

Monitoring mit scannenden bildgebenden Tachymetern

Wolfgang Wiedemann | Andreas Wagner | Peter Wasmeier | Thomas Wunderlich

1 Einleitung

Bei einer geodätischen Überwachungsmessung wird in der Regel zunächst eine räumliche und zeitliche Diskretisierung des Messobjekts vorgenommen; d. h. das zu untersuchende (künstliche oder natürliche) Objekt wird durch einzelne repräsentative Punkte ersetzt, die in unterschiedlichen zeitlichen Abständen (Epochen) beobachtet werden. Als Ergebnis der mehrmaligen Messungen und Deformationsanalysen ergeben sich für die diskreten Objektpunkte Verschiebungsvektoren, die wiederum in eine Deformation (Starrkörperbewegung oder Verformung) des Körpers rückzurechnen sind.

Seit einigen Jahren zeichnet sich ein Trend zu flächenhaften Messverfahren ab, bei denen die oben genannte Problematik der Diskretisierung und späteren Generalisierung umgangen wird. Die zumeist eingesetzten Methoden des Laser-scannings und der (Stereo-)Photogrammetrie erfassen in kurzer Zeit hochauflösende genaue Punktwolken des Messgebietes und sind ideal zur Erfassung von Deformationen geeignet. Auch an der Entwicklung elektronischer Tachymeter ist dieser Trend nicht spurlos vorübergegangen. Moderne Geräte verfügen über Scanfunktionalitäten und eine oder mehrere eingebaute Kameras und ermöglichen damit heutzutage auch eine flächenhafte Messdatenerfassung.

Im folgenden Beitrag werden die Entwicklung und der technische Stand scannender bildgebender Tachymeter beschrieben (Kap. 2) und die besonderen Anforderungen an die Kalibrierung dieser Instrumente dargelegt (Kap. 3). Kap. 4 zeigt eine neue Auswertemethode für kombinierte Bild- und Scandaten im Sinne einer strengen Deformationsanalyse. Der Mehrwert der neuen Geräteklasse wird abschließend diskutiert und ein Ausblick auf zukünftige Auswertemethoden gegeben (Kap. 5).

2 Instrumente

Im Folgenden sollen die Entwicklungsgeschichte und der Stand der Technik moderner Tachymeter kurz beschrieben werden. Neben der Integration von

Scanfunktionalität und Kameras wird hier auch auf die herstellerepezifische Software als Schnittstelle zwischen Benutzer und Instrument eingegangen.

2.1 Integration der Scanfunktionalität

Die ersten Tachymeter mit Scanfunktion wurden im Jahr 2007 nahezu gleichzeitig von zwei Herstellern vorgestellt (Wagner et al. 2014). Das *GPT-9000Ai* von *Topcon* verfügte über die Möglichkeit, einen vorab definierten Bereich mit bis zu 20 Punkten pro Sekunde zu scannen; die *Trimble VX Spatial Station* erreichte max. 15 Punkte in der Sekunde. Vor dieser Zeit gab es lediglich Entwicklungen, bei denen Punkte rasterförmig mithilfe der reflektorlosen Distanzmessfunktion gemessen wurden. Da diese Realisierung sehr zeitaufwendig ist, wurde bereits 1994 an der Ruhr-Universität Bochum ein intelligenter Ansatz vorgeschlagen und prototypisch realisiert (Scherer 2004).

Die erste signifikante Erhöhung der Scanrate ergab sich 2015 mit Einführung der *Leica MS50*, die mit bis zu 1.000 Punkten pro Sekunde messen kann. Die *Trimble SX10*, vorgestellt 2016, bietet heute sogar Scanraten von bis zu 26.600 Hz. Diese weitere deutliche Steigerung wurde möglich, da bei diesem Gerät erstmals ein zusätzliches Bauteil in Form eines rotierenden Prismas eingebaut wurde (Schrock 2017).

2.2 Integration von Kameras

Digitale integrierte Kameras wurden erstmals in Theodolitmesssystemen (*Kern SPACE & Wild ATMS*) in den späten 1980ern eingesetzt (Wagner et al. 2014). In der Industrievermessung wurden diese Geräte aber schnell von den kurz darauf entwickelten Lasertrackern abgelöst. Da zu dieser Zeit die Bildauswertungsalgorithmen und vor allem die Auswerte-PCs noch sehr ineffizient und unhandlich waren, konnten sich die sog. Videotheodolite oder -tachymeter nicht am Markt etablieren.

Bis zum Jahr 2005, in dem *Topcon* mit dem *GPT-7000i* das erste kommerziell erhältliche Videotachymeter vorstellte, wurden vor allem im Forschungsumfeld Prototypen entwickelt und eingesetzt. Der Fokus lag dabei auf der Entwicklung geeigneter Kalibriermethoden und der Ableitung präziser Messinformation aus dem (Teleskop-)Kamerabild (z. B. Walser 2004, Vogel 2006, Reiterer 2013).

