

Terrestrisches Laserscanning 2019: Von großen Chancen, großen Herausforderungen und großen Radioteleskopen

Christoph Holst*

Zusammenfassung

Der terrestrische Laserscanner (TLS) ist der logische Nachfolger vom motorisierten, reflektorlos messenden Tachymeter. Das Messprodukt ist eine 7D-Punktwolke (X,Y,Z,I,R,G,B), die sich aufgrund ihres geometrischen und physikalischen Detailreichtums sehr gut eignet, kleine und große Objektkarakteristiken und ihre zeitliche Änderungen zu erfassen. Dies gilt vor allem auch deshalb, weil die Erstellung eines Laserscans dank intelligenter, vollautomatischer Standpunktverknüpfungen und Steigerungen in der Messfrequenz in den letzten Jahren sehr effizient geworden ist. Der TLS stellt also eine große Chance für die Ingenieurgeodäsie dar, die Digitalisierung der Welt kompetent mit zu gestalten.

Die räumlich und zeitlich hochfrequente Erfassung der Umgebung mit einem TLS ist messtechnisch nur erreichbar, indem die Messgenauigkeit der geometrischen Redundanz weicht. Das bedeutet, dass der einzelne Messpunkt nur eine sehr geringe Bedeutung hat. Dieser Umstand stellt Neulinge im Bereich des terrestrischen Laserscannings im Wesentlichen vor zwei Herausforderungen: (1) Die gesuchte geometrische Information kann nur aus einer flächenhaften Betrachtung gewonnen werden; (2) Die Messunsicherheit kann weniger gut quantifiziert werden.

Der vorliegende Artikel befasst sich schwerpunktmäßig mit diesem Wechselspiel aus Chance und Herausforderung, was anhand mehrerer Beispiele und messtechnischer Grundlagen erläutert wird. Die Zielgruppe dieses Artikels sind (Ingenieur-)Geodäten, die sich mit dem Thema terrestrisches Laserscanning befassen, z.B. innerhalb von Ingenieurbüros oder Behörden. Implizit bezieht der Artikel auch Stellung bezüglich der Frage, ob die Anschaffung eines TLS für eine vorliegende Aufgabe sinnvoll ist.

Summary

The terrestrial laser scanner is the constructive follower of the motorized, reflectorless-measuring total station. The product of measurement is a 7D point cloud (X,Y,Z,I,R,G,B) containing many geometric and physical details. Thus, it can be perfectly used for capturing small and large object characteristics and their temporal changes. This is particularly true since the acquisition of laser scans has become more efficient in the last years due to increasing scanning frequencies and automated registration processes. Consequently, the

TLS provides a chance for the engineering geodesy to participate in digitalizing the world.

Capturing the environment with high areal and temporal frequency using a TLS can metrologically only be realized by decreasing the accuracy of each scan point. In other words: the geometric redundancy beats the accuracy. Thus, each individual scan point is only of small relevance. This fact might be challenging for newcomers in the field of terrestrial laser scanning considering two consequences: (1) the geometric information that is searched for can only be obtained by an areal modeling; (2) the measurement uncertainty cannot be quantified that well any more.

The present article focuses this interplay between chances and challenges by discussing several examples as well as metrological basics. The intended readers are (engineering) geodesists that deal with TLS, e.g., in engineering companies or government entities. Implicitly, this article also tackles the question whether the purchase of a TLS is reasonable considering existing tasks.

Schlüsselwörter: Laserscanning, Ingenieurgeodäsie, Tachymeter, Aufnahmevermessung, Deformationsanalyse, Kalibrierung

1 Motivation

Theodolite, optische Tachymeter, elektronische Tachymeter, motorisierte Tachymeter, reflektorlos messende Tachymeter, bildgebende Tachymeter, terrestrische Laser-scanner. Diese Aufzählung zeigt einerseits die historische Entwicklung ingenieurgeodätischer Messinstrumente, die 3D-Punkte über die Polaraufnahme koordinieren bzw., im Falle des Theodolits, über den Vorwärtsschnitt. Andererseits verdeutlicht diese Aufzählung, dass der terrestrische Laserscanner (TLS) im Grunde genommen nur die logische Konsequenz aus der schon vorher beschrittenen Automatisierung der Polaraufnahme darstellt; er ist also aus messtechnischer Sicht der natürliche Nachfolger des Tachymeters.

Gleichzeitig bewirkt der TLS in dieser Aufzählung einen fundamentalen Richtungswechsel im Selbstverständnis des Geodäten: Die Messgenauigkeit weicht der geometrischen Redundanz. Das bedeutet, dass der einzelne Messpunkt, der von seinem Nachbarpunkt mitunter weniger als einen Millimeter entfernt liegt, nur eine sehr geringe

* Dr.-Ing. Christoph Holst erhielt den DGK-Wissenschaftspreis 2018, was der Anlass zur Anfertigung dieses Artikels war.

Bedeutung hat. Die gesuchte geometrische Information wird stattdessen aus einer Vielzahl von Punkten, in der Regel mindestens einigen Tausend, gewonnen (Kuhlmann und Holst 2016). Hierbei wird bewusst in Kauf genommen, dass jeder Messpunkt, verglichen mit einer tachymetrischen Aufnahme, von eher geringer Qualität ist (Genauigkeit wie Zuverlässigkeit). Historisch gesehen ist dies eine Abkehr von der bisher gepflegten Strategie, jedem einzelnen Messpunkt eine sehr große wirtschaftliche Aufmerksamkeit zu widmen – was in der Regel zu einer hohen Einzelpunktgenauigkeit führt –, damit die Anzahl an Messpunkten, die zur Erlangung der gesuchten geometrischen Information aufgenommen werden müssen, möglichst gering gehalten werden kann. Mit dieser Abkehr geht einher, dass sich die Ingenieurgeodäsie durch die Nutzung von TLS der Photogrammetrie annähert und teilweise ihrer Methoden bedient: Sind flächenhafte Aufnahmen in der Photogrammetrie – wenn auch messtechnisch grundlegend verschieden erzeugt – doch schon seit jeher die Datengrundlage.

Dieser Strategiewechsel sollte jedem Käufer eines TLS bewusst sein. Neulinge im Bereich des Laserscannings stellt er eventuell kurzzeitig vor Herausforderungen, da er altbekannte Denkmuster und Vorgehensweisen bei der Messung und Auswertung verändert, wie z.B. die Messung in zwei Lagen auf identische Punkte zur Reduzierung systematischer Achsabweichungen. Der erste Anblick einer neu aufgenommenen Punktwolke, mit ihrem Detailreichtum in sieben Dimensionen – Geometrie (X,Y,Z), rückgestrahlte Intensität (I) und Farbe (R,G,B) –, verdeutlicht dem geschulten Geodäten aber zugleich das enorme Potenzial des Messprodukts. Dies gilt insbesondere für (ingenieur-)geodätische Aufnahme- und Deformationsmessungen. Zur Verknüpfung von punkthaften mit flächenhaften Messstrategien – bzw. zur schonenderen Transformation der Gewohnheiten des Geodäten – hält der Markt auch Kombinationen aus Tachymeter und TLS bereit: Die Leica MS60 und die Trimble SX10.

Der vorliegende Artikel befasst sich schwerpunktmäßig mit diesem Wechselspiel aus Chance und Herausforderung, die der TLS für den Nutzer darstellt (Abschnitte 3 und 4). Hierbei wird herausgearbeitet, welche Änderungen die Nutzung eines TLS anstelle eines Tachymeters mit sich bringt. Einführend zeigt Abschnitt 2 die messtechnischen Unterschiede zwischen Tachymeter und TLS systematisch auf. Abschnitt 5 skizziert eine TLS-basierte Deformationsanalyse, die die genannten Herausforderungen annimmt und die Chancen offenbart.

Die Zielgruppe dieses Artikels sind (Ingenieur-)Geodäten, die sich mit dem Thema terrestrisches Laserscanning befassen, z.B. in Ingenieurbüros, Behörden oder während des Studiums. Implizit bezieht der Artikel auch Stellung bzgl. der Frage, ob die Anschaffung eines TLS für eine vorliegende Aufgabe sinnvoll ist und was der Umstieg für die o.g. Zielgruppe konkret bedeutet.

2 Von der Messtechnik

Tachymeter und TLS¹ stimmen in der groben Achsgeometrie (Stehachse, Kippachse, Zielachse) und ihren mechanischen Bedingungen (Rechtwinkligkeit, ein einziger Schnittpunkt) überein. Im Detail ergeben sich die Unterschiede daraus, dass die Kippachse beim TLS durch die Rotationsachse eines rotierenden Spiegels und die Zielachse nur durch den am Spiegel reflektierten Laserstrahl repräsentiert werden (Abb. 1). Daraus folgt unmittelbar, dass beim TLS keine optische Anzielung definierter Punkte möglich ist. Vielmehr bestimmt der Nutzer eines TLS nur den horizontalen und vertikalen Messbereich sowie die Punktdichte, mit der dieser polar erfasst werden soll.

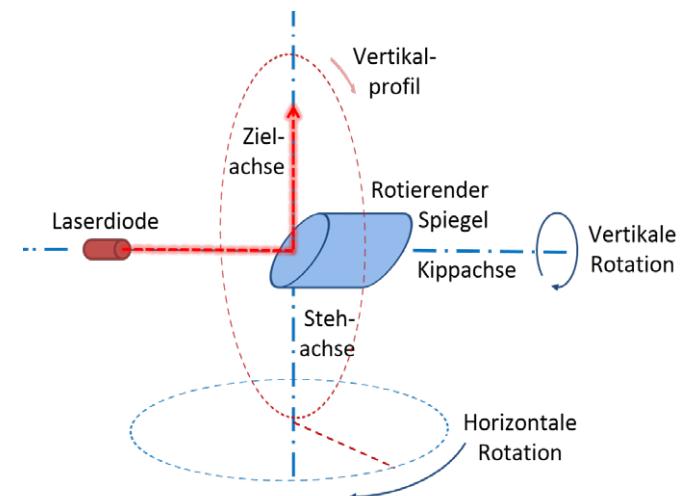


Abb. 1: Aufbau eines TLS

Auf Basis dieser Informationen spannt der TLS automatisch ein gleichabständiges horizontales und vertikales Winkelraster auf; die in diesen Zielrichtungen liegenden Oberflächen werden mit elektrooptischer Distanzmessung reflektorlos aufgenommen (Kuhlmann und Holst 2016).

