

# UAV-Kameras – Bewertung von Kalibrierung, Langzeitstabilität und optischem Auflösungsvermögen

Henry Meißner | Heinz-Jürgen Przybilla | Michael Cramer | Karsten Stebner

## 1 Einführung

Während der letzten Jahre hat sich die Luftbildaufnahme mit unbemannten Trägern (UAV) zu einer etablierten Methode für die 3D-Objektpunkt-Rekonstruktion entwickelt. Der Einsatz dieser Systeme hat Vorteile hinsichtlich Flexibilität und Verfügbarkeit besonders für die großmaßstäbige Kartierung räumlich begrenzter Gebiete. Darüber hinaus wird die UAV-Technologie vermehrt in klassischen ingenieurtechnischen Vermessungsszenarien verwendet und ersetzt in manchen Fällen die punktbasierende Objektvermessung mit Tachymetern. Anspruchsvolle ingenieurgeodätische Aufgaben, wie z. B. Inspektion und Überwachung, erfordern eine hohe Bodenauflösung und entsprechende Genauigkeit oftmals im Subzentimeterbereich.

Neben der korrekten Bildgeometrie und den angewandten Verarbeitungsschritten ist die Wahl des Kamerasystems von großer Bedeutung. Die Kamera als bildgebendes System ist der primäre Sensor und liefert die Daten aus denen die späteren Produkte (3D-Objektpunkte und/oder Punktwolken) abgeleitet werden. Die Qualität der Bildpunktmessung beeinflusst direkt die Qualität der Datenprodukte. Aus diesem Grund ist die Kamerageometrie und die zugehörige Kalibrierung ein wichtiger Aspekt, der berücksichtigt werden muss (Cramer et al. 2017a). Neben der geometrischen Kalibrierung sollten radiometrische Eigenschaften nicht unbeachtet bleiben, da sie die Qualität von Systemen und deren (effektiver) optischen Auflösung mitbestimmen. Die automatische Detektion von Verknüpfungspunkten für den photogrammetrischen Bündelblockausgleich ist ein weiterer Schritt in der Verarbeitungskette. Das zugrundeliegende Bild-Matching für die Merkmalsextraktion beeinflusst die erreichbare geometrische Genauigkeit, da es hauptsächlich auf den Grauwertinformationen eindeutiger Punkte bzw. Regionen beruht. Folglich ist die optische Abbildungsleistung eines Kamerasystems (neben Überlappung und Aufnahmegeometrie) maßgeblich für die Qualität des Matchings und gleichzeitig für die geometrische Stabilität des Blocks.

Die im UAV-Bereich verwendeten Aufnahmegeräte sind oftmals handelsübliche oder in Serie produzierte Kameras. Das Hauptaugenmerk liegt oftmals auf dem Gewicht und dem Potenzial der Integrierbarkeit in das Gesamtsystem. Sehr häufig haben photogrammetrische Aspekte (z. B. langzeitstabile innere Orientierung) eine geringe Priorität bei der Wahl der Komponenten. Die aktuell verfügbaren Kameras können in verschiedene Gruppen, abhängig von deren Spezifikationen/Systemdesign eingeteilt werden (z. B. Kompaktkameras, System- oder Bridge-Kameras, proprietäre Systeme, speziell angefertigt für UAV-Anwendungen). Typische Vertreter dieser Gruppen wurden empirisch hinsichtlich Langzeitstabilität der inneren Orientierung und des optischen Auflösungsvermögens untersucht. Die Ergebnisse werden hier in Form einer Benchmark-Übersicht gegeben.

Aus diesem Grund ist der Beitrag wie folgt aufgebaut: In [Kap. 2](#) werden die Kameras vorgestellt, die an der Untersuchung/Benchmark teilgenommen haben. Anschließend wird in [Kap. 3](#) das verwendete Verfahren zur Bestimmung der inneren Orientierung und Langzeitstabilität erläutert und die Ergebnisse diskutiert. [Kap. 4](#) behandelt ein Verfahren zur Bestimmung der effektiven optischen Auflösung und liefert die zugehörigen Ergebnisse.

## 2 Kameras für UAV-Anwendungen

Mittlerweile kommen verschiedenste Kamerasysteme in UAV-Anwendungen zum Einsatz, die sich bzgl. Sensorgröße, Trigger-Event-Kontrolle, Systemgewicht, Schnittstellenerreichbarkeit und Anschaffungskosten deutlich unterscheiden können. Diese Systeme werden oftmals gruppiert als a) proprietäre Systeme speziell für UAV-Einsätze entwickelt b) Groß- bzw. Mittelformatkameras c) Bridge- bzw. Systemkameras und d) Spiegelreflexkameras (Przybilla 2017). Dabei ist festzustellen, dass die, für die UAV-Photogrammetrie verwendbaren Kameras, in sehr kurzen Entwicklungszyklen zur Verfügung stehen. Die Aufnahmegeräte, die in diesem Beitrag verglichen werden, basieren jedoch auf Testreihen, die bereits im Jahr 2016 begonnen haben (vgl. [Abb. 1](#)). Die DP1 von Sigma wird in der Kategorie „Others/Andere“ geführt. Das ist dem Umstand geschuldet, dass diese Kamera einen Foveon-Sensor (Hubel et al. 2004) besitzt, der für jedes Pixel die zugehörigen Farbwerte in der Sensorpixeltiefe detektiert im Gegensatz zu Bayermuster-Kameras, die die entsprechenden Werte aus der direkten Nachbarschaft interpolieren (Cramer et al. 2017a).

