

# Welche ist am besten? – Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie

Michael Cramer & Benedikt Leinss<sup>1</sup>  
Institut für Photogrammetrie (ifp), Universität Stuttgart  
Geschwister-Scholl-Str. 24D  
70174 Stuttgart  
michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

## 1 Einführung

Die Verwendung von ferngesteuerten, unbemannten Flugsystemen (unmanned aircraft systems UAS, umgangssprachlich auch oftmals Drohnen genannt) für die photogrammetrische Erfassung von lokal begrenzten Gebieten oder Objekten findet zunehmend Verbreitung. Für diese Anwendungen werden in der Regel Fluggeräte mit einem Gesamtaufstiegsge­wicht (maximum take-off weight MTOW) von max. 5 kg (inkl. Nutzlast) verwendet. Grund dafür sind die Aufstiegs­genehmigungen in Deutschland: Nur für Fluggeräte innerhalb dieser Gewichtsklasse lässt sich eine allgemeine Aufstiegs­erlaubnis im vorgegebenen Rahmen erwerben. Ansonsten sind jeweils Einzel­genehmigungen notwendig, was eine möglichst flexible und kurzfristige Anwendung des UAS durch den Beantragungsvorlauf erschweren kann. Das maximale Aufstiegs­gewicht ist ausschlaggebend für die Nutzlast und damit auch für Auswahl des Kamerasystems. Bislang werden in den kommerziell üblichen Flugsystemen standard, sog. off-the-shelf oder Consumer-Kameras eingesetzt, also handelsübliche digitale Kompakt-, System-, oder Spiegelreflexkameras mit verschiedenen Sensorformaten bis hin zum Kleinbildvollformat (24 x 36 mm<sup>2</sup>). Diese Kameras werden oftmals lediglich durch eine entsprechende zeitliche Synchronisation mit der Steuerelektronik der Plattform verbunden, um zu vorgegebenen Auslösezeit-

---

<sup>1</sup> Dieser Bericht beruht in großen Teilen auf einer 2014 fertiggestellten studentischen Arbeit. Die Arbeit wurde von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik & Geodäsie der Universität Stuttgart als beste studentische Arbeit des Studienjahres 2013/14 prämiert.

punkten die Aufnahme zu erledigen und/oder eine Zeitsynchronisation mit GNSS-Positionsmessungen (Geotags) zu realisieren. Die Positionen können dann in der Auswertung für eine erste Vorpositionierung der Bilder und Strukturierung des Bildverbands genutzt werden. Festzustellen ist, dass die allgemein üblich verwendeten UAS-Kamerasysteme nicht speziell für photogrammetrische Anwendungen konzipiert wurden, sondern sich deren Auswahl in erster Linie aufgrund deren Verfügbarkeit ergibt.

Im klassischen photogrammetrischen Luftbildfall ist die Vorgehensweise bislang grundsätzlich anders. Hier werden Kamerasysteme anhand eines vorgegebenen Anforderungskatalogs speziell entworfen und für diese Aufgaben entwickelt. Daraus ergeben sich (metrische) Kamerasysteme, welche die photogrammetrischen Belange bestmöglich erfüllen sollen.

In diesem Beitrag sollen zunächst in einem ersten Überblick die generellen Unterschiede zwischen klassisch photogrammetrischen und den oftmals in UAS-Anwendungen eingesetzten Consumer-Kameras aufgezeigt werden (Abschnitt 2), wobei die Grenze zwischen den beiden Gruppen fließend sein kann. Im zweiten Teil werden dann exemplarische Untersuchungen zur Genauigkeitsbeurteilung von zwei (UAS-)Kamerasystemen gezeigt. Diese Untersuchungen erfolgen anhand von zwei unterschiedlichen Kameras, die der Kompakt- bzw. Systemkameraklasse zuzuordnen sind. Schwerpunkt liegt auf der Analyse der radiometrischen (Abschnitt 3) und geometrischen Qualität (Abschnitt 4). Die Untersuchungen erlauben eine Abschätzung des Potenzials der entsprechenden Kamera für die photogrammetrische Anwendung und liefern damit einen Beitrag zur Beantwortung der Frage, welches System für photogrammetrische UAS-Anwendungen geeignet ist.

## **2 Anforderungen an ein metrisches (UAS-)Kamerasystem**

Klassische photogrammetrische (Luftbild-)Kameras zeichnen sich aus durch eine hohe (geometrische) Stabilität. Man spricht daher auch von metrischen Kameras (mapping cameras). In der Regel werden die Kameras vorab kalibriert und die entsprechenden Kameraparameter können dann abgesehen von kleinen Abweichungen für eine längere Zeitdauer als bekannt angesehen werden. Daher sind diese Kameras auch mit einer Festbrennweite und Fixfokus auf Unendlich ausgestattet. Neben der Ableitung von 3D-Objektrauminformationen aus den Bildern liefern fast alle großformatigen Luftbildkameras auch die Farbwerte mit

separaten Farbkanälen, sodass auch Fragestellungen im Umfeld der Fernerkundung beantwortet werden können. Dieses erfordert eine zusätzliche radiometrische Kalibrierung des Sensors.

Die klassischen Luftbildkameras erlauben aufgrund der großen Bildformate und guten Auflösungen eine effiziente Datenerfassung; auch aus großen Aufnahmefernungen können noch kleine Details bei großer Flächenabdeckung pro Bild erfasst werden. Die hohen Auflösungen werden durch qualitativ gute Optiken und umfassende Bewegungskompensation erreicht, d.h. die Kamera wird durch eine stabilisierende Plattform von den Rotationsbewegungen des Trägerflugzeugs entkoppelt. Darüber hinaus werden Verfahren zur Bildwanderungskompensation angewandt. Bei digitalen Kameras ist das typischerweise das Verschieben der elektronischen Ladungen auf dem CCD-Sensor unter Nutzung des „Eimerketten-Prinzips“ während der Bildaufnahme (time-delayed integration TDI). Bei CMOS-basierten Kameras ist wegen der separaten Ansteuerung und Auslesung jedes einzelnen Pixels dieses Ladungsverschieben so nicht möglich, stattdessen wird nun die gesamte Sensorfläche in der Fokalebene bewegt (z.B. Leica DMC III Kamera). Dieses Verfahren ist vergleichbar zu der damaligen Bewegung des Films bei der analogen Aufnahme, dem sog. FMC (forward motion compensation), wobei der CMOS-Sensor nach der Aufnahme in seine definierte Ausgangsposition zurückkehren muss. Beim Film wurde der Bezug zur Fokalebene durch die fest installierten Rahmenmarken realisiert. Alternativ werden aber auch definiert zu bewegendes Strahlteiler / Prismen eingesetzt (z.B. Leica RCD30 Kamera), um die Kamerabewegung zu kompensieren. Die Verwendung beweglicher optischer Elemente oder Linsengruppen im Strahlengang kennt man auch von den Kompaktkameras oder in Objektiven von Spiegelreflexkameras.

Die umfassende Bewegungskompensation erlaubt nicht nur visuell scharf abgebildete Aufnahmen, eine gute Bildqualität ist auch für den späteren photogrammetrischen Auswerteprozess von Relevanz. Ein Kernelement der photogrammetrischen Auswertung ist die Verknüpfung der sich überlappenden Bilder zu einem stabilen photogrammetrischen Bildverband. Diese sog. Verknüpfungspunktmessung oder auch Bildzuordnung / Matching wird heute automatisch mittels verschiedener Punktzuordnungsverfahren realisiert. Auf die unterschiedlichen Verfahren wird in Abschnitt 4.2 kurz eingegangen, eine gute Bildradiometrie ist aber förderlich für alle automatischen Punktmessverfahren. Letztlich basieren diese Methoden auf der Detektion von Ähnlichkeit / Übereinstimmung von Grauwerten oder bestimmten Merkmalen, die z.B. durch Bildrauschen negativ beeinflusst werden kann.

Abschließend ist noch die exakte Zeitsynchronisation von metrischen Luftbildkameras zu erwähnen. Diese dient nicht nur der gezielten Auslösung der Kamera im Zusammenspiel mit der Flugnavigation (pin-point photogrammetry), sondern auch der späteren Einbindung von direkt gemessenen GNSS(/inertial)-Orientierungselementen im Rahmen der erweiterten Aerotriangulation, der sog. integrierten Sensororientierung. Um das Genauigkeitspotenzial der direkt gemessenen Orientierungselemente aus GNSS(/inertial)-Systemen voll ausschöpfen zu können, sind aufgrund der Fluggeschwindigkeit des Trägers Zeitsynchronisationsgenauigkeiten im Bereich von einer Millisekunde und besser erforderlich.

