

UAV und Monitoring: Widerspruch oder erweiterte Option?

Michael Cramer | Patrick Havel

1 Einführung

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 Anwendung und verfügbarer Messsensorik bestimmt die Ingenieurgeodäsie 3D-Objektpunkte mit einer sehr hohen Genauigkeit. Damit ist die Ingenieurgeodäsie das bevorzugte Verfahren für die „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 Beobachtungssysteme genutzt“ (Niemeier und 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-Verfahren. 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 auf Verschiebungen der repräsentativ angelegten Netzpunkte 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 angeben werden. ... Für die einzelnen Punkte des geodätischen Netzes entstehen dabei verdichtet über die Zeit Messreihen, die mit Hilfe 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 mm-Bereich 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 eine bevorzugte Sicht 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 Punktwolkenzuordnung/Dense Image Matching 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 (GSD) angenommen werden. Für die Genauigkeit des Laserscanning 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 bis 20 mm angenommen werden (Mandlbürger et al. 2015). 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 Eignung von UAV-basierten Kameras bzw. Laserscannern für präzises flächenorientiertes Monitoring ist Fokus eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts, welches seit einiger Zeit am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart in Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz durchgeführt wird. Als Projektumfeld wurde die Schleusenanlage Hessigheim/Neckar gewählt. Dieses Bauwerk wird aktuell saniert, da Teile der Schleusenanlage in schwierigem Baugrund gründen, was zu Instabilitäten und Bodenabsenkungen führt.

2.1 Bauwerksnetz

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

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

Im Zuge der Erweiterung soll das Gebiet auf den in der [Abb. 1](#) blau umgrenzten Bereich ausgedehnt werden. Damit wird das bisherige Kernmessgebiet deutlich auf die an den Neckar angrenzenden Bereiche inklusive bebauter Bereiche erweitert, wobei der mittels UAV-Bilder zu erfassende Bereich leicht kleiner definiert ist und durch die blau-gestrichelte Linie umgrenzt wird. Die

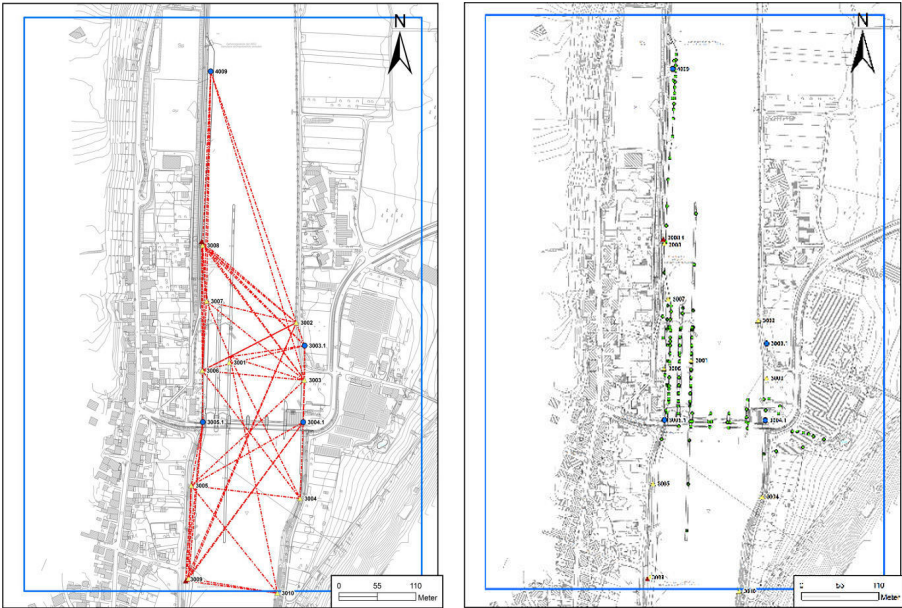


Abb. 1: Übersicht über das geodätische Bauwerksnetz: Netzpunkte mit der Beobachtungsgeometrie für die tachymetrische Messung (links) und die weiteren Objektpunkte (150 3D-Objektpunkte, 135 Höhenpunkte) (rechts)

UAV-Laserbefliegung erfolgt aber im gesamten erweiterten Gebiet. Es ist deutlich erkennbar, dass eine entsprechende punktweise Erweiterung des klassischen 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 und Riedel (2016) empfehlen ebenfalls die Verfahren der Fernerkundung zur Überwachung von großräumigen Bereichen mit Oberflächenveränderungen, aber mit Schwerpunkt auf der satelliten-gestützten Radarinterferometrie. Auch in dem hier vorgestellten Monitoringprojekt kommen Methoden der Radarinterferometrie zum Einsatz (Persistent Scatterer Interferometrie), auf die hier aber nicht eingegangen wird (Schneider und Sörigel 2020).

