

Flächenhaftes UAV-Monitoring: das Hessigheim-Projekt¹

Area-based UAV Monitoring: The Hessigheim Project

Michael Cramer, Michael Kölle, Norbert Haala, Patrick Havel

Dieser Beitrag diskutiert das flächenhafte UAV-basierte (Bauwerks-)Monitoring mittels Bild- und Laserdaten am Beispiel der Schleusenanlage und deren Umfeld in Hessigheim/Neckar. Die angestrebten Objektpunktgenauigkeiten im Subzentimeterbereich werden empirisch nachgewiesen. Vielversprechend ist die hybride Georeferenzierung von Laser- und Bilddaten, mit der die komplementären Eigenschaften beider Sensoren voll ausgeschöpft werden können. Die stabile Geometrie eines flächenhaft aufgenommenen Luftbilds unterstützt die Orientierung des scannenden Lasersystems. Mit den empirisch nachgewiesenen Genauigkeiten von ca. 5 mm können Setzungen in der Größenordnung von 1 cm/Jahr gesichert flächendeckend nachgewiesen werden.

Schlüsselwörter: Flächenhaftes Monitoring, Bauwerksmonitoring, UAV, hybride Bild- und Laserdatenorientierung

This article discusses area-based monitoring (of structures) using image and laser data captured by UAV, illustrated on the ship lock and its surroundings in Hessigheim/Neckar. The requested object point accuracy in the sub-centimetre range is empirically proven. The hybrid georeferencing of laser and image data is very promising. It allows the complementary properties of both sensors to be fully exploited. The stable geometry of an aerial frame-based image supports the orientation of the scanning laser system. With the empirically proven accuracy of approx. 5 mm, subsidence in the order of 1 cm/year can be reliably detected over the entire area.

Keywords: Area-based monitoring, monitoring of structures, UAV, hybrid image and laser orientation

1 EINLEITUNG

Die Ingenieurgeodäsie ist gemäß einer Definition von /Kuhlmann et al. 2013/ „die Disziplin von der Aufnahme, der Absteckung und dem Monitoring lokaler und regionaler geometriebezogener Phänomene mit besonderer Berücksichtigung von Qualität, Sensorik und Bezugssystemen“. Je nach geforderter Anwendung und verfügbarer Messsensorik bestimmt die Ingenieurgeodäsie 3D-Objektpunkte mit einer entsprechenden, z.T. sehr hohen Genauigkeit. Damit ist die Ingenieurgeodäsie das bevorzugte Verfahren für „Vermessungen im Zusammenhang mit der Projektierung, Ausführung, Abnahme und Überwachung von Bauwerken oder anderen Objekten“ /DIN 2010/. Der Begriff (Geo-)Monitoring wird in der Geodäsie „fast selbstverständlich als Synonym für die Überwachung komplexer natürlicher und technischer Vorgänge oder Prozesse mittels geeigneter Beob-

achtungssysteme genutzt“ /Niemeier & Riedel 2016/. Die Überwachung von Bauwerken, vor allem auch zur Deformationsmessung, ist eine dieser Anwendungen. Zum üblichen Messinstrumentarium gehören klassische geodätische Messsensoren, wie Totalstationen, Nivelliere und GNSS. Diese messen direkt die Deformation in Form von Punktverschiebungen bzw. Koordinatenveränderungen in Lage und/oder Höhe. Ergänzend können auch andere Messsysteme, wie Schlauchwaagen, Beschleunigungssensoren oder Neigungsmesser, eingesetzt werden, die im Unterschied zu den klassischen Methoden keine direkten Koordinatenänderungen, sondern physikalische Eigenschaften des Objekts messen. „Ureigenes geodätisches Mittel zur Beobachtung eines Objekts ist die Anlage und Auswertung eines Überwachungsnetzes mit dem Zweck, aus wiederholten Messungen

¹ Erweiterte und aktualisierte Version des Konferenzbeitrags: Cramer, M.; Havel, P. (2020): UAV und Monitoring: Widerspruch oder erweiterte Option? In: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe 97. Wißner, Augsburg, 163 – 176.

auf Verschiebungen der repräsentativ angelegten Netzkpunkte zu schließen. Sofern auch Punkte in der Umgebung angelegt sind, können festgestellte Veränderungen in Bezug auf einen äußeren Referenzrahmen und somit georeferenziert und nicht nur relativ angegeben werden. ... Für die einzelnen Punkte des geodätischen Netzes entstehen dabei verdichtet über die Zeit Messreihen, die mithilfe der Methoden der Zeitreihenanalyse untersucht werden können. Derartig betriebene Überwachungsnetze erlauben eine verbesserte Betrachtung von Deformationen im Zeitbereich mit der verbleibenden Einschränkung auf zumeist nur wenige zur Verfügung stehende Objektpunkte“ /Eichhorn et al. 2016/.

Maßgeblich für ein erfolgreiches Monitoring ist eine hinreichend genaue Vorkenntnis des zu erwartenden zeitlichen und räumlichen Ablaufs der Deformationen. Diese definiert die Genauigkeitsanforderungen und vor allem auch die Auslegung des Überwachungsnetzes. 3D-Punktgenauigkeiten im Millimeterbereich und ggf. besser sind für präzise Bauwerksüberwachungen möglich. Die Deformationsanalyse ist aber nur für diejenigen Punkte möglich, die im Rahmen einer Zeitreihe wiederholt beobachtet wurden. Tritt im Extremfall eine räumliche Veränderung in einem Bereich auf, der bislang nicht Bestandteil des Überwachungsnetzes ist, bleibt diese lokale Deformation unerkannt.

Vor diesem Hintergrund werden alternativ zu den eher punktorientiert erfassenden Methoden flächenhaft erfassende Messsysteme (Kameras/Laserscanner) interessant. Terrestrische Laserscanner werden in ingenieurgeodätischen Anwendungen bereits eingesetzt. Unbemannte Fluggeräte (UAV bzw. Drohnen) haben sich ebenfalls in der Vermessung etabliert. Sie ermöglichen die bevorzugte Sicht von oben auf das zu vermessende Gebiet. Größere Plattformen erlauben die Verwendung von hochauflösenden Kamerasystemen, aktuell bis hin zu 150-Mpix-Kameras, aber auch die Kombination mit Laserscannern. Damit stehen die klassischen Verfahren der photogrammetrischen 3D-Bestimmung von Einzelpunkten bzw. Punktwolken – bildbasiert durch dichte Mehrbildstereozuordnung (Dense Image Matching, DIM) bzw. durch direkte Messung mittels Laserscanning – zur Verfügung und können bei entsprechender Genauigkeit auch für flächige Monitoringanwendungen eingesetzt werden.

Im Unterschied zu den üblichen bemannten Bild- oder Laserflügen aus größeren Flughöhen erlauben es Drohnen, deutlich niedriger zu fliegen. Die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung aus Bildern ist eine Funktion des Bildmaßstabs, festgelegt durch den Aufnahmeabstand. Eine geringe Distanz verringert zwar die abgebildete Fläche pro Bild, ist aber positiv für die resultierende geometrische Auflösung und 3D-Punktgenauigkeit. Als erster Richtwert kann eine 3D-Punktgenauigkeit im Bereich von einem Bodenpixel angenommen werden. Für die Genauigkeit des Laserscannings ist neben dem Messrauschen die sogenannte Strahldivergenz entscheidend. Die Aufweitung des Messstrahls definiert ebenfalls in Abhängigkeit von der Flughöhe den Durchmesser der von einer Messung am Boden ausgeleuchteten Fläche (Laser-Footprint). Der Laser misst die mittlere Höhe dieses Bodenelements. Niedrige Flughöhen von 50 m und eine angenommene Strahldivergenz von 0,5 mrad erlauben Footprint-Durchmesser von 2,5 cm /Mandlbürger et al. 2015/. Das Messrauschen (Präzision) ist systemabhängig. Für mehrzielfähige, gepulst messende Systeme können mittlere absolute Differenzen innerhalb glatter Bereiche im

Bereich von 5–20 mm angenommen werden /Mandlbürger et al. 2015/, wobei die Qualität der Trajektorienbestimmung die Gesamtgenauigkeit beim Laserscanning definiert. Mehrzielfähige Systeme werden bevorzugt angewendet, da diese die Durchdringung von semi-transparenten Objekten, wie z. B. Vegetation, erlauben.

2 MONITORING-PROJEKT HESSIGHEIM

Die Untersuchung der Potenziale von UAV-gestützten Kameras bzw. Laserscannern für präzises flächenorientiertes (Bauwerks-) Monitoring ist Fokus des Projekts UAV-gestützte 3D-Messdaten – Matching und Laserscanning im Forschungsprojekt "Effizientes ingenieurgeodätisches Monitoring der Verkehrsbauwerke". Dieses wird seit einiger Zeit im Rahmen des Ressortforschungsprogramms BMVI-Expertenetzwerk (siehe Editorial dieser Publikation) am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart in Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz durchgeführt. Als Projektumfeld wurde die Schleusenanlage Hessigheim/Neckar und deren Umfeld gewählt. Das Schleusenbauwerk wird aktuell saniert, da Teile der Schleusenanlage in schwierigem Baugrund gründen, was zu Instabilitäten und Bodenabsenkungen führt /Kauther & Schulze 2015/.