Die Spezifikationen einer photogrammetrischen Kamera sind im Prinzip auf das Kamerasystem für die UAS-Anwendung zu übertragen. Generell ist es auch möglich ein metrisches Kamerasystem für die UAS-spezifischen Rahmenbedingungen zu konzipieren. Wenn man die UAS-Photogrammetrie als Erweiterung der terrestrischen Photogrammetrie sieht, so gab es derartige terrestrische (stereo-)Messkameras bereits zur Zeit der analogen Bildaufnahme. Für UAS sind aber, wie oben schon erwähnt, das Kameragewicht und die Kameragröße die limitierenden Parameter, vor allem wenn an einen Einsatz in der UAS-Kategorie  $< 5$  kg MTOW gedacht wird. Bei fast allen kommerziell verfügbaren UAS für photogrammetrische Anwendungen wird daher ein anderer Weg beschritten. Die UAS-Hersteller verwenden eine meist (geringfügig) modifizierte kommerzielle Großserienkamera und integrieren diese in die Flugplattform. Dabei sollte die Kamera in Anlehnung an obige Ausführungen vor allem hinsichtlich Stabilität der Optik folgende Voraussetzungen erfüllen, die aber nicht immer erfüllt werden, bzw. zu erfüllen sind:

- geringes Gesamtgewicht ( $< 1$  kg) und -volumen bei dennoch stabilem Gehäuse.
- möglichst große Fläche des Bildsensors und vor allem der Fläche pro Pixel (z.B. APS-C:  $22 \times 15$  mm<sup>2</sup> oder Vollformat  $24 \times 36$  mm<sup>2</sup> oder größer), um einen großen Dynamikumfang und ein niedriges Rauschmaß zu gewährleisten.
- stabile Verarbeitung des Objektivs und keine beweglichen Teile in der Optik oder am Sensor, d.h. kein Bildstabilisator (weder optisch noch mechanisch am Bildsensor) und kein Sensorreinigungssystem, bei dem der komplette Sensor gerüttelt wird.
- Festbrennweiten-Weitwinkelobjektiv, bevorzugt mit manueller, direkter mechanischer Fokussierung mit sehr guter Abbildungsleistung (insbeson-

dere geringe Verzeichnung, hohes Auflösungsvermögen über das gesamte Bildfeld).

Im Consumer-Segment gibt es prinzipiell drei verschiedene Typen von Kameras: Die Kompaktkameras, die klassischen Spiegelreflexkameras und die zunehmend Verbreitung findenden sogenannten spiegellosen Systemkameras oder Bridge-Kameras. Wie der Name Bridge-Kamera verdeutlicht, sollen diese Kameras die Brücke zwischen den Kompakt- und Spiegelreflexkameras schlagen: kompakte, einfach zu bedienende Kameras gepaart mit Wechselobjektiven und der Qualität der klassischen Spiegelreflexkamerasysteme. Diese Systemkameras sind in der Regel leichter als Spiegelreflexkameras, wegen des fehlenden Spiegels mechanisch weniger aufwendig und bieten sich daher besonders für die Anwendung in UAS an.

Neben Kameras aus dem Consumer-Segment sind Industriekamerasysteme zu nennen. Diese bestehen im Regelfall zunächst nur aus dem eigentlichen bildaufzeichnenden Element zzgl. Optik und müssen zur Bedienung, Synchronisation, Datenkommunikation und -speicherung an einen Rechner angebunden sein. Damit lassen sich sehr flexibel anwendungsspezifische Systeme konzipieren, die nur aus den wirklich benötigten Komponenten bestehen. Das ist ein großer Vorteil gegenüber den Consumer-Kameras, da man hier ein Komplettsystem erwirbt, das für den „normalen“ Anwender konzipiert ist. Komponenten wie z.B. optischer Sucher oder eingebauter Blitz sind aber für die normale UAS-Anwendung nicht notwendig und verursachen nur weiteres Gewicht. Andererseits sind die Systeme quasi „stand-alone“ betriebsfähig, d.h. verfügen über eigene Stromversorgung und Datenspeicherung und können im Regelfall sehr einfach zwischen unterschiedlichen Trägerplattformen ausgetauscht werden, da keine speziellen Anforderungen an den Bordrechner gestellt werden. Hardwareseitig stark integrierte UAS-Plattformen verwenden i.d.R. fest eingebaute Kameras, die dann für eine bestimmte Anwendung konzipiert sind. Hier sind zum Beispiel die neuen Inspektions-Drohnen zu nennen (z.B. sensefly eXom), die neben einer Kamera oftmals mit zusätzlichen Abstands- und/oder Radarsensoren in einem Sensorkopf ausgerüstet sind, um sich in der unmittelbaren Umgebung der Drohne autonom zu orientieren, z.B. um möglichst nah an das zu vermessende Objekt heranfliegen zu können – vor allem wenn es sich um komplexe Objekte handelt oder höchste Auflösungen gefordert sind.

Nur der Vollständigkeit halber sollen noch die unbemannten Flugplattformen aus dem „Action-Bereich“ erwähnt werden, die oftmals mit sehr weitwinkligen oder Fischaugen-Optiken ausgestattet sind, um ein möglichst großes Bildfeld zu erfassen (z.B. für first-person-view (FPV) Flüge). Prinzipiell sind solche Systeme

me auch für photogrammetrische Anwendungen zu verwenden, bieten sie doch den Vorteil auch auf kurze Distanz große Flächen zu erfassen. Das prädestiniert die Kameras vor allem auch für Innenraumanwendungen. Wegen der besonderen Kamerageometrie, die wegen der großen Öffnungswinkel nicht mehr der zentral-perspektivischen Abbildung gehorcht, sind aber entsprechende modifizierte Auswertemodelle zu berücksichtigen.

Am DLR Berlin und IGN Paris laufen zurzeit zwei unabhängige Aktivitäten zur Entwicklung einer metrischen UAS-Kamera, die gemäß den oben genannten Voraussetzungen entwickelt wird. Für das Camlight-Kamerasystem des IGN steht schon ein Vorserien-Prototyp zur Verfügung. Die Kamera basiert auf einem 20 MPix CMOS-Vollformat-Sensor mit  $6.4 \times 6.4 \mu\text{m}^2$  Pixelgröße. Die maximale Bildfolge liegt bei 30 Bildern/s bei  $94 \mu\text{s}$  kürzester Belichtungszeit. Die Abmessungen der Kamera (Kamerakopf inkl. Elektronik) betragen  $7 \times 7 \times 4 \text{ cm}^3$  bei einem Gewicht von ca. 120 g (Martin et al., 2014). Das DLR testet ebenfalls eine CMOS-basierte Kamera. Ein erster Prototyp mit 12 MPix CMOS Sensor wurde bereits in einem Testflug getestet (Kraft et al., 2016). Beide Kameras werden über einen Bordrechner im UAS angesteuert.

Zudem gibt es ein kommerzielles Produkt der Firma PhaseOne, das laut Hersteller speziell für den Einsatz in UAS konzipiert ist. Die Kamera iXU 150 verwendet einen 50 MPix Mittelformat CMOS-Sensor ( $8280 \times 6208 @ 5.3 \mu\text{m}$  Pixelgröße, Sensorformat  $43.8 \times 32.9 \text{ mm}^2$ ). Die Kamera hat  $9.7 \times 9.3 \times 11.0 \text{ cm}^3$  groß und wiegt 750 g (jeweils ohne Linse). Kombiniert man den Kamerakörper mit einer 80 mm Optik liegt das Gesamtgewicht des Kamerasystems bei 1.25 kg.

Die Untersuchungen zur Qualität von UAS-Kamerasystemen beziehen sich nachfolgend ausschließlich auf zwei exemplarisch getestete Kamerasysteme. Es handelt sich dabei um eine übliche Kompaktkamera mit Zoomobjektiv der Firma Canon, der eine Systemkamera der Firma Ricoh kombiniert mit einer Zeiss Optik gegenübergestellt wird. Die wesentlichen technischen Kenngrößen beider Systeme finden sich in Tab. 1. Auch wenn diese Kameras aufgrund der schnellen Produktzyklen der Hersteller zwischenzeitlich durch Nachfolger ersetzt wurden, so können sie doch als typische Repräsentanten ihrer Klasse gesehen werden, die oftmals auch in UAS-Anwendungen eingesetzt werden.

