

Flächenhafte Deformationsanalysen mit terrestrischen und Nahbereichslaserscannern – eine Gegenüberstellung anhand von Beispielen

Area-based Deformation Analyses Based on Terrestrial and Close-up Laser Scanners – a Comparison by Examples

Christoph Holst, Jan Dupuis, Stefan Paulus und Heiner Kuhlmann

Dieser Beitrag stellt einen Überblick über den Ablauf einer flächenhaften Deformationsanalyse basierend auf terrestrischen Laserscannern (TLS) dar, wobei speziell auf die Datenerfassung, Vorverarbeitung und Auswertung eingegangen wird. Zudem werden Deformationsanalysen im Nahbereichsscanning betrachtet und es wird ein Vergleich zwischen beiden Anwendungen anhand zweier Beispiele gezogen: Die verwendeten Auswertemethoden im TLS- und Nahbereich sind sehr ähnlich und meist übertragbar. Beiden Anwendungen ist gemein, dass weiterhin großer Forschungsbedarf besteht. Dies gilt gerade im Hinblick auf die Integration systematischer, oberflächenbedingter Abweichungen in die Auswertung sowie bei der flächenhaften Modellierung von Deformationen.

Schlagwörter: Flächenhafte Deformationsanalyse, terrestrisches Laserscanning, Nahbereichslaserscanning, automatische Segmentierung

The present study reviews the process of area-based deformation analysis using terrestrial laser scanners (TLS) focused on data acquisition, pre-processing and modeling. Additionally, area-based deformation analysis based on close range laser scanners is discussed. Both applications, TLS-based and close range deformation analysis, are compared by two examples: The used methods for deformation analysis are similar and also exchangeable. Furthermore, both applications are combined in the fact that further research is needed. This applies especially at integrating systematic and surface-based errors in the analysis as well as at modeling area-based deformations.

Keywords: Area-based deformation analysis, terrestrial laser scanning, close-up laser scanning, automated segmentation

1 EINLEITUNG

Zur Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen gibt es einen reichhaltigen Methodenschatz /Heunecke et al. 2013/, der allerdings im Wesentlichen von klar identifizierbaren und oft vermarkten Einzelpunkten ausgeht. Laserscanner hingegen tasten das Untersuchungsobjekt räumlich hoch aufgelöst mit willkürlich

gewählten – also nicht identifizierbaren – Punkten ab. Das führt zu einer Reihe von Herausforderungen bei der Übertragung der bekannten Methoden zur Deformationsanalyse auf eine oberflächenbasierte Objektrepräsentation, die den Umfang eines Zeitschriftenbeitrags deutlich sprengen würde.

In diesem Beitrag sollen vielmehr die wesentlichen Schritte der Messung, Analyse und Interpretation von Laserscannermessungen zur Deformationsanalyse aufgezeigt und anhand von zwei Beispielen exemplarisch erläutert werden. Am Institut für Geodäsie und Geo-information (IGG) der Universität Bonn werden im Bereich Laserscanning schwerpunktmäßig sowohl Anwendungen terrestrischer Laserscanner als auch Anwendungen von Laserscannern im Nahbereich untersucht. Daher beziehen sich die gewählten Beispiele jeweils auf einen dieser Bereiche.

Das erste Beispiel stellt die Deformationsanalyse eines Radio-teleskops dar. Dieses wurde mit einem terrestrischen Laserscanner (TLS) erfasst. Das zweite Beispiel beschreibt die Deformationsanalyse eines gefrästen Kegels basierend auf einem Nahbereichslaserscanner. Anhand der Beispiele werden die verschiedenen Vorgehensweisen zur Deformationsanalyse im TLS- sowie im Nahbereich untersucht, gegenübergestellt und auf jeweilige Übertragbarkeit evaluiert.

2 ABLAUF EINER TLS-BASIERTEN DEFORMATIONSANALYSE

Für eine Deformationsanalyse mit terrestrischen Laserscannern (TLS) ist der in *Abb. 1* gezeigte Ablauf typisch. Im ersten Schritt findet eine Erörterung der Problemstellung statt, wobei hier die Anforderungen an

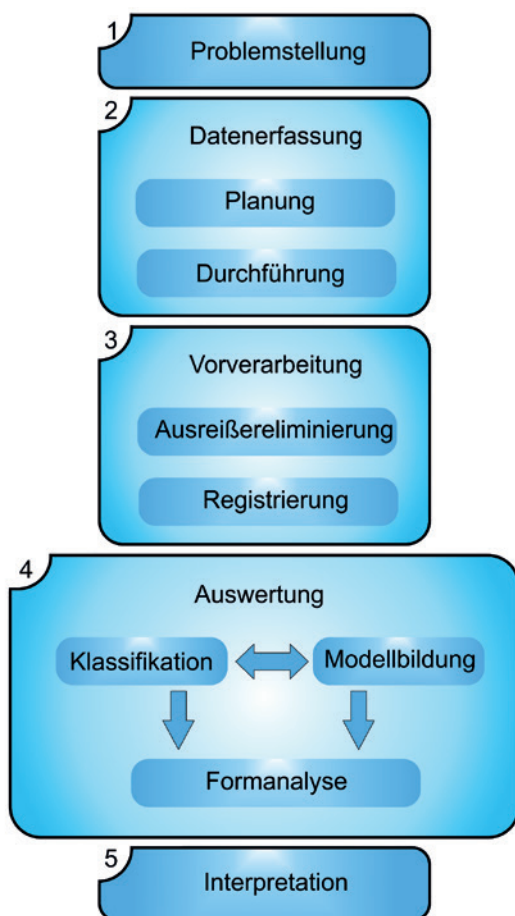


Abb. 1 | Ablaufdiagramm einer typischen Messung mit einem Laserscanner /eigene Darstellung/

die Ergebnisse, insbesondere bzgl. zeitlicher und räumlicher Diskretisierung sowie Genauigkeit, festgelegt werden. Der zweite Schritt der Datenerfassung beinhaltet die Planung und Durchführung der Messung. Im anschließenden dritten Schritt werden die nun vorliegenden Punktwolken vorverarbeitet. Hier sind im Speziellen die Ausreißereliminierung und die Registrierung von großer Bedeutung. Weitere Schritte sind z. B. die Georeferenzierung oder die Punktwolkenausdünnung.

Die Auswertung stellt den vierten Schritt des Ablaufs einer TLS-basierten Deformationsanalyse aus *Abb. 1* dar. Diese kann anwendungsabhängig in die Klassifikation und Modellbildung sowie die anschließende Formanalyse unterteilt werden. Diese Analyseschritte bilden den zentralen Aspekt bei der TLS-basierten Deformationsanalyse, da hier aus den flächenhaft gescannten Punkten Aussagen bzgl. räumlicher Deformationen und ihrer Signifikanz abgeleitet werden.

Im letzten, fünften Schritt findet eine abschließende Interpretation der Ergebnisse statt. Diese geht über die mathematische und statistische Analyse des vierten Schritts hinaus, indem die Ergebnisse weiter analysiert werden, oft unter Hinzuziehung weiterer (evtl. nicht geodätischer) Daten. Aus den Ergebnissen sind geeignete Schlüsse zu ziehen und die in der Problemstellung vorgegebenen Ziele der Deformationsanalyse aufzugreifen.

In den folgenden Abschnitten werden einige dieser Aspekte wieder aufgegriffen, indem detaillierter auf die Datenerfassung, Vorverarbeitung und Auswertung eingegangen wird (Abschnitte 2.1–2.4). Diese Ausführungen werden die verschiedenen Methoden einer TLS-basierten Deformationsanalyse in die klassische, geodätische Begrifflichkeit einordnen.

2.1 Datenerfassung

Nach *Abb. 1* beinhaltet die Datenerfassung sowohl die Planung der Messung als auch deren Durchführung. Die Planung integriert dabei u. a. die Aspekte der Standortwahl, -anzahl und -verknüpfung, um eine möglichst optimale Aufnahmegeometrie zu schaffen. Aspekte, wie z. B. der Auftreffwinkel des Scans, gilt es hier zu berücksichtigen /Soudarissanane et al. 2011/. Wie in Abschnitt 2.3 gezeigt wird, kann die daraus resultierende Messkonfiguration auch mitentscheidend für die Reproduzierbarkeit der flächenhaften Analyse sein.

Generell gelten bei der Messplanung und Durchführung die gleichen objektbezogenen Regeln wie bei allen Arten von Deformationsmessungen. Hier ist insbesondere die räumliche sowie zeitliche Diskretisierung an die zu erwartende Deformation anzupassen. Einen Überblick über wichtige planerische Schritte liefern /Heunecke et al. 2013/.

Eine interessante Entwicklung gibt es in den letzten Jahren hinsichtlich der kinematischen Aufnahme terrestrischer Laserscans /Neitzel & Neumann 2013/, /Frei et al. 2013/. Bisweilen reichen die Genauigkeiten und räumlichen Auflösungen der Scans – abhängig von der kinematischen Trägerplattform – für eine Vielzahl von geodätischen Deformationsanalysen allerdings noch nicht aus. Dennoch sind zukünftig kinematisch aufgenommene Deformationsmessungen denkbar.

2.2 Vorverarbeitung

Der in *Abb. 1* erstgenannte Schritt der Vorverarbeitung ist die Ausreißereliminierung. Diese bezeichnet die Eliminierung gescannter

Punkte, die nicht das eigentliche Objekt repräsentieren, dessen Scan mithilfe eines Modells analysiert werden soll. Die Ursachen für Ausreißer können in zwei Bereiche geteilt werden, wobei sich der erste Bereich im geodätischen Sinn zu groben Fehlern zählen lässt und der zweite systematischen Abweichungen zuzuordnen ist:

- Grobe Fehler sind Punkte, die nicht das eigentliche Messobjekt repräsentieren, sondern verschiedenen anderen (Hintergrund-) Objekten zuzuordnen sind. Ein Großteil dieser Punkte wird meist manuell gelöscht, da sowohl Größenordnung der Abweichung und Anzahl als auch räumliche Verteilung sehr projektspezifisch sind. Falls diese Punkte jedoch Objekte repräsentieren, die in unmittelbarer Nähe zum eigentlichen Messobjekt liegen, ist eine Eliminierung oftmals nur iterativ während der Modellbildung möglich.
- Üblicherweise sind systematische Abweichungen in der Geodäsie auf instrumentelle Abweichungen oder äußere Bedingungen der Umwelt zurückzuführen. Bei Scannermessungen müssen die Ursachen noch um messgeometriebedingte (z. B. Auftreffwinkel, Generalisierung des Objekts durch Footprint) und oberflächenbedingte (z. B. Perforation, Unstetigkeiten, Reflexion, Kometenschweif) Abweichungen erweitert werden. Hier ist eine Einteilung der oberflächenbedingten Abweichungen in die Kategorie systematischer Abweichungen anstelle der Zuordnung zu groben Fehlern allerdings nicht immer eindeutig möglich, wie es etwa am Beispiel perforierter Oberflächen deutlich wird. Ausreißer, die aus diesen systematischen Abweichungen resultieren, können aufgrund ihrer geringen Residuen zum Modell meistens erst

während der Auswertung bei der Klassifikation oder der Modellbildung (iterativ) eliminiert werden.