2.1 Bauwerksnetz

Der eigentliche Schleusenbereich wird schon länger feinnivellistisch, tachymetrisch und mittels Extensometer beobachtet (*Abb. 1*, links). Weitere Bereiche wurde bis dato ausschließlich feinnivellistisch mit wenigen Objektpunkten in das bestehende Messprogramm einbezogen. Benötigt wird zukünftig eine verdichtete punkt- und insbesondere hochaufgelöste flächenmäßige 3D-Oberflächen-erfassung. Die zu erfassende Veränderung der eindeutig reproduzierbaren Stütz- und Objektpunkte soll mit einer Maßtoleranz T : $T = \Delta x = \Delta y = \Delta z \leq 1 \text{ cm/Jahr}$ erfolgen /BfG 2017/. Diese Toleranz definiert die entsprechende Punktmessgenauigkeit. Um derartige Bewegungen zu erfassen, muss die Genauigkeit der Einzelpunktbestimmung demzufolge deutlich besser sein.

Das Vermessungspunktfeld des aktuellen Bauwerksnetzes ergibt sich aus 10 Messpfeilern, 4 Hilfspunkten (*Abb. 1*, links), ca. 150 tachymetrisch zu messenden Objektpunkten, davon ca. 24 zusätzlich feinnivellistisch zu messen, und ca. 135 ausschließlich feinnivellistisch zu messenden Objektpunkten (*Abb. 1*, rechts). Das Messpfeilernetz wird zusätzlich durch GNSS-Basislinienmessungen eingemessen, zwei der Pfeilerpunkte werden dauerhaft als GNSS-Permanentstationen betrieben, die restlichen Punkte werden nur im Rahmen der Messkampagne beobachtet. Die Einmessung der Bodenpunkte gemäß der Vorgabe im Messprogramm dauert etwa zehn Tage mit zwei Messtrupps à drei Personen für die reine Datenerhebung vor Ort. /Böhm 2019/ gibt die Genauigkeit der Objektpunkte wie gefordert mit $u_x = u_y = u_z \leq 1 \text{ mm}$ an.

Vor dem Hintergrund der Detektion von Veränderungen im unmittelbaren und weiteren Umfeld der Schleusenanlage soll das Gebiet auf den in *Abb. 1* blau umgrenzten Bereich ausgedehnt werden. Damit wird das bisherige Kernmessgebiet deutlich auf die an den

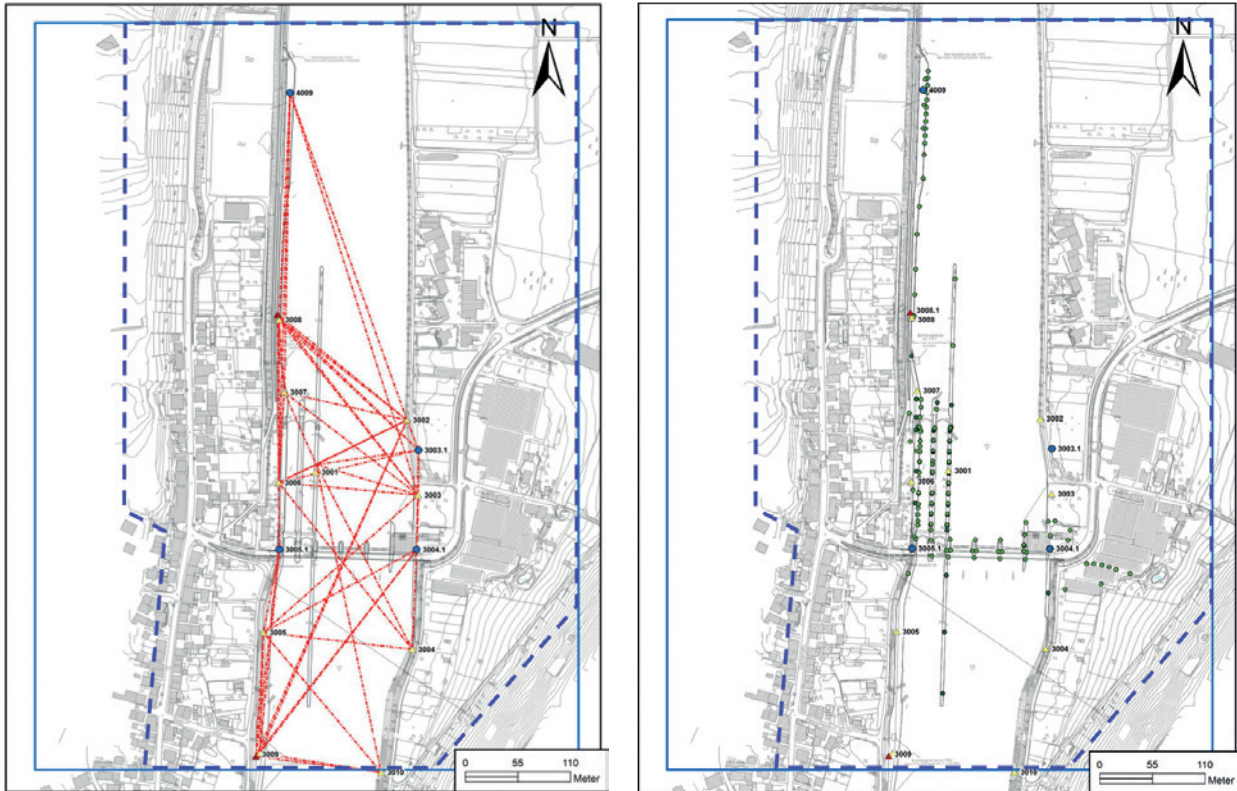


Abb. 1 | Übersicht über das geodätische Bauwerksnetz. Links dargestellt die Netzpunkte mit der Beobachtungsgeometrie für die tachymetrische und nivellistische Messung, rechts die weiteren Objektpunkte (150 3D-Objektpunkte, 135 Höhenpunkte).

Neckar angrenzenden Bereiche inklusive bebauter Bereiche erweitert, wobei der mit UAV-Bildern zu erfassende Bereich leicht kleiner definiert ist und durch die blau-gestrichelte Linie umgrenzt wird. Die UAV-Laserbefliegung erfolgt aber im gesamten erweiterten Gebiet. Es ist deutlich erkennbar, dass eine klassische punktweise Erweiterung des bisherigen Bauwerksnetzes auf diesen deutlich größeren Bereich unter Beibehaltung der relativ hohen Punktdichte nur mit sehr großem Aufwand realisierbar wäre. Aufgrund der dichten Bebauung und der nur bedingten Zugänglichkeit privater Grundstücke wäre eine klassische Vermessung eines solchen Netzes vermutlich auch nur wenig realistisch. Hier bleibt also nur die berührungsfreie Vermessung aus der Luft. /Niemeier & Riedel 2016/ empfehlen ebenfalls die Verfahren der Fernerkundung zur Überwachung von großräumigen Bereichen mit Oberflächenveränderungen, aber mit Schwerpunkt auf der satellitengestützten Radarinterferometrie. Auch in dem hier vorgestellten Monitoringprojekt kommen Methoden der Radarinterferometrie zum Einsatz (Persistent-Scatterer-Interferometrie), über die in /Schneider & Sörgel 2020/ berichtet wird. Für kleinere Untersuchungsgebiete ist nach /Niemeier & Riedel 2016/ „eine Befliegung (Flugzeug, ggf. sogar UAV) möglich“, wobei diese Befliegungen im klassischen Sinn eher dem Aufdecken von potenziellen Bereichen mit Objektveränderungen dienen, für das eigentliche Monitoring dann aber die Approximation der spezifischen Veränderungszone mittels repräsentativer Punkte empfohlen wird. In Bezug auf flugzeuggestütztes Laserscanning erwartet /Niemeier & Riedel 2016/ Koordinatengenauigkeiten von wenigen Zentimetern.

2.2 Anforderungen an die UAV-Sensorik

Die oben genannten Genauigkeitsanforderungen sind entscheidend für die Auswahl der UAV-Sensorik. Das betrifft die Kamera wie auch den Laserscanner. Grundsätzlich sind für beide Systeme das Gewicht und die Einbaumaße entscheidend für die Auswahl der Trägerplattform. In der Regel kommen für die nachfolgend diskutierten Systeme nur größere UAV mit einer Gesamtabflugmasse zwischen 10–25 kg in Betracht.

2.2.1 Anforderungen an die Kamera

Für die Auswahl der Kamera kann die angestrebte Genauigkeit in erster Näherung in Relation zu der realisierten Bodenpixelgröße, die sog. Ground Sampling Distance (GSD), gestellt werden. Geht man von Genauigkeiten im Bereich von etwa einer GSD aus, erfordert das eine entsprechend kleine GSD. Für das hier vorgestellte Projekt wurden die Bilder mit einer mittleren GSD von etwa 4 mm aufgezeichnet. Diese Festlegung beruht auf der Annahme, dass so die geforderte Maßtoleranz von ≤ 10 mm gesichert eingehalten werden kann.