Tab. 1: Technische Spezifikationen der später untersuchten Kamerasysteme

	<i>Canon IXUS 100 IS</i>	<i>Ricoh GXR Mount A12 mit Zeiss Optik</i>
<b>Objektiv</b>	5.9 – 17.9mm f/3.2 – f/5.8	Zeiss Biogon T* 21mm f/2.8 – f/22 ZM
<b>Bildsensor</b>	CCD (1/2.3“) 6.188mm × 4.641mm	CMOS (APS-C) 23.6mm × 15.7mm
<b>Auflösung</b>	4000 × 3000 Pixel 12.1 MP	4288 × 2848 Pixel 12.3 MP
<b>Pixelgröße</b>	1.547 µm	5.5 µm
<b>Bildfolgezeit</b>	1.5 s (JPG)	1.47 s (JPG)
<b>Min. Verschlusszeit</b>	1/1500 s	1/4000 s
<b>Gewicht (kompl.)</b>	132 g	650 g
<b>Preis</b>	279€ (Hersteller-Preiseempfehlung Februar 2009)	1954€ (Ladenpreis April 2012, inkl. Objektiv)

### 3 Radiometrische Qualität eines Kamerasystems

Die radiometrische Qualität ist entscheidend für die spätere (automatische) Punktmessung und -übertragung. Je besser die Qualität der Bilder umso zuverlässiger können Punkte gemessen werden. Dieses wirkt sich sowohl auf die Qualität der Aerotriangulation als auch auf die spätere dichte Punktwolkengenerierung aus. In diesem Zusammenhang sind Abbildungsfehler und Bildunschärfen zu nennen.

Idealerweise würde ein Objektiv einen Gegenstandspunkt beliebiger Lichtwellenlänge als ‚scharfen‘ Bildpunkt (d.h. mit verschwindend kleinem Unschärfekreis) in der Bildebene darstellen (keine Verschmierung) und der Abbildungsmaßstab müsste im gesamten Bildfeld konstant sein (keine Verzeichnung). Die Abbildungsqualität einer Digitalkamera wird jedoch durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst: Beugung, optische Abbildungsfehler, die Aufnahme mittels eines (diskreten) Bildsensors und die elektronische Signalverarbeitung beschränken die Abbildungsqualität und führen dazu, dass der Punkt im Bildraum „verschmiert“ erscheint. Hinzu kommt im Luftbildfall der Einfluss der Bewegungsunschärfe aufgrund der Relativbewegung zwischen Objekt und Kamera (Bewegungsunschärfe), die bei UAS-Kamerasystemen oftmals nicht umfassend kompensiert wird und daher nur durch die Wahl einer möglichst kurzen Belich-

tungsdauer und höheren ISO-Empfindlichkeit eingeschränkt beeinflusst werden kann.

### 3.1 Belichtungseinstellungen

Um Bewegungsunschärfen zu vermeiden, sind generell geeignet kurze Verschlusszeiten zu wählen. Geht man von einer angestrebten Bodenpixelgröße (GSD ground sampling distance) von 5 cm und von der Annahme aus, dass der während der Integrationszeit zurückgelegte Weg  $\Delta X = v \cdot t$  kleiner gleich 10 % der GSD betragen muss (Sandau, 2005), ergibt sich für eine mittlere Fluggeschwindigkeit von 20 m/s (übliche Geschwindigkeit für UAS-Flächenflieger) eine erforderliche Verschlusszeit von 1/4000 s. Dieses ist mit vielen Kompaktkameras nicht realisierbar oder kann für andere Kameras nur mit hohen ISO-Empfindlichkeiten und/oder großen Blenden erzielt werden könnte, was beides ebenfalls Nachteile hinsichtlich der Bildqualität (höheres Bildrauschen bzw. Randunschärfen und Aberrationen) mit sich bringt. Zwar kann die Fluggeschwindigkeit durch Wahl der Trägerplattform in gewisser Weise beeinflusst werden – Koptersysteme können langsamer fliegen als Flächenflügler – aber oftmals steigen dann auch die Anforderungen an die Bodenpixelgröße, d.h. es werden kleinere GSD-Werte verlangt, was den Vorteil einer geringeren Fluggeschwindigkeit wieder kompensiert. Hinzu kommen meist stärkere Vibrationen, die sich negativ auf die Bildschärfe auswirken. Für die am Institut für Photogrammetrie durchgeführten Testflüge mit Flächenfliegern zeigte sich, dass bei Verschlusszeiten ab etwa 1/2000 s bei den untersuchten Kamerasystemen bei GSD-Werten von ca. 5 cm augenscheinlich keine Bewegungsunschärfen mehr auftreten. Bei längeren Zeiten sind v.a. bei Rollbewegungen des Fliegers teilweise noch Bewegungsunschärfen festzustellen.

Viele Kompaktdigitalkameras verfügen über keine Irisblende/Lamellenblende, sondern verwenden zur Begrenzung des Lichteinfalls ein Neutralsdichte-(ND)-Filter. Üblicherweise ist in der Fotografie ein ND-Filter (auch Graufilter) für Aufnahmesituationen vorgesehen, in denen bei guten Beleuchtungsbedingungen längere Belichtungszeiten erwünscht sind, ohne die Kamera dafür stark abblenden zu müssen, was Beugungsunschärfe zur Folge hätte. Typische Motive sind z.B. Wasserfälle, Bäche usw., wobei für das fließende Wasser eine weiche Bewegungsunschärfe erzielt wird. In den Kompaktkameras ist ein ND-Filter anstelle einer echten Blende für die Hersteller in der Realisierung günstiger und mit weniger Aufwand verbunden. Jedoch verliert man hierbei die Vorteile einer echten Blende, z.B. die variable Begrenzung des Lichteinfalls und v.a. auch den

Einfluss auf die Schärfentiefe sowie auf Abbildungsfehler wie Randunschärfen, Vignettierung und Diffraction. Das Einschwenken des ND-Filters in den Lichtgang des Objektivs geht bei der exemplarisch untersuchten Canon Ixus Kompaktkamera automatisch beim Schwenken aus einem dunklen in einen sehr hellen Motivbereich vonstatten. Dabei springt die im Display dargestellte ‚Blendenzahl‘ von  $f/3.2$  (im Fall der kleinsten Brennweite) auf  $f/9$ . Aus den Blendenzahlen kann eine Lichtwertdifferenz entsprechend einer Verkürzung der Belichtungszeit von  $1/80$  s auf ca.  $1/640$  s bestimmt werden. Um im Vergleich zum Automatik-Modus wesentlich kürzere Belichtungszeiten zu realisieren, darf das ND-Filter nicht automatisch in den Strahlengang eingeschwenkt werden, sondern muss auch bei hellem Umgebungslicht deaktiviert sein. Dieses ist i.d.R. durch entsprechende die Kameraeinstellung zu realisieren.

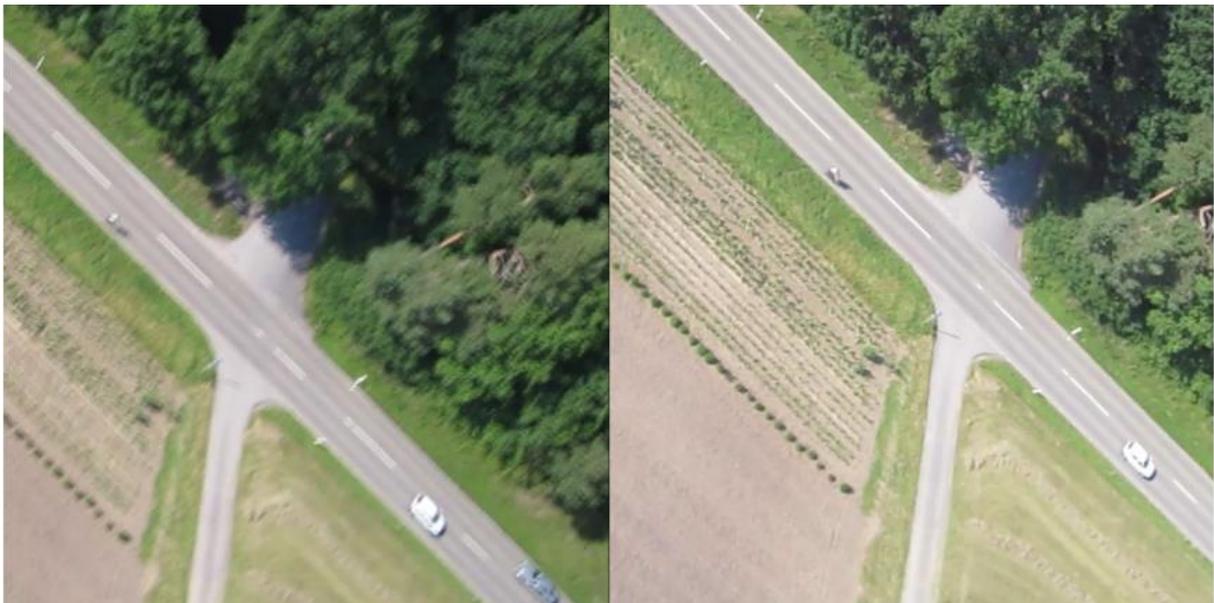
### **3.2 Bildstabilisierung im Kamerasystem**

