

Zum Einsatz von Multikoptern als Kameraplattform in der Nahbereichs-Luftbildmessung*

1. Vorbemerkung

Dem in der Fußnote genannten Artikel der beiden Autoren Ing. Dr. *Wolfgang Pfeffer* und Ing. *Clemens Pfeiffer* ging ein Vortrag unter dem Titel „Skizzenerstellung mit dem Multicopter“ voraus, den die beiden Kollegen am 25. 1. 2011 beim 34. Internationalen Fachseminar 2011 in Bad Hofgastein gehalten haben. Dieser Vortrag sowie die angesprochene Publikation können auf der Homepage von Dr. *Pfeffer* unter <http://www.kfz-bewertung.at> nachgelesen werden.

Bezüglich des Einsatzes von *unmanned aerial vehicles* (im Folgenden kurz: UAV) oder dem Gesamtsystem *unmanned aircraft system* (im Folgenden kurz: UAS) – es umfasst neben dem Flugobjekt auch die Bodenstation zur Flugführung- und/oder Überwachung – halten auch wir fest, dass damit eine zusätzliche aktuelle Plattform für den Einsatz von digitalen Kameras zur Erstellung von Luftbildern in der Nahbereichs-Luftbildmessung existiert. Wird bei der Befliegung sowie der Auswertung solcherart erstellter Luftbilder nach dem Stand der Technik vorgegangen, dann können die Auswerteergebnisse für verschiedene Aufgabenstellungen in der Geomatik angewandt werden. Es ist daher nicht verwunderlich, dass seit etwa vier Jahren dazu eigene Tagungen und Symposien stattfinden sowie bei allgemeinen photogrammetrischen Fachveranstaltungen und Kongressen dieser Thematik ein entsprechender Raum gewidmet wird. Die Ergebnisse sind Publikationen und Vorträge, die sich mit den Problemen der UAV selbst, den dabei eingesetzten Kameras, den Komponenten zur Steuerung beim Bildflug und der damit erzielbaren Genauigkeiten, der Stabilisierung und Orientierung der Plattform, der Erstellung und Auswertung von Luftbildern sowie deren Nutzung für unterschiedliche Aufgabenstellungen beschäftigen. Beispielhaft für die obigen Ausführungen bezüglich der Veranstaltungen und Veröffentlichungen seien die Proceedings der beiden letzten ISPRS-Kongresse 2008 in Peking und 2012 in Melbourne, der DGPF-Tagungsband 18/2009 sowie die Proceedings der UAV-g 2011 Konferenz an der ETH Zürich genannt.

In der angeführten Publikation von *Pfeffer/Pfeiffer* heißt es wörtlich: „Im Rahmen einer genauen und gewissenhaften Unfallaufnahme sollen Spuren, Endlagen und Straßenverlauf mit maximaler Genauigkeit aufgenommen werden“ (Punkt 3., Absatz 3). Um eine Messgenauigkeit (hier in diesem Artikel definiert als einfache Standardabweichung der Messgröße in Bezug zum tatsächlichen Wert) von künstli-

chen und natürlichen Objektpunkten im Bereich weniger Zentimeter zu erreichen, sind neben der Gewährleistung einer entsprechenden Definitionssicherheit der Messpunkte eine hochauflösende Datenerfassung sowie eine auf dem letzten Stand der Technik erforderliche photogrammetrische Datenauswertung essentiell. Da auf diese Aspekte in den oben erwähnten Arbeiten nicht genau eingegangen wird, befasst sich der Abschnitt 2 der vorliegenden Anmerkungen mit einigen dieser relevanten Themen. Anschließend folgen im Abschnitt 3 aus fachlicher Sicht Feststellungen und Korrekturen zu den Ausführungen in dem zu besprechenden Vortrag bzw Artikel. Im Abschnitt 4 werden aktuelle Hinweise bezüglich der Rechtslage in Österreich bei der Erstellung von Luftbildern unter Einsatz von UAS wiedergegeben, um mit einem Resümee die Anmerkungen zu beenden.

2. Projektablauf für eine Befliegung mittels Leichtgewicht-UAV und die photogrammetrische Auswertung der dabei erstellten Luftbilder

In diesem Abschnitt werden die aus photogrammetrischer Sicht notwendigen Schritte bei einer derartigen Befliegung mittels kostengünstigen Leichtgewicht-UAV (unabhängig, ob es sich dabei um Flächenflugzeuge, Helikopter oder Multicopter handelt) und der Auswertung der dabei aufgenommenen Luftbilder skizziert. Die Ergebnisse so eines technischen Projekts sind georeferenzierte (in einem einheitlichen Koordinatenrahmen [zB österreichisches Landeskoordinatensystem oder Projektkoordinatensystem] vorliegende) numerische und/oder fotografische Daten. Die geometrische Genauigkeit (einfache Standardabweichung) der Auswerteergebnisse soll dabei für gut definierte Bilddetails im Bereich von einem Dezimeter oder besser liegen und damit die von den Autoren verlangte „maximale Genauigkeit“ erreichen. Im Falle der Erstellung von Orthophotos oder eines Orthophotomosaiks sollte neben der geometrischen auch die fotografische Qualität der Bilderergebnisse den heute dafür üblichen Standards entsprechen. Nur dann sind Auswerteergebnisse von UAV-Luftbildern gegenüber den Produkten aus bisherigen Standardverfahren konkurrenzfähig. Dies ist bei Verwendung moderner vermessungstechnischer und photogrammetrischer Standardkomponenten bei den nachfolgend angeführten Bearbeitungsschritten möglich. Darüber hinaus darf der Kostenrahmen eines derartigen Projekts nicht wesentlich über dem der bekannten Verfahren liegen.