Das Thema der Registrierung (und der Georeferenzierung als Teilaspekt) von Laserscans brachte in den letzten Jahren eine Vielzahl (geodätischer) Publikationen hervor. Die Herausforderung ist dabei, die Transformationsparameter auch ohne das Zurückgreifen auf eigens installierte Zielmarken oder Festpunkte möglichst vollautomatisiert durchführen zu können. Als Verfahren dient hier zumeist der „Iterative Closest Point (ICP)“-Algorithmus, der auf /Besl & McKay 1992/ zurückgeht. Problematisch wird dessen Anwendung z. B. bei zu geringen Überlappungsbereichen der Scans oder fehlender Struktur im gescannten Objekt. Daher beschäftigen sich verschiedene Studien mit diesbezüglichen Weiterentwicklungen /Wujanz et al. 2013/, z. B. über ebenenbasierte Registrierung /Gielsdorf 2013/ oder unter Nutzung weiterer Sensorik /Paffenholz 2013/. Der Überblick von /Hesse & Ehm 2013/ zeigt, dass eine finale Lösung derzeit noch nicht in Sicht ist. Oft liegen Limitationen bzgl. Automatisierung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit vor. Daher ist die Registrierung mit Zielzeichen auch weiterhin bei vielen Anwendungen das Mittel der Wahl und die Entwicklung geeigneter Zielzeichen wird weiter vorangetrieben /Kern et al. 2010/.

2.3 Auswertung

Die Auswertung bildet in vielen Anwendungen den Schwerpunkt flächenhafter Deformationsanalysen basierend auf TLS. Von großer Wichtigkeit ist hier die Frage, wie die Deformationen in der Modellbildung flächenhaft analysiert werden können. /Ohlmann-Lauber & Schäfer 2011/ kategorisieren die verschiedenen Möglichkeiten zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten in fünf Modelle: punkt-basierte, punktwolkenbasierte /Girardeau-Montaut et al. 2005/, oberflächenbasierte /Schäfer et al. 2004/, /Grimm-Pitzinger et al. 2005/, /Alba et al. 2006/, geometriebasierte /Eling 2009/, /Ioannidis et al. 2006/, /van Gosliga et al. 2006/, /Chmelina et al. 2012/ und schließlich parameterbasierte Modelle /Schneider 2006/, /Lindenbergh et al. 2005/, /Holst et al. 2012/.

Bei diesen Modellen werden Deformationen nun teilweise aus geschätzten Parametern, aus Punkt-zu-Punkt-Vergleichen oder aus dem Vergleich von (interpolierten) Oberflächen gewonnen. Die parameterbasierten Modelle ermöglichen hierbei die größtmögliche Analyse. Sie basieren auf der Approximation geometrischer Formen wie auch die geometriebasierten Ansätze, jedoch mit der Weiterentwicklung, dass auch die aus der Parameterapproximation resultierende statistische Analyse weiteren Aufschluss über die Deformationen geben kann.

Zur parametrischen Analyse ist ein (geometrisches) Modell für das gescannte Objekt zu definieren. Falls das zugrunde liegende Modell nicht bekannt ist, kann entweder eine Approximation mit Freiformflächen (z. B. Nurbs, /Koch 2009/) durchgeführt werden oder aber die Fläche wird durch eine generelle Quadrik approximiert. Während bei ersterer Wahl beliebige Oberflächen modelliert werden können, charakterisiert eine Quadrik im dreidimensionalen Raum eine Fläche, die durch die quadratische Gleichung mehrerer Variablen beschrieben wird. Hier findet durch die Approximation dieser quadratischen Gleichung implizit eine Klassifikation statt, da die Oberfläche bei der

Hochschule für Technik Stuttgart

An der Hochschule für Technik Stuttgart ist in der **Fakultät Vermessung, Informatik und Mathematik** zum Wintersemester 2014/15 (1. September 2014) oder später eine

Professur für Angewandte Geodäsie

(Bes. Gr. W2) Kennziffer 577

zu besetzen.

Die zu berufende Person soll die Bachelor- und Master-Studiengänge des Bereichs Vermessung und Geoinformatik in den Schwerpunkten Vermessung oder Landmanagement stärken. Von den Bewerberinnen und Bewerbern wird ein Studienabschluss im Bereich Vermessung und Geoinformatik erwartet.

Ausführliche Informationen zu den Einstellungs-voraussetzungen sowie den dienstlichen Aufgaben der Professorinnen und Professoren finden Sie unter www.hft-stuttgart.de/Einstellungs-voraussetzungen. Die Bewerbungsfrist endet am **31.08.2014**.

Weitere inhaltliche Auskünfte zur Stellenbeschreibung erhalten Sie vom Studiendekan Prof. Rainer Kettemann (rainer.kettemann@hft-stuttgart.de; Telefon: 0711 8926-2608).

Parameterschätzung in eine geometrische Form, wie einen Zylinder oder ein Paraboloid, überführt wird /Drixler 1993/.

Der Vergleich zwischen approximierten Modellen verschiedener Epochen oder zwischen approximiertem Modell und ursprünglichem Scan liefert in der Formanalyse abschließend eine Aussage bzgl. vorhandener Formabweichungen bzw. lokaler Deformationen.

3 BEISPIEL EINER TLS-BASIERTEN DEFORMATIONSANALYSE

Im Allgemeinen folgen TLS-basierte Deformationsanalysen dem in *Abb. 1* dargestellten Ablaufdiagramm. Im Folgenden wird dieses Ablaufschema für ein konkretes Beispiel besprochen (Abschnitte 3.1–3.5). Anschließend greift Abschnitt 3.6 weiterführende Fragestellungen auf, die auf andere TLS-basierte Deformationsanalysen übertragen werden können.

3.1 Problemstellung

Abb. 2 zeigt das Radioteleskop Effelsberg. Dieses Radioteleskop mit einem Durchmesser von 100 m wird u. a. für geodätische „Very Long Baseline Interferometry (VLBI)“-Beobachtungen verwendet. Aufgrund des Messkonzepts bei der VLBI – mehrere Quasare werden jeweils über einige Zeit von verschiedenen Radioteleskopen beobachtet – rotiert das Radioteleskop während einer Messung sowohl azimuthal als auch vertikal.

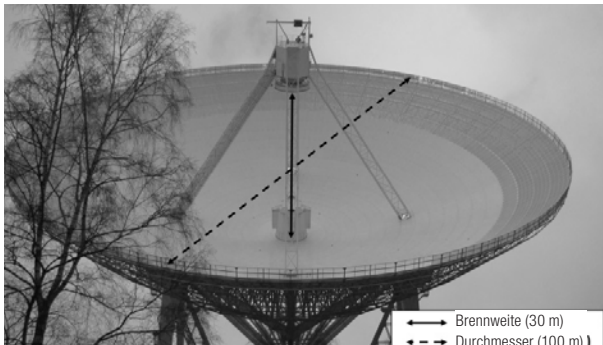


Abb. 2 | Montierung des Laserscanners im Subreflektor /Holst et al. 2011/

Die vertikale Rotation führt dabei aufgrund des Gewichts des Hauptreflektors von 3200 Tonnen zu gravitationsbedingten, flächenhaften Deformationen des Hauptreflektors. Diese wurden mithilfe eines TLS erfasst und ausgewertet /Holst et al. 2012/, wie in den folgenden Abschnitten näher erläutert wird.

3.2 Datenerfassung

Bei der hier beschriebenen Deformationsanalyse wurde der Laserscanner Leica HDS 6100 im Subreflektor fixiert, sodass er bei einer Elevationsstellung von 90° kopfüber hängt (*Abb. 3*). Diese Aufnahmesituation ist vorteilhaft, da sich der Hauptreflektor von diesem Standpunkt aus komplett scannen lässt, die Messgeometrie

symmetrisch zum Scanobjekt ist und die Auftreffwinkel in einem akzeptablen Bereich sind /Holst et al. 2011/. Von diesem Standpunkt wurde die Fläche des Hauptreflektors in sieben Elevationsstellungen (90°, 75°, 60°, 45°, 30°, 15°, 7,5°) mit jeweils ca. 350 Millionen Punkten gescannt.

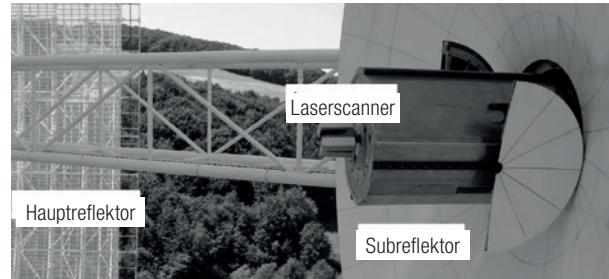


Abb. 3 | Montierung des Laserscanners im Subreflektor bei einer Stellung von 7,5° Elevation /Holst et al. 2011/

3.3 Vorverarbeitung

Beim vorliegenden Beispiel sind einige Aspekte der Vorverarbeitung zu vernachlässigen: Eine Registrierung verschiedener Scans ist aufgrund der Standpunktwahl des Scanners nicht nötig. Eine Georeferenzierung wurde ebenfalls nicht durchgeführt, da die flächenhaften Deformationen jedes Scans der verschiedenen Elevationsstellungen separat im jeweiligen Datum bzw. Koordinatensystem des mitbewegten Scanners analysiert wurden. Nur die Brennweite wird als datumfreier Parameter zum Vergleich der Deformationen bei verschiedenen Elevationsstellungen herangezogen – die Analyse basiert somit nicht auf fixiertem Datum.

Die Ausreißereliminierung hingegen ist von großer Bedeutung für dieses Projekt: In der Umgebung aufgenommene Objekte, wie z. B. Bäume oder sonstige Bepflanzung, sowie konstruktionsbedingte Verstreungen auf der Hauptreflektoroberfläche galt es zu eliminieren (grobe Fehler). Punkte mit systematischen, oberflächenbedingten Abweichungen, die auf die Perforation der Oberfläche am äußeren Rand zurückzuführen sind (*Abb. 2*), wurden

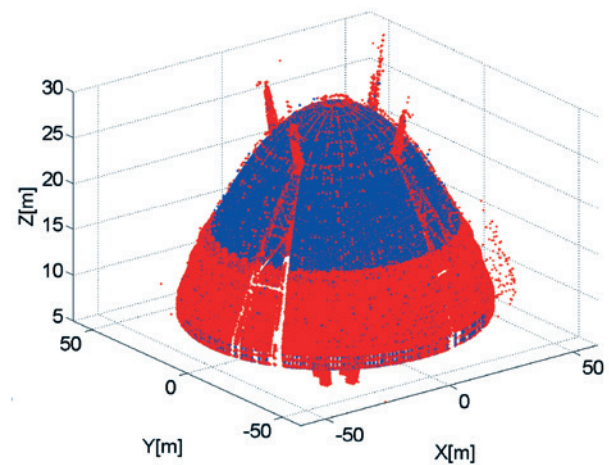


Abb. 4 | Eliminierung der Ausreißer (rot, sowohl grobe Fehler als auch systematische Abweichungen) des Hauptreflektorscans bei 90° Elevation; Darstellung im Scannerkoordinatensystem

ebenfalls entfernt (Abb. 4). Diese Ausreißereliminierung wurde sowohl manuell vor der Modellbildung als auch iterativ während der Modellbildung durchgeführt.

3.4 Auswertung

Der Hauptreflektor wird in der Modellbildung mithilfe des parameterbasierten Modells eines Rotationsparaboloids beschrieben. Dessen einziger Formparameter – die Brennweite – gibt Aufschluss über die globale Deformation (Abb. 5): Die Brennweite variiert elevationsabhängig um maximal 12,5 mm. Neben dieser globalen Deformation, ermittelt durch die Approximation eines bestanpassenden Rotationsparaboloids in jeder Elevationsstellung, werden in der Formanalyse Formabweichungen (lokale, flächenhafte Deformationen) über die Residuen zwischen Modell und Messung betrachtet (Abb. 6). Hier treten neben Effekten, die auf Abschattungen und die Scannermessung selbst zurückzuführen sind, weitere Bereiche großer Residuen in Erscheinung. Diese sind mit weiteren Methoden auf flächenhaften Verformungen und Signifikanz zu überprüfen.

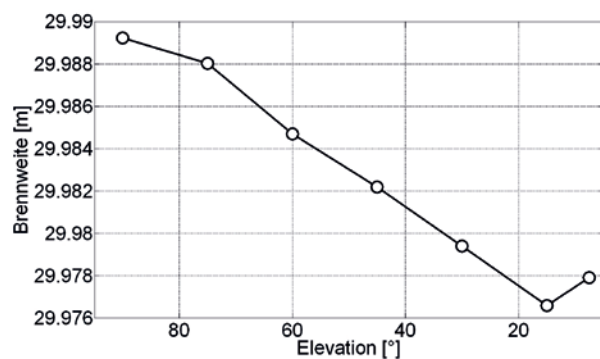


Abb. 5 | Geschätzte Brennweite des Hauptreflektors zu verschiedenen Elevationsstellungen /Holst et al. 2011/

Zur statistischen Analyse dieser punkthaften Residuen eignen sich z. B. aus der Gruppe der geometriebasierten Modelle eine flächenhafte Approximation bikubischer Splines (Abb. 7) oder die Generierung repräsentativer Objektpunkte nach /Eling 2009/ zur Filterung des Rauschens (Abb. 8). Durch beide Modelle kann die Signifikanz der Residuen flächenhaft analysiert werden, sodass auf flächenhafte Deformationen geschlossen werden kann /Eichborn 2012/.

Das hier gezeigte Verfahren zur Analyse der flächenhaften Deformationen beinhaltet keine Klassifikation, da aufgrund von Vorinformationen vom parametrischen Modell eines Rotationsparaboloids ausgegangen wurde.

3.5 Interpretation

Die Interpretation der in den in Abb. 5–8 dargestellten Residuen führt zu verschiedenen Erkenntnissen. Abb. 5 zeigt, dass sich der Hauptreflektor als Ganzes deformiert, ausgedrückt durch eine sich signifikant ändernde Brennweite. Abb. 6–8 zeigen aber auch, dass zusätzlich noch signifikante, flächenhafte Deformationen vorliegen (siehe z. B.

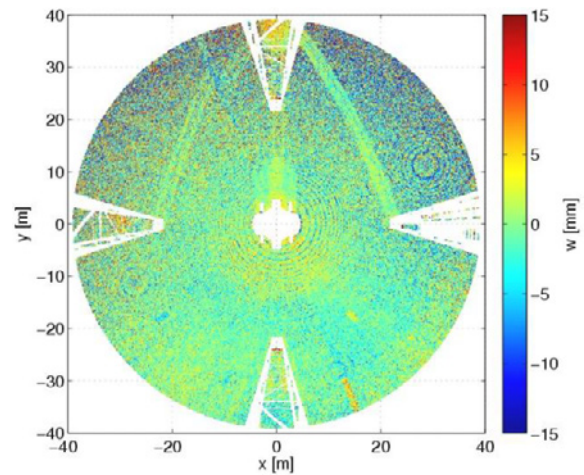


Abb. 6 | Residuen zwischen approximiertem Rotationsparaboloid und TLS-Messung bei 15° Elevation /Eichborn 2012/; Darstellung im Paraboloidkoordinatensystem

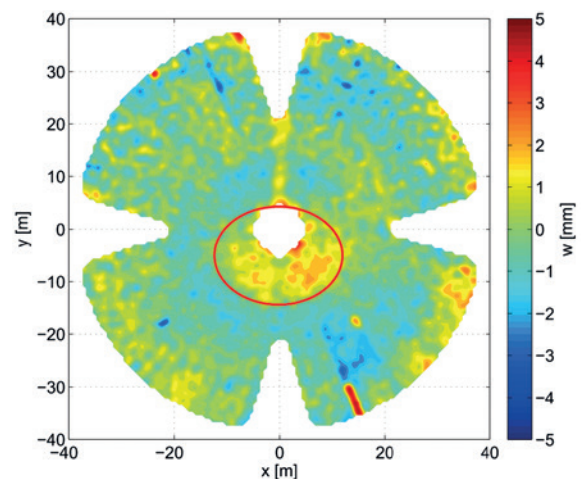


Abb. 7 | Bikubische Splineapproximation der Residuen zwischen approximiertem Rotationsparaboloid und TLS-Messung bei 90° Elevation /Eichborn 2012/; Darstellung im Paraboloidkoordinatensystem

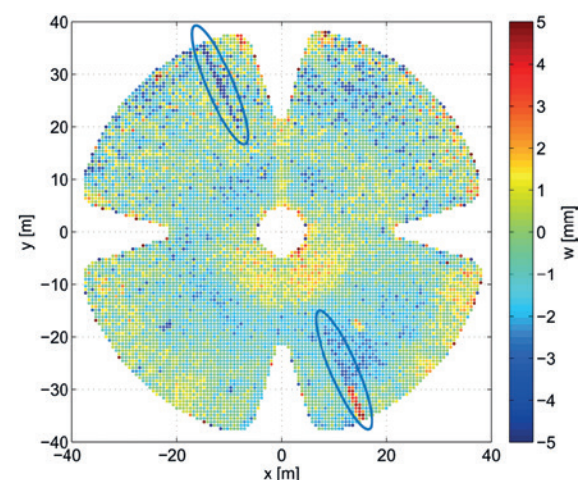


Abb. 8 | Residuen zwischen approximiertem Rotationsparaboloid und repräsentativen Objektpunkten bei 90° Elevation /Eichborn 2012/; Darstellung im Paraboloidkoordinatensystem

rote Markierung in *Abb. 7*). Diese treten in verschiedenen Regionen des Hauptreflektors auf und lassen auf ein Einwirken der Schwerkraft schließen. Des Weiteren sind scheinbare Deformationen zu erkennen, die sich durch verhältnismäßig große Residuen linienhafter Struktur auszeichnen (siehe z.B. blaue Markierung in *Abb. 8*). Diese stellen aber im Gegensatz zu den restlichen Bereichen keine tatsächlichen Deformationen dar, sondern vielmehr messbedingte Systematiken, die weiterer Untersuchung bedürfen.

3.6 Weitergehende Fragestellungen

In den vorherigen Abschnitten wurde eine typische, TLS-basierte Deformationsanalyse am Beispiel der Verformung des Hauptreflektors eines Radioteleskops besprochen. Die verwendeten Analysemethoden spiegeln den aktuellen Entwicklungsstand auf dem Gebiet flächenhafter Analysemethoden wider. Bezogen auf dieses Beispiel sind aber im Bereich der verwendeten Methoden noch weitere Fragestellungen offen, die sich problemlos auf alle Arten TLS-basierter Deformationsanalysen übertragen lassen. Im Folgenden werden drei Aspekte näher betrachtet, die weiteren Forschungsbedarf in dieser Thematik offenlegen und aktuell am IGG Bonn untersucht werden.