Für kleinere Untersuchungsgebiete ist nach Niemeier und 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 Approxi-

mation der spezifischen Veränderungszone mittels repräsentativer Punkte empfohlen wird. In Bezug auf flugzeuggestütztes Laserscanning erwartet Niemeier und 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 UAVs mit einer Gesamtflugmasse zwischen 10 bis 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, da diese die eigentliche Erkennbarkeit von Details in den Bildern festlegt. Qualitativ hochwertige Kamera-Linsen-Kombinationen zeigen i. d. R. ein deutlich besseres Auflösungsvermögen; nur die tatsächlich erkennbaren Strukturen im Bild können auch gemessen werden.

Radiometrisch gute Bilder erlauben eine bessere Qualität der Bildpunkt-messung. Dieses 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 hoch gesetzt 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 Bildpunkt-messung signalisierter Punkte ist für Nahbereichsanwendungen üblich, bedingt aber eine gewisse Mindestgröße der

Signale. Daher wird sie im 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 Schachbretttafeln mit einem Durchmesser von knapp 30 cm verwendet. Bei etwa 5 mm großen Bodenpixeln entspricht der Durchmesser des Signals mehr als 50 Pixeln, was für die automatische Messung ausreichend ist. Auf eine zusätzliche Kodierung der Messtafeln wurde aber verzichtet.

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 zugrundeliegenden Pass(punkt)informationen zu fordern. Da das photogrammetrisch zu erfassende Gebiet deutlich über das bisherige Kernmessgebiet hinausreicht, müssen für die spätere Bündeltriangulation zusätzliche Passpunkte koordiniert und signalisiert werden. Diese sollten im Idealfall an den Rändern des aufzunehmenden Gebiets liegen. Die genaue geodätische Einmessung dieser Punkte ist aufwändig, 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 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 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 bis 60 m über Grund sind daher ausgeleuchtete Flächen einer Größe von 20 bis 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 herstellerseitig angegebenen Werte liegen je nach System bei 5 bis 40 mm, wobei nur ein System, nämlich der VUX-1UAV Scanner von Riegler, 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 miteinander in Beziehung gesetzt. Zusätzlich werden Korrekturen an den Trajektorienparametern geschätzt, um die sog. Borensight-Parameter, d. h. die Einbauoffsets/-Winkel zwischen GNSS/inertial-Sensorik und Laserscanner zu bestimmen. Falls notwendig können weitere Bias- oder höherwertigere Spline-Korrekturen verwendet werden, die direkt auf die GNSS/inertial-Positionen und -Winkel wirken. 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 Überschwingen der Korrektursplines zu Verschlechterungen

der absoluten Genauigkeit führen kann. Eine gute Überdeckung der Laserstreifen ist dafür nötig. 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-Bildes deutlich stabilisierend auf die Georeferenzierung der Laserstreifen aus (Glira et al. 2019).

3 Empirische Genauigkeitsuntersuchungen



Abb. 2: Testfeld Schleusenanlage Hessigheim. Alle Punkte sind mit luft sichtbaren Schachbretttafeln signalisiert. Die drei gesondert in rot gekennzeichneten Punkte sind zudem Messpfeiler des Bauwerksnetzes.

Im Rahmen des Hessigheim-Projekts 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 im Bereich der Schleusenanlage in ausreichender Anzahl zur Verfügung stehen. Daher beschränken sich die Genauigkeitsuntersuchungen hier auch nur auf diesen Bereich. Die Abb. 2 zeigt das Testfeld. Selbstverständlich wurde im Rahmen der Kampagnen das gesamte deutlich erweiterte Gebiet wie in Abb. 1 dargestellt erfasst. Aufgrund der in Abschnitt 0 diskutierten Anforderungen wurde das Phase One iXM Kamerasystem und der Riegl VUX1-1LR Laserscanner für die UAV-Datenerfassung gewählt. Der eigentlich geplante VUX1-UAV Laserscanner stand nicht zur Verfügung. Die Analysen haben aber gezeigt, dass die Messgenauigkeit des VUX1-LR Scanners praktisch identisch mit dem vom Hersteller etwas genauer klassifizierten VUX1-UAV-System ist.