Camera Class	Purpose built / Proprietary					Large Format	System / Bridge Cameras		DSLR	Other
Camera	DJI Inspire 1 Pro 12mm lens	DJI Inspire 1 Pro 15mm lens	DJI Phantom 3 Advanced	MACS Micro 24mm lens	MACS Micro 50mm lens	PhaseOne IXX1000 55mm lens	Ricoh GXR Mount A12 21mm lens	Sony Alpha 7R 35mm lens	Canon EOS SDS R 24mm lens	Sigma DP1
Lens	Olympus M. Zuiko 12mm f2.0	DJI MFT ASPH 15mm f1.7	Integrated lens 3.6mm f2.8	Schneider Kreuznach Apo-Xenoplan	Leica APO Summicron 50/2.0	Rodenstock 50mm f/5.6	Zeiss Biogon 21/2.8	Voigtländer Skopar 35/2.5	Canon EF 24 f/1.4L II USM	Integrated lens
MPx	16	16	12	12	16	100	12	36	52	4,7*
Approx. weight (incl. lens)	545 g	545 g	188 g	320 g	720 g	930 g	916 g	591 g	1626 g	277 g
Fixed aperture	4.0 f	4.0 f	2.8 f	4.0 f	2.8 f	4.0 f	7.1 f	5.6 f	5.6 f	5.6 f
Pixel pitch	3,75 µm	3,75 µm	1,55 µm	4,7 µm	7,4 µm	4,6 µm	5,5 µm	4,87 µm	4,14 µm	7,8 µm
Focal length	12 mm	15 mm	3,61 mm	24 mm	50 mm	50 mm	21 mm	35 mm	24 mm	16,6 mm
Pixel count in X	4608 px	4608 px	4072 px	4000 px	4864 px	11608 px	4288 px	7360 px	8688 px	2640 px
Pixel count in Y	3456 px	3456 px	3044 px	3000 px	3232 px	8708 px	2848 px	4912 px	5792 px	1760 px
FOV diagonal	84,0 °	71,5 °	95,0 °	52,2 °	46,7 °	67,4 °	68,0 °	67,2 °	84,0 °	73,4 °
FOV in X	71,5 °	59,9 °	82,3 °	42,8 °	39,6 °	56,2 °	58,6 °	57,9 °	73,7 °	63,6 °
FOV in Y	56,7 °	46,7 °	66,3 °	32,7 °	26,9 °	43,7 °	40,9 °	40,5 °	53,1 °	44,9 °
Image Acquisition Parameter										
Distance	16,0 m	20,0 m	11,7 m	25,6 m	33,8 m	54,2 m	19,1 m	36,0 m	29,0 m	10,7 m
Native ground resolution (image center)	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm

Abb. 1: Spezifikationen der verglichenen Kameras für UAV-Anwendungen

### 3 Langzeitstabilität der inneren Orientierung

In mehreren Tagungsbeiträgen (u. a. Cramer et al. 2017b) wurde darauf hingewiesen, dass sich die klassische Photogrammetrie auf die exakte 3D-Objektmodellierung, die geometrische Kalibrierung und deren Langzeitstabilität fokussiert. Diese Stabilität soll in diesem Abschnitt für die vorgestellten Kameras aus Kap. 2 untersucht und diskutiert werden.

#### 3.1 Durchgeführte Kalibriermethode

Kalibrierungen mittels Testfeld bieten die Möglichkeit das geometrische Verhalten eines Kamerasystems über einen längeren Zeitraum oder unter variablen Betriebsbedingungen zu prüfen. Das hier genutzte 3-dimensionale Testfeld der HS Bochum hat eine Ausdehnung von ca. 14 m × 3 m × 3 m und besteht aus ca. 500 räumlich verteilten, kodierten und nicht-kodierten Zielmarken. Die Bilderfassung bei der Kalibrierung erfolgt über einen höhengestaffelten „Halb-Rundverband“. Um eine Bestimmung der Hauptpunktlage sowie von Affinitäts- und Nicht-Orthogonalitätsparametern zu ermöglichen, beinhaltet der Datensatz um 90°, 180° und 270° gekantete Aufnahmen.