In diesem Zusammenhang ist aber auch die tatsächliche Bodenauflösung, die sog. Ground Resolving Distance (GRD) von Bedeutung. Im Unterschied zur rein geometrisch definierten Bodenpixelgröße GSD definiert die Auflösung die Fähigkeit des Sensorsystems, zwei eng benachbart liegende Punkt im Objektraum auch im Bild als noch zwei getrennte Signale abzubilden. Sie ergibt sich wesentlich aus der optischen Qualität der gewählten

Kamera-Linsen-Konfiguration und den entsprechenden Aufnahmebedingungen. Die physikalische Auflösung wird in der Regel anhand von Auflösungsmustern bestimmt. Qualitativ hochwertige Kamera-Linsen-Kombinationen zeigen i.d.R. ein deutlich besseres Auflösungsvermögen. Dieses wirkt sich positiv auf die Erkenn- und damit auch Messbarkeit von Objekten in Bildern aus und beeinflusst auch die Qualität der Bildorientierung /Meißner et al. 2018/.

Bilder mit hoher Auflösung erlauben eine bessere Qualität der Bildpunktmessung und damit auch eine bessere dichte Erfassung von 3D-Punktwolken mittels Mehrbildstereozuordnung. Die Messungen der Verknüpfungspunkte im Bild sind die entscheidenden Beobachtungen im Rahmen der Bildorientierung. Daher sollte bei der Kamera auf ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis geachtet werden. Das zeigt sich vor allem für Bildflüge unter nicht optimalen Beleuchtungsbedingungen, bei denen die Empfindlichkeit/ISO-Zahl des Sensors entsprechend hochgesetzt werden muss.

Wenn, wie im Monitoring üblich, identische Objektpunkte wiederholt einzumessen sind, muss deren eindeutige Erkennbarkeit in den Bildern sichergestellt sein. Für solch dezidierte Punkte wird daher eine entsprechend Luft-sichtbare und im Idealfall automatisch messbare Signalisierung (mit Zwangszentrierung) empfohlen. Diese automatische Bildpunktmessung signalisierter Punkte ist für Nahbereichsanwendungen üblich, bedingt aber eine gewisse Mindestgröße der Signale. Daher wird sie im klassischen Luftbildfall eher selten eingesetzt. Für diese Anwendung können aber ausreichend große Signale installiert werden, da durch die kleinen Bodenpixel sichergestellt ist, dass die Signale hinreichend groß in den Bildern abgebildet werden. Im konkreten Fall wurden runde Schachbrettafeln mit einem Durchmesser von knapp 30 cm verwendet. Bei etwa 5 mm großen Bodenpixeln entspricht der Durchmesser des Signals mehr als 50 Pixel, damit ist der Minstdurchmesser von ca. 30 Pixel für die automatische Messung mit zusätzlicher Toleranz sicher eingehalten. Eine weitere zusätzliche Codierung der Messtafeln wäre ggf. möglich gewesen, wirkt sich aber nicht auf die Bildpunktmessgenauigkeit aus. Der Mehrwert der Codierung liegt lediglich darin, dass schon bei der Messung den Punkten die entsprechende Punktnummer und damit auch die zugehörige Objektraumkoordinate automatisch zugewiesen werden kann.

Durch die erforderliche geringe GSD spielt auch die Anzahl der Bildelemente der Kamera eine entscheidende Rolle. Das ist zunächst hinsichtlich der Effizienz von Belang: Bei einer größeren Flächenabdeckung pro Bild sind letztlich auch weniger Bilder bzw. Flugstreifen und damit Flüge zur Erfassung des Gebiets notwendig. Die Anzahl der Bilder wirkt sich auch auf die Blockstabilität aus. Ein Bildverband, der aus weniger Bildern und Streifen besteht, ist bei gleicher Überdeckung generell als stabiler zu betrachten.

Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen sind auch entsprechende Genauigkeiten für die zugrunde liegenden Pass(punkt)informationen zu fordern. Da das photogrammetrisch zu erfassende Gebiet deutlich über das bisherige Kernmessgebiet hinausreicht, müssen für die spätere Orientierung zusätzliche Passpunkte koordiniert und signalisiert werden. Diese sollten im Idealfall an den Rändern des aufzunehmenden Gebiets liegen. Die genaue geodätische Einmessung dieser Punkte ist aufwendig, daher wird man im Sinne der Effizienz versuchen, die Anzahl der notwendigen zusätzlichen

Passpunkte zu minimieren. Auch vor diesem Hintergrund ist ein Bildverband mit weniger Bildern vorteilhaft.

Entscheidend ist letztlich die absolute Genauigkeit der Georeferenzierung des Bildverbands. Prinzipiell ist die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung skalierbar und damit nur eine Funktion des Aufnahmeabstands. Punktmessgenauigkeit und Strahlenschnittgeometrie sind ebenfalls zu berücksichtigen. Wie oben diskutiert, spielen Genauigkeit und Verteilung der Passpunkte eine entscheidende Rolle. Sie liefern die Referenzmessungen für die Bildorientierung. Eine zusätzliche Kombination der Kamera mit einem integrierten GNSS/Inertial-System zur direkten Messung der Sensortrajektorie (Position und Neigung) ist empfehlenswert. Damit kann der Bildverband weiter stabilisiert werden. Prinzipiell ist für gut überlappende Bildverbände mit flächendeckender Verknüpfungspunktmessung und guter Strahlenschnittgeometrie auch eine präzise GNSS-Trajektorie (geodätischer Empfänger, RTK-basierte oder post-prozessierte Phasenlösung) ausreichend. Die zusätzliche Winkelmessung durch integrierte GNSS/Inertial-Systeme unterstützt die Bildorientierung vor allem in den Bereichen, in denen keine Verknüpfung der Bilder möglich ist. Das ist in dem hier vorgestellten Projekt vor allem für die Schleuse und an den Flussufern der Fall, die aber für das Monitoring von besonderer Relevanz sind.

2.2.2 Anforderungen an den Laserscanner

Im Gegensatz zu der im Prinzip beliebig anpassbaren Genauigkeit der bildbasierten 3D-Punktbestimmung sind beim Laserscanner hardware-technische Vorgaben deutlich entscheidender. Im einleitenden Abschnitt wurde diesbezüglich bereits auf das Messrauschen und die sogenannte Strahldivergenz hingewiesen. Für UAV-Anwendungen in Betracht kommende Laserscanner haben fast durchweg eine Strahldivergenz von 0,5 mrad. Um ein 5 mm großes Bodenelement (sog. Footprint) im Nadir zu realisieren, müsste der Scanner 10 m über Grund fliegen. Für realistischere Flughöhen von 40–60 m über Grund sind daher ausgeleuchtete Flächen einer Größe von 20–30 mm zu erwarten. Diese Fläche definiert das kleinste abtastbare bzw. zu messende Objekt.

In diesem Kontext sind auch die Form des Footprints (kreisförmig versus elliptisch), die Strahlqualität (Konstanz des Footprints), der Punktabstand im Vergleich zum Footprintdurchmesser (under sampling, over sampling) und die daraus resultierende Homogenität der Punktverteilung anzumerken.

Die (innere) Genauigkeit der Messung wird wesentlich durch das Messrauschen festgelegt. Hier zeigen sich gewisse Unterschiede bei der aktuell verfügbaren Sensorik. Die herstellerteilig angegebenen Werte liegen je nach System bei 5–40 mm, wobei nur ein System, nämlich der Scanner VUX-1UAV von Riegl, mit nur 5 mm Messrauschen klassifiziert wird, d. h. die Messung einer definierten Entfernung hat eine Standardabweichung von 5 mm.

Zusätzlich zu berücksichtigen ist die absolute Genauigkeit der Entfernungsmesseinheit, die für diesen Scanner mit 10 mm angegeben wird. Entscheidend ist letztlich, wie genau also der Messstrahl und damit die Messung in das gewünschte übergeordnete Objektkoordinatensystem transformiert werden kann. Hier spielt aber nicht nur die hardwareseitige Ausstattung eine Rolle, wichtig

ist auch die spätere Bestimmung der Lasertrajektorie durch GNSS/Inertial-Daten und der nachfolgende Streifenausgleich.

