Potenzial ultrahochauflösender und -genauer UAV-basierter 3D-Datenerfassung

MICHAEL CRAMER[1], GOTTFRIED MANDLBURGER[1], DOMINIK LAUPHEIMER[1], NORBERT HAALA[1] & PATRICK HAVEL[2]

Zusammenfassung: Dieser Artikel präsentiert eine Studie über das Potenzial ultrahochauflösender und -genauer UAV-basierter 3D-Datenerfassung zur Deformationsüberwachung einer Schiffsschleuse und deren Umgebung. Flächenhaft erfasste UAV-Luftbild- und -Laserdaten sollen dafür mit Ergebnissen von klassischen punktbasierten ingenieur-geodätischen Verfahren verglichen werden. Demnach sind 3D-Punkte bzw. Punktwolken mit einer Qualität im Bereich von besser 1 cm zu liefern. Im Rahmen des Beitrags werden Daten und Ergebnisse aus der ersten Flugkampagne analysiert und präsentiert. Die UAV-Daten wurden von zwei verschiedenen Multi-Copter-Systemen erfasst, die am selben Tag geflogen wurden. Die Ergebnisse zeigen das außerordentliche Potenzial qualitativ hochwertiger UAV-basierter Bild- und Lasersensoren und deren Auswertung sowie ggf. auch deren Fusion. Die bisherigen Untersuchungen konnten aber auch zeigen, dass die zu erzielenden Genauigkeiten der Georeferenzierung nicht einfach „skalierbar" sind. Um die geforderte Objektpunktgenauigkeit von besser 1 cm zu erreichen, ist die reine Trajektorieninformation aus GNSS/inertial-Daten nicht ausreichend. Aus diesem Grund spielt die Optimierung im Rahmen einer integrierten Ausgleichung von Bild- und Laserdaten eine wichtige Rolle. Die in diesem Artikel präsentierten Ergebnisse stellen lediglich einen aktuellen Zwischenstand der Auswertungen dar, da die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind.

1 Einleitung

Der Artikel beschreibt das Potenzial von ultrahochauflösenden und -genauen UAV-basierten Laser- und Bilddaten zur 3D-Objektpunktbestimmung und Punktwolkengenerierung. Die konkrete Anwendung für diese bislang in UAV-Anwendungen in der Regel nicht angestrebten Genauigkeiten ist die 3D-Datenerfassung zur Deformationsüberwachung einer Schiffsschleuse (einschließlich Wehr- und Wasserkraftwerksgebäude) und ihrer Umgebung. Das Untersuchungsgebiet liegt in Hessigheim am Neckar nördlich von Stuttgart. In der Nähe der Schleuse wurde in den letzten Jahren eine Senkung von etwa 1 mm/Jahr bis 3 cm/Jahr relativ zur stabilen Umgebung beobachtet. Um solche Bewegungen zu überwachen, werden bislang die klassischen technisch-geodätischen Verfahren (Tachymetrie, präzises Nivellement, Extensometermessungen) genutzt. Diese liefern typischerweise punktweise Messungen an den jeweiligen Strukturen. Im Gegensatz dazu zielen wir auf eine flächendeckende Messung durch UAV-basiertes Monitoring mittels Photogrammetrie und Laserscanning; auch vor dem Hintergrund, dass Veränderungen in bisher nicht überwachten Bereichen auftreten können und ggf. unbemerkt bleiben. Um die obigen Setzungen nachweisen zu können, müssen die Laser- und Bilddatenauswertungen an ihre Grenzen gebracht werden, auch

[1] Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie (ifp), Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, [vorname.nachname]@ifp.uni-stuttgart.de
[2] Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Referat M5 – Geodäsie, Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz, havel@bafg.de

um mit den obigen klassischen, geodätischen Vermessungsverfahren konkurrieren zu können. Die angestrebte Bodenpixelgröße (GSD) und Objektpunktgenauigkeit (für signalisierte und definierte Einzelpunkte) liegt bei 3-5 mm und die Punktdichte der 3D-Punktwolke bei bis zu 800 Punkten/m².