Wie in Abschnitt 2 erwähnt verfügen Consumer-Kameras auch über einen optischen Bildstabilisator, der vor allem dazu dienen soll, bei schlechten Lichtverhältnissen ohne Einsatz eines Stativs verwacklungsfreie Aufnahmen mit längeren Verschlusszeiten aus der Hand zu ermöglichen. Die bekannten Kamera- bzw. Objektivhersteller wie Canon, Nikon und Sigma verwenden dafür sogenannte „Lens-Shift“-Bildstabilisatoren. Mithilfe von Kreiselensoren wird dabei die Kamerabewegung gemessen und sofort mit einer entsprechenden Gegenbewegung einer quer zur optischen Achse verschiebbaren Linse und damit einer entsprechenden Ablenkung der Abbildungsstrahlen kompensiert. Die einzelne Linse muss hierfür weich, d.h. beweglich gelagert sein. Canon bezeichnet diese Bildstabilisation mit IS (image stabilisation), Nikon nennt die gleiche Methode VR (vibration reduction) und bei Sigma heißt dieses Verfahren OS (optical stabilisation). Es handelt sich also um eine bewegliche Linse im Strahlengang der Optik, die die Kamerageometrie durch die Bewegung verändern kann. Auf den Seiten der Firma Canon wird die Funktionsweise des optischen Bildstabilisators demonstriert (Canon, 2015).

Im Rahmen der Arbeit wurde der Einfluss dieser Bildstabilisierung am Beispiel der Canon-Kompaktkamera der Ixus-Serie ausführlich untersucht. Prinzipiell sollte sich die Bildstabilisierung auch für UAS-gestützte Aufnahmen positiv auswirken. Das Problem ist nur, dass das Bildstabilisationssystem für andere Störfrequenzen ausgelegt ist, als sie im Rahmen der UAS-Befliegung auftreten. Bedingt durch die weiche, bewegliche Lagerung der Bewegungskompensationslinse, kann diese in Eigenschwingung geraten und somit zu zusätzlichen Bewe-

gungsunschärfen im Bild führen. Bewegliche Teile innerhalb des Objektivs verändern auch die innere Geometrie der Kamera und sind aus photogrammetrischer Sicht kritisch zu beurteilen. Aus diesen Gründen wurde die bewegliche Linse durch Klebung an geeigneter Stelle im Innern des Objektivs physikalisch fixiert. Die Bildstabilisation nur in der Kamera-Firmware abzuschalten, würde nicht ausreichen, da dies nur den Stellmechanismus (Piezoelemente) deaktivieren würde und die Linse nach wie vor beweglich wäre.

Um die Wirksamkeit der Maßnahmen unter gleichen äußeren Bedingungen (Wind, Kamerabewegung, Beleuchtung usw.) zu testen, wurde ein Videotestflug mit einem unmodifizierten Exemplar der Canon-Kamera und der modifizierten Kamera durchgeführt. Die Auslösung beider Kameras wurde zuvor entsprechend synchronisiert. Nachdem bei beiden Kameras die Videoaufzeichnung gestartet wurde, wurden sie unter die Tragflächen eines Starrflügel-UAS montiert. Somit sind die Perspektiven beider Kameras sehr ähnlich.



*Abb. 1: Videotestflug zum Einfluss der Bildstabilisierung, Vergleich von unmodifizierter Canon Ixus (links, **mit** Bildstabilisierung) und modifizierter Kamera (rechts, Bildstabilisierung hardware-seitig deaktiviert).*

Im erstellten Video sind selbst bei einer frame-by-frame-Analyse keine verwackelten Aufnahmen bei der modifizierten Kamera zu finden, während die unmodifizierte Kamera sehr häufig durch die Flugbewegung verursachte Bildunschärfen zeigt (siehe Abb. 1). Anhand des Screenshots in der Abbildung ist dies ein-

deutig erkennbar. Somit kann die Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen zur Reduktion der Bewegungsunschärfen als erwiesen angesehen werden.

### **3.3 Auflösungsuntersuchung anhand von Testmustern**

Nach DIN 18716-3 kennzeichnet das geometrische Auflösungsvermögen die „Fähigkeit eines optischen Systems, Signale von benachbarten Objektstrukturen getrennt zu erfassen“. Ein Indiz dafür, wie nahe sich zwei Punktsignale zur Trennbarkeit nach der optischen Abbildung kommen dürfen, liefert das Rayleigh-Kriterium. Zur empirischen Analyse des Auflösungsvermögens können periodische schwarz-weiße Linienmuster dienen. Das erreichbare Auflösungsvermögen wird durch Angabe einer bestimmten Ortsfrequenz spezifiziert, d.h. wie viele Linien bzw. Linienpaare pro Längeneinheit wiedergegeben bzw. bildseitig erkannt werden können. Generell korrespondieren großflächige Bildinhalte mit kleinen Ortsfrequenzen und feine Strukturen bzw. Details im Bild mit hohen Ortsfrequenzen. Als Einheit sind im Falle von filmbasierten optischen Systemen Linien oder Linienpaare pro Millimeter (L/mm, LP/mm) gebräuchlich, bei Digitalkameras sind aufgrund der vielen verschiedenen Sensorgrößen jedoch eher Linien pro Pixel (L/Px), Linienpaare pro Pixel (LP/Px = Cycles/Px) oder Linienpaare pro Bildhöhe (LP/BH) zur Angabe der Ortsfrequenz geeignet. Beispiele für geeignete Auflösungsmuster sind z.B. die „USAF 1951“ Linientafel oder ein Siemensstern. Die Auflösungsgrenze des Systems kann hierbei durch einfache visuelle Analyse festgestellt werden, indem das Feld bzw. der Durchmesser desjenigen Graurings gefunden wird, bei dem Linien gerade noch getrennt erkennbar sind. Für den Siemensstern existiert jedoch auch eine Methode, das Auflösungsvermögen rechnergestützt zu bestimmen, wobei – im Gegensatz zur rein visuellen Auswertung – auch die Kontrastabhängigkeit des Auflösungsvermögens berücksichtigt wird. Dazu werden die Modulationstransferfunktion (MTF modulation transfer function) und die Punktverschmierungsfunktion (PSF point spread function) berechnet, deren Standardabweichung ein objektives Kriterium zur Abschätzung der Bildschärfe im Bildraum liefert. Ein weiteres Maß für das Auflösungsvermögen ist die Breite der PSF auf der halben Höhe des Maximums (full width half maximum FWHM, Beaton & Farley, 1991). Ferner kann das Auflösungsvermögen mit der Ortsfrequenz festgelegt werden, bei der die MTF einen bestimmten (Minimal-) Wert erreicht. Die sog. Grenzauflösung, auch RP („resolving power“) genannt, ist die Anzahl der kleinsten erkennbaren Linien pro Pixel, welche mit dem Kehrwert derjenigen Frequenz abgeschätzt wird, bei der die MTF auf 10% Kontrast gefallen ist, da

dieser Wert der Rayleigh-Grenze am nächsten kommt, die bei ca. 9% liegt (Honkavaara et al., 2006). Bei Consumer-Digitalkameras liegt der Wert MTF10 jedoch häufig oberhalb der Nyquist-Frequenz oder im Bereich des Sensorrauschens, sodass dieser Wert sehr unsicher gemessen wird (auch aufgrund des i.d.R. flachen Verlaufs bei den hohen Frequenzen). Daher wird zusätzlich oft der Wert MTF50 angegeben, d.h. die Frequenz, bei der der Kontrast auf die Hälfte gesunken ist (Koren, 2009). Durch Multiplikation der Auflösungsweite  $RP_{\text{MTF10}}$  und FWHM usw. mit der nominellen GSD erhält man die entsprechenden Auflösungen im Objektraum  $GSD_{\text{MTF10}}$  bzw.  $GSD_{\text{FWHM}}$ .