Unabhängig von der Messung mit Tachymeter oder TLS wird die Unsicherheit eines Messpunktes von vier Faktoren beeinflusst (Soudarissanane et al. 2011): Instrumentelle Abweichungen, atmosphärische Bedingungen, die Messkonfiguration und die angemessene Oberfläche. Sollen die Messungen verschiedener Standpunkte darüber hinaus miteinander verknüpft werden oder sollen die Messungen in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert werden, addiert sich die Unsicherheit aus der Georeferenzierung (Abb. 2). Abhängig von der konkreten Realisierung dieser Ähnlichkeitstransformation (überbestimmt/eindeutig, netzartige/nachbarschaftliche Verknüpfung), entspricht diese einer freien Stationierung, einem Polygonzug oder einer Netzausgleichung. Beim Laserscanning wird auch allgemein von einer Registrierung gesprochen (Kuhlmann und Holst 2016).

1 Die Ausführungen dieses Artikels beschränken sich auf Panoramalaserscanner. Der Aufbau von Kamerascannern oder Hybridscannern weicht von den folgenden Darstellungen ab.

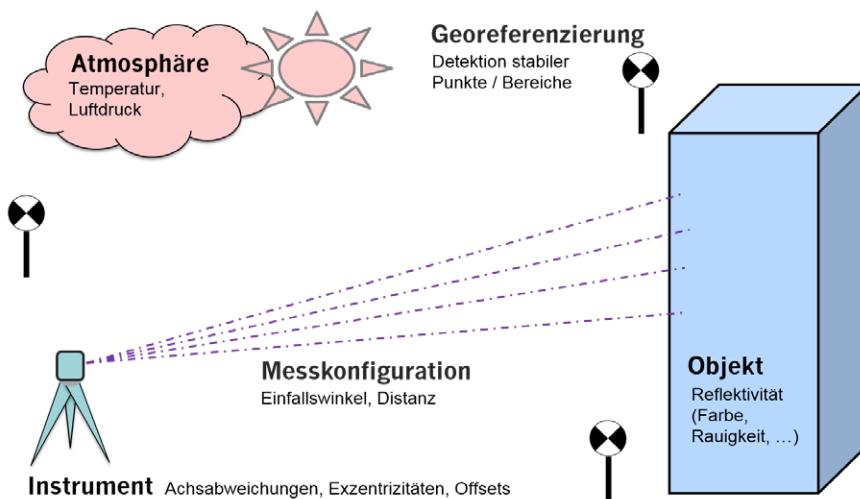


Abb. 2: Genauigkeitsbeeinflussende Faktoren beim terrestrischen Laserscanning

Um die Messgenauigkeit trotz dieser Unsicherheitsfaktoren möglichst hoch zu halten, bieten Tachymeter und TLS die im Folgenden genannten Möglichkeiten.

2.1 Tachymeter

Der Nutzer eines Tachymeters ist eine relativ hohe Messgenauigkeit gewohnt. Dies liegt zum Großteil daran, dass die zeitliche Effizienz bei der statischen Messung jedes einzelnen Punktes nicht im Vordergrund steht, sodass die Einzelpunktmessung mitunter mehrere Sekunden dauert. Dadurch lassen sich zufällige und systematische Abweichungen bei jeder gemessenen Punktkoordinate minimieren. Je nach geforderter Messgenauigkeit werden ferner genauigkeitssteigernde Messstrategien umgesetzt. Daraus ergibt sich folgende Aufstellung:

- Der Teilkreisabgriff für Horizontalrichtung und Vertikalwinkel erfolgt an mehreren Positionen gleichzeitig und zeitlich wiederholt (z. B. Leica TS60: 4 Teilkreisabgriffe in Viertelkreisen angeordnet; Leica Geosystems 2015). Dieses Vorgehen minimiert sowohl zufällige als auch systematische Messabweichungen (z. B. Teilkreisexzentrizitäten). So erreichen Tachymeter höchster Genauigkeitsklasse eine Winkelmessung mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0,15 \text{ mgon}$ (z. B. Leica TS60, Leica Geosystems 2015).
- Die Streckenmessung erfolgt bei präziser Messung mehrmals hintereinander, was zu einer Standardabweichung der Streckenmessung von $\sigma = 0,6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ führt² (z. B. Leica TS60, Leica Geosystems 2015). Als Messprinzipien werden das Impulslaufzeitverfahren, das Phasenvergleichsverfahren oder Mischformen verwendet (Witte und Sparla 2015).
- Wir messen auf vorher definierte Punkte und signalisieren diese mit einem Reflektor, falls eine hohe Messgenauigkeit erreicht werden soll (Deumlich und Staiger 2001). Dieser Reflektor wurde speziell für tachymetrische Messungen entwickelt mit dem Ziel, zufällige und systematische Messabweichungen zu minimieren.

Messen wir den Reflektor mit automatischer Zielerkennung an, entfallen ferner die zufälligen und systematischen Messabweichungen durch die manuelle, nutzerabhängige Anzielung³. Der Reflektor stellt somit die ideale, reproduzierbar anzielbare Messoberfläche dar. Falls die Oberfläche mit dem Tachymeter hingegen reflektorlos angemessen wird, gelten die gleichen Aussagen wie bei der reflektorlosen Laserscannermessung (siehe Abschnitt 2.2).

- Wir beeinflussen die Messkonfiguration positiv, indem wir den Reflektor auf den Zielstrahl ausrichten, sodass der Einfallswinkel immer sehr klein ist.

So werden systematische laterale und radiale Messabweichungen minimiert. Falls der Reflektor nicht ausgerichtet wird, können entstehende systematische Abweichungen kalibriert werden (Rüeger 1996).

- Wir messen die Reflektoren in zwei Lagen an, um einige instrumentelle Abweichungen des Tachymeters zu eliminieren (insb. Zielachs-, Kippachs-, Höhenindexabweichung). Soll die Genauigkeit noch gesteigert werden, werden mehrere Vollsätze gemessen (Witte und Sparla 2015).
- Wir messen die Temperatur und den Luftdruck entlang des Messstrahls, um atmosphärische Laufzeitkorrekturen mit Hilfe der 1. Geschwindigkeitskorrektion anbringen zu können (Witte und Sparla 2015).
- Zur Georeferenzierung bzw. zur freien Stationierung messen wir identische Messpunkte nach dem o. g. Schema zur Minimierung zufälliger und systematischer Messabweichungen an und wir bestimmen daraus die Transformationsparameter (Witte und Sparla 2015). In der Regel geschieht dies durch einen Ausgleich, da die Minimalzahl an anzumessenden Punkten aus genauigkeits- und zuverlässigkeitssrelevanten Überlegungen heraus geringfügig überschritten wird.

2.2 Terrestrischer Laserscanner

Dem terrestrischen Laserscanner steht für jede 3D-Punktbestimmung nur ein Bruchteil der Messzeit zur Verfügung. Aktuell sind es beim am schnellsten scannenden TLS 1/2.000.000 Sekunden (Leica RTC 360, Leica Geosystems 2018) bei einer Messfrequenz von 2 MHz; eine

2 Unter der Annahme, dass diese Standardabweichung von zufälligen Messabweichungen dominiert wird, ist die vom Hersteller abweichende Verwendung einer quadratischen Varianzfortpflanzung wahrscheinlich realistischer.

3 Falls die automatische Zielerkennung nicht ausreichend kalibriert ist, werden wiederum neue Abweichungen eingefügt.

Frequenz von 1 MHz ist mittlerweile Standard. Deswegen ist es verglichen mit der Tachymetrie nicht in gleichem Maße möglich, zufällige und systematische Abweichungen zu minimieren:

- Der **Teilkreisabgriff** für Horizontalrichtung und Vertikalwinkel erfolgt bei manchen TLS auch an mehreren Positionen gleichzeitig, jedoch je nach TLS nur für etwa 1 % aller Messpunkte, also jede hundertste Messung. Die übrigen 99 % der Winkelwerte werden zeitlich interpoliert, wobei von einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels um die Kippachse und des Oberbaus um die Stehachse ausgegangen wird. Dadurch werden die Messabweichungen nur in geringerem Maße als bei der Tachymetrie minimiert. So erreichen TLS höchster Genauigkeitsklasse, die nach o.g. Schema abtasten, eine Winkelmessung mit einer Standardabweichung von $\sigma = 2,5 \text{ mgon}$ (z.B. Leica ScanStation P50, Leica Geosystems 2017). Dies ist mehr als um den Faktor 10 schlechter als bei Tachymetern. Bei weniger aufwendigen Teilkreisabgriffen, die bei vielen aktuell am Markt erhältlichen TLS verbaut sind, kann die Genauigkeit noch um mehrere Faktoren geringer sein.
- Die **Streckenmessung** erfolgt bei präziser Messung auch mehrmals hintereinander und wird pro Punkt gemittelt; die Messprinzipien gleichen denjenigen der tachymetrischen Distanzmessung. Da während der Wiederholungsmessung der Spiegel jedoch weiter rotiert, treffen die Wiederholungsmessungen systematisch verschwenkt auf der Oberfläche auf (bei lotrechter Aufstellung des TLS: vertikale Verschwenkung). Diese Strategie zur Reduktion zufälliger Abweichungen verursacht demnach gegebenenfalls zusätzliche systematische Abweichungen. In der Summe wird die Genauigkeit in der Regel jedoch gesteigert. Aktuell sind Streckenmessgenauigkeiten von ca. $\sigma = 1,0 \text{ mm} + 10 \text{ ppm}$ (z.B. Leica ScanStation P50, Leica Geosystems 2017; Z+F Imager 5016, Zoller + Fröhlich 2018) realisierbar⁴.
- Wir messen **reflektorlos** auf die in Zielstrahl liegenden Oberflächen. Diese Oberflächen sind z.B. Gebäudewände und sonstige Mauern, Straßenoberflächen oder natürliche Oberflächen wie Steine, Felsen und Pflanzen. Diese Oberflächen sind sehr variabel in ihren geometrischen und physikalischen Eigenschaften, sodass das Zusammenspiel zwischen Laserstrahl und Oberfläche nicht aufeinander abgestimmt sein kann, wie es bei der reflektorgestützten Messung der Fall ist. Abhängig von den Eigenschaften der Oberfläche wird die elektrooptische Distanzmessung daher zufällig, aber vor allem auch systematisch verfälscht (Kuhlmann und Holst 2016).