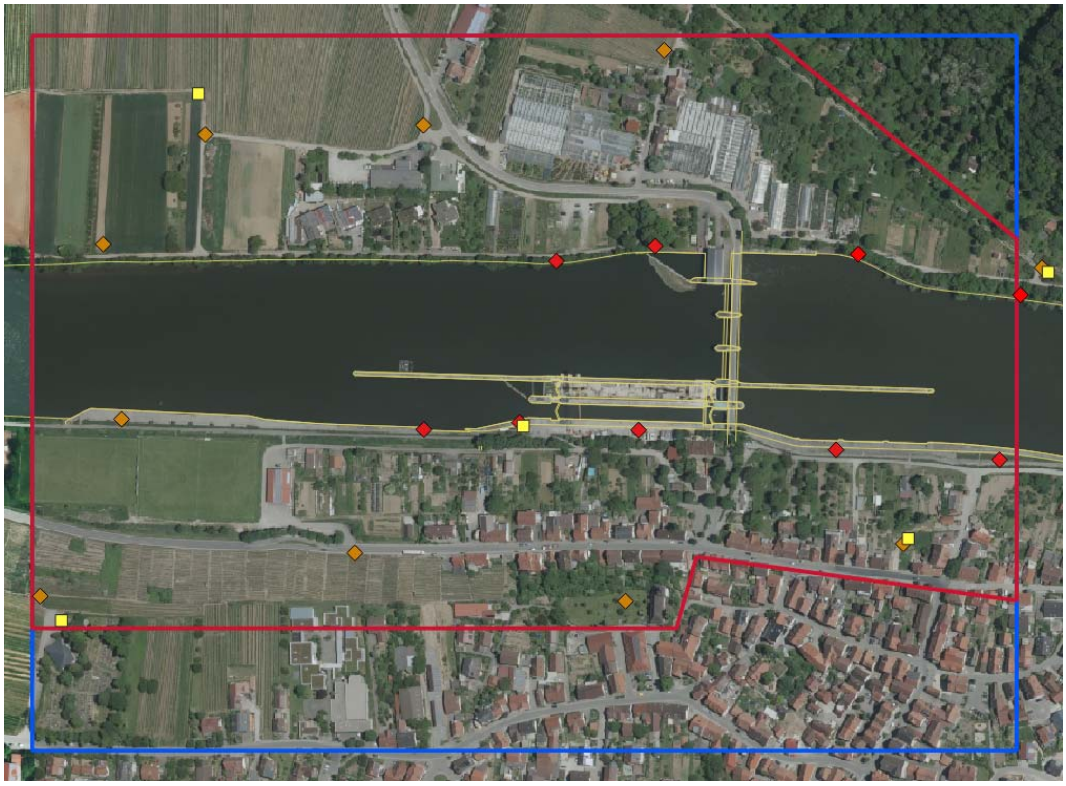

Abb. 1: Projektgebiet Hessigheim (geostete Darstellung). Der mit der PhaseOne zu erfassende Bereich ist durch das roten Umringpolygon markiert. Die Laserbefliegung erfasst ein geringfügig größeres Gebiet (blaues Polygon, 780 x 570 m²). Die signalisierten Passpunkte sind mit Rauten markiert (rot: Pfeilerpunkte, braun: Stativpunkte), die Passflächen für die Laserbefliegung mit gelben Quadraten.

2 Datenerfassung

2.1 Testgebiet Hessigheim

Das Projektgebiet umfasst neben der Schleusenanlage auch größere Teile des Uferbereichs mit Teilen der Ortschaft Hessigheim und einem großen Gärtnereibetrieb. Der Neckar zerteilt das Gebiet in einen westlichen und östlichen Teil. Die Wehranlange mit der Brückenstraße verbindet beide Uferteile. Die maximale Ausdehnung des Geländes beträgt etwa 570 m (Ost-West) x 780 m (Nord-Süd). Das Gelände ist in Neckarnähe überwiegend flach, steigt aber mäßig nach Nordwesten (Weinberge) bzw. stark nach Südosten (bewaldeter Prallhang) an. Diese Geländehöhenvariationen sollten bei den Flugplanungen berücksichtigt werden. Dieses Gebiet wird mittels Bild- und Laserdaten erfasst, wobei der Bereich für die Bilddatenerfassung geringfügig kleiner definiert ist, als der Bereich der Laserbefliegung (Abb. 1).

Die Georeferenzierung der UAV-Bilder und Laserdaten basiert im Wesentlichen auf den verfügbaren signalisierten Objektpunkten. Der zentrale Teil des Gebiets, d. h. die Schleuse und das Neckarwehr selbst, wird von einem Netzwerk von neun betonierten Pfeilerpunkten umgeben, die auch als permanente Punkte für das ingenieurgeodätische Vermessungsnetz dienen. Um den deutlich größeren Bereich des Befliegungsgebietes abzudecken, wurden für die Flugkampagnen weitere 10 Punkte auf Vermessungsstativen installiert (sog. „mobile“ Passpunkte). Diese Punkte sind nicht dauerhaft markiert, sondern gelten nur für die entsprechende Flugkampagne. Ihre genaue Position wird durch mehrfache statische GNSS-Basislinienmessung bestimmt, wobei die Höhenkomponente durch zusätzliches Nivellement eingemessen wird. Auf die gleiche Art werden auch die Pfeilerpunkte bestimmt. Die Referenzstation für die GNSS-Messungen liegt im Testgebiet. Die Koordinaten aller Punkte müssen für jede Befliegungskampagne neu bestimmt werden, da diese sich aufgrund von Setzungen verändern können. Lediglich der Pfeilerpunkt der GNSS-Referenzstation ist durch seine über 25 m tiefe Gründung als stabil zu betrachten. Aus der geodätischen Netzausgleichung ergeben sich die Passpunktkoordinaten mit einer Genauigkeit (Std.Abw.) von 2-5 mm.
Alle Pfeiler- und mobilen Passpunkte sind für die hochgenaue photogrammetrische Punktbestimmung mit zwangszentrierten Schachbretttafeln signalisiert, die für die geodätische Einmessung durch die GNSS-Antennen bzw. Prismen ersetzt werden können. Die Größe der runden Schachbretttafeln (27 cm Durchmesser) ist so gewählt, dass sie in den Bildern automatisch gemessen werden können (Abb. 2 (links)), um die Fehler der Bildpunktmessungen zu minimieren. Für die absolute Orientierung der Laserdaten wurden fünf zusätzliche satteldach-förmige Bezugsflächen installiert, die auf Vermessungsstativen mit bekannter Position und Orientierung im Raum befestigt sind (Abb. 1). Jede Seite dieser Referenzflächen hat eine Größe von 40 cm x 80 cm.

2.2 UAV-Datenerfassung

Die UAV-basierte Datenerfassung der ersten Messkampagne im März 2018 erfolgte mit dem Riegl VUX-1 Laser in Kombination mit zwei Sony Alpha 6000 Oblique Kameras und der PhaseOne iXU-RS 1000 für die 100 MPix großen Nadir-Bilddaten. Da es aktuell noch keine UAV-Trägerplattformen gibt, die sowohl VUX-1 Laser als auch PhaseOne-Kamera in einem System kombinieren, wurden zwei Multicopter-UAVs eingesetzt, die aber quasi parallel, also am gleichen Tag die Daten erfassten (CRAMER et al. 2018).
Die PhaseOne iXU-RS 1000 Nadirbilder (Sensorformat 11608 × 8708 Pixel, 4.6 µm Pixelgröße, 16 bit RGB-Bilder, für die Auswertung reduziert auf 8 bit-Tiefe) wurden mit dem CopterSystems CS-SQ8-Copter aufgenommen, der speziell für PhaseOne-Kamera-Nutzlasten optimiert ist. Es waren 18 aufeinander folgende Flugmissionen erforderlich, um das Projektgebiet vollständig abzudecken. Die mittlere Fluggeschwindigkeit lag bei 4 m/s. Die mittlere Flughöhe betrug etwa 40 m über dem Boden. Dies führt zu einer nominalen GSD von 3.7 mm für die Nadir-Bilder. 3775 Bilder mit 80/60 Soll-Überlappung sind in 146 zumeist in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Fluglinien angeordnet, da die Flussrichtung des Neckar für dieses Testgebiet fast exakt in Nord-Süd-Richtung liegt. Der Fluss selbst wurde nicht überflogen (mit Ausnahme des Schleusenbereichs und der Wehranlage), da seine Breite etwa 100 m beträgt und die resultierende Bildabdeckung am Boden aus der vorgegebenen Flughöhe zu klein wäre um die Flussbreite komplett zu überbrücken. Die

Auswertung der PhaseOne-Nadirbilder zerfällt also praktisch in einen westlichen und östlichen Bildverband.