MTF-Kurven ermöglichen es, die kontrastabhängige Abbildungsqualität eines optischen Systems hinsichtlich der Auflösung darstell- und vor allem vergleichbar zu machen. Jede einzelne Komponente des bildfassenden Systems, welche eine Kontrastdämpfung bewirkt, im Luftbildfall z.B. Objektiv, Sensor, Atmosphäre und vor allem Flugdynamik, ließe sich theoretisch durch eine eigene MTF beschreiben, sodass sich die Gesamt-MTF im Frequenzraum durch Multiplikation der Einzelgrößen ergeben würde. Stellt man aufgenommenen Luftbildern mit Siemensstern-Muster stationäre Aufnahmen gegenüber, entfällt allerdings der Einfluss der Flugdynamik- und aufgrund der geringeren Zielweiten der größte Teil des Einflusses der Atmosphäre. Statische Auflösungsuntersuchungen erlauben demnach eine Abschätzung des maximalen Auflösungspotenzials eines Kamerasystems. Im Fall der Aufnahme aus bewegten UAS ist im Regelfall von schlechteren Auflösungsweiten auszugehen.

### 3.3.1 Statische Auflösungsuntersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen wurde das Potenzial der Canon Ixus 100 Kompaktkamera mit der Ricoh Systemkamera kombiniert mit der Zeiss Optik untersucht. Die statischen Auflösungsuntersuchungen wurden unmittelbar nacheinander und damit unter praktisch gleichen äußeren Bedingungen durchgeführt. Für die Aufnahmen wurde ein feststehendes Stativ verwendet, d.h. der Abstand zum Siemensstern bleibt gleich und es kommt zu keiner relativen Bewegung zwischen Kamera und Siemensstern wie im Fall der Luftbilder. Der hierbei verwendete Siemensstern hat nur einen Durchmesser von 30 cm. Bei einem Aufnahmeabstand von etwa 7 m entspricht dieses einer Bildgröße von ca. 75 pix. Diese Konfiguration ist ähnlich der späteren Befliegung, bei der ein 8 m Siemensstern in knapp 200 m Flughöhe überflogen wird, um die angestrebte Bodenpixelgröße (GSD) von etwa 4 cm zu erzielen. Die Ergebnisse der Auflösungsuntersuchungen sind in der Tab. 2 gegeben. Diese auf den Objektraum bezogenen Ergebnisse sind mit der nominellen GSD zu vergleichen.

Tab. 2: Ergebnisse der statischen Auflösungsuntersuchungen (angegeben im Bild- und Objektraum, Siemensstern in Bildmitte, nom. GSD 0.185 cm)

<i>Farbkanal</i>	<i>Canon IXUS 100 IS</i>			<i>Ricoh GXR Mount A12 mit Zeiss Optik</i>		
	<i>Rot</i>	<i>Grün</i>	<i>Blau</i>	<i>Rot</i>	<i>Grün</i>	<i>Blau</i>
$\sigma_{\text{PSF}}$ (pix)	0.470	0.490	0.416	0.362	0.362	0.362
<b>MTF10</b> (L/pix)	0.726	0.697	0.820	0.945	0.943	0.943
<b>MTF50</b> (L/pix)	0.398	0.383	0.450	0.518	0.517	0.517
<b>GSD<sub>MTF10</sub></b> (cm)	0.255	0.265	0.226	0.194	0.194	0.194
<b>GSD<sub>FWHM</sub></b> (cm)	0.205	0.213	0.181	0.156	0.156	0.156

Die nominelle GSD von 0.185 cm konnte mit der Ricoh/Zeiss-Kamera beinahe erreicht werden, legt man den ermittelten  $\text{GSD}_{\text{MTF10}}$ -Wert von 0.194 zugrunde. Die Canon-Kamera verfehlt die nominelle GSD in diesem Test deutlicher. Zudem sind im Bild der Canon leichte violette Farbsäume, die durch Aberrationen bedingt sind, auszumachen. Dementsprechend zeigen sich in der PSF etwas unterschiedliche Auflösungswerte für die einzelnen Farbkanäle. Allerdings scheint die Canon-Aufnahme im Bereich des Siemenssterns auch überbelichtet zu sein, weshalb hier etwas schlechtere Ergebnisse erreicht werden.

### 3.3.2 Auflösungsuntersuchung in UAS-Befliegung

Die obigen Auflösungstests wurden dann in zwei UAS-Befliegungen für jedes Kamerasystem wiederholt. Bei beiden UAS-Befliegungen wurde an der gleichen Stelle im Gelände ein Siemensstern mit 8 m Durchmesser für die Auflösungsanalyse ausgelegt. Die Kameras wurden nicht am gleichen Tag geflogen, es kamen zwei unterschiedliche UAS-Flächenflieger zum Einsatz. Damit sind die Umgebungsbedingungen leicht unterschiedlich, was in den Vergleichen zu berücksichtigen ist. Der Stern wurde entsprechend der geplanten Flugstreifen an unterschiedlichen Positionen in der jeweiligen Bildebene abgebildet. Zum Vergleich mit den Ergebnissen aus dem terrestrischen Test in Tab. 2 werden hier exemplarische Bilder analysiert, in denen der Siemensstern nahe dem Bildzentrum abgebildet wurde. Die Ergebnisse finden sich in Tab. 3, aufgrund der deutlich größeren Aufnahmedistanz liegt das nominelle Bodenpixel (GSD) hier bei 4.4 cm (Canon) bzw. 4.8 cm (Ricoh/Zeiss).

Tab. 3: Ergebnisse der statischen Auflösungsuntersuchungen (angegeben im Bild- und Objektraum, Siemensstern nahe bei Bildmitte)

<i>Farbkanal</i>	<i>Canon IXUS 100 IS</i>			<i>Ricoh GXR Mount A12 mit Zeiss Optik</i>		
	<i>Rot</i>	<i>Grün</i>	<i>Blau</i>	<i>Rot</i>	<i>Grün</i>	<i>Blau</i>
$\sigma_{\text{PSF}}$ (pix)	0.444	0.452	0.424	0.405	0.400	0.401
<b>MTF10</b> (L/pix)	0.769	0.756	0.805	0.843	0.853	0.852
<b>MTF50</b> (L/pix)	0.422	0.415	0.442	0.462	0.468	0.467
<b>GSD<sub>MTF10</sub></b> (cm)	5.728	5.822	5.467	5.689	5.620	5.628
<b>GSD<sub>FWHM</sub></b> (cm)	4.607	4.683	4.397	4.576	4.520	4.526

Das Auflösungsvermögen der Ricoh/Zeiss-Kamera ist in der Bildmitte bei der Befliegung (z.B. MTF10-Wert um 0.853 L/Px) etwas schlechter verglichen mit dem obigen stationären Test (MTF10  $\approx$  0.951 L/Px). Die Canon schneidet hingegen besser als in obigem Test ab, da der überbelichtete kleine Siemensstern zu schlechteren Auflösungswerten führte. Die etwas schlechteren Ergebnisse bei den Befliegungen sind zum einen auf die größere Entfernung zum Siemensstern zurückzuführen. Aerosole in der Atmosphäre verursachen eine Streuung des Lichts, d.h. eine Trübung und somit im Bild eine Kontrastminderung. Andererseits führen die lineare Flugbewegung, aber auch Drehungen und Kippungen des UAS-Trägers, je nach gewählter Belichtungszeit, zu Bewegungsunschärfen, Gleiches gilt für mögliche Vibrationen des Trägersystems.

Die resultierenden GSD<sub>MTF10</sub>-Werte sind bei beiden Kameras schlechter als die nominelle GSD. Im Fall der Ricoh/Zeiss bleibt die Bodenauflösung um  $\Delta\text{GSD} \approx 0.9$  cm und im Fall der Canon um etwa 1.4 cm hinter der jeweils nominellen GSD zurück. Bildet man den Faktor zwischen realisiertem Bodenpixel und nominellem Wert, so ergibt sich für die Canon der Wert nahe bei 1.3, bei der Ricoh/Zeiss von knapp unter 1.2. Demnach liefert die Canon im Vergleich eine etwa 10% schlechtere Auflösung.