Heutzutage hat jeder große Gerätehersteller ein Tachymeter mit einer oder mehreren integrierten Kameras in seinem Produktportfolio. Die zusätzliche Bildinformation wird in den Vermessungsgeräten allerdings nur zur Unterstützung der herkömmlichen Arbeitsabläufe oder einfachen Postprocessing-Auswertungen verwendet. Die *Trimble SX10* nimmt, wie bei der Scanfunktion, auch hier eine Sonderrolle ein, da bei diesem Instrument komplett auf ein Okular

verzichtet wurde. Die Kamera ist nicht länger unterstützendes, sondern notwendiges Element, um das Instrument bedienen zu können.

2.3 Softwareentwicklung

Einhergehend mit der Integration von Kameras und Scanfunktionen in die Instrumente wurden auch die Softwarepakete der Hersteller – sowohl auf den Instrumenten als auch die Büro-Auswertesoftware – kontinuierlich erweitert. Die Kamerabilder können heute zur Dokumentation der Messung im Feld und der Anzielung von Punkten ohne Blick durch das Okular (falls überhaupt noch vorhanden) verwendet werden. Im Speziellen erleichtern sie den Betrieb des Instruments als Einmann-Station. Bereits gemessene Punkte und Planungsdaten lassen sich zusätzlich mit dem (Live-)Kamerabild überlagern, wodurch der Bediener weiter unterstützt wird. Die Auswerteprogramme bieten Möglichkeiten zur nachträglichen stereo-photogrammetrischen Bestimmung von Punkten aus den Bilddaten, die im Feld aufgenommen wurden.

Bei Verwendung der Scanfunktion sind die erfassten Punktwolken fest mit der Gerätestationierung verknüpft und liegen direkt georeferenziert für die Auswertung vor. Eine aufwendige Registrierung der Scandaten über Passpunkte wird damit überflüssig. Mit der steigenden Rechenleistung der Instrumente sind heutzutage auch einfache on-board-Anwendungen – beispielsweise für den Vergleich zwischen Plan und Scandaten – vorhanden.

3 Neue Anforderungen an die Kalibrierung

Durch die Teleskopkamera entsteht eine neue Instrumentenachse, die bezüglich der bestehenden Instrumentenachsen (EDM-Achsen, Okular-Zielachse, ...) kalibriert werden muss. Ziel der Kalibrierung ist es, dass ein im Bild markiertes Pixel in eine Tachymeterrichtung (und umgekehrt) umgewandelt werden kann sowie aufgenommene (Scan-)Punkte lagerichtig in das Bild projiziert werden können. Da die Werkskalibrierung der Hersteller teilweise lediglich generalisierte Parameter für eine ganze Geräteklasse bestimmt, ist für hochgenaue Anwendungen eine eigene, für jedes Gerät individuelle Kalibrierung notwendig.

Wichtig ist die Berücksichtigung der unterschiedlichen Bezugspunkte und -achsen, wie in [Abb. 1](#) dargestellt. Die Zielachse des Instruments ist definiert als Verbindungslinie zwischen dem physikalischen Fadenkreuz und dem dingseitigen Brennpunkt des Fernrohrs (Schlemmer 1996, S. 76). Diese Achse fällt nicht zwangsläufig mit der optischen Achse des Fernrohrs zusammen und verändert sich beim Umfokussieren. Die virtuelle Zielachse definiert sich aus dem Bezugspunkt der Kalibrierung (d. h. der Kalibrierparameter) der Teleskopkamera

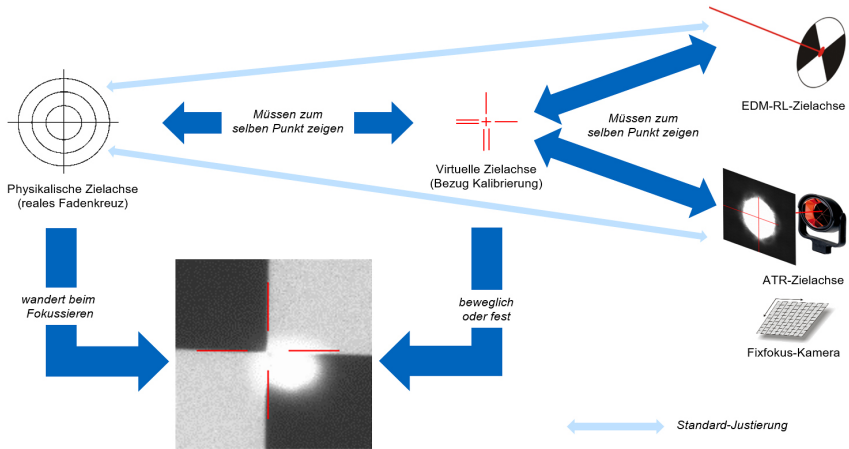


Abb. 1: Berücksichtigung unterschiedlicher Bezugspunkte und -achsen am Beispiel der Leica Nova Serie (MS50, MS60)

und dem dingseitigen Brennpunkt des Fernrohrs. Beide Achsen werden über ein gemeinsames Kalibrierverfahren zueinander in Bezug gesetzt (Wasmeier 2009).