Genau wie für die Bilddaten spielt auch für die Laserstreifen die Georeferenzierung die entscheidende Rolle für die finale Objektpunktgenauigkeit. Üblicherweise werden, vergleichbar der Bündeltriangulation für Bilder, die Laserstreifen über Verknüpfungen im Objektraum miteinander in Beziehung gesetzt. Dieses basiert im Wesentlichen auf den direkt gemessenen Orientierungselementen. Der Qualität dieser Trajektorieninformation kommt hierbei eine entscheidende Rolle zu. Im Unterschied zu einer flächenhaft aufzeichnenden Kamera handelt es sich bei einem Laserscanner um ein polares Messsystem. Jede individuelle Messung (Distanz, Auslenkwinkel) muss durch polares Anhängen mit der durch das GNSS/Inertial-System bestimmten Positions- und Winkelinformation im Raum orientiert werden. Damit hängt die Genauigkeit der erfassten Laserpunkte direkt von der Genauigkeit der Trajektorie ab. Zusätzlich werden am Boden aber auch sog. ALS-Passflächen eingesetzt. Dabei handelt es sich um künstliche Dachflächen, deren Position und Ausrichtung im Raum exakt bestimmt ist und die in der Ausgleichung für die absolute Orientierung des Laserblocks sorgen.

Die direkt gemessenen GNSS/Inertial-Trajektorienparameter müssen um die sog. Boresight-Parameter, d. h. die Einbauoffsets/-winkel zwischen GNSS/Inertial-Sensorik und Laserscanner, korrigiert werden. Diese werden im Rahmen des Streifenausgleichs geschätzt. Im Gegensatz zu diesen innerhalb der Flugkampagne als stabil anzunehmenden Einbauparametern können Abweichungen der sich dynamisch ändernden Trajektorie durch Bias- oder höherwertigere Spline-Korrekturen berücksichtigt werden, die direkt auf die GNSS/Inertial-Positionen und -Winkel wirken. Dies beruht auf der Annahme, dass sich die Trajektorienfehler durch entsprechende mathematische Modelle korrigieren lassen /Glira et al. 2019/. Dadurch wird die GNSS/Inertial-Trajektorie aufgeweicht und die Laserstreifen können sich besser aneinander anpassen. Hier muss allerdings sehr vorsichtig vorgegangen werden, da dies unter Umständen durch mögliches Überspringen der Korrektursplines zu Verschlechterungen der absoluten Genauigkeit führen kann.

Neue Verfahren beziehen weitere Beobachtungen aus parallel und im Idealfall von der gleichen Plattform aus aufgenommenen Bildern ein. Diese zusätzlichen Korrespondenzen zwischen Bild und Laser wirken sich aufgrund der definierten Geometrie des 2D-Bilds deutlich stabilisierend auf die Georeferenzierung der Laserstreifen aus /Glira et al. 2019/. Dieses Verfahren integriert zusätzliche photogrammetrische Verknüpfungspunkte der Bilder aus einer klassischen Bündelblockausgleichung. Der Laserstreifenausgleich minimiert damit nicht nur die Klaffungen zwischen den Laserstreifen, sondern auch zwischen Laserstreifen und photogrammetrischen Verknüpfungspunkten. Insbesondere wenn sich Laserscanner und Kamerasystem auf derselben Plattform befinden, kann so die gemessene Trajektorie signifikant verbessert werden. Die stabile Geometrie des Luftbilds unterstützt damit die Orientierung der Laserscans und erlaubt eine erhebliche Genauigkeitssteigerung für die 3D-Laserpunkte. Durch die Integration von Bild- und Lasermessungen in einer hybriden Ausgleichung werden zudem die üblicherweise für die Georeferenzierung des Laserblocks notwendigen ALS-Passflächen obsolet. Es reichen somit die normalen auch für die klassische Bildorientierung notwendigen signalisierten Passpunkte.

3 EMPIRISCHE GENAUIGKEITSUNTERSUCHUNGEN

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden zwischenzeitlich mehrere Testkampagnen durchgeführt. Exemplarisch werden hier die Resultate zweier Befliegungen präsentiert, die das Potenzial des UAV-basierten Monitorings aufzeigen. Die Genauigkeiten werden abgeleitet aus den absoluten Differenzen an den Kontrollpunkten, die vor allem im Bereich der Schleusenanlage in ausreichender Anzahl zur Verfügung stehen. *Abb. 2* zeigt exemplarisch die mit dem Phase-One-iXM-Kamerasystem (links) und dem Riegl-VUX-1LR-Laserscanner (rechts) erfassten Datensätze. Aufgrund schlechter Wetterbedingungen konnte der Bildverband im November 2018 nicht vollständig erfasst werden. Die in *Abb. 2* (links) umrandeten gelben Bereiche zeigen die Fehlstellen. Der grün umgrenzte Bereich ist das eigentliche Schleusengebiet, das aufgrund der sehr dichten Pass- bzw. Kontrollpunkt-signalisierung als Kalibrierblock in einer Kreuzbefliegung in zwei verschiedenen Flughöhen befliegen wurde. Die Laserdaten wurden im März 2019 erfasst. Der eigentlich geplante VUX1-UAV-Laserscanner stand nicht zur Verfügung. Vorabanalysen haben aber gezeigt, dass die Messgenauigkeit des VUX1-LR-Scanners praktisch identisch mit dem vom Hersteller etwas genauer klassifizierten VUX1-UAV-System ist. Aufgrund einer Fehlfunktion konnten ca. 1,5 Flugstreifen im Bereich des Westufers nicht erfasst werden.

Für die Bilddatenerfassung verwendet wurde ein Multirotor-Copter der Firma Coptersystems, der mit einer Kamera Phase One iXM 100 mit 35-mm-Objektiv und dem integrierten GNSS/Inertial-System Applanix APX-15EI UAV ausgestattet war. Das Projektgebiet wurde mit in Nord-Süd-Richtung orientierten Flugstreifen und 80/60 % Überdeckungsverhältnissen aus einer Flughöhe von 40 m ü. G. erfasst. Die resultierende Bodenpixelgröße beträgt etwa 4 mm. Im Rahmen der integrierten Sensororientierung wurden signalisierte Passpunkte und die GNSS/Inertial-Orientierungselemente (hier nur Positionen) als gewichtete Beobachtungen eingeführt. Die signalisierten Passpunkte wurden mit 3 mm (Std.Abw.), die Projektionszentrumskoordinaten mit 5 cm Genauigkeit (Std.Abw.) eingeführt. Gleichzeitig wurden für jeden Bildflug die Kameraparameter mitgeschätzt. Die sog. Boresight-Kalibrierparameter wurden ausschließlich aus der Kreuzbefliegung aus zwei verschiedenen Flughöhen im Kalibrierblock bestimmt. Die unterschiedlichen Flughöhen erlauben die Trennung konstanter Kalibriergrößen von flughöhen- bzw. maßstabsabhängigen Systemparametern.

Die Laserdaten wurden im Rahmen der Projektbefliegung im März 2019 aufgezeichnet. Die Datenerfassung erfolgte mit dem Riegl-RiCopter-System der Universität Innsbruck aus einer Flughöhe von 50 m ü. G. Dieses UAV ist mit dem Riegl-VUX1-LR-Scanner und dem Applanix-AP-20-GNSS/Inertial-System ausgestattet. Der resultierende Abtastfleck hat einen Durchmesser von <3 cm. Der Scanner weist ein Quasi-360°-Scanfeld auf, wobei der Nutzbereich pro Streifen hier auf einen Scanwinkelbereich von nur $\pm 35^\circ$ beschränkt wurde, um die o. a. Größe des Abtastflecks zu gewährleisten. Die Querüberdeckung der Streifen ist etwa 50 %. Für die Ausgleichung wird ein Schwad von ca. ± 80 m pro Streifen verwendet, um eine größere Stabilisierung zu erreichen. Bei einer maximalen Pulsrepetitionsrate von 820 kHz werden die Laserpunkte mit einem Punkt-Abstand von ca. 5 cm abgetastet. Zusätzlich verfügt der RiCopter