* Anmerkungen zum Beitrag von *Pfeffer/Pfeiffer*, Digitale Luftbilder aus unterschiedlichen Perspektiven mit dem Multicopter, SV 2011/4, 212.

2.1. Datengewinnung

2.1.1. Kamerakalibrierung

Damit ein Foto für die nachfolgende Auswertung als Strahlenbündel verwendet werden kann, müssen die Elemente der inneren Orientierung (Kammerkonstante, Lage des Bildhauptpunktes und die Objektivverzeichnung [typischerweise sind die radialen Komponenten ausreichend]) möglichst genau bekannt sein. Daher ist es ein Muß, jede bei einem derartigen Projekt verwendete Kamera vor ihrem Bildflugeinsatz zu kalibrieren. So eine Kamerakalibrierung wird üblicherweise unter Verwendung von Testfeldern mit einer großen Anzahl bekannter Kontrollpunkte unter Laborbedingungen durchgeführt. Neben der Laborkalibrierung ist auch eine Kalibrierung mittels eines Testfeldes (zB Schachbrettmuster) oder auch anhand genau bestimmter Objektpunkte im Feld möglich. In den uns bekannten Publikationen sowie in Firmenangaben, die UAV-Befliegungen und deren geometrischen Bildauswertungen bei Projekten behandeln und/oder als Dienstleistungen anbieten, werden kalibrierte Kameras benutzt.

Aus Gründen des geringen Zuladegewichts beim Einsatz eines Leichtgewicht-UAV und der relativ kurzen möglichen Bildflugzeit dieser Systeme werden bei diesen Befliegungen üblicherweise Kompaktkameras mit einer Weitwinkeloptik eingesetzt. Damit ist es leichter, das Interessengebiet ohne Löcher mit Luftbildern in einem großen Bildmaßstab abzudecken. Die geometrische Instabilität derartiger Kameras macht allerdings eine fortlaufende Kalibrierung notwendig. Um eine möglichst hohe geometrische Genauigkeit der Auswertergebnisse zu erzielen, wendet man daher heute eine sogenannte *On-the-job*-Kalibrierung (Selbstkalibrierung) an. Mittels einer solchen Kalibrierung werden die bekannten Kalibrierungsdaten zum Aufnahmezeitpunkt anhand der aktuellen Bildinformation verbessert. Dadurch können kurzfristige geometrische Instabilitäten der Kamera bei der nachfolgenden Bildauswertung berücksichtigt werden.

2.1.2. Passpunkte

Die Bestimmung der Elemente der äußeren Orientierung (Koordinaten der Projektionszentren und der Raumlage der Luftbilder) kann über Passpunkte oder über eine direkte Bestimmung während des Bildfluges erfolgen. Bei UAV-Bildflügen wird wiederum aus Gründen des geringen Zuladegewichts dafür der indirekte Weg über Passpunkt gewählt. Neueste Untersuchungen zeigen aber, dass auch über den direkten Weg entsprechende Ergebnisse (allerdings in einem globalen Koordinatenrahmen) erzielbar sind (*Pfeifer/Glira/Briese* [2012]).

Als Passpunkte können entweder Signale vor dem Bildflug entsprechend den bekannten Regeln für ihre Lage am Rande und im Interessengebiet bei einer nachfolgenden Blockausgleichung ausgelegt oder nach erfolgtem Flug unter Nutzung der Luftbilder in den dafür notwendigen Bereichen Naturpunkte ausgewählt werden (zB *Kraus* [2004]). In beiden Fällen sind die Raumkoordinaten dieser Signale oder Naturpunkte mittels geodätischer Verfahren

unter Einsatz von Totalstationen oder D-GNSS in einem einheitlichen Koordinatenrahmen einzumessen. Der dabei verwendete Koordinatenrahmen gilt für alle in der Folge angeführten Schritte des Projekts.