Die Kalibrierung wird als Bündelblockausgleich durchgeführt unter Benutzung der Aicon 3D-Studio-Software. Typischerweise wurden 70 Bilder pro Kalibrierepoche und Kamera aufgenommen. Die Anzahl der Bilder für die

DJI-Systeme ist etwas geringer, da die Kamera bei diesen Systemen nicht vom Träger zu lösen ist und somit nicht alle Kantungen realisierbar waren. Die verwendete Kalibrierungssoftware hat dabei das Standardverzeichnungsmodell nach Brown implementiert mit zusätzlichen physikalischen Parametern für die Korrektur von Kamerakonstante, Bildhauptpunkt, radialer und tangentialer Verzerrung sowie Affinität und Scherung. Alle Bildpunkte wurden automatisch durch Ellipsen-Fit extrahiert. Die Geometrie von Kalibrierblöcken ist sehr ähnlich und so wurden hier ähnliche Aufnahmeconfiguration für alle Systeme realisiert und sind somit direkt miteinander vergleichbar. Um Aussagen über die Stabilität treffen zu können, wurde jede dieser Kameras mehrfach (z. T. über mehrere Tage) kalibriert. Außer zwei Systemen wurde jede Kamera zu vier verschiedenen Zeitpunkten kalibriert. Dabei dient die erste Kalibrierung jeweils als Referenzepeche. Dabei wurde auf eine einheitliche Aufnahmegeometrie geachtet, sodass sich Korrelationseffekte zwischen innerer und äußerer Orientierung über alle Epochen nahezu identisch verhalten.

### 3.2 Ergebnisse der Methode zur Langzeitstabilität

Die in [Abb. 2](#) dargestellten Werte zeigen die Ergebnisse der vorgestellten Methode zur Bestimmung der Stabilität der inneren Orientierung für die untersuchten UAV-Kameras. Vergleichsparameter sind dabei die Kamerakonstante und der Bildhauptpunkt.

Offensichtlich ist, dass jede Kamera Abweichungen zu ihrer Referenzepeche aufweist. Diese Abweichungen bzw. Veränderungen sind Indikatoren für die opto-mechanische Stabilität der Kamera. Bei näherer Betrachtung lassen sich dennoch Unterschiede feststellen. Hierbei sei darauf hingewiesen, dass sich die Skalierungen der einzelnen Diagramme teilweise unterscheiden.

Die eigens für UAV-Anwendungen entwickelte MACS Micro 12MP bleibt unter 0,9 Pixel hinsichtlich Bildhauptpunktlage und unter 0,4 Pixel hinsichtlich Brennweitenänderung. Bezüglich der System- und Bridgekameras sind die Unterschiede der Sigma DP1 und Ricoh GXR deutlich unter 0,9 Pixel für alle Parameter, wobei die DP1 ein wenig stabiler wirkt. Als ein möglicher Grund kann das festverbaute Objektiv der DP1 angenommen werden. Anschließend ordnet sich die Mittelformatkamera PhaseOne IXU 1000 ein. Die Canon EOS 5 DSR zeigt die größten Abweichungen; der Wert der Kammerkonstante ändert sich um mehr als 14 Pixel für die letzten beiden Epochen. Dazwischen rangiert die Sony Alpha 7R. Interessant zu beobachten ist der Vergleich der beiden proprietären Systeme von DJI. Die Phantom 3 weist nur geringe Veränderungen auf, die vermutlich auch auf die Festmontage des Objektivs zurückzuführen sind. Somit kann die Phantom 3, in Bezug auf die geometrische Stabilität, als eine dem Konzept einer (photogram-)metrischen Kamera nahestehenden