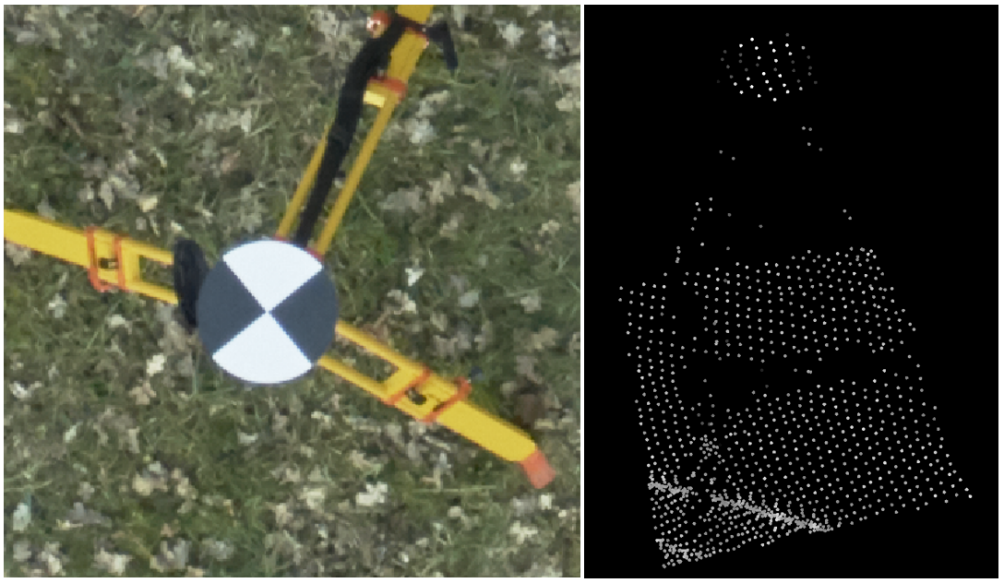

Abb. 2: Signalisierter Passpunkt auf Vermessungsstativ (Durchmesser Schachbrettsignaltafel 27 cm) und zughörige Punktwolkenerfassung aus Lasermessung.

Für die Laserdatenerfassung reichten nur fünf Flüge, die insgesamt 17 Längsstreifen (d. h. Nord-Süd-Streifen), 4 Kreuzstreifen (Ost-West) und 4 Diagonalstreifen umfassen – letztere um den steil ansteigenden bewaldeten Prallhang in der südöstlichen Ecke des Untersuchungsgebiets abzudecken. Zwei weitere zusätzliche diagonale Fluglinien sollten zur weiteren Blockstabilisierung dienen. Bei einer Fluggeschwindigkeit von 8 m/s, einer nominalen Flughöhe von 50 m über Boden, einem Streifenabstand von 35 m, einer Pulswiederholungsrate von 820 kHz, einer Abtastzeilenrate von 133 Hz und einem verwendeten Scannerfeld von 70° beträgt die resultierende Laserimpulsdichte 300-400 Punkte/m² pro Streifen und mehr als 800 Punkte/m² für den gesamten Flugblock aufgrund der nominalen seitlichen Überlappung von 50 %. Diese Flugmissionsparameter garantieren einen Durchmesser des Laserfußabdrucks von weniger als 3 cm auf dem Boden, was eine hohe horizontale Auflösung von 5 cm ermöglicht. Ein Nachweis dieser horizontalen Punktdichte zeigt die Abb. 2 (rechts). Der Durchmesser der 27 cm großen Signalisierungsscheibe wird wie erwartet mit ca. 5-7 Laserpunkten erfasst. Die im Herstellerdatenblatt des Sensors angegebene Entfernungsgenauigkeit beträgt 10 mm (RIEGL 2018).

3 Auswertung der Daten

3.1 PhaseOne iXU-RS 1000 Nadirbilddaten

Die effektive Auflösung der PhaseOne-Bilder wurde durch separate Auflösungsuntersuchungen anhand der Analyse von Siemenssternen geschätzt. Der abgeleitete MTF10-Wert als Maß für die tatsächliche Auflösung entspricht im mittleren Bereich der Bilder in etwa der nominalen GSD. Die Auflösung nimmt zum Bildrand ab. Die Abb. 3 zeigt die Ergebnisse dieser Auflösungsuntersuchung. Die Bilder wurden in einem separaten Vortest erfasst, in dem das Auflösungsmuster aus

zwei leicht unterschiedlichen Flughöhen mehrfach überflogen wurde. Der Siemensstern wurde so insgesamt 16 mal an unterschiedlichen Stellen im Bild abgebildet. Die nominelle Bodenpixelgröße im Bereich von 3.2-3.4 mm wird für die Bilder mit der Flughöhe zwischen 35-37 m knapp aufgelöst. Die höheren MTF10-Werte treten für diejenigen Bilder auf, in denen der Stern eher am Bildrand zu liegen kam. Für die niedrigere Flughöhe kann die nominelle Bodenpixelgröße aber nicht ganz erreicht werden. Hier überwiegt der Einfluss der Unschärfe aufgrund der Eigenbewegung der Kamera während der Bildaufnahme. Die Bilder wurden durchgängig mit 1/1000 s Belichtungszeit aufgenommen (ISO 800, maximale Blendenöffnung 1/5.6). Bei einer Fluggeschwindigkeit von 4 m/s ergibt sich daraus bereits eine theoretische Bewegungsunschärfe von 4 mm. Im statischen Umfeld löst die Kamera problemlos die nominelle Bodenpixelgröße auf, was durch einen separaten statischen Test nachgewiesen wurde. Zu berücksichtigen ist auch der Einfluss der Schärfentiefe. Um in der weiteren Auswertung eine möglichst stabile Kamerageometrie zu gewährleisten, wurde das 50 mm-Rodenstock-Objektiv auf eine Distanz von 40 m fixiert, was der im Projekt geplanten mittleren Flughöhe über Grund entspricht. Bei einer vorgewählten Blendenzahl 1/5.6 ergibt sich der Schärfentiefenbereich von ca. 28-68 m. Die niedrige Flughöhe liegt demnach am unteren Ende des Schärfentiefenbereichs, was die Auflösungsqualität beeinflusst.

