

INNOVATIVE STRATEGIEN DES LONG-RANGE-SCANNINGS MIT BILDGEBENDEN TACHYMETERN

Raphael Bretscher, Martin Schlüter, Fabian Schmenger

Zusammenfassung: Zur direkten Bestimmung von georeferenzierten, dreidimensionalen Punktwolken auf tendenziell große Zielweiten bei gänzlich unzugänglichen Objekten – also ohne Signalisierung von Passpunkten – stellen wir ein Konzept und seine Erprobung vor. Dazu greifen wir auf bildgebende Tachymeter, hier die Leica Nova MS50 Multistation, und Auswertemethoden durch Structure-from-Motion-Techniken zurück. Ferner erfolgt eine Bewertung der so gewonnenen Daten durch den Vergleich der Punktwolken einer Steinbruchsteilwand, die in einem Feldversuch ebenfalls terrestrisch, aber aus kurzer Distanz, mit einer Leica Scanstation P20 aufgenommen wurde. Anhand der Ergebnisse wird gezeigt, dass der Nachteil stark anwachsender Scanzeiten bei größer werdenden Reichweiten durch den Rückgriff auf bildgebende Verfahren erfolgreich aufgehoben werden kann, bei insgesamt etwa gleichbleibender geometrischer Qualität der jeweils resultierenden 3D-Punktwolke.

Schlüsselwörter: Long-Range-Scanning, bildgebender Tachymeter, 3D-Punktwolkenerfassung, 3D-Photogrammetrie, Structure from Motion

INNOVATIVE STRATEGIES FOR LONG-RANGE-SCANNING WITH IMAGE-ASSISTED TACHYMETERS

Abstract: For direct determination of georeferenced, three-dimensional point clouds at tendency long ranges and completely inaccessible objects – i. e. without signaling of control points – we introduce the concept and testing. For this we rely on image-assisted tachymeters such as the Leica Nova MS50 Multistation and calculation methods by structure from motion techniques. Furthermore, an assessment of the obtained data is carried out by comparing the point cloud of a quarry wall, which was also measured terrestrial in a field trial, but from short distance, with a Leica Scanstation P20. Based on the results, it is shown that the disadvantage of growing scanning durations in case of growing scanning ranges can be successfully avoided by using image based techniques, retaining the overall geometric quality of the resulting 3D point cloud.

Keywords: Long-Range-Scanning, image assisted total station, 3D point cloud acquisition, 3D photogrammetry, structure from motion

Autoren

M. Sc. Raphael Bretscher
Prof. Dr.-Ing. Martin Schlüter
M. Sc. Fabian Schmenger

Hochschule Mainz – University of Applied Sciences
i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik
Lucy-Hillebrand-Str. 2
D-55128 Mainz

E: raphael.bretscher@hs-mainz.de
martin.schluter@hs-mainz.de
fabian.schmenger@hs-mainz.de

1 EINFÜHRUNG

1.1 HINTERGRUND

Am Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik i3mainz wird unter dem Stichwort MoDiTa (Modulare Digitalkamera-Tachymeter) seit etwa zehn Jahren mit Prototypen bildgebender Theodolite und Tachymeter erfolgreich gearbeitet. In den ersten Jahren zielten diese Arbeiten nahezu ausschließlich auf Anwendungen, bei denen nicht oder nur selten umfokussiert werden musste, nämlich Kollimations- und Autokollimationsmessungen für die Luft- und Raumfahrtindustrie (Schlüter et al. 2009). An der ETH Zürich dagegen standen z. B. wiederholt astrogeodätische Arbeiten im Mittelpunkt, zuletzt Vittuari et al. (2016). Eine Bedeutungssteigerung erfuhren diese Arbeiten in den letzten Jahren, da nahezu alle namhaften Hersteller geodätischer Totalstationen einen bildgebenden Tachymeter mit Autofokusfunktion auf den Markt gebracht haben (Wagner et al. 2016). Guillaume et al. (2016) bringen es auf den Punkt, obwohl gerade das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich eigens einen externen Fokusmotor entwickelt hatte: „However, it is preferred to use a model of the last generation which provides a digital automation of the focus.“ Gerade die Autofokusfunktion der bildgebenden Tachymeter wird zukünftig neue Anwendungsfelder auch für externe digitale Okularkameras erschließen (Hauth et al. 2012, Hauth et al. 2013) (Abb. 1). Vor diesem Hintergrund ist die hier dargestellte Arbeit zu lesen, bei der wir uns ausnahmsweise einmal ausschließlich auf die Nutzung der koaxial im Tachymeterfernrohr integrierten Kamera konzentrieren. Selbstredend bietet auch das Ausschöpfen der integrierten Kameras bereits faszinierende Möglichkeiten (Ehrhart & Lienhart 2015).

1.2 MOTIVATION

Für Vermessungs- und Monitoringaufgaben im Tagebau kommen, je nach konkreter Situation vor Ort, unterschiedliche Sensoren, Plattformen und Messstrategien zum Einsatz, die sich jeweils durch spezifische Stärken und Schwächen charakterisieren lassen. Bei mittleren Zielweiten kommt bevorzugt terrestrisches Laserscanning (TLS) zum Einsatz. Handelsübliche geodätische Laserscanner stoßen jedoch bei Reichweiten in Größenordnungen über 100 m an

ihre Grenzen, insbesondere bei hohen Anforderungen an die geometrische Genauigkeit. Photogrammetrische Verfahren weisen mit Blick auf ausgedehnte Objekte keine Einschränkung der Reichweite auf (Lato et al. 2012). Sie ermöglichen es darüber hinaus aus der Luft zu arbeiten, z. B. via UAV (Neitzel & Klonowski 2011) oder Ultraleichtflugzeug (Denis 2014). Die photogrammetrische Erfassung und Auswertung über Structure-from-Motion (SfM)-Techniken bietet eine große Flexibilität, liefert aber letztlich bislang keinen ganzheitlichen Ansatz zur unmittelbaren, präzisen Georeferenzierung, welcher auf das Anbringen und Einmessen von Passpunkten verzichten könnte. Demzufolge halten wir es für konsequent, die Stärken des photogrammetrischen Ansatzes mit der hochgenauen Erfassung absoluter Ausrichtungen und Distanzen im Raum, wie dies Tachymeter bieten, zu verknüpfen. Im Bereich von Reichweiten ab etwa 100 m bis 2000 m sehen wir eine Lücke, welche sich durch bildgebende Tachymeter in Verbindung mit SfM-Techniken schließen lässt, mit Vorteilen bei gänzlich unzugänglichen Objekten, in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Genauigkeit und einfache, präzise Georeferenzierung.