2.1.3. Bildflug

Damit die gewünschte Projektfläche komplett mit Bildmaterial abgedeckt wird (für eine 3D-Auswertung ist zumindest eine Doppelabdeckung zu gewährleisten), ist vorweg eine Flugplanung zu erstellen. Im Regelfall ist für eine stereoskopische Abdeckung mehr als ein Flugstreifen notwendig. Die Befliegung hat mit entsprechender Längs- und Querüberdeckung zu erfolgen. Unter Benutzung dieser Flugplanung werden die Koordinaten der vorbestimmten Aufnahmeorte ermittelt. Über Steuerungsmöglichkeiten der UAV werden diese Punkte angefliegen. Nach Erreichen der Sollposition erfolgt mit einer möglichst lotrechten Kameraposition die Bildauslösung. Dabei werden über entsprechende Softwaremöglichkeiten für die Kamerasteuerung die Fotos mit der Entfernungseinstellung „unendlich“ und zur Vermeidung von Bildunschärfen mit kurzer Verschlusszeit ausgelöst. Neben der wegpunktgesteuerten Auslösung kann die Kamera auch in einem konstanten Zeitintervall ausgelöst werden. Dabei muss im Rahmen der Flugplanung auch noch auf die Fluggeschwindigkeit Rücksicht genommen werden. Aufgrund der Witterungsverhältnisse (zB böiger Wind) sind gegebenenfalls unterschiedliche Sicherheitsgrenzen eventuell in Abhängigkeit der Flugrichtung für die Bildüberlappung zu berücksichtigen.

2.2. Automatische Aerotriangulation (AAT)

Für eine (semi)automatische Bündelblockausgleichung sind vorweg die aufgenommenen Bilder zu sichten und die für die Abdeckung und Auswertung des Interessengebiets notwendigen Luftbilder auszuwählen. Unter Benutzung photogrammetrischer Software (zB MATCH-AT), der ausgewählten Luftbild- und Kamerakalibrierungsdaten sowie der Passpunkte wird eine AAT ausgeführt. Ergebnis einer derartigen Bündelblockausgleichung sind die Elemente der äußeren Orientierung der Luftbilder sowie die Koordinaten von Verknüpfungspunkten benachbarter Luftbilder im Koordinatensystem der Passpunkte. Im Fall einer *On-the-job*-Kalibrierung (siehe Punkt 2.1.1.) erhält man zudem auch noch eine aktuellere Schätzung der inneren Orientierung der Kamera. Diese Ergebnisse werden für die nachfolgende geometrische Auswertung der Luftbilder benötigt. Bei Einhaltung der in der Photogrammetrie bekannten Bearbeitungsregeln (richtige Wahl der Flughöhe, der Kameraauflösung, Genauigkeit der Passpunkte etc) liegt die erzielte mittlere Punktgenauigkeit der photogrammetrisch bestimmten Verknüpfungspunkte und damit in der Folge auch die der Auswertergebnisse im Bereich von wenigen Zentimetern.

Neben den photogrammetrischen Standardsoftwarepaketen findet man mittlerweile auch andere automatische Lösungen zur Bildorientierung in Programmpaketen, die auf Algorithmen der Computer-Vision basieren (zB die Software PhotoScan). Oft kann man mit diesen Programmpa-

keten automatische Lösungen erzielen (für die innere und äußere Orientierung, siehe *Verhoeven/Doneus/Briese/Vermeulen* [2012]). Allerdings sind zur genauen Ergebnisbeurteilung entsprechende Genauigkeitskenngrößen zu ermitteln und zu analysieren. Leider fehlen typischerweise in derartigen Softwarepaketen diese Kennzahlen und Analysewerkzeuge.

2.3. Photogrammetrische Auswertemöglichkeiten

Je nach Aufgabenstellung können die über die AAT orientierten Luftbilder (siehe Punkt 2.2.) nach den unten angeführten Möglichkeiten bearbeitet und ausgewertet werden.

2.3.1. Digitale Strichauswertung

Werden als Ergebnis der Befliegung digitale Strichauswertungen verlangt, so sind die entsprechenden Bildpaare unter Nutzung der Ergebnisse der AAT mit einer digitalen photogrammetrischen Stereoauswertestation von einem Operateur manuell auszuwerten. Das Resultat sind 3D-Datensätze mit den vorweg definierten Informationen. Diese digitalen Informationen können nach ihrer Aufbereitung entweder in ein Geoinformationssystem (GIS) übernommen oder nach einer CAD-mäßigen Bearbeitung mittels Plotter als Plan ausgegeben werden.