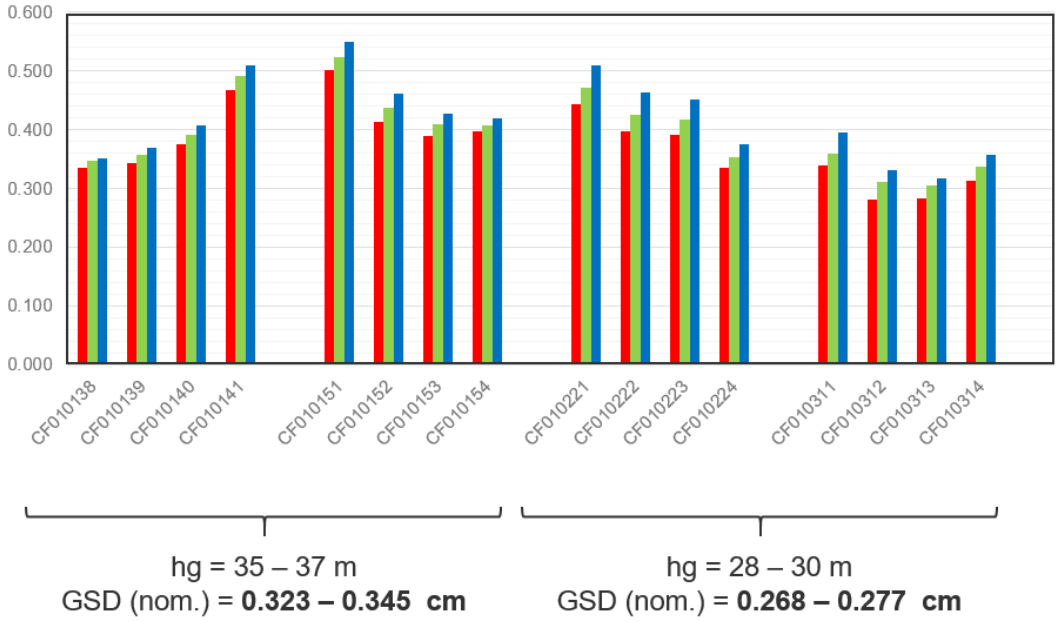

Abb. 3: Auflösungsuntersuchung (MTF10 Wert [cm] bezogen auf Objektraum, RGB-Farbkanal) Phase-One iXU-RS 1000 Kamera aus zwei unterschiedlichen Flughöhen.

Im Folgenden werden nur die PhaseOne-Bilddaten des westlichen Blockteils bestehend aus 10 einzelnen Flügen mit insgesamt 1971 Bildern berücksichtigt. Die Hauptflugrichtung ist Nord-Süd, mit Ausnahme eines einzelnen Bildverbands, der über der Schleusenanlage in Ost-West-Richtung erfasst wurde. Die Georeferenzierung basiert auf 10 verfügbaren Passpunkten. Nur ein zusätzlicher Punkt wurde als unabhängiger Kontrollpunkt verwendet. Weitere Kontrollpunkte standen für diese Kampagne nicht zur Verfügung. Da alle Punkte mit Schachbretttafeln ausreichender Größe signa-

lisiert sind, wurden deren Bildkoordinaten automatisch gemessen. Der mittlere Rückprojektionsfehler liegt für die signalisierten Punkte bei etwa 0.06 pix. Dies ist 5-fach besser als der Gesamtrückprojektionsfehler, der mit etwa 1/3 pix hauptsächlich durch die sonstigen Verknüpfungspunktmessungen bestimmt wird. Die Objektkoordinaten der Passpunkte werden gemäß ihren Standardabweichungen aus der vorherigen statischen GNSS-Netzmessung separat gewichtet. Diese liegen zwischen 2 und 5 mm (Standardabweichung).

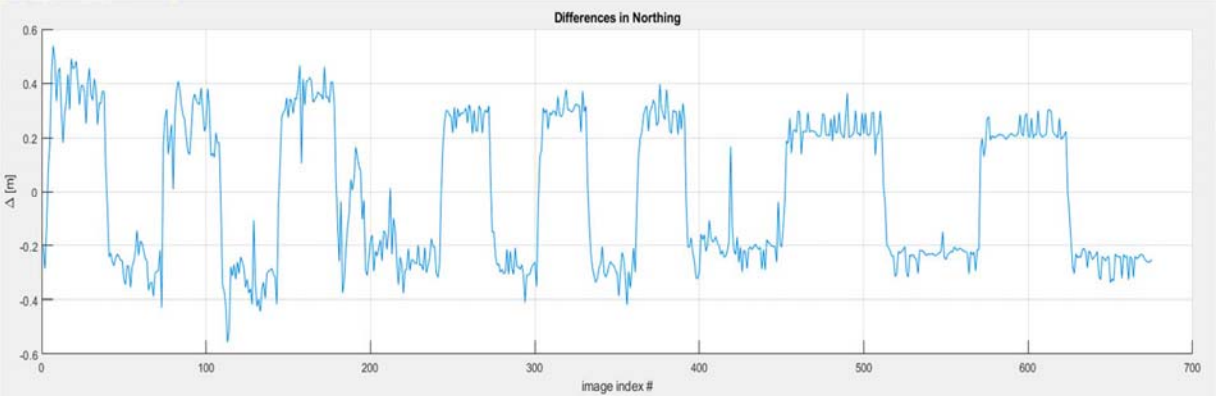

Abb. 4: Differenz der Projektionszentrumskoordinaten (Nordkomponente = Flugrichtung, [m]): Geschätztes Projektionszentrum aus passpunktbasierter AT versus direkt gemessener Projektionszentrumskoordinate aus GNSS/inertial-Beobachtungen.