Die Bilddatenerfassung fand im November 2018 statt. Verwendet wurde ein Multirotor-Copter der Firma Coptersystems, der mit einer Phase One iXM 100 Kamera mit 35 mm-Objektiv und dem integrierten GNSS/inertial-System Applanix APX-15el UAV ausgestattet war. Das Testfeld wurde in einer Kreuzbefliegung mit 80/60 Überdeckungsverhältnissen aus zwei Flughöhen (40 m/50 m ü. G.) erfasst. Die resultierenden Bodenpixelgrößen sind entsprechend etwa 4 mm bzw. 5 mm. Im Rahmen der integrierten Sensororientierung wurden die Koordinaten der drei Pfeilerpunkte als Passpunkte und die GNSS/inertial-Orientierungselemente als gewichtete Beobachtungen eingeführt. Gleichzeitig wurden die Systemkalibrierparameter mitbestimmt. Diese umfassen sowohl die Kamerageometrie als auch die Boresight-Kalibrierparameter. Durch die hohe Überdeckung kommt es zu bis zu 20-facher Verknüpfung der Bilder. Die unterschiedlichen Flughöhen erlauben zusätzlich die Trennung konstanter Kalibriergrößen von flughöhen- bzw. maßstabsabhängigen Systemparametern.

Die Laserdaten wurden im Rahmen der Projektbefliegung im März 2019 aufgezeichnet. Die Daten wurden aus einer Flughöhe von 50 m ü. G. mit dem Riegl RiCopter-System der Universität Innsbruck geflogen. 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. Damit kann ein Schwad von knapp 80 m pro Streifen abgedeckt werden. Die Querüberdeckung der Streifen ist etwa 50 %. Mit einer maximalen Pulsrepetitionrate von 820 kHz werden die Laserpunkte mit einem Punktabstand von ca. 5 cm abgetastet. Die Orientierung der Laserstreifen erfolgt auf Basis der redundanten Beobachtungen von (glatten) Flächenstücken im Überlappungsbereich der einzelnen Scans. 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 Orientierungsoffsets bestimmt werden können. Die absolute Orientierung wird durch sogenannte ALS-Passflächen – definierte giebelartige Referenzflächen, deren Position und Ausrichtung im Raum exakt bestimmt ist – in der Ausgleichung bewerkstelligt.

Tab. 1 zeigt die erzielten Genauigkeiten aus 18 Kontrollpunktdifferenzen des Testfelds. Der RMS-Wert definiert dabei die absolute Genauigkeit der Objektbestimmung. Setzt man die erzielte Genauigkeit in Bezug zu der Bodenpixelgröße GSD 4 mm für die iXM Bilder aus der Flughöhe 40 m ü. G., so werden in der Lage Genauigkeiten von besser $\frac{1}{4}$ pix, in der Vertikalkomponente eine Genauigkeit von $\frac{1}{2}$ pix erreicht. Die Genauigkeit der Vertikalkomponente des Laserscanners ist marginal schlechter als die photogrammetrische Genauigkeit aus den Phase One Bildern. Die Genauigkeit ist aber deutlich besser als

Tab. 1: Absolute Genauigkeit der 3D-Objektpunktbestimmung. Die Statistik wurde aus 18 signalisierten Kontrollpunkten berechnet, die in beiden Datensätzen vorhanden sind.

		UAV-Kamera iXM 100	UAV-Laser VUX1-LR
RMS [mm]	Ost	1,1	–
	Nord	1,7	–
	Vertikal	2,3	3,1
Mean [mm]	Ost	–0,6	–
	Nord	–0,4	–
	Vertikal	0,3	0,1
Std. Abw. [mm]	Ost	0,9	–
	Nord	1,6	–
	Vertikal	2,3	3,1

das theoretische Messrauschen des Scanners. Das liegt daran, dass aus allen Laserpunkten, die auf dem Kontrollpunktsignal gemessen wurden, zunächst eine mittlere Ebene geschätzt, deren Abstand zur Referenzhöhe des Kontrollpunkts dann ermittelt wurde. Insgesamt sind die erzielten Resultate sehr zufriedenstellend.

