

Bauwerksuntersuchungen durch terrestrisches Laserscanning mit dem Mensi GS100

Klaus MECHELKE, Harald STERNBERG und Thomas KERSTEN

HafenCity Universität Hamburg,
Department Geomatik, Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg

Zusammenfassung

Das terrestrische Laserscanning System Mensi GS100 wurde in zwei Projekten zur Untersuchung von Bauwerken eingesetzt. Anhand der mit dem Laserscanner gewonnenen Daten konnten Bauwerksplanungen mit dem Ist-Bestand hinsichtlich Abweichungen und Kollisionen überprüft werden. Die Ergebnisse zeigen, dass aus Laserscanningdaten abgeleitete Werte sehr umfangreiche Prüfungen zulassen, und dass jedoch bei erhöhten Genauigkeitsanforderungen (besser als 2 mm) das System an seine Grenzen stößt. Da umfangreiche CAD-Modellierungsarbeiten nicht erforderlich sind, können sehr schnell Ergebnisse (Faktor Erfassung/Auswertung 1:1) erzeugt werden.

1 Einleitung

Die Anwendungsgebiete für Laserscanner sind auf den ersten Blick vielfältig und in den meisten bisher durch Tachymetrie und Photogrammetrie beherrschten Anwendungen wird die Einsatzfähigkeit von Scannern seit einigen Jahren getestet. So berichteten JAHN et al. (2004) über die Objektmodellierung einer Industrieanlage und eines historischen Gebäudes aus Laserscannerdaten des CYRAX 2500 und HÖNNIGER & KERSTEN (2005) über den Einsatz des Mensi GS100 bei einer topographischen Geländeaufnahme. HESSE & STRAMM (2004) setzten den IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich für Deformationsuntersuchungen an einem Schleusentor ein und KERSTEN et al. (2006) verglichen den Mensi GS100 und den IMAGER 5003 bei Innenaufnahmen von zwei historischen Sälen im Hamburger Rathaus. Das Laserscanning System Mensi GS100 wird an der HafenCity Universität Hamburg seit September 2003 in einer Vielzahl unterschiedlichster Projekte (JAHN et al. 2004, HÖNNIGER & KERSTEN 2005, LINDSTAEDT & KERSTEN 2005, KERSTEN et al. 2005a, KERSTEN et al. 2006a, KERSTEN et al. 2006b) und Untersuchungen (KERSTEN et al. 2005a, KERSTEN et al. 2005b, STERNBERG et al. 2005) eingesetzt, unter anderem auch zur Überprüfung von Bauwerken. Der Vorteil der Messmethode liegt hier in der vollständigen, flächenhaften Erfassung der Messobjekte, woraus sich vielfältige Auswertemöglichkeiten ergeben. In den hier vorgestellten Projekten Wasserturm Sternschanze Hamburg (siehe Kap. 3) und U-Bahntunnel Gänsemarkt Hamburg (siehe Kap. 4) werden aus den Laserscanningdaten Geometrien und diskrete Punkte mit dem Ziel abgeleitet, bestehende Bauwerksplanungen bzw. Konstruktionspläne zu überprüfen. Beide Projekte wurden in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro „Spanheimer Bornemann Ingenieure“ Hamburg bearbeitet.

2 Das terrestrische Laserscanning-System Mensi GS100

Für die Bauwerksuntersuchungen wurde das Trimble 3D-Laserscanning-System GS100 eingesetzt, das von Mensi S.A. in Frankreich hergestellt wird. Es besteht aus Messinstrument mit Zubehör und entsprechender Erfassungs- und Auswertesoftware. Die Streckenmessung erfolgt nach dem Impulslaufzeitverfahren mit einem grünen Laser mit 532 nm Wellenlänge. Die Genauigkeit der Einzelstrecke beträgt 6 mm. Die optimale Messentfernung des GS100 wird mit 2 – 100 m angegeben. Durch die bestmögliche Winkelauflösung von $0,0018^\circ$ lässt sich in 100m Entfernung eine Gitterweite von 3 x 3 mm realisieren. Der Panorama-View Scanner (360° horizontal, 60° vertikal) kann bis zu 5000 Punkte in der Sekunde messen, wobei ein Laserpunkt in 50 m Entfernung 3 mm groß abgebildet wird. Weitere technische Angaben und Abbildungen vom System sind in HÖNNIGER & KERSTEN (2005) aufgeführt. Die vollständigen technischen Daten sind unter MENSI (2004) zu finden.