Es war vorgesehen die Bilder mittels GNSS-gestützter Aerotriangulation bzw. integrierter Sensororientierung zu georeferenzieren. Parallel zu den Bilddaten sind daher zusätzlich GNSS/inertial-Orientierungselemente über das Applanix APX-15 UAV-Board gemessen worden, deren Genauigkeit nach dem Post-Processing bei 2-5 cm für die Position und 0.025- 0.080° für die Orientierung liegt, vorausgesetzt die GNSS-Satellitenkonstellation ist ausreichend und es liegen kurze GNSS-Basislinien vor (APPLANIX 2018). Entgegen der ursprünglichen Planung erfolgte die Zeitsynchronisation zwischen dem Mittenimpuls der Kamera und dem APX-15 Board nur auf 0.1 s genau. Unter der Annahme, dass durch diese ungenaue Synchronisierung Zeitfehler von bis zu 0.05 s auftreten können, werden dadurch nicht reproduzierbare Abweichungen von bis zu 20 cm in der Position verursacht, hauptsächlich in Flugrichtung, bei 4 m/s angenommener mittlerer Fluggeschwindigkeit. Die Abb. 4 zeigt die Differenzen zwischen den aus der AT geschätzten Projektionszentrumskoordinaten und den direkt gemessenen aus GNSS/inertial-Sensorik für 17 ausgewählte Flugstreifen. Dargestellt ist nur die Differenz in der Nordachse, da diese mit der Hauptflugrichtung des Systems zusammenfällt. Die streifenabhängige Systematik ist deutlich zu erkennen. Diese kann durch streifenweise Offset- (und Drift-) Korrekturen kompensiert werden, wie aus der traditionellen GNSS-gestützten Bündelausgleichung bekannt. Der mittlere Offset pro Streifen deutet auf einen konstanten Zeitoffset hin, oder Restfehler in den Hebelarmen zwischen GNSS/inertial-Einheit und Kameraprojektionszentrum. Problematisch sind die Variationen innerhalb des jeweiligen Streifens, die mehr als doppelt so groß sind als die theoretisch zu erwartenden 2-5 cm. Bei den weiteren Auswertungen wurden die GNSS/inertial-Orientierungen daher nur mit einer geringen Gewichtung eingeführt.

Durch in-situ Selbstkalibrierung wird im Rahmen der AT die Kamerageometrie durch zusätzliche physikalische Parameter bestimmt (BROWN, 1971). Obwohl der Bildblock aus zehn Flugmissionen besteht, die an zwei aufeinanderfolgenden Tagen geflogen wurden, wurde die Kamera nur mit einem Satz von Kalibrierungsparametern modelliert.
Die hohen Bildüberlappungen und die geringe Flughöhe in Kombination mit dem gewählten Weitwinkelobjektiv ermöglichen eine theoretische 3D-Objektpunktqualität, die in horizontaler Richtung bei besser 1 Pixel und in vertikaler Richtung besser 1.5 Pixel liegen sollte. Da wegen der aufgrund der Zeitsynchronisation deutlich schlechteren GNSS/inertial-Orientierungselementen alle signalisierten Punkte (bis auf eine Ausnahme) als gewichtete Passpunkte verwendet wurden, lassen die Residuen an diesen Passpunkten nur eine grobe Qualitätsabschätzung zu. Die mittleren Abweichungen sind 2.0 mm für die Ost-, 4.1 mm für die Nord- und 6.6 mm für die vertikale Koordinate. Dies liegt bei der GSD von knapp 4 mm im Rahmen der Erwartungen. Wie bereits erwähnt, wurde nur ein einziger Punkt als unabhängiger Kontrollpunkt verwendet. Die Residuen betragen 5.5 mm, 0.9 mm und 5.6 mm für Ost-, Nord- und Vertikalkoordinate. Der Residuenvektor passt betragsmäßig gut mit den Residuen an den Passpunkten überein.

3.2 Riegl VUX-1 Laserdaten

Parallel zur photogrammetrischen Bündelausgleichung wurde eine Laser-Streifenausgleichung mit zeitabhängiger Bahnkorrektur durchgeführt (GLIRA et al. 2016, MANDLBURGER et al. 2017). Im Rahmen eines Kalibrierungsverfahrens wurden die Hebelarme und Boresight-Parameter, eine globale Offsetkorrektur sowie Flugbahnkorrekturen geschätzt, um die Abweichungen (Punkt-zu-Ebene-Abstände überlappender Flugstreifen) zu minimieren. Zur absoluten Orientierung werden die Referenzflächen berücksichtigt. Im Rahmen dieser Laserstreifenanpassung wurden zwei verschiedene Versionen untersucht. Die erste Version berücksichtigt nur einen konstanten Versatz (Δx, Δy, Δz, $\Delta roll$, $\Delta pitch$, Δyaw) pro Streifen, d. h. die Trajektorieninformationen aus GNSS/inertial-Daten werden nicht verformt, sondern nur verschoben und insgesamt leicht gedreht. In der zweiten Version werden zusätzliche Polynomkorrekturen eingeführt, die die a-priori-Flugbahninformationen aus der GNSS/inertial-Verarbeitung flexibler machen und die Unterschiede zwischen den Streifen weiter minimieren. Die Restdifferenz in den Vertikalen nach der Streifenanpassung betrug 4 mm, gemessen als robuste Standardabweichung der absoluten Streifenhöhenunterschiede (σ_{MAD}) in glatten und offenen Oberflächenbereichen.
Es sollte erwähnt werden, dass die Georeferenzierung von Laserpunktwolken in erster Linie von der Qualität der direkten Georeferenzierung abhängt. Bei dem APX-20 UAV GNSS/inertial-Board wird die Genauigkeit im Post-Processing mit 2-5 cm für die Positionierung festgelegt. Diese Genauigkeit wird im Wesentlichen von der GNSS-Qualität bestimmt und ist identisch mit der Genauigkeit des APX-15 UAV Boards, welches für die PhaseOne-Befliegung genutzt wurde. Da neben der Position vor allem auch die Genauigkeit der Orientierungswinkelbestimmung für die Orientierung von Scannern wesentlich ist, liefert das APX-20 Board hier eine höhere Genauigkeit: Die Orientierungswinkel werden mit einer Genauigkeit von 0.015-0.035° bestimmt, wobei sich der erste Wert auf die Roll- und Neigungswinkel bezieht, der zweite Wert auf die Qualität der Kurswinkelbestimmung (APPLANIX 2018). Da das Lasersystem in 50 m Höhe über dem Boden geflogen wurde, verursachen Fehler in Roll- / Neigungswinkel etwa 1.5 cm Positionsverschiebung