4 Diskussion

Die obigen Auswertungen zeigen das hohe Potenzial der UAV-gestützten Objektpunktbestimmung und damit auch dessen prinzipielle Eignung für Monitoringanwendungen. Die in der [Tab. 1](#) nachgewiesenen absoluten Genauigkeiten wurden an definierten, mit Signaltafeln 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 Laser-scannerdaten. Diese Passpunkte umschließen das zu untersuchende Gebiet und definieren den Passpunktrahmen. 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 als Kernmessgebiet nur das eigentlichen 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 luftsichtbar gemacht werden können. Wenn diese Referenzpunkte nicht garantiert werden, können die im Testfeld erzielten Genauigkeiten nicht in die Fläche übertragen werden.

Sowohl Laser 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 Befliegung 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 extra zusätzliche Stützstreifen geflogen, die durch die zusätzlichen Verknüpfungen den Block weiter versteifen.

Es ist ohne Zweifel klar, dass man sich mit den hier angestrebten Genauigkeiten immer an der Grenze des aktuell technisch Machbaren befindet. Das gilt aber nicht nur für die UAV-Datenerfassung, sondern auch für die Bereitstellung der präzisen Referenzpunkte. In Rahmen der Auswertungen des obigen Laserflugs wurde zum Beispiel ein nicht erwarteter Offset in der Zeitsynchronisation zwischen den Messungen des Laserscanners und der GNSS/inertial-Trajektorieninformation in der Größenordnung von 1,2 msek 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.

Vielsprechend sind in diesem Zusammenhang die Verfahren der hybriden Ausgleichung, also die gleichzeitige Berücksichtigung von parallel erfassten Bild- und Laserdaten. Dieses wurde schon empirisch an diesen Datensätzen nachgewiesen, allerdings nur in Kombination mit den standardmäßig auf dem RiCopter installierten schrägblickenden Sony Alpha 6000 Kameras, die primär eigentlich der Texturierung der Laserpunktwolke dienen. Diese Bilder haben deutlich größere Bodenpixel, die durch die starke Perspektive zusätzlich noch je nach Lage im Bild in der Größe variieren. Das erschwert die Punktzuordnung und Verknüpfung mit den Laserdaten. Vor diesem Hintergrund wird für

zukünftige Tests eine gemeinsame Verwendung von hochauflösender nadirblickender Kamera- und Lasersensorik auf einer Plattform angestrebt. Die aktuellen auch kommerziellen Systementwicklungen gehen deutlich in diese Richtung. Derzeit kommen UAV-Plattformen auf den Markt, die Phase One 100 MPix Kamera, 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 bei einem vertretbaren Aufwand für die Bereitstellung photogrammetrischer Passpunkte flächendeckend realisierbar sein.

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

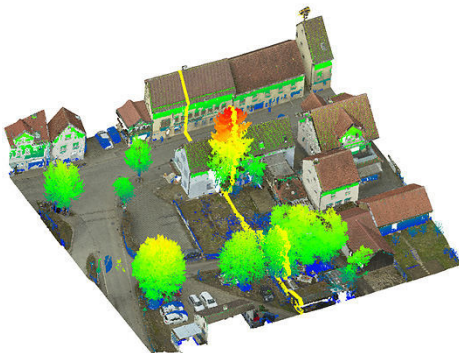


Abb. 3: Vergleich der photogrammetrischen (RGB-koloriert) und Laserpunktwolke (eingefärbt nach Reflektanz – blau: gering, rot: hoch) für einen Ausschnitt des erweiterten Testfeldbereichs. Gelb hervorgehoben ist der Bereich für den Profilschnitt in der Abb. 4.

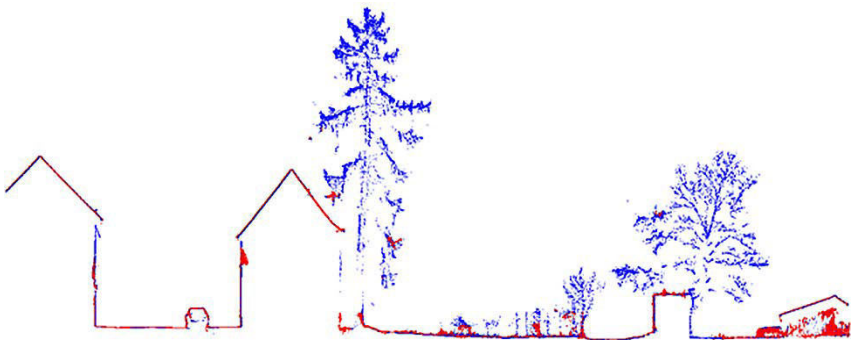


Abb. 4: Vergleich eines Profilsquerschnittes durch die photogrammetrische (rot) und Laserpunktwolke (blau)