Analysiert man das Auflösungsvermögen anhand von Siemenssternen, die am Bildrand abgebildet werden, so stellt man ein Abnehmen der Bildschärfe fest. Bei beiden Kameras ist das Auflösungsvermögen deutlich schlechter als in der Bildmitte. Bei der Canon werden ca. 71 % und bei der Ricoh/Zeiss-Kamera etwa 73 % des jeweiligen MTF10-Wertes der Bildmitte erreicht. Bei der Canon-Kamera fällt eine zum Rand hin verstärkte laterale chromatische Aberration auf. Mit steigender Ortsfrequenz nimmt der Kontrast der Canon-Kamera wesentlich schneller ab als bei der Ricoh/Zeiss-Kamera. Die Ricoh/Zeiss-Kamera zeigt dementsprechend auch visuell an den Bildrändern ein besseres Übertragungs-

verhalten, zumal keine Farbsäume sichtbar sind. Für die Bildschärfe am Rand ergibt sich der Faktor zwischen realisierten Bodenpixel und nominellen Bodenpixel nahe bei 2 (Canon) bzw. etwas größer als 1.6 für die Ricoh/Zeiss (bezogen auf die  $GSD_{MTF10}$ -Werte).

## 4 Geometrische Qualität eines Kamerasystems

Klassischerweise liefert die Photogrammetrie 3D-Objektkoordinaten aus 2D-Bildern. Dabei spielt die Kamerageometrie eine entscheidende Rolle. Die geometrischen Kenngrößen der sog. inneren Orientierung (inkl. Objektivverzeichnung) müssen im Auswerteprozess zur Verfügung stehen bzw. im Rahmen des eigentlichen Projekts bestimmt werden. Für großformatige Luftbildkamerasysteme nimmt man diese innere Orientierung als bekannt an (siehe Abschnitt 2), was für die normalerweise verwendeten UAS-Kamerasysteme im Allgemeinen nicht der Fall ist.

### 4.1 Kamerakalibrierung

Im Zuge der empirischen Untersuchungen mit den vorgestellten Kamerasystemen wurden beide Kamerasysteme mehrfach über einen längeren Zeitraum anhand unterschiedlicher Testfelder kalibriert. Alle Kalibrierungen wurden mithilfe von 2D-Testfeldern (z.T. mit Referenzmaßstab) bewerkstelligt, für die Ricoh/Zeiss erfolgte eine weitere Kalibrierung mit einem 3D-Testfeld. Die Tab. 4 zeigt die Ergebnisse der verschiedenen Kalibrierläufe. Alle Kalibrierungen erfolgten nach dem 8-Standpunkte-Verfahren (Luhmann, 2010). Zum Einsatz kam das Australis-Programm mit dem bekannten physikalischen Parametermodell nach Brown.

Für die Canon wurde ein 2D-Indoor-Testfeld verwendet. Die Kalibrierungen wurden nacheinander durchgeführt, wobei zwischen Kalibrierung (i) und (ii) die Kamera ausgeschaltet wurde, zwischen Kalibrierung (ii) und (iii) die Kamera aber eingeschaltet blieb. Damit kann die Stabilität der Kalibrierung nachgewiesen werden, da bei jedem Ein-/Ausschaltvorgang die Optik komplett in das Gehäuse eingefahren wird. Die Längenmessgenauigkeit  $\Delta\text{Länge}$  (Standardabweichung der aus den ausgeglichenen Objektraum-Koordinaten berechneten Strecke des Maßstabs) kann als äußeres Genauigkeitsmerkmal der Kalibrierung herangezogen werden. Die Ergebnisse in Tab. 4 zeigen demnach, dass die Ricoh/Zeiss-Kamera eine höhere Objektraumgenauigkeit liefert. Die Genauig-

keit der Bildpunktmessung ( $\text{RMS}_{\text{BPM}}$ ) liegt für die Canon im Bereich von 1/10 pix. Das Ricoh/Zeiss-System schneidet auch in dieser Kategorie mit Werten unter 5% der Pixelgröße deutlich besser ab, wobei die 3D-Testfeldkalibrierung im Ergebnis schlechter ist. Insgesamt stimmen die Parameter der inneren Orientierung der drei Ricoh/Zeiss-Kalibrierungen nicht gut überein und sollten wegen der unterschiedlichen Testfelder auch nicht direkt verglichen werden. Die Kalibrierungen liegen zeitlich einige Monate auseinander. Ein Test wie bei der Canon, mit drei Kalibrierläufen am gleichen Testfeld unmittelbar hintereinander, wurde für die Ricoh/Zeiss nicht durchgeführt. Die innere und äußere Genauigkeit für die Ricoh/Zeiss-Kalibrierung ist bei der 2D-Laborkalibrierung am besten, für den 3D-Fall ist die interne Genauigkeit deutlich schlechter. Möglicherweise liegt das an der ungünstigeren Schnittkonfiguration im 3D-Fall mit nur 4 Schrägsichtaufnahmen und 8 verkanteten Aufnahmen bzw. an den aufgetretenen Überstrahlungen und Farbsäumen an den abgebildeten Retrotargets. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten konnte zudem für das 3D-Testfeld nur ein geringerer Objektstand als im 2D-Fall eingehalten werden, weshalb im 3D-Fall unschärfere Aufnahmen resultierten. Es handelt sich jedenfalls nicht um ein prinzipielles Problem, wonach ein 3D-Testfeld schlechtere Ergebnisse als ein 2D-Testfeld liefert.

Tab. 4: Resultate der Kamerakalibrierung für Canon bzw. Ricoh/Zeiss

	Canon			RicoH/Zeiss		Vor-Ort
	(i)	(ii)	(iii)	2D	3D	
<b>c</b> (mm)	6.0248	6.0237	6.0246	21.6485	21.6408	21.6335
<b>x<sub>0</sub></b> (mm)	0.1167	0.1167	0.1163	-0.1024	-0.0936	-0.1064
<b>y<sub>0</sub></b> (mm)	-0.1832	-0.1834	-0.1823	-0.2305	-0.2438	-0.2200
<b>K1</b>	2.30e-3	2.35e-3	2.41e-3	1.13e-4	1.10e-4	1.08e-4
<b>K2</b>	-1.95e-5	-2.69e-5	-4.08e-5	-3.23e-7	-3.10e-7	-2.60e-7
<b>K3</b>	-5.42e-7	-1.67e-7	5.41e-7	2.73e-10	3.06e-10	6.31e-11
<b>P1</b>	-5.86e-4	-5.74e-4	-5.81e-4	1.10e-5	1.72e-5	2.85e-5
<b>P2</b>	8.72e-4	8.72e-4	8.71e-4	1.04e-5	8.31e-6	1.68e-5
<b>B1</b>	8.09e-5	9.69e-5	7.92e-5	-1.17e-4	-7.44e-5	9.91e-5
<b>B2</b>	4.15e-4	3.88e-4	3.65e-4	4.17e-5	5.48e-5	-1.37e-6
<b>RMS<sub>BPM</sub></b> ( $\mu\text{m}$ )	0.17	0.14	0.14	0.26	0.56	0.27
<b>RMS<sub>BPM</sub></b> (% pix)	11.04	9.09	9.09	4.72	10.18	4.90
<b><math>\Delta\text{Länge}</math></b> (mm)	0.0648	0.0619	0.0598	0.0407	0.0360	-