Die EDM-Achse (auf die sich die Scans beziehen) kann mittels mechanischer Justage oder Anpassen des Fadenkreuzes mit der Zielachse koinzidiert werden. Dies gilt auch für die Integration von schnell rotierenden Zielachsen im Scanning (wie bei der *Trimble SX10*), wobei hier ggf. zyklische Korrekturen zu untersuchen sind. Für die Achse der automatischen Feinzieleinrichtung müssen bei einer Kamerakalibrierung weitere Ablageparameter zur physikalischen bzw. virtuellen Zielachse bestimmt werden.

Wird an Stelle einer Teleskopkamera die Übersichtskamera (nicht koaxial zum Fernrohr) verwendet, muss der Einfluss der Parallaxe korrigiert werden. Da dieser Einfluss entfernungsabhängig ist, kann eine Pixelposition nicht in Tachymeterrichtungen (und umgekehrt) überführt werden, ohne dass die Objektdistanz bekannt ist. Diese kann für einzelne Punkte mithilfe der reflektorlosen Distanzmessung bestimmt oder flächenhaft aus Scandaten für das ganze Bild abgeleitet werden. Daneben existieren Ansätze, die Entfernung aus der Stellung der Fokussierlinse im Teleskop (wie im Digitalnivellier) zu ermitteln (Mischke 2000).

4 Kombinierte Auswertung von Bild und Scandaten

Wie bereits erwähnt, werden für geodätische Überwachungsmessungen heutzutage zunehmend Daten flächenhafter Messverfahren verwendet. Sowohl die

Analyse von Laserscan- als auch die von Bilddaten haben ihre individuellen Vor- und Nachteile.

Laserscans bieten den Vorteil, dass sie unabhängig von Beleuchtung und Textur Objekte maßhaltig erfassen können. Allerdings ist es unter Verwendung von reinen Laserscandaten oft nicht möglich, aussagekräftige Informationen über eventuell vorhandene Deformationen abzuleiten. Bedingt durch das Aufnahmeverfahren werden bei Laserscandaten unterschiedliche Objektpunkte abgetastet. Da keine eindeutigen Korrespondenzen zwischen den Punktwolken vorliegen, ist ein direkter Vergleich der Einzelpunkte – im Sinne einer strengen Deformationsanalyse – nicht möglich. Mit den vorhandenen Verfahren des Epochenvergleichs zweier Laserscans (Cloud2Cloud Vergleich etc.), können zwar Veränderungen einfach dargestellt werden, das verlässliche Ableiten der tatsächlichen Objektbewegungen/-verformungen gestaltet sich allerdings schwierig und lässt Raum für unterschiedliche Interpretationen (Holst et al. 2017, Wiedemann et al. 2017). Zusätzlich sind diese Auswerteverfahren für Laserscandaten im Wesentlichen sensitiv für Distanzänderungen in Aufnahme­richtung. ICP-Verfahren zur Schätzung von Deformationen aus Punktwolken (bzw. Punktwolkenbereichen) decken nur Starrkörperbewegungen auf. Die Ergebnisse sind dabei stark abhängig von der Objektgeometrie und dem gewählten Punktwolkenausschnitt und liefern unzureichende Deformationsangaben bei Objektverformungen.

Bei der Verwendung reiner Bilddaten müssen Objekte von mindestens zwei Standpunkten aus erfasst werden, um Tiefeninformationen ableiten zu können. Um hohe Genauigkeiten zu erhalten, müssen lange Basislinien gewählt werden, was in der Praxis oft schwierig umzusetzen ist. Zusätzlich wird die Korrespondenzfindung zur Berechnung eines photogrammetrischen Vorwärtsschnittes bei steigender Basislinienlänge erschwert. Bei der Verwendung monoskopischer Kamerabilder können nur Bewegungen in der Bildebene (d. h. quer zur Aufnahme­richtung) bestimmt werden. Reine Entfernungsänderungen – die sich nur an einer Skalierung der Objekte im Bild erkennen lassen – sind nur sehr schwer zu erfassen und setzen Vorkenntnisse über das Untersuchungsobjekt voraus.

Um die oben beschriebenen Nachteile der einzelnen Verfahren und Auswertemethoden zu umgehen, wurde ein kombiniertes Verfahren entwickelt, das versucht, die Nachteile der jeweiligen Einzelverfahren mit den Vorteilen des jeweils anderen Verfahren zu ergänzen.

4.1 Datenerfassung

Bildgebende scannende Tachymeter erlauben es, hochauflösende Bildaufnahmen mit der Teleskopkamera des Tachymeters zu erzeugen. Mit entsprechender Kalibrierung der Kamera und den Tachymeterablesungen zum Zeitpunkt der Bildaufnahme sind diese Aufnahmen absolut im Raum orientiert. Damit kann

jedem Pixel direkt eine Raumrichtung (Hz, V) im Tachymetersystem zugeordnet werden.