2.3.2. Erstellung digitaler Geländemodelle (DGM)

Werden im gegenständlichen Projekt Daten eines DGM benötigt, so können diese unter Verwendung entsprechender photogrammetrischer Software durch ein automatisches Matching (zB mit der Software Match-T DSM) aus orientierten Bilderpaaren oder Bildverbänden gewonnen werden. Neben den photogrammetrischen Softwarepaketen können dazu auch Programmpakete, die auf Basis des Ansatzes *structure from motion* (im Folgenden kurz: SFM) arbeiten, genutzt werden (zB die Software PhotoScan bzw. *Verhoeven/Doneus/Briese/Vermeulen* [2012]). Existieren im Interessengebiet Bruch- und Formenlinien, wie sie im natürlichen Gelände, aber vor allem bei künstlichen Details bestehen, so können zur verbesserten Geländeapproximierung des DGM die automatisch gewonnenen Informationen durch zusätzliche manuelle Auswertungen ergänzt werden (siehe zB die Software SCOP++). Sind Objektpunkte an Gebäuden oder der Vegetation (Nicht-Geländepunkte) in diesem Modell inkludiert, spricht man vom digitalen Oberflächenmodell (im Folgenden kurz: DOM). Benötigt man ein DGM, das die Erdoberfläche ohne künstliche und natürliche Objekte beschreibt, müssen diese Punkte als Nicht-Geländepunkte klassifiziert werden. Dieser Schritt kann manuell oder (semi)automatisch erfolgen.

Die so erstellten DOM- oder DGM-Daten dienen für Masenermittlungen, zur Bestimmung von Oberflächen- oder Geländeänderungen bei periodischen Befliegungen, als Basis zur Ableitung von Höhenlinien, für die Erstellung von Orthophotos (siehe Punkt 2.3.3.) und für allfällige Visualisierungsaufgaben.

2.3.3. Erstellung von Orthophotos

Ein Orthophoto ist eine verzerrungsfreie und maßstabsgetreue Umbildung des Luftbildes des Interessengebiets. Die Berechnung erfolgt unter Benutzung entsprechender photogrammetrischer Software (zB OrthoMaster), wozu die Bilddaten, die Elemente der inneren und äußeren Orientierung der jeweiligen Orthophotovorlage sowie die DGM-Daten des Interessengebiets benötigt werden.

Aus Gewichtsgründen und zur leichteren Geländeabdeckung werden – wie oben ausgeführt – Weitwinkelkameras bei den Befliegungen mit UAV eingesetzt. Der Öffnungswinkel der damit erstellten Luftbilder liegt in den Bilddiagonalen im Bereich von 90 Grad. In so einem Weitwinkelfoto verursachen Geländehöhenunterschiede in allen Bildbereichen mit Ausnahme des Nadirpunktes selbst bei horizontaler Lage der Kamerabildebene während des Bildfluges Lageverzerrungen. Werden die Luftbilder ohne Berücksichtigung des DGM entzerrt, so ergeben sich in den Randbereichen Lageverzerrungen im Verhältnis 1:1 zu den existierenden Geländehöhenunterschieden. Da eine absolute Vertikalrichtung der Kamera mit den dafür vorgesehenen Steuerungskomponenten bei Leicht-UAV nicht garantiert werden kann, die Luftbilder mit Weitwinkeloptiken erstellt werden und es auch im Straßenbereich *keine* ebenen und horizontalen Flächen gibt (siehe dazu Punkt 3.3.), ist für die Orthophotoerstellung neben einer dafür entwickelten Software die Einbeziehung der oben angeführten Daten und Informationen ein Muss.

Das Interessengebiet wird üblicherweise nicht durch ein einziges Luftbild zur Gänze abgedeckt. Daher ist aus den in einem einheitlichen Koordinatenrahmen berechneten Orthophotos benachbarter Luftbilder ein Orthophotomosaik zu erstellen. Dies geschieht wiederum unter Verwendung entsprechender photogrammetrischer Software (zB OrthoVista). Neben den geometrischen Anforderungen werden bei einem derartigen Bildverband bestehende Farbunterschiede der beteiligten Fotos ausgeglichen und Bildschnittlinien automatisch gewählt. Zur Vermeidung von Fehl- und Doppelabbildungen dürfen diese Schnittlinien nicht durch Bauten (Häuser, Brücken, Mauern etc) gehen. Zur Beseitigung von in den Schnittlinienbereichen eventuell verbliebenen Bildfehlern erlauben diese Programme auch nachträgliche manuelle Überarbeitungen der digitalen Bilddaten.

Heute noch kein Standardprodukt sind sogenannte True Orthophotos. Bei der Erstellung der üblichen Orthophotos werden Bilddaten von Objekten, die aus der Geländefläche herausragen, nicht bearbeitet. Daher sind Bauwerke – je nach ihrer Lage in der Orthophotovorlage – in gekippter Form in den Orthophotos abgebildet. In einem True Orthophoto hingegen werden auch die Bilddaten dieser Objekte metrisch richtig umgebildet. Dazu benötigt man ein DOM. Um derartige Orthophotos ohne sichtbare Bildbereiche erstellen zu können, müssen die Luftbilder sowohl in Flugrichtung als auch quer dazu mit hoher (typischerweise 80%iger) Überdeckung befliegen werden. True Orthophotos werden hauptsächlich für Planungs- und Bewirtschaftungsaufgaben von Stadtgebieten eingesetzt (siehe dazu auch Punkt 3.4.).

3. Fachliche Stellungnahme und Korrekturen zu den Ausführungen im oben angeführten Vortrag und in der Veröffentlichung von Pfeffer/Pfeiffer

Wie in den Vorbemerkungen dieses Beitrags angegeben (siehe Punkt 1.), wird nachfolgend zu einigen Details des Vortrages und der Veröffentlichung aus fachlicher Sicht Stellung bezogen.