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. Hier liefert die photogrammetrische Bildpunktzuordnung keine Ergebnisse, weshalb die Bäume und andere Vegetation in der Regel nicht oder nur rudimentär in der dichten Punktwolke aus Dense Image Matching (DIM) enthalten sind.

5 Fazit

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

Die im Rahmen des klassischen 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 erwähnten Randbedingungen berücksichtigt werden. Die parallele Erfassung und zukünftig gemeinsame Auswertung von UAV-Bild- und Laserdaten nutzt das tlw. komplementäre Verhalten: Der stabilen Geometrie und sehr hohen Auflösung der Bilder stehen die Vorteile des Laserscannings bei semi-transparenten Objekten gegenüber.

Danksagung

Die Autoren danken allen Beteiligten, die zum Gelingen des Hessigheim-Projekts beigetragen haben. Ausdrücklicher Dank gilt dabei vor allem den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der BfG in Koblenz, des Amtes für Neckar Ausbau Heidelberg und des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart.

Literatur

- BfG (2017): Projekt 301_BfG: Effizientes ingenieurgeodätisches Monitoring der Verkehrsbauwerke (Ingenieurgeodätisches Bauwerksmonitoring), interner Projektbericht, Bedarfserhebung experimentelle FuE-Aktivitäten, Bundesanstalt für Gewässerkunde, M5-Geodäsie + Objektvermessung, Koblenz.
- Böhm, K. (2019): Beobachtung lokaler Bauwerksnetze bei instabilem Baugrund. Vortrag im Kolloquium Ingenieurgeodäsie für eine zeitgemäße Infrastruktur der Bundeswasserstraßen, Koblenz, 13.+14. November 2019. www.bafg.de/DE/05_Wissen/02_Veranst/2019/2019_11_13_Boehm.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff 01/2020.
- DIN 18710-1 (2010): Deutsche Norm: Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin.
- Eichhorn, A., Heuncke, O., Kuhlmann, H., Neuner, H. (2015): Methoden und Modelle bei ingenieurgeodätischen Überwachungsmessungen. In: Handbuch der Geodäsie, Freeden, W., Rummel, R. (Hrsg.), Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-662-46900-2_30-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2_30-1).
- Gkira, P., Pfeifer, N., Mandlbürger, G. (2019): Hybrid Orientation of Airborne LiDAR Point Cloud and Aerial Images, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-2/W5, 567–574. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-567-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-567-2019).
- Kuhlmann, H., Schwiager, V., Wieser, A., Niemeier, W. (2013): Ingenieurgeodäsie – Definition, Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 6/2013, 138. Jg., 391–399.
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Riegl, U., Haring, A., Wieser, M., Gkira, P., Winiwarter, L. (2015): Complementing Airborne Laser Bathymetry with UAV-based LiDAR for Capturing Alluvial Landscapes. Proc. SPIE 9637, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVII, 96370A. DOI: [10.1117/12.2194779](https://doi.org/10.1117/12.2194779).
- Niemeier, W., Riedel, B. (2016): Monitoring von Hangrutschungen. In: Handbuch der Geodäsie, Freeden, W., Rummel, R. (Hrsg.), Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-662-47188-3_34](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3_34).
- Schneider, P., Sörgel, U. (2020): Monitoring einer Schleuse mittels satellitengestützter DInSAR-Techniken. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 29, DGPF-Jahrestagung 2020 in Stuttgart, 4.–6. März. www.dgpf.de/src/tagung/jt2020/proceedings/start.html.

Kontakt

Michael Cramer
Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart
michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

Patrick Havel
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat M5 – Geodäsie
Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz
havel@bafg.de

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, Band 97, Augsburg, 2020, S. 163–176.
Tagungsband online verfügbar unter https://geodaesie.info/sites/default/files/privat/DVW_97_2020_UAV_2020_FINAL_200214.pdf