Die Scanfunktion moderner Tachymeter erlaubt es zudem, von demselben Standpunkt aus eine Punktwolke des Objekts zu erfassen. Da das Scanzentrum und das Projektionszentrum der Kamera bei diesem Gerätetyp (nahezu) zusammenfallen, zeigen beide Aufnahmen die gleiche Perspektive. Ungewollte Abschattungen im Scan gegenüber den Kamerabildern werden vermieden.

Die Verwendung eines bildgebenden scannenden Tachymeters bietet im Allgemeinen den Vorteil, dass alle Sensordaten (Bilder, Scans, Winkel- und Neigungsdaten, ...) im selben Koordinatensystem erfasst werden.

4.2 Erzeugen von RGB+D-Bildern

Für den beschriebenen Ansatz werden die beiden Messdatensätze – Bilder und Scans – zu sogenannten RGB+D-Bildern kombiniert (Wagner 2016). Da das Sichtfeld durch die ca. 30-fache Vergrößerung des Teleskops stark begrenzt ist, müssen meist mehrere Bilder der Teleskopkamera verwendet werden, um das Untersuchungsgebiet vollständig zu erfassen. Mithilfe der absoluten Orientierung der Kamera aus dem Tachymeterstandpunkt und dessen Winkelablesungen lassen sich die Aufnahmen direkt zu einer sphärischen Panoramaaufnahme (RGB) zusammensetzen. Diese werden um einen weiteren Kanal D (depth) ergänzt, in dem die Entfernungsinformation hinterlegt ist. Die Scanpunkte werden dazu in das Bild projiziert; daraus wird anschließend ein Tiefenbild in der gleichen Auflösung wie die Bildinformation interpoliert.

Da die Zuordnung der Raumrichtung beim Erstellen der Panoramabilder erhalten bleibt, kann eine abgegriffene Pixelkoordinate des RGB+D-Bildes direkt als polarer Messwert zu dem Objektpunkt oder als kartesische 3D-Koordinate ausgedrückt werden. Die Auflösung des aus Einzelbildern zusammengesetzten Panoramas übersteigt meist die des Scans (in der Regel um den Faktor 10). D. h. die Tiefenwerte der meisten Bildpixel werden aus den jeweils umliegenden Scanpunkten interpoliert. Die Genauigkeit des D-Kanals ist somit auch von der Auflösung des Scans und der gewählten Interpolationsmethode abhängig.

4.3 Merkmalsbasierte Identifizierung von Bildpunkten

Für die weitere Verarbeitung werden mittels gängiger Bildverarbeitungsalgorithmen (SIFT, SURF, BRISK, etc.) Featurepunkte aus den Bildern extrahiert. Neben der jeweiligen Pixelkoordinate enthalten diese auch eine numerische Beschreibung, sogenannte Featurevektoren, die aus den radiometrischen Informationen der lokalen Nachbarschaft jedes Punktes berechnet werden.

Die generierten Featurevektoren werden genutzt, um identische Punkte in den Daten unterschiedlicher Aufnahmestandpunkte bzw. Epochen zu finden. Die Suche kann so auf einer abstrakten numerischen Ebene durchgeführt werden, bei der lediglich die Ähnlichkeit der Featurevektoren verglichen wird (Featurematching) und eine geometrische Interpretation oder komplexe objektbasierte Auswertung der Bilder vermieden werden kann.

4.4 Deformationsanalyse

Die detektierten Bildpunkte repräsentieren, in Verbindung mit dem Tiefenkanal, direkt sphärische Koordinaten und lassen sich einfach in 3D-Objektkoordinaten umrechnen. Mithilfe identischer Punkte in RGB+D-Bildern aufeinanderfolgender Epochen können daraus 3D-Verschiebungsvektoren berechnet werden, die bereits erste Anhaltspunkte für eine Objektdeformation liefern.

Für eine sinnvolle Analyse der Deformation müssen die ermittelten Verschiebungsvektoren allerdings einem Signifikanztest unterzogen werden. Dies kann durch eine strenge Deformationsanalyse (im Sinne eines Kongruenzmodells) geschehen, in der die detektierten Objektpunkte enthalten sind. Möglich ist dies mit einer zusätzlichen Netzmessung zu Stabilpunkten, was sich bei der Verwendung bildgebender scannender Tachymeter einfach in den Messablauf integrieren lässt.

Für die Durchführung der strengen Deformationsanalyse müssen zusätzlich folgende Bedingungen bei der Auswertung berücksichtigt werden:

1. Gleiche Lagerung: die datumstragenden Punkte müssen in den Vergleichsepochen dieselben sein.
2. Identischer Datumsdefekt: die Datumparameter der Epochen müssen identisch gewählt werden.
3. Identischen Näherungskordinaten: die Netze der Epochen müssen unter Verwendung identischer Näherungswerte frei ausgeglichen werden.
4. Gemeinsamer Varianzfaktor: die freien Netzausgleichungen der Messepochen müssen vergleichbare Genauigkeiten liefern, um einen gemeinsamen Varianzfaktor berechnen zu können.