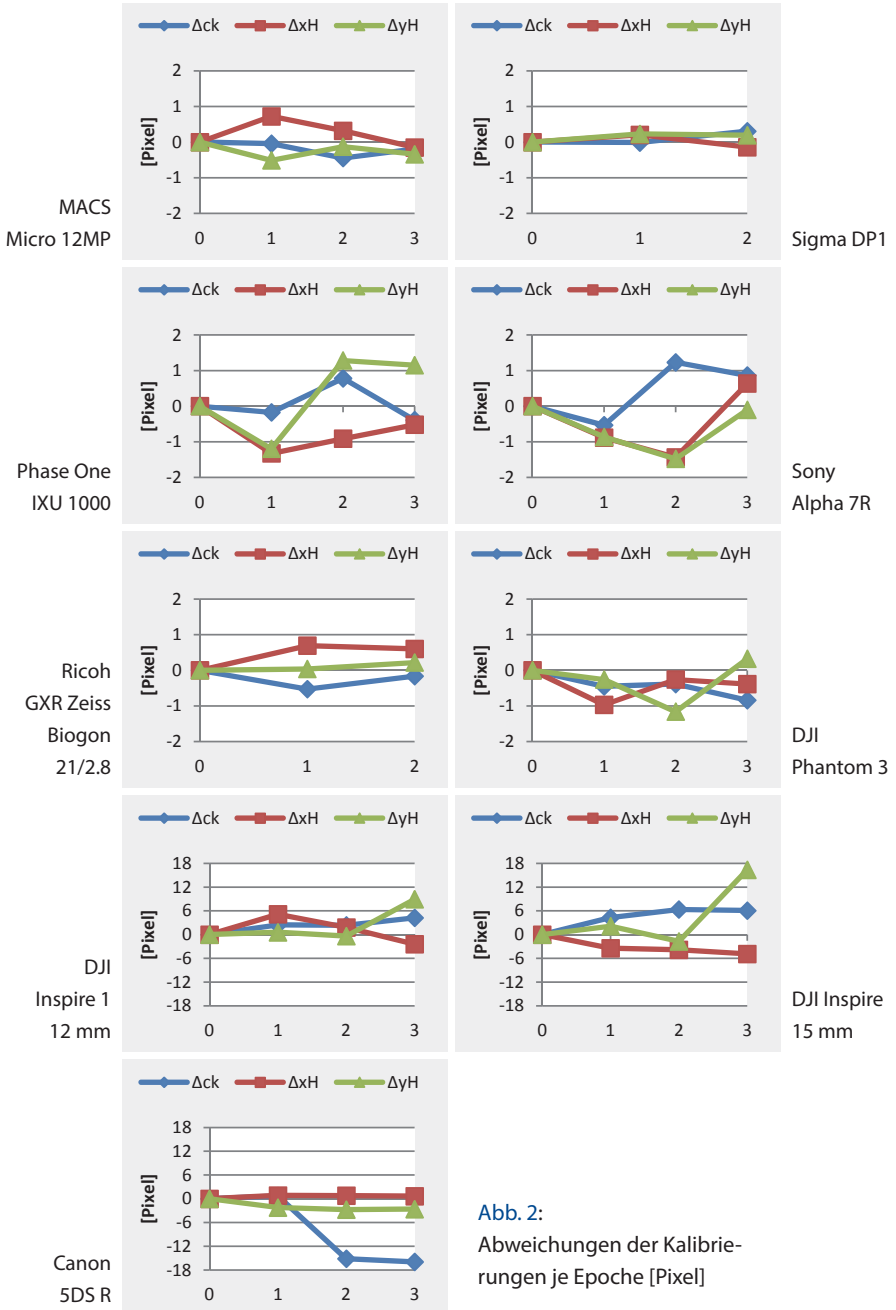


Abb. 2:  
Abweichungen der Kalibrierungen je Epoche [Pixel]

Entwicklung angesehen werden. Das wird noch offensichtlicher, wenn man die Werte mit denen des DJI Inspire 1 Systems (mit Wechselobjektiven) vergleicht. Dort sind die Abweichungen sowohl bezüglich der Brennweite als auch der Bildhauptpunktlage deutlich größer.

Es gibt teilweise erhebliche Unterschiede in Bezug der Stabilität der inneren Orientierung der Kameras. Prinzipiell sind Änderungen der inneren Orientierung einer Kamera dann vernachlässigbar, sofern die Aufnahmegeometrie eine Insitu-Kalibrierung zulässt (Cramer et al. 2017a) und sich die Kameraparameter während der Befliegung nicht verändern.

## 4 Effektives optisches Auflösungsvermögen

Die radiometrische Qualität optischer Sensoren wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Lichtstrahlen, die von einem Objekt reflektiert und von der Kamera detektiert werden, durchlaufen auf ihrem Weg einen Teil der Erdatmosphäre und verlieren dabei auf Grund von Absorption und Diffusion an Energie. Dieser Anteil ist im UAV-Kontext relativ gering und soll hier nicht weiter betrachtet werden. Anschließend passiert das Licht ein (komplexes) Linsensystem mit integrierter Blende. Somit werden die effektiven Raumwinkel für den Lichteinfall begrenzt. Die Konsequenz ist, dass sowohl das Objektiv als auch die Blende die Menge an Licht begrenzt und somit die Menge an Photonen, die zum Sensor gelangen können und dort zum Abbildungsprozess beitragen. Die Anzahl an Photonen, die in einem definierten Zeitraum die Photodioden erreicht, bestimmt die benötigte Belichtungszeit, die nötig ist, um ein äquivalentes Ausgangssignal zu erzeugen. Je kleiner die Blende dabei gewählt wird, desto mehr begrenzen Beugungseffekte ein scharfes Bild. Wird die Blendenöffnung zu groß gewählt, so gewinnen Abbildungsfehler, wie sphärische und chromatische Aberrationen an Bedeutung und beeinflussen die Aufnahme. Die Belichtungszeit beeinflusst in der Luftbildphotogrammetrie wiederum eine scharfe Abbildung in Form der Bewegungsunschärfe als Resultat der örtlichen Veränderung des Kamerasystems während der Belichtung. Bei Koptersystemen werden fast ausschließlich Stabilisierungen genutzt (Gimbal). Diese kompensieren einen Teil der Unschärfe, die durch plötzliche Rotationen (z. B. durch Windböen) entstehen. Der Unschärfeanteil durch die Bewegung des Fluggeräts während der Belichtung kann kompensiert (forward motion compensation) werden und einige großformatige Luftbildsysteme bieten solche technischen Lösungen an. Im UAV-Bereich wird auf solche (z. T. mechanischen) Lösungen oftmals verzichtet, da diese das Gesamtgewicht steigern und somit die Flugzeit verringern. Aus diesem Grund ist, die Belichtungszeit vor jedem Flug individuell den Umgebungsbedingungen sowie der geplanten Fluggeschwindigkeit anzupassen.