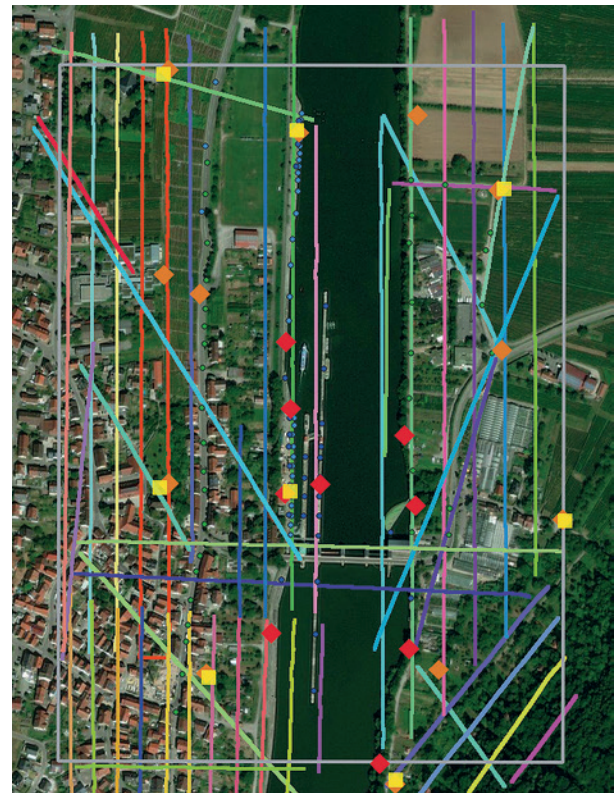
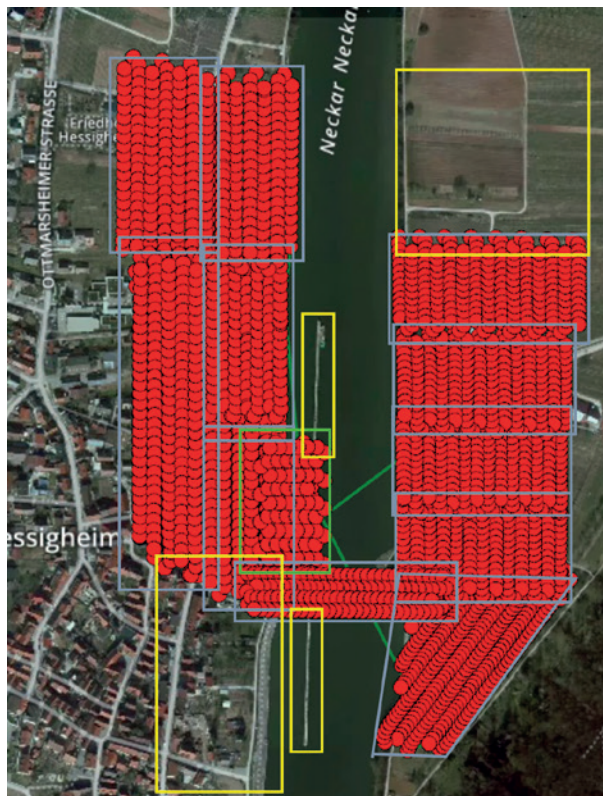


Abb. 2 | Datenerfassung Projektgebiet Hessigheim. Die linke Seite zeigt die Flüge zur Erfassung der Bilddaten mit der Kamera Phase One iXM 100 (November 2018), rechts sind die Flugstreifen der Laserbefliegung mit dem Laserscanner Riegl VUX1-LR dargestellt (März 2019). Ebenfalls zu erkennen sind rechts die Georeferenzierung zur Verfügung stehenden photogrammetrischen Passpunkte (rote bzw. braune Rauten) und ALS-Passflächen (gelbe Quadrate).

standardmäßig über zwei integrierte schräg-seitwärts blickende Kameras Sony Alpha 6000, die eigentlich zur Einfärbung der Laserpunktwolke mit gleichzeitig erfassten Bildaufnahmen gedacht sind, aber auch für einen hybriden Bild-Laserdatenausgleich genutzt werden können. Die beiden Kameras haben einen Öffnungswinkel quer zur Flugrichtung von etwa 74° und sind mit einem Winkel von $\pm 35^\circ$ seitwärts ausgerichtet. Aufgrund der Schrägsicht variiert die GSD in Bereich von 1,5–3 cm bei einer gewählten Flughöhe von 50 m ü. G.

Für die Orientierung der Laserstreifen stehen verschiedene Varianten zur Verfügung. Die klassische Laserstreifenausgleichung erfolgt auf Basis der redundanten Beobachtungen von (glatten) Flächenstücken im Überlappungsbereich der einzelnen Scanstreifen /Glira et al. 2019/. Für die finale Ausgleichung wird das Spline-Korrekturmodell verwendet, bei dem ein einzelner Streifen basierend auf definierten Zeitintervallen in mehrere Teile aufgeteilt wird, wodurch kontinuierliche Positions- und Orientierungs-Offsets für die direkt gemessenen GNSS/Inertial-Trajektorieninformationen bestimmt werden können. Zusätzlich werden die ALS-Passflächen verwendet.

Alternativ ist eine hybride Ausgleichung möglich, in der Verknüpfungspunktmessungen aus den Sony-Alpha-Bildern mit in den Laserstreifenausgleich integriert werden. Da die Sony-Alpha-Kameras gemeinsam mit dem Laserscanner fest auf der RiCopter-Plattform verbaut sind, bewegen sich beide Sensoren auf der identischen Trajektorie. Damit kann die photogrammetrische Auswertung der Bilder direkt zur Korrektur dieser Trajektorie genutzt werden.

Tab. 1 zeigt die erzielten Genauigkeiten aus den verschiedenen Auswertungen. Die Ergebnisse beziehen sich nur auf das Westufer. Drei verschiedene Auswertemethoden werden gegenübergestellt: Zwei rein bildbasierte Auswertungen können mit einer reinen Laserauswertung und mit dem hybriden Ansatz verglichen werden. Der RMS-Wert definiert dabei die absolute Genauigkeit der Objektpunktbestimmung. Die Genauigkeit der Phase-One-iXM-100-Auswertung beruht auf 25 Kontrollpunktdifferenzen, für die Sony Alpha 6000 standen 28 Kontrollpunkte zur Verfügung. Die Genauigkeiten der Laserauswertungen (stand alone bzw. hybrid) wurden an 31 Kontrollpunkten ermittelt.

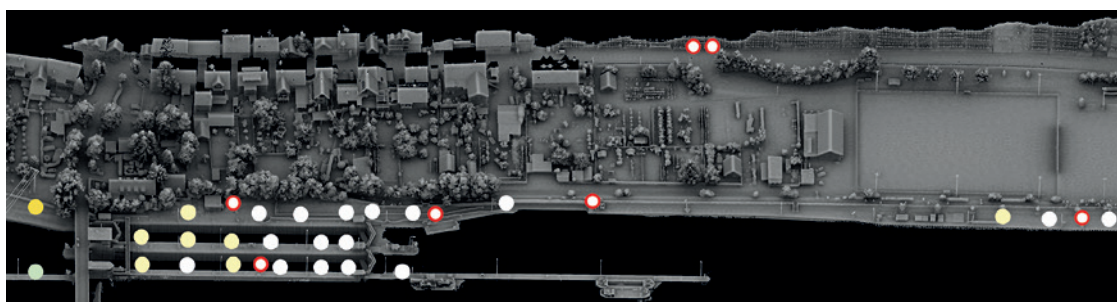
Setzt man die erzielte Genauigkeit aus der Bildorientierung in Bezug zu der mittleren Bodenpixelgröße, werden für die iXM-Bilder in der Lage Genauigkeiten von besser 1 pix erreicht. In der Vertikalkomponente liegt die Genauigkeit im Bereich von 1 pix bzw. etwas darüber. Das bezieht sich auf die angenommene GSD 4 mm für die iXM bei der Flughöhe von 40 m ü. G. Wenn nur der Kalibrierblock betrachtet wird, dann sind die Genauigkeiten in allen drei Komponenten im Bereich $\frac{1}{2}$ pix, da sich hier die sehr stabile Blockgeometrie durch die Kreuzbefliegung in zwei unterschiedlichen Flughöhen zusätzlich positiv auswirkt /Cramer & Havel 2020/. Die Genauigkeiten aus den Sony-Alpha-6000-Bildern sind schlechter, was primär durch das deutlich größere und aufgrund der Schrägbildgeometrie variierende Bodenpixel verursacht wird. Bezieht man aber die Genauigkeiten (RMS) auf das mittlere Bodenpixel von ca. 2 cm, so können auch für die Alpha 6000 vergleichbare Genauigkeiten von besser 1 pix für Lage bzw. etwa 1 pix für die Höhe erreicht

werden. Diese photogrammetrischen Genauigkeiten entsprechen in beiden Fällen der Erwartung für normale Blockkonfigurationen. Zusätzliche Querstreifen erhöhen die Blockstabilität und damit auch die Genauigkeit der 3D-Objektpunkte, gehen aber mit zusätzlichem Flugaufwand einher.