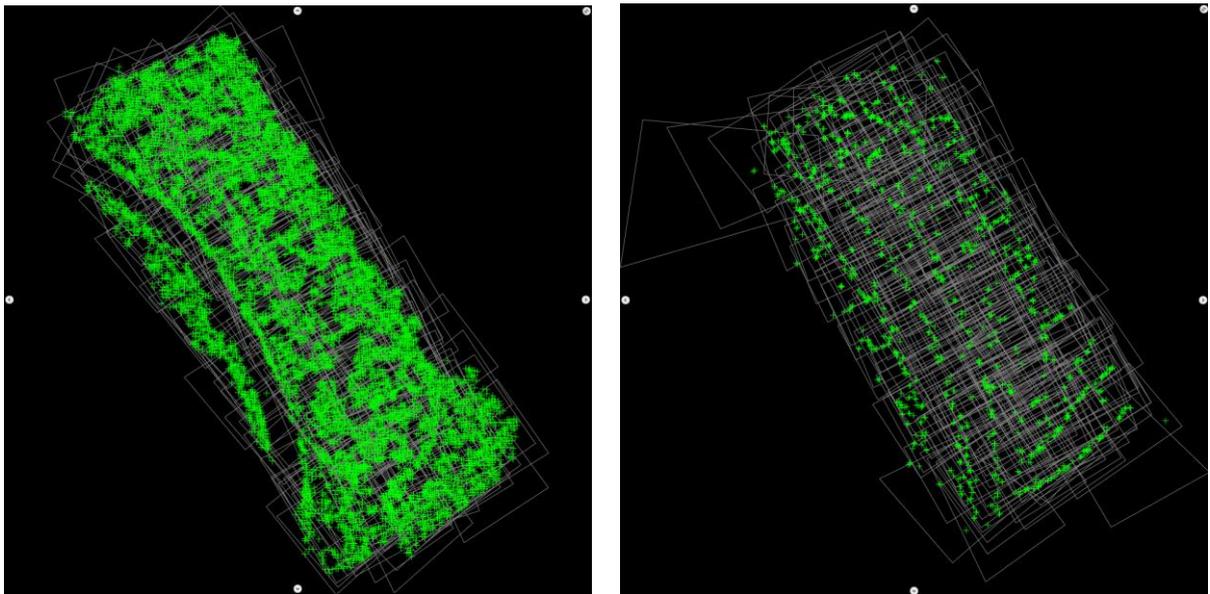
Um die aktuelle innere Geometrie der Kamera zu erfassen, wurde direkt vor jedem Bildflug eine Kalibrierung mit einem mobilen 2D-Testfeld vorgenommen. Bei den weiteren Auswertungen wurde dann immer diejenige Kalibrierung verwendet, die zeitlich am nächsten an den Bildflügen lag. Die Vor-Ort-Kalibrierung der Ricoh/Zeiss-Kamera ist ebenfalls in Tab. 4 dokumentiert. Auch hier ergeben sich Differenzen zu den vorigen Kalibrierungen, die möglicherweise durch die etwas Bauart des mobilen Testfelds und dessen zu kleine Punktmarken (bedingt durch den Objektstand) zu erklären sind. Letztlich bleibt für die Ricoh/Zeiss-Kamera unklar, ob die unterschiedlichen Ergebnisse nicht-kamera-spezifische Ursachen und Effekte aus den individuellen Kalibrierblockgeometrien zurückzuführen sind, oder ob dafür physikalische Änderungen in der Kamerageometrie verantwortlich sind. Hierzu wären – wie bei der Canon geschehen – mehrere zeitnahe Kalibrierläufe an einem unveränderten Testfeld erforderlich.

## **4.2 Empirische Genauigkeit aus UAS-Testflügen**

Die empirischen Testflüge wurden im Gebiet der Hessigheimer Felsengärten durchgeführt. Das Gebiet liegt ca. 25 km nördlich von Stuttgart unmittelbar am Neckar und zeichnet sich durch steile Weinberglagen aus. Für die Befliegungen wurde eine ca. 1000 m x 400 m große Fläche definiert, welche in einem klassischen photogrammetrischen Bildverband erfasst werden sollte. Dazu wurden insgesamt 5 Längsstreifen und zwei Querstreifen mit hohen Überdeckungsverhältnissen von ca. 80% innerhalb des Streifens und ca. 70% zwischen benachbarten Streifen geplant (siehe Abb. 2, siehe auch Cramer et al., 2013).

Die Flüge wurden derart geplant, dass eine nominelle Bodenpixelgröße von 4.5 cm – 7.3 cm realisiert wird. Die starke Variation der GSD liegt an Geländehöhenunterschieden von ca. 100 m. Insgesamt konnte im Rahmen der weiteren Auswertungen auf 33 im Projektgebiet durch Farbmarkierungen signalisierte Punkte zugegriffen werden, die im Vorfeld der Flugkampagnen vermarktet und mit GPS eingemessen worden waren. Die Standardabweichung dieser Objektpunkte liegt bei etwa 1 cm.

Die Aerotriangulation der Bilder des Bildflugs mit der Canon- (Befliegung im März 2012) bzw. Ricoh/Zeiss-Kamera (Befliegung im August 2012) wurde mit der Software inpho/Match-AT von Trimble durchgeführt. Zuvor wurde eine erste Auswertung mit einer structure-from-motion Software durchgeführt, auch um für jedes Bild schon erste Näherungsorientierungen zu bekommen.



*Abb. 2: Bildflüge Hessigheim: Blockgeometrie Canon Flug (März 2012, links) und Ricoh/Zeiss Befliegung (August 2012, rechts) mit Verknüpfungspunkten aus automatischer Match-AT Punktzuordnung*

Die dort automatisch gemessenen Verknüpfungspunkt-Bildkoordinaten aus SIFT-Punktzuordnungen (SfM-Pkte) wurden ebenfalls in das Match-AT-Projekt übernommen. Anschließend erfolgte die manuelle Messung aller signalisierten Punkte. Dann wurde eine rein pass-punktbasierte Auswertung unter ausschließlicher Verwendung der Verknüpfungspunkte aus der SIFT-Punktzuordnung durchgeführt. Die Ergebnisse finden sich in Tab. 5. Die Tabelle zeigt neben der Anzahl der verwendeten Pass- und Kontrollpunkte (PP/KP) und dem geschätzten Wert von  $\sigma_0$  die mittlere geschätzte Genauigkeit (Standardabweichung, innere Genauigkeit) der Geländepunkte und die RMS-Werte aus den Differenzen an den Kontrollpunkten (äußere Genauigkeit). Das  $\sigma_0$  der AT mit Verwendung der SfM-Verknüpfung liegt für beide Bildflüge im Bereich von knapp besser 1 pix, was sehr gut mit der zu erwartenden Genauigkeit der SIFT-Punktzuordnung korrespondiert. Bei SIFT handelt es sich um eine merkmalsbasierte Punktzuordnung. Wird die Punktübertragung mit Match-AT vorgenommen, d. h. eine Kombination von merkmalsbasierter und zusätzlicher grauwertbasierter Zuordnung (AAT-Pkte), werden zwar wesentlich weniger Verknüpfungspunkte gefunden, die Qualität dieser Zuordnung ist aber deutlich besser und liegt im Bereich von 1/3 pix. Prinzipiell wäre es natürlich auch möglich, die gefundenen SIFT-Punkte aus dem SfM durch eine nachgeschaltete grauwertbasierte Zuordnung zu verbessern (Remondino 2006). Dieses wurde hier aber nicht vorgenommen. Die

oben genannten Werte für  $\sigma_0$  ergaben sich sowohl für den Canon- als auch für den Ricoh/Zeiss-Flug.

Die höhere Qualität der Punktzuordnung wirkt sich auch positiv auf die innere und äußere Genauigkeit der Objektpunktbestimmung aus. Im Vergleich zur nominellen Bodenpixelgröße von 4.5 cm – 7.3 cm liegen die absoluten Genauigkeiten im deutlichen Sub-Pixel Bereich, wobei sich kaum Unterschiede in den Objektpunktgenauigkeiten aus Canon- bzw. Ricoh/Zeiss-Auswertung erkennen lassen. Dies ist insofern erstaunlich, als dass im Rahmen der vorigen Auflösungs- und Qualitätsuntersuchungen der beiden Kameras Qualitätsunterschiede nachgewiesen wurden. Bei den Vergleichen zwischen beiden Systemen muss aber berücksichtigt werden, dass die realisierte Match-AT-Verknüpfung für den Canon-Bildflug im Frühjahr vor Einsetzen der Belaubung im Vergleich zur Befliegung mit der Ricoh/Zeiss-Kamera bei voller Belaubung im Hochsommer deutlich besser ist. Der Einfluss der Vegetation ist auch aus Standard-Photogrammetrieanwendungen bekannt. Die SIFT-Punktzuordnung ist weniger anfällig gegenüber Störungen durch Vegetation, was sich an der in beiden Fällen deutlich größeren Anzahl von Verknüpfungspunkten zeigt. Für die Ricoh/Zeiss-AT wurden die SfM-Punkte auf 27367 Punkte ausgedünnt. Ursprünglich wurden 103787 Punkte durch das SfM-Verfahren erzeugt, wobei die eigentliche SIFT-Punktzuordnung gar nicht bis zu untersten Pyramidenstufe (maximale Auflösung) fortgesetzt wurde, da sonst für den Ricoh/Zeiss-Flug deutlich über 300000 Punkte generiert worden wären. Dies zeigt die bessere radiometrische Qualität der Ricoh/Zeiss-Bilder.

