

Detailverbesserung von 3D-Laserscannermessungen durch hoch aufgelöste digitale Bilder am Beispiel von Freileitungsgittermasten

MICHAEL RANZAU¹ & ANSGAR BRUNN¹

Zusammenfassung: 3D-Laserscanning und Nahbereichsphotogrammetrie lassen sich in vielen Anwendungsgebieten kombiniert einsetzen. Aktuell überwiegen Verfahren zur Texturierung und zur Genauigkeitssteigerung der Laserpunktwolke durch unterstützende photogrammetrische Aufnahmen. Dieser Artikel beschreibt und bewertet eine neue Kombinationsmöglichkeit der beiden 3D-Messverfahren Photogrammetrie und 3D-Laserscanning, um die in großer Entfernung stark verrauschten Laserscanpunktwolken mittels photogrammetrischer Methoden drei-dimensional geometrisch zu verdichten. Möglich wird dies durch die in den photogrammetrischen Daten hohen, skalierbaren Pixelauflösungen am Objekt. Gut sichtbare Objektelemente werden dabei als Passpunkte zwischen den beiden Messsystemen verwendet und dienen der Maßstabsübertragung und der Lösung der Bildorientierung. Erreicht werden Streckenmessgenauigkeiten am Objekt von unter 2mm bei einer Objektentfernung von bis zu 100m. Das Verfahren wurde zur Messung hoher Industriebauten entwickelt und wird anhand eines Freileitungsgittermasts vorgestellt.

1 Motivation

Terrestrische Laserscanner reichen weit und erfassen akkurat und schnell ihre gesamte Umgebung. Die Qualität der Ergebnisse hängt unter anderem von der Punktdichte am Objekt, der Spotgröße, dem Auftreffwinkel und dem Reflektionsvermögen der Oberfläche ab. Nehmen diese Kriterien durch äußere Umstände ungünstige Eigenschaftswerte an und vergrößert sich die Objektentfernung auf einen mittleren Bereich von 50m bis zu 100m, erhöht sich das Messrauschen stark und die Qualität der Einzelpunkte verschiebt sich in den Zentimeterbereich. Zudem sind nur wenige Laserscanner in der Lage, entsprechend kleine Winkelschrittweiten zu erzielen. Sind das Objekt komplex und berührungsloses Messen sowie die große Entfernung anwendungsspezifisch, können photogrammetrische Aufnahmen mit hoch aufgelösten Bildern das Laserscanning unterstützen.

Besonders in der Archäologie werden beide Messverfahren bereits seit einigen Jahren kombiniert. Dabei wird die Photogrammetrie eingesetzt, um dichte Punktvolken und Vermaschungen von schwer zugänglichen Bereichen zu erzeugen und um die Laserscanwolken zu kolorieren (BRIESE et al. 2012, CARDENAL et al. 2012, BROSER 2014). Verknüpft werden beide Punktvolken üblicherweise durch 3D - 3D oder 2D - 3D Algorithmen. Aktuelle Matching-Methoden werden in STAMOS 2010 gegenüber gestellt. Dazu gehören die Merkmalsextraktionen im 2D- und 3D-Raum, Bildvergleichsverfahren mit dem texturierten 3D-Modell und das Einhängen des orientierten Bildverbandes in das 3D-Modell (3D - 3D). Eine hardwareseitige Fusionierung der Techniken findet sich bei CLAUSS 2014, in dem für beliebige Objektpunkte im Bild lasergenaue Raumkoordinaten

¹ Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Röntgenring 8, 97070 Würzburg; E-Mail: [michael.ranzau, ansgar.brunn]@fhws.de

bestimmt werden. Das System besteht aus einer Vollsphären-Panoramakamera mit punktuelltem Lasermessmodul, das vor Ort das Messen von Strecken „im Bild“ möglich macht.

Der Ansatz des neuen Verfahrens besteht in der Verdichtung der in großer Entfernung stark verrauschten Laserscanpunktewolken mittels photogrammetrischen Methoden. Vorgestellt wird dies anhand der Messung von Freileitungsgittermasten. Ziel ist eine Millimetergenauigkeit der Rekonstruktion selbst in der Mastspitze. Das Potenzial des Verfahrens entfaltet sich besonders bei geforderten hohen Genauigkeiten am Objekt in großen Entfernungen. Die einfache Handhabung, ohne das Anbringen von Passpunkten, und die zum Teil sehr kostenarmen Instrumente leisten ihren Beitrag, um die Messmethoden effizient kombinieren zu können.

Im Folgenden wird zunächst auf die Anlage der Laserscannermessung eingegangen, gefolgt von der Messung und der Verarbeitung der photogrammetrischen Daten (Kap. 3) und dem Zusammenführen der Daten (Kap. 4). Zum Schluss werden die Ergebnisse diskutiert.



Abb. 1: Panoramabild aus der Mitte des Masts. Zu sehen sind der Bewuchs und die Schienen.

2 Laserscanning

Terrestrische Laserscanner mit Reichweiten um die 100m sind mittlerweile einige auf dem Markt vorhanden. Nur in geringen Entfernungen kann eine Millimetergenauigkeit erreicht werden. Verloren geht in großen Entfernungen die Detailtreue durch das Entfernungsrauschen, das begrenzte Winkelinkrement, die Spotgröße des Lasers, die mit zunehmender Entfernung oft flach werdenden Auftreffwinkel und die Reflexionseigenschaften des Objektmaterials. Im Nahbereich

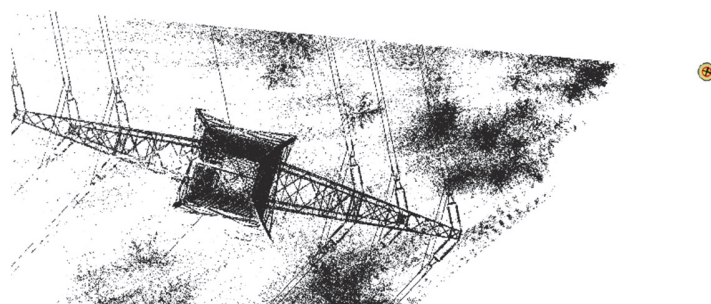


Abb. 2: Die Draufsicht auf die Laserscannerpunktewolke zeigt die Aufnahmeposition des Laserscanners (oben rechts). Der Scannerstandpunkt ist so platziert, dass die Auftreffwinkel für die Passpunkte möglichst frontal sind, jedoch alle Passpunkte sichtbar bleiben.

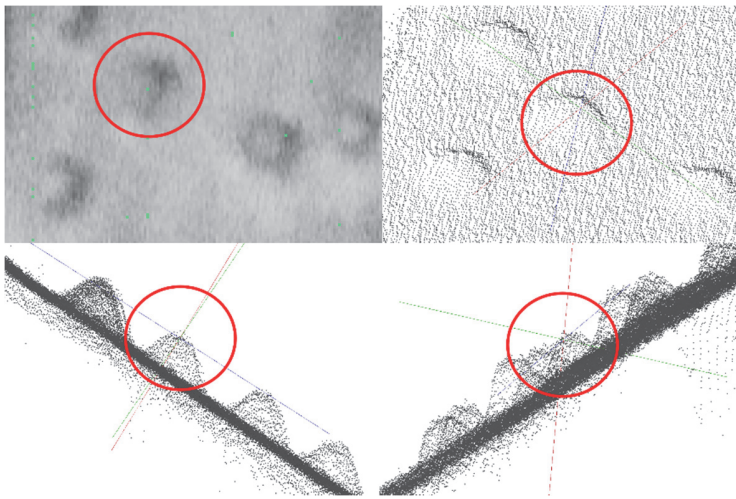


Abb. 3: Markierung einer Schraube aus mehreren Ansichten. Im unteren Mastbereich lassen sich Schrauben und ihr Mittelpunkt in der 3D-Ansicht gut erkennen. Der Schraubenmittelpunkt lässt sich am besten markieren, wenn das Objekt gedreht und die Ansicht mehrmals verändert wird (rechts und links unten). Oben links: Ausschnitt des Intensitätsbilds.

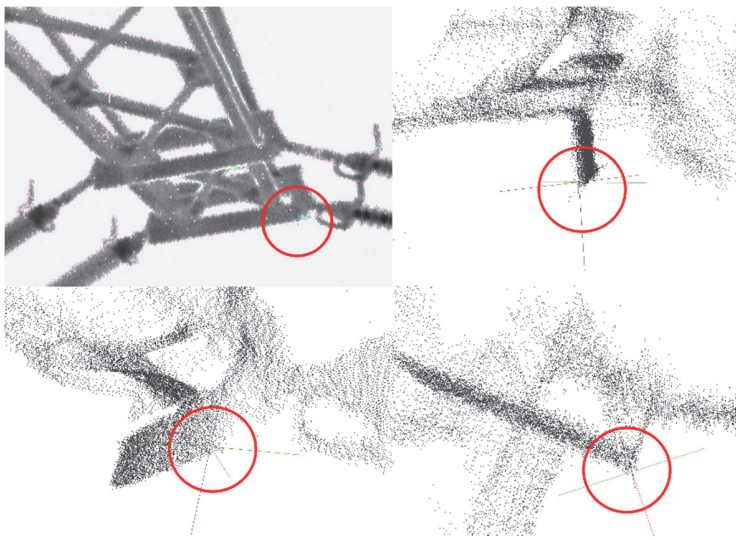


Abb. 4: Im oberen Mastbereich können nur noch Ecken von Blechen als Passpunkte verwendet werden. Zu sehen ist, wie der exakte Eckpunkt in der 3D-Ansicht optisch interpoliert wird. Für ein besseres optisches Verständnis wird die Ansicht mehrmals gedreht (rechts und links unten). Oben links: Ausschnitt des Intensitätsbilds.

lassen sich Objektpunkte hingegen direkt und präzise abgreifen. Ab einer bestimmten Entfernung ist es jedoch notwendig, die Punktwolken zu verdichten und zu präzisieren, und zwar mittels Photogrammetrie (Kap. 3). Der Bildverband wird dabei in das Objektkoordinatensystem des Laserscanners eingepasst und so ein nahtloser Übergang zwischen den beiden Systemen hergestellt (Kap. 4), wozu gut verteilte Passpunkte benötigt werden. Aufgrund der zu berücksichtigenden Unzugänglichkeit des Objekts, sind als Passpunkte natürliche Ziele am Objekt selbst auszumachen. Um dem Messrauschen entgegenzuwirken, werden flächenhafte und optische Interpretation von Punktmengen eingesetzt. Eckpunkte lassen sich beispielsweise über die Verschneidung von zuvor gemittelten Flächen berechnen. Gemessen wird generell nur von einem Standpunkt aus, um Fehlereinflüsse auf die 3D-Strecken durch weitere Transformationen zu vermeiden. Daher spielt die Standpunktwahl eine wichtige Rolle. Das Objekt muss vollständig sichtbar sein und die Passpunkte in einem guten Winkel zum Laserscanner liegen.

In diesem Fall ist das Messobjekt ein ca. 60m hoher Freileitungsgittermast, umgeben von 6m hohem Bewuchs mit einigen Schneisen (Abb. 1). Ab einer Entfernung von etwa 15m lässt der Bewuchs nach und lässt den Blick auf den gesamten mittleren und oberen Mastbereich zu. Zielgrößen der

Messungen sind die Bohrlochmittenabstände auf den Stäben und die Profilgrößen von Schrauben und Stäben. Für die Bohrlochabstände werden direkt die Schrauben angemessen. Für die Profile meist Kanten und Eckpunkte. Als Laserscanstandpunkt eignet sich ein Bereich, der den gesamten Masten mit seinen 4 Traversen (2 links, 2 rechts) freigibt und verwertbare Auftreffwinkel für Bleche und Schrauben, die als Passpunkte dienen, bereitstellt (Abb. 2). Verwendet wird der FHWS eigene IMAGER 5010 der Zoller+Fröhlich GmbH, mit der höchsten Scanauflösung (Winkelinkrement $<1\text{mm}$ auf 100m) und Qualität. Im unteren Bereich lassen sich direkt die Schrauben erkennen und auch als Passpunkte verwenden (Abb. 3). Weiter oben nimmt die Genauigkeit zur Identifikation der Schraubmittelpunkte ab. An den Traversen werden die Ecken von Blechen, durch eine optische Interpolation in der Punktwolke, identifiziert (Abb. 4). Insgesamt werden 19 natürliche Passpunkte festgelegt (Abb. 5). Objektpunkte können bis zu einer Masthöhe von 15m gemessen werden. Um auch den bewachsenen unteren Bereich vollständig messen zu können, der von außerhalb weder scanbar und photogrammetrisch messbar ist, wird ein zusätzlicher Laserscannerstandpunkt eingeführt, der sich mittig unter dem Mast befindet. Passpunkte zur Photogrammetrie werden hier nicht benötigt.

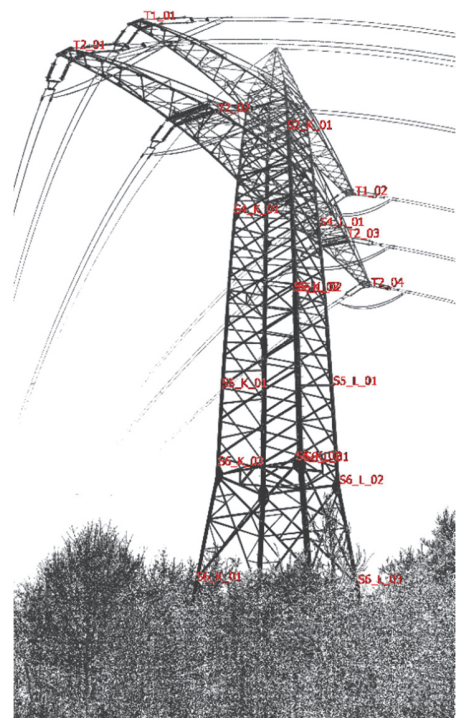


Abb. 5: Intensitätsbild des Laserscans mit markierten Passpunkten (rot markiert und beschriftet).

3 Photogrammetrie

Mit terrestrischer Photogrammetrie wird der Bereich erfasst, der vom Laserscanner nicht mehr hinreichend genau gemessen werden kann. Möglich wird dies durch die Skalierbarkeit der Kamera-Objektiv-Systeme. Das Aufnahme-konzept ermöglicht eine 3D-Objektpunktgenauigkeit, die in etwa der Pixelauflösung am Objekt entspricht. Dabei sorgen große Brennweiten für hohe Auflösungen am Objekt. Als korrespondierende Punkte dienen die Objektpunkte selbst. Je nach Größe des Bildausschnitts sind von jedem der konvergent zueinander angeordneten Standpunkte so viele Aufnahmen vom Objekt zu machen, bis das gesamte Objekt vollständig abgebildet ist. Die Aufnahmen sollten sich mindestens zu 20% überlappen. Zudem sollte jeder Objektpunkt von mindestens 5 Standpunkten aus und

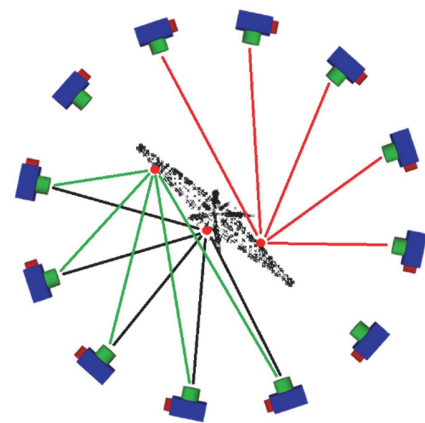


Abb. 6: Ideale Aufnahmekonstellation: Durch 12 gleichmäßig verteilte Standpunkte ist jeder Objektpunkt eines rechtwinkligen Objekts in 5 Bildern sichtbar. Je Standpunkt werden so viele Bilder mit 20% Überlappung aufgenommen, bis das gesamte Messobjekt abgebildet ist.

unter Schnittwinkeln von annähernd 90° sichtbar sein (Abb. 6), um für die Berechnung der Äußeren Orientierung verwendet werden zu können. Besitzt das Objekt genügend Strukturen, sind auch Verfahren aus der Structure From Motion (SFM) denkbar, um die Äußere Orientierung herzustellen. Einhergehend mit der Äußeren Orientierung werden auch die Kameraparameter mitgeschätzt. Wurde die Kamera bereits im Vorfeld für die entsprechende Fokussierung kalibriert und während der Messung nicht mehr verändert, kann auf eine Simultankalibrierung verzichtet werden. Nach erfolgreicher Innerer und Äußerer Orientierung werden alle berechneten 3D-Punkte fixiert. Anschließend werden alle weiteren Messungen durchgeführt.

Ziel der Messung ist es, alle Hauptabmessungen des Freileitungsmast mit $\leq 1\text{cm}$ und den mittleren Mastbereich und die unteren Traversen mit $\leq 1\text{mm}$ zu rekonstruieren. Schrauben- und Profilgrößen müssen für den gesamten Mast bestimmt werden. Die normierten Größen differieren teils nur um 1mm . Um gute Sichten und Schnittwinkel zu erreichen, wird ein Aufnahmeabstand zwischen 20m und 30m gewählt. Für eine hinreichend hohe Auflösung am Mast wird ein 210mm Objektiv auf einer Mittelformatkamera verwendet, wodurch sich Pixelgrößen zwischen $\leq 1\text{mm}$ und 2mm am Objekt ergeben. Der rechteckige

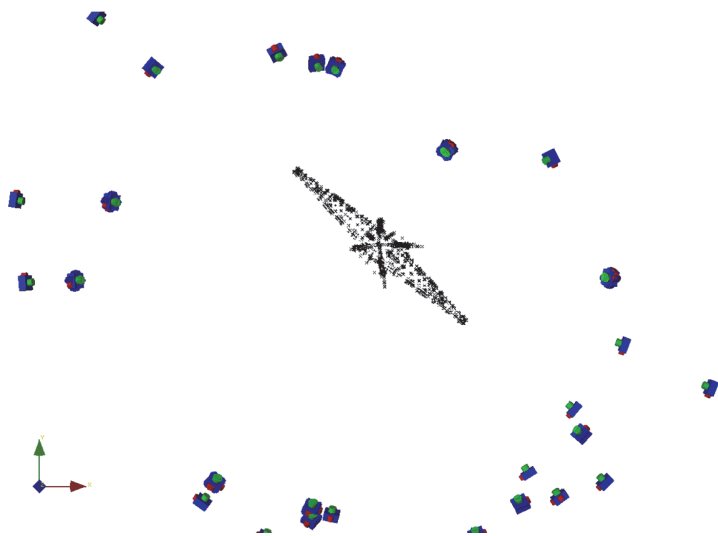


Abb. 7: Reale Aufnahmekonstellation. Gezeigt werden die Standpunkte aller Aufnahmen. Aufgrund der Bedingungen vor Ort kann keine Gleichverteilung der Standpunkte realisiert werden. Der Messablauf verhindert zudem, dass exakt die gleichen Standpunkte zum Fotografieren der einzelnen Mastabschnitte verwendet werden können.

Grundriss ermöglicht es, mit 12 Standpunkten den Mast so zu fotografieren, sodass jeder Objektpunkt in mind. 5 Bildern sichtbar ist und sich Schnittwinkel von annähernd 90° bilden. Aufgrund des Bewuchses kann eine streng regelmäßige Standpunktverteilung nicht vollständig eingehalten werden (Abb. 7). Auf jedem Standpunkt wird der gesamte Gittermast fotografiert. Die einzelnen Bildausschnitte haben Größen zwischen 8m und 15m und überlappen sich zu etwa 20% . Durch die Sichten der unterschiedlichen Standpunkte erhöht sich der Überlappungsbereich nochmals auf ein vielfaches. Insgesamt müssen drei Umfokussierungen vorgenommen werden, um alle Bereiche scharf darzustellen. Pro Fokussierung wird der Mast einmal umrundet und von jedem Standpunkt aus werden alle scharf abgebildeten Bereiche fotografiert.

Wie beim Laserscanning auch müssen die Schraubenmittelpunkte als natürlich Objektpunkte manuell markiert und zudem referenziert werden. Bei mehr als 100 Objektpunkten pro Bild entsteht so ein hoher manueller Aufwand. Die Auswertung beginnt daher mit der Wahl der zu verwendenden Bilder. Aussortiert werden Bilder, die durch die verschiedenen Blickwinkel und Ansichten mehr Überlappungen liefern, als für die Auswertung notwendig sind. Anschließend werden alle Schrauben und Passpunkte markiert und referenziert und der Bildverband über eine

Bündelblockausgleichung orientiert. Tests mit SFM-Verfahren führten bisher wegen der schwachen Kontraste und homogenen Objektoberfläche nicht zum Erfolg und können den Orientierungsprozess daher nicht unterstützen. Für die notwendige Simultankalibrierung und Optimierung der Äußeren Orientierung werden nur Punkte mit starker Geometrie verwendet, die anschließend für weitere Berechnungen als Fixpunkte eingefroren werden. Da die Markiergenauigkeit im Bild bei einem Pixel liegt, beträgt die durchschnittliche 3D-Punktgenauigkeit etwa 1mm –

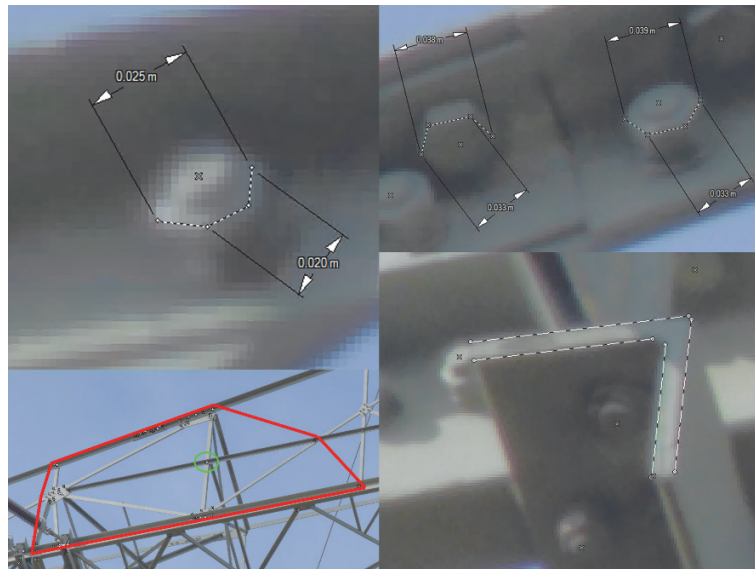


Abb. 8: Markier- und Messvorgang von Schrauben- und Profilgrößen. Einbildmessungen (o. l.) auf einer definierten Ebene aus 3D-Punkten (u. l.). Klassische Mehrbildauswertung und Messung von Linien (o. r.) und Kanten (u. r.).

2mm. In Bereichen mit geringer Distanz zum Gittermast und an stärker überbestimmten Stellen werden teilweise deutlich höhere Genauigkeiten erreicht. Es folgen weitere Messungen zum Bestimmen der Schrauben- und Profilgrößen mittels Vorwärtsschnitt, Einzelbildmessungen auf definierten 3D-Ebenen und Kantenmessungen. Abb. 8 zeigt Beispiele aus den Markiervorgängen.

4 Transformation und Maßstabsübertragung

Der letzte Schritt beim Verdichten der Laserscannermessungen besteht im Zusammenführen der Laserscanner- und der photogrammetrischen Punkte. Letztere sind trotz einer vollständigen Orientierung aufgrund der fehlenden bekannten Strecke im Bild noch maßstabslos. Dazu wird anhand der in beiden Systemen gemessenen Passpunkte eine 3D-Ähnlichkeitstransformation durchgeführt. Eine Formveränderung der Punktmenge findet nicht statt, die photogrammetrischen Punkte werden ausschließlich gedreht, verschoben und skaliert.

Am Beispiel des Gittermasts treten dabei Restklaffungen von durchschnittlich 1cm auf. Dieser Fehler verteilt sich über die gesamte Mastausdehnung und senkt die Genauigkeit der Photogrammetrie, was die Bedeutung der Punktmarkierung im Laserscan hervorhebt. Relativiert werden die Restklaffungen, wenn die einzelnen Zielgrößen der Messung, die Stablängen, betrachtet werden. Eine Stablänge beträgt beispielsweise nur wenige Meter. Eine Restklaffung von 10mm auf 40m Objektausdehnung wirkt sich als relativer Fehler auf einen 2m langen Stab nur noch mit 0,5mm und somit kaum auf die Genauigkeit der Einzelmessungen aus. Systematische Fehler beider Messsysteme wirken sich aufgrund der Lokalität der Messaufgabe nicht aus. Die Maßstabsübertragung mittels terrestrischem Laserscanning kann der Verwendung anderer Verfahren, wie beispielsweise des Einsatzes einer terrestrischen Basislatte, vorgezogen werden

(RANZAU & BRUNN 2014). Die gewonnenen 3D-Objektdaten können als Grundlage für die Erstellung technischer Detailpläne verwendet werden.

Zur Kontrolle der Ergebnisse anhand echter Vergleichswerte, wurden alle Mastelemente unabhängig händisch mit dem Maßband, der üblichen Messmethode für Freileitungsgittermasten, geprüft. Alle geforderten Genauigkeiten wurden im Vergleich durch die berührungslose Lösung eingehalten. Die Positionen der Schrauben weichen vereinzelt zwischen 1mm und 3mm ab, wobei die Gesamtmaße der aufsummierten Stablängen identisch sind. In Bereichen mit einem Grenzwert von 1mm stimmen alle Positionen exakt überein, ebenso die Profilgrößen mit Profilbreite und –stärke. Im übrigen Schaftbereich treten bei der Profilstärke Abweichungen von max. 1mm auf, an den Traversen vereinzelt bis zu 2mm. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit des händischen Aufmaßes zeigt der Vergleich, dass die photogrammetrische Verdichtung von Laserscanner-Punktwolken alle im Messkonzept vorgestellten Leistungen erbringt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein neues Verfahren zur Verdichtung von Laserscannerpunktwolken durch photogrammetrische Aufnahmen vorgestellt. Anhand einer Beispielmessung wurde dargelegt, dass mit dem gezeigten photogrammetrischen Verfahren Genauigkeiten im Bereich der Pixelauflösungen am Objekt möglich sind. Hinzu kommen noch die Einflüsse des Skalierungsfaktors während der Transformation in das Laserscannersystem. Auch hierbei werden die geforderten maximalen Genauigkeitsvorgaben von 1mm eingehalten.

Eine stärkere Automatisierung der bisher händischen Messungen wird in den weiteren Arbeiten untersucht.

6 Dank

Die vorgestellten Arbeiten wurden durch das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur in dem Projekt „ReGit: Berührungslose Rekonstruktion von Gittermasten von Freileitungen“ gefördert. Die Vergleichsmessungen wurden von der LTB Leitungsbau GmbH (Dresden) durchgeführt.

7 Literaturverzeichnis

- BRIESE, C.; ZACH, G.; VERHOEVEN, G.; RESSL, C.; ULLRICH, A.; STUDNICKA, N. & DONEUS, M., 2012: Analysis of mobile laser scanning data and multi-view image reconstruction. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **39** (B), S. 163-168.
- BROSER, L.-M., 2014: 3D-Laserscanning und SFM-Verfahren - Beispiele aus Archäologie und Denkmalpflege. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2014*, Luhmann, T. & Müller, C. (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 260-267.
- CARDENAL, J.; PEREZ-GARCIA, J. L.; MATA, E.; HERNANDEZ, M. A.; MOZAS, A.; DELGADO, J.; LOPEZ-ARENAS, A. & MEROÑO, J. E., 2012: Photogrammetric and LIDAR documentation of the Royal Chapel (Cathedral-Mosque of Cordoba, Spain). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **39** (B5), S. 541-546.
- CLAUSS, 2014: RODEONmetric BASIC. URL: <http://www.dr-clauss.de/de/vermessungstechnik-3/rodeonmetric> (letzter Zugriff: 15.1.2015).
- RANZAU, M. & BRUNN, A., 2014: Photogrammetrische Rekonstruktion von Freileitungsgittermasten. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2014*, Luhmann, T. & Müller, C. (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 182-189.
- STAMOS, I., 2010: Automated registration of 3D-range with 2D-color images: an overview. 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), S. 1-6.