- Die globale Deformation des Radioteleskops Effelsberg wird mithilfe der geschätzten Brennweite des Hauptreflektors zu verschiedenen Elevationsstellungen des Teleskops beschrieben. Das zugrunde liegende funktionale Modell zur Parameterschätzung führt in der Geodäsie üblicherweise auf das Gauß-Helmert-Modell (GHM, Allgemeinfeld der Ausgleichsrechnung), bei nichtlinearen Funktionen optimalerweise in seiner strengen Umsetzung /Lenzmann et al. 2004/. Ungeachtet dessen lösen Mathematiker und Informatiker diese Art von Modellen üblicherweise mit der Orthogonalen Distanzregression (ODR, /Ahn et al. 2002/). Dieser Ansatz minimiert im Gegensatz zum GHM nicht direkt die Verbesserungen zwischen Modell und Beobachtungen durch das implizite funktionale Modell. Vielmehr werden explizit sogenannte Fußpunkte auf dem Modell, die den im Sinne der Varianz kürzesten Abstand zwischen Modell und Messung repräsentieren, berechnet und deren Abstand zu den Messungen minimiert. Ein zufriedenstellender Vergleich beider Methoden hinsichtlich der Erwartungstreue und anderer Kriterien liegt bisher noch nicht vor. Erste Schritte in diese Richtung hat /Diehl 2013/ durchgeführt.
- Die räumliche Verteilung von TLS-Messungen und die Genauigkeit jeder Einzelmessung sind abhängig von der Messgeometrie, insbesondere von der Standpunktwahl. Wie /Holst et al. 2014/ zeigen, kann die daraus resultierende variable räumliche Verteilung zu verzerrten Parameterschätzungen bei der TLS-basierten Deformationsanalyse führen. Die Ergebnisse einer Deformationsanalyse hängen somit von der Messkonfiguration ab und sind unter Umständen bei einer abweichenden Konfiguration nicht zu reproduzieren. Als Abhilfe wird eine Strategie zur Ausdünnung der TLS-Messungen beschrieben, die die Reproduzierbarkeit der Deformationsanalyse ermöglicht. Methodisch werden die Redundanzanteile der Beobachtungen homogenisiert, wie es auch bei anderen Netzoptimierungen durchgeführt

wird (z.B. /Holst et al. 2013/). Als mögliche Alternativen zur Ausdünnung kommen z.B. auch robuste Schätzverfahren /Borutta 1988/, balancierte Ausgleichungen /Linke 2000/, die Einführung räumlicher Korrelationen oder auch der Ransac-Algorithmus in Betracht. Ein Vergleich dieser Möglichkeiten zur reproduzierbaren Deformationsanalyse wird in /Holst et al. 2014/ durchgeführt.

- Als stochastisches Modell von TLS-Messungen werden in den meisten Analysen – wie auch in dem hier diskutierten Beispiel – unkorrelierte Messungen angenommen. Dies ist für viele Anwendungen unzureichend, da verschiedene Effekte eine signifikante räumliche Korrelation der Messungen verursachen können. Hier sind z.B. der Footprint des Laserstrahls, der Auftreffwinkel oder die lokalen Oberflächeneigenschaften zu nennen, z.B. /Soudarissanane et al. 2011/. In einer realitätsnahen stochastischen Modellierung sollten also neben den Genauigkeiten für Strecken und Winkel als direkte Messgrößen, die auf die kartesischen Koordinaten fortgepflanzt werden, auch räumliche Korrelationen mitberücksichtigt werden. Ein weiterer zusätzlicher Aspekt wäre noch die Integration des scannerinternen Messunsicherheitsbudgets /Gordon 2008/ sowohl in das stochastische als auch das funktionale Modell.

Jeder dieser drei Aspekte ist auch für das in den vorherigen Abschnitten beschriebene Beispiel der Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg von Bedeutung. Die Untersuchungen und später auch die Übertragung der Erkenntnisse auf dieses Beispiel werden zeigen, ob die bisher erzielten Ergebnisse auch unter der optimierten Modellierung Bestand haben.

4 BEISPIEL EINER DEFORMATIONSANALYSE IM NAHBEREICHSSCANNING

Grundsätzlich unterscheiden sich die Fragestellungen einer flächenhaften Deformationsanalyse im Nahbereich nur geringfügig von den klassischen geodätischen Aufgaben. Auch hier besteht das Ziel meist darin, eine Oberfläche durch eine Vielzahl an 3D-Punkten flächenhaft zu beschreiben, um Deformationen oder Abweichungen von einer gegebenen Sollform zu bestimmen. Allerdings sind die Anforderungen an die Messqualität und die Punktauflösung im Regelfall deutlich höher.

Der wohl bedeutendste Anwendungsbereich für Nahbereichslaserscanner ist der industrielle Einsatz in Form von Reverse Engineering oder Qualitätssicherung /Bi 2010/, /Seokbae et al. 2002/. Da diese Arbeitsschritte meist am Anfang einer Produktionskette stehen, sind die Genauigkeitsanforderungen an die Objekterfassung entsprechend hoch. Gegenüber taktilen Koordinatenmessmaschinen haben Laserscanner den Vorteil, die Objektoberfläche in einem Arbeitsgang flächenhaft mit einer Vielzahl an 3D-Punkten zu erfassen, bei einer Genauigkeit von 0,1 mm bis hin zu wenigen Mikrometern, abhängig vom eingesetzten Messsystem. Darüber hinaus ermöglichen sie die nichtinvasive Erfassung der Objektstruktur, was die Messung von flexiblen Materialien erlaubt.

Aufgrund dieser nicht-invasiven Abtastung ergeben sich neben dem industriellen Einsatz noch weitere Aufgabenfelder. So werden

Nahbereichsscanner am IGG Bonn beispielsweise eingesetzt, um das Wachstumsverhalten junger Pflanzen unter verschiedensten Stressbedingungen geometrisch zu verfolgen /Paulus et al. 2013 b, 2014/. Anhand solcher Wachstumskurven ist es möglich, die Stressresistenz einer Neuzüchtung zu bewerten und so langfristig den Ertrag einer landwirtschaftlichen Nutzfläche zu steigern.

Im Folgenden soll die flächenhafte Deformationsanalyse nach *Abb. 1* eines maschinell gefertigten Aluminiumkegels im Rahmen einer Reverse-Engineering-Aufgabe verdeutlicht werden. Der Schwerpunkt liegt dabei nicht, wie in den vorangegangenen Abschnitten, auf der Methodik der Auswertung, vielmehr stehen hier die eingesetzten Messsysteme sowie die Nutzung alternativer Low-Cost-Sensoren im Fokus.

4.1 Problemstellung

Abb. 9 zeigt einen gefrästen Kegel. Dieser wurde als CAD-Modell am Computer nach präzisen Maßen konstruiert und automatisiert aus einem zylindrischen Aluminiumblock gefertigt.



Abb. 9 | Mittels CNC-Fräse gefertigter Aluminiumkegel

Aufgrund einer Vielzahl an möglichen geometrischen und mechanischen Abweichungen der Maschinenführung /Schwenke et al. 2008/ können sowohl Abweichungen von der geometrischen Form (Formabweichungen bzw. lokale Deformationen) als auch Abweichungen von den Sollmaßen (Maßabweichungen bzw. globale Deformationen) aus dem CAD-Modell auftreten.

Im Rahmen des Reverse Engineering soll der gefräste Kegel messtechnisch erfasst und die erhaltene Punktwolke bestangepasst approximiert und bezüglich Formabweichungen kontrolliert werden. Zusätzlich sind mögliche Maßabweichungen vom CAD zu bestimmen.

Neu entwickelte Low-Cost-Sensoren bieten die Möglichkeit, präzise 3D-Daten aufzunehmen, ohne dabei große Investitionen tätigen zu müssen. Daher wird der Kegel zunächst mit dem David-Laserscanning-System als Repräsentant der Low-Cost-Sensoren

aufgenommen und anschließend mit der Messung eines Industrielasersystems höherer Ordnung verglichen.

4.2 Datenerfassung im Nahbereich

Im Gegensatz zum TLS arbeiten die meisten Nahbereichslaserscanner nach dem Prinzip der optischen Triangulation /Donges 1993/ in Form von Structured-Light-Sensoren oder Laserlinienscannern. Der Fokus liegt hier auf den nach dem Lichtschnittverfahren arbeitenden Laserlinienscannern. Derartige Sensoren liefern lediglich eine zweidimensionale Kontur der Oberfläche (die sog. „Scanlinie“) als Messgröße und müssen daher in geeigneter Art und Weise über die Objektoberfläche hinweg bewegt werden, um ein vollständiges 3D-Modell zu erhalten. Dabei gilt es, die einzelnen Scanlinien über die Kenntnis der Sensorpose (Position und Orientierung) zu einer Punktwolke zusammenzusetzen, wobei mechanisch-messtechnische Ansätze oder mathematische Ansätze zum Einsatz kommen:

- Mechanisch-messtechnische Ansätze nutzen die Kombination aus einem Laserlinienscanner und einem sogenannten „Support“, der messtechnisch die Sensorpose erfasst und somit die einzelnen Scanlinien in Echtzeit registriert. Bei dem Support handelt es sich in der Regel um kartesische Koordinatenmessmaschinen /Cheng 1995/ oder Gelenkmessarme /Paulus et al. 2011/, mit denen eine hochgenaue Verfolgung der Sensorpose im Bereich von wenigen Mikrometern ermöglicht wird. Vorteile dieses Verfahrens sind insbesondere die hohe Genauigkeit, eine hohe Flexibilität und die Echtzeitregistrierung der einzelnen Scanlinien. Demgegenüber stehen jedoch die meist sehr hohen Kosten für Sensorik und Auswertesoftware.
- Der mathematische Ansatz hingegen benötigt keinen externen Support zur Verfolgung der Sensorpose, da die Aufnahmeconfiguration während des Messvorgangs verändert – beispielsweise in Form einer Bewegung des Lasers – und mathematisch berücksichtigt wird.

Ein Vertreter dieses zweiten Ansatzes ist das David-Laserscanning-System /Winkelbach 2006/. Das David-Laserscanning-System ist ein Low-Cost-System, bei dem die Laserlinie per Hand über das Objekt geführt wird und das in seiner Basiskonfiguration lediglich 500 € kostet. In dieser Minimalkonfiguration besteht es aus einer Webcam, einem Linienlaser und einer Kalibrierecke sowie der Mess- und Auswertesoftware. Da die Messqualität durch die Einfachheit der Komponenten stark eingeschränkt ist, kann das System durch höherwertige Sensoren, wie eine hoch auflösende Industriekamera, ergänzt werden. Im Gegensatz zu handelsüblichen Lichtschnittsensoren ist die Aufnahmeconfiguration zwischen Laser und Aufnahmeoptik durch die Bewegung des Lasers variabel und daher mathematisch zu berücksichtigen. In der Grundausstattung erfolgt die Bewegung der Laserlinie per Hand, kann jedoch zur Genauigkeitssteigerung mit einer motorisierten Laserführung ergänzt werden.

Der Aufbau des eingesetzten David-Messstands sieht wie folgt aus (*Abb. 10*): Das eingesetzte David-Laserscanning-System besteht aus einer hochauflösenden Industriekamera, der Kalibrierecke und einem Linienlaser sowie einem Linearantrieb für die Laserbewegung und einem Drehteller für die Rotation des Messobjekts.

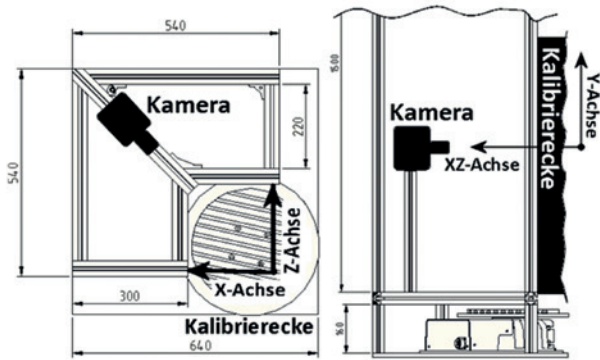


Abb. 10 | Schematischer Aufbau des David-Messstands mit Ausrichtung der Koordinatenachsen. Der Laser wird hinter der Kamera platziert und vertikal verschoben (Einheit: mm).

Die Industriekamera ist so in den Messstand integriert, dass sie annähernd im rechten Winkel auf die Kalibrierecke blickt. Der Linienlaser ist so befestigt, dass er in einem Winkel zwischen 30° und 45° von oben auf die Kalibrierecke trifft.

Für die Messung selbst muss zunächst die relative Orientierung der Kamera gegenüber der Kalibrierecke bestimmt werden. Dies erfolgt innerhalb des David-Softwarepakets über eine Kalibrierung nach /Tsai et al. 1988, 1989/. Gleichzeitig wird auf diese Weise das Koordinatensystem festgelegt, dessen Ursprung innerhalb der Kalibrierecke liegt und dessen Achsen wie in Abb. 10 dargestellt ausgerichtet sind. Während des Scanvorgangs selbst dient die Kalibrierecke dazu, die Lage der Laserebene im Raum zu rekonstruieren und die Aufnahme-konfiguration mathematisch zu definieren. Dafür verwendet die Software Punkte, die auf den Kalibrierecken liegen, um mittels Ransac-Algorithmus die Laserebene im Raum zu schätzen.

Für den Messablauf bedeutet dies, dass sich der Laser mittels des Linearantriebs unter konstanter Geschwindigkeit über das Messobjekt hinweg bewegt und für jeden Kameraframe die Aufnahmekonfiguration abgeleitet wird. Die Objektkoordinaten können dann aus der Kontur der Laserlinie berechnet werden. Das Ergebnis ist eine vermaschte Punktwolke der Oberfläche, beschränkt durch den aktuellen Kameraausschnitt. Für einen vollständigen 360° -Scan wird das Messobjekt mit einem Drehteller um einen definierten Winkelschritt um die Vertikalachse (y -Achse) gedreht und in einem weiteren Scanvorgang erfasst. Diese Vorgehensweise resultiert in mehreren Einzelscans, die gegeneinander um einen definierten Winkelwert verdreht sind.

4.3 Vorverarbeitung

Um ein vollständiges Modell zu erhalten, müssen die Einzelscans registriert und zusammengefügt werden. Die David-Software bietet dafür einen eigenen, automatischen Registrierungsalgorithmus an /Winkelbach 2006/. Dieser nutzt die relative Lage von Punktpaaren sowie die gegenseitige Ausrichtung ihrer Normalenvektoren in zwei Einzelscans, um die Transformationsmatrix zwischen beiden Ansichten zu berechnen. Dazu müssen auf dem Objekt genügend geometrische Strukturen, d.h. markante Punktpaare im Überlappungsbereich, vorhanden sein. Dies führt insbesondere bei rotationssymmetrischen Objekten zu Problemen. Durch die Verwendung

eines Drehtisches kann jedoch eine genäherte Transformation zwischen zwei Einzelscans bestimmt und der Suchbereich für korrespondierende Punktpaare stark eingeschränkt werden. Dies ermöglicht die automatische Registrierung rotationssymmetrischer Objekte.

In einem letzten Schritt, der sogenannten „Fusion“, fügt die David-Software die registrierten Einzelscans zu einer vermaschten Punktwolke zusammen und eliminiert Ausreißer oder systematische Messabweichungen wie beispielsweise den laserscannertypischen Kometenschweif /Gordon 2008/ am Rand des Objekts. Das Endergebnis ist eine vollständig abgedeckte Punktwolke des Messobjekts. Möglichkeiten der automatischen Verbesserung, wie das Füllen von Datenlücken und die Glättung der Vermaschung, werden softwareseitig angeboten, jedoch im hier gezeigten Experiment nicht genutzt.

4.4 Auswertung

Ziel der Auswertung ist die Ermittlung von Form- und Maßabweichungen des gefrästen Kegels. Dafür soll mithilfe der Software Geomagic Studio 12 (Raindrop Geomagic Inc, Morrisville, NC/USA) die aufgenommene Punktwolke durch einen bestangepassten Kegel approximiert und die Abweichungen visualisiert werden. Wie in Abb. 9 zu erkennen ist, wurde der Kegel aus einem zylindrischen Aluminiumblock gefräst. Daher sind im Scan neben den tatsächlichen Kegelpunkten auch Punkte eines Zylinders enthalten. Eine Approximation mittels Kegelmodell der Rohdaten würde somit zu keinem repräsentativen Ergebnis führen. Aus diesem Grund sind in einem ersten Auswerteschritt Zylinder- und Kegelpunkte zu trennen. Dieser Vorverarbeitungsschritt kommt ohne manuellen Einsatz aus und basiert auf einer Klassifikation der reinen Scanpunkte. Den Einzelpunkten wird damit eine semantische Bedeutung zugeordnet.

4.4.1 Klassifikation

Zur Klassifikation mit typischen Klassifikationsmethoden wie Support Vector Machines (SVM) werden spezielle Merkmale benötigt /Vapnik 1998/, die aus den gewonnenen Messdaten abgeleitet werden. Für die Klassifikation von 3D-Punkten stehen meist nur reine xyz -Daten ohne weitere Zusatzinformationen zur Verfügung, was den direkten Einsatz von SVM verhindert. Daher wird die Oberfläche bezüglich ihrer Krümmung und Glattheit bewertet. Einen Beschreibungsansatz liefern sogenannte „Surface Feature Histogramme“ (SFH), die für Oberflächen unterschiedlicher Geometrie charakteristische Histogramme erzeugen (Abb. 11). Diese lassen sich mithilfe von SVM zuordnen.

Die Oberflächenrepräsentation in Form der Histogramme ist generalisierbar und wurde u. a. für die automatische Trennung von geometrischen Primitiven von charakteristischen Pflanzenorganen /Paulus et al. 2013 a/ und für die automatische Registrierung von Einzelansichten verwendet /Rusu et al. 2009/.

Angewendet auf die aktuelle Aufgabenstellung dienen die Histogramme als hochdimensionaler Merkmalsraum für die SVM-Klassifikation mit dem Ziel, Kegel- und Zylinderpunkte in der Punktwolke zu separieren. Dafür gilt es, zunächst ein sogenanntes „SVM-Modell“ zu trainieren, in dem die Trennfunktionen der einzelnen Klassen sowie alle weiteren benötigten Parameter definiert sind.

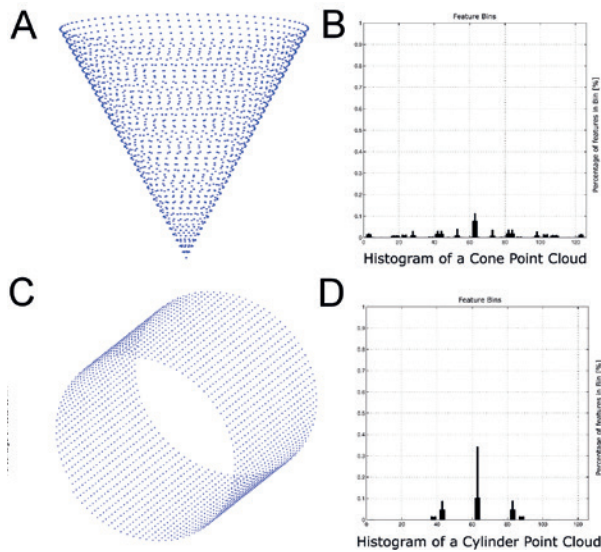


Abb. 11 | Eine kegelförmige (A) und eine zylindrische Punktwolke (C) mit den dazugehörigen Surface-Feature-Histogrammen /Paulus et al. 2013 a/

Dazu kommen Trainingsdaten zum Einsatz. Im aktuellen Fall dienen Histogramme von künstlich erzeugten Punktwolken geometrischer Primitive (Kegel und Zylinder) mit den entsprechenden geometrischen Abmessungen aus dem CAD-Modell als Trainingsdaten.

In Abb. 12 ist das Ergebnis der histogrammbasierten SVM-Klassifikation dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Großteil der Punkte der korrekten Klasse zugeordnet wurde, es jedoch im Übergangsbereich von Kegel- zu Zylinderform zu Fehlklassifikationen kommt. Diese resultieren aus der starken Ähnlichkeit der Geometrie in diesem Bereich. Um das Ergebnis dennoch für eine Modellierung nutzbar zu machen, werden kleine Regionen – wie der

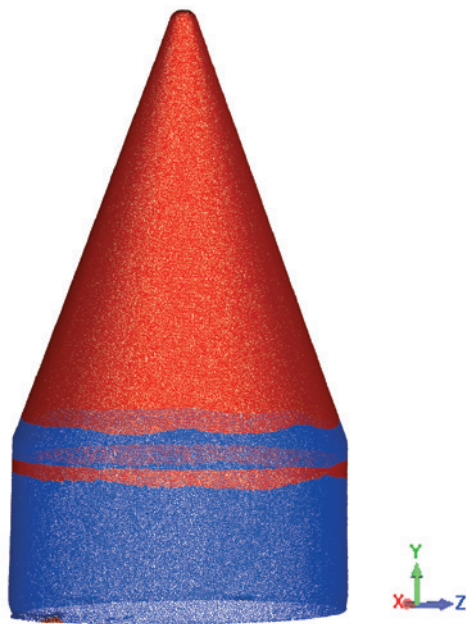


Abb. 12 | Ergebnis der histogrammbasierten SVM-Klassifikation. Blau: Zylinderpunkte, Rot: Kegelpunkte.

Ring am Übergang – mithilfe eines sogenannten „RegionGrow“-Algorithmus detektiert und neu zugeordnet /Paulus et al. 2014/. Im weiteren Verlauf werden schließlich nur die Punkte der Klasse Kegel für eine Modellierung genutzt.

4.4.2 Modellbildung

Die Modellbildung erfolgt in der Auswertesoftware Geomagic Studio 12 und wird in zwei Aspekte unterteilt:

Der erste Teil der Modellierung umfasst die Approximation der klassifizierten Kegelpunkte durch einen bestangepassten Kegel. Das Ergebnis sind sowohl die geschätzten Kegelparameter (Basisdurchmesser und Höhe), als auch eine farbcodierte Darstellung der Residuen. Diese sollen im Folgenden für die Analyse der Formabweichung herangezogen werden.

In einem zweiten Modellierungsschritt wird das CAD-Modell in Geomagic importiert und dient als Sollform. Zum Vergleich des Modells mit der gemessenen Punktwolke erfolgt eine Transformation der Punktwolke über die Basisebene und die Kegelachse in das Koordinatensystem des CAD-Modells. Mittels einer Abstandsanalyse können die Abweichungen des gescannten Kegels zum Modell berechnet und visualisiert werden.

4.4.3 Formanalyse

Das Ergebnis beider Modellierungsvarianten ist ein farblich codiertes Abweichungsbild, das einen Soll-Ist-Vergleich der gescannten Punktwolke mit einem Modell darstellt. Die gezeigten Soll-Ist-Vergleiche sind angelehnt an die VDI-Richtlinie 2617, bei der zwischen einer Formabweichung (Abb. 13 A und B) und einer Maßabweichung (Abb. 13 C und D) unterschieden wird.

Für die David-Punktwolke ergeben sich Formabweichungen in der Größenordnung von $-2,78$ mm bis $0,39$ mm bei einer a posteriori Standardabweichung von $0,071$ mm (Abb. 13 A). Die ermittelten Kegelparameter betragen $142,69$ mm für die Höhe und $110,10$ mm

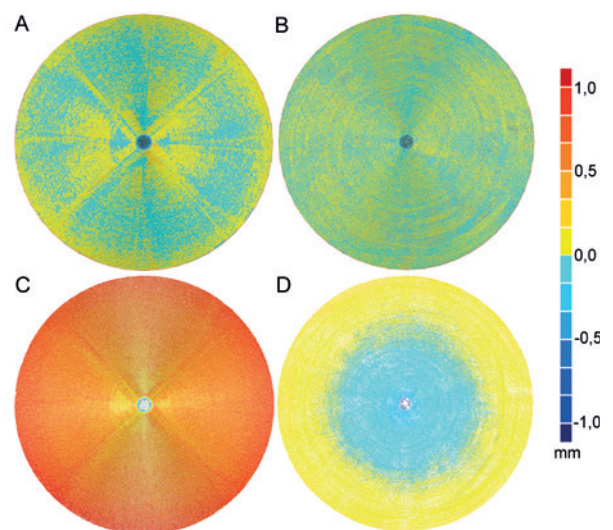


Abb. 13 | Formanalyse des Kegels (Draufsicht), aufgenommen mit dem David-Laserscanning-System (A und C) und der Sensorkombination Romer Infinite 2.0 mit Perceptron V5 Laserscanner (B und D). A und B zeigen die Formabweichungen, C und D die Maßabweichungen.

für den Basisdurchmesser. Es ist deutlich zu erkennen, dass die größten Abweichungen im Bereich der Kegelspitze auftreten, da diese eine Rundung aufweist und nicht mehr mit dem angesetzten Modell übereinstimmt. Des Weiteren lassen sich systematische Abweichungen erkennen, deren Struktur vertikal an acht Positionen über die Mantelfläche hinweg verläuft.

Der Vergleich der berechneten Kegelparameter mit den Sollwerten aus dem CAD-Modell – 108 mm Basisdurchmesser und eine Höhe von 144 mm – zeigt bereits signifikante Abweichungen. Diese zeichnen sich ebenfalls im Soll-Ist-Vergleich mit dem CAD-Modell ab (Abb. 13 C). Die Messung mit dem David-System fällt bis auf den Bereich an der Spitze durchweg zu groß aus.

Dem gegenüber steht die Messung mittels des Industriemesssystems (Abb. 13 A), einer Kombination aus dem Messarm Romer Infinite 2.0 und dem Laserlinienscanner Perceptron V5. Die erhaltenen Formabweichungen liegen zwischen –1,64 mm und 0,18 mm bei einer a posteriori Standardabweichung von 0,042 mm. Auch hier treten die größten Abweichungen im Bereich der abgerundeten Spitze auf. Anders als beim David-System sind hier die Abweichungen auf der Mantelfläche zufällig und zeigen keine systematische Struktur.

Beim Vergleich des Kegels mit dem CAD-Modell (Abb. 13 D) wird deutlich, dass dieser in der Höhe um 1,8 mm zu kurz ist und sowohl im Basisdurchmesser als auch im Öffnungswinkel vom Modell abweicht. Dies lässt sich daran erkennen, dass die Abweichungen im unteren Bereich durchweg positiv und im oberen Bereich negativ sind.

4.5 Interpretation

Anhand der Formanalyse konnte gezeigt werden, dass beide Messsysteme grundsätzlich in der Lage sind, die geometrische Form der Oberfläche mit einer Standardabweichung unterhalb von 0,1 mm zu erfassen. Jedoch zeigen sich beim David-Laserscanning-System deutliche Systematiken in Form von Strukturen in den Residuen und einer Skalenabweichung.

Bei den Strukturen handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um Abweichungen, die aus der Registrierung und Fusion der Einzelansichten resultieren. Das Bauteil wurde vom David-System aus acht um 45° gedrehten Einzelscans zusammengesetzt, welche sich im Ergebnis abzeichnen.

Die Skalenabweichung hat ihren Ursprung wahrscheinlich in der Kalibrierung der Kamera. Diese erfolgt vor Beginn der Messung und benötigt den Maßstab des Kalibrierungsmusters, der durch eine Skala bzw. den Abstand der Punkte im Muster definiert ist. Aktuelle weitergehende Untersuchungen dieser Problematik am IGG Bonn unter Verwendung eines zertifizierten Kugelnormals konnten bereits eine signifikante Abhängigkeit der Absolutgenauigkeit des David-Systems vom gemessenen Kalibriermaßstab bestätigen. Dennoch besteht an dieser Stelle weiterer Forschungsbedarf.

Darüber hinaus kann über den Vergleich mit einem kommerziellen Industriemesssystem gezeigt werden, dass ein Großteil der Abweichungen des David-Systems messtechnisch bedingt ist und keine Abweichungen des Bauteils von einer Kegelform darstellen.

Anders stellt sich dies bei den Maßabweichungen dar. Hier konnten die Messungen des Industriemesssystems belegen, dass

der gefräste Kegel deutliche Abweichungen gegenüber der Sollform aufweist.

Beim Vergleich des David-Laserscanning-Systems mit einem kommerziellen Industriemesssystem konnte gezeigt werden, dass im Nahbereich die Anforderungen an das Messsystem sowie die verwendeten Auswertemethoden zur Registrierung und Fusion deutlich steigen. Bereits kleinste mess- oder auswertetechnische Abweichungen können signifikanten Einfluss auf die Interpretation der Messergebnisse haben.

5 VERGLEICH ZWISCHEN DEN ANALYSEN IM TLS- UND NAHBEREICH

In den vorausgegangenen Kapiteln wurde der Ablauf von zwei flächenhaften Deformationsanalysen dargestellt. Das erste Beispiel beschreibt die Deformationsanalyse eines Radioteleskops basierend auf TLS-Beobachtungen (Kapitel 3), das zweite Beispiel die Deformationsanalyse eines gefrästen Kegels basierend auf Beobachtungen eines Low-Cost-Nahbereichslaserscanners (Kapitel 4). Beide Beispiele befassen sich insbesondere mit der Datenerfassung, Vorverarbeitung und Auswertung, sodass sich ein abschließender Vergleich beider Beispiele in Hinblick auf diese Aspekte lohnt.

5.1 Datenerfassung

Table 1 vergleicht die in den besprochenen Beispielen verwendeten Laserscanner. Basierend auf den unterschiedlichen Messprinzipien dieser Laserscanner liegen auch Unterschiede in den Eigenschaften der resultierenden Punktwolke vor. Aus Sicht des TLS wäre eine Auflösung und Genauigkeit, wie sie im Nahbereich erzielt werden kann, für viele Aufgaben eine Bereicherung. Dieser Qualitätsgewinn ist allerdings im Bezug zum sehr geringen Messvolumen und der Reichweite im Nahbereichsscanning zu sehen.

	Leica Geosystems HDS 6100	David Laserscanning akt. Konfiguration
Reichweite	0,4 m bis 79 m	< 1 m
Messvolumen	360°/310°	0,3 m/0,3 cm/0,4 cm
Auflösung	max. 1,6 mm bei 10 m	0,2 mm
Genauigkeit	5 mm bei 25 m	ca. 0,1 % der Objektgröße
Preis	> 50 000 €	< 2 000 €

Tab. 1 | Vergleich zwischen verwendetem TLS und Nahbereichslaserscanner

Dennoch ist diese hohe Präzision des Nahbereichsscannings beachtlich, da diese nicht nur die Messgenauigkeit des Laserscanners zur Aufnahme einzelner Scanlinien beinhaltet, sondern zusätzlich noch die nötigen Schritte zur Verarbeitung der Scanlinien zu kompletten 3D-Einzelscans. Hierfür werden die schon erwähnten mechanisch-messtechnischen oder mathematischen Ansätze verwendet.

Die limitierenden Faktoren bei der Genauigkeit der Datenerfassung im Nahbereichsscanning liegen bei Systematiken, die der Wechselwirkung zwischen Laser und Objekt (insbesondere Eindringeffekte, Auswirkungen der Belichtungszeit bzw. der Lichtverhältnisse während der Messung sowie die Reflexion der Oberfläche) sowie der Fusion der Scanlinien geschuldet sind. Diese Systematiken wirken sich signifikant auf die resultierende Punktwolke aus, da das bereits erwähnte scannerbedingte Rauschen der abgetasteten Oberfläche sehr gering ist. Um die hohen Anforderungen an die Präzision im Nahbereichsscanning, z. B. für das Reverse Engineering, einzuhalten, müssen diese systematischen Effekte daher in der Auswertung (und einer geeigneten Sensorkalibrierung) kompensiert werden. Daher sind die Erstellung konsistenter Einzelscans aus den Scanlinien und die Analyse der Wechselwirkung zwischen Laser und Objekt hochrelevante Aspekte bei der Deformationsanalyse im Nahbereichsscanning.

5.2 Vorverarbeitung

Sowohl im TLS-Bereich als auch im Nahbereich treten systematische Abweichungen und grobe Fehler – im Sinne der Einteilung aus Kapitel 2 – auf, die zu Ausreißern in den Punktwolken führen. Die Eliminierung dieser Ausreißer wird gleichermaßen manuell oder, wie bereits beschrieben, während der Modellbildung durchgeführt.

Die Registrierung spielt eine zentrale Rolle bei vielen flächenhaften Deformationsanalysen, da Einzelscans oft nicht die komplette, relevante Oberfläche abbilden können. Dies gilt sowohl für den TLS-Bereich als auch für den Nahbereich. Während sich bei Erstgenanntem der Standpunkt des Laserscanners zwischen den Einzelscans verändert, bewegt sich im Nahbereich entweder auch der Sensor (Veränderung der Sensorpose) oder das zu scannende Objekt wird bewegt bzw. rotiert.

Im TLS-Bereich erfolgt die Registrierung, wie bereits erwähnt, mittels Zielzeichen oder ICP-ähnlichen Algorithmen zur automatisierten Registrierung. Selten werden externe Sensoren zur Registrierung verwendet. Im Gegensatz dazu ist dies im Nahbereich in Form des mechanischen Trackings der Sensorpose durch Messarm oder Lasertracker – neben Zielzeichen und ICP – ein weitverbreiteter Ansatz /Paulus et al. 2011/. Denn hier ist die Art und Weise der Registrierung abhängig vom verwendeten Sensor und dem Scanobjekt. Müssen viele Einzelmessungen in kurzer Zeit (Triangulationstaster und Laserlinienscanner) zusammengesetzt werden, kommen üblicherweise mechanische Ansätze zum Einsatz. Bildbasierte Ansätze (Structured Light oder Stereoskopie) hingegen nutzen auf dem Objekt aufgebrachte Zielzeichen. Ist das Anbringen von Zielzeichen aufgrund der Objekteigenschaften nicht möglich, werden ICP-basierte Verfahren angewandt.

Diese ICP-basierten Verfahren profitieren im Nahbereich – im Gegensatz zum TLS-Bereich – teilweise von der Vorinformation über Rotationsbewegungen des Objekts zwischen zwei Einzelscans. So wird das Objekt z. B. in einer Orientierung gescannt und anschließend auf einem Drehteller rotiert, bevor es bei konstanter Position des Laserscanners nun auf einem anderen Oberflächenstück abgetastet wird. Der Rotationswinkel des Drehtellers kann nun eine entscheidende Vorinformation für den ICP-Algorithmus sein, ohne

die sich Einzelscans rotationssymmetrischer Körper nur sehr schwer oder gar nicht registrieren ließen.

Eine weitere Möglichkeit aus dem Nahbereich, um eine Vorinformation zur Registrierung von Einzelscans zu erhalten, sind die zur Klassifikation eingesetzten Surface-Feature-Histogramme. Mit diesen können korrespondierende Objektpunkte in mehreren Scans automatisiert zugeordnet werden /Rusu 2009/. Diese Möglichkeit ließe sich auch auf den TLS-Bereich übertragen.

Auswertung

Die in den Kapiteln 2–4 genannten Methoden zur Klassifikation der 3D-Koordinaten einer Punktwolke, z. B. mittels approximierenden Quadriken oder Surface-Feature-Histogrammen, stellen nur einen kleinen Ausschnitt möglicher Algorithmen dar. Da diese Algorithmen prinzipiell geometrische Eigenschaften verwenden, um die Punkte geometrischen Primitiven zuzuordnen, sind diese Methoden auch zwischen TLS- und Nahbereich austauschbar. So wurde z. B. der besprochene histogrammbasierte Klassifikationsansatz zwar für den Einsatz auf niedrig aufgelösten Laserpunktwolken entwickelt /Rusu et al. 2008/, eine Übertragung auf das Nahbereichsscanning wurde jedoch bereits erfolgreich umgesetzt /Paulus et al. 2013 a/.

Die Modellbildung und Formanalyse nimmt im TLS-Bereich einen entscheidenden Platz ein. Durch eine geeignete Modellierung ist zu kompensieren, dass die Oberfläche nur mit einer begrenzten Genauigkeit und einer begrenzten räumlich Auflösung – jeweils höchstens im Millimeterbereich – abgetastet wurde. Aufgrund dieser Tatsachen und zusätzlich vorhandenen systematischen Abweichungen in der Punktwolke, die oft messgeometrie- oder oberflächenbedingt sind, versucht die geeignete Modellierung, diese genauigkeitslimitierenden Faktoren zu kompensieren. Eine Genauigkeitssteigerung der Einzelmessung soll so durch eine Vielzahl anscheinend unabhängiger, stochastisch normalverteilter Messpunkte und deren räumlicher Kontinuierung erreicht werden.

Im Nahbereich stellt sich die Situation differenziert dar: Die Punktwolke besitzt eine für die meisten Anwendungen ausreichende Qualität der Einzelpunkte hinsichtlich Präzision und räumlicher Auflösung. Hier ist die Reduktion der auftretenden systematischen Effekte von großem Interesse bei der Modellierung. Diese Systematiken sind insbesondere die Wechselwirkung zwischen Scanner und Objekt, die Fusion der Scanlinien sowie die Registrierung der Einzelscans. Denn aufgrund des niedrigen Rauschens der Einzelpunkte führen diese Systematiken unmittelbar zu signifikanten systematischen Abweichungen.

Aus diesen Gründen ist eine geeignete Modellbildung und Formanalyse entscheidend für eine aussagekräftige Deformationsanalyse, sowohl im TLS- als auch im Nahbereich. Prinzipiell sind dabei die in den Kapiteln 2-3 gezeigten Ansätze aus dem TLS-Bereich auf den Nahbereich übertragbar und statt der verwendeten Standardsoftware nutzbar. Überlegungen aus Abschnitt 3.6 bzgl. weiterer Fragestellungen zur Optimierung der Analyse im TLS-Bereich sind daher auch teilweise auf den Nahbereich transferierbar.

6 FAZIT UND AUSBLICK

Der vorliegende Artikel beschreibt den generellen Ablauf flächenhafter Deformationsanalysen sowie deren Umsetzung anhand von zwei Beispielen. Die erste Anwendung thematisiert die Deformationsanalyse am Radioteleskop Effelsberg basierend auf einem TLS. Die zweite Anwendung verdeutlicht die Deformationsanalyse im Nahbereichsscanning anhand der Formanalyse eines gefrästen Kegels.

Aus diesen beiden Beispielen sowie der anschließenden Aufarbeitung der verwendeten Sensoren und Methoden wird deutlich, dass trotz unterschiedlicher Anforderungen im TLS- und Nahbereich ähnliche Methoden und Werkzeuge verwendet werden können, um aus einer Punktwolke flächenhafte Deformationen bestimmen zu können. Zwar liegen große Unterschiede in der Datenerfassung und daraus resultierend in der Qualität der Punktwolke vor, woraus sich verschiedene Motivationen für eine geeignete Modellbildung ergeben – sei es die Reduktion des Rauschens und die Kontinuierung des Messobjekts im TLS-Bereich bzw. die Reduktion systematischer Effekte sowohl im TLS- als auch im Nahbereich. Durch geeignete Integration zufälliger und systematischer Effekte in das (funktionale oder stochastische) Modell kann diesen unterschiedlichen Daten Grundlagen dennoch Rechnung getragen werden.

Somit sind verschiedene Methoden, die in den Schritten von der Vorverarbeitung (z. B. Möglichkeiten zur Registrierung) bis zur Auswertung (z. B. Klassifikationsalgorithmen oder mathematische Approximationsansätze) verwendet wurden, hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit austauschbar zwischen dem Nah- und TLS-Bereich. Dies gilt trotz unterschiedlicher Anforderungen an Genauigkeit, Auflösung und Messvolumen.

Neben diesen Überlegungen zur Übertragbarkeit verschiedener Ansätze in den jeweils anderen Bereich sind weitere, bereits beschriebene Untersuchungen zur Qualitätssteigerung der Deformationsanalysen von großer Bedeutung. Hier sind im TLS-Bereich die in Abschnitt 3.6 genannten Fragestellungen des Ausgleichsalgorithmus, der Ergebnisreproduzierbarkeit und der stochastischen Modellierung erwähnenswert. Weiterhin wird auch in Zukunft von großer Wichtigkeit sein, wie Deformationen bestmöglich flächenhaft detektiert, parametrisiert und auf Signifikanz hin untersucht werden können. Hier ist auch von Entscheidung, wie systematische Abweichungen – insbesondere messgeometriebedingte und oberflächenbedingte – in der Auswertung berücksichtigt werden können.

Dieser Aspekt ist auch im Nahbereich von großer Bedeutung. Generell wird es hier auch zukünftig die Aufgabe sein, Genauigkeitssteigerungen durch Kompensierung verschiedener Systematiken zu erzielen. Erwähnenswert sind hier die Wechselwirkungen zwischen Scanner und Objekt, die Fusion der Scanlinien sowie die Registrierung von Einzelscans.

LITERATUR

Ahn, S. J.; Rauh, W.; Cho, H. S.; Warnecke, H.-J. (2002): Orthogonal distance fitting of implicit curves and surfaces. In: IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 24(2002)5, 620–638.

Alba, M.; Giussani, A.; Roncoroni, F.; Scaioni, M.; Valgoi, P. (2006): Geometric modeling of a large dam by terrestrial laser scanning. Shaping the Change, 13. FIG-Kongress, München, 8.–13. Oktober 2006.

Besl, P. J.; McKay, N. D. (1992): A method for registration of 3-d shapes. In: IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 14(1992)2, 239–256.

Bi, Z. M.; Wang, L. (2010): Advances in 3D data acquisition and processing for industrial applications. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 26(1998)5, 403–413.

Borutta, H. (1988): Robuste Schätzverfahren für geodätische Anwendungen. Diss., Schriftenreihe im Studiengang Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Bd. 33.

Cheng, W.; Menq, C. (1995): Integrated Laser/CMM System for the Dimensional Inspection of Objects Made of Soft Material. In: Int. J. of Advanced Manufacturing Technol., 10(1995)1, 36–45.

Chmelina, K.; Jansa, J.; Hesina, G.; Traxler, C. (2012): A 3-d laser scanning system and scan data processing method for the monitoring of tunnel deformations. In: J. Appl. Geodesy, 6(2012)3-4, 177–185.

Diehl, M. (2013): Algorithmen zur Formanalyse partiell gescannter Prüfkörper. Masterarbeit, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn (unveröffentlicht).

Drixler, E. (1993): Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum. Diss., DGK, Reihe C, 409.

Donges, A. (1993): Lasermeßtechnik. Grundlagen und Anwendungen. Hüthig, Heidelberg.

Eichborn, M. (2012): Deformationsanalyse am Hauptspiegel des Radioteleskops Effelsberg. Masterarbeit, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn (unveröffentlicht).

Eling, D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Diss., DGK, Reihe C, 641.

Frei, E. A.; Vennegeerts, H.; Omelanowsky, D. (2013): Kinematische Scanlösungen von p3d systems. In: Schriftenreihe DWV, 72 (Terrestrisches Laserscanning 2013). Wißner, Augsburg, 107–124.

Gielsdorf, F. (2013): Neue Wege bei der Registrierung von Scans. In: Schriftenreihe DWV, 72 (Terrestrisches Laserscanning 2013). Wißner, Augsburg, 67–74.

Girardeau-Montaut, D.; Roux, M.; Raphael, M.; Thibaul, G. (2005): Change detection on point cloud data acquired with a ground laser scanner. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 (Workshop „Laserscanning 2005, 12.–14. September). Enschede, Niederlande, 30–35.

Gordon, B. (2008): Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner. Diss., TU Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, 28–33.

Grimm-Pitzinger, A.; Rudig, S. (2005): Laserscannerdaten für flächenhafte Deformationsanalysen. Proc. 13. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl, Österreich.

Hesse, C.; Ehm, M. (2013): Verfahren und Grenzen der automatischen Registrierung von Punktwolken. In: Schriftenreihe DWV, 72 (Terrestrisches Laserscanning 2013). Wißner, Augsburg, 41–66.

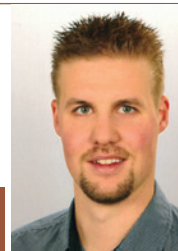
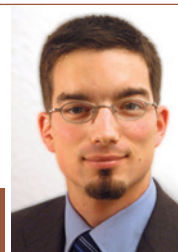
Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Welsch, W.; Eichhorn, A.; Neuner, H. (2013): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen (Reihe Handbuch Ingenieur-geodäsie). 2. Auflage. Wichmann, Berlin · Offenbach.

Holst, C.; Artz, T.; Kuhlmann, H. (2014): Biased and unbiased estimates based on laser scans of surfaces with unknown deformations. In: J. Appl. Geodesy, doi: 10.1515/jag-2013-0023, in press.

Holst, C.; Eling, C.; Kuhlmann, H. (2013): Automatic optimization of height network configurations for detection of surface deformation. In: J. Appl. Geodesy, 7(2013)2, 103–113.

Holst, C.; Kuhlmann, H. (2011): Bestimmung der elevationsabhängigen Deformation des Hauptreflektors des 100-m-Radioteleskops Effelsberg mit Hilfe von Laserscannermessungen. In: Schriftenreihe DWV, 66 (Terrestrisches Laserscanning 2011). Wißner, Augsburg, 161–180.

- Holst, C.; Kuhlmann, H. (2014): Impact of spatial point distributions at laser scanning on the approximation of deformed surfaces. In: Wieser, A. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 14*. Wichmann, Berlin · Offenbach, 269–282.
- Holst, C.; Zeimet, P.; Nothnagel, A.; Schauer, W.; Kuhlmann, H. (2012): Estimation of focal length variations of a 100-m radio telescope's main reflector by laser scanner measurements. In: *J. Surv. Engng.*, 138(2012)3, 126–135.
- Ioannidis, C.; Valani, A.; Georgopoulos, A.; Tsiligiris, E. (2006): 3D model generation for deformation analysis using laser scanning data of a cooling tower. 3rd IAG/12th FIG Symposium, 22.–24. Mai, Baden.
- Kern, F.; Siegrist, B.; Huxhagen, U. (2010): Genauigkeitsvergleich verschiedener Zielmarkendesigns. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 117(2010)5, 170–175.
- Koch, K. R. (2009): Fitting free-form surfaces to laserscan data by NURBS. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 116(2009)4, 134–140.
- Lenzmann, L.; Lenzmann E. (2004): Strenge Auswertung des nichtlinearen Gauß-Helmert-Modells. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 111(2004)2, 68–73.
- Lindenbergh, R.; Pfeifer, N. (2005): A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. In: *Proc. 7th Conf. on Optical 3D Meas. Techn.*, Wien, 61–70.
- Linke, J. (2000): Zur Analyse der Geometrie und Beurteilung von geodätischen und mechanischen Netzen unter Verwendung von Balancierfaktoren. Diss., Schriftenreihe Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal, 3.
- Neitzel, F.; Neumann, I. (2013): Scanning in Motion – Kinematisches TLS mittels mobiler Plattformen. In: *Schriftenreihe DWV*, 72 (Terrestrisches Laserscanning 2013). Wißner, Augsburg, 89–106.
- Ohlmann-Lauber, J.; Schäfer, T. (2011): Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: *Schriftenreihe DWV*, 66 (Terrestrisches Laserscanning 2011). Wißner, Augsburg, 147–157.
- Paffenholz, J.-A. (2013): Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors. Diss., DGK, Reihe C, 689.
- Paulus, S.; Dupuis, J.; Mahlein, A. K.; Kuhlmann, H. (2013a): Surface feature based classification of plant organs from 3D laserscanned point clouds for plant phenotyping. In: *BMC Bioinformatics*, 238(2013)14.
- Paulus, S.; Dupuis, J.; Schumann, H.; Kuhlmann, H. (2013b): Automatische Parameterextraktion aus hochauflösenden Laserscans – ein wichtiger Schritt bei der Phänotypisierung. In: *Bornimer Agrartechn. Berichte*, 81(2013), 241–249.
- Paulus, S.; Kuhlmann, H. (2011): Nahbereichsscanning – Messprinzipien und Einsatzmöglichkeiten bei Nutzpflanzen. In: *Schriftenreihe DWV*, 66 (Terrestrisches Laserscanning 2011). Wißner, Augsburg, 17–30.
- Paulus, S.; Riedel, S.; Kuhlmann (2014): Automatic extraction of stem parameters out of 3D laser scanned barley plant point clouds. In: Wieser, A. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 14*. Wichmann, Berlin · Offenbach, 403–416.
- Rusu, R. B.; Marton, Z. C.; Blodow, N.; Beetz, M. (2008): Learning informative point classes for the acquisition of object model maps. In: 10th Int. Conf. Control. Autom. Robot. Vis., 643–650.
- Rusu, R. B.; Blodow, N.; Beetz, M. (2009): Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, Kobe, Japan, 3212–3217.
- Schäfer, T.; Weber, T.; Kyrinovic, P.; Zamecnikova, M. (2004): Deformation measurement using terrestrial laser scanning at the hydropower station of Gabčíkovo. *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern Europ. Conf. on Engng. Surveying*, Bratislava, Slowakei, 11.–13. November.
- Schneider, D. (2006): Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams. 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden, 22.–24. Mai.
- Schwenke, H.; Knapp, W.; Haitjema, H.; Weckenmann, A.; Schmitt, R.; Delbressine, F. (2008): Geometric error measurement and compensation of machines – An update. In: *CIRP Ann. – Manufacturing Technol.*, 57(2008), 660–675.
- Son, S.; Park, H.; Lee, K. H. (2002): Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection. In: *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 42(2002), 889–897.
- Soudarissanane, S.; Lindenbergh, R.; Menenti, M.; Teunissen, P. (2011): Scanning geometry: influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. In: *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 66(2011), 389–399.
- Tsai, R. Y.; Lenz, R. K. (1988): Real time versatile robotics hand/eye calibration using 3D machine vision. In: *IEEE Trans. on Robot. and Autom.*, 4(1988)1, 554–561.
- Tsai, R. Y.; Lenz, R. K. (1989): A new technique to fully autonomous end efficient 3D robotic hand/eye calibration. In: *IEEE Trans. on Robot. and Autom.*, 5(1989)3, 345–558.
- van Gosliga, R.; Lindenbergh, R.; Pfeifer, N. (2006): Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Inform.*, 36(2006)5.
- Vapnik, V. (1998): The Support vector method for estimating indicator functions. In: Vapnik, V. N. (Ed.): *Statistical Learning Theory*. Wiley & Sons, 401–416.
- Winkelbach, S.; Molkenstruck, S.; Wahl, F. M. (2006): Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach in Pattern Recognition. In: *Lecture Notes in Computer Science*, 4174(2006), 718–728.
- Wujanz, D.; Neitzel, F.; Krueger, D.; Manthe, C. (2013): DefoScan++ – oberflächenbasierte Registrierung terrestrischer Laserscans zur Deformationsanalyse. In: Luhmann, Th.; Müller, Ch. (Hrsg.): *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik*. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013. Wichmann, Berlin · Offenbach, 26–37.

M. Sc. Christoph HolstUNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
GEOINFORMATION (IGG)Nussallee 17 | 53115 Bonn
c.holst@igg.uni-bonn.de**M. Sc. Jan Dupuis**UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
GEOINFORMATION (IGG)Nussallee 17 | 53115 Bonn
j.dupuis@igg.uni-bonn.de**Dipl.-Inform. Stefan Paulus**UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
GEOINFORMATION (IGG)Nussallee 17 | 53115 Bonn
s.paulus@igg.uni-bonn.de**Prof. Dr.-Ing Heiner Kuhlmann**UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
GEOINFORMATION (IGG)Nussallee 17 | 53115 Bonn
heiner.kuhlmann@uni-bonn.de