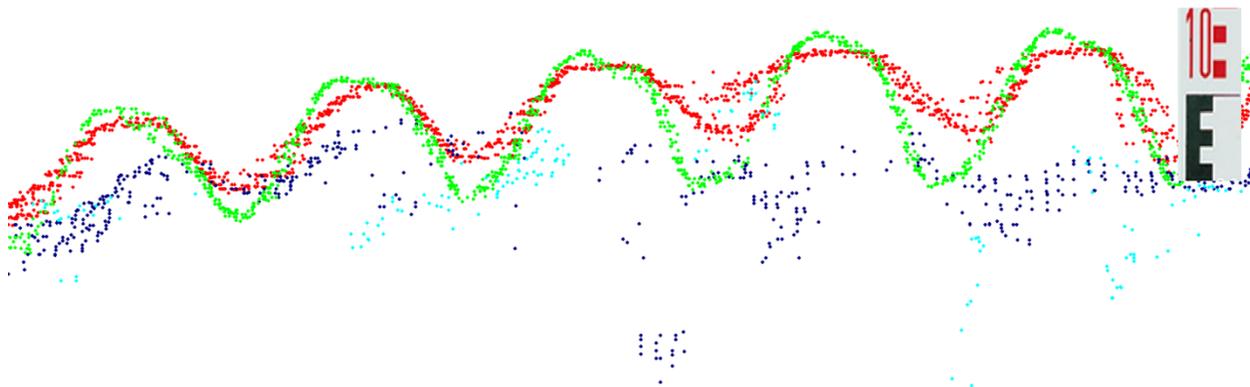


Abb. 19: Zahnhöhe im Profil, iXM (rot), Sony A7 (blau), DJI P1 (cyan), Sigma DP2Mhi (grün)

Der Datensatz der Sigma DP2 Merrill mit dem GSD von 20 mm (Mlo) zeigt im Vergleich mit der iXM (10 mm GSD) eine vollständige Erfassung des Bogens. Durch die geringe Abtastung (20 mm GSD) kann die Zahnhöhe allerdings nicht korrekt erfasst werden. Die Daten der Sony RX-0 sind hingegen stark geglättet, die DJI Phantom 4 versagt genauso wie die DJI P1 (Abb. 20, links unten in grün dargestellt). Als Grund wird hier die integrierte JPEG-Kompression in Kombination mit einer bis ISO 800 freigegebenen Aufnahmeeinstellung angenommen. Die Sony RX-0 zeichnet mit ISO 100 die Bilddaten als Rohdaten auf. Zwar weisen diese Daten auch eine Streuung auf, besitzen allerdings nicht die Artefakte der DJI Phantom 4 (Abb. 20, unten links, grün).

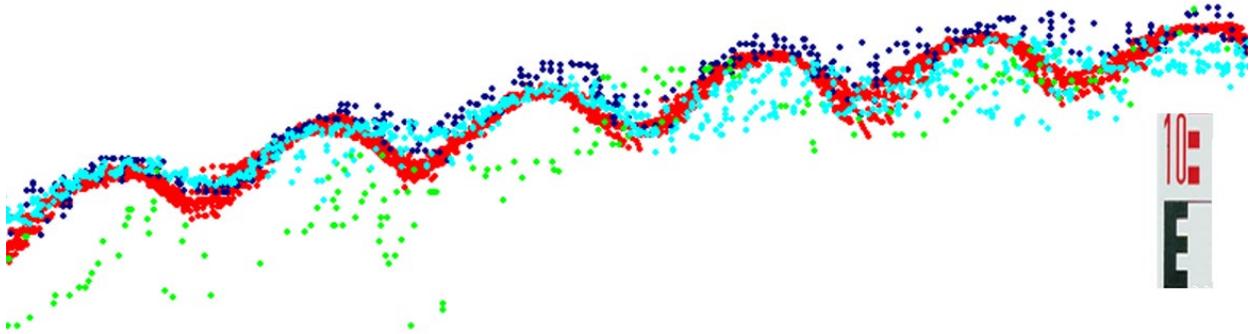


Abb. 20: Zahnhöhe im Profil, iXM (rot), Sigma DP2Mlo (blau), Sony RX-0 (cyan), DJI P4 (grün). Höhe des Maßstabs 10 cm, mit 1cm-Teilung