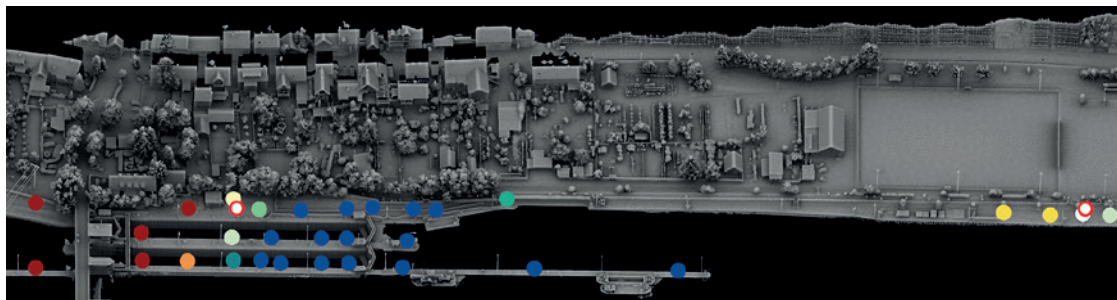
Die Laserdaten wurden sowohl mit dem klassischen Streifen-ausgleich als auch mit dem hybriden Ansatz ausgewertet. Der Mehrwert des hybriden Ausgleichs wird im Vergleich der erzielten Vertikalgenauigkeiten (RMS) deutlich. Durch die Verwendung der Passpunkte wird die Vertikalgenauigkeit des Laserscanners sehr

		UAV-Kamera iXM 100	UAV-Kamera Alpha 6000	UAV-Laser VUX1-LR	UAV-Laser VUX1-LR mit Alpha-6000-Bildern
RMS	Ost	2,4 mm	7,8 mm	—	—
	Nord	3,6 mm	14,0 mm	—	—
	Vertikal	5,0 mm	24,9 mm	52,6 mm	6,9 mm
Mittelwert	Ost	−0,3 mm	−0,3 mm	—	—
	Nord	−0,4 mm	2,4 mm	—	—
	Vertikal	−2,1 mm	19,7 mm	10,8 mm	−4,1 mm
Std.Abw.	Ost	2,4 mm	7,8 mm	—	—
	Nord	3,6 mm	13,8 mm	—	—
	Vertikal	4,5 mm	15,1 mm	52,2 mm	5,7 mm

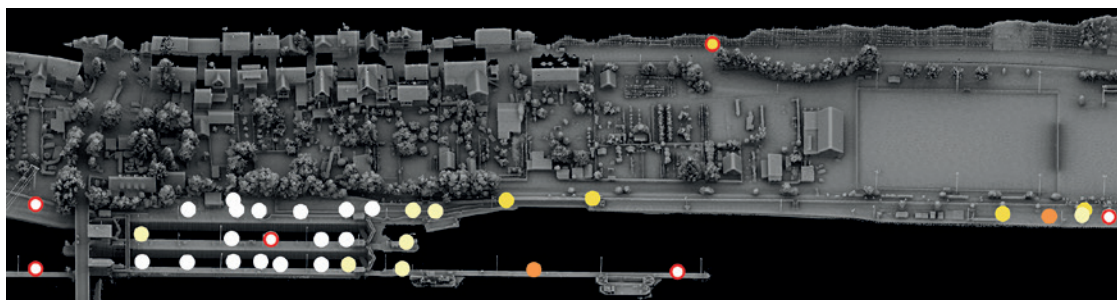
Tab. 1 | Absolute Genauigkeit der Objektpunktbestimmung. Die Statistik wurde aus 25 (iXM 100), 28 (Alpha 6000) bzw. 31 (Laser/hybrid) signalisierten Kontrollpunkten berechnet.



(a) UAV-Kamera iXM 100



(b) UAV-Laser VUX1-LR



(c) UAV-Laser VUX1-LR mit Alpha-6000-Bildern

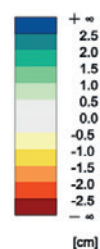


Abb. 3 | Vertikalgenauigkeit der Objektpunkte unterlegt mit der ausgeglichenen Laserpunktswolke. Die jeweiligen Vertikaldifferenzen zu den eingemessenen Kontrollpunkten sind farbcodiert dargestellt. Die verwendeten Passinformationen (Passpunkte (Fall (a)/(c) bzw. ALS-Passflächen (Fall (b))) sind jeweils durch rote Umkreise hervorgehoben. Die dargestellten drei Versionen entsprechen den Varianten, die in der Tab. 1 gezeigt und diskutiert werden.

gut bestimmbar. Im Vergleich zur reinen Streifenausgleichung ohne Stützung durch Bilddaten kann die Genauigkeit von ursprünglich 5 cm RMS auf den Subzentimeterbereich signifikant gesteigert werden. Die hier nachgewiesene Genauigkeit von 6,9 mm liegt im Bereich des Messrauschens der Lasermessung. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die resultierende Vertikalgenauigkeit nach der hybriden Ausgleichung sogar besser als die Genauigkeit aus der zugrunde liegenden Alpha-6000-Bildorientierung ist. Die Referenzhöhen der Passpunkte sind ausschlaggebend dafür, die zusätzlichen Verknüpfungen aus den photogrammetrischen Messungen wirken sich hier zunächst in der Lagegenauigkeit aus. Die ermittelten Genauigkeiten kommen aus dem Vergleich an horizontalen Passpunkten, wobei diese Punkte durch die Signalisierung mit ca. 30 cm großen Scheiben als kleine Flächen angesehen werden können und die Differenz letztlich als Mittelwert aller auf dieser Fläche liegenden Laserpunkte zur Referenzhöhe berechnet wird. Verbleibende kleine Lagefehler wirken sich bei solchen horizontalen Flächen nicht aus. Bei geneigten Flächen werden diese aber sichtbar. Letzteres ist der Grund dafür, dass zukünftig der hybride Ausgleich mit den Bildern der iXM-Kamera angestrebt wird, die dazu gleichzeitig mit dem Laser auf der gleichen UAV-Plattform geflogen wird. Durch die kleineren Bodenpixel und größeren Bildformate der iXM-Kamera können höhere absolute Genauigkeiten erzielt werden, die sich dann durch die höhere Lagegenauigkeit positiv auch auf das Ergebnis des hybriden Ausgleichs auswirken. Dieses wird dann vor allem an geneigten Flächen sichtbar werden.

Abb. 3 illustriert drei der vier in Tab. 1 diskutierten Auswertungen. Dargestellt sind die farbcodierten absoluten Differenzen an den jeweiligen Kontrollpunkten für die Varianten Orientierung Bilddaten iXM 100 (a), reine Laserstreifenausgleichung (b) und hybrider Ausgleich Laser mit Alpha-6000-Bildern (c). Die für die Auswertung verwendeten Passinformationen sind durch die roten Umringe hervorgehoben. Bei der reinen Laserstreifenausgleichung in (b) handelt es sich dabei um zwei ALS-Passflächen, ansonsten um die mit 30 cm großen Scheiben signalisierten Passpunkte. Auch die Kontrollpunkte sind mit derartigen Scheiben signalisiert. Der Vergleich von (a) mit (c) zeigt, dass der hybride Ausgleich bei vergleichbarer Anordnung der Passpunkte in Bezug auf die Vertikalgenauigkeit ähnliche Ergebnisse wie die Auswertung der Bilder einer qualitativ hochwertigen Luftbildkamera liefern kann. Der reine Laserausgleich in (b) ist deutlich schlechter. Die relativ großen Differenzen scheinen systematisch und sind durch Restfehler in der Trajektorie verursacht. Der Block biegt sich aufgrund des Spline-Korrekturmodells zwischen den Passflächen stark durch. Diese Effekte können erst durch die integrierte Ausgleichung mit Bilddaten effektiv kompensiert werden.

4 DISKUSSION

Die obigen Auswertungen zeigen das hohe Potenzial der UAV-gestützten Objektpunktbestimmung und damit auch dessen prinzipielle Eignung für Monitoringanwendungen. Die in Tab. 1 nachgewiesenen absoluten Genauigkeiten wurden an definierten, mit Signalfeldern versehenen Kontrollpunkten erzielt, können aber auch auf andere natürliche, aber klar definierte Punkte übertragen werden. Für die Laserpunktbestimmung sind dazu definierte horizontale

Flächen zu bevorzugen. Die Interpolation einer ausgleichenden Ebene durch mehrere Einzelpunktmessungen erlaubt hier die Reduktion des Messrauschens der Einzelmessung und steigert damit die Genauigkeit der Höhenmessung.

Entscheidend für die erreichte Genauigkeit ist, wie bereits diskutiert, die Genauigkeit der Georeferenzierung. Diese beruht auf einer ausreichenden Anzahl von Passpunkten und ggf. weiteren speziellen Referenzflächen für die Laserscannerdaten. Diese Passpunkte umschließen das zu untersuchende Gebiet und definieren den Passpunkttrahmen. Wenn Genauigkeiten im Bereich von wenigen Millimetern zu erzielen sind, müssen auch die Passinformationen mit dieser hohen Genauigkeit zur Verfügung stehen. Im Vergleich zu dem aktuellen Festpunktfeld, das nur das eigentliche Schleusenbauwerk umfasst, sind die Referenzpasspunkte deutlich großflächiger anzuordnen. Die bislang durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die präzise Einmessung eines solchen erweiterten Passpunktfelds mit einem deutlichen Messaufwand verbunden ist, vor allem dann, wenn diese für die UAV-Befliegungen notwendigen Punkte nur als temporäre Passpunkte, also nur für den Zeitpunkt der Messung realisiert werden. Empfehlenswert sind daher auch in den Randbereichen des erweiterten Monitoringgebiets permanent vermarkte Punkte, die mit entsprechenden Signalisierungen für jede Messkampagne luft sichtbar gemacht werden können. Die hohen geodätischen Anforderungen, z.B. für die hochpräzise Bestimmung von photogrammetrischen Passpunkten, wird in /Bäumker 2020/ diskutiert.