Wagner (2016) betont, dass die große Reichweite der reflektorlosen Entfernungsmessung der MS50 die Limitierungen früherer Projekte im Bereich Geomonitoring endlich aufhebt. Problematisch bleibt jedoch, dass die Messdauer pro Punkt bei den großen Reichweiten auf bis zu mehr als eine Sekunde ansteigt.



Abbildung 1: Erstinbetriebnahme der Leica Nova MS50 als Modulare Digitalkamera-Tachymeter MoDiTa

Vor ähnlichem Hintergrund entwickeln Wagner et al. (2014) erfolgreich auf Basis zweier Image Assisted Total Stations (IATS), welche auf Leica TCRA1201+ und Aufsatzkameras basieren, einen prototypischen Lösungsansatz, der sich durch eigens entwickelte Algorithmen zur 3D-Rekonstruktion auf der Basis sphärischer Panoramen auszeichnet. Im Unterschied zu Wagner et al. (2014) gehen wir der Frage nach, inwieweit eine solche Messstrategie unter möglichst weitgehendem Rückgriff auf kommerziell verfügbares Instrumentarium und bereits vorhandene Software realisierbar ist und setzen dafür die Leica Nova MS50 Multistation ein (Abb. 1), nur ohne zusätzliche Okularkamera.

1.3 SENSORTECHNISCHE VORAUSSETZUNGEN

Der Hersteller gibt die Standardabweichung der Winkelmessung der MS50 mit 0,3 mgon sowohl für Horizontalrichtungen als auch für Vertikalwinkel an. Die Streckenmessung basiert auf der Waveform-Digitizer (WFD)-Technologie und erreicht als maximale reflektorlose Reichweite etwa 2000 m bei einer Standardabweichung von 4 mm + 2 ppm bzw. 2 mm + 2 ppm bei Distanzen kleiner als 500 m (Leica Geosystems 2014, S. 66 ff.).

Neben den klassischen Eigenschaften moderner Totalstationen verfügt die MS50 über Möglichkeiten der digitalen Bildtechnik sowie über eine 3D-Scanfunktion. Für die Bildaufnahme sind eine exzentrische Übersichts- und eine koaxiale Teleskop-CMOS-Kamera mit jeweils fünf Megapixeln verbaut. Die Teleskopkamera verfügt über eine Autofokussierung, die bei Unendlichkeit eine Brennweite von 231 mm aufweist. Die Bildauflösung mit 2560×1920 Pixel bei $2,2 \times 2,2 \mu\text{m}$ Pixelgröße entspricht einem Gesichtsfeld von etwa $1,3^\circ \times 1,0^\circ$ (Leica Geosystems 2014, S. 73). Die GeoCOM-Schnittstelle bietet u. a. die Registrierung der virtuellen Pixelposition des Strichkreuzes auf dem Bild.

Die Scanfunktion ist in vier Modi von 1000 bis 1 Hz unterteilt. Der Hersteller gibt die absolute Positionsgenauigkeit der modellierten Fläche gleich der Standardabweichung einer reflektorlosen Einzelmessung an. Tabelle 1 zeigt die Reichweiten sowie das Distanzrauschen bezogen auf optimale Messbedingungen (Objekt im Schatten, bedeckter Himmel, Albedo 90%).

Exemplarisch wird deutlich, dass die beim Scannen in akzeptabler Zeit erreichbare Punktdichte mit zunehmender Reichweite stark abnimmt. Insbesondere für große Zielweiten erscheint die Einbeziehung der Messbilder in den Prozess des 3D-Scannings als vielversprechend.

2 TACHYMETRISCH-PHOTOGRAMMETRISCHE SCANSTRATEGIE

Neben den Anforderungen der direkten Georeferenzierung ohne Signalisierung von Passpunkten und der präzisen Aufnahme aus tendenziell größerer Entfernung, soll das Messkonzept auch möglichst wirtschaftlich einsetzbar sein. Dabei gliedert sich das Vorgehen in drei wesentliche Schritte:

- ▶ die tatsächliche Messdatenerfassung vor Ort,
- ▶ die Aufbereitung der Einzelbilder pro Standpunkt zu je einem ebenen Bildpanorama pro Standpunkt
- ▶ sowie die Punktwolkenberechnung mittels SfM.

2.1 MESSDATENERFASSUNG

Die Strategie beruht im Kern auf der Erfassung von 3D-Koordinaten nach dem Prinzip des Vorwärtseinschneidens über die zugehörigen korrespondierenden Pixelkoordinaten auf den tachymetrisch erfassten Messbildern, die von zwei oder mehr Standpunkten aufgenommen werden (Abb. 2).

Für die Messdatenerfassung vor Ort sind zunächst geeignete Instrumentenstandpunkte sicherzustellen. Bei der Standpunktwahl gilt es eine gute Schnittgeometrie der Bildstrahlen einzuhalten, weshalb ein Verhältnis von Objektabstand zur Basis zwischen den Standpunkten von etwa 1:3 bis 1:4 empfohlen wird. Die Anzahl der Standpunkte ist abhängig von der gewünschten Genauigkeit, dem Objektabstand bzw. der Bildauflösung und der Geometrie des Objekts selbst. Durch das eingeschränkte Sichtfeld der Kamera empfiehlt sich außerdem eine konvergente Anordnung um das Messobjekt. Die Genauigkeit der sich anschließenden Stationierung trägt direkt zur Qualität der späteren Georeferenzierung bei, weshalb diese möglichst präzise unter Nutzung von Zwangszentrierungen erfolgen sollte. Um eine bestmögliche Überlappung benachbarter Messbilder herzustellen, wird das Instrument stets sorgfältig horizontalisiert –

| Modus | Reichweite [m] | Distanzmessrauschen in [mm] auf | | |
|---------|-------------------|---------------------------------|-------|-------|
| | | 50 m | 100 m | 200 m |
| 1000 Hz | 300 | 1,0 | 2,0 | 6,0 |
| 250 Hz | 400 | 0,8 | 1,0 | 3,0 |
| 62 Hz | 500 | 0,6 | 0,8 | 2,0 |
| > 1 Hz | 1000 | 0,6 | 0,8 | 1,8 |

Tabella 1: Eigenschaften der Scanmodi der MS50 (Leica Geosystems 2014, S. 72)

schließlich wird die Teleskopkamera je nach Restneigung des Tachymeters entsprechend verschwenkt.

Durch das eingeschränkte Sichtfeld der 30-fachen Vergrößerung der Teleskopkamera werden mehrere Bilder pro Standpunkt benötigt, um den Aufnahmebereich von Interesse (engl. Region of Interest – ROI) abzubilden. Diese werden in einem regelmäßigen Raster mit ca. 60% Überlappung aufgenommen, was 0,65 gon (58%) horizontal und 0,5 gon (57%) vertikal entspricht. Während jeder Bildauslösung wird zusätzlich die Pixelkoordinate der Strichkreuzposition sowie die Horizontalrichtung und der Zenitwinkel gespeichert. Pro Standpunkt entsteht so ein Bildverbund, dessen absolute Ausrichtung im Raum, als auch dessen absolute Kameraposition bekannt ist. Zur späteren Georeferenzierung werden softwarebedingt allerdings Passpunkte am Objekt benötigt, weshalb vom ersten Standpunkt einige über die ROI verteilte, gut zu messende Punkte festgelegt werden und zusätzlich zu Bild, Strichkreuzposition und Winkel auch die jeweilige Strecke erfasst wird, um die Objektkoordinate im entsprechen-

den Koordinatensystem zu berechnen. Von allen weiteren Standpunkten werden diese Koordinaten wieder angefahren und ebenfalls die oben genannten Parameter und Bilder registriert. Als Ergebnis erhält man so identische Koordinaten am Objekt, sowie mehrere Bildverbände mit korrespondierenden Pixelpositionen pro Einzelbild (Strichkreuzpositionen), welche zur Referenzierung dienen (Abb. 2). Zur Automatisierung dieser Prozesse wird die MS50 über GeoCOM-Befehle mit der Control-Software MoDiTa 2.0 gesteuert, welche seit 2009 am i3mainz entwickelt wird.

2.2 VORVERARBEITUNG ZU PANORAMEN

Um die bildbasierte Berechnung von 3D-Punktwolken automatisiert mit der kommerziellen Software Agisoft Photoscan durchführen zu können, ist es zielführend, vorab jeweils alle Messbilder eines Tachymeterstandpunkts in ein gemeinsames Panoramabild zu überführen. Mit der im Folgenden skizzierten Strategie kann die Verzeichnung des Messfernrohrs ohne explizite Vorabkalibrierung sehr weitgehend elimi-

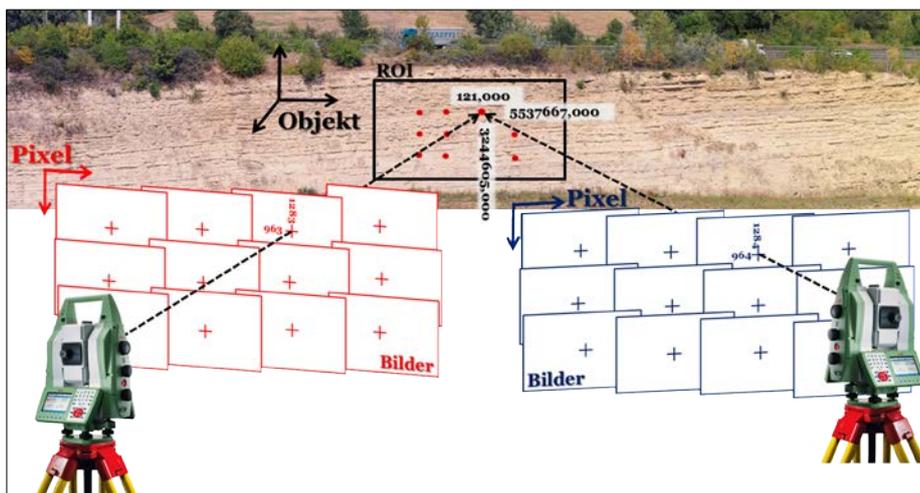


Abbildung 2: Messstrategie

nirt werden, wie wir über die Analyse der Endergebnisse belegen. Ort und Ausrichtung der Bildebene des zentralperspektivischen Panoramabilds („Panoramaebene“) orientieren sich an der Zielachse des mittleren Messbilds und der Lotrichtung (Abb. 3).

Pro Messbild können die zugehörigen Bildkoordinaten des Tachymeterstrichkreuzes im Panoramabild mittels räumlichen Geradenschnitt direkt aus den Tachymeterablesungen berechnet werden. Ein Template von 200×200 Pixeln um diesen Schnittpunkt herum wird bezüglich des gesamten Panoramabilds als geometrisch korrekt angenommen. Der restliche Teil jedes Messbilds wird als potenziell verzeichnungsbehaftet betrachtet. Insgesamt gesehen wird die Auflösung der Messbilder für das Panoramabild in etwa übernommen. Die Projektion eines einzelnen Messbilds in das Panoramabild wird quadrantenweise vorgenommen (Abb. 4).

Die drei außen liegenden Punkte eines Quadranten werden mittels projektiver Abbildung derart in das Panoramabild überführt, dass die jeweiligen lokalen Bildinhalte mit den als geometrisch korrekt angenommenen Templates der benachbarten Messbildmitten übereinstimmen. Auf diese Weise wird in acht Richtungen von der Bildmitte nach außen ein linearer Anteil der radialsymmetrischen Verzeichnung je nach aktueller Fokussstellung bestmöglich berücksichtigt. Pro Messbild wird die Autofokussfunktion eingesetzt und die Belichtungszeit wird automatisch an die jeweils herrschenden Lichtverhältnisse angepasst – wobei die dabei tatsächlich auftretenden Änderungen in der Regel nur geringfügig sind.

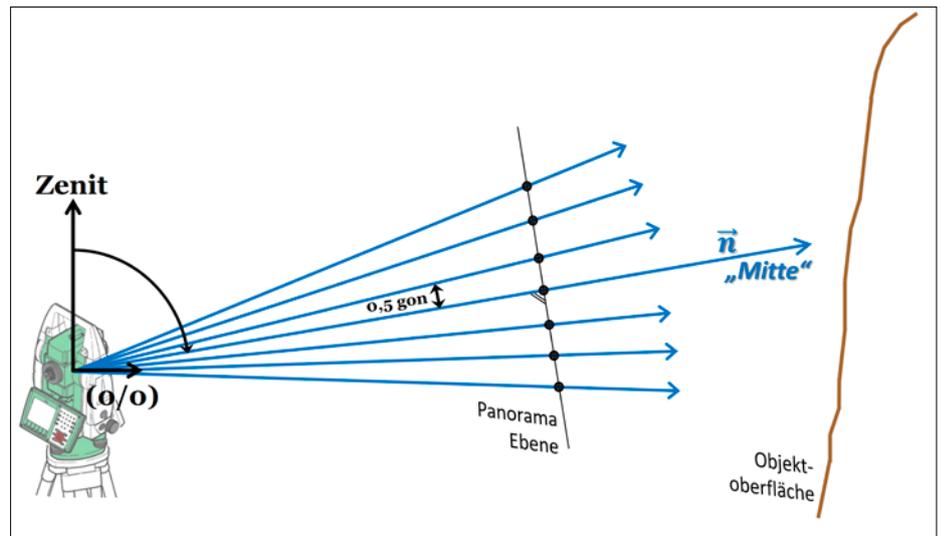


Abbildung 3: Lage der Bildebene des Panoramabilds in einem Tachymeterstandpunkt

Wir hatten uns für diese Strategie entschieden, weil sich in den Folgearbeiten zu Schlüter et al. (2009) gezeigt hatte, dass beim Messfernrohr mit (aus photogrammetrischer Sicht) langer Brennweite primär Effekte durch die Restneigungen der Sensorebene bzgl. der Zielachse zu korrigieren sind und die von Weitwinkeloptiken bekannten radialsymmetrischen Anteile in der Regel vernachlässigbar sind; ähnlich kommentiert auch (Wagner 2016).

Als Software für die Umprojektion der Messbilder in je ein Panoramabild wird das Open-Source-Bildverarbeitungsprogramm ImageJ genutzt. Es bietet neben fertigen Werkzeugen sowohl die Option zur Integration nutzereigener Plug-ins als auch der eigenen Makro-Programmierung. Für die oben angesprochene Bildzuordnung wird auf das Plug-in cvMatch-Template zurückge-

griffen, welches die Template-Matching-Funktion der OpenCV-Bibliothek nutzt. Als Suchmethode empfiehlt sich der normalisierte Korrelationskoeffizient, da dieser für den vorliegenden Fall (unterschiedliche Helligkeiten und Kontraste wegen Helligkeitsabfall zum Bildrand; keine nennenswerte Rotation der Bildinhalte) optimale Ergebnisse verspricht. Für Transformation und Resampling wird das Plug-in Projective Mapping genutzt; für ImageJ und beide Plugins (vgl. Burger & Burge (2015)). Schlägt das Template-Matching lokal fehl, z. B. in texturarmen Bereichen, so lassen sich die fehlenden Zuordnungsergebnisse aus der Gesamtzahl aller Matchingergebnisse eines Panoramabilds grundsätzlich erfolgreich lokal interpolieren (Schmenger 2016).

Wie beim digitalen Mosaikieren generell üblich, wird die Gewichtung einzelner

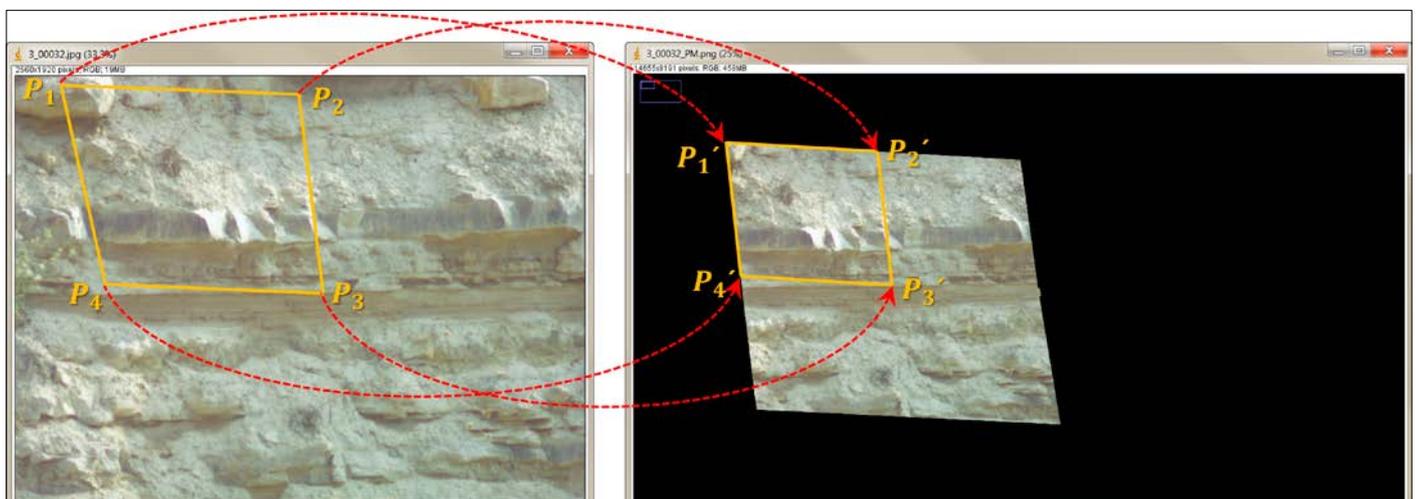


Abbildung 4: Konzept der projektiven Abbildung eines Messbildquadranten (links) in das zugehörige Panoramabild (rechts)

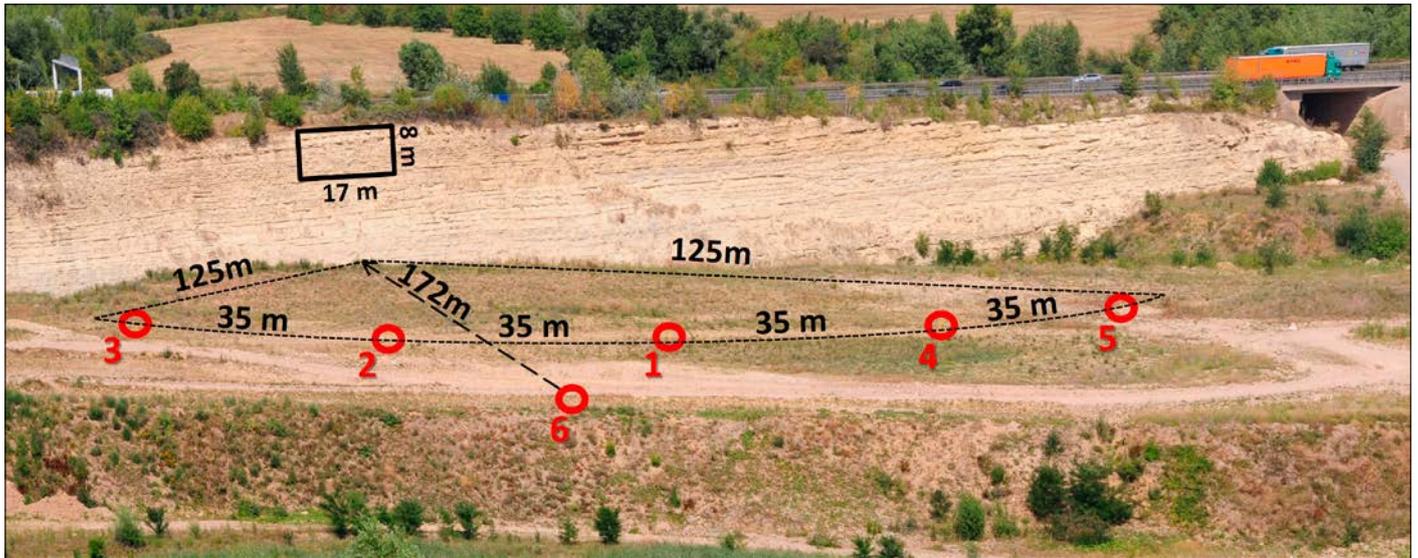


Abbildung 5: Aufnahmesituation

Grauwerte zum Bildrand hin zurückgenommen. Durch die relativ große Überlappung gewinnen die Panoramabilder im Vergleich zu den einzelnen Messbildern visuell wahrnehmbar an Bildqualität, u. a. durch ein reduziertes Bildrauschen.

2.3 3D-PUNKTWOLKEN-GENERIERUNG

Die bildbasierte Rekonstruktion einer dreidimensionalen Szene basiert auf orientierten Kamerabildern und korrespondierenden Merkmalspunkten in den Bildern. Dieses Verfahren wird auch als Structure from Motion bezeichnet, da die dreidimensionale Oberfläche (Structure) aus dem Bildverband erstellt wird, deren Perspektivveränderung auch als Bewegung der Kamera (Motion) verstanden werden kann.

Zur automatisierten Berechnung nutzen wir die Software PhotoScan der Firma Agisoft LLC. Diese berechnet zunächst die Kameraparameter sowie Aufnahmepositionen und Ausrichtungen der einzelnen Panoramen, also innere und äußere Orientierung, mittels Bündelblockausgleichung. Die bekannten Standpunktkoordinaten des Tachymeters, die identisch mit den Projektionszentren der Bildpanoramen sind, fließen als Näherungskoodinaten im Maß der Stationierungsgenauigkeit in die Berechnung ein. Zur Optimierung der Kamerapositionen und Bildausrichtungen sowie zur Georeferenzierung (absoluten Orientierung der Bilder) werden normalerweise Passpunkte am Objekt (Ground Control Points) auf den Bildern markiert. Da hier bei der Messdatenerfassung direkt die Pi-

xelkoordinaten der Passpunkte erfasst werden, können diese nach Umrechnung in das Panoramapixelkoordinatensystem über XML-Dateien in PhotoScan importiert werden. Das händische Markieren der Passpunkte in den Messbildern entfällt daher vollständig.

Die abschließend seitens Photoscan durchgeführte Berechnung der 3D-Punktwolke basiert auf einem allgemeinen räumlichen Vorwärtsschnitt der Richtungsvektoren homologer Punkte in den Panoramabildern. PhotoScan bietet sechs Klassen der Rekonstruktionsqualität, wobei „sehr hoch“ die Original-Pixelanzahl verwendet (pro Pixel wird ein 3D-Punkt erstellt) und in jeder folgenden Qualitätsstufe die Pixelanzahl um den Faktor vier (zwei in Zeilen- und Spaltenrichtung) herunterskaliert wird.

3 FELDVERSUCH ZUR QUALITÄTSANALYSE

Zur Evaluierung der Aufnahmestrategie und zur Beurteilung der geometrischen Qualität der resultierenden 3D-Punktwolke wurden mehrere, voneinander unabhängige Messkampagnen zur 3D-Rekonstruktion einer Steilwand im ehemaligen Steinbruch Mainz Laubenheim vorgenommen. Neben der vorgestellten tachymetrisch-photogrammetrischen Lösung wurde ergänzend ein klassischer 3D-Laserscan mit der MS50 durchgeführt, welcher den Ergebnissen der entwickelten Aufnahmestrategie gegenübergestellt wird. Als Referenz wurde ein 3D-Laserscan mit einem terrestrischen Laserscanner Leica P20 aus erheblich kürzeren Distanzen von etwa 30 m bis 40 m erstellt.

3.1 TACHYMETRISCH-PHOTOGRAMMETRISCHE LÖSUNG

Die tachymetrisch-photogrammetrische Aufnahme mit der MS50 erfolgte von sechs Standpunkten, wobei auf jedem Standpunkt 112 (= 14×8) überlappende Einzelbilder der Koaxialkamera inkl. Teilkreis- und Kompensatorablesungen registriert wurden (Abbildung 5). Zur Georeferenzierung wurden von jedem der sechs Standpunkte aus zusätzlich zwölf weitere, gut über den Aufnahmebereich verteilte Messbilder aufgenommen, bei denen zusätzlich auch die Schrägdistanzen registriert wurden. Die Tachymeterzielungen erfolgten aus durchschnittlich 125 m Entfernung. Lediglich der Standpunkt 6 war mit 172 m weiter zurückgesetzt. Um gute Schnittbedingungen am Objekt zu garantieren, wird eine Basis zwischen den Standpunkten von 35 m eingehalten, was einem Verhältnis (Basis : Objektabstand) von ca. 1:3,5 entspricht.

Der als Referenzobjekt genutzte Teil der Steilwand hat eine Größe von ca. 8 m x 17 m. Die Aufnahme der Bildserie pro Standpunkt beanspruchte ca. 10 Minuten, sodass bei sechs Standpunkten, unter der Annahme von ca. 10 Minuten Stationierung und Standpunktwechsel, von einer Gesamtmessdauer von ca. 1,5 Stunde ausgegangen werden kann.

Nach der anschließenden Vorverarbeitung der Einzelbilder zu Panoramen pro Standpunkt wird die Punktwolke mit Agisoft PhotoScan entsprechend Abschnitt 2.3 berechnet. Der Total Error aus Kameraausrichtung und Passpunkten beträgt 0,005 m.

Die resultierende Punktwolke, die mit der Rekonstruktionsqualität „Medium“ (ein Punkt für jedes vierte Pixel in Zeilen- bzw. in Spaltenrichtung) erstellt wird, umfasst 7,1 Millionen Punkte (Abbildung 6).

3.2 TACHYMETRISCHER 3D-SCAN

Zur späteren Gegenüberstellung wurde außerdem die Scaneigenschaft der MS50 genutzt, um eine Punktwolke aus ca. 125 m Entfernung von einem einzelnen Standpunkt (Standpunkt 1; vgl. Abb. 5) aufzunehmen. Bei der Scandefinition wurde der 1000 Hz Scanmodus verwendet. Dieser ist bis zu 300 m Reichweite verfügbar und profitiert von einer vergleichsweise schnellen Messdauer (für den ausgewählten Bereich ca. 48 Min.). Prämisse ist allerdings ein Distanzrauschen von 2,0 mm auf 100 m zusätzlich zu der anzunehmenden 3D-Positionsgenauigkeit der modellierten Fläche von 2 mm + 2 ppm auf 500 m Entfernung (Leica Geosystems 2014, S. 72). Die Wahl anderer Scanmodi führt theoretisch zur Reduzierung des Messrauschens, was sich allerdings exponentiell auf die Messdauer auswirkt (2:40 h bei 250 Hz, 29:00 h bei 62 Hz und mehr als 269 h bei > 1 Hz). Die kaum zu realisierenden, hohen Messzeiten für Distanzen größer als 500 m zeigen deutlich, dass die Scaneigenschaften der MS50 nicht primär für das hoch aufgelöste Erfassen von entfernten Objekten ausgelegt sind.

Weiterhin erwähnt sei, dass die angegebenen Zeitangaben auf einer Scanauflösung von einem Zentimeter sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen beruhen. Die Scanauflösung lässt sich als Ver-

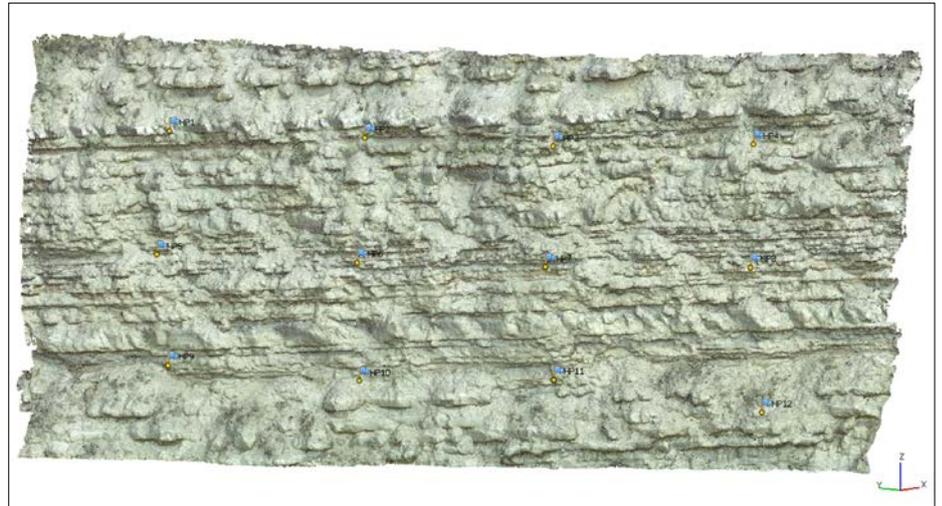


Abbildung 6: 3D-Punktwolke aus Agisoft PhotoScan

hältnis zwischen Objektabstand und Punktrasterabstand am Objekt definieren.

Die Georeferenzierung des Scans beruht auf der Stationierung des Standpunkts nach der Methode des polaren Anhängens. Die resultierende Punktwolke umfasst 2,2 Millionen Punkte.

3.3 TERRESTRISCHES LASERSCANNING

Zur Aufnahme der Referenzpunktwolke wurde die Leica Scanstation P20 eingesetzt, da diese auf kurze Distanzen gute Genauigkeiten liefert. Der Hersteller gibt die Genauigkeit einer einzelnen 3D-Position auf 50 m Entfernung mit einer Standardabweichung (1σ) von 3 mm an. Zusätzlich wird ein Distanzrauschen zwischen $\pm 0,7$ mm (weiße Oberfläche, Reflexionsgrad 100%) und $\pm 1,1$ mm (graue Oberfläche, Reflexionsgrad 28%) bei einer Entfernung von 50 m

erwartet (Leica Geosystems 2013, S. 129-131). Von zwei Standpunkten aus fanden je ein 360°-Rundumscan mit 6,3 mm Scanauflösung und ein Detailscan des hier zum Vergleich relevanten Bereichs mit einer Auflösung von 1,6 mm statt (Scanauflösung bezogen auf 10 m Objektdistanz) (vgl. Abbildung 7).

Die Registrierung der Einzelscans sowie die Georeferenzierung der Punktwolken fand über sechs Black & White Tilt- und Turntargets statt, welche zuvor tachymetrisch bestimmt wurden. Als Resultat ergibt sich ein mittlerer absoluter Fehler von ± 3 mm. Die registrierte Punktwolke des Detailscans umfasst 34,4 Millionen Punkte.

4 ERGEBNISSE DES FELDVERSUCHS UND BEWERTUNG

Zur Bewertung der gewonnenen 3D-Punktwolken werden Vergleiche der Punktwolken mit der Open-Source-Software CloudCompare vorgenommen. CloudCompare berechnet Distanzen zwischen den Punktwolken primär mit einer lokalen Modellierung, was einer quadratischen Funktion mit 6 Parametern der Form

$$Z = a \cdot X^2 + b \cdot X + c \cdot XY + d \cdot Y + e \cdot Y^2 + f$$

entspricht (CloudCompare 2015, S. 108). Softwareintern werden die Distanzen aus der lokalen Modellierung mit (in der Regel eher größeren) Distanzen gemäß dem mathematischen Modell der Nächste-Nachbar-Distanz verglichen. Verwendet wird anschließend jeweils das Minimum beider Modelle. Es können also keine größeren

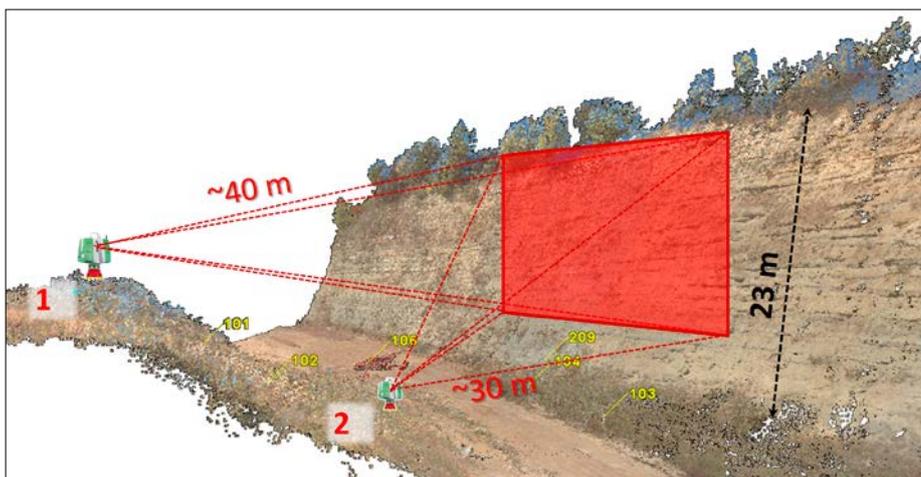


Abbildung 7: 3D-Scans mit dem Laserscanner Leica P20

Distanzen als die Nächst-Nachbar-Distanzen resultieren. Nach der Berechnung kann die Punktwolke entsprechend den Abweichungen zur Referenzpunktwolke zu einer sogenannten Inspection-Map eingefärbt werden.

Der Vergleich der P20 Scanpunktwolke mit der tachymetrisch-photogrammetrisch ermittelten 3D-Punktwolke aus den Image-Panoramen ergibt eine maximale Abweichung von 0,183 m. Da allerdings 99,5% aller Differenzen unter 30 mm liegen, werden alle darüber liegenden Werte als Ausreißer deklariert. Abbildung 8 zeigt die Inspection-Map der Punktwolke. Der Mittelwert aller Abweichungen beträgt -1 mm, die Standardabweichung ± 7 mm.

Mehr Aussagekraft über die Qualität der Punktwolke liefert allerdings die Häufigkeitsverteilung der einzelnen (absoluten) Abweichungen, wie in Abbildung 9 dargestellt.

Auch die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der MS50 Scan-Punktwolke zeigt, dass 99,9% aller Punkte unter 30 mm zu finden sind, weshalb auch hier eine Beschränkung auf dieses Maß stattfindet. Die maximale Abweichung beträgt davor 0,145 m. Anhand der Inspection-Map ist gut zu erkennen, dass die Scanpunktwolke homogener ist, aber insgesamt etwas schlechter passt (Abbildung 10). Dies zeigt auch die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen (Abb. 11) sowie die Standardabweichung von ± 8 mm.

Geht man den vereinzelt auftretenden, größeren Abweichungen zwischen den Punktwolken exemplarisch auf den Grund, so werden die unterschiedlichen Blickrichtungen aller drei Scans und die damit verbundene, jeweils unterschiedliche Sichtbarkeit der Steilwandbereiche als zumindest eine Ursache für systematische Anteile in den Abweichungen deutlich: Von den eher nahe an der Steilwand und vergleichsweise tief liegenden Standpunkten der P20 aus sind vielfach die Unterseiten der vorstehenden Gesteinsschichten einsehbar, welche von den entfernter liegenden Tachymeterstandpunkten aus, mit etwa horizontal verlaufenden Blickrichtungen, nicht sichtbar sind. In ähnlicher Weise ist die von sechs Tachymeterstandpunkten aus gewonnene 3D-Punktwolke hinsichtlich der möglichen Einsehbarkeit ein wenig vollständiger als die nur von dem mittleren Tachymeterstandpunkt aus direkt gescannte 3D-Punktwolke.

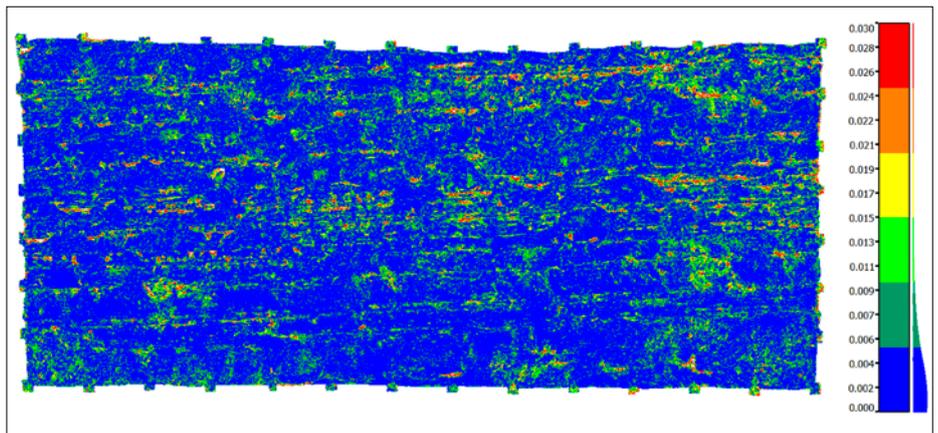


Abbildung 8: Inspection-Map zum tachymetrisch-photogrammetrischen 3D-Scan; Referenz ist der P20-Scan

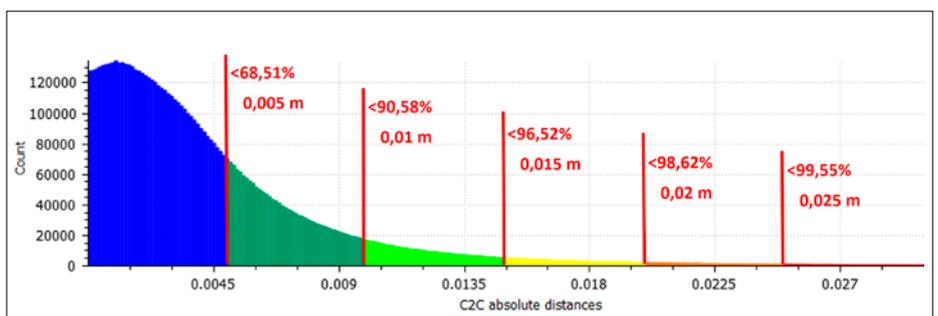


Abbildung 9: Histogramm der Häufigkeitsverteilung zum tachymetrisch-photogrammetrischen 3D-Scan; Referenz ist der P20-Scan

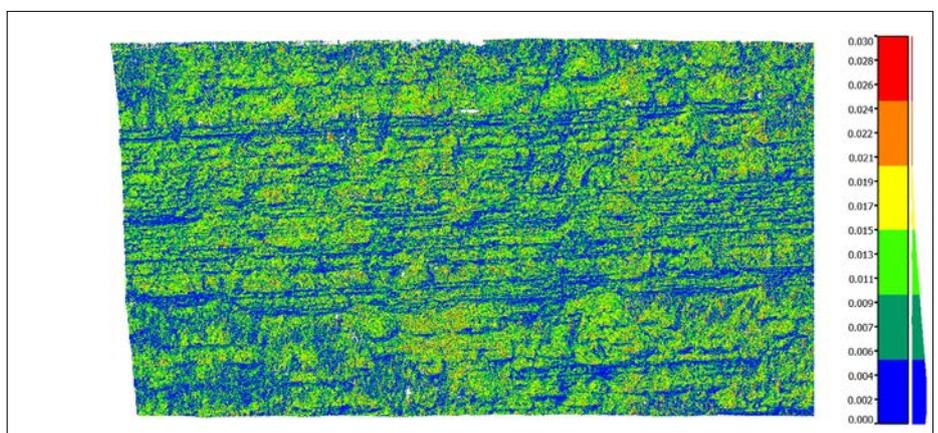


Abbildung 10: Inspection-Map zum rein tachymetrischen 3D-Scan; Referenz ist der P20-Scan

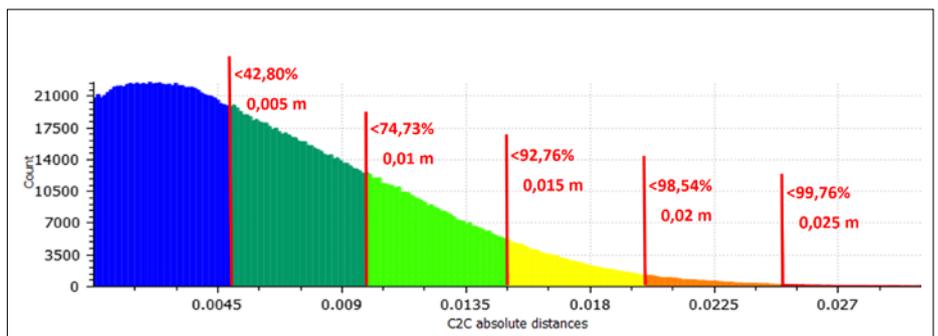


Abbildung 11: Histogramm der Häufigkeitsverteilung zum rein tachymetrischen 3D-Scan; Referenz ist der P20-Scan

Die geringfügigen systematischen Abweichungen, die in den Abbildungen 8 bis 11 erkennbar sind, lassen sich so also zumindest teilweise auf einfache physikalische Ursachen zurückführen und sind im Hinblick auf die erreichte Genauigkeit am Objekt sogar eher positiv als zu pessimistisch zu bewerten.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Die vorgestellte Strategie zur direkten Erfassung georeferenzierter, dreidimensionaler Punktwolken mittels bildgebender Tachymeter, hier der Leica Nova MS50, und SfM-Auswertetechniken, hier der Software Agisoft PhotoScan, kann aufgrund der erzielten Ergebnisse als verifiziert gelten (Bretscher 2015). Die SfM-Auswertung mit

einer Standardabweichung von 3 mm bewerten wir als sehr gut. Des Weiteren lässt die geringe Standardabweichung von 7 mm der Abweichungen der photogrammetrisch ermittelten Punktwolke auch in puncto absoluter geometrischer Genauigkeit auf hohe Qualität schließen. Damit konnte nachgewiesen werden, dass der photogrammetrische Ansatz mittels Tachymeter auf Entfernungen größer einhundert Meter in der Lage ist, innerhalb weniger Stunden Messdauer geometrisch hochwertige 3D-Punktwolken zu generieren, obwohl nur vereinzelte reflektorlos gemessene Strecken in das Gesamtergebnis einfließen müssen. Dadurch ist zu erwarten, dass sich das hier erstmals erprobte Verfahren ebenfalls erfolgreich für die angestreb-

ten Reichweiten um und größer als 1000 m einsetzen lässt, und zwar bei etwa gleichbleibender Messdauer. Als Limitation gegenüber dem direkten 3D-Scanning bleibt, dass mehrere Instrumentenstandpunkte besetzt werden müssen.

Last but not least bietet der hier dargestellte Ad-hoc-Ansatz eine interessante Referenz für aktuelle und zukünftige Arbeiten zur Modellierung und Kalibrierung des gesamten Sensorsystems eines bildgebenden Tachymeters. Trotz Verzicht auf eine explizite geometrische Modellierung wird mit einer algorithmisch eher einfachen Vorgehensweise eine geometrisch hochwertige Ergebnisqualität erzielt.

Literatur

- Burger, W.; Burge, M. J. (2015): Digitale Bildverarbeitung: Eine algorithmische Einführung mit Java. Springer, Berlin/Heidelberg/New York, S. 599 ff.
- Bretscher, R. (2015): 3D-Mine-Mapping – Entwurf, Erprobung und Bewertung innovativer Strategien. Masterarbeit, Hochschule Mainz.
- CloudCompare (2015): CloudCompare Version 2.6.1 User Manual. <http://www.cloudcompare.org/>.
- Denis, J. (2014): Entwurf und Erprobung einer Prozesskette für Photogrammetry-on-demand mit einem Tragschrauber. Bachelorarbeit, Hochschule Mainz.
- Ehrhart, M.; Lienhart W. (2015): Image-based dynamic deformation monitoring of civil engineering structures from long ranges. In: Proc. SPIE 9405, Image Processing: Machine Vision Applications VIII, 94050J, Stuttgart, 2015.
- Guillaume, S.; Clerc, J.; Leyder, C.; Ray, J.; Kistler, M. (2016): Contribution of the Image-Assisted Theodolite System QDaedalus to Geodetic Static and Dynamic Deformation Monitoring. In: Proceedings of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Wien, 2016.
- Hauth, S.; Schlüter, M.; Thiery, F. (2012): Modular Imaging Total Stations – Sensor Fusion for high precision alignment. In: Schwieger, V. et al. (Eds.): 3rd International Conference on Machine Control & Guidance Proceedings, Stuttgart, 2012, S. 202-210.
- Hauth, S.; Schlüter, M.; Thiery, F. (2013): Schneller und ausdauernder als das menschliche Auge: Modulare Okularkameras am Motortachymeter. In: allgemeine vermessungsnachrichten (avn), 120 (6), S. 210-216.
- Lato, M. J.; Bevan, G.; Fergusson, M. (2012): Gigapixel Imaging and Photogrammetry: Development of a New Long Range Remote Imaging Technique. In: Remote Sensing, 4/2012, S. 3006-3021.
- Leica Geosystems (2013): Leica ScanStation P20 User Manual, Version 1.1, English. Heerbrugg, Schweiz.
- Leica Geosystems (2014): Leica MS50/TS50/TM50 Gebrauchsanweisung, Version 2.0, Deutsch. Heerbrugg, Schweiz.
- Neitzel, F.; Klonowski, J. (2011): Mobile 3d mapping with a low-cost UAV system. In: Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, IAPRS XXXVIII-1, Zürich, 2011.
- Schlüter, M.; Hauth, S.; Heß, H. (2009): Selbstkalibrierung motorisierter Digitalkameratheodolite für technische Präzisionsmessungen. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 134 (1), S. 22-28.
- Schmenger, F. (2016): Bildgestütztes 3D-Monitoring mit der Multistation Leica MS50. Masterarbeit, Hochschule Mainz.
- Vittuari, L.; Tini, M. A.; Sartì, P.; Serantoni, E.; Borghi, A.; Negusini, M.; Guillaume, S. (2016): A Comparative Study of the Applied Methods for Estimating Deflection of the Vertical in Terrestrial Geodetic Measurements. In: Sensors, 16 (4), 565. doi:10.3390/s16040565.
- Wagner, A. (2016): A new approach for geomonitoring using modern total stations and RGB + D images. In: Measurement, 82, S. 64-74.
- Wagner, A.; Huber, B.; Wiedemann, W.; Paar, G. (2014): Long-Range Geo-Monitoring using Image Assisted Total Stations. In: Journal of Applied Geodesy, 8 (3), S. 223-234.
- Wagner, A.; Wiedemann, W.; Wasmeier, P.; Wunderlich, T. (2016): Monitoring Concepts Using Image Assisted Total Stations. In: International Symposium on Engineering Geodesy, Varaždin, Kroatien, 2016, S. 137-148.