Für beide Bildverbände wurde auch die Rolle von Zusatzparametern in der AT untersucht. Zur Anwendung kamen die Polynommodelle von Ebner (12 Parameter (SC 12)) und Grün (44 Parameter (SC 44)), die in Match-AT implementiert sind. Für die Ricoh/Zeiss-Konfiguration zeigen sich im Objektraum kaum Veränderungen. Die Absolutdifferenzen an den Kontrollpunkten scheinen eher etwas größer zu werden. Für die Canon ist eine leichte Verbesserung der RMS-Werte, vor allem in der Vertikalen zu erkennen. Insgesamt ist nur ein geringer Einfluss der Zusatzparameter sichtbar, was auf die gute Vorabkorrektur der Bilder und eine ausreichende geometrische Stabilität der Kamera hinweist (siehe Abschnitt 4.1).

Tab. 5: Ergebnisse der Aerotriangulation mit Match-AT.

	PP/ KP	$\sigma_0$ (pix)	Std.Abw. (m)			RMS (m) aus KP-Differenz		
			Ost	Nord	Vert.	Ost	Nord	Vert.
<i>Canon, 202 Bilder</i>								
<b>SIFT-Pkte</b> (Anz.: 165970)	22 / 11	0.7	0.036	0.032	0.141	0.050	0.037	0.095
<b>AAT-Pkte</b> (Anz.: 8011)	22 / 11	0.3	0.008	0.007	0.024	0.030	0.023	0.050
<b>AAT-Pkte, SC12</b>	22 / 11	0.3	0.007	0.007	0.022	0.024	0.021	0.044
<b>AAT-Pkte, SC44</b>	22 / 11	0.3	0.007	0.007	0.022	0.022	0.021	0.037
<i>Ricoh, 190 Bilder</i>								
<b>SIFT-Pkte</b> (Anz.: 27367)	22 / 11	0.7	0.034	0.030	0.110	0.031	0.037	0.058
<b>AAT-Pkte</b> (Anz.: 1439)	22 / 11	0.3	0.018	0.015	0.049	0.029	0.024	0.043
<b>AAT-Pkte, SC12</b>	22 / 11	0.3	0.018	0.015	0.048	0.028	0.028	0.051
<b>AAT-Pkte, SC44</b>	22 / 11	0.3	0.017	0.015	0.048	0.027	0.029	0.051

## 5 Zusammenfassung

Welche Kamera ist nun die Beste für photogrammetrische UAS-Anwendungen? In diesem Beitrag wurden maßgeblichen Kriterien diskutiert und zwei Kamerasysteme exemplarisch vorgestellt. Diese Kameras entstammen der Kompakt- bzw. Systemkameraklasse – den beiden Kameratypen, die häufig in entsprechenden UAS-Konfigurationen anzutreffen sind. Die Diskussion der radiometrischen Qualität und Auflösung zeigt durchaus Unterschiede zwischen beiden Kameras auf, in der empirischen Genauigkeitsanalyse aus Testfeldbefliegungen

(hier Einzelpunktgenauigkeit aus der Aerotriangulation anhand von Kontrollpunktdifferenzen) sind die Unterschiede kaum mehr zu erkennen. Das zeigt, dass selbst mit Kompaktkameras Einzelpunktbestimmung sub-pixelgenau durchzuführen ist. Zu berücksichtigen ist aber, dass die Auswertungen sich auf mittlere Bodenpixelgrößen von 5 cm beziehen und mit mehr als 20 Passpunkten verhältnismäßig viele Passinformationen zugrunde gelegt wurden.

Bei kleineren GSD-Werten ergeben sich höhere Auflösungsanforderungen an das Kamerasystem, was eine bessere radiometrische Qualität erfordert. Diese höhere radiometrische Qualität macht sich auch bei der Berechnung einer flächenhaften, dichten Punktwolke mittels Dense-Matching-Verfahren bemerkbar. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Rauschen der Punktwolke in homogenen Flächen für die Systemkamera um bis zu Faktor 2 geringer ist, als für das unter vergleichbaren Bedingungen getestete Kompaktkameramodell (Cramer et al., 2013). Für eine flächenhafte Punktwolkengenerierung mit hoher Genauigkeit ist also eher die qualitativ höherwertige Kamera zu favorisieren.

Letztlich hängt die Beantwortung der obigen Frage also von den geforderten Genauigkeitsansprüchen ab. Selbst einfache Kameras können in photogrammetrischen Anwendungen erfolgreich eingesetzt werden; um möglichst viele Anwendungsbereiche abdecken zu können, sollte aber vor allem in eine gute optische Qualität investiert werden. Vor diesem Hintergrund sind auch die speziell für photogrammetrische Anwendungen konzipierten Kameraentwicklungen von Interesse.

Neben der Auswahl der Kamera ist deren mechanische und softwareseitige Integration in die Trägerplattform zu beachten. Werden zum Beispiel entsprechende Dämpfer vergessen, können sich Vibrationen der Plattform negativ auf die Bildqualität auswirken und damit wird das Potenzial der Kamera nicht voll ausgeschöpft.

## **6 Danksagung**

Unser besonderer Dank gilt dem Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL BW) für die Finanzierung dieser Studie.

## Literatur

- Beaton, R. & Farley, W. (1991): Comparative study of the MTF, ICS, and SQRI image quality metrics for visual display systems. Techn. Ber., DTIC Document, digital unter <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a252116.pdf> verfügbar, letzter Zugriff 15. Dezember 2015
- Canon (2015): Firmenvideo zur Funktionsweise der Bildstabilisierung, digital verfügbar unter <http://www.canon.com/v-square/movie.html?id=t011>, letzter Zugriff 15. Dezember 2015
- Cramer, M., Haala, N., Rothermel, M., Leinss, B. & Fritsch, D. (2013): UAV@LGL – Pilotstudie zum Einsatz von UAV im Rahmen der Landesvermessung in Deutschland. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), Heft 5, S. 497-511.
- Honkavaara, E., Jaakkola, J., Markelin, L. & Becker, S. (2006): Evaluation of resolving power and MTF of DMC . In: Proceedings of the ISPRS Commission I Symposium. Paris, France. 4-6 July 2006, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bd. 36 (1A), online unter <http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/part1/Papers/PS3-39.pdf> verfügbar, letzter Zugriff 15. Dezember 2015
- Koren, N. (2009): Imatest™ documentation. Online-Ressource. Imatest LLC, Boulder, Colorado, online verfügbar unter: <http://www.imatest.com/docs/Imatest%20Documentation.pdf>, letzter Zugriff 15. Dezember 2015
- Kraft, Th., Geßner, M., Meißner, H., Przybilla, H. J. & Gerke M. (2016): Introduction of a photogrammetric camera system for UAV with highly accurate GNSS/INS information for standardized workflows. Akzeptierter Beitrag für EuroCOW Workshop 2016, Lausanne, Schweiz
- Martin, O., Meynard, C., Pierrot-Deseilligny, M., Souchon, M. & Thom, C. (2014): Réalisation d'une caméra photogrammétrique ultralégère et de haute résolution. Colloque Drones et moyens légers aéroportés d'observation, Montpellier, Frankreich, Juni 24-26, 2014, digital verfügbar unter

[https://drone.teledetection.fr/articles/Souchon\\_CAMLIGHT\\_IGN\\_rev.pdf](https://drone.teledetection.fr/articles/Souchon_CAMLIGHT_IGN_rev.pdf),  
letzter Zugriff 15. Dezember 2015

- Remondino, F. (2006): Detectors and descriptors for photogrammetric applications. – IAPRS XXX-VI (3): 1–6, Bonn.
- Luhmann, T. (2010): Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Wichmann, Berlin, 3. Aufl. ISBN 978-3-87907-479-2.
- Sandau, R. (Hrg.) (2005): Digitale Luftbildkamera: Einführung und Grundlagen. Wichmann, Heidelberg. ISBN 3-87907-391-0.