Sowohl Laserscanner als auch Kamera sind mit GNSS/Inertial-Sensorik ausgestattet. Damit schließt die Kalibrierung neben dem zu orientierenden Sensor immer auch diese Navigationssensorik ein. Die Qualität der Gesamtsystemkalibrierung ist entscheidend. Eine sehr stabile Blockgeometrie, wie im Beispiel der obigen Phase-One-Kalibrierfeldbefliegung, ist der Idealfall für eine derartige Kalibrierung. Diese Geometrie kann aber nicht unbedingt für die gesamte Fläche garantiert werden. Daher ist es unter Umständen notwendig, eine In-situ-Kalibrierung aus einem Testfeld als fest für die weiteren Flüge anzunehmen. Hier sind geometrisch stabile Systeme vorteilhaft. Für die Stabilisierung der Laserstreifen wurden daher zusätzliche Stützstreifen geflogen, die den Block weiter versteifen.

Ohne Zweifel befinden sich die hier angestrebten Genauigkeiten an der Grenze des Machbaren. Das gilt aber nicht nur für die UAV-Datenerfassung, sondern auch für die Bereitstellung der präzisen Referenzpunkte und die technische Auslegung der Systeme. So wurde zum Beispiel bei der Auswertung des Laserflugs ein nicht erwarteter zeitlicher Offset zwischen den Messungen des Laserscanners und der GNSS/Inertial-Trajektorieninformation in der Größenordnung von 1,2 ms nachgewiesen. Nach Korrektur dieses Fehlers konnte die relative Orientierung der Streifen signifikant von einer mittleren Abweichung von 1,2 cm auf 1 mm reduziert werden.

Vielversprechend sind in diesem Zusammenhang die Verfahren der hybriden Ausgleichung, also die gleichzeitige Berücksichtigung von parallel erfassten Bild- und Laserdaten. Dieses wurde ebenfalls in Tab. 1 nachgewiesen, allerdings bislang nur in Kombination mit den standardmäßig auf dem RiCopter installierten schrägblickenden Sony-Alpha-6000-Kameras. Da diese primär eigentlich der Texturierung der Laserpunktwolke dienen, haben die Bilder deutlich größere



Abb. 4 | Vergleich der photogrammetrischen (RGB-koloriert) und Laserpunktwolke (höhenkodiert eingefärbt) für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebiets. Gelb hervorgehoben ist der Bereich für den Profilschnitt in der Abb. 5.

Bodenpixel, die durch die starke Perspektive zusätzlich noch je nach Lage im Bild in der Größe variieren. Vor diesem Hintergrund wird für zukünftige Kampagnen eine gemeinsame Verwendung von hochauflösender Nadir-blickender Kamera- und Lasersensorik auf einer Plattform angestrebt, was sich vor allem auf die weitere Steigerung der horizontalen Genauigkeit der Laserpunktbestimmung auswirken wird. Die aktuellen auch kommerziellen Systementwicklungen gehen deutlich in diese Richtung. Erste UAV-Plattformen sind bereits auf dem Markt verfügbar, die Phase-One-iXM-Kameras, Riegl-VUX-Laserscanner und präzise GNSS/Inertial-Sensorik in einer Plattform integrieren und damit genau das gewünschte Instrumentarium zur Verfügung stellen. Damit sollte der angestrebte Genauigkeitsbereich von wenigen Millimetern für horizontale und geneigte Flächen bei einem vertretbaren Aufwand für die Bereitstellung photogrammetrischer Passpunkte flächendeckend realisierbar sein. Die beim Laserscanning von bewegten Plattformen aus übliche Genauigkeitsbeschränkung durch die notwendige Bestimmung der Trajektorie mittels integrierter GNSS/Inertial-Systeme kann somit

durch die Integration einer photogrammetrischen Bildauswertung überwunden werden.

Dieser Beitrag hat schwerpunktmäßig bislang die Genauigkeit der Einzelpunktbestimmung thematisiert. Das ist auch die klassische Aufgabe des (Bauwerks-)Monitorings. Nicht angesprochen wurde der Mehrwert, der durch die flächenhafte 3D-Erfassung des gesamten Gebiets erzielt wird. Als Motivation sollen hier die nachfolgenden Grafiken dienen. Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt aus der gemeinsam dargestellten Laser- und photogrammetrischen Punktwolke und Abb. 5 den entsprechend markierten Profilschnitt.

Deutlich zu erkennen ist die hohe Detailinformation, die in diesen Punktwolken enthalten ist. Darüber hinaus kann in dem Profilschnitt auch die Überlegenheit des Laserscannings bei semi-transparenten Objekten wie Vegetation erkannt werden. Abb. 5 zeigt die Punkte aus der Lasermessung in Blau, die Punkte aus der photogrammetrischen Mehrbildstereozuordnung in Rot. Die Mehrzielfähigkeit erlaubt es dem Laserpuls, mehrere Ziele aufzulösen. Mehrzielsituationen entstehen, wenn der Laserstrahl in unterschiedlicher

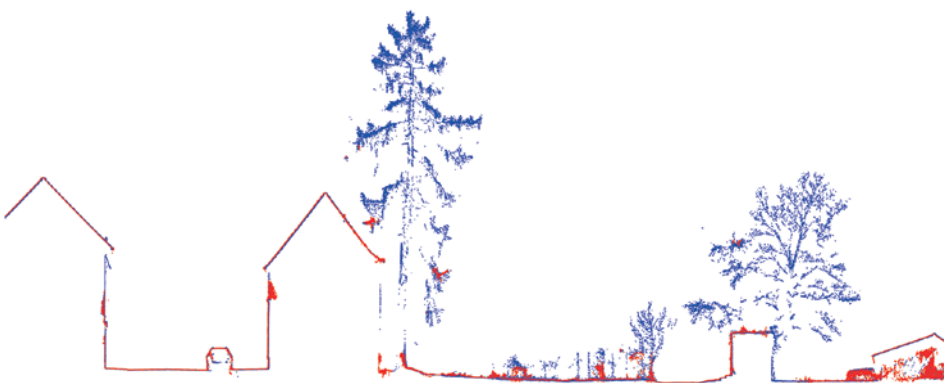


Abb. 5 | Vergleich eines Profilschnitts durch die photogrammetrische (rot) und Laser-Punktwolke (blau)

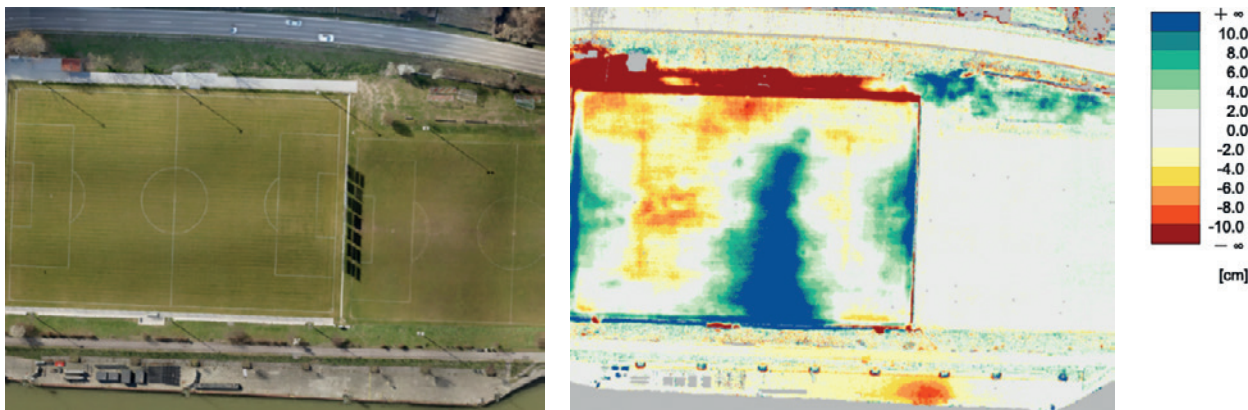


Abb. 6 | Deformationen im Bereich der Anlegestelle und des Sportplatzes. Die Differenzen stammen aus dem Vergleich der UAV-Laserdaten nach der hybriden Ausgleichung (März 2019) und den offiziellen Höhendaten des LGL BW (2016).

Entfernung auf Ziele trifft, deren räumliche Ausdehnung kleiner als der jeweils beleuchtete Fußpunkt ist. Dieses betrifft z.B. Äste und kleine Zweige. Somit können Lasermessungen Vegetation durchdringen und beispielsweise auch Objekte wie Fassadenelemente unter Baumkronen erfassen. Möglich ist aber auch die Erfassung sehr kleiner Objekte wie Stromleitungen. Erkennbar ist aber auch, dass die pixelweise Erfassung mittels DIM sehr hohe Punktdichten ermöglicht.

