

Effiziente Aufnahme und orthogonale Darstellung von Laserscans zur Erstellung von Bestandsplänen historischer Gebäude

Efficient Surveying and Orthogonal Projection of Laser Scans for the Creation of As-built Plans of Historical Buildings

Nikolaus Studnicka¹, Bernhard Groiss¹, Christoph Fürst¹, Mathias Ganspöck²

¹RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Horn · nstudnicka@riegl.com

²EKG Baukultur ZT GmbH, Wien

Zusammenfassung: Eigentümer historischer Gebäude sind oft mit einem Mangel an aktuellen und präzisen Bestandsplänen konfrontiert. Bei der Planung von Restaurationsarbeiten sind nur veraltete Pläne verfügbar und die Erstellung neuer CAD-Pläne wäre mit hohem Kosten- und Zeitaufwand verbunden.

In diesem Beitrag wird anhand eines konkreten Beispiels präsentiert, wie aus Laserscandaten rasch – und vor allem bei großen Gebäuden effizient – ein exakter Bestandsplan erstellt werden kann. Ziel der Zusammenarbeit von RIEGL Laser Measurement Systems als Hersteller von Laserscan-Systemen mit EKG Baukultur als Dienstleister und Anwender von Laserscannern war die Vermessung von Schloss Eckartsau in Niederösterreich. Die Aufnahme der Scandaten erfolgte in einer Kombination aus terrestrischem und UAV-basiertem Laserscanning.

Schlüsselwörter: Laserscanning, Bestandsplan, Registrieren, Ansichten, Schnitte

Abstract: *The lack of current and accurate inventory plans is a well-known problem for owners of historic buildings. Often, only outdated plans are available for restoration planning, and creating new CAD plans would be costly and time-consuming.*

This paper uses a concrete example to show how laser scan data can be quickly – and efficiently – used to create an exact as-built plan, especially for large buildings. The aim of the cooperation between RIEGL Laser Measurement Systems as a manufacturer of laser scan systems and EKG Baukultur as a service provider and user of laser scanners was to survey Schloss Eckartsau in Lower Austria. The acquisition of the scan data took place in a combination of terrestrial and UAV-based laser scanning.

Keywords: *Laser scanning, inventory plan, registration, views, sections*

1 Motivation und Beschreibung des Workflows

Durch moderne Methoden haben sich sogenannten Punktwolken in der Vermessungstechnik etabliert. Sie liefern ein adäquates Mittel um die Realität gut zu visualisieren. Darüber hinaus ist es aber gerade bei komplexen Gebäuden notwendig, aus hochaufgelösten und genauen Punktwolken eine Grundlage für klassische Bestandspläne zu liefern. Folgende aktuelle Entwicklungen waren notwendig, damit man für diese Aufgabe kostengünstig und effizient einen modernen Laserscanner einsetzen kann:

Ein terrestrischer Laserscanner (TLS) kann heutzutage fast im Minutentakt eine Scanposition nach der anderen einnehmen und dabei zig Millionen 3D-Messpunkte vom Dreibeinstativ aus aufzeichnen. Gleichzeitig ist er imstande diese Daten bereits zur Laufzeit miteinander zu

verknüpfen, und dies ohne Verwendung von Passmarken. Ein gesamtes Scanprojekt kann anschließend gemeinsam mit ein paar wenigen Kontrollpunkten einer Qualitätskontrolle zugeführt werden. Die terrestrischen Laserscans eignen sich gut, in ein komplettes Projekt aus Panoramabildern konvertiert zu werden, aus denen auch Ansichten und Schnitte erstellt werden können.

Der Vollständigkeit halber soll hier auch die Datenaufnahme mittels Laserscanners an Bord eines unbemannten Fluggeräts (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) kurz vorgestellt werden. Diese kinematische Vermessungsmethode erlaubt die effiziente Aufnahme von Dachlandschaften, naturräumlichen Umgebungen, u.v.m. (Amon 2014).

2 Datenaufnahme

Das terrestrische Scanprojekt von Schloss Eckartsau wurde in drei Tagen aufgenommen und besteht aus 636 einzelnen Laserscans.

2.1 Terrestrische Datenaufnahme

Zu Beginn wurde das sogenannte „Panorama40“ Scanmuster (siehe Tabelle 1) gewählt. Die Scanzeit pro Position beträgt netto ca. 45 Sekunden. Es ist notwendig, die Belichtungszeit der Fotokamera zu beschränken, um bei der simultanen Aufnahme von Scans und Fotos scharfe Fotos zu erzeugen. Beim den gewählten Scanparametern wird die Belichtungszeit auf maximal 1/200 sec eingestellt. Da für eine große Tiefenschärfe die Blende auf den Wert 8 fixiert ist, muss die ISO-Empfindlichkeit der Kamera manuell oder automatisch nachgeregelt werden. Mit diesen Einstellungen kann eine Gesamtdauer (mit Umstellen des Dreibeinstativs) pro Scanposition auch für größere Projekte von durchschnittlich weniger als 80 Sekunden erzielt werden.

Tabelle 1: Grundlegende Spezifikationen des terrestrischen Laserscanners

Laserscanner	RIEGL VZ-400i (RIEGL 2019)
Scanmuster	„Panorama40“
Sichtfeld des Scanners	100° vertikal, 360° horizontal
Winkelauflösung (Auflösung am Objekt)	0,040° (7 mm @ 10 m Messdistanz)
Messungen pro Scan	ca. 22,5 Mio
Präzision der Laser Entfernungsmessung	3 mm @ 100 m (Standardabweichung)
Fotokamera	Nikon D810 (14 mm Festbrennweite)
Fotoauflösung	36 MPixel
Zeit pro Scanposition (inklusive Umstellung)	unter 80 Sekunden

Für die Robustheit der automatischen Registrierung ist es wichtig, die Positionen der Scans so zu wählen, dass sie in einer „Scan-Kette“, einer sukzessiven Abfolge einzelner Scans mit ausreichend Überlappung zueinander, angeordnet sind. Der Abstand zwischen den Standorten beträgt im Freien ca. 10 Meter, etwa die gleiche Distanz wie zur vermessenen Fassade. Im Inneren des Gebäudes verringert sich diese. Dieser relativ geringe Abstand zwischen den

Scanpositionen erlaubt es, die Scanschatten zu reduzieren und für das automatische Registrieren genügend Überlappungsbereiche zu garantieren. An Gebäudeecken und bei Durchgängen sollten Zusatzscans eingefügt werden. Es ist empfohlen, an den Enden einer „Scan-Kette“, Kontrollpunkte einzumessen. Diese wenigen aber gut verteilten Passpunkte haben im abschließenden Genauigkeitsbericht eine hohe Aussagekraft.

Beim Scannen von freistehenden Gebäuden wird empfohlen, anfangs im Freien einmal um das Gebäude zu scannen. Danach wird die Scankette durch einen Gebäudeeingang ins Gebäudeinnere gelegt. Der Abschluss einer Scankette erfolgt idealerweise wieder im Freien. Falls der Scanner neu gestartet werden muss – zum Beispiel nach einem Tageswechsel – sollte der erste Scan möglichst nahe der letzten Scanposition aufgenommen werden. Das Umstellen des Scanners selbst sollte jeweils innerhalb von 20-30 Sekunden durchgeführt werden. So ist sichergestellt, dass die Daten des eingebauten initialen Messsystems (IMU „Inertial Measuring Unit“) auch bei schlechtem GNSS-Empfang eine gute Annäherung der relativen Positionierung für die automatische Registrierung liefern.

2.2 Datenaufnahme mittels UAV

Für die Aufnahme der UAV-basierten Laserscandaten wurde ein RIEGL VUX-1UAV Laserscanner auf einem RiCOPTER (beide RIEGL 2019) benutzt. Das System beinhaltet neben dem Scanner eine IMU-GNSS-Einheit für die Aufnahme einer Trajektorie. Zur parallelen Bildaufnahme wurden zwei Kameras benutzt, welche schräg nach unten gerichtet wurden (siehe Tabelle 2). Für das Prozessieren der präzisen Trajektorie wurde eine GNSS-Basisstation aufgestellt.

Tabelle 2: Grundlegende Spezifikationen des Laserscanners an Bord eines unbemannten Fluggeräts

UAV-Laserscanner	RIEGL VUX-1UAV (RIEGL 2019)
Laser Impulsrate	550 kHz
Sichtfeld des Scanners	330°
Scangeschwindigkeit	200 Scanlinien pro Sekunde
Präzision	5 mm @ 150 m laut Datenblatt
IMU-GNSS-Einheit	Applanix AP20
Fotokameras	2 × Sony Alpha 6000
Fotoauflösung	24,3 MPixel pro Kamera
UAV-Plattform	RIEGL RiCOPTER (RIEGL 2019)

Nach einer kurzen Initialisierungsphase fliegt der RiCOPTER einen vorprogrammierten Pfad ab und der Laserscanner scannt dabei das Projektgebiet. Es wurden zwei Flüge auf einer Flughöhe von 50 Metern über Grund bei einer Fluggeschwindigkeit von 5 m/s aufgenommen. Um Scanschatten auf der Dachstruktur zu minimieren, bestand jeder Flug aus mehreren sich kreuzenden Scanstreifen. Die Flüge dauerten jeweils etwa 30 Minuten.

3 Datenverarbeitung

3.1 Automatische Registrierung und Blockausgleich der TLS Scanpositionen

Um die terrestrischen Scandaten für die anschließende Registrierung in der Software RiSCAN PRO vorzubereiten, wird die irreguläre Punktwolke in einem 3D-Raster – dem sogenannten 3D-Voxeldatensatz – aufgerastert. Für die nachfolgende automatische Registrierung der Scandaten, sind die Voxelgröße und die Voxelanzahl entscheidend. Die Voxelgröße kann manuell oder auch automatisch der Umgebungssituation angepasst werden.

Ein Voxel wird dann erzeugt, wenn es mindestens drei Messpunkten besitzt. Dadurch ist es möglich, ebene Flächenstücke in den Voxeln zu schätzen, und diese durch Schwerpunkt und Normalvektor zu repräsentieren. Pro Voxel werden der Mittelwert der Reflektivität, die Anzahl der Messpunkte und ein Formattribut (Linie, Ebene, Volumen) gespeichert.

Die Registrierung erfolgt unter der Verwendung der a priori verfügbaren Informationen. Um einen neuen Scan annähernd an der richtigen Position im Projektkoordinatensystem zu positionieren, werden folgende Daten verwendet:

Daten der zu registrierenden Scanposition:

- GNSS-Position – nicht immer verfügbar (wenn verfügbar optional mit RTK-Lösung).
- Orientierung durch Beschleunigungssensoren und Magnetfeldsensor (zuverlässige Roll- und Neigungswinkelmessung, relativ ungenaue Giermessung).
- relative Position und Ausrichtung zwischen aufeinander folgenden Scanpositionen durch interne IMU-Messung.
- Höhe (Barometer).

Referenzdaten (bereits registrierter Scandaten):

- dem sogenannten „Projekt-Voxeldatensatz“ (siehe Abb. 1).

Die Registrierung selbst findet dann zunächst im „Spektralbereich“ („Phase-Only Matched Filtering“) statt (Ullrich & Fürst, 2017):

- Neuabtastung der irregulären Punktwolke auf einem 3D-Raster ergibt einen 3D-Voxeldatensatz: $v(x)$.
- Fouriertransformation von $v(x)$: $V(k)$.
- Dasselbe „Signal“ rotiert und verschoben: $w(x) = v(Rx + t)$.
- Fouriertransformation von $w(x)$: $W(k)$.
- Fourier-Rotationstheorem und -Verschiebungstheorem
 $W(k) = V(Rk) \exp(i2\pi k^T R^{-1}t)$.
- Betrachtung der Beträge $|W(k)| = |V(Rk)| \rightarrow$ Rotationsmatrix R .
- nach Anwendung der Rotation $W'(k) = V(k) \exp(i2\pi k^T t) \rightarrow$ Verschiebungsvektor t .

Nachdem diese spektralbasierte Registrierung die Scans in der Größenordnung einer Voxelgröße – zum Beispiel 10 cm – aufeinander angenähert hat, werden die extrahierten Ebenen benutzt, um die jeweils letzten beiden Scanpositionen auf wenige Millimeter genau zueinander zu registrieren.

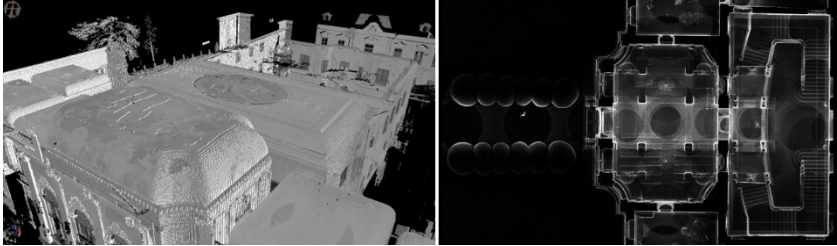


Abb. 1: Links: Zusammengesetzter Projekt-Voxeldatensatz aus mehreren Scanpositionen, rechts: Resultierende Punktwolke aus mehreren Scans in mehreren Stockwerken

Die Rechenzeit pro Scanposition beträgt auf einem Standard-PC mit 16 GB RAM, einem intel i7 Prozessor, Nvidia Grafikkarte und SSD durchschnittlich 23 Sekunden.

Diese Art der reflektorlosen Registrierung wurde 2017 fertig entwickelt und seither intensiv bei realen Scanprojekten getestet. Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass diese Registrierung auch am Laserscanner selbst ablaufen kann, seit 2019 sogar im vorher beschriebenen „real-time“ Tempo.

Nach erfolgreicher Registrierung aller Scanpositionen kann es bei einem Schleifenschluss zu geringen Klaffungen kommen. Um diese über das Projekt auszugleichen, wird der neu entwickelte Gesamtausgleich „Multi Station Adjustment 2“ der Software RiSCAN PRO empfohlen. Dieser bewerkstelligt eine rigorose Anpassung mittels der Scandaten, der GNSS-Messungen, und der Scanner-internen Sensordaten. Falls vorhanden, werden auch Kontrollpunkte verwendet. Die durchschnittliche Rechenzeit pro Scanposition beträgt 14 Sekunden. Abschließend wird automatisiert ein detaillierter Bericht erstellt. Die Abweichungen befinden sich üblicherweise im Millimeterbereich. Beim Projekt von Schloss Eckartsau wurden zur Geo-Referenzierung 16 Kontrollpunkte mit einem GNSS-Empfänger eingemessen. Der abschließende Blockausgleich führt zu folgender Statistik (Tabelle 3) über die Residuen. Die mittlere absolute Abweichung beträgt demnach einen Zentimeter.

Tabelle 3: Ergebnis des Blockausgleichs: Statistik über die Residuen

	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	Distanz [m]
Minimale Abweichung	-0,0286	-0,0280	-0,0300	0,0221
Maximale Abweichung	0,0448	0,0338	0,0297	0,0636
Mittlere Abweichung	-0,0026	0,0018	0,0014	0,0340
Standardabweichung	0,0202	0,0219	0,0189	0,0100
Mittlere absolute Abweichung (Standardabweichung ohne Ausreißer)	0,0208	0,0247	0,0199	0,0102

3.2 Prozessieren der UAV-Daten und Kombinieren mit den TLS-Daten

Zum Prozessieren der UAV-Daten werden in der POSpac-Software von Applanix die Rohdaten der IMU-GNSS-Einheit sowie die RiNEX-Daten der Basisstation eingelesen und mittels „Kinematic Ambiguity Resolution“-Methode eine hochgenaue Trajektorie erstellt.



Abb. 2: Punktwolke aus einer Befliegung mit dem RiCOPTER

Anhand der Zeitstempelung von Trajektorie und Scandaten werden erste Punktwolken erstellt, deren absolute und relative Genauigkeiten bei einigen wenigen Zentimetern liegen. Für größtmögliche relative Genauigkeit wird die UAV-Punktwolke (siehe Abbildung 2) mit der Software RiPRECISION ausgeglichen. Sie analysiert die korrespondierenden Ebenen zwischen den einzelnen Flugstreifen und errechnet anhand dieser unter Berücksichtigung der lokalen GNSS-Genauigkeiten neue, verbesserte Trajektorien.

Die Kombination beider Datensets erfolgt in RiSCAN PRO. Um die UAV-Punktwolke auf die terrestrischen Scandaten zu registrieren, werden Ebenen mit zugehörigem Normalvektor extrahiert. Dies ermöglicht im anschließenden „Multi Station Adjustment“ einen auf ICP „Iterative Closest Point“ Algorithmus (Dold, 2010) basierenden Ausgleich. Der TLS-Datensatz wurde festgehalten und die UAV-Scandaten starr verschoben. Die Standardabweichung der Residuen aus beiden Datensätzen liegt nach der Registrierung bei 4 mm.

3.3 Erstellung von orthogonalen Ansichten und Schnitten

Ein Laserscanprojekt aus vielen hunderten Scanpositionen ergibt eine Punktwolke, welche die Geometrie gut visualisiert. Sie beinhaltet viel Information, die aber erst extrahiert werden muss. Seit langem üblich sind zweidimensionale Pläne in vektorisierter Form. Nur diese haben für Anwender wie Architekten dann auch einen realen Marktwert. Der einfachste Weg, diese CAD-Pläne eines bestehenden Gebäudes zu erstellen, ist, eine orthogonale Ansicht einer Punktwolke als Vorlage zu nehmen. Diese ist gut interpretierbar. Seit Jahren gilt diese Vorgehensweise als Standard.

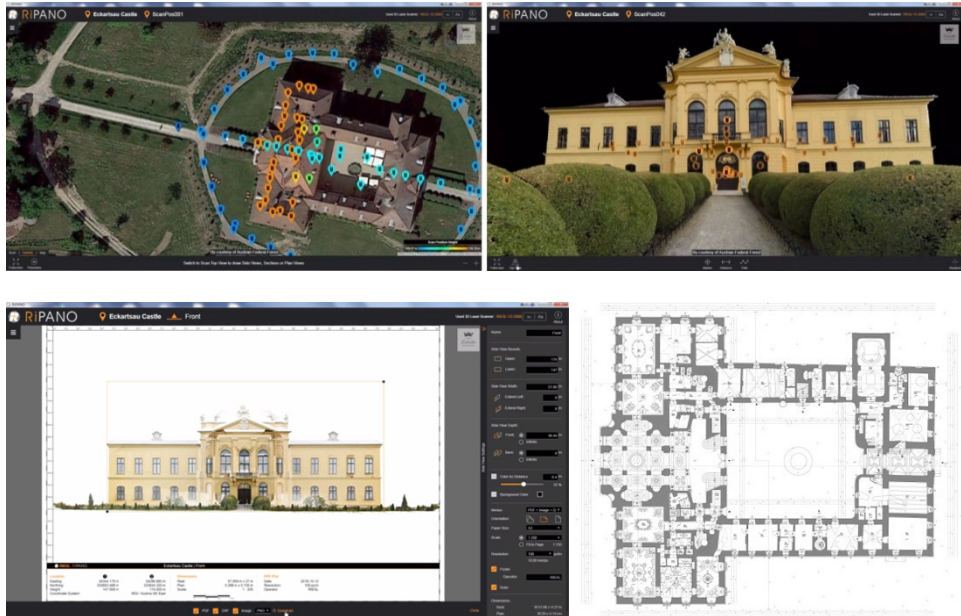


Abb. 3: Links oben: Übersichtsplan in RiPANO, rechts oben: Panoramaansicht einer Scanposition, links unten: orthogonale Ansicht mehrerer Scans, rechts unten: CAD-Bestandsplan nach dem Interpretieren eines Schnitts durch die Punktwolke

Mit der neu entwickelten Software „RiPANO“ ist man in der Lage, ein vollständiges Scanprojekt so zu exportieren, dass auch Nicht-Vermesser intuitiv von der Panoramaansicht einer Scanposition zur nächsten navigieren können. Es ist möglich, an beliebigen Punkten Koordinaten abzugreifen, Distanzen zu messen und Kettenmaße zu definieren. Zusätzlich können aber nun auch Ansichten und Schnitte generiert werden. Bei jedem Panoramabild wird nämlich zur sichtbaren Information auch die Tiefeninformation gespeichert. Dadurch kann eine Punktwolke zur Laufzeit wieder rekonstruiert werden. Nach einer Ansichtsdefinition im Übersichtsplan wird die resultierende orthogonale Ansicht (siehe Abb. 3 links unten) der Punktwolke aus den einzelnen Scans zusammengesetzt.

4 Diskussion

Nach vielen hier vorgestellten Entwicklungen ist man nun in der Lage Punktwolken für große und komplexe Gebäude zu erstellen. Zusammengefasst können also aus vielen einzelnen „Single Button-3D-Aufnahmen“, automatisiert und effizient Schnitte durch ganze Gebäude extrahiert werden. In diesem abschließenden Kapitel soll aus der Praxis heraus diskutiert werden, ob ein zweidimensionaler Plan noch zeitgemäß ist. Die Genauigkeit und Aktualität von vorhandenen Plänen ist grundsätzlich kritisch zu hinterfragen. Somit ist es ratsam, aktuelle und korrekte Bauwerksdaten zu erheben. Zumeist hat man es nicht mit optimalen Geometrien (wie ebenen Wänden) und mehr oder weniger bezugsfertigen Objekten zu tun. Historische Gebäude weisen oft detailreiche Strukturen auf, die sich über Jahrhunderte hinweg immer wieder verändert haben. In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich der Laserscan als

schnelle und zuverlässige Technologie für die Vermessung von Bestandsgebäuden etabliert (Zehetner, 2005). Aber warum ist der 3D-Scan so praktisch für die Architekturvermessung? Der wohl wichtigste Aspekt neben Vollständigkeit, Handhabung und dem Detailgrad der Vermessung, ist die Wirtschaftlichkeit. Die traditionellen Techniken vom Handaufmaß bis zur tachymetrischen Vermessung sind langsam und bergen Fehlerpotenzial. Mit dem Laser-scanner, der die Raumgeometrie statisch millimetergenau vermisst, ist es unwahrscheinlich, dass Details übersehen werden. Mit einer solchen Grundlage kann effizienter geplant werden. Die Notwendigkeit, dasselbe Objekt zum Zweck der Nachverdichtung mehrmals zu untersuchen und zu vermessen, entfällt meist völlig. Diese Maßnahme – in diesem ersten Schritt in der Bestandsbauplanung alleine – sorgt schon für eine erste Kostenreduktion und hilft durch ihre Zuverlässigkeit, den kalkulierten Kostenrahmen einzuhalten. Verfügt man über einen vollständigen und korrekten Datensatz eines Objektes, geht es darum, den Datensatz korrekt zu interpretieren und für die diversen Bedarfsträger aufzubereiten. Hier liegt der Vorteil in der Technologie darin, dass alle Produkte für alle Bedarfsträger auf demselben Datensatz basieren. Es kann sowohl die Forderung der Denkmalpflege nach verformungstreuen 2D-CAD-Plänen in Grundriss, Schnitt und Ansicht erfüllt werden, als auch progressivere Herangehensweise via BIM („Building Information Modeling“) in all seinen Varianten. Bei eher alltäglichen Objekten profitieren Planer und Ausführende davon, dass aus den 3D-Laserscandaten sehr rasch und günstig zuverlässiges Planmaterial erstellt werden kann.

Unser Dank gilt den Österreichischen Bundesforsten AG für Ihre freundliche Genehmigung das Schloss Eckartsau erfassen und die daraus resultierenden Daten präsentieren zu dürfen.

Dieser Aufsatz baut auf einem Vortrag der Oldenburger 3D Tage 2019 mit dem Titel „Online-Erstellung von orthogonalen Ansichten und Schnitten aus Laser Scanner Daten“ auf.

Literatur

- Amon, P., Rieger, P., Riegl, U., & Pfennigbauer, M. (2014). Introducing a New Class of Survey-Grade Laser Scanning with Unmanned Aerial Systems (UAS). *Proceedings of the FIG Congress 2014, Kuala Lumpur, Malaysia*.
- Dold, C. (2010). *Ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscans* (Dissertation). Leibniz Universität Hannover (Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik, Nr. 283, ISSN 0174-1454).
- RIEGL LMS GmbH (2019). *Webseite*. www.riegl.com.
- Ullrich, A., & Fürst, C. (2017). Vollautomatischer Ansatz für die Onboard-Datenregistrierung im terrestrischen Laserscanning. In: DVW e. V. (Ed.), *Terrestrisches Laserscanning 2017 (Beiträge zum 165. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2017 in Fulda)*. Retrieved May 6, 2019, from <https://geodaesie.info/sr/terrestrisches-laserscanning-2017-tls-2017/7109/1950>.
- Zehetner F., & Studnicka N. (2005), Cultural heritage documentation by combining near-range photogrammetry and terrestrial laser scanning – St. Stephens Cathedral, Vienna. In: J. Nimmrichter, W. Kautek, & M. Schreiner (Eds.), *Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA VI Proceedings, Vienna, Austria, Sept. 21–25, 2005)*. Retrieved May 6, 2019, from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-72310-7_67.