3.1. UAV-Steuerung

Im Artikel von Pfeffer/Pfeiffer wird behauptet (Punkt 2., Absatz 2), dass für die Realisierung einer Dreiachssteuerung vier unabhängige Rotoren benötigen werden. Tatsächlich kann eine derartige Dreiachssteuerung eines Multikopters aber schon mit mindestens drei unabhängigen Rotoren realisiert werden (sogenannte Trikopter; siehe Wikipedia-Artikel „Aerial photography“ bzw RC-Network-Artikel „Tricopter“). Erwähnt sei dazu noch, dass neben den Multikoptern nach dem heutigen Stand der Technik auch Flächenflugzeuge und Helikopter mit ähnlichen Navigationssensoren ohne großen finanziellen Aufwand automatisiert bzw autonom betrieben werden können (siehe zB auch <http://www.grid-it.at/surveybird>).

3.2. Bildflüge in der Photogrammetrie

In der Photogrammetrie gehören heute neben Flächenflugzeugen Hubschrauber zu den gängigen Trägerplattformen bei Befliegungen mit analogen oder digitalen Sensoren. Bei *großmaßstäblichen* Aufgabenstellungen liegen die Flughöhen über Grund entscheidend unter den im Vortrag angeführten Werten von 2.000 bis 5.000 m (Abbildung 6 des Vortrages). Für Angaben bezüglich der Auflösung wird in der Photogrammetrie üblicherweise der Begriff *ground sampling distance* (im Folgenden kurz: GSD) verwendet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die GSD selbst noch nicht unbedingt mit der Messgenauigkeit beim Auswertergebnis vergleichbar ist. Eine entsprechende GSD (Bodenauflösung) ergibt sich in Abhängigkeit der Auflösung im Bild (bei photogrammetrischen Kameras im Bereich weniger Mikron), der gewählten Brennweite und Flughöhe. Die Aussage von Pfeffer/Pfeiffer, dass die Auflösung (= GSD) „*klassischer Luftbilder*“ bei zirka 0,1 m pro Pixel liegt (Punkt 1., Absatz 4) und somit doppelt so ungenau wie die Bilddaten ist, die mit einer Kompaktkamera aus einer UAV-Befliegung stammen, ist bei der Wahl einer entsprechenden Flughöhe und einer hochauflösenden photogrammetrischen Kamera falsch. Faktum ist, dass bei großmaßstäblichen photogrammetrischen Projekten heute Bilddaten mit einer GSD von wenigen Zentimetern möglich sind. Bei solchen photogrammetrischen Projekten werden im Routinebetrieb Auswertegenauigkeiten für entsprechend definierte Bildpunkte erreicht werden, die – ähnlich wie bei den UAV – im Bereich von wenigen Zentimetern liegen (für photogrammetrische Kameras typischerweise ein Drittel bis die Hälfte der GSD).

Nicht unerwähnt sei, dass es bei herkömmlichen Bildflügen rechtliche, finanzielle und terminliche Bedingungen gibt, die Hindernisse für eine Befliegungen von Kleinstprojekten darstellen können. So existieren in Österreich zB

Beschränkungen für Befliegungen von Siedlungsgebieten mit geringen Flughöhen, für die Bereiche von Flughäfen und von militärischen Sperrgebieten. Die aktuelle rechtliche Situation für Bildflüge mit UAV wird im Punkt 4. dieser Publikation angesprochen.

Für eine Aufnahme von Bildern im nahen Infrarot sind keine „*Spezialoptiken*“ bei den Kameras notwendig (Abbildung 5 des Vortrages). Zur Erfassung dieses Bereichs des elektromagnetischen Spektrums sind vielmehr bei analogen Kameras entsprechend sensibilisierte Infrarot-SW-Filme oder Farbinfrarotfilme notwendig. Digitale Kameras müssen über geeignete Zeilen- oder Flächensensoren verfügen, die neben den Rot-, Grün- und Blaukanälen des sichtbaren Lichts als vierten Bildkanal auch den Wellenlängenbereich des nahen Infrarotbereichs erfassen und registrieren. Alternativ könnte der Infrarotbereich auch durch eine zweite unabhängige Kamera erfasst werden. Erwähnt sei in diesem Zusammenhang, dass bei einigen der aktuellen digitalen Spiegelreflexkameras Bildsensoren, die auch für den Infrarotbereich sensitiv sind, verbaut werden. Damit können diese Kameras durch einen Austausch der eingesetzten Filter zur Infrarotdatenerfassung umgebaut werden.

Der Vorteil von Bildflügen für Kleinprojekte mittels UAV ist bekannt und in dem Vortrag und der Publikation von Pfeffer/Pfeiffer angeführt. Was die Auswertung solcherart erstellter Luftbilder in technischer Hinsicht anlangt, so wird auf die Ausführungen im Punkt 2. unserer Anmerkungen hingewiesen. Generell gilt, dass die Ergebnisse aus den mittels UAV erstellten Luftbildern in geometrischer und fotografischer Hinsicht bezüglich Genauigkeit und Qualität den aus dem Vermessungswesen und der Photogrammetrie erstellten Produkten entsprechen sollen. Alle bisherigen Informationen belegen, dass die Kosten der Auswertung derartiger Luftbilder keinesfalls geringer sind als jene von herkömmlichen Messbildern (zB Sauerbier/Siegrist/Eisenbeiss/Demir [2011]).

3.3. Orthophoto und Orthophotomosaik

Das Umbildeprinzip bei der Erstellung eines Orthophotos aus einer Fotografie (Zentralprojektion) ist unabhängig davon, ob es sich bei der Orthophotovorlage um ein analoges oder digitales Luftbild handelt (Abbildung 3 des Vortrages). In beiden Fällen benötigt man für die Rektifizierung die Elemente der inneren Orientierung des umzubildenden Fotos, dessen exakte Raumorientierung (äußere Orientierung) und die Geländehöhen für den umzubildenden Bereich im identen Koordinatensystem. Die Umbildung selbst wurde und wird natürlich entsprechend den dafür verwendeten Geräten und/oder der dabei eingesetzten Software unterschiedlich realisiert. Der Durchbruch der Orthophotoerstellung gelang 1976. Unter Benutzung analoger Luftbildvorlagen wurde damals mit dem digital gesteuerten Orthophotogerät WILD AVIOPLAN OR1 und dem Programmpaket SORA eine Offline-Lösung des Umbildvorgangs realisiert. Dabei wurde über die Orientierung der Orthophotovorlage und die Benutzung existierender digitaler Geländemodelle die Gerätesteuerung für die fotografische differentielle Entzerrung berechnet und damit die Umbildung auf optischem Wege ausgeführt (Kraus [1976]).

Im besprochenen Artikel von *Pfeffer/Pfeiffer* werden Parameter angeführt, die bei der Erstellung einer möglichst verzerrungsfreien und maßstabsgetreuen Fotografie der Erdoberfläche von Bedeutung sind (Punkt 1., Absatz 5). Unerwähnt sind dabei die Brennweite des zu rektifizierenden Fotos, der Kameraöffnungswinkel und die Lage der umgebildeten Punkte im Foto. Diese Werte haben in Abhängigkeit der Geländehöhe über der Projektionsebene einen entscheidenden Einfluss auf die Radialverschiebungen von Bilddetails und damit die Genauigkeit der Umbildergebnisse. Die Behauptung, dass in der Praxis nur „*sehr geringe Verzerrungseffekte*“ bei automatisch horizontiert gehaltenen Kameras entstehen, wenn die Kameraebene parallel zur entzerrten Geländeebene gehalten werden kann, gilt nur, wenn das abgebildete Gelände *eben und horizontal* ist. Diese Bedingungen treten in der Natur selbst bei den behandelten Aufgabenstellungen im Straßenverlauf höchst selten und dann auch nur in ganz kleinen Bereichen auf. Aus langjähriger Erfahrung bei der Erstellung photogrammetrischer Unfallgutachten wissen wir, dass es zB aus Gründen der Ableitung von Regenwässern keine ausreichend ebenen und horizontalen Straßen- und Kreuzungsbereiche gibt. Somit ist für die typischerweise geforderten Genauigkeitsansprüche (Standardabweichung von einem Dezimeter und besser) die Berücksichtigung eines Geländemodells essentiell.

Sieht man von Sonderfällen ab, so hatten und haben Ganzbildentzerrungen aufgrund der topographischen Gegebenheiten sowie der Genauigkeitsanforderungen bei technischen Aufgabenstellungen in Österreich keine Bedeutung. Entsprechend den Ausführungen im Punkt 1., Absatz 5 der besprochenen Publikation von *Pfeffer/Pfeiffer* handelt es sich bei den Auswertergebnissen um Ganzbildentzerrungen und keine Orthophotos. Ob solcher Art erstellte Daten daher „*ausreichend genau korrigiert*“ sind, ist nach unserem Dafürhalten im Regelfall nicht gegeben. Seitens des Herstellers und/oder Anwenders derartiger Bilddaten ist eine entsprechende Genauigkeitsabschätzung für die Lageversetzungen im Ergebnis vorzunehmen. Bei Projekten im Vermessungswesen und in der Photogrammetrie sowie bei Gutachten gehören derartige Genauigkeitsangaben *immer* zum Lieferumfang bzw zum technischen Projektbericht.

Bezüglich der Mosaikierung von Orthophotos wird auf unsere Ausführungen unter Punkt 2.3.3. verwiesen.