Abschließend sollen mit Abb. 6 die Deformationen im Bereich des Sportplatzes und der Schiffsanlegestelle am Neckar als Beispiel für das flächenhafte Monitoring dargestellt werden. Für die Differenzen in Abb. 6 werden die Ergebnisse der hybriden Laser-Bild-Ausgleichung verglichen mit den offiziellen Höhendaten des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL BW). Diese wurden im Rahmen der landesweiten Neubefliegung mit flugzeuggestütztem Laserscanning im Jahr 2016 mit einer mittleren Punktdichte von mindestens 12 Punkten/m² erfasst. Das Messrauschen wurde an definierten festen Flächen empirisch mit etwa 2 cm abgeschätzt. Die in Abb. 6 gezeigten Differenzen umfassen einen Zeitraum von ca. drei Jahren, in dem deutlichen Veränderungen nachgewiesen werden. Negative Differenzen (rot) bedeuten Geländeabtrag bzw. Setzungen, positive Differenzen (blau) dementsprechend Geländeaufschüttung. Deutlich zu erkennen sind die großen Abweichungen am Rand des Sportplatzes (oberer Bildrand). Hier handelt es sich um die Abtragung einer Böschung im Zuge der Neuanlage der Zuwegung zum Fußballplatz. Erkennbar sind auch die Aufschüttungen zur Planierung der ausgeprägten Bodenwelle mitten auf dem Fußballfeld. Der gesamte Sportplatz wurde im Jahr 2018 neu angelegt. Am Neckarufer im Bereich der ehemaligen Anlegestelle (unterer Bildrand) ist ebenfalls eine deutliche Senkung zu erkennen. Durch das flächenhafte Monitoring sind all diese Deformationen deutlich nachweisbar. Im Fall eines klassischen ingenieurgeodätischen Monitorings könnten diese Veränderungen nur dann aufgedeckt werden, wenn an den entsprechenden Stellen auch Punkte des Kontrollnetzes vorhanden sind. Aufgrund des hohen Potenzials des UAV-gestützten Monitorings können bei der Durchführung entsprechender Befliegungskampagnen auch deutlich geringere Deformationen nachgewiesen werden.

5 FAZIT

In diesem Beitrag wurde die Eignung von UAV-basiertem (Bauwerks-)Monitoring diskutiert. Es handelt sich vermutlich um die erste UAV-Datenerfassung, die eine derartige hochgenaue 3D-Objekt-rekonstruktion für ein vergleichbar großes Untersuchungsgebiet anstrebt. Die vorgestellten Ergebnisse sind sehr zufriedenstellend. Für definierte Flächen können unter Berücksichtigung aller Vorgaben absolute Genauigkeiten (RMS) im Bereich von 5 mm gesichert nachgewiesen werden. Bei angenommenen Veränderungen im Objektraum in der Größenordnung von 1 cm/Jahr sollten Deformationen nach etwa sechs Monaten nachweisbar sein.

Die Untersuchungen zeigen den großen Mehrwert einer hybriden Ausgleichung von Laser- und Bilddaten. Ein derartiger kombinierter Ansatz sollte zukünftiger Standard für derartige Anwendungen sein. Die entsprechenden UAV-Plattformen, mit denen hochauflösende Bilddaten gemeinsam mit Laserdaten erfasst werden können, sind verfügbar. Die parallele Erfassung und zukünftig gemeinsame Auswertung von UAV-Bild- und Laserdaten nutzt das teilweise komplementäre Verhalten: Der stabilen Geometrie und sehr hohen Auflösung der Bilder stehen die Vorteile des Laserscannings bei der geometrischen Erfassung beziehungsweise Durchdringung semitransparenter Objekte, insbesondere von Vegetation, gegenüber.

Nicht zu unterschätzen bei der Durchführung eines UAV-Monitorings ist der Aufwand für die Signalisierung des erweiterten Passpunktfelds. Die über das klassische Bauwerksreferenznetz hinausgehenden Objektpunkte sollten festvermarktet und im Rahmen der Referenznetzmessung bestimmt werden, was nicht nur deren 3D-Objektpunktgenauigkeit, sondern auch die praktische Durchführung der UAV-Kampagne deutlich vereinfacht. Weitere Ansätze werden in einem Folgeprojekt anwendungsorientiert erprobt und soweit möglich optimiert.

Die im Rahmen des terrestrischen Monitorings erzielten Genauigkeiten in der Größenordnung von 1 mm für definierten Einzelpunkte sind aber nicht zu erreichen. Dafür liefert der UAV-basierte Ansatz die volle flächendeckende 3D-Information auch für Bereiche, die für klassische terrestrische Messverfahren kaum oder nur mit großem Aufwand zugänglich sind. Vor diesem Hintergrund ist das UAV-basierte Monitoring auf jeden Fall als Erweiterung der klassischen

Verfahren zu sehen, vor allem dann, wenn die in diesem Beitrag diskutierten Randbedingungen berücksichtigt werden.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken allen Beteiligten, die zum Gelingen des Projekts beigetragen haben. Ausdrücklicher Dank gilt dabei vor allem den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der BfG in Koblenz, des Amts für Neckarausbau Heidelberg und des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Besonderer Dank gilt auch Philipp Glira für seine Unterstützung bei der Anwendung des hybriden Ausgleichs, welcher im Rahmen seiner Dissertation entwickelt wurde. Das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung in Baden-Württemberg hat die offiziellen Höhendaten der Landesvermessung zur Verfügung gestellt. Auch dafür herzlichen Dank.

LITERATUR

Bäumker, M. (2020): Aufbau eines hybriden hochpräzisen 3D-Grundlagenternetzes am Beispiel des UAV-Testfelds Zeche Zollern. In: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe 97. Wißner, Augsburg, 103–120.

BfG (2017): Projekt 301_BfG: Effizientes ingenieurgeodätisches Monitoring der Verkehrsbauwerke (Ingenieurgeodätisches Bauwerksmonitoring), interner Projektbericht, Bedarfserhebung experimentelle FuE-Aktivitäten. Bundesanstalt für Gewässerkunde, M5-Geodäsie und Objektvermessung, Koblenz.

Böhm, K. (2019): Beobachtung lokaler Bauwerksnetze bei instabilem Baugrund. Vortrag im Kolloquium „Ingenieurgeodäsie für eine zeitgemäße Infrastruktur der Bundeswasserstraßen“, 13.–14.11.2019, BfG, Koblenz. https://www.bafg.de/DE/05_Wissen/02_Veranst/2019/2019_11_13_Boehm.pdf?__blob=publicationFile (31.03.2020).

Cramer, M.; Havel, P. (2020): UAV und Monitoring: Widerspruch oder erweiterte Option? In: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe 97. Wißner, Augsburg, 163–176.

DIN 18710-1 (2010): Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth, Berlin.

Eichhorn, A.; Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Neuner, H. (2015): Methoden und Modelle bei ingenieurgeodätischen Überwachungsmessungen. In: Freeden, W.; Rummel, R. (Hrsg.): Handbuch der Geodäsie. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin/Heidelberg.

Glira, P.; Pfeifer, N.; Mandlbürger, G. (2019): Hybrid orientation of airborne LiDAR point cloud and aerial images. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W5, 567–574. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-567-2019>.

Kauther, R.; Schulze, R. (2015): Detection of subsidence affecting civil engineering structures by using satellite InSAR. In: Dight, P. (Hrsg.): Proceedings of the Ninth Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 207–218. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1508_11_Kauther.

Kuhlmann, H.; Schwieger, V.; Wieser, A.; Niemeier, W. (2013): Ingenieurgeodäsie – Definition, Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 138(2013)6, 391–399.

Mandlbürger, G.; Pfennigbauer, M.; Riegl, U.; Haring, A.; Wieser, M.; Glira, P.; Winiwarter, L. (2015): Complementing airborne laser bathymetry with UAV-based lidar for capturing alluvial landscapes. In: Proc. SPIE 9637, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVII, 96370A (14 Oct. 2015); doi: 10.1117/12.2194779.

Meißner, H.; Cramer, M.; Reulke, R. (2018): Towards standardized evaluation of image quality for airborne camera systems. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science XLII-1, 295–300. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-295-2018>.

Niemeier, W.; Riedel, B. (2016): Monitoring von Hangrutschungen. In: Freeden, W.; Rummel, R. (Hrsg.): Handbuch der Geodäsie. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin/Heidelberg.

Schneider, P.; Sörgel, U. (2020): Monitoring einer Schleuse mittels satellitengestütztem DInSAR. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 127(2020)3, 218–224.

Dr.-Ing. Michael Cramer

UNIVERSITÄT STUTTGART
INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE

Geschwister-Scholl-Str. 24D | 70174 Stuttgart
michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de



M.Sc. Michael Kölle

UNIVERSITÄT STUTTGART
INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE

Geschwister-Scholl-Str. 24D | 70174 Stuttgart
michael.koelle@ifp.uni-stuttgart.de



apl. Prof. Dr.-Ing. Norbert Haala

UNIVERSITÄT STUTTGART
INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE

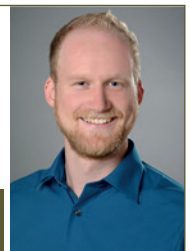
Geschwister-Scholl-Str. 24D | 70174 Stuttgart
norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de



M.Sc. Patrick Havel

BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE
REFERAT M5 – GEODÄSIE UND
FERNKUNDUNG

Am Mainzer Tor 1 | 56068 Koblenz
havel@bafg.de



Manuskript eingereicht: 31.03.2020 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet