

Im Mai 2005 erhielt das Leipziger Vermessungs- und Ingenieurbüro Andreas Jope den Auftrag, ein dreidimensionales Aufmass des Fuchsturmes in der Stadt Jena durchzuführen. Für dieses Projekt wurde das Messverfahren 3D-Laserscanning eingesetzt, die dabei gewonnenen Erfahrungen werden hier geschildert.

1. Der Fuchsturm – vulpeca turris

Der Fuchsturm bei Jena (Bild 1) stellt den markantesten Überrest einer Burgengruppe dar, deren älteste Anlage bereits im Jahre 937 als ottonischer Königshof Kirchberg in das Licht der Geschichte tritt. In den folgenden Jahrhunderten entstanden auf dem schmalen Bergriegel des Hausberges weitere Burgen als Folge sich überschneidender Machtinteressen, so die 1123 erstmals genannte Burg Kirchberg II sowie die 1156 erwähnte Burg Greifenberg. Im Jahre 1279 wird schließlich noch die Burg Winterberg im Eigenbesitz der Burggrafen von Kirchberg genannt.



Bild 1 Der Fuchsturm

Der Fuchsturm als mittelalterlicher Bergfried der Burg Kirchberg II liegt in einer Höhe von 381 m ü. NN, besitzt eine Höhe von ca. 22 Meter bis zum Ende des massiven Mauerwerks und 26 Meter bis zum Abschluss der hölzernen Dachkonstruktion. Bei einem mittleren Durchmesser von sechs Metern haben die Bruchsteinmauern eine durchschnittliche Dicke von zwei Metern.

Nach einer umfassenden Sanierung 1925 soll das dreidimensionale Aufmass als Planungsgrundlage für erneut notwendige statische Sicherungsmassnahmen dienen und die Grundlage einer noch ausstehenden historischen Bewertung bilden.

2. Der 3D-Laserscanner

Zur Datenerfassung wurde der Vollpanoramascanner CP 3200 der Firma Callidus eingesetzt (Bild 2). Der Scanner arbeitet nach dem Messprinzip der berührungslosen elektrooptischen Distanzmessung. Ein kurzer Lichtimpuls wird vom Scanner ausgesendet, trifft auf die Oberfläche des Objektes und wird von dort wieder zum Scanner reflektiert. Aus der zwischen Aussenden und Empfangen verstrichenen Zeit kann die Strecke zwischen Scanner und Oberflächenpunkt berechnet werden.



Bild 2 Callidus CP 3200

Über einen variablen Spiegel wird der Laserstrahl so abgelenkt, dass er im Bruchteil einer Sekunde einen vertikalen Bereich von 40° (schräg nach unten) bis 180° (senkrecht nach oben) überstreift. Dabei wird ca. 720 mal ein Lichtimpuls ausgesandt, empfangen und aus der verstrichenen Zeit die Strecke berechnet.

Nach der Messung eines solchen Messfächers wird der

Scanner mit Hilfe eines Servomotors schrittweise um seine eigene senkrechte Achse gedreht. Dabei wird eine volle Umdrehung (360°) in Intervallen von $0,125^\circ$ bis $0,25^\circ$ durchgeführt. Der Horizontalwinkel in Richtung der Scannerdrehung, der Vertikalwinkel in Richtung der Spiegeldrehung und die gemessene Strecke sind die Grundlagen für die Berechnung von x,y,z-Koordinaten des Oberflächenpunktes. Die schrittweise Drehung von ca. 1440 Intervallen mit je einem Messfächer von 720 reflektierten Oberflächenpunkten kann bis zu 1,2 Mio. gemessene Punkte liefern. Ein solcher Rundum-Scan benötigt etwa 15 min Messzeit.

Gleichzeitig wird das Objekt durch eine im Scanner integrierte Digitalkamera lückenlos fotografisch dokumentiert.

Der Messbereich des Scanners liegt bei ca. 30 m rings um die rotierende senkrechte Achse des Scanners (kugelförmiger Bereich).

Vorteile des Verfahrens sind die 3-dimensionale verformungsgerechte Aufnahme der Objektstrukturen, die berührungslos (also auch zerstörungsfrei) sowie völlig unabhängig von den Lichtverhältnissen (dunkle Räume) abläuft.

Zur Messung kann der Scanner auf einem speziellen Fotostativ aufgestellt werden, oder in besonders beengten Räumen auch direkt auf den Boden gestellt werden. Das Gerät hat eine Abmessung von 40 cm in der Höhe und 30 cm im Durchmesser.

3. Die vermessungstechnische Erfassung

Die äußere Oberfläche der Turmmauern wurde von fünf verschiedenen Scannerstandpunkten aufgenommen. Dabei musste der Scanner meist unmittelbar am Turmfuß platziert werden, weil auf der einen Seite nahe Böschungen drohten oder bis direkt an den Turm heranreichende belaubte Äste von Bäumen die Turmmauern verdeckten.

Für die Messungen im Inneren des Turmes wurden insgesamt 18 Scannerstandpunkte benötigt. Der im Innendurchmesser nur ca. 1,80 - 2 m breite Turm ist komplett mit einer stählernen Wendeltreppe mit Trittstufen aus Holz ausgebaut. Zwischen der Mittelstütze der Treppe und der Innenwand des Turmes blieben meist nur 0,9 m bis 1,2 m Platz (siehe Bild 3). Gleichzeitig wird durch die Treppe der sichtbare Bereich der Turmmauern stark eingeschränkt, es ist von einem Standpunkt aus meist nur ein etwas mehr als halbkreisförmiger Bereich der Turmmauern sichtbar.



Bild 3
Wendeltreppe im Turminneren

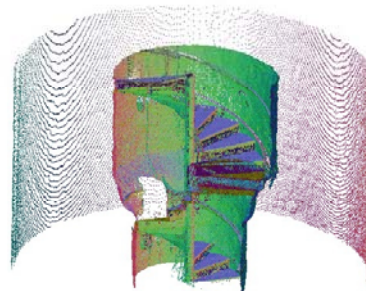


Bild 4
Ausschnitt aus der Punktwolke Treppenaufgang und Außenmauer

Die Aufstellung des Scanners erfolgte deshalb immer ca. ½ Treppenwendelung weiter und ca. 1,50 m höher als der letzte Standpunkt. Jeder Scan im Inneren des Turmes erfasste ca. 1 Mio. Punkte (Bild 4).

4. Zusammenfügen aller Scanneraufnahmen zu einem Modell

Die 3D-Koordinaten der Punkte der einzelnen Scans liegen nach Abschluss der Messung jeweils in einem lokalen Koordinatensystem mit dem Nullpunkt im Mittelpunkt des Scanners. Das ist für alle 23 Scans des Objektes gleich. Somit können die Einzelaufnahmen noch nicht zusammengefügt werden.

Um die Aufnahmen auswerten zu können, ist es notwendig, dass alle in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformiert werden und nach Lage und Höhe richtig zueinander ausgerichtet sind.

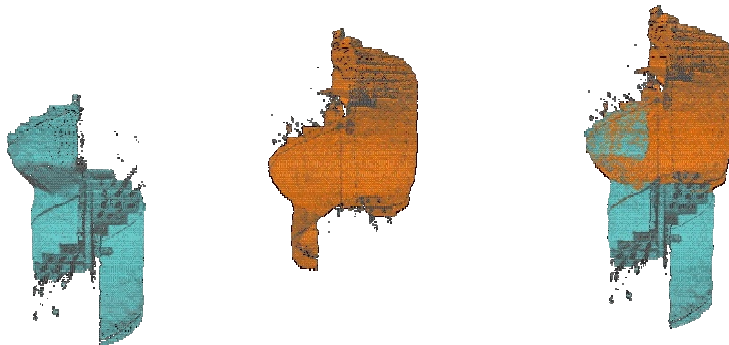
Die Software des Scannerherstellers Callidus bietet dazu verschiedene Möglichkeiten. Standardmäßig wird mit Hilfe eines normalen Vermessungsinstrumentes (Tachymeter) und eines Reflektors die Position des Scanners im Landeskoordinatensystem eingemessen. Ein zusätzlicher Reflektor wird in größerer Entfernung vom Scanner aufgestellt. Während des Scanvorganges erfasst der Scanner auch die Position dieses Reflektors. Mit dem Tachymeter wird dieser Reflektor im Landeskoordinatensystem eingemessen.

Der Nullpunkt des lokalen Koordinatensystems des Scanners wird nun auf die x,y und z-Koordinaten des Scanners im Landeskoordinatensystem verschoben. Anschließend erfolgt noch eine Drehung um die z-Achse auf die Richtung des gemessenen Reflektors.

Das wird für alle einzelnen Scannerstandpunkte gemacht, die mit einem Tachymeter eingemessen wurden.

Dieses Verfahren kann aber nur dann angewandt werden, wenn ausreichend Platz z.B. zum Aufstellen des Tachymeters und des Reflektors vorhanden ist. Der Reflektor sollte mindestens 20 m vom Scanner entfernt stehen.

Für die beengten Verhältnisse im Inneren des Turmes schied diese Variante aus, da der Reflektor nur maximal 2 m entfernt vom Scanner stehen würde und auch kein Platz zum zusätzlichen Aufstellen des Tachymeters vorhanden wäre.



Für die Lösung dieses Problems steht in der Callidus-Software das sehr nützliche Softwaretool „fuzzy join“ zur Verfügung. Hier werden zwei Scans über identische Bereiche der erfassten Objekt Oberfläche ineinander gerechnet. Ein Scan wird als Referenzscan in seiner

Bild 5 zwei Punktwolken vor und nach der „fuzzy join“-Anpassung

Lage im Raum unverändert gelassen, der zweite Scan, als anzupassender Scan, wird in seiner Lage und Höhe so lange verändert bis die Abweichungen zum Referenzscan minimal sind (Bild 5). Dieses komplizierte mathematische Verfahren hat sich bei den Messungen am Fuchsturm als ein sehr nützliches Tool erwiesen. Schrittweise wurden nun jeweils der nächste höher gelegene Scan an den unteren angefügt.

Zur Kontrolle wurden im Bereich des Fensters und im Bereich der verglasten Aussichtsplattform (siehe Bild 1) Scannerstandpunkte und Reflektoren eingemessen und nach dem zuerst beschriebenen Verfahren transformiert. Die Lage dieser Scans wurde mit den nach dem „fuzzy join“-Prinzip berechneten kontrolliert. Die Ergebnisse waren zufrieden stellend genau.

Als Ergebnis der Transformationen lagen ca. 16 Mio. Punkte im thüringischen Gauß-Krüger-Landeskoordinatensystem und Höhensystem NN vor. Ein vollständiges Abbild des realen Fuchsturmes liegt im Computer vor. Die Bilder 6 bis 8 zeigen Ausschnitte aus den gescannten Punktwolken.

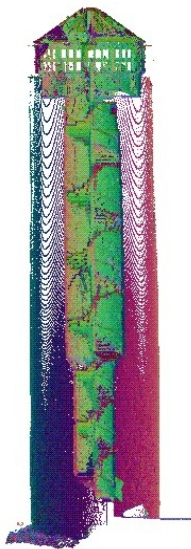


Bild 6
Ausschnitt aus der Punktwolke
mit Außenhaut und
Treppenaufgang

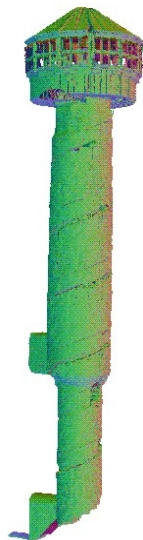


Bild 7
Innerer Bereich mit Eingang,
Fenster und Aussichtsplattform

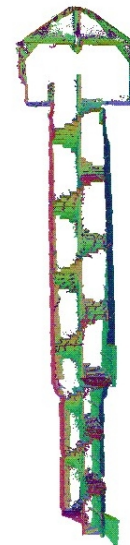


Bild 8
Schnitt des Turminneren

5. Datenauswertung mit AutoCAD

Ziel der Datenerfassung war die Erstellung von horizontalen und vertikalen Schnittzeichnungen an beliebigen Stellen des Turmes.

Mit dem vorliegenden Datenbestand ist der Planer, Denkmalschützer oder Statiker in der Lage großzügig alle 10 m oder detailliert alle 20 cm Schnitte durch das Objekt zu legen, sie werden immer der Realität entsprechen und sind nicht generalisiert.

Die Zeichnungen der Schnitte werden oft mit dem System AutoCAD erstellt. Im originalen Zustand ist AutoCAD nicht in der Lage mehr als 200.000 Einzelpunkte in anwenderfreundlicher Geschwindigkeit zu verarbeiten. Was geschieht nun hier mit ca. 16 Mio. Punkten ?

Speziell für AutoCAD-Anwender, die mit gescannten Punktwolken arbeiten möchten, hat die Firma Kubit Software GmbH das Programm PointCloud entwickelt. Dieser

AutoCAD-plugin macht es möglich, Punktwolken mit mehreren Mio. Punkten zu verarbeiten. Normale Funktionalitäten wie Punktfang, Abstandsmessungen und Bemaßungen sind möglich.

Zur Erstellung der Schnittzeichnungen kann eine besonders nützliche Funktion der Software PointCloud benutzt werden. Eine ca. 20 cm starke Schicht wird horizontal aus der gesamten Punktwolke des Turmes geschnitten (Bild 9). Die restlichen Punkte werden für diesen Augenblick weggeblendet. Mit den üblichen AutoCAD-Funktionen zeichnet man nun die inneren und äußeren Mauerwerkskonturen nach, bemaßt die Zeichnung und plottet sie

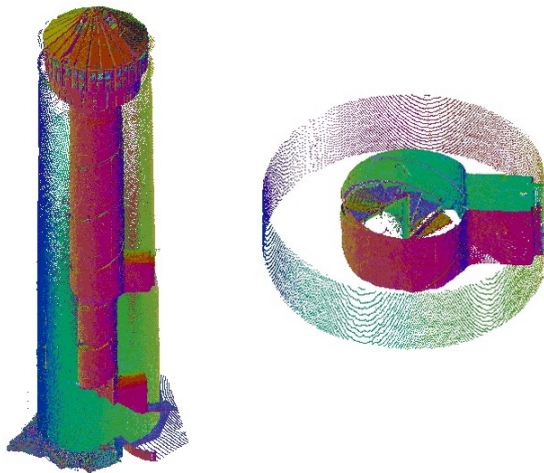


Bild 9
gesamte Punktwolke und ca. 1 m
breite horizontale Schicht

aus. Anschließend wird die definierte Schicht um einen beliebigen Betrag nach oben verschoben, um an dieser Stelle die nächste Kontur nachzuzeichnen. Die Vertikalschnitte entstanden auf die selbe Art und Weise.

Registrierte Nutzer von PointCloud haben zudem die Möglichkeit, Punktwolken kostenlos an Ihre Kunden weiterzugeben. Damit ist der Anwender in der Lage, alle gewünschten Schnitt- und Ansichtszeichnungen selbst zu erstellen. Er nutzt dazu die PointCloud-FreeEdition.

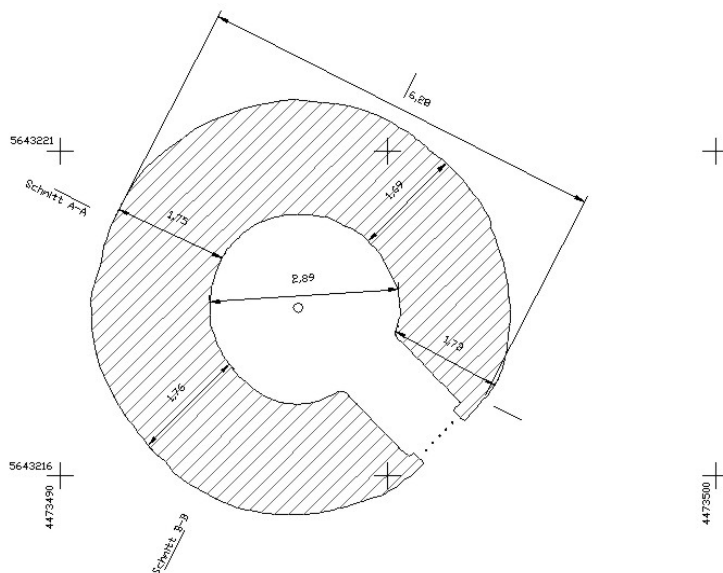


Bild 10 CAD-Zeichnung Horizontalschnitt

6. Zusammenfassung

Die Aufmessung des Fuchsturmes zeigt, für eine denkmalpflegerische Bestandsaufnahme schwieriger, enger Objekte empfiehlt sich der Einsatz eines 3D-Laserscanners mit Vollpanoramaerfassung besonders.

Die Zeitspanne für die Erfassung des Turmes betrug nur 1,5 Tage. Damit hat sich dieses Messverfahren vor allem hinsichtlich der Geschwindigkeit gegenüber herkömmlichen Methoden deutlich durchgesetzt.

Außerdem konnte wegen der beengten Verhältnisse im Turm kein anderes Messverfahren wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden. Ein umständliches Handaufmass wäre wesentlich zeitaufwändiger und hätte nie die Informationsdichte einer Laserscanningmessung erreicht.

Für AutoCAD-Anwender kommt zudem der Vorteil hinzu, mit dem Programm PointCloud die CAD-Bearbeitung der Messdaten selbst durchführen zu können.

Anschrift des Autors:

messbuero.de
Vermessungs- und Ingenieurbüro Andreas Jope
Händelstraße 23
04288 Leipzig
Tel.: (034297) 40935
www.messbuero.de