auf dem Boden. Dies Einfluss ist etwas kleiner als die angenommenen Fehler in der Positionsbestimmung, jedoch größer als die angestrebte 3D-Objekpunktgenauigkeit. Dies zeigt bereits, dass mit der ausschließlichen direkten Georeferenzierung die geforderte Genauigkeit nicht erreicht werden kann, sondern zusätzliche Referenzdaten und Streifenausgleichung erforderlich sind.
Die Genauigkeit der Laserstreifenausgleichung wurde an den vorhandenen Passpunkten ermittelt. Die kreisförmigen Schachbrettsignalisierungstafeln mit einem Durchmesser von 27 cm bilden eine definierte Fläche für die Lasermessungen (Abb. 2 rechts). Die Koordinaten dieser Punkte sind bekannt und können für den Genauigkeitsvergleich herangezogen werden. Acht Referenzpunkte stehen dafür zur Verfügung. Um die Differenzen zu ermitteln wird zunächst in einem Kugelvolumen (Radius 10 cm) um den Mittelpunkt der Signaltafel nach Laserpunkten gesucht. Aus den sechs nächstgelegenen Laserpunkten wird dann eine Ebene geschätzt. Da die Passmarken horizontal ausgerichtet sind, sollte diese geschätzte Ebene auch horizontal sein. Der vertikale Abstand (Normalrichtung) zwischen dieser Ebene und dem Referenzpunkt wird berechnet und kann somit als absolute Genauigkeit betrachtet werden. Die berechneten Standardabweichungen betragen 2.9 cm bzw. 3.0 cm, je nachdem ob für den Streifenausgleich nur Offset- bzw. zusätzliche Polynomkorrekturen verwendet wurden. Diese Abweichungen liegen deutlich über den angestrebten Genauigkeiten und auch über der Herstellerangabe zur Entfernungsmessgenauigkeit des Lasersystems. Das deutet auf verbleibende Restfehler bei der Georeferenzierung hin, die in den laufenden Untersuchungen noch festzustellen und zu korrigieren sind.

3.3 Punktwolkenvergleich

Sowohl Photogrammetrie durch dichte Bildpunktzuordnung als auch Laser liefern dichte Punktewolken. Die Abb. 5 zeigt einen ersten qualitativen Vergleich zwischen photogrammetrischer und Laserpunktwolke. Beide Methoden erlauben eine dichte und genaue Darstellung der jeweiligen Oberflächengeometrie. Der Profilschnitt in Abb. 5 (links) zeigt aber auch die Unterschiede beider Methoden. Ein dichtes Mehrbildstereo-Zuordnungsverfahren liefert 3D-Informationen für jedes Bildpixel, sofern von ausreichender Bildüberlappung und -textur ausgegangen werden kann. Im Gegensatz dazu ist das polare Messprinzip von Lasersensoren immer dann von Vorteil, wenn sich die Struktur des Objekts aus verschiedenen Blickrichtungen stark ändert. Dies gilt beispielsweise für semi-transparente Objekte wie Vegetation. Der Baum im Profilschnitt in Abb. 5 (links) wird detaillierter mit seiner ganzen Aststruktur erfasst. In der photogrammetrischen Punktwolke fehlt er vollständig. Anders die Situation bei definierten Oberflächen. Die Dachflächen z.B. können deutlich vollständiger erfasst werden. Außerdem ist die Punktdichte der photogrammetrischen Punktwolke durch die kleine GSD signifikant höher als das Abtastintervall des Lasers. Das ist deutlich in Abb. 5 (mittig, rechts) erkennbar. Das rechts dargestellte Laser-DSM wurde auf 5 cm Schrittweite abgetastet. Dies passt zu der nativen Abtastung der Laserpunkte, wenn nur ein Flugstreifen berücksichtigt wird, ist also im Vergleich zu der originalen Punktdichte (Streifenüberdeckung 50%) um den Faktor 2 heruntergerechnet. Die GSD der Nadir-Bilder liegt, wie bereits erwähnt, bei etwa 4 mm. Das photogrammetrisch abgeleitete DSM wird hier als 1 cm-Raster angegeben, also ebenfalls um den Faktor 2 verringert. Insbesondere bei den Detailvergrößerungen der Dachziegelstrukturen ist die höhere Auflösung der bildbasierten Rekonstruktion im Vergleich zum Ergebnis der Lasermessung deutlich zu erkennen. Auch in diesen beiden Bildern sind die systemimmanenten Unterschiede bei der Erfassung von Vegetation zu erkennen.