Anschließend können die Netze über Kongruenztests (zweistufiger Netzaufbau) auf Deformationen untersucht werden. Das stochastische Modell des Kongruenztestes erfordert allerdings, dass Genauigkeitsmaße für die im RGB+D-Bild detektierten Objektpunkte eingeführt werden. Liegen für diese Punkte keine Überbestimmung vor (RGB+D als Polarpunkte bei Aufnahmen von nur einem Standpunkt), können Varianzinformationen aus synthetischen Kovarianzmatrizen erstellt werden (Kauker et al. 2016).

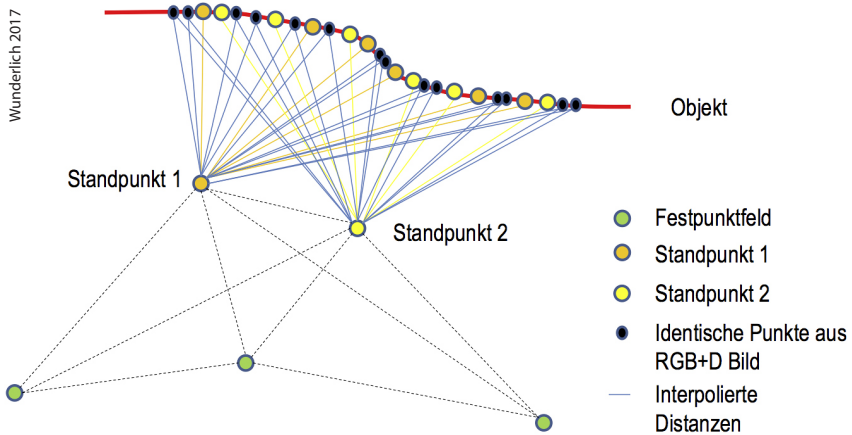


Abb. 2: Konzeptioneller Aufbau der vorgestellten Methode zum Auffinden identischer Punkte aus RGB+D-Bildern

Die in diesem Ansatz vorgeschlagene Vorgehensweise sieht allerdings vor, empirische Werte für die Kovarianzmatrix durch eine Überbestimmung der Objektpunkte zu ermitteln. Dies erfordert eine weitere RGB+D-Aufnahme von einem zusätzlichen Standpunkt innerhalb der gleichen Messepoche, der ebenfalls in der Netzmessung eingebunden ist (vgl. Abb. 2). Identisch zum Vorgehen über mehrere Epochen hinweg, lassen sich auch in RGB+D-Aufnahmen innerhalb einer Epoche identische Punkte über Bildfeatures ermitteln. Mit der nun vorhandenen Überbestimmung können die Varianzinformationen der Objektpunkte im Zuge einer freien Netzausgleichung bestimmt werden. Die Überbestimmung erlaubt es ebenfalls, grobe Messfehler – z. B. eine falsche Zuordnung von Featurepunkten – aufzudecken.

4.5 Anwendungsbeispiele

Nachfolgend soll der Prozess zum Auffinden der identischen Punkte in RGB+D-Bildern und die Berechnung der Deformationsvektoren anhand von Beispielen veranschaulicht werden.

Abb. 3 links zeigt das Panoramabild eines untersuchten Schotterfeldes, das in zwei Epochen mit einer *Leica Nova MS60* erfasst wurde. Zwischen den Epochen wurden künstliche Deformationen erzeugt. Auf dem losen Gestein des Schotterfeldes wurde eine Fläche von ca. 54 m² aufgenommen, die ca. 38 m vom Instrumentenstandpunkt entfernt ist. Für die Erstellung der Panoramabilder wurden je 72 Einzelbilder in einem vordefinierten Raster aufgenommen. Diese lassen sich über die Tachymeterrichtungen und die Kalibrierparameter direkt zusammen-

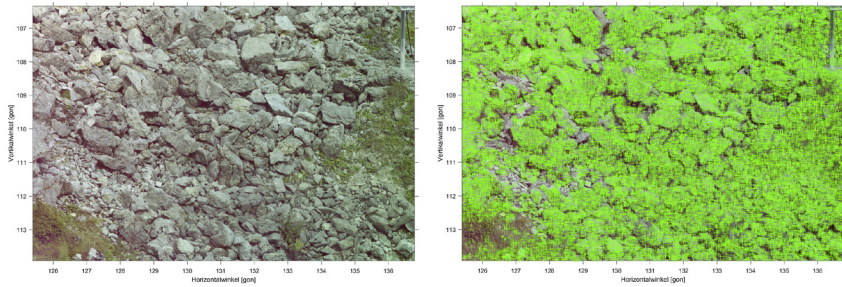


Abb. 3: Aufgenommenes Schotterfeld (links); erfolgreich zugeordnete Feature zwischen den Epochen (rechts)

fügen; in den Überlappungsbereichen (20 %) müssen lediglich Belichtungsdifferenzen und Vignettierungseffekte ausgeglichen werden (Wagner 2016). Zu jeder Epoche wurde ein Scan mit einer Auflösung von ca. 6 mm auf der Objektoberfläche angefertigt. Damit liegen je $\sim 1.000.000$ Stützpunkte für die Interpolation der Tiefenkanäle vor.