Ein weiterer, störender Aspekt ist die Abnahme der Lichtstärke zu den Bildrändern. Dieser Effekt wird häufig als Vignettierung beschrieben und wird durch das Linsensystem und die integrierte Blende verursacht. Die Vignettierung ist messbar und korrigierbar durch die Bestimmung der Photo-Response-Non-Uniformity (PRNU) (Kraft et al. 2016). Nachdem die Lichtstrahlen das Linsensystem passiert haben, treffen sie auf den Sensor, also die Baugruppe, die das digital interpretierbare Signal erzeugt, abhängig von den detektierten Photonen während des Belichtungszeitfensters. Die Qualität dieses Signals wird durch verschiedene elektronische Bauteile beeinflusst (Ausleseelektronik des Sensors, Analog-Digital-Wandler). Ein Maß für diese Qualität ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Das SNR ist ebenfalls charakterisiert durch a) das elektronische Grundrauschen, das unweigerlich entsteht sobald ein Halbleiter an eine Versorgungsspannung angeschlossen ist, und b) die photo-effektive Fläche jedes einzelnen Sensorelements (Pixel). Je größer die effektive Fläche desto mehr Photonen tragen bei angenommenen gleichen Belichtungszeitfenstern zum Signal bei und erhöhen es somit. Das elektronische Grundrauschen kann gemessen und anschließend berücksichtigt werden, indem man die Dark-Signal-Non-Uniformity (DSNU) bestimmt (Kraft et al. 2016).

#### 4.1 Verfahren zur Bestimmung der effektiven optischen Auflösung

Schärfe als ein Bildmerkmal ist charakterisiert durch die Modulationstransferfunktion *MTF*, welche die Ortsfrequenz-Antwort eines abbildenden Systems auf eine gegebene Belichtung ist. „Hohe Ortsfrequenzen spiegeln den feinen Bilddetailgrad wieder. Je größer die Antwort, desto feiner ist das Detail und desto schärfer ist das Bild“ (Mix 2005). Das effektive, optische Auflösungsvermögen kann auf verschiedene Weise bestimmt werden. Ein klassischer Ansatz ist die Verwendung von Balkendiagrammen (z. B. USAF-Testtafel mit Gruppen von Balken). Dort erhält man die (zumeist subjektiv bestimmte) Auflösung als den Balkenabstand in derjenigen Gruppe, die als gerade noch unterscheidbar wahrnehmbar ist. Das ist dem Rayleigh-Kriterium sehr ähnlich (Born und Wolf 1999), denn es definiert den Abstand zwischen zwei Punktlichtquellen, sodass diese von einem abbildenden System aufgelöst werden.

Um dem subjektiven Einfluss bei der Messung mit Balkendiagrammen entgegenzuwirken, nutzen einige Methoden Techniken aus der Signalverarbeitung bei der Bestimmung des Auflösungsvermögens. Die Beiträge von Reulke et al. (2004, 2006) gehören zu diesen Methoden. Dort werden die *MTF* und anschließend die Punktspreizfunktion *PSF* für ein bestimmtes Testmuster (z. B. Siemensstern) berechnet. Mit Vorkenntnissen über die (wohldefinierte) Siemensstern-Testtafel wird zunächst die Kontrasttransferfunktion *CTF* als

Gaußfunktion approximiert, wobei sich der Kontrast  $C$  zur zugehörigen Frequenz  $f$  aus dem Quotient der Intensitätsunterschiede  $I$  ergibt:

$$C(f) = \frac{I_{\max}(f) - I_{\min}(f)}{I_{\max}(f) + I_{\min}(f)}. \quad (1)$$

Die  $MTF$  wird ausgehend von der  $CTF$  mithilfe der Coltman-Formel (Coltman 1954) abgeleitet:

$$MTF(f) = \frac{\pi}{4} \left[ CTF(f) + \left( \frac{CTF(3f)}{3} \right) - \left( \frac{CTF(5f)}{5} \right) + \left( \frac{CTF(7f)}{7} \right) + \dots \right]. \quad (2)$$

Die  $PSF$  erhält man anschließend als die inverse Fouriertransformierte der  $MTF$ .

Es existieren mehrere Kriterien um aus diesen Funktionen Maße für das Auflösungsvermögen von Kameras abzuleiten. Der Parameter  $\sigma$  (Standardabweichung) der gaußförmigen  $PSF$  ist ein Kriterium. Es bezieht sich direkt auf den Bildraum und kann als objektives Maß angenommen werden, um die Abbildungsleistung verschiedener Kameras zu vergleichen. Ein weiteres Kriterium ist die zugehörige Frequenz, bei der die  $MTF$  einen gewissen (minimalen) Wert annimmt (z. B. 10 %,  $MTF_{10}$ ). Das Reziproke dieser Frequenz ist die Näherung für die maximale Anzahl an Linien pro Pixel (mit der Nyquistfrequenz bei 1). Die Breite der  $PSF$  auf halber Höhe ihres Maximums ist ein weiteres Kriterium und wird häufig als FWHM (full width half maximum) abgekürzt.