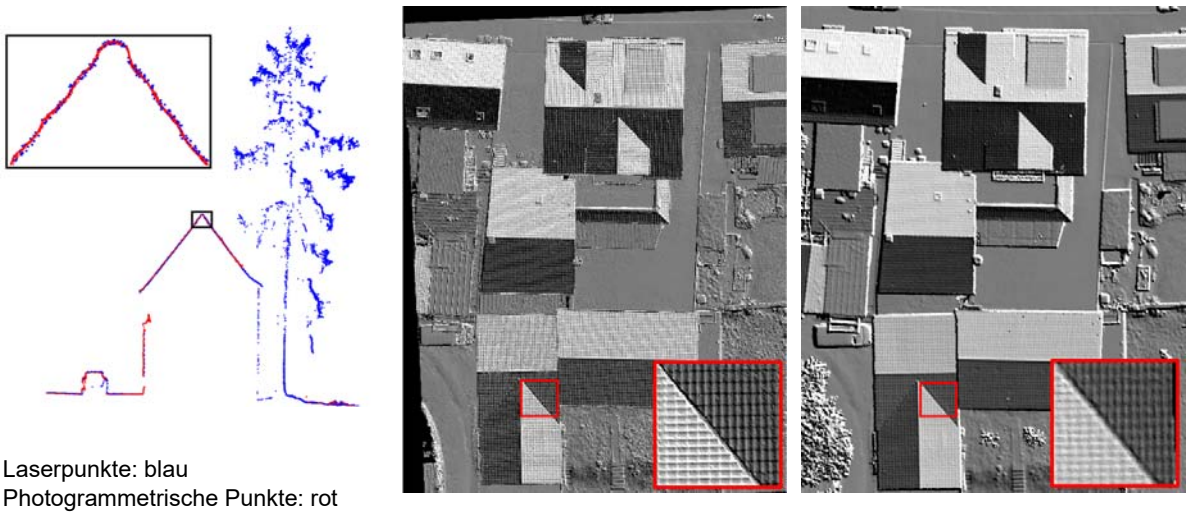

Abb. 5: Vergleich zwischen Laser- und photogrammetrischer Punktwolke. Profilschnitt (links) und schattiertes Oberflächenmodell aus dichter Punktzuordnung (Rasterweite 1 cm, mitte) bzw. Laser (Rasterweite 5 cm, rechts).

Der direkte Vergleich zwischen photogrammetrischer und Laserpunktwolke durch Differenzbildung erlaubt die umfassende Beurteilung der Qualität der Georeferenzierung beider Datensätze. Bislang wurden Bild- und Laserdaten mit den Standardverfahren getrennt ausgewertet. Wenn die Differenz beider Oberflächenmodelle klein ist, dann belegt das auch die Qualität der Georeferenzierung. In Abb. 6 (oben) wird die Differenz zwischen dem Laseroberflächenmodell (Streifenausgleich mit Splinekorrektur) und dem Oberflächenmodell aus der photogrammetrischen Punktwolke gezeigt. Die Abbildung zeigt deutliche systematische Unterschiede zwischen den beiden DOMs, die als eine Art globale Schwingung bezeichnet werden könnten. Dieses wird durch Restsystematiken in der Georeferenzierung der Sensoren verursacht. Die Abweichungen können einerseits durch den Laserstreifenausgleich oder Systematiken in der Bündeltriangulation der Bilddaten (inklusive in-situ Kamerakalibrierung) verursacht sein. Die Wahl der Parameter im Streifenausgleich wirkt sich deutlich auf die spätere 3D-Punktwolke aus. Eine gewisse Rolle spielt auch die Gewichtung der Passpunkte im Rahmen der Bündeltriangulation der Bilder. Beide Effekte werden ebenfalls in Abb. 6 gezeigt. Die in der Mitte gezeigte DOM-Differenz ergibt sich aus der unterschiedlichen Gewichtung der Passpunkte in der Bündelausgleichung der Bilder. In der Regel werden die Passpunkte mit der angenommenen Standardabweichung als beobachtete Größe in die Ausgleichung eingeführt. In diesem Fall wie oben beschrieben mit Werten von 2-5 mm, die sich aus der geodätischen Netzbestimmung ergaben. Im zweiten Fall wurden die Passpunkte als tatsächlich feste Größen behandelt, d.h. die Abbildungsstrahlen mussten sich an der vorgegebenen Passpunktkoordinate schneiden. In den von den Passpunkten am weitesten entfernten Bereichen ergeben sich so Differenzen im Bereich von ca. 2 cm, was bereits über der hier veranschlagten Projektgenauigkeit liegt. Deutlich größer sind aber die Unterschiede bei unterschiedlichen Freiheitsgraden im Laserstreifenausgleich. Die Abb. 6 (unten) zeigt den Vergleich des Laser-DOM nach Bias- bzw. Splinekorrektur. Die Differenzen erreichen bis zu ±5 cm.

Da es aktuell an unabhängigen Kontrollinformationen vor Ort mangelt, können die Ursachen für die obigen Restfehler in der Georeferenzierung der Datensätze nicht klar zugewiesen werden. Zudem ist es momentan nicht möglich genau einzuordnen welche der berechneten Varianten nun die beste Lösung liefert. Alle hier durchgeführten Vergleiche sind in diesem Sinne nur relativ. Zusätzliche Referenzhöhen sollten in unmittelbarem zeitlichen Zusammenhang durch terrestrische Vermessung nachgemessen werden. Diese Punkte sind praktisch wie Profile angelegt, die das gesamte Projektgebiet durchziehen. Erst dann können die systematischen Fehler eindeutig der Photogrammetrie oder dem Laserscanning zugeordnen werden. Die Messung dieser Referenzprofile erfolgte im Herbst 2018, die finalen Koordinaten konnten für diese Auswertungen aber noch nicht berücksichtigt werden.