In den Panoramabildern werden je ca. 125.000 SIFT-Features detektiert. Zwischen den beiden Epochen können ca. 76.000 Featurepunkte einander zugeordnet werden. **Abb. 3** rechts zeigt die Verteilung der zugeordneten Punkte im Untersuchungsbereich. Dabei werden in fast allen Bereichen Bildfeatures erkannt. Lediglich in Bereichen mit Vegetation (Gras, unten links im Bild) versagt die Zuordnung. Kleinere Bereiche ohne detektierte Bildpunkte resultieren aus Abschattungen, die durch die Deformation hervorgerufen werden.

Die detektierten Verschiebungsvektoren, die aus den RGB+D-Bildern berechnet wurden, sind in **Abb. 4** als rote Linien dargestellt. In deformierten Bereichen treten dabei gehäuft Vektoren in gleicher Richtung auf. Vereinzelt sichtbare

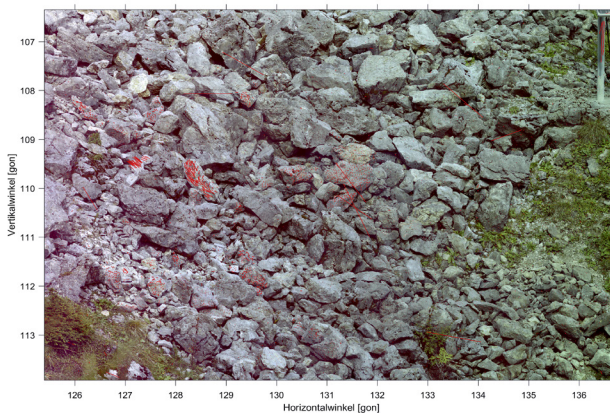


Abb. 4: Detektierte Deformationsvektoren im Schotterfeld, dargestellt als rote Linien

Fehlzuordnungen zeigen sich als einzelne Linien. Unter der Annahme, dass Deformationen in lokal begrenzten Bereichen eine annähernd gleiche Größenordnung und Richtung besitzen, können solche Ausreißer durch den Vergleich der Orientierung und Länge benachbarter Vektoren gefiltert werden. Einzelne Elemente, die keiner lokalen Gruppe zugeordnet werden können, werden als Falschzuordnung verworfen.

In weiteren Messungen wurden die Deformationen eines Betonträgers bei einem zerstörenden Brückenbelastungsversuch untersucht. Um die Standfestigkeit des Brückenfeldes zu ermitteln, wurde dieses über Hydraulikzylinder so lange mit zunehmender Last beaufschlagt, bis es versagte. [Abb. 5](#) zeigt den Träger vor und nach dem Belastungsversuch.



[Abb. 5](#): Brückenträger vor (links) und nach (rechts) dem Belastungsversuch; der Untersuchungsbereich ist rot markiert.

Während des Versuches wurden mit einer *Leica Nova MS60* Bild- und Laserscandaten bei unterschiedlichen Belastungsstufen aufgenommen. Auf Grund der beschränkten Zeit zwischen den einzelnen Belastungsstufen und einer sehr geringen Objektdistanz (ca. 5 m), konnte nur ein Ausschnitt von 0,2 m² des Trägers erfasst werden. Die benötigte Aufnahmezeit betrug ca. 10 Minuten. Die erstellten Panoramabilder setzen sich aus 36 Einzelbildern zusammen; die Scanauflösung beträgt 1 mm auf der Objektoberfläche. Die aus den Messdaten abgeleiteten Deformationsvektoren zwischen Nullepoche und der Aufnahme nach dem Bruch (entlasteter Zustand) sind in [Abb. 6](#) dargestellt. Darin sind sowohl Stabilbereiche (rechts oben), als auch der Bruch in zwei unterschiedliche Teile mit leicht abweichenden Bewegungsrichtungen zu erkennen. Zwischen diesen Regionen zeigen sich deutlich die Rissbereiche, in denen keine Features detektiert wurden.