## 4.2 Benchmark Layout

Ziel der Benchmark Prozedur ist es die räumliche Auflösung für verschiedene Sensor-Linsen-Kombinationen vergleichend zu bestimmen. Um sicherzustellen, dass die Messung wiederholbar ist und gleichzeitig kein Streulicht die Analyse verfälscht, wurde ein ausreichend langer Kellergang gefunden und professionelles Fotografen-Equipment zur Beleuchtung genutzt (Abb. 3 oben). Für jede Kamera wurde die zugehörige Distanz zur Siemenssterntafel derart festgelegt, dass die nominelle Auflösung für alle Systeme gleich ist (entsprechend dem Verhältnis von Brennweite und Pixelgröße). In diesem Test wurde die nominelle Auflösung auf 5 mm festgelegt, um die eingangs erwähnten Anforderungen an Genauigkeit hinsichtlich Inspektions- und Überwachungsaufgaben zu adressieren. Üblicherweise verändert sich das Auflösungsvermögen, wenn es über das gesamte Bildfeld betrachtet wird. Um diesen Effekt zu analysieren wurden mit jeder Kamera mehrere Aufnahmen gemacht, wobei die Zieltafel an verschiede-



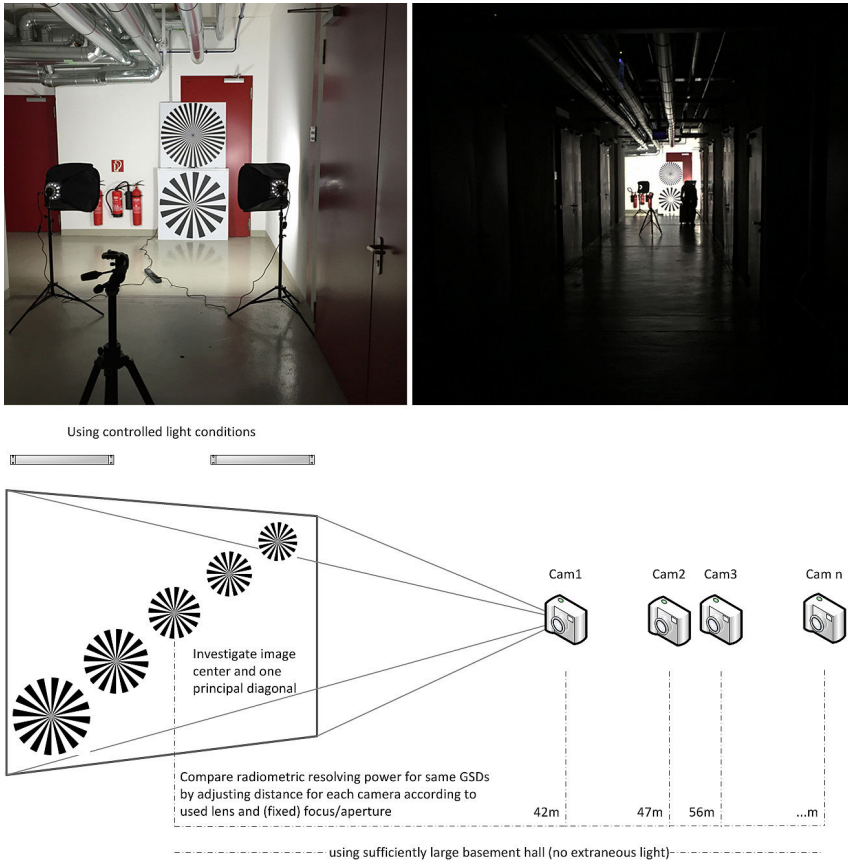


Abb. 3: Design und Layout der Benchmark-Prozedur

nen Stellen im Bildraum abgebildet wird, z. B. Bildzentrum, Bildhalbfeld und Bildecke (Abb. 3 unten).