5 Fazit

Viele Untersuchungen UAV-getragener Kamerasysteme wurden auf Basis der geometrischen Betrachtung an einzelnen Kontrollpunkten im Rahmen der Bündelblockausgleichung durchgeführt. In diesem Vergleich sollten die Auswirkungen von Kameraeinstellungen und Sensor/Optik Kombination auf die Punktwolkenqualität untersucht werden.

Die enttäuschende Leistung der Sony Alpha 7R ist auf die falsche Auswahl des Objektivs zurückzuführen. Für die Portraitaufnahme optimiert, erzeugte diese Optik auch bei hohen Blendeneinstellungen keine zufriedene Bildschärfe, was sich in den Vergleichen der Testflächen bestätigte. Die Aufnahmen der DJI P1 wurden mit zu hohen ISO-Einstellungen und integrierter JPEG-Konvertierung durchgeführt, die Phantom 4 kann ohnehin nur JPEG aufzeichnen (Phantom 4 RTK, SDK Edition). Selbst bei optimalen Einstellungen kommen die kleinformatischen Sensoren an ihre Grenzen, wie die Sony RX-0 bestätigt.

Die untersuchte Phase One iXM-100 hat durch ihre hohe Bildfolgezahl und dem Sensorformat mit einer deutlich höheren Überdeckung und letztendlich auch einer intelligenteren Auswahl der freigegebenen ISO (Abb. 12) die beste Punktwolke erzeugt.

GREIWE et al. (2017) zeigten bereits in früheren Untersuchungen an einem Testfeld in Dortmund (Zeche Gneisenau), dass die Sensortechnik des Foveon-Sensors im Vergleich zu den CMOS-Kameras mit Bayer-Pattern aufgrund der besseren MTF schlussendlich auch die bessere geometrische Genauigkeit und Oberflächenabtastung ermöglicht.

Allerdings wird der Foveon-Sensor exklusiv von SIGMA verbaut und hat sich seit Produktionsende 2013 im Markt nicht durchgesetzt. Sie wird vermutlich auch nicht weiter

produziert werden. Es ist zudem zu sehen, dass sich CMOS-Sensoren mit Bayer-Pattern am Markt durchsetzen. Somit muss bei der Ableitung von hochgenauen und hochauflösenden Oberflächenmodellen aus solchen Luftbildern zukünftig ein Augenmerk auf den Praxiseinsatz mit Bayer-Pattern gelegt werden. Hier wird aus Sicht der Autoren in Zukunft zu prüfen sein, inwiefern sich die De-Bayering / De-Mosaicking und Binning – Methoden für CMOS-Sensoren insoweit verbessern lassen können, bis sie sich mit den herkömmlichen CCD-Sensoren messen können.

Es wird den Herstellern, aber auch den Dienstleistern für UAV-Befliegungen empfohlen, Praxistests mit ihren Systemen auf solchen UAV-Testfeldern durchzuführen, welche die vom Anwender aufzunehmenden Objekte in Ausdehnung und Höhenstaffelung repräsentieren, um hiermit deren Eignung für eine verlässliche Aufnahme des Objektes zu gewährleisten.