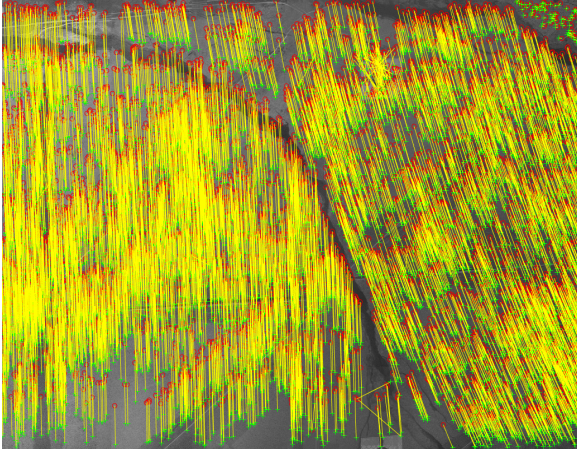


Abb. 6:
Deformationsvektoren
eines Betonträgers
während eines Brücken-
belastungsversuchs

5 Diskussion und Ausblick

Scannende bildgebende Tachymeter bieten einen deutlichen Mehrwert gegenüber konventionellen Tachymetern. Die von den Herstellern bereitgestellten Funktionen erleichtern die Bedienung und erweitern die Messmethoden durch stereo-photogrammetrische Punktbestimmung. Durch die Integration der Scanfunktion lassen sich zusätzlich Aufgaben in den tachymetrischen Messablauf integrieren und mit einem einzigen Instrument bewerkstelligen. Mit der zu erwartenden Steigerung der Scanraten in der Zukunft werden so Tachymeter ebenfalls für den Einsatz in Scanprojekten interessant.

Neben den von Herstellern angebotenen Funktionen lassen sich z. B. die Kamerabilder der Tachymeter auch für weiterführende Anwendungen nutzen. Bei diesen wird der Bildinhalt analysiert und interpretiert, um beispielsweise Zusatzinformationen über einen Messpunkt mithilfe codierter Zielzeichen zu übertragen (Zhou et al. 2016). Es ist ebenfalls möglich, nichtsignalisierte Objektpunkte aus den Aufnahmen eines bildgebenden Tachymeters zu detektieren und automatisiert einzumessen. Abb. 7 zeigt die Aufnahme eines Brückenträgers auf dem die Positionen der Verbindungsbolzen erfasst werden sollen. Nach der einmaligen Definition eines Zielpunktes können ähnliche Objektpunkte mittels Mustererkennung (template matching) im Bild gefunden werden. Diese lassen sich anschließend vollautomatisch anzielen und reflektorlos einmessen. Mit diesem Verfahren ist es möglich, beliebige bekannte Formen als Zielzeichen zu verwenden. Mit der raschen voranschreitenden Entwicklung der Künstlichen Intelligenz im Bereich der Bildinterpretation und Objekterkennung könnte es bald möglich sein, dass Tachymeter festgelegte Objekte vollautomatisch finden und einmessen.

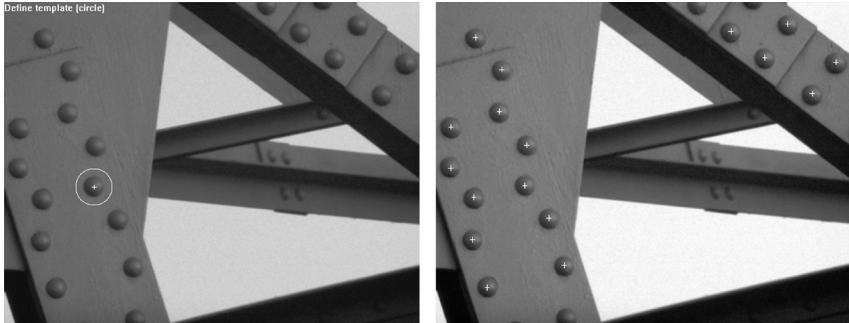


Abb. 7: Beispiel einer Mustererkennung: kreisförmige Bereichsauswahl (links), markierte, detektierte Ziele (rechts)

Die Integration von Bildsensoren und der Scanfunktion in das Tachymeter ermöglichen eine konsistente flächenhafte Datenerfassung ohne auf die gewohnten Anwendungen (freie Stationierung, Netzmessung, etc.) eines Tachymeters verzichten zu müssen. Die Verschmelzung von hochauflösenden Bildern und Scans ermöglicht zudem die Entwicklung neuer Auswertemethoden (vgl. Kap. 4) für die Deformationsanalyse. Mithilfe der aufgezeichneten Bilder und Methoden der Bildverarbeitung können Korrespondenzen in den Scandaten (Tiefenbilder) gefunden werden. Die so ermittelten identischen Objektpunkte aus unterschiedlichen Aufnahmeepochen genügen damit den Anforderungen der strengen Deformationsanalyse und können dieser zugeführt werden.