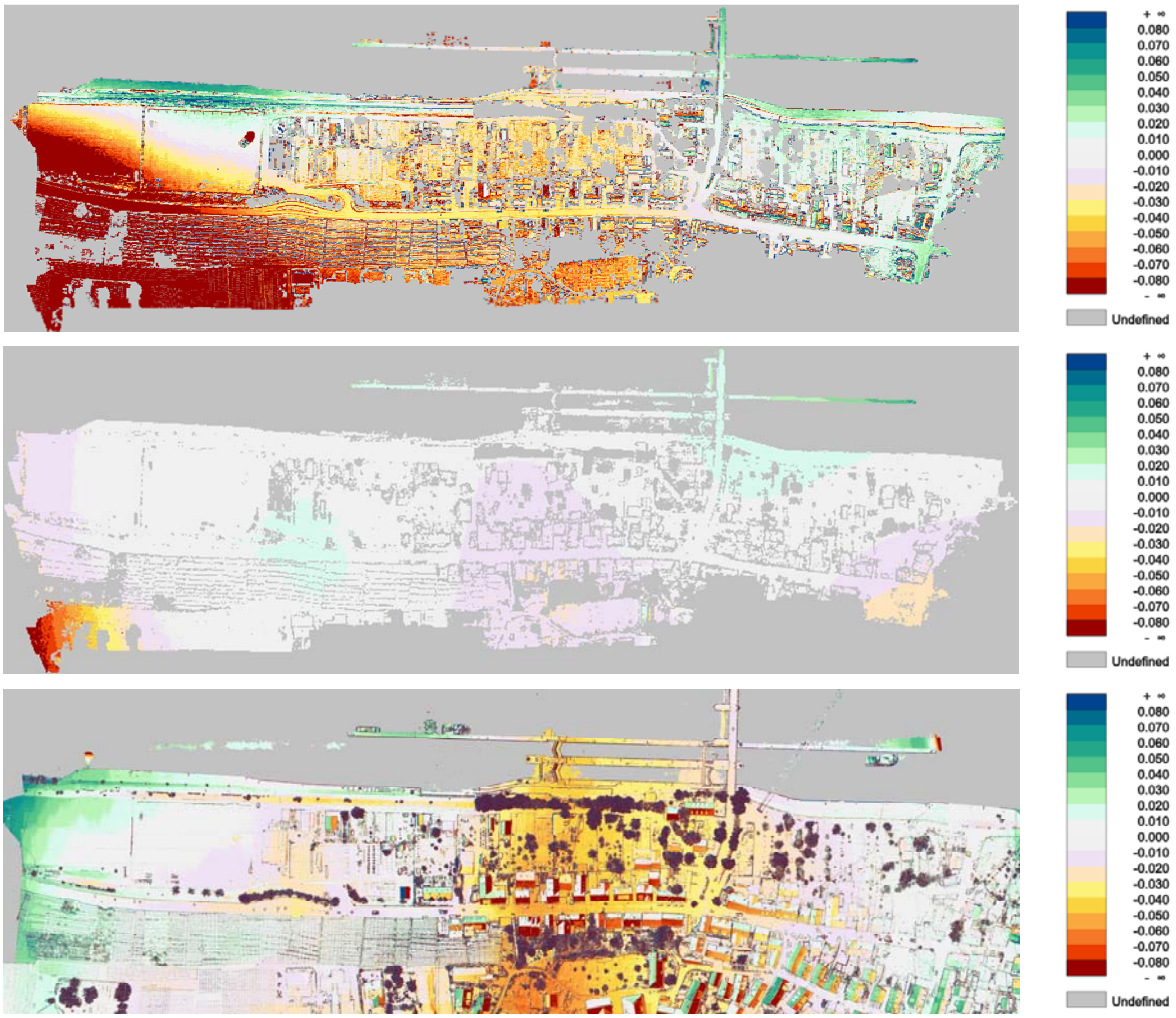

Abb. 6: Punktwolkendifferenzen ([m], geostete Kartendarstellung): Vergleich zwischen Laser-DOM (nach Splinekorrektur) und photogrammetrischem Oberflächenmodell (gewichtete Passpunktbeobachtungen in AT, (oben)). Vergleich photogrammetrische DOMs unter Verwendung von gewichteten bzw. festen Passpunktbeobachtungen (mittig). Vergleich zwischen Laser-DOMs nach Bias- bzw. Splinekorrekturmodell im Streifenausgleich (unten).

4 Diskussion und Ausblick

Die obigen Abschnitte präsentieren den aktuellen Stand der Auswertungen im Rahmen dieses Projekts. Mit den bisherigen Auswertungen konnte die avisierte geometrische 3D-Objektpunktgenauigkeit noch nicht erreicht werden. Die Adressierung einer Genauigkeitsstufe von besser 1 cm für derartige UAV-Anwendungen ist definitiv nicht trivial. Die ausschließliche Trajektorieninformation aus GNSS/inertial-Daten erscheint dafür nicht ausreichend. Daher spielt die nachgeschaltete integrierte Ausgleichung eine wichtige Rolle bei der Optimierung der Georeferenzierung. Bisher werden die beiden Datensätze als separate Daten betrachtet, aber im nächsten Schritt werden die Bilder und Laserdaten in einem gemeinsamen Laserbildanpassungsprozess zusammengeführt. Den erfolgreichen Einsatz der hybriden Ausgleichung hat GLIRA (2018) bereits für ein Teilgebiet des Hessigheim Flugblocks demonstriert.

5 Literaturverzeichnis

APPLANIX, 2018: APX UAV product specifications. https://www.applanix.com/products/dg-uavs.htm.

BROWN, D.C., 1971: Close range camera calibration. Photogrammetric Engineering, **37**(8):855-866, https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1971journal/aug/1971_aug_855-866.pdf.

CRAMER, M., HAALA, N., LAUPHEIMER, D., MANDLBURGER, G. & HAVEL, P., 2018: Ultra-high Precision UAV-based LiDAR and Dense Image Matching. The Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., **42**(1), 115-120, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-115-2018.

GLIRA, P., PFEIFER, N. & MANDLBURGER, G., 2016: Rigorous Strip Adjustment of UAV-based Laser Scanning Data Including Time-Dependent Correction of Trajectory Errors. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **12**, 945-954.

GLIRA, P., 2018: Hybrid Orientation of LiDAR Point Clouds and Aerial Images. Dissertation, Technische Universität Wien.

MANDLBURGER, G., WENZEL, K., SPITZER, A., HAALA, N., GLIRA, P. & PFEIFER, N., 2017: Improved topographic models via concurrent airborne LiDAR and dense image matching. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-2/W4, 259-266, https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-259-2017.

RIEGL, 2018: RIEGL VUX-1UAV product specifications. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VUX-1UAV_Datasheet_2017-09-01_01.pdf.