6 Literaturverzeichnis

- CRAMER, M., PRZYBILLA, H.-J., MEIBNER, H. & STEBNER, K., 2017: Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme. Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, **86**, DVW e. V. (Hrsg.), 67-84.
- CUNNINGHAM I. A. & FENSTER, A. 1987: A method for modulation transfer function determination from edge profiles with correction for finite-element differentiation. Medical Physics, 14(4), <https://doi.org/10.1118/1.596064>.
- DJI, 2021: Zenmuse P1 User Manual, V 1.2 (04.2021), <http://www.dji.com/zenmuse-p1>
- BOREMANN, G., D., 2001: Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems. SPIE – The International Society for Optivcal Engineering, Bellingham, Washington
- GHAASSOUN, Y., GERKE, M., KHEDAR, Y., BACKHAUS, J., BOBBE, M., MEISSNER, H., TIWARY, P.K. & HEYEN, R., 2021: Implementation and Validation of a High Accuracy UAV-Photogrammetry Based Rail Track Inspection System. Remote Sens., **13**, 384, <https://doi.org/10.3390/rs13030384>.
- FRASER, C., 2018: Camera Calibration Considerations for UAV Photogrammetry. Towards Photogrammetry 2020, ISPRS Technical Comm. II Symposium 2018, Riva del Garda, Italy, 3-7 June 2018.
- GREIWE, A. & GEHRKE, R., 2013: Foveon Chip oder Bayer Pattern – geeignete Sensoren zur Aerophotogrammetrie. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013, Luhmann, T. & Müller, C. (Hrsg.), VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach, 334-343.
- GREIWE, A., PETERS, J., SPRECKELS, V., SCHLIENKAMP, A., LÖSLER, M. & ESCHELBACH, C., 2017: Geeignete Kameras zur Geländeaufnahme durch UAS. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Luhmann, T. & Müller, C. (Hrsg.), VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach, 202-221.
- ISO 12233:2017(E), 2017: Photography – Electronic still picture imaging – Resolution and spatial frequency responses, Standard. International Organization for Standardization, Genf.
- LUHMANN, T., 2018: Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen - Methoden - Beispiele. 4. Auflage, Wichmann Verlag, Wiesbaden

- MEIßNER, H. PRZYBILLA, H.-J., CRAMER, M. & STEBNER, K., 2018: UAV-Kameras – Bewertung von Kalibrierung, Langzeitstabilität und optischem Auflösungsvermögen. Unmanned Aerial Vehicles 2018 (UAV 2018). DVW-Schriftenreihe, **89**, DVW e. V. (Hrsg.), 47-59.
- NASSE, H.H., 2008: Wie liest man MTF-Kurven? Technischer Bericht, Geschäftsbereich Photo Objektive, Carl Zeiss
- REICHENBACH, S. E., PARK, S. K. & NARAYANSWAMY, R., 1991: Characterizing digital image acquisition devices. Optical Engineering, **30**, 170-178.
- SPRECKELS, V., SCHLIENKAMP, A., GREIWE, A. & EBERHARDT, L., 2016: Eignung von ALS, Aero- und UAS-Photogrammetrie zur Früherkennung und Erfassung von Tagesbrüchen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., **25**, 97-112.
- PRZYBILLA, H.-J. & KERSTEN, T., 2022: Aspekte der Qualitätssicherung für UAV-Anwendungen in der Photogrammetrie. Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022, Beiträge zum 208. DVW-Seminar am 2. und 3. Juni 2022 in Berlin, 103-121.
- PRZYBILLA, H.-J., 2022: Wer wird denn gleich in die Luft gehen? UAV 2022 – Innovation und Praxis. DVW-Schriftenreihe, **100**, DVW e. V. (Hrsg.), 17-38.
- VERHOEVEN, G. J. J., 2010: It's all about the format – unleashing the power of RAW aerial photography. International Journal of Remote Sensing, **31**(8), 2009-2042.
- ZURHORST, A. & HUDASCH, J., 2020: Baubegleitende Dokumentation mittels UAV und bildbasierten Punktwolken. Unmanned Aerial Vehicles 2020 – The Sky is the limit? DVW-Schriftenreihe, **97**, DVW e. V. (Hrsg.), 219-228.