

# Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktvolken zur Rekonstruktion von Tragwerken

Steffen SCHELLER, Danilo SCHNEIDER

## 1 Zusammenfassung

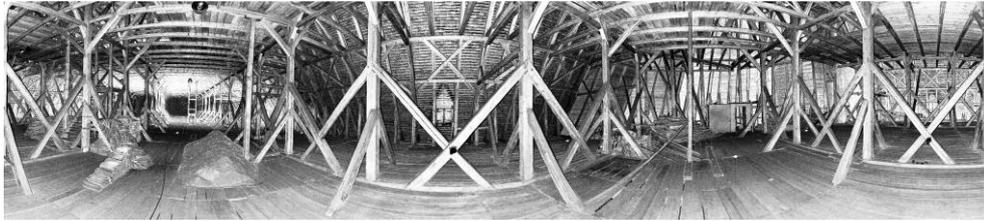
In diesem Beitrag wird die Entwicklung von Algorithmen für eine zwei- und dreidimensionale Modellierung von geometrischen Primitiven aus Laserscannerdaten in extrahierten Schnittprofilen vorgestellt. Als Testdatensatz wurde eine Laserscannerpunktvolke des Dachstuhls des Bautzener Doms verwendet (Abb. 1). Zur Extraktion der Balken wurden Methoden entwickelt und implementiert, welche im zweidimensionalen Ansatz die gesamte Punktvolke automatisch in Schnittprofile zerlegt und einzelne Balken (d.h. Rechtecke) detektiert und segmentiert. Die anschließende Modellierung wird mit einer 2D-Houghtransformation und einer Ausgleichung der erhaltenen Gerade realisiert. Im Resultat werden einzelne Balkenbegrenzungen in den verschiedenen Schnittprofilen erhalten. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist stark von der Punktdichte und der Streuung der Punkte in den Schnittebenen abhängig. Etwa 75% aller extrahierten Daten konnten für eine Weiterverarbeitung (Generierung eines Stabwerkmodells) verwendet werden.

Eine dreidimensionale Auswertung kann zum einen basierend auf der Zusammensetzung der einzelnen zweidimensionalen Profile und zum anderen über eine direkte Extraktion von Ebenen im dreidimensionalen Raum erfolgen. Hierfür wurde eine direkte Geometrieextraktion entwickelt, beruhend auf einer 3D-Houghtransformation, welche Ebenen in dreidimensionalen Punktvolken detektieren kann. Ähnliche Ansätze finden sich in RABBANI (2004). Durch die Verschneidung der detektierten und modellierten Ebenen kann die Oberfläche der Balken des Dachstuhls beschrieben werden. Durch diesen Ansatz ist es möglich, ein vollständiges dreidimensionales Modell zu generieren, aus dem sich außerdem die Topologiebeziehungen zwischen den Balken ableiten lassen. Die geometrischen und topologischen Informationen können für eine statische Berechnung der Tragwerkskonstruktion des Dachstuhls weiterverwendet werden.

## 2 Einleitung

### 2.1 Laserscannerdaten vom Dachstuhl Bautzener Dom

Die verwendete Punktvolke wurde im Rahmen der Diplomarbeit von Frau A. Bienert, TUD (2004) mit einem Laserscanner *Riegl LMS-Z420i* aufgenommen (Abb. 2). Diese Punktvolke besteht aus Aufnahmen von zwölf Standpunkten und beinhaltet ca. 34 Millionen Punkte. Die Registriergenauigkeit der einzelnen Standpunkte zueinander beträgt 5 – 7 mm. Die gesamte Punktvolke des Dachstuhls des Bautzener Doms diente als Datengrundlage zur Separierung und Detektion der einzelnen Balken. (Abb. 1)



**Abb. 1:** Laserscanneraufnahme von einem Standpunkt im Dachstuhl Bautzener Dom, dargestellt als zweidimensionales Intensitätsbild (Screenshot *RiscanPro*)



Technische Daten	
Lasersklasse	1
Wellenlänge	Nahes Infrarot
Strahldivergenz	~ 0,25 mrad
minimale Reichweite	2 m
Maximale Reichweite	1000 m ( p >80% )
	350 m ( p >10% )
Messungen pro Sekunde	max. 1200
Winkelauflösung	~ 8 mgon
Mittl. Streckengenauigkeit	< 7 mm