3.4. Einsatz des Orthokopters in der Denkmalpflege

Ein Fassadenfoto des Kunsthistorischen Museums in Wien wird in Punkt 4. des Artikels von *Pfeffer/Pfeiffer* zur Dokumentation der Einsatzmöglichkeit von UAV-Befliegungen für den Bereich der Denkmalpflege angeführt. Auf Ausführungen bezüglich der Auswertung solcher Fotos wird im angesprochenen Artikel nicht eingegangen. Daher seien unsererseits folgende Ergänzungen dazu angemerkt: Soll ein fotografisches Produkt zur Dokumentation und für Auswerteaufgabenstellungen in der Denkmalpflege herangezogen werden, so muss das Ausgangsbild wegen der in derartigen Fassaden existierenden Bruchkanten, Gesimse, Fensterleibungen, Säulen und Reliefs sowie der großen

Tiefenausdehnung, wie dies zB bei der Fassade des abgebildeten Kunsthistorischen Museum der Fall ist, als True Orthophoto erstellt werden (siehe Punkt 2.3.3.). Dafür ist ein sehr genaues Oberflächenmodell der Fassade notwendig. Solche Daten werden heute aus Kosten- und Genauigkeitsgründen üblicherweise mittels Laserscanning erstellt. Bei derartigen Laserabtastungen der Fassade können aber auch Bildinformationen aufgenommen werden. Mittlerweile werden zur Ableitung von Oberflächenmodellen teilweise auch die bereits erwähnten Methoden des Matchings eingesetzt (zB SFM). Im Gegensatz zum Laserscanning muss hier auch eine entsprechende Oberflächentextur vorhanden sein und jeder Oberflächenpunkt muss in zumindest zwei Bildern (Stereobildpaar) sichtbar sein.

Werden Strichauswertungen der Fassaden gewünscht, so können bzw müssen diese manuell aus entsprechenden Stereobildpaaren ausgewertet werden. Für beide angeführten Auswerteverfahren werden sehr genaue Aufnahmeanordnungen und Bildorientierungen sowie kalibrierte Kameras benötigt.

4. Rechtslage für die Erstellung von Luftbildern unter Einsatz von UAV

In Österreich war bisher der Einsatz von UAV zur Luftbildfassung nicht explizit geregelt. Die technischen Möglichkeiten und die praktische Verfügbarkeit der Technik waren der Gesetzgebung voraus. Die Rechtsunsicherheit war auch daran zu erkennen, dass seitens der Interessensvertretungen der Modellflieger unterschiedliche Rechtsauslegungen vertreten wurden.

In den letzten Monaten wurde diese Rechtsunsicherheit bezüglich des Einsatzes von UAV seitens des Gesetzgebers durch eine Änderung des Luftfahrtgesetzes beseitigt. Der Ministerialentwurf zur Gesetzesänderung ist am 27. 12. 2012 im Nationalrat eingelangt. Bis zum Ende der Begutachtungsfrist am 4. 2. 2013 langten dazu eine Reihe von Stellungnahmen ein (siehe http://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXIV/ME/ME_00446/index.shtml). Am 22. 5. 2013 erfolgte der Beschluss der überarbeiteten Änderungen des Luftfahrtgesetzes im Nationalrat (siehe http://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXIV/II/I_02299/index.shtml). Der finale Gesetzestext wurde am 20. 6. 2013 in BGBl I 2013/108 (http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2013_I_108/BGBLA_2013_I_108.pdf) kundgemacht.

Mit dieser Gesetzesänderung wurden im Abschnitt 4 nun neben Flugmodellen und unbemannte Geräten bis zu 79 Joule maximaler Bewegungsenergie auch unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 und 2 eingeführt. Während Flugmodelle nur

1. in einem Umkreis von höchstens 500 m
2. ausschließlich unentgeltlich und nicht gewerblich im Freizeitbereich und
3. ausschließlich zum Zwecke des Fluges selbst

betrieben werden dürfen (siehe Abschnitt 4, § 24c Luftfahrtgesetz idF BGBl I 2013/108), können unbemannte

Luftfahrzeuge (UAV) der Klasse 1 und 2 auch in einem Umkreis von mehr als 500 m und/oder gegen Entgelt oder gewerblich oder zu anderen als in § 24c Abs 1 Luftfahrtgesetz genannten Zwecken betrieben werden (§ 24f bzw § 24g Luftfahrtgesetz).

Während für die UAV der Klasse 1 direkte, ohne technische Hilfsmittel bestehende Sichtverbindung zum Piloten gewährleistet werden muss, können UAV der Klasse 2 auch ohne Sichtverbindung betrieben werden. Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 und 2 dürfen aber nur mit Bewilligung der AustroControl GmbH oder einer aufgrund einer Übertragung gemäß § 140b Luftfahrtgesetz zuständigen Behörde betrieben werden. Für UAV der Klasse 2 sind sämtliche für Zivilluftfahrzeuge und deren Betrieb geltende Bestimmungen oder erlassenen Verordnungen anzuwenden. Weitere detaillierte Regelungen sind dem oben erwähnten Bundesgesetzblatt zu entnehmen.