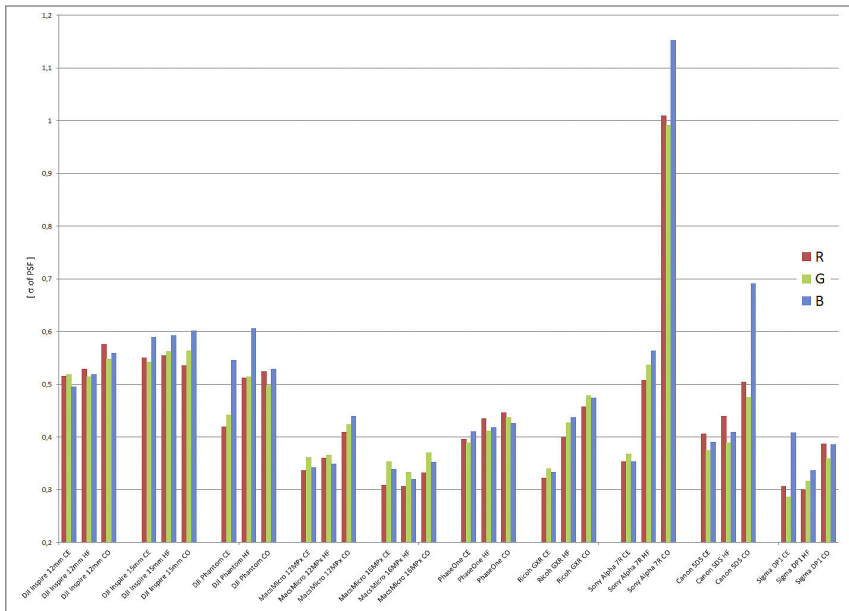
Die Auswirkung von verschiedenen Demosaikierungsverfahren, also die Konvertierung von Rohbildern in Farbbilder aus Bayer-Pattern wurde durch (Kraft et al. 2016) beschrieben. Die Untersuchung in diesem Beitrag wurde so angelegt, dass alle Aufnahmen mit dem DCB-Verfahren konvertiert wurden. Dabei wurde sowohl auf die open-source Implementierung von LibRAW, als auch die ursprüngliche Implementierung der MACS Micro Varianten genutzt. Für jedes konvertierte Bild wurde die *PSF* mit der zugehörigen Standardabweichung  $\sigma$  berechnet (Kap. 4.1). Um das Auflösungsvermögen so unverfälscht wie möglich entlang der Bild diagonalen darzustellen, wurden sowohl die Vignettierung als auch das Dunkelstromrauschen nicht korrigiert und soll somit die authentische

Systemantwort vom Objektraum zum Sensor abbilden. Die Ergebnisse sind in [Abb. 4](#) dargestellt.

### 4.3 Ergebnisse der Auflösungsuntersuchung

Wie erwartet, verringert sich das effektive, optische Auflösungsvermögen einer bestimmten Sensor-Objektiv-Kombination vom Bildzentrum über die Bildhalbfelder hin zu den Bildecken. Diese Abnahme der Auflösung wird durch Effekte der radialsymmetrischen Verzeichnung und durch Vignettierungseffekte hervorgerufen. Deutlich zu sehen ist dieser Trend bei Sonys Alpha 7R mit dem Voigtländer Skopar 35/2.5-Objektiv ([Abb. 4](#)). Während die Auflösung im Bildzentrum nahe an den Resultaten der am besten auflösenden Systeme liegt, nimmt sie zu den Bildecken außergewöhnlich stark ab.

Die Abbildungsleistung der DJI-Systeme verhält sich relativ homogen und die Veränderung über das gesamte Bildfeld ist gering. Die MACS-Micro-Prototypsysteme (besonders die 16 MP-Version) zeigen im Vergleich die besten Werte. Möglicherweise deutet das einen Zusammenhang zwischen Pixelgröße (photo-effektiver Fläche) und tatsächlichem Auflösungsvermögen an, denn für die 16 MP-Variante beträgt diese  $7,4 \mu\text{m}$ . Die Resultate der Sigma DP1 stützen



**Abb. 4:** Benchmark-Ergebnisse des optischen Auflösungsvermögens (CE-Sensorzentrum; HF-Sensorhalbfeld; CO-Sensorecke)

diese Annahme, da sie ebenfalls über 7,8 µm große Sensorpixel verfügt. Überdies hinaus liefert der Foveon-Chip die besten Resultate. Der Hauptgrund dafür ist das nicht nötige De-Mosaikieren der Bayer-Matrix (Hubel et al. 2004).

Die Ricoh GXR zeigt eine gleichmäßige Abbildungsleistung und ist nah an der MACS Micro 12MP und Phase One's IXU 1000. Besonders im Bildzentrum ist die Auflösung vergleichsweise sehr gut.

Die IXU 1000 von Phase One mit Mittelformat Sensor und 100 Megapixel weist lediglich geringe Abweichungen für das Auflösungsvermögen über das gesamte Bildfeld auf, auch wenn sie sich leicht hinter der MACS Micro 12MP bezüglich effektiver Auflösung platziert.

Die Canon 5DS R als Vertreterin der DSLR-Kamerafamilie verhält sich im Bildzentrum ähnlich der IXU 1000. Zu den Bildecken hin nimmt die Auflösung allerdings wahrnehmbar stärker ab.

Bei einigen Systemen ist zu beobachten, dass der blaue Farbkanal signifikant schlechter auflöst als der grüne oder der rote Kanal. Das Bayer-Muster besitzt doppelt so viele grüne Pixel im Vergleich zu roten und blauen Pixel. Daher sind für den grünen Kanal leicht besser bestimmte Werte zu erwarten (in Relation zu Rot und Blau). Dieser Sachverhalt ist noch nicht abschließend geklärt und wird in zukünftigen Arbeiten untersucht, gerade unter der Annahme, dass chromatische und sphärische Aberrationen und die Farbtemperatur der verwendeten Lichtquelle einen Einfluss haben können.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wurden verschiedene Qualitätsmerkmale für UAV-basierte Kamerasysteme vorgestellt und diskutiert. Folgende Aspekte sind dabei von Bedeutung:

- Neben den technischen Spezifikationen der Kamera, wie Brennweite, Pixel- und Sensorgröße, Blende und Öffnungswinkel ist es ebenfalls von Relevanz, welches Gesamtgewicht das System besitzt, wie genau ein Triggerereignis einer äußeren Orientierung zuzuordnen ist (z. B. im Hinblick auf eine direkte Georeferenzierung der Bilder) und wie gut die Schnittstellenerreichbarkeit ist. Die Gesamtsystemkosten sind dabei nicht zu vernachlässigen.
- Weitere hier vorgestellte Qualitätsmerkmale sind die Langzeitstabilität der inneren Orientierung und das effektive, optische Auflösungsvermögen abbildender Systeme.
- Die hier untersuchten Systeme unterscheiden sich teilweise deutlich hinsichtlich Langzeitstabilität der geometrischen Kalibrierung.
- Das geometrische Auflösungspotenzial erlaubt auch Aussagen über die radiometrische Qualität des Kamerasystems. Eine gute Auflösung erlaubt nicht

nur das Erkennen von Details in den Bildern, sondern auch eine bessere Verknüpfungspunktmessung.

- Es existieren manuelle und automatische Verfahren zur Bestimmung der Auflösung. Eine automatische Variante wurde hier algorithmisch vorgestellt.

Die Gesamtheit der hier zusammengetragenen Qualitätsmerkmale und deren Prozeduren eignen sich, um eine Gegenüberstellung von avisierten abbildenden Systemen zu realisieren. Prinzipiell lassen sich heutzutage Unzulänglichkeiten der Kamerageometrie teilweise durch Software lösen (z. B. Selbstkalibrierung mit Pix4Dmapper oder Agisoft PhotoScan). Neben einer geeigneten Aufnahmegeometrie (Bündelblock) sind zusätzlich für instabile Kamerasysteme Passpunkte notwendig, um jeweils die Maßhaltigkeit der erzeugten Modelle zu gewährleisten. Für stabile innere Orientierungen können hingegen Passpunkte für die Modellbildung vernachlässigt werden. Das effektive Auflösungsvermögen eines Kamerasystems ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Neben der De-Mosaikierungsmethode (Cramer et al. 2017a) ist auch die Sensor-Objektiv-Kombination entscheidend. Die effektive Auflösung weicht dabei in den meisten Fällen von der berechneten, nominellen Auflösung (zumeist identisch zur Herstellerangabe) ab. Neben kinematischen Einflüssen während der Befliegung (z. B. Bewegungsunschärfe) ist diese Abweichung auch unter statischen Laborbedingungen feststellbar. Es empfiehlt sich daher die tatsächlich erreichte Auflösung im Feld (z. B. durch Nutzung eines Siemenssterns oder USAF-Testtafel) mitzubestimmen.

## Literatur

- Born, M.; Wolf, E. (1999): Principles of Optics. Cambridge University Press.
- Coltman, J. W. (1954): The Specification of Imaging Properties by Response to a Sine Wave Input. *J. Opt. Soc. Am.* 44, S. 468–471.
- Cramer, M.; Przybilla, H.-J.; Meißner, H.; Stebner, K. (2017a): Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 67–84.
- Cramer, M.; Przybilla, H.-J.; Zurhorst, A. (2017b): UAV Cameras: Overview and geometric calibration benchmark. In: Stachniss, C.; Förstner, W.; Schneider, J. (eds.): International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42(2/W6), S. 85–92.
- Hubel, P. M.; Liu, J.; Guttosch, R. J. (2004): Spatial frequency response of color image sensors: Bayer color filters and foveon x3. *Proc. SPIE*, Vol. 5301, S. 402–407.

- Kraft, T.; Geßner, M.; Meißner, H.; Cramer, M.; Gerke, M.; Przybilla, H.-J. (2016): Evaluation of a metric camera system tailored for high precision UAV applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41(B1), S. 901–907.
- Mix, P.E. (2005): *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide*. John Wiley & Sons.
- Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e.V. (Hrsg.): *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)*. DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 51–66.
- Ruelke, R.; Becker, S.; Haala, N.; Tempelmann, U. (2006): Determination and improvement of spatial resolution of the CCD line-scanner system ADS40. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(2), S. 81–90.
- Ruelke, R.; Tempelmann, U.; Stallmann, D.; Cramer, M.; Haala, N. (2004): Improvement of spatial resolution with staggered arrays as used in the airborne optical sensor ADS40. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B1), S. 114–119.

## Kontakt

Henry Meißner | Karsten Stebner  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für optische Sensorsysteme  
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin  
[henry.meissner@dlr.de](mailto:henry.meissner@dlr.de) | [karsten.stebner@dlr.de](mailto:karsten.stebner@dlr.de)

Heinz-Jürgen Przybilla  
Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie  
Lennershofstraße 140, 44801 Bochum  
[heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de](mailto:heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de)

Michael Cramer  
Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie  
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart  
[michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de](mailto:michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de)