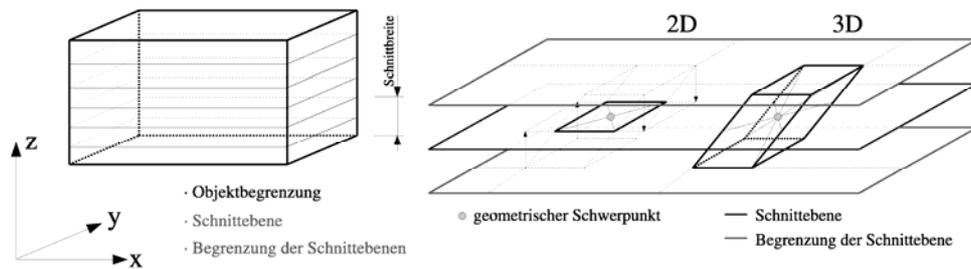
**Abb. 2:** Laserscanner Riegl LMS-Z420i

## 2.2 Datenaufbereitung

Die Datenakquisition wurde mit der scannereigenen Software *RISCAN PRO* durchgeführt. In dieser Software erfolgten auch die Registrierung und der Export der Messdaten. Als Exportformat diente eine Textdatei mit jeweils einem Koordinatentripel pro Zeile. Diese Datei stellt die Grundlage für alle weiteren Verfahrensschritte in den erstellten C++ Programmen dar.

Der entwickelte Algorithmus arbeitet ohne Standpunktinformationen und realisiert zunächst eine Zerlegung der Punktwolke in Schnittprofile (Scheiben), welche automatisch nach einer vorgegebenen Ebene ausgerichtet werden. Der erste Schritt für eine automatische Aufteilung einer Punktwolke in Schnittprofile ist die Definition einer beliebigen Ebene im Raum und einer bestimmten Schnittbreite. Über die Objektgröße wird die Lage aller weiteren Schnittprofile so berechnet, dass sie parallel zu der zuvor definierten Ebene sind (Abb. 3 links).

Die Zuordnung der Punkte zu den Schnittprofilen erfolgt durch eine Abstandsbestimmung zwischen einem Schnitt und einem Punkt. Jeder Punkt wird auf seine Entfernung zur Ebene getestet. Alle Messpunkte, die innerhalb des vordefinierten Abstandes liegen, werden im 2D-Auswertungsansatz orthogonal auf die jeweilige Schnittebene projiziert. (Abb. 3 rechts)



**Abb. 3:** Schnittprofilaufeilung (parallel zur  $x,y$ -Ebene) (links), Unterteilung der 2D und 3D Auswertung eines Balkens, 2D-Auswertung durch Projektion aller Datenpunkte auf die Schnittebene, bei der 3D-Auswertung werden alle originalen Datenpunkte in einem Schnitt verwendet (rechts)

### 2.3 Ausgabeformate

In den ersten Verfahrensschritten der Programmerstellung zeigte es sich, dass das Einlesen aus einer Textdatei sehr zeitintensiv ist. Zur Lösung dieses Problems wurde die Textdatei vor allen Berechnungen in eine Binärdatei konvertiert.

Zur Visualisierung der Ergebnisse und der Laserscannerpunktvolke wurde die Skriptsprache VRML 2.0 (Virtual Reality Modeling Language) verwendet. Diese Skriptsprache ist ursprünglich eine dreidimensionale Schnittstellenentwicklung für das World Wide Web. Die VRML-Ausgabedateien der Ergebnisse werden automatisch von dem in dieser Arbeit erstellten C++ Programm generiert.