Aktuell wird derzeit noch an den Detailregularien (Verordnungen) für den praktischen Einsatz von UAV (oder auch RPAS [*remotely piloted aircraft systems*]) gearbeitet. Erste Informationen bezüglich der Flugbewilligungen von UAV sind dazu auf der Homepage der AustroControl GmbH unter http://www.austrocontrol.at/luftfahrtbehoerde/lizenzen_bewilligungen/flugbewilligungen/unbemannte_lfz zu finden. Ab dem 1. 1. 2014 sollten damit alle notwendigen Bestimmungen für den Betrieb von UAV in Österreich existieren. Die im ersten Absatz erwähnte Rechtsunsicherheit wird damit wohl behoben werden. Für den Einsatz von UAV sind entsprechende Vorschriften und Bedingungen einzuhalten.

Mit der aktuellen Gesetzesänderung besteht nun eine gesicherte Rechtsbasis zum praktischen Einsatz von UAV in Österreich. Europaweit sind die Regulative, was den Einsatz von Kameras in UAV betrifft, sehr heterogen. Eine rechtliche Bewertung dieser Bestimmungen und der aktuellen europaweiten Gesetzesinitiativen zu diesem Thema in unseren Ausführungen geht über unser Fachgebiet hinaus und würde zusätzlich den hier zur Verfügung stehenden Rahmen sprengen.

5. Resümee

Der Einsatz von UAV bietet für Kleinprojekte und manche Aufgabenstellungen eine zusätzliche und kostengünstige Möglichkeit bei der Erstellung von digitalen Luftbildern im photogrammetrischen Nahbereich. Mit den Ausführungen in Punkt 2. unserer Anmerkungen haben wir die Bearbeitungsschritte und die dabei zu beachtenden Gegebenheiten nach dem aktuellen Stand der Technik skizziert.

Den Kosten bei der Realisierung eines derartigen Projekts kommt zweifelsfrei eine hohe Bedeutung bei. Damit es zu keinen falschen Genauigkeitsvorstellungen beim Einsatz einer neuen Komponente innerhalb einer Produktionskette eines vermessungstechnischen und/oder photogrammetrischen Projekts kommt, sind bei einer Projektanbahnung entsprechende theoretisch begründbare Angaben und im Routinebetrieb erzielte Projektergebnisse anzuführen. Das können zB Angaben bezüglich der gewonnenen Koordinaten- und Winkelgenauigkeiten und der GSD sein. Die

benötigte Genauigkeit bei einer Projektrealisierung ist entweder bekannt oder ist vom ausführenden Fachmann mit dem Auftraggeber gemeinsam festzulegen und in der Folge nachzuweisen. Jede bewusste oder unbewusste Genauigkeitsvortäuschung ist dabei tunlichst zu vermeiden.

6. Literatur

Kraus, Applications of a Digitally Controlled Orthophoto Instrument, presented paper, Commission IV, XIII. International Congress for Photogrammetry, Helsinki 1976;

Kraus, Photogrammetrie I: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen (2004);

Pfeffer/Pfeiffer, Skizzenerstellung mit dem Multicopter, Vortrag vom 25. 1. 2011, 34. Internationales Fachseminar, Bad Hofgastein 2011;

Pfeffer/Pfeiffer, Digitale Luftbilder aus unterschiedlichen Perspektiven mit dem Multicopter, SV 2011/4, 212;

Pfeifer/Glira/Briese, Direct Georeferencing with On Board Navigation Components of Light Weight UAV Platforms, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B7, 2012 XXII ISPRS Congress, 25th August – 1st September 2012, Melbourne, Australia;

Sauerbier/Siegrist/Eisenbeiss/Demir, The Practical Application of UAV-based Photogrammetry Under Economic Aspects, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22 UAG-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich 2011, Switzerland;

Verhoeven/Doneus/Briese/Vermeulen, Mapping by Matching: a Computer Vision-based Approach to Fast and Accurate Georeferencing of Archaeological Aerial Photographs, Journal of Archaeological Science 2012, 2060;

Wikipedia-Artikel „Aerial photography“, http://en.wikipedia.org/wiki/Aerial_photography (Zugriff: 8. 1. 2013);

RC-Network-Artikel „Tricopter“, <http://wiki.rc-network.de/Tricopter> (Zugriff: 8. 1. 2013).

Korrespondenz:

Dipl.-Ing. Dr. Christian Briese

Department für Geodäsie und Geoinformation und Ludwig Boltzmann Institut für archäologische Prospektion und virtuelle Archäologie

Gusshausstrasse 27-29/E120.7, 1040 Wien bzw Hohe Warte 38, 1190 Wien

E-Mail: christian.briese@geo.tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Dr. Gottfried Otepka

Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger für die Fachgebiete Vermessungswesen, Photogrammetrie, Fernerkundung und Geographische Informationssysteme

Sirapuit 83, 6460 Imst

E-Mail: g.otepka@aon.at