⁴ Unter der Annahme, dass diese Standardabweichung von zufälligen Messabweichungen dominiert wird, ist die vom Hersteller abweichende Verwendung einer quadratischen Varianzfortpflanzung wahrscheinlich realistischer.

- Wir können die **Messkonfiguration** nicht im Detail beeinflussen, da das Messobjekt in der Regel nicht auf den Zielstrahl ausgerichtet werden kann. Hieraus erwachsen zufällige und systematische Messabweichungen.
- Messtechnisch gesehen erlauben es einige TLS, Messobjekte wiederholt in zwei Lagen aufzumessen. Dafür rotiert der TLS in der ersten Messung von 0° bis 180° und in der zweiten Messung von 180° bis 360° um die Stehachse. Die Wiederholung eines Scans in identischer Lage ist hingegen in jedem Fall möglich. Da in beiden Fällen jedoch nur identische Objekte, nicht aber identische Messpunkte aufgenommen werden, kann nicht unmittelbar eine Vollsatzauswertung zur Minimierung systematischer Achsabweichungen des TLS an jedem Messpunkt erfolgen.
- Falls relevant, können atmosphärische Laufzeitkorrekturen mit Hilfe der 1. Geschwindigkeitskorrektion analog zum Tachymeter angebracht werden.
- Zur **Georeferenzierung** bzw. zur **Registrierung** müssen auch hier die Transformationsparameter bestimmt werden. Da keine identischen Punkte angemessen werden können, geschieht dies (a) über Zielzeichen, deren Mittelpunkt reproduzierbar geschätzt werden kann, (b) über von verschiedenen Standpunkten überlappend aufgenommene Geometrien oder (c) über Zusatzenso-rik, die in den TLS integriert ist (Kuhlmann und Holst 2016). Vorgehensweise (c) wird beim kinematischen Laserscanning seit geraumer Zeit standardmäßig angewandt (Kuhlmann und Klingbeil 2016).

3 Von großen Chancen

Terrestrische Laserscanner werden vorwiegend zur geometrischen Aufnahme von Bauwerken oder natürlichen Oberflächen eingesetzt. Die räumliche Auflösung der resultierenden Punktwolke ist mit einem Punktabstand von bis zu 0,8 mm auf dem Messobjekt in einer Distanz von 10 m sehr hoch (z.B. Leica ScanStation P50, Leica Geosystems 2017; Z+F Imager 5016, Zoller + Fröhlich 2018). Um zu beurteilen, welche Objektdetails erkennbar sind, muss jedoch das räumliche Auflösungsvermögen betrachtet werden. Dieses hängt neben der räumlichen Auflösung noch maßgeblich von der Größe des Laserspots auf der Oberfläche ab (Böhler et al. 2003).

Die Kompletaufnahme der Umgebung, der sogenannte Rundumscan, dauert bei dieser räumlichen Auflösung etwa eine Stunde; im viel häufiger auftretenden Fall, dass nur gewisse Teilebereiche aufgenommen werden sollen, reduziert sich die Messzeit auf nur wenige Minuten. Während als Messgröße unmittelbar auch die Intensität des reflektierten Messstrahls erfasst wird, kann diese 4D-Information anschließend innerhalb weniger Minuten bei neueren TLS optional um RGB-Informationen für jeden einzelnen Messpunkt erweitert werden. Dafür wer-

den automatisiert aufgenommene Fotos, mit bekannten inneren und äußereren Kalibrierparametern, auf die Messpunkte gematcht.

Dieses Produkt, die 3D-, 4D- oder 7D-Punktwolke eines Gebäudes, bietet gegenüber einer klassischen tachymetrischen Aufnahme, die je nach Anwendung nur aus den Eckpunkten des aufsteigenden Mauerwerks besteht, ein sehr viel höheres Maß an Detailinformation, geometrisch wie physikalisch. Physikalische Informationen der Oberfläche sind hierbei sowohl aus der Farbinformation als auch aus der empfangenen Intensität ersichtlich; insbesondere diejenigen, die die spektralen Reflexionseigenschaften beeinflussen. Abb. 3 zeigt eine solche Punktwolke intensitätscodiert (oben) und farbcodiert (unten) der Alten Sternwarte in Bonn. Der hier dargestellte Detailreichtum ist mit einem Tachymeter in vertretbarer Zeit nicht zu erreichen. Terrestrische Laserscanner eignen sich damit ideal für die geometrische As-Built-Dokumentation.

Bei der geometrischen Erfassung solch großer Objekte sind mehrere Standpunkte mit dem TLS zu besetzen, deren Einzelscans anschließend in ein gemeinsames Koordinatensystem zu georeferenzieren bzw. registrieren sind. Kriterien zur Auswahl geeigneter Standpunkte listet Wujanz et al. (2016) auf. Zur Transformation in ein übergeordnetes Koordinatensystem werden in vielen Fällen Zielzeichen bzw. Passpunkte verwendet, deren Koordinaten in dem übergeordneten Koordinatensystem gegeben sind (z.B. Zimmermann et al. 2018) – analog zur freien Stationierung bei der Tachymetrie. Janßen et al. (2019) zeigen, wie diese Transformationsparameter mit hoher Genauigkeit geschätzt werden können.

Die lokale Verknüpfung benachbarter Standpunkte verläuft im Gegensatz dazu zunehmend passpunkt frei und vollautomatisiert in zwei Stufen: Über im TLS fest installierte Zusatzhardware (z.B. GNSS-Antennen, inertiale Messeinheiten, Barometer, Kameras, Kompass) werden Näherungswerte für die gesuchten Transformationsparameter berechnet. Diese dienen als Startwerte für iterative, rein punktwolkenbasierte Registrieralgorithmen. Letztgenannte gehen auf den Iterative Closest Point Algorithmus (ICP) zurück (Besl und McKay 1992). Vielfach werden auch Abwandlungen des ICP, z.B. ebenenbasierte Registrierungen, eingesetzt (z.B. Wujanz et al. 2018).

Dieses Vorgehen ermöglicht eine Registrierung der Standpunkte nahezu in Echtzeit, sodass unmittelbar eine Kontrolle gegeben ist. Zoller + Fröhlich nennt diese Strategie den Blue Workflow (Zoller + Fröhlich 2019), Leica Geosystems setzt auf die VIS-Technologie (Visual Inertial System, Leica Geosystems 2018) und Riegl auf die Registrierung im Spektralbereich (Ullrich und Fürst 2017). Immer öfter basieren diese Verfahren auf photogrammetrischen Methoden (Merkmalsextraktion, Mehrbildauswertung, Bündelausgleichung).

Im Gesamten bedeutet dies, dass sowohl die Erstellung eines Einzelscans als auch die Verknüpfung von Scans

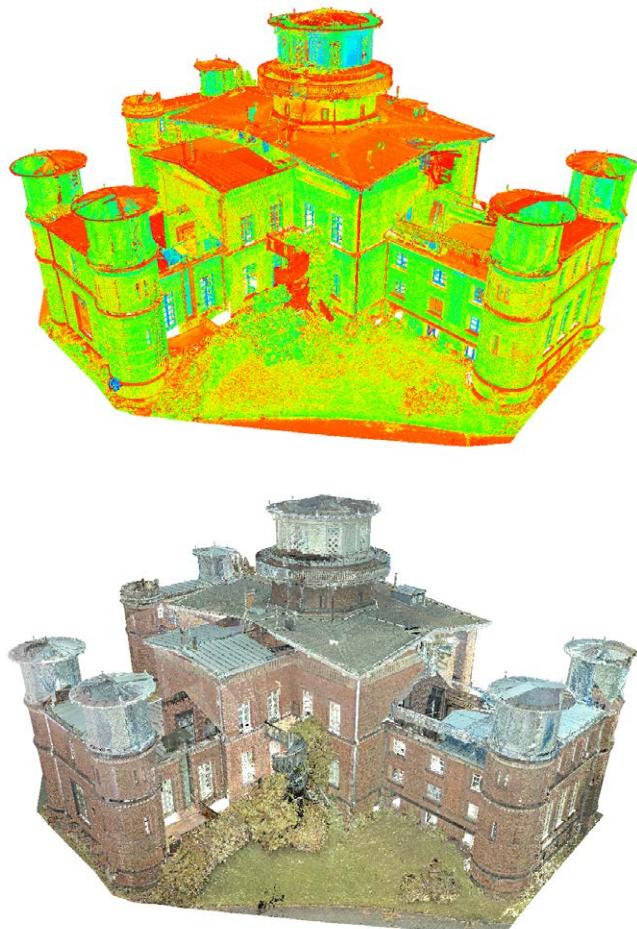


Abb. 3: Scans der Alten Sternwarte in Bonn mit intensitätsbasiert Kolorierung (oben) und RGB-Kolorierung (unten)

mehrerer Standpunkte zunehmend vollautomatisiert ablaufen. Der Weg zu einem hochauflösenden geometrischen Abbild selbst komplexer Bauwerke oder natürlicher Oberflächen ist demnach denkbar einfach. Der Nutzer muss lediglich den Standpunkt wählen und entscheiden, wie groß der Messbereich ist, wie hoch die Punktdichte und ob jeder Messpunkt aus einer Mehrfachmessung hervorgehen soll. Wie Heinz et al. (2019) zeigen, kann bei sinnvoller Wahl dieser Einstellungen eine hohe Zeitersparnis bei gleichbleibender Genauigkeit des Endprodukts erreicht werden.

Aufgrund dieser effizienten Erfassung geometrischer Strukturen bietet sich der TLS zur Aufnahme komplexer Oberflächen (z.B. Bauwerke) an und er eröffnet neue Chancen, die Tachymeter nicht bieten. Dies gilt demnach insbesondere für die ingenieurgeodätische Aufnahmevermessung (z.B. As-Built-Dokumentation), aber auch für die darauf aufbauende Deformationsanalyse oder daraus hervorgehende Anwendungen (z.B. Baufortschrittsmonitoring; Wujanz et al. 2019). Dies soll an vier Beispielen erläutert werden. Diese Beispiele fokussieren dabei Anwendungen, die auch mit Tachymetern gelöst werden können. Nicht fokussiert werden neue Anwendungen, die sich erst aus der hohen räumlichen Auflösung der

Punktwolke ergeben haben. Hier sei z.B. Building Information Modeling (z.B. Clemen und Manthe 2015) zu nennen.