## 3 Separierung von Punkt-Clustern

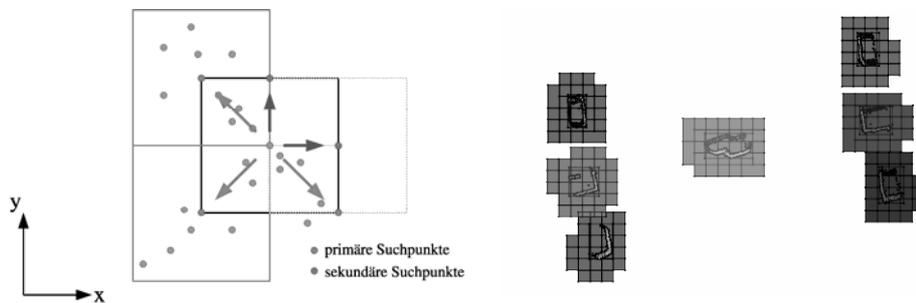
Die Separierung der Punkt-Cluster erfolgt in den einzelnen Schnittprofilen. Hierbei wird unterschieden zwischen einer 2D- und einer 3D-Auswertung (Abb. 4). In dieser Arbeit wird die Größe einer Punktvolke über einen umschließenden Quader definiert. Alle Kanten des Quaders sind jeweils zu einer Koordinatenachse parallel. Die damit entstandene Objektgrenze wird bei jeder eingelesenen Punktvolke bestimmt und dient als räumlicher Bezug. Die Objektgrenze ist zudem Grundlage zur Definition von lokalen Koordinatensystemen und für Kontrollmechanismen, die eine Zuordnung von Objekten realisieren.

### 3.1 2D-Separierung von Punkt-Clustern

Die Separierung von Punkt-Clustern ist eine automatische Suche und Trennung von zusammengehörigen Laserscannerpunkten. Ein Patch ist im Folgenden ein definiertes Strukturelement, über das eine Separierung des Datensatzes erfolgen soll. Das Patch dient in erster Linie einer Zuordnung von benachbarten Punkten. Es ist so definiert, dass es die gleiche Ausrichtung besitzt wie das Koordinatensystem. Mit der Größe des Patches wird die Entfernung angegeben, mit der zwei Objekte voneinander getrennt werden sollen. Anhand des Patches wird die gesamte Punktvolke durchsucht. Der Algorithmus startet bei einem

beliebigen Punkt der Punktwolke, der als Mittelpunkt für das Suchpatch dient. Im Folgendem werden alle Punkte des Datensatzes heraus gesucht, die innerhalb der definierten Fläche liegen.

Durch die Aufteilung des Patches in Quadranten können vier primäre Suchpunkte definiert werden. Wenn hingegen ein Quadrant keine Datenpunkte enthält, werden an benachbarten Quadranten, die Punkte enthalten, sekundäre Suchpunkte gesetzt. Es sind vier sekundäre Suchpunktpositionen möglich. Diese befinden sich am Schnittpunkt einer Quadrantenabgrenzung und einer Außenkante des Patches. Die sekundären Suchpunkte sind für eine exakte Objekttrennung erforderlich. Alle gefundenen Datenpunkte innerhalb des Patches werden in einer Objektstruktur gespeichert und aus dem Originaldatensatz entfernt. Die zuvor ermittelten primären und sekundären Suchpunkte sind neue Mittelpunkte für die weitere Patchsuche. Der Algorithmus wird solange wiederholt, bis alle Suchpunkte abgearbeitet wurden und keine neuen Suchpunkte über ein Patch gesetzt werden können. Das Prinzip ist in Abbildung 4 verdeutlicht. Mit diesem Algorithmus ist es möglich, die Punktwolken der einzelnen Schnittprofile in einzelne Objekte zu zerlegen.



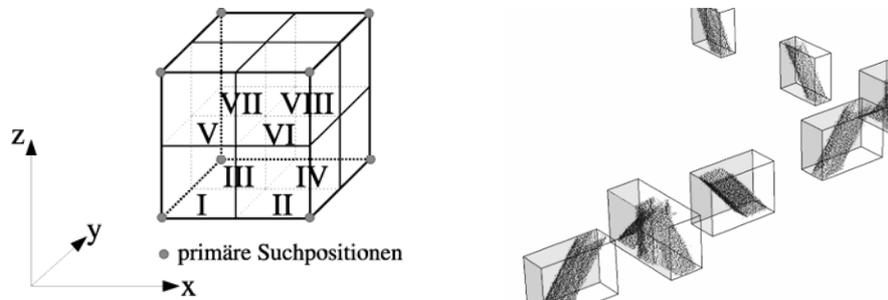
**Abb. 4:** Objektseparierung, dynamische Patchsuche durch Definition neuer Suchpunkte (links), Ergebnis der Objektseparierung (rechts)

### 3.2 3D-Separierung von Punkt-Clustern

Mit dem Ansatz der Objektsuche über eine dynamische Quadersuche wird der entwickelte zweidimensionale Algorithmus aus Abschnitt 3.1 auf eine dreidimensionale Separierung von Punkt-Clustern erweitert. Das Verfahren soll benachbarte Punkte im Raum zu einem Objekt zusammenfassen.