Wesentliche Teile des hier vorgestellten Auswerteverfahrens beruhen auf Bildverarbeitungsmethoden, die neben einer hohen Bildauflösung auch eine hohe Bildqualität erfordern. Hier zeigen die kommerziell verfügbaren Instrumente zum Teil noch Schwächen. Die verbauten Kameras, in Kombination mit der zur Verfügung stehend Software, bieten oft nicht die nötigen Einstellungsmöglichkeiten, um eine konstante Belichtung und Farbgebung über einen Bildverband hinweg zu erzeugen. Bei nicht optimaler Beleuchtung zeigen die Bilder zudem ein starkes Rauschen, insbesondere bei Geräten mit Koaxialkamera und Okular. Hier wird nur ein Teil des Lichtes, das in das Teleskop einfällt, auf den Kamerachip geleitet. Dies könnte sich zum Teil mit der (bereits begonnenen) Entwicklung okularloser Instrumente verbessern; generell zeigen sich die verbauten Kameras (speziell in Innenräumen) als nicht sehr lichtstark. Hier wäre eine Verbesserung der Kameraqualität wünschenswert. Ebenfalls zeigen die verbauten Kameras nur einen kleinen Dynamikumfang, sodass eine inhomogene Beleuchtung der Szene schnell zu Über-/Unterbelichtung einzelner Bildbereiche führt. Hier wären Funktionen zum Erzeugen von HDR-Bildern hilfreich.

Eine weitere praxisrelevante Größe ist die Übertragungsgeschwindigkeit der Daten. Die vorgestellte Methode erfordert derzeit noch die Übertragung der

aufgenommenen Bilder und Scans an einen externen Auswerterechner. Dies ist insbesondere bei der Speicherung der Bilddaten sehr zeitintensiv. Zwar bieten die Hersteller auch die Live-Übertragung eines Videostreams an (meist um das Arbeiten im Ein-Mann-Betrieb zu ermöglichen), dieser ist jedoch in der Auflösung und Bildrate stark beschränkt und kann nicht für eine sinnvolle Auswertung verwendet werden.

Natürlich übertreffen terrestrische Laserscanner die Tachymeter in der Punktrate bei weitem – die Vorteile der kombinierten Auswertung von Scan- und Bilddaten für die strenge Deformationsanalyse kompensieren den Geschwindigkeitsverlust (außer für dynamische Spezialaufgaben) jedoch in überzeugendem Maße.

Literatur

- Holst, C.; Klingbeil, L.; Esser, F.; Kuhlmann, H. (2017): Using point cloud comparisons for revealing deformations of natural and artificial objects. In: Kopáčik, A.; Kyrinovič, P.; Henriques, M. J. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Surveying (INGEO 2017), S. 265–274.
- Kauker, S.; Holst, C.; Schwieger, V.; Kuhlmann, H.; Schön, S. (2016): Spatio-temporal Correlations of Terrestrial Laser Scanning. In: avn – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 123 (6), S. 170–182.
- Mischke, A. (2000): Entwicklung eines Videotheodolit-Messsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten. Dissertation, Technische Universität Wien.
- Reiterer, A. (2013): Novel Observation Concepts for Image Assisted Total Stations in Applied Geodesy – Development Steps and Applications. Habilitation, Technische Universität München.
- Scherer, M. (2004): Intelligent Scanning with Robot-Tacheometer and Image Processing a Low Cost Alternative to 3D Laser Scanning? In: Proceedings of the FIG Working Week, CD-ROM.
- Schlemmer, H. (1996): Grundlagen der Sensorik. Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure. Heidelberg.
- Schrock, G. (2017): Behind the Big Eye, In: xyHt (July 2017), S. 16–23.
- Vogel, M. (2006): Vom Pixel zur Richtung. Die räumlichen Beziehungen zwischen Abbildungsstrahlen und Tachymeter-Richtungen. Dissertation, TU Darmstadt.
- Wagner, A. (2016): A new approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB+D images. In: Measurement 82, S. 64–74. DOI: [10.1016/j.measurement.2015.12.025](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.025).
- Wagner, A.; Wasmeier, P.; Wunderlich, T.; Ingensand, H. (2014): Vom selbstzielenden Theodolit zur Image Assisted Total Station. In: avn – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 121 (5), S. 171–180.
- Walser, B. (2004): Development and Calibration of an Image Assisted Total Station. Dissertation, ETH Zürich.

- Wasmeier, P. (2009): Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter. Dissertation, Technische Universität München.
- Wiedemann, W.; Wagner, A.; Wunderlich, T. (2017): Ableitung von 3D-Verschiebungsvektoren aus fusionierten Laserscan- und Bilddaten. In: avn – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 124 (11-12), im Druck.
- Wunderlich, T. (2017): 3D Congruency – The Point Cloud Problem. 7th International Conference on Engineering Surveying (INGEO2017), 18–20 Oktober 2017. Lissabon, Portugal.
- Zhou, Y.; Wagner, A.; Wunderlich, T.; Wasmeier, P. (2016): Calibration Method for IATS and Application in Multi-Target Monitoring using Coded Targets. In: Journal of Applied Geodesy 11 (2), S. 99–106. DOI: [10.1515/jag-2016-0021](https://doi.org/10.1515/jag-2016-0021).

Kontakt

Wolfgang Wiedemann | Andreas Wagner | Peter Wasmeier | Thomas Wunderlich
Technische Universität München, Lehrstuhl für Geodäsie
Arcisstraße 21, 80333 München
w.wiedemann@tum.de