Implizit zeigen diese Beispiele auch, dass die Erstellung von Punktwolken mittlerweile sehr einfach ist. Zur validen Nutzung von TLS gehört dennoch ein hohes Maß an Fachkompetenz. Diese verlagert sich aber zunehmend von der Erstellung der Messung hin zu ihrer Auswertung. Schon vor 10 Jahren sprach Staiger (2009) im Kontext der generellen Automatisierung der geodätischen Messtechnik davon, dass der Messexperte nicht länger nur die Aufgabe hat, präzise Messwerte zu erzeugen, sondern vielmehr den kompletten Mess- und Auswerteprozess beherrschen muss.

Bei den Beispielen wird jeweils auf die Angabe von Genauigkeitsmaßen oder Konfidenzbereichen verzichtet, da die Unsicherheit eines Laserscans aktuell nur in Ausnahmefällen abschließend bewertet werden kann. Dies wird in Abschnitt 4 als eine große Herausforderung näher thematisiert.

3.1 Beispiel 1: Erdmassenberechnung

Zur Erdmassenberechnung werden klassischerweise markante Eckpunkte des ausgehobenen Bereichs tachymetrisch aufgemessen und das Volumen anschließend rechnerisch über die Verwendung von Querprofilen oder die Verwendung von Prismen angenähert (Witte und Sparla 2015). Je nach Komplexität des ausgehobenen Bereichs wird dieses Verfahren schnell zeitaufwändig; die Genauigkeit hängt entscheidend von der Wahl und Anzahl der markanten Punkte ab.

Wird stattdessen ein TLS zur Aufnahme verwendet, ist das resultierende Messprodukt vollständiger und objektiver – weil nicht von der subjektiven Auswahl markanter Punkte abhängig. Die Anwendung von Näherungsformeln zur Volumenberechnung ist anschließend nicht mehr nötig: Aus der Vermaschung der Punktwolke zu einem geschlossenen Körper resultiert unmittelbar das Volumen.

3.2 Beispiel 2: Erstellung eines digitalen Höhenmodells

In gleicher Weise lassen sich effizient Höhenmodelle erstellen. Aus den georeferenzierten bzw. registrierten Punktwolken, dank des Kompensators im Laserscanner am lokalen Horizont ausgerichtet, können unmittelbar Höhenlinien mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung berechnet werden. Abb. 4 zeigt dies für den Seeboden des Poppelsdorfer Weiher in Bonn, dessen Höhenprofil bei Leerstand zu dokumentieren war. Eine tachymetrische Erzeugung des Höhenmodells wäre sehr viel zeitaufwändiger und dennoch zwangsläufig weniger detailliert.

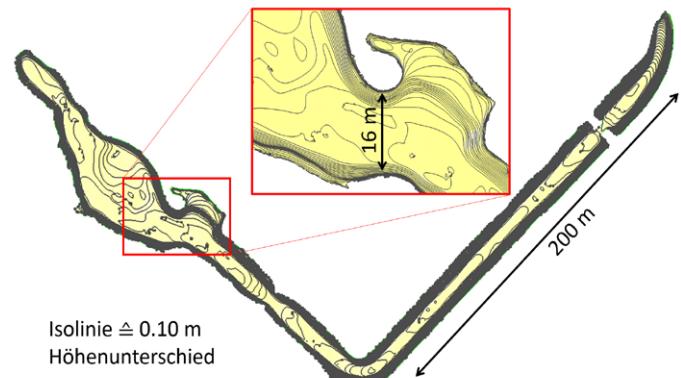


Abb. 4: Höhenmodell des Seebodens vom Poppelsdorfer Weiher

3.3 Beispiel 3: Deformationsanalyse einer Staumauer

Die Brucher-Talsperre in der Nähe von Marienheide, betrieben vom Wupperverband, hat eine Kronenlänge von 200 m und eine Höhe von 25 m. Klassischerweise wird ihre Deformation auf Basis tachymetrischer Netzmessungen und eines Präzisionsnivelllements an ca. 15 Messpunkten halbjährlich analysiert.

Das Ergebnis einer zeitgleich stattfindenden TLS-basierten Messung mit der Leica ScanStation P50 zeigt Abb. 5 in Form eines Punktwolkenvergleichs (M3C2, Lague et al. 2013). Die Größenordnung der geometrischen

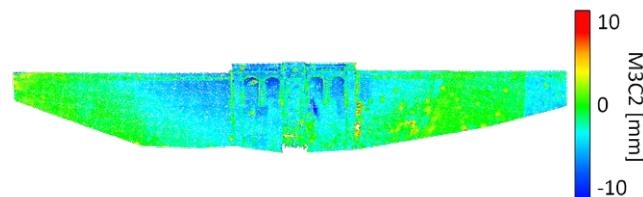


Abb. 5: Punktwolkenvergleich (M3C2) von einer Staumauer, Epochenabstand von sechs Monaten

Bewegungen von maximal etwa 8 mm stimmt mit denjenigen der tachymetrischen Aufnahme überein. Diese Information liegt jedoch in einer sehr viel höheren räumlichen Auflösung vor: ungefähr 10 Millionen Punkte vs. 15 Messpunkte tachymetrisch. Weitere Informationen sind Holst et al. (2017) entnehmbar; hier wird auch auf mögliche Problematiken bei der Nutzung von Punktwolkenvergleichen eingegangen.

Abb. 6 zeigt ferner zwei intensitätsskalierte Ausschnitte eines Staumauerscans. Die Messdistanz betrug etwa 40 m. Es ist ersichtlich, dass jeder einzelne Stein in seiner Geometrie vollständig erfasst wurde. Werden einzelne Steine nun in zwei Epochen vermessen und jeweils zeitlich zugeordnet, könnte zusätzlich zu der o.g. Deformationsanalyse der gesamten Staumauer auch die Deformation eines jeden Steines ermittelt werden; sowohl seine individuelle Positionsänderung als auch Absplitterungen

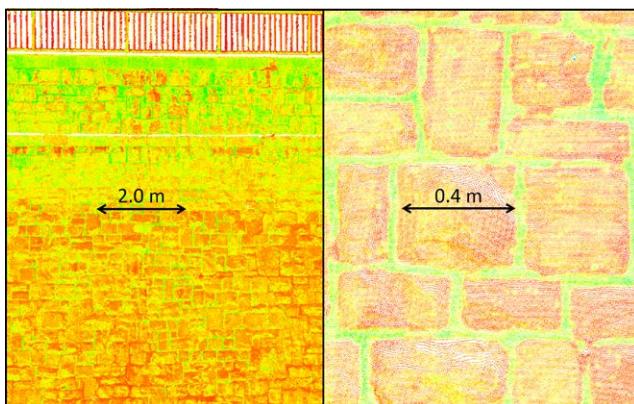


Abb. 6: Intensitätskolorierte Ausschnitte aus dem Scan einer Staumauer

in seiner Oberfläche. Die dauerhafte Anlage eines »Steinkatasters« würde das Monitoring eines jeden Steins über einen längeren Zeitraum ermöglichen.

3.4 Beispiel 4: Schwingungsanalyse eines Portalkranks

Zur Bestimmung der Funktionstüchtigkeit von Portalkrallen ist einerseits die Durchbiegung in Abhängigkeit der gehobenen Last und andererseits das Schwingungsverhalten bei Absetzung der Last zu analysieren. Im Konkreten wurde hier ein Portalkran der Länge von 100 m und einer Höhe von 50 m untersucht. Dieser Kran hebt Lasten von bis zu 800 t.

Zur Aufnahme wurde der Profillaserscanner Z+F 9012A verwendet, dessen Konstruktion derjenigen eines 3D-Laserscanners gleicht (Abb. 1); einzig die horizontale Rotation um die Stehachse entfällt. Dieser Profillaserscanner ermöglicht die hochfrequente Erfassung eines Profils in räumlich hoher Auflösung. Dafür wurde der TLS unterhalb des Portalkranks positioniert, sodass er die Unterseite des Portalkranks wiederholt aufmessen kann.

Abb. 7 zeigt die resultierenden Ergebnisse. Hierbei wurde jede Profilmessung entlang des Krans separat durch einen B-Spline approximiert, um zufällige Messabweichungen in der Auswertung zu minimieren. Auf der Hochachse von Abb. 7 ist die Länge des Portalkranks dargestellt, auf der Rechtsachse die Beobachtungsdauer

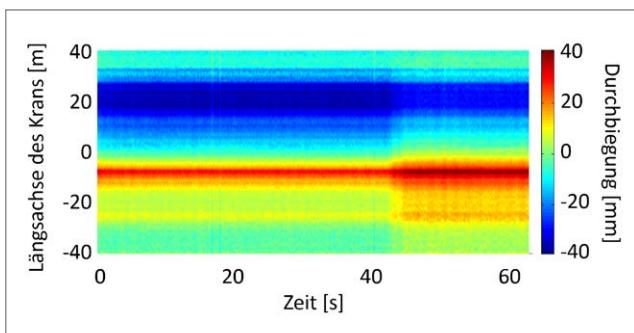


Abb. 7: Durchbiegung eines Portalkranks über eine Zeitspanne von 60 Sekunden

von 60 Sekunden. Die Analyse entlang der Hochachse zeigt, dass der Portalkran bei gehobener Last stellenweise Durchbiegungen von 30 mm aufweist, aber teilweise auch Aufwölbungen von 40 mm. Dass auch Aufwölbungen vorliegen, hängt mit der positiven Vorbiegung des Portalkranks in unbelastetem Zustand zusammen; die Asymmetrie der Durchbiegung ist mit der Tatsache zu erklären, dass die Last bei 20 m der Längsachse hing. Nach ca. 43 Sekunden wurde die Last abgeladen, was zu einer abrupten Änderung der Durchbiegung führt; diese Änderung ist räumlich variabel.

Zur näheren Betrachtung des zeitlichen Verhaltens wird aus Abb. 7 der Messpunkt bei 0 m der Längsachse entnommen und über die Zeit beobachtet (Abb. 8). Hierbei wird deutlich, dass der Portalkran an dieser Position um 10 mm deformiert und dass er 5 Sekunden benötigte, um vom Ausgangszustand (unter Last) schwingend zum Endzustand (ohne Last) zu gelangen.