3 Bestimmung von Geometrien im Wasserturm Sternschanze

Der ehemalige Wasserturm im Sternschanzenpark Hamburg (Abb. 1) wird zu einem Mövenpick Hotel umgebaut. Bei Erhaltung der Außenfassade erfolgt der Innenausbau mit Betonfertigelementen. Zum Zeitpunkt der Planung konnten Turminnendurchmesser und -achse aufgrund der Einbauten nur indirekt ermittelt werden. Nach der Entkernung des Turms konnte festgestellt werden, ob der Bestand mit der Planung übereinstimmt. Als geeignetes Messverfahren bietet sich hier Laserscanning an, da so die Innenfassade (Abb. 1 Mitte) mit geringem Aufwand erfasst werden kann. Weiterhin wurde ermittelt, in wie weit die zuvor indirekt abgeleitete Turmachse mit der aus den Laserscannerdaten ermittelten Achse übereinstimmt und ob beim Einbau der Geschosfertigecken Kollisionen auftreten. In diesem Projekt wird untersucht, ob terrestrisches Laserscanning die benötigten Maße mit der geforderten Genauigkeit liefern kann.

Die Innenfassade des Turms (Durchmesser 26 m, Höhe 50 m) wurde von fünf Scannerstationen nahezu vollständig erfasst. Auf zwei Stationen in der Grundebene wurde mithilfe eines Spezialstatives (Abb. 1 rechts) die Drehachse des Scanners horizontal gestellt, um so den Innenraum vom Boden bis zur letzten Ebene in 50 m Höhe erfassen zu können. Auf einer weiteren Station wurde mit einem 360° -Scan der untere Turmbereich erfasst. Zur Kontrolle wurde der obere Turmabschnitt zusätzlich von zwei Stationen in einer Höhe von ca. 47 m aufgenommen. Die einzelnen Stationen wurden mithilfe von elf Passpunkten (acht Kugeln und drei Targets), die auf drei Ebenen im Turminnenraum verteilt waren, verknüpft. Diese Punkte wurden vorab tachymetrisch mit einem Leica TCRP1201 im Baustellenkoordinatensystem bestimmt. Nach Geo-Referenzierung der Punktwolken in dieses Koordinatensystem lagen die Restfehler an den Passpunkten bei 4 mm.



Abb. 1: Wasserturm Sternschanze Hamburg: Außenansicht (links), Innenansicht (Mitte), Scanner GS100 im Spezialstativ auf der Turmgrundebene (rechts)

Die Auswertung der Punktwolken erfolgte mit den Programmen RealWorks Survey 4.2 und 3Dipsos 3.0 der Firma Mensi SA. Im ersten Bearbeitungsabschnitt wurde im Programm 3Dipsos die Turmachse aus Planungsdaten konstruiert. Nach Bereinigung der Punktwolke des Turminnenraums wurde mit einer Best-Fit-Methode ein Zylinder so in den Turm eingepasst, dass keine Kollisionen auftraten. Die lotrechte Hauptachse des Zylinders wurde dann mit der Planungsachse verglichen. Die Differenz zwischen beiden Achsen lag bei 25 mm.

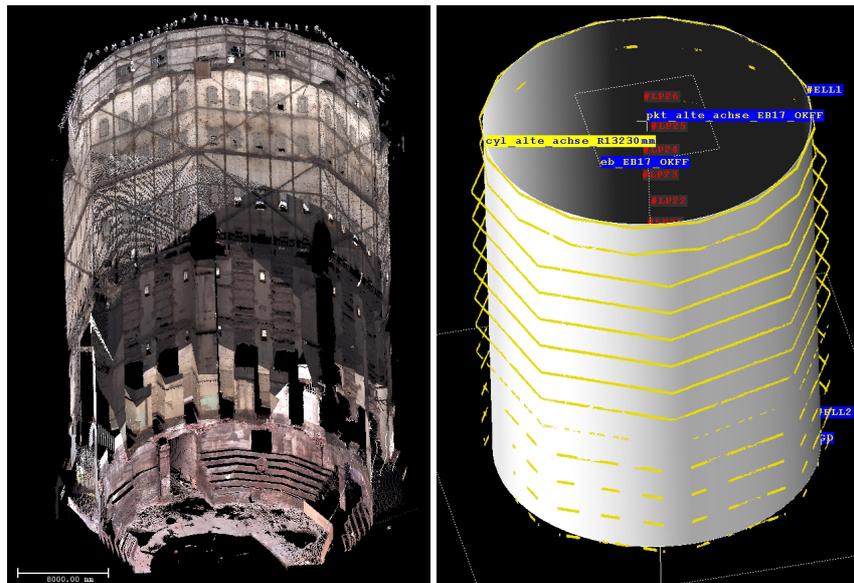


Abb.2: Gesamte Punktwolke Wasserturm (links) und Teilpunktwolke (Geschoßebenen, in gelbe Linien) des Wasserturms mit eingepasster Sollgeometrie (grauer Zylinder)

Im nächsten Bearbeitungsschritt wurden mit AutoCAD anhand der Planungsunterlagen die Turmachse sowie die Sollgeometrie in Form eines Zylinders auf dieser Achse erzeugt. Der Radius des Zylinders wurde der Planung entnommen. Dieser Körper wurde in das Programm RealWorks Survey importiert und in der Punktwolke gelagert. Mithilfe des Surface Inspection Tools der Software wurde die Punktwolke nun auf Kollisionen mit der Sollgeometrie untersucht, wobei nur Punkte in Höhe der jeweiligen Geschößdecken berücksichtigt wurden. Im oberen Turmbereich konnten Kollisionen von bis zu 60 mm an Teilflächen festgestellt werden. Kollisionsflächen konnten in einer Abwicklung des Zylinders farbko-diert sowie in einem Diagramm dargestellt werden. Die Diagrammdarstellung in Abb. 2 zeigt die abgewickelte Sollgeometrie als rote Linie (Null-Linie) und die als radiale Strecken gerechneten Differenzen zwischen Sollgeometrie und Punktwolke als grüne Linie. An den Stellen, an denen die grüne die rote Linie unterschreitet, treten Kollisionen auf. Nachteilig an der Darstellung ist, dass die Nullstelle der Abwicklung vom Programm festgelegt wird. Kritische Stellen lassen sich so nur schwer auf das Objekt übertragen.

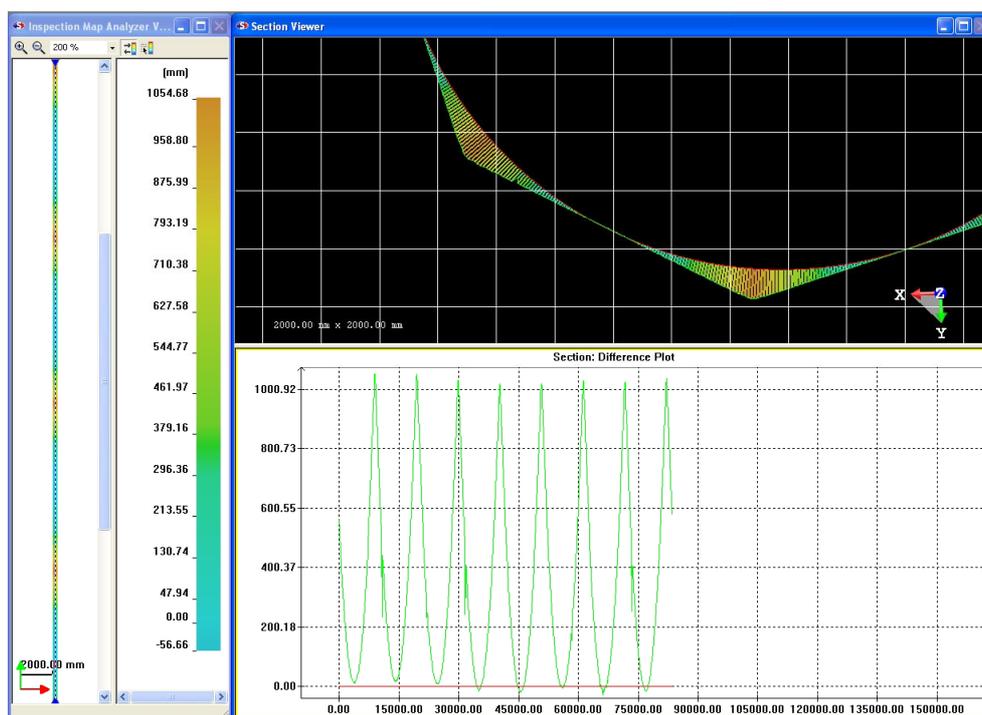


Abb. 3 Kollisionsdetektion mit dem Surface Inspection Tool in RealWorks Survey

In einem weiteren Bearbeitungsschritt wurden in Höhe der jeweiligen Geschößebenen 05 – 17 horizontale Scheiben in Geschößdeckenstärke aus der Punktwolke ausgeschnitten und in Polylinien umgewandelt. Die Erzeugung der Polylinien erfolgt automatisch, wobei jedoch teilweise noch eine Nachbearbeitung erforderlich war. Die Polylinien wurden dem Bauträger im DXF-Format zur Überprüfung der Planung der Geschößfertigdecken übergeben.

Nach Rohbaufertigstellung der Geschoßebenen 00 – 08 wurde eine tachymetrische Kontrollmessung mit dem Leica TCRP1201 in den Ebenen 07 und 08 durchgeführt. Die Streckenmessung erfolgte reflektorlos. Ermittelt wurde hierbei der Innendurchmesser des Turms zwischen Punkten, die auch in der Punktwolke identifizierbar waren. Ein Vergleich der tachymetrisch ermittelten Strecken mit den entsprechenden aus der Punktwolke abgeleiteten Strecken zeigte im Mittel Differenzen von 2 mm (Standardabweichung 4 mm).

Die Datenerfassung am Wasserturm betrug insgesamt acht Stunden, wobei das Laserscanning sechs und die geodätische Passpunktbestimmung zwei Stunden dauerte. Die Auswertung (Referenzierung, Achsbestimmung, Kollisionsprüfung, Polylinienerzeugung) konnte dagegen in sieben Stunden durchgeführt werden.

4 Positionsbestimmung von Bauteilen im U-Bahntunnel Gänsemarkt Hamburg

Eine Flanschverbindung in einem U-Bahntunnel der Hamburger Hochbahn musste wegen Undichtigkeiten und dadurch eindringendem Grundwasser neu abgedichtet werden. Zur passgenauen Vorfertigung von Flanschblechen war die Positionsbestimmung des Stirnflächenzentrums von 240 Flanschbolzen mit einer Genauigkeit von besser als 3 mm gefordert.

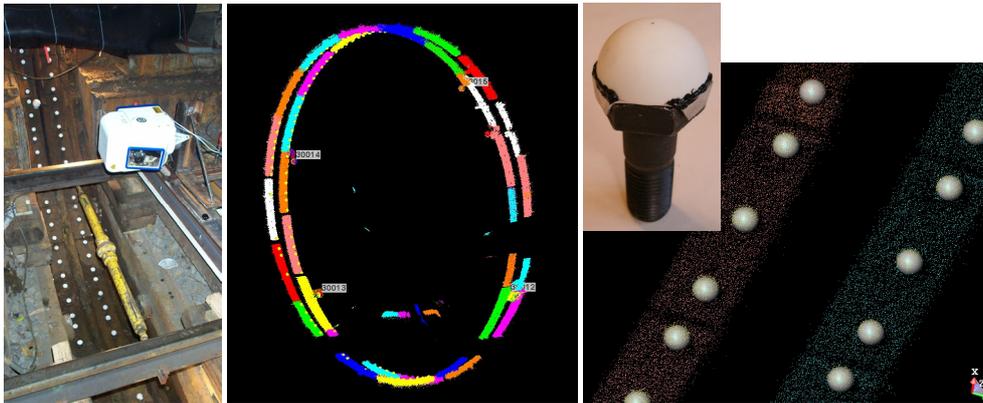


Abb.4: v.l.n.r.: Laserscanner im Tunnel, farbkodierte Punktwolken, Halbkugel-Adapter und automatisch eingepasste Kugeln (Spheres)

Es wurde untersucht, ob der terrestrische Laserscanner Mensi GS100 die geforderte Genauigkeit liefern kann. Dazu war es notwendig, das Messrauschen durch eine genügende Anzahl von Mehrfachmessungen und eine optimale Reflektivität der Objektoberfläche zu minimieren. Außerdem stand in der nächtlichen Betriebspause von 1 bis 4 Uhr eine Messzeit von drei Stunden zur Verfügung. Um diese vorgegebenen Kriterien einhalten zu können, wurden die Bolzen mit speziell angefertigten Halbkugeln (halbierte Tischtennisbälle auf Magnetadapter, siehe Abb. 4) signalisiert, die eine halb-automatische Koordinatenberechnung des Kugelzentrums bereits in der Scanningsoftware PointScape durch die Sphere-Extraction-Funktion ermöglichten. Das Halbkugelzentrum stellt das Zentrum der Stirnfläche des Bolzens und damit den gesuchten Punkt dar. Um den gesamten Flansch in einer

Aufstellung erfassen zu können, wurde der Scanner in der an der HCU entwickelten Spezialhalterung (siehe Abb. 1 und Abb. 4 links) mit horizontaler Drehachse aufgestellt. Die signalisierten Bolzen wurden jedoch wegen der begrenzten Anzahl der Signale abschnittsweise gescannt. Über vier Referenzpunkte wurde die Punktwolke in das Tunnelkoordinatensystem transformiert. Zur Genauigkeitskontrolle wurden 40 Bolzenpositionen mit einem Sokkia-Tachymeter aufgenommen.

Für die Auswertung benötigte man alle drei Mensi-Programme des Laserscanning-Systems. Im ersten Schritt wurde in PointScape die halb-automatische Sphere-Extraction-Funktion verwendet, in dem in der unbereinigten, nicht selektierten Punktwolke ein Punkt der Kugel angeklickt wurde. In die Punktwolke wurde dann an dieser Stelle eine Kugel mit vorgegebenem Radius eingepasst und der Kugelmittelpunkt berechnet. Im zweiten Schritt wurden die Kugelmittelpunkte mit RealWorks Survey in das Tunnelkoordinatensystem transformiert, so dass georeferenzierte Koordinaten der Bolzenköpfe vorlagen. Diese Koordinaten konnten mit den tachymetrisch bestimmten Referenzpunkten verglichen werden. Aus den Abweichungen konnte eine Standardabweichung der 3D-Position von 2 mm berechnet werden, wobei Ausreißer allerdings bis zu 8 mm groß waren. In die Berechnung dieser Standardabweichung geht aber die Messunsicherheit des Tachymeters mit ein. Im dritten Schritt wurde mit 3Dipsos versucht, die Abweichungen der Bolzenköpfe von einem Idealkreis zu bestimmen. Der Kreis wurde nach der Methode der kleinsten Quadrate bestmöglich in die gesamte ausgewählte Punktwolke eingepasst. Da die Punktwolke nur aus den Mittelpunkten der Halbkugeln bestand, musste die Punktwolke nicht weiter selektiert werden. Dabei wurde der Radius nicht vorgegeben, sondern wurde zusätzlich bestimmt. Als Berechnungsfunktion wurde der Kreis (im Raum) gewählt. Als Ergebnisse des ‚Fittings‘ wurden der Radius, der Flanschmittelpunkt und der Abstand der einzelnen Bolzen vom Idealkreis aus der Funktion ‚Distance to Entity‘ ermittelt. Zur Überprüfung wurden die berechneten Koordinaten in AutoCAD geladen und dort der Abstand der Bolzenköpfe vom Mittelpunkt und der Abstand zweier benachbarter Bolzenköpfe dargestellt (Abb.5).

Des Weiteren wurde untersucht, in wie weit alle Bolzenpunkte von einer in 3Dipsos eingepassten Ebene abweichen. Für die Beurteilung der Einpassung können die Eigenschaften des neuen, eingepassten Objektes (z.B. Standardabweichung und Normalenvektor der Ebene) angezeigt werden. Durch Vorgabe eines Schwellwertes für die Standardabweichung kann der ‚Fitting‘-Algorithmus eine verbesserte Einpassung durchführen. Neben diesen numerischen Qualitätsangaben bietet die Software die Möglichkeit einer visuellen Interpretation der Ergebnisse, was insbesondere bei der Überprüfung von Werkstücken oder anderen Objekten gut genutzt werden kann. Über die Funktion ‚Distance to Entity‘ werden die Abstände der einzelnen Punkte zum Objekt farblich dargestellt und in einem Verteilungsdiagramm erläutert (Abb. 5). Dies gibt auch die maximalen Abstände in beiden Richtungen wieder. Diese Art der Visualisierung vereinfacht nicht nur die Interpretation, sondern es können so auch Ausreißer im Verteilungsdiagramm leicht eliminiert werden, da die Schwellwerte manuell einstellbar sind. Abb. 5 zeigt das Diagramm zusammen mit den farblich kodierten Abweichungen von einer Ebene. Die Ausgabe dieser Darstellung kann nur über einen Screenshot erfolgen, da die Abspeicherung der farblich kodierten Punktwolke nicht vorgesehen ist. Außerdem lässt sich die Punktgröße in dieser Darstellung nicht variieren, so dass einzelne Punkte kaum erkennbar sind. Die Bearbeitung und Einpassung von Punktwolken mit der Modellierungssoftware 3Dipsos ist in KERSTEN et al. (2005c) beschrieben. Zur besseren Visualisierung wurde diese Auswertung in Matlab ein zweites Mal durchgeführt, um die Verformungen dort farblich ausgeben zu können (Abb. 5 rechts).

Die gesamte Auswertzeit (Einpassung der Kugeln in die Punktwolke und Berechnungen) betrug etwa 8 h und damit ergibt sich ein Verhältnis von Mess- zur Auswertzeit von 1:3.

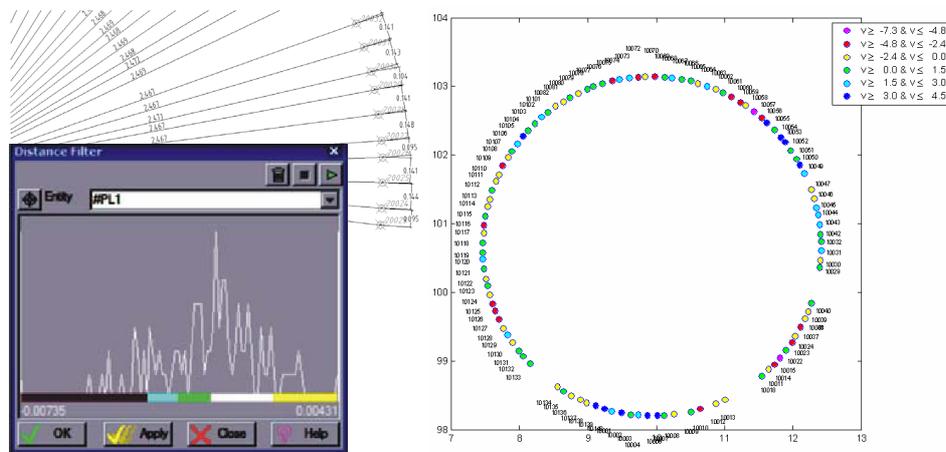


Abb. 5: Darstellung Radius und Abstand in AutoCAD, Abweichung der Punkte von der Ebene dargestellt in 3Dipsos und farblich kodiert in Matlab (in mm)

5 Fazit und Ausblick

Das terrestrische Laserscanning zeigte sich in beiden Projekten als eine geeignete Methode zur Erfassung komplexer und (un-) regelmäßiger Objekte wie beim Wasserturminnenraum und bei der Flanschverbindung im U-Bahntunnel. Durch die flächenhafte Erfassung der Messobjekte boten sich vielseitige Möglichkeiten für die Auswertung in den verwendeten Auswertetools wie z.B. RealWorks Survey 4.2 und 3Dipsos. Hierbei war es erforderlich, nur einfache Geometrien (Koordinaten, Polylinien) aus der Punktwolke für die Achsbestimmung, zur Kollisionsprüfung und zur Koordinatenbestimmung abzuleiten. Dadurch konnte jeweils eine effiziente Projektbearbeitung mit einem Faktor 1:1 bzw. 1:3 für die Datenerfassung/Auswertung erfolgen. Die Punktbestimmung erfolgte in beiden Projekten mit einer Genauigkeit von bis zu 3 mm, was beim Projekt U-Bahntunnel nicht ganz den Anforderungen entsprach. Es zeigte sich, dass bei solchen höheren Genauigkeitsanforderungen ein besonderes Augenmerk auf die Verteilung der Passpunkte um das Objekt zu legen ist. Nachteilig wirkte sich die niedrige Scangeschwindigkeit gerade bei hoher Auflösung aus, da dadurch eine längere Scanzeit in Anspruch genommen werden musste. Hier ist also noch Optimierungspotenzial vorhanden.

Durch den Einsatz von sogenannter ‚third party software‘ (wie z.B. Matlab) bei der Datenbearbeitung erhöht sich die Flexibilität der Anwender für eine effiziente Projektbearbeitung, da die Auswertetools des Laserscanning-Systems nicht alle gewünschten Bearbeitungen bzw. Ausgaben ermöglichen.

Es kann empfohlen werden, terrestrische Laserscanning-Systeme in Zukunft für Bauwerksuntersuchungen einzusetzen, da die Akzeptanz der gelieferten Ergebnisse beim Kunden sehr hoch ist und weitere spätere Auswertungen auf Kundenwunsch jederzeit möglich sind.

6 Literatur

- Hesse, Ch., Stramm, H., (2004). *Deformation Measurements with Laser Scanners – Possibilities and Challenges*. Int. Symposium on Modern Technologies, Education, and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, November 4-5, Sofia, Bulgaria.
- Hönniger, C., Kersten, Th. (2005). *Topographische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen mit dem 3D-Laserscanning-System Mensi GS100*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 224-231.
- Jahn, I., Kersten, Th., Kinzel, R. (2004). *Erfahrungen mit einem 3D-Laserscanning-System bei der Erfassung einer Industrieanlage und des Lübecker Holstentores*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 222-229.
- Kersten, Th., Sternberg, H., Mechelke, K., Acevedo Pardo, C. (2005a). *Terrestrischer Laserscanner Mensi GS100/GS200 – Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Oldenburger 3D-Tage 2004, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 98-107.
- Kersten, Th., Sternberg, H., Mechelke, K. (2005b). *Investigations into the Accuracy Behaviour of the Terrestrial Laser Scanning System Mensi GS100*. Optical 3-D Measurement Techniques VII, Gruen/Kahmen (Eds.), Vienna 2005, Vol. I, pp. 122-131.
- Kersten, Th., Sternberg, H., Mechelke, K., Lindstaedt, M. (2005c). *Zur Objektgenerierung in Punktwolken des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 mit der Modellierungssoftware 3Dipsos*. Terrestrisches Laserscanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft, DVW-Schriftenreihe, Band 48, pp. 127-146.
- Kersten, Th., Biebermann, M., Schneider, M. (2006a). *3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmensembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Kersten, Th., Sternberg, H., Stiemer, E. (2006b). *Terrestrisches 3D-Laserscanning im Hamburger Rathaus - Mensi GS100 und IMAGER 5003 im Vergleich*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Lindstaedt, M., Kersten, Th. (2005). *Ein virtueller Klon für Helgolands Lange Anna durch terrestrisches Laserscanning*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 216-223.
- Mensi (2004). *GS 100 3D laser scanner*. <http://www.mensi.com/website2002/gs100.asp>
- Sternberg, H., Kersten, Th., Conseil, N. (2005). *Untersuchungen des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 - Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 56-65.