Die Zusammenfassung beruht auf einer räumlichen Suche mit einem definierten Quader. Die Größe des Quaders ist im Vorfeld so festzulegen, dass die Seitenlängen mindestens halb so klein sind wie der Abstand zweier zu trennender Objekte. Durch diese Festlegungen definiert sich der Quader mit den Größen  $dx$ ,  $dy$  und  $dz$ . Die Orientierung wird durch das Koordinatensystem festgelegt. Der Verfahrensablauf erfolgt analog zum zweidimensionalen Fall. Ein beliebiger Punkt aus der Punktwolke wird als Mittelpunkt des ersten Suchquaders festgelegt. Mit Hilfe der Abgrenzungen des Quaders werden alle Punkte gefiltert, die sich innerhalb des Quaders befinden. Diese Punkte werden nach dem Quadrantentest aus der Punktwolke gelöscht und in einer separaten Objektstruktur gespeichert. Die Aufteilung des Suchquaders in acht Quadranten ist in Abbildung 5 visualisiert.

Durch die Definition der acht Quadranten ist es möglich die sekundären und primären Suchpositionen festzulegen, die als mögliche Mittelpunkte eines neuen Suchquaders dienen. Damit ist es möglich, räumlich getrennte Punkte verschiedenen Objekten zuzuweisen. Mit dem Ziel, ein Objekt vollständig aus der Punktwolke zu separieren, sind alle durch den Algorithmus entstanden Suchpositionen abzuarbeiten.



**Abb. 5:** Suchquader mit der Aufteilung in einzelne Quadranten (links), Ergebnis der Separierung von Punktklustern im dreidimensionalen Raum (rechts)

## 4 Extraktionen von Primitiven

### 4.1 Geradenextraktion in separierten Objekten

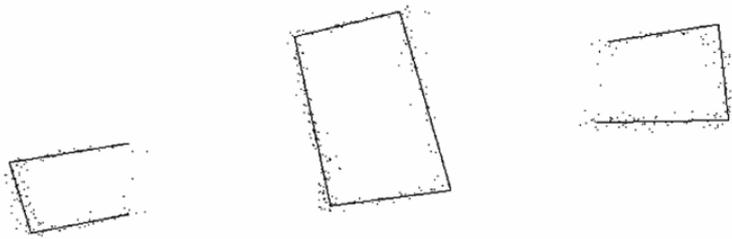
Im folgenden Abschnitt wird eine Geometrieextraktion anhand eines zuvor erstellten zweidimensionalen Objekts näher erläutert. Theoretisch kann jede Kurve, Parabel, Gerade oder jeder Kreis als Modellierungsgrundlage dienen. Problematischer ist es, eine Näherungslösung (Lage und Orientierung) für eine Geometrie zu finden, wenn mehrere Geometrien in einem Objekt enthalten sind. Mit zunehmender Komplexität einer Geometrie nimmt der Aufwand zur Bestimmung einer Näherungslösung zu.

In der Regel besteht ein Dachstuhl aus einer Vielzahl an Balken, Sparren und Dachlatten. Die Oberflächen der einzelnen Bestandteile können durch approximierende Flächen oder durch kombinierte Regelkörper beschrieben werden. Diese Annahme kann annähernd für den gesamten Datensatz Anwendung finden. Wird die Punktwolke horizontal geschnitten so erhält man aufgrund der hauptsächlich vertikalen Richtung der Balken als Resultat einen Balkenquerschnitt der durch einzelne Geraden darstellbar ist. Im speziellen Beispiel des Bautzener Doms besteht ein extrahiertes Objekt aus einer kleinen Punktwolke, die einen Teil des Dachstuhls beschreibt. Das kann im Einzelnen ein Balken, ein Teil einer Dachplanke oder des Dachstockes sein. Die Streuung (Genauigkeit des Laserscanners und Rauigkeit der Balkenoberfläche) der einzelnen Datenpunkte beträgt im dreidimensionalen Datensatz durchschnittlich  $\pm 1-2$  cm.

Bei der Projektion in die Ebene (zweidimensionaler Ansatz) kann diese Streuung nur für Balken übernommen werden, die zur Schnittebene senkrecht stehen. Alle Balken, die eine

andere Neigung aufweisen, werden im Schnitt mit einer geringeren Punktdichte und einer größeren Streuung der Datenpunkte abgebildet.

Der verwendete Grundalgorithmus für die Bestimmung der Näherungslösung einer Geraden ist eine Houghtransformation (HOUGH 1962). Hierbei werden kollineare Punkte in einem Bildausschnitt in einem Parameterraum gefunden. Als Grundlage dient die Hessesche Normalform der Geraden. Die Houghtransformation stellt ein sehr robustes Verfahren zur Bestimmung von Näherungslösungen für eine Gerade dar auch für Punkte, die eine gewisse Streuung besitzen. Aufgrund dessen, dass das Verfahren aus der Bildverarbeitung stammt, sind sowohl der Ortsraum und als auch der Parameterraum durch eine Bildmatrix beschrieben (HABERÄCKER 1991). Jedes detektierte Maximum im berechneten Parameterraum wird in den Ortsraum zurücktransformiert, mit dem Ziel eine Gerade in einer Punkt-Richtungsform zu erhalten. Mit Hilfe einer ausgleichenden Geraden kann anschließend die Näherungslösung der Houghtransformation verbessert werden (Abb. 6).

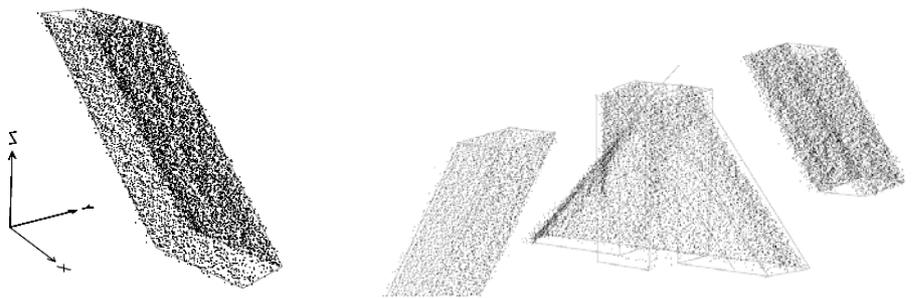


**Abb. 6:** Geradenextraktion von drei einzelnen Balken in einem zweidimensionalen Schnittprofil (minimale Punktzahl für eine Geradendetektion sind 10 Datenpunkte)

## 4.2 Extraktion von Ebenen in separierten Objekten

Der zweidimensionale Ansatz liefert für annähernd senkrecht stehende Balken gute Ergebnisse, zur Schnittebene geneigte Balken ( $>45^\circ$ ) können hingegen nur schlecht bis gar nicht detektiert werden. Durch diese Einschränkung ist es nicht möglich alle Balkenpositionen für eine Topologiefindung in dem jeweiligem Schnittprofil zu bestimmen. Zur Lösung dieser Problematik wurde ein dreidimensionaler Ansatz zur Separierung der Begrenzungsflächen der Balken des Dachstuhls realisiert.

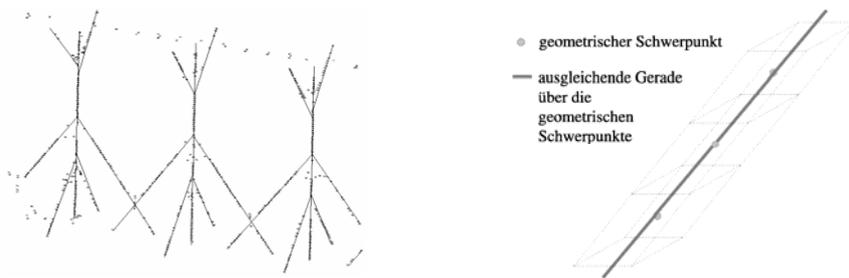
Die Extraktion soll ohne Einschränkungen im dreidimensionalen Raum und ohne Vorinformationen erfolgen. Mit diesen Bedingungen wurde die zweidimensionale Houghtransformation für Geraden so erweitert, dass sie für eine Ebene anwendbar ist (VOSSELMAN et al. 2004). Ausgangspunkt für die Berechnung ist die Hessesche Normalform der Ebene, was bedeutet, dass für jeden Punkt eine Ebenenschar zu generieren und in einen Parameterraum einzutragen ist. Über diesen Parameterraum ist es möglich, eine Aussage zu treffen, an welchen Stellen und mit welcher Orientierung sich Ebenen im Raum befinden. Diese Ebenenparameter dienen analog dem zweidimensionalen Fall (Gerade) als Näherung für eine Ebenenausgleichung (KERN 2003). Alle extrahierten Ebenen wurden im Anschluß miteinander verschnitten (Abb. 7).



**Abb. 7:** Ebenenextraktion, visualisiert durch die Schnittgeraden der detektierten Ebenen

## 5 Rekonstruktion der Dachstuhltopologie

Mit dem vorgestellten Verfahrensablauf ist es möglich, aus den Extraktionsergebnissen eine Balkentopologie auf Grundlage von geometrischen Schwerpunkten zu berechnen. Mit dem Ziel, eine Visualisierung der Topologie des Bautzener Doms zu erhalten, wurden die Ergebnisse der Geometriextraktion in ein CAD-Programm importiert. In diesem Programm wurden die Stäbe über die einzelnen geometrischen Schwerpunkte der einzelnen extrahierten Geometrien erstellt (Abb. 8). Dieser Arbeitsschritt erfolgt im derzeitigen Bearbeitungsstand noch interaktiv.



**Abb. 8:** Ausschnitt des Extraktionsergebnisses vom Dachstuhl Bautzener Dom: durch mehrere geometrische Schwerpunkte konstruierte Stäbe (visualisiert mit AutoCAD) (links), Verbindung der einzelnen geometrischen Schwerpunkten in einem Schnittprofil (rechts)

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Verfahren zur Detektion und Modellierung der Begrenzungsflächen von Dachbalken mit dem Ziel der Tragwerksmodellierung entwickelt. Das

Verfahren beruht auf der Unterteilung einer Laserscannerpunktvolke in Schichten und der Suche nach Begrenzungslinien in 2D-Projektionen bzw. nach Begrenzungsflächen durch eine Houghtransformation.

Die Ergebnisse sind stark von der Punktdichte und der Streuung der Punkte in den Schnittebenen abhängig. Etwa 75% aller extrahierten Daten konnte für eine Weiterverarbeitung verwendet werden. Hierauf basierend konnte manuell ein Stabwerkmodell für die Statikberechnung mit einer Genauigkeit von 1 – 2 cm erstellt werden.

Für die Zukunft ist eine automatische Zuordnung der einzelnen geometrischen Schwerpunkte zu einer Balkentopologie vorgesehen. Mit diesem Verfahrensschritt ist es dann möglich aus einer Laserscannerpunktvolke automatisch ein Stabwerksmodell zu extrahieren, mit dem eine Statikberechnung des kompletten Dachstuhls erfolgen kann.

## 7 Literatur

- Haberäcker, P. (1991). *Digitale Bildverarbeitung, Grundlagen und Anwendung*. Carl Hanser Verlag, München / Wien.
- Henze, F.; Wulf-Rheidt, U.; Bienert, A.; Schneider, D. (2005): *Photogrammetric and geodetic documentation methods at St. Petri Cathedral, Bautzen*. Turin (Italy). CIPA Archives for Documentation of Cultural Heritage, Volume XX-2005 & ISPRS International Archives, Volume XXXVI-5/C34
- Hough, P.V.C., (1962) *Method and means for recognizing complex patterns*. U. S. Patent 3,069,654.
- T. Rabbani, F. van den Heuvel, *Efficient Hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds*, Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005, Enschede, VOLUME XXXVI, PART 3/W19 ISSN 1682-1777
- Vosselman, G.; Gorte, B.; Sithole, G. and Rabbani, T. (2004) *Recognising structure in laser scanner point clouds*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 46 (part 8/W2), pp. 33–38.
- Kern, F., (2003) *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Braunschweig: Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig Heft Nr. 19