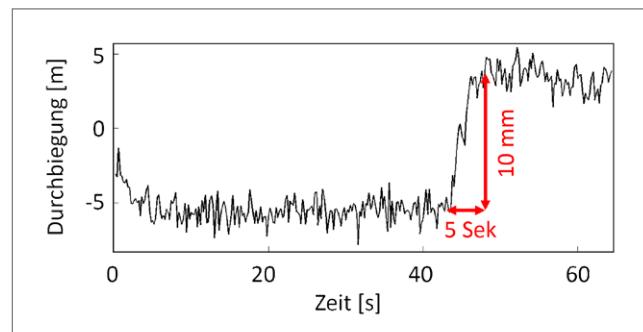


Abb. 8: Höhenänderung eines ausgewählten Punktes auf dem Portalkran

Eine solche Untersuchung ist auch mit einem Tachymeter möglich. Hierbei müsste jedoch die Entscheidung getroffen werden, ob die Messung zeitlich oder aber räumlich hochfrequent durchgeführt werden soll. Beides ist nicht gleichzeitig möglich. Bei zeitlich hochfrequenter Messung könnte z.B. ein Prisma an einer einzigen Position des Portalkranks über automatische Zielverfolgung eines motorisierten Tachymeters getrackt werden; bzw. nach den in Lienhart et al. (2017) vorgestellten Methoden eine Zielmarke, die mit bildgebenden Tachymetern aufgenommen wird. Das Ergebnis wäre in beiden Fällen vergleichbar mit einem Schnitt entlang der Rechtsachse von Abb. 7 bzw. vergleichbar mit Abb. 8. Bei räumlich hochfrequenter Messung könnte die komplette Unterseite des Krans reflektorlos aufgenommen werden: Das Ergebnis würde einem Schnitt entlang der Hochachse von Abb. 7 entsprechen. Die Dynamik des Krans während der Lastabgabe bliebe dabei verborgen. Nur mit dem Profillaserscanner ist sowohl die zeitlich als auch die räumlich hohe Frequenz möglich.

Beschreibt diese Anwendung die Deformation von Portalkrallen, ist sie dennoch übertragbar auf andere Anwendungen: z.B. Schwingungsanalysen von Turbinen oder Tragwerken. Schill (2018) zeigt für dieses Anwendungsfeld einige neue methodische Ansätze.

4 Von großen Herausforderungen

Aus den Beispielen des vorhergehenden Abschnitts sowie den Grundlagen aus Abschnitt 2 gehen einerseits die Chancen des terrestrischen Laserscannings hervor: die umfassende 7D-Aufnahme der Umgebung. Andererseits führen sie auch unmittelbar zu großen Herausforderungen, mit denen jeder zu kämpfen hat, der einen TLS fachgemäß einsetzen möchte (Holst und Kuhlmann 2016). Diese Herausforderungen treten vor allem auf, wenn die gewonnenen 7D-Informationen zur Beantwortung der vorliegenden Aufgabenstellung ausgewertet werden sollen. Ganz konkret sind folgende Aspekte betroffen:

- Zur Erstellung eines Laserscans muss neben dem TLS selber ggfs. neue Messausrüstung angeschafft werden: Stative mit hoher Stabilität und Zielzeichen, die von Scanner zu Scanner variieren.
- Ein Laserscan besteht in der Regel aus mindestens einigen Millionen Punkten. Zur Verwaltung und Darstellung muss die nötige Hardware vorhanden sein: Computerleistung, Speicherplatz, RAM, Server zur Verwaltung, Grafikkarte, ...
- Zur Verarbeitung des Laserscans muss entsprechende Software vorhanden sein. Dies betrifft u.U. die Registrierung der Scans, aber in jedem Fall die Software zur Entnahme der gesuchten geometrischen Information. Der Kauf eines Laserscanners zieht also weiteren Investitionsbedarf mit sich.
- Die Auswertung von Laserscans erfordert neue methodische Kompetenz, da die gesuchte Information nicht aus wenigen Einzelpunkten, sondern aus mindestens einigen Tausend Punkten gewonnen wird. Gleichzeitig ist die gewonnene Information in der Regel nicht punkthaft, sondern flächenhaft. Für die in Abschnitt 3 genannten Beispiele wurden z.B. Vermaschungen nach vorheriger Rauschminimierung, Objekterkennungsalgorithmen (Finden von Steinen bei der Staumauer), Punktwolkenvergleiche oder Splineapproximationen verwendet.
- Die Abschätzung der Messunsicherheit ist deutlich komplexer als bei tachymetrischen Messungen. Dies liegt zum einen daran, dass die Gesamtunsicherheit maßgeblich von der Unsicherheit der reflektorlosen Distanzmessung auf die Messoberfläche beeinflusst wird (zufällig und systematisch); zum anderen daran, dass systematische instrumentelle Abweichungen nicht einfach durch eine 2-Lagenmessung minimiert werden können. Die Qualität des Messprodukts lässt sich also weniger gut vorhersagen bzw. beurteilen.

Die drei erstgenannten Aspekte betreffen ausschließlich die Anpassung der Infrastruktur – im Idealfall sind sie also kurzfristig zu beheben. Die beiden letzten genannten Aspekte sind jedoch von andauernder Relevanz. Daher befasst sich ein Großteil der aktuellen ingenieurgeodätischen Forschung mit diesen beiden Aspekten oder daraus abgeleiteten Herausforderungen.

4.1 Herausforderung 1: Ableitung flächenhafter Informationen aus Laserscans

Sowohl die Extraktion geometrischer Informationen aus einem Laserscan als auch die Extraktion geometrischer Veränderungen zwischen zwei Epochen erfordert eine flächenhafte Modellierung. Soll z.B. die Ecke eines Hauses aus einem Laserscan koordiniert werden, könnten die zwei Wandflächen, die die Ecke einschließen, als Ebenen approximiert werden. Die Schnittlinie dieser beiden Ebenen entspräche dann der Gebäudeecke. Dieses Vorgehen ist bei dem Beispiel der Gebäudeecke trivial; dennoch stellt es eine Verlagerung der Kompetenzen dar. Hatte der Geodät bei der Tachymetrie noch die Aufgabe, die Gebäudeecke vor Ort durch die optimale Positionierung des Reflektors eindeutig – aber auch unumkehrbar – festzulegen, ist der Innendienst nun zuständig für die Herausarbeitung der flächenhaften Information aus eventuell gar nicht benötigten Massendaten.

In vielen Fällen ist die Aufgabe jedoch deutlich komplexer, siehe auch Abschnitt 3. Wird z.B. ein Industriegelände aufgenommen und sollen die Geometrien vorhandener Leitungen dokumentiert werden, müssen diese Leitungen in einem ersten Schritt gefunden und von den umliegenden Objekten isoliert werden. Methodisch gesehen entspricht dies einer Segmentierung, Klassifizierung oder Merkmalserkennung – in der Photogrammetrie längst verwendete Methoden (Luhmann 2018). Im Anschluss muss jede einzelne Leitung modelliert werden, z.B. durch Schätzung der Parameter von Zylinderprimitiven oder durch Vermaschung der entsprechenden Messpunkte. Am Schluss steht die Visualisierung der komplexen Strukturen.

Sollen ferner geometrische Veränderungen aus den Punktwolken ermittelt werden, müssen zusätzlich zeitliche Differenzen gebildet werden. Die bekannte ingenieurgeodätische Methode der punktweisen Differenzbildung im 2-Epochenvergleich (Heunecke et al. 2013) ist nicht unmittelbar anwendbar, da keine identischen Punkte zwischen den Epochen existieren. Viele alternative Lösungsstrategien existieren, die Ohlmann-Lauber und Schäfer (2011) erstmalig klassifizierten und Neuner et al. (2016) anhand vieler Beispiele einordnen. Wird nur die geometrische 3D-Information genutzt, können etwa verschiedene Punktwolkenvergleiche (Holst et al. 2017) oder ähnliche Verfahren, z.B. der Defo Scan++ (Wujanz 2016), durchgeführt werden. Eine andere Möglichkeit ist der Vergleich epochenweise geschätzter Parameter aus geometrischen Primitiven (Holst 2015) oder aus komplexeren Flächenparametrisierungen (Bureick et al. 2016). Werden zusätzlich Informationen aus der reflektierten Intensität oder aus den Kameras integriert, können geometrische Änderungen wieder aus vorher identifizierten Einzelpunkten entnommen und auf die Fläche extrapoliert werden (Wiedemann et al. 2017, Gojcic et al. 2018).

Für viele dieser Möglichkeiten zur Modellierung von Geometrien oder ihrer zeitlichen Differenzen existieren

kostenlose oder kostenpflichtige Softwareprogramme, die sich in ihrem Funktionsumfang deutlich unterscheiden. Geist et al. (2018) beschreiben die Möglichkeiten der Modellierung, differenziert nach der Komplexität, und dafür nutzbare Softwarepakete. Da dieser Bereich sehr dynamisch ist, wird der Funktionsumfang – auch getrieben von Universitäten und Hochschulen – stetig erweitert und neue Produkte kommen auf den Markt.

Obwohl – oder gerade weil – diese Ausführung einige Möglichkeiten zur flächenhaften Auswertung der Laserscans aufzeigt, ist dieser Auswerteschritt eine Herausforderung: Es existieren momentan noch keine allgemein akzeptierten Vorgehensweisen oder Standards, wie Laserscans vorverarbeitet sein müssen und wie die Auswertung bestmöglich erfolgen sollte, um auch zwischen unterschiedlichen Nutzern identische Ergebnisse zu erlangen. Wunderlich et al. (2016) sprechen in diesem Bezug von der »Challenge« flächenhafter Deformationsanalysen. Bei Anwendung der falschen Methoden – was nicht unmittelbar ersichtlich sein muss – führen die Berechnungsergebnisse auch zu Fehlinterpretationen. Dies zeigen Holst et al. (2017) für die Deformationsanalyse mit Punktwolkenvergleichen.

Die Vorgehensweise ist beim terrestrischen Laserscanning – verglichen mit tachymetrischen Deformationsmessungen – also sehr viel mehr anwendungsgetrieben: Das gescannte Objekt bestimmt in großem Maße, über welche methodischen Wege die gesuchte Information gewonnen werden kann. Hierbei sollte immer die Absicht sein, die hohe geometrische Redundanz der Punktwolke optimal zu nutzen. Bei tachymetrischen Messungen ist dies in der Regel nicht der Fall, da das Objekt seine geometrische und physikalische Individualität nach der Diskretisierung in Einzelpunkte verliert – unabhängig von seiner Ausdehnung und Komplexität.

4.2 Herausforderung 2: Abschätzung der Messunsicherheit

Die Unsicherheit beim Laserscanning wird prinzipiell von den zur Tachymetrie identischen Faktoren beeinflusst (Abb. 2). Dennoch ist deren Abschätzung sehr viel komplexer. Dies liegt zum einen daran, dass die Distanz zu einer vorher geometrisch und physikalisch unbekannten Oberfläche gemessen wird; dies führt zu deutlich höheren zufälligen und systematischen Abweichungen verglichen mit der reflektorgestützten Messung. Zum anderen daran, dass die gewohnten Strategien zur Reduktion instrumenteller Abweichungen (z.B. Messung mehrerer Vollsätze auf identische Punkte) nicht übertragbar sind. Die Angabe einer Genauigkeit zu der gemessenen Größe gehört jedoch zum Selbstverständnis des Geodäten – ohne diese Angabe sind keine soliden Entscheidungen auf Basis des Laserscans möglich. Daher werden aktuell insbesondere die zwei folgenden Strategien verfolgt, um Genauigkeitsaussagen treffen zu können.

4.2.1 Realistische Abschätzung der Streckenmessgenauigkeit

Die Streckenmessgenauigkeit wird – abgesehen von instrumentellen Abweichungen (Nullpunkt-, Maßstabsabweichung) – hauptsächlich von konfigurationsabhängigen Abweichungen (Einfallsinkel und Messdistanz) und oberflächenabhängigen Abweichungen (Reflexions-eigenschaften) zufällig und systematisch beeinflusst (Abb. 2, Kuhlmann und Holst 2016). Die Quantifizierung dieser Einflüsse ist daher essenziell. Im Optimalfall führt sie zu einer Aufstellung einer Kovarianzmatrix der Beobachtungen, die alle wesentlichen Effekte beinhaltet.

Wujanz et al. (2017) haben in diesem Sinne einen Durchbruch erzielt, da sie eine von drei Parametern abhängige funktionale Beziehung zwischen den gemessenen Intensitäten und der Präzision der Distanzmessung hergestellt haben. Werden demnach rohe Intensitätswerte aufgezeichnet und die drei Parameter bestimmt, kann nach Ende des Scans direkt die Präzision der Streckenmessung entnommen werden. Voraussetzung ist, dass die rohen Intensitätswerte vom Scanner zur Verfügung gestellt werden. Bei TLS von Leica Geosystems ist dies z.B. aktuell nicht der Fall. Strategien zur Bestimmung der drei relevanten Parameter finden sich in Wujanz et al. (2017) für Scanner im 1D-Modus, in Heinz et al. (2018) im 2D-Modus, in Wujanz et al. (2018) und Schmitz et al. (2019a) im 3D-Modus.

Systematische Abweichungen der Distanzmessung können auf diese Weise nicht quantifiziert werden. Soudarissanane et al. (2011) und Zámečníková und Neuner (2018) zeigten bereits, dass große Einfallsinkel des Laserstrahls auf die Oberfläche, auch in Kombination mit der Oberflächenrauigkeit, zu relevanten systematischen Distanzabweichungen führen. Ferner verdeutlichen Zámečníková et al. (2014), dass die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Oberflächen, z.B. aufgrund unterschiedlicher Farben, zu unterschiedlich großen Offsets in der Distanzmessung führen. Da der Laserspot auf der Oberfläche eine Größe im Millimeter- oder Zentimeterbereich einnimmt, führen diese systematischen Abweichungen zwangsläufig zu Korrelationen zwischen den Messpunkten. Deren Quantifizierung, die wiederum auch von dem Auflösungsvermögen eines Laserscanners abhängt (Schmitz et al. 2019b), ist jedoch noch nicht möglich (Kauker et al. 2016). Fest steht allerdings, dass Korrelationen in erheblichem Maße vorliegen, sodass die große Anzahl an Messpunkten eine viel zu hohe Genauigkeit der aus der Punktwolke abgeleiteten Parameter suggeriert (Jurek et al. 2017).

Schlussendlich gelingt die Quantifizierung der Präzision der Distanzmessung in Abhängigkeit der reflektolos angemessenen Oberfläche mittlerweile relativ gut. Dies gilt jedoch nicht für systematische Abweichungen sowie die Korrelationskoeffizienten zwischen den Messpunkten, die maßgeblich von den geometrischen und

physikalischen Oberflächeneigenschaften abhängen (Holst und Kuhlmann 2016). Die gesuchte Kovarianzmatrix ist demnach nur auf der Hauptdiagonalen gefüllt. Dass dies zu Fehlinterpretationen von Laserscans führen kann, zeigen Jurek et al. (2017) und Kauker et al. (2017).

4.2.2 Entwicklung von Strategien zur Kalibrierung des Laserscanners

Terrestrische Laserscans werden, ähnlich wie tachymetrische Messungen, durch konstruktionsbedingte instrumentelle Abweichungen verfälscht. Bezugnehmend auf Abb. 1 könnte z.B. der rotierende Spiegel eine Neigungsabweichung haben, der Laserstrahl verschwenkt sein oder die Kippachse nicht senkrecht auf der Stehachse stehen. Diese Effekte führen zu systematischen Abweichungen, die teilweise identisch mit denjenigen eines Tachymeters sind, etwa die Zielachs-, Kippachs- und Höhenindexabweichung. Andere Abweichungen wiederum existieren nur bei TLS. Das National Institute of Standards and Technology der USA (NIST, Muralikrishnan et al. 2015) listet 18 mögliche Konstruktionsabweichungen auf. Da die daraus folgenden instrumentellen Abweichungen nicht in einer punktbasierten Vollsatzauswertung eliminiert werden können, treten gerade beim Scanning zwei Aspekte in den Vordergrund (Holst et al. 2016).

Der erste Aspekt ist die Prüfung von TLS, um zu entscheiden, ob sie noch in den Spezifikationen des Herstellers arbeiten. Das DVW-Merkblatt 7-2014 (Neitzel et al. 2014) stellt den Prototypen eines solchen TLS-Prüffeldes auf, Holst et al. (2018) geben einen Überblick über die konkrete Realisierung von Prüffeldern in Deutschland sowie die erzielten Ergebnisse auf Basis von 47 Prüflingen und 26 unterschiedlichen TLS-Baureihen. Aktuell wurde die ISO-Norm 17123-9 zur Prüfung von TLS veröffentlicht. Wunderlich et al. (2013) stellen Prüfkriterien auf, um TLS verschiedener Hersteller anhand konkreter Kriterien objektiv miteinander vergleichen zu können.

Der zweite Aspekt ist die Kalibrierung von TLS, um die Messgenauigkeit, resultierend aus seinen Einzelkomponenten der Winkel- und Distanzmessung, quantifizieren und verbessern zu können. Zwar sind TLS herstellerseitig kalibriert (Holst et al. 2016), regelmäßige Kalibrierungen sind jedoch aufgrund der fehlenden Vollsatzauswertung wichtig, falls konstant hohe Genauigkeiten erzielt werden sollen.

Daher werden aktuell herstellerunabhängige Kalibrierfelder aufgebaut, die als Alternative zur Herstellerkalibrierung wahrgenommen werden können. Diese basieren auf wiederholten Messungen von verschiedenen Standpunkten und/oder in zwei Lagen, wobei Zielzeichen (Medić et al. 2017), Ebenen (Bae und Lichti 2007) und/oder aus den Scans nachträglich detektierte radiometrische Merkmale (Medić et al. 2019b) erfasst werden. Deren Position wird über eine Netzausgleichung bzw. Bündelausgleichung in einem übergeordneten Koordinatensystem zusammen mit den Kalibrierparametern geschätzt;

auch hier ist nach Medić et al. (2019a) das stochastische Modell von großer Bedeutung.

Strategien zur Prüfung und Kalibrierung von TLS werden demnach derzeit entwickelt oder sind schon nutzbar. Einige Aspekte, wie die Entwicklung des optimalen Kalibrierfelds, die Analyse der zeitlichen Konstanz von Kalibrierparametern oder die Entwicklung von Messstrategien zur Reduzierung systematischer Messabweichungen im Feld, werden weiterhin Forschungsthema bleiben.

Prinzipiell sollte die regelmäßige Nutzung der bereits existierenden Möglichkeiten zur Prüfung und Kalibrierung von TLS – ob als eingekaufte Dienstleistung oder durch eigene Realisierung – auch heute schon für jeden Nutzer eine Pflichtaufgabe sein. Räumlich hochauflöste und farblich kolorierte Punktwolken vermitteln bei ihrem Anblick zwar den Anschein von hoher Genauigkeit – schließlich werden glatte Wände auch ziemlich glatt dargestellt. Dass dieser Anschein aber nicht zwangsläufig mit hoher Messgenauigkeit, die beim Scanning von systematisch wirkenden Effekten dominiert wird, korreliert, wird dabei manchmal vergessen. Dies wird auch aus dem folgenden Beispiel in Abschnitt 5 deutlich.

5 Von großen Radioteleskopen

In der geodätischen Very Long Baseline Interferometry (VLBI) werden die Basislinien zwischen Radioteleskopen bestimmt, indem mindestens zwei Radioteleskope gleichzeitig verschiedene Radioquellen beobachten. Bei der Basislinienbestimmung wird heutzutage eine Genauigkeit von bis zu 1 mm angestrebt. Damit diese Genauigkeit erreicht werden kann, muss die Form- und Lagestabilität der an der Basislinienbestimmung beteiligten Radioteleskope mit mindestens einer ähnlichen Genauigkeit bekannt sein (Sarti et al. 2009b). Soweit nicht anders bekannt, gelten dabei u. a. zwei Annahmen (Sovers et al. 1998):

- Die Form des Hauptreflektors ist über alle Elevationsstellungen stabil.
- Der Referenzpunkt des Radioteleskops ist über alle Elevationsstellungen stabil.

Abweichungen von diesen Annahmen sind messtechnisch zu quantifizieren und nach Nothnagel et al. (2019) in die VLBI-Auswertekette zu integrieren.

Die Formbestimmung von Radioteleskopen mit Laser-scanning ist ein seit einigen Jahren etabliertes Verfahren und wurde an verschiedenen Radioteleskopen umgesetzt (Dutescu et al. 2009; Sarti et al. 2009a; Holst et al. 2012, 2015, 2017). Die Stabilitätsuntersuchung des Referenzpunktes wurde dahingegen bisher noch nicht mit Laser-scanning durchgeführt, sondern auf Basis von Totalstationen oder Lasertrackern (Eschelbach und Haas 2003; Lösler et al. 2014; Sarti et al. 2009b, 2011). Dass TLS hierfür jedoch auch verwendbar sind – sogar ohne die Nutzung

von Passpunkten –, zeigen Holst et al. (2019) erstmalig. Voraussetzung hierfür ist, dass die in Kapitel 4 genannten Herausforderungen angenommen werden: Die Deformationen werden aus flächenhaften Analysen abgeleitet und systematische Messabweichungen werden durch eine Kalibrierung minimiert.

Als Beispiele für diese Analysen dienen das 100-m-Radioteleskop in Effelsberg, betrieben vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie, und das 20-m-Radioteleskop in Onsala, betrieben vom Onsala Space Observatory. Beide Teleskope wurden mit einer Leica ScanStation P20 vermessen. In Holst et al. (2015, 2017, 2019) werden die Deformationsanalysen ausführlich erklärt.

5.1 Messkonzept

Der TLS wurde kopfüber in der Nähe des Subreflektors montiert (Abb. 9). Die Form des Hauptreflektors kann so in verschiedenen Elevationsstellungen aufgenommen

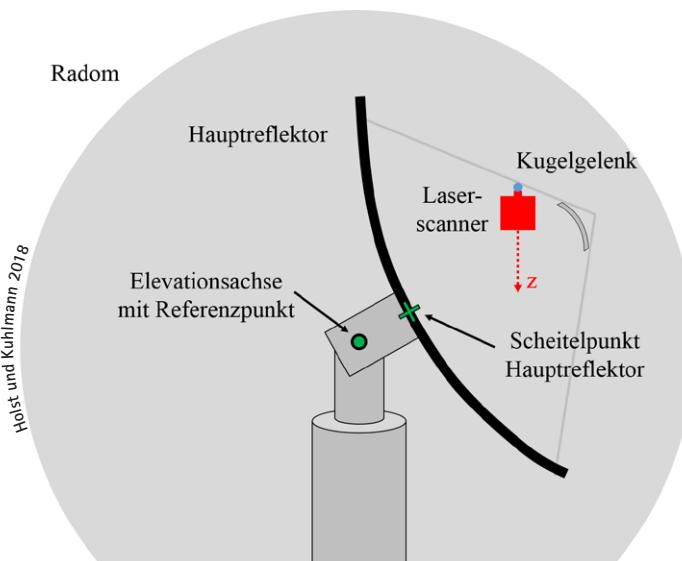


Abb. 9: Skizze vom 20-m Radioteleskop in Onsala mit Messaufbau

werden. Arretiert wurde der TLS mit Hilfe eines frei beweglichen Kugelgelenks. Dieses ermöglicht, dass sich der Laserscanner unabhängig von der Elevationsstellung des Radioteleskops immer wieder neu ausrichten kann, sodass seine z-Achse senkrecht auf dem lokalen Horizont steht. Von dieser Position aus wurden zu verschiedenen Elevationsstellungen Messungen durchgeführt. Jede Messung wurde aufgrund der in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen systematischen Messabweichungen nach Möglichkeit in zwei Lagen durchgeführt.

Für die Messungen stand jeweils nur ein begrenzter Zeitraum zur Verfügung, da die Radioteleskope hierfür ihren gewöhnlichen Beobachtungsplan unterbrechen müssen. Daher stellt sich die Frage, ob entweder eine sehr hohe Auflösung oder eine hohe Anzahl an Punktmitteilungen zur Minimierung zufälliger Abweichungen in der

Streckenmessung (siehe Abschnitt 2.2) als Scansetting gewählt werden sollte. Für das Scanning ebener Flächen ist es nach Heinz et al. (2019) sinnvoller, eher eine hohe räumliche Auflösung zu wählen als eine hohe Anzahl an Punktmitteilungen. Daher wurde mit einer relativ hohen Auflösung von 1,6 mm auf 10 m Distanz und Qualitätsstufe 1 (keine Punktmitteilungen) gemessen. Diese Wahl sollte für jede Anwendung gut überlegt sein und ist nicht verallgemeinerbar.

5.2 Flächenhafte Deformationen des Hauptreflektors

Zur Bestimmung der flächenhaften Deformation des Hauptreflektors wird dessen Form jeweils als Rotationsparaboloid parametrisiert; hierbei wird die Form einzig durch die Brennweite festgelegt. Auf Basis der Punktwolken wird diese Brennweite sowie die Position und Ausrichtung des Rotationsparaboloids im jeweiligen Koordinatensystem des Laserscanners für jede Elevationsstellung in einem kleinste-Quadrat-Ausgleich geschätzt. Zusätzlich werden die Kalibrierparameter des TLS in einer Bündelausgleichung aller über eine 2-Lagenmessung erstellten Laserscans geschätzt. Ansonsten wären die Ergebnisse aufgrund der Achsabweichungen des TLS grob verfälscht (Holst et al. 2018).

Abb. 10 zeigt die resultierenden elevationsabhängigen Brennweitenänderungen der beiden Radioteleskope. Aufgrund seines Durchmessers von 100 m fällt die Brennweitenänderung beim Radioteleskop Effelsberg mit 22,7 mm deutlich größer aus als diejenige des Radioteleskops in Onsala (Brennweitenänderung von 9,6 mm) mit einem Durchmesser von nur 20 m. Für beide Radioteleskope kann somit die o.g. Annahme, dass die Form des Hauptreflektors über alle Elevationsstellungen stabil bleibt, widerlegt werden.

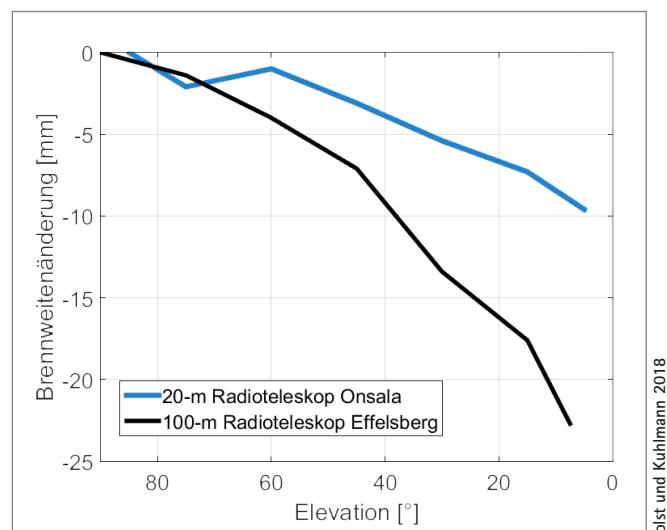


Abb. 10: Geschätzte Brennweitenvariationen in Abhängigkeit der Elevationsstellung; 100-m-Radioteleskop Effelsberg (schwarz), 20-m-Radioteleskop Onsala (blau)

Abb. 11 zeigt die Residuen von der Schätzung des Rotationsparaboloids am Radioteleskop Effelsberg, ohne Kalibrierung des TLS (links) sowie mit der Kalibrierung (rechts). Die durchgehende schwarze Linie ist eine Projektion der Startposition der Messungen. Der Schnittpunkt mit der gestrichelten Linie symbolisiert den lokalen Zenit des auf dem Kopf stehenden TLS. Aus diesen Informationen und dem Vergleich der beiden Abbildungen wird deutlich, dass die in der linken Abbildung erkennbaren systematischen Abweichungen von der Ausrichtung des TLS abhängen.

Der Vorzeichenwechsel entlang der schwarzen Linie entsteht dadurch, dass die eine Seite in Lage 1 und die zweite Seite in Lage 2 gemessen wurde. Die Auswirkung z.B. der Kippachsabweichung wechselt also hier das Vorzeichen. Diese systematischen Abweichungen sind dabei mit ca. ± 5 mm eindeutig größer als die zufälligen. Dies gilt sowohl für die Messungen am Radioteleskop Effelsberg (Messdistanzen ca. 40 m) als auch beim Radioteleskop Onsala (Messdistanz ca. 7 m). Diese hohen Werte kommen zustande, da sich das Messobjekt in Zenitrichtung vom TLS aus befindet; dort, wo Achsabweichungen ihren größten Einfluss haben (Deumlich und Staiger 2001).

5.3 Stabilität des Referenzpunktes

Der Referenzpunkt wird bei Radioteleskopen gewöhnlich über den Schnittpunkt von Elevationsachse und Vertikalachse beschrieben⁵ (Abb. 9). Dies gleicht dem konsistanten Drehpunkt bei Horizontal- und Vertikaldrehung des Radioteleskops. Zur Untersuchung der Stabilität des Referenzpunktes wird analysiert, inwieweit sich der Hauptreflektor tatsächlich auf einer Kreisbahn um den Referenzpunkt bewegt. Diese Analyse basiert auf drei Schritten:

- Die Position und Ausrichtung des Hauptreflektors im jeweiligen Koordinatensystem des TLS ist aus der vorhergehenden Formanalyse bekannt. Hieraus wird der Scheitelpunkt des Hauptreflektors berechnet.

5 Beim Onsala 20-m-Radioteleskop liegt zwischen diesen beiden Achsen ein Offset von 6 mm vor (Eschelbach und Haas 2003). Dies ist für die hier vorgestellte Stabilitätsuntersuchung aber vernachlässigbar.

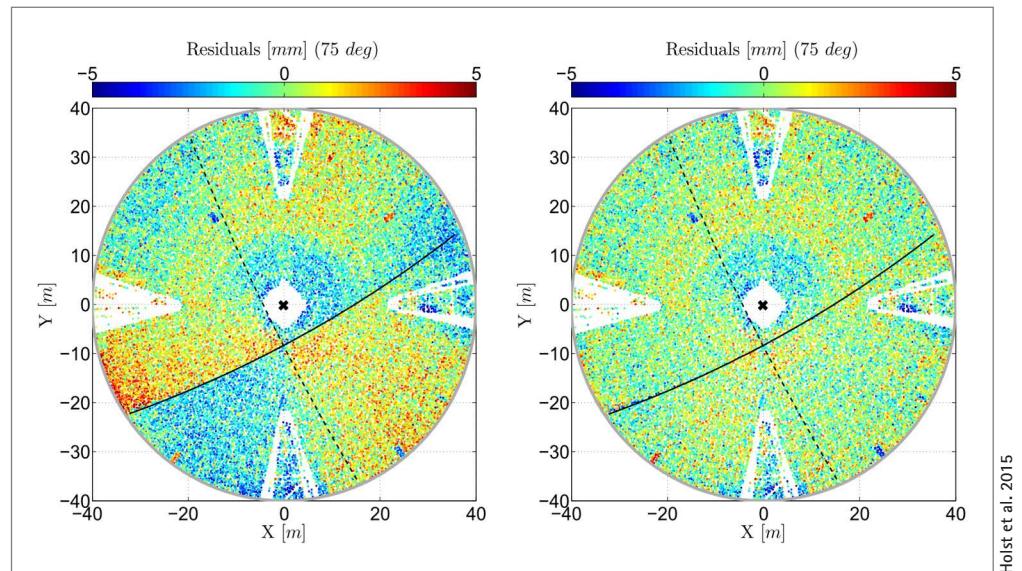


Abb. 11: Residuen von der Schätzung beim Radioteleskop Effelsberg ohne Kalibrierung des TLS (links) und mit Kalibrierung des TLS (rechts)

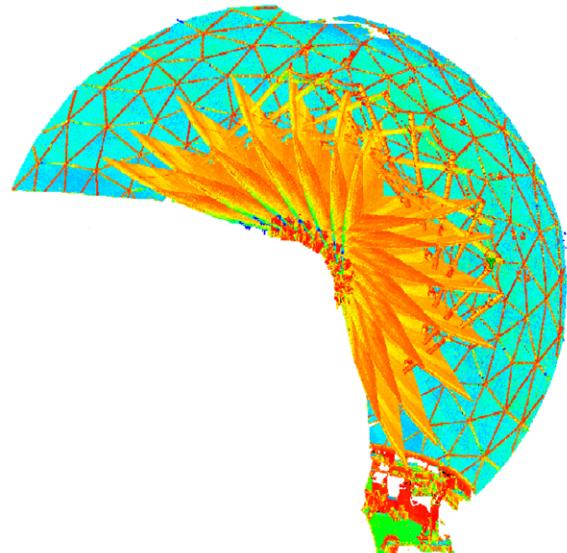


Abb. 12: Intensitätskolorierte Laserscans vom Radioteleskop Onsala, transformiert in das übergeordnete Koordinatensystem (orange: Hauptreflektoren; türkis: Radom)

- Diese Scheitelpunkte werden in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert. Hierfür wird ausgenutzt, dass der TLS in jeder Elevationsstellung auch jeweils das Radom mit abgescannt hat. Die Hülle des Radoms kann als ausreichend stabil angesehen werden, um es als unveränderten Überlappungsbereich aller Laserscans zur ebenenbasierten Registrierung zu verwenden. Realisiert wurde diese Registrierung mit der Software Scantra der Fa. technet GmbH. Abb. 12 zeigt die in das übergeordnete Koordinatensystem transformierten Laserscans (Elevationsstellungen zwischen 85° und 5°).
- Aus den elevationsabhängigen Scheitelpunktkoordinaten im übergeordneten Koordinatensystem wird eine Elevationsachse und ein Drehzentrum geschätzt (Abb. 13) und seine Konstanz analysiert.

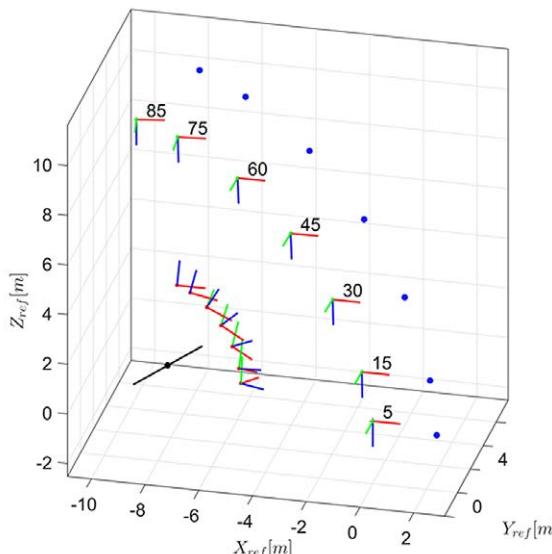


Abb. 13: Elevationsachse (schwarze Linie), Referenzpunkt (schwarzer Punkt), Scheitelpunkte des Radioteleskops (Dreibeine ohne Beschriftung), Laserscannerpositionen (Dreibeine mit Beschriftung der Elevationsstellung) und Brennpunkte (blaue Punkte) des Radioteleskops Onsala

Im Ergebnis variiert das Drehzentrum über alle Elevationsstellungen im Bereich von nur 0,3 mm. Deswegen kann die Stabilität des Referenzpunktes in Anbetracht der Messgenauigkeit nicht widerlegt werden. Die o.g. Annahme, dass der Referenzpunkt des Radioteleskops über alle Elevationsstellungen stabil bleibt, kann für das 20-m-Radioteleskop Onsala demnach bestehen bleiben.

Für das 100-m-Radioteleskop Effelsberg wurde nicht in gleicher Weise eine Stabilitätsuntersuchung durchgeführt. Das vorgestellte Konzept für das 20-m-Radioteleskop Onsala basiert auf der Registrierung der Laserscans über das in jeder Elevationsstellung aufmessbare Radom. Da in Effelsberg weder ein Radom noch eine vergleichbare Struktur, die jederzeit vom TLS aus sichtbar wäre, vorhanden ist, ist eine Übertragung nicht unmittelbar möglich.

6 Fazit

Der terrestrische Laserscanner (TLS) ist der logische Nachfolger vom motorisierten, reflektorlos messenden Tachymeter. Das Messprodukt ist eine räumlich sehr hoch aufgelöste 7D-Punktwolke (X,Y,Z,I,R,G,B), die sich aufgrund ihres geometrischen und physikalischen Detailreichtums sehr gut eignet, kleine und große Objektcharakteristiken und ihre zeitlichen Änderungen zu erfassen. Terrestrische Laserscanner bieten also große Chancen hinsichtlich der (ingenieur-)geodätischen Aufnahme- und Deformationsmessung oder damit verwandter Bereiche, wie etwa As-Built-Dokumentation, Change Detection, Baufortschrittsmonitoring. Neue Bereiche wie BIM

können mit TLS erstmalig erschlossen werden. Dies gilt vor allem auch deshalb, weil die Erstellung eines Laser-scans dank intelligenter, vollautomatischer Standpunktverknüpfungen in den letzten Jahren sehr effizient geworden ist.

Um die gewünschte Geometrieinformation der Aufnahme- oder Deformationsmessung aus der Punktwolke zu extrahieren, hat eine flächenhafte Auswertung zu erfolgen. Hierfür sind Methoden neu zu entwickeln oder aus angrenzenden Bereichen innerhalb der Geodäsie – vor allem der Photogrammetrie, aber auch der Geoinformatik und der Erdmessung – zu übertragen. Methodische Verknüpfungen, über z.B. die Bündelausgleichung, digitale Bildverarbeitung, Merkmalserkennung, Klassifikation und Segmentierung, Dreiecksvermaschung, Kollokation oder die Lösung riesiger Normalgleichungssysteme mit korrelierten Beobachtungen, sind in jedem Fall gegeben. Die Auswertung terrestrischer Laserscans erfordert demnach neue methodische Kompetenzen vom (Ingenieur-) Geodäten, verglichen mit der Auswertung tachymetrischer Messungen.

Die enorme Schnelligkeit bei der Erstellung eines Laserscans ist nur erreichbar, indem die Messgenauigkeit der geometrischen Redundanz weicht. Jeder einzelne Messpunkt ist also mit einer höheren Unsicherheit behaftet: Mehrfachmessungen auf identische Punkte sind nicht möglich, die Messung erfolgt reflektorlos auf eine vorher nicht definierte Oberfläche und eine klassische Vollsatzauswertung kann nicht stattfinden. Daher ist es einerseits herausfordernd, die Genauigkeit von Laserscans zu bestimmen. Andererseits gewinnt die Prüfung und Kalibrierung von Laserscannern und die Verifizierung seiner Produkte an Wichtigkeit. Sowohl zur Quantifizierung der Messunsicherheit als auch zur Minimierung dieser stehen aktuell noch keine standardisierten Methoden zur Verfügung.

Diese Ausführungen und auch die dargestellten Beispiele zeigen, dass der TLS zukunftsweisend für die Ingenieurgeodäsie ist. Er ist kein Allheilmittel und löst nicht jede beliebige Aufgabe – Tachymeter, Nivellier und GNSS verlieren nicht ihre Daseinsgrundlage. Er bietet aber die Chance, die ansonsten ohne die Ingenieurgeodäsie stattfindende Digitalisierung der Welt mitzustalten.

Literatur

- Bae, K., Lichten, D. (2007): On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 36, 14–19.
- Besl, P. J., McKay, M. D. (1992): A method for registration of 3-D shapes. *IEEE T. Pattern. Anal.*, 14 (2), 239–256.
- Böhler, W., Bordas Vicent, M., Marbs, A. (2003): Investigating Laser Scanner Accuracy, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 34 (5/C15), 696–701.
- Bureick, J., Neuner, H., Harmening, C., Neumann, I. (2016): Curve and Surface Approximation of 3D Point Clouds. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 11–12/2016, 315–327.

- Clemen, C., Manthe, C. (2015): TLS für das Building Information Modeling (BIM) – Das BIM-Pilotprojekt Erneuerung Hbf Hannover. In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015), DVW-Schriftenreihe, Band 81, Augsburg.
- Deumlich, F., Staiger, R. (2001): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Dutescu, E., Heunecke, O., Krack, K. (2009): Formbestimmung bei Radioteleskopen mittels Terrestrischem Laserscanning. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 6/2009, 239–245.
- Eschelbach, C., Haas, R. (2003): The IVS-reference point at Onsala – high end solution for a real 3D-determination. Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, 109–118.
- Gojcic, Z., Zhou, C., Wieser, A. (2018): Learned compact local feature descriptor for TLS-based geodetic monitoring of natural outdoor scenes. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-2, 113–120.
- Heinz, E., Holst, C., Kuhlmann, H. (2019): Zum Einfluss der räumlichen Auflösung und verschiedener Qualitätsstufen auf die Modellierungsgenauigkeit einer Ebene beim terrestrischen Laserscanning. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 1-2/2019, 3–12.
- Heinz, E., Mettenleiter, M., Kuhlmann, H., Holst, C. (2018): Strategy for determining the stochastic distance characteristics of the 2D laser scanner Z+F Profiler 9012A with special focus on the close range. *Sensors*, 18 (7), 2253.
- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., Neuner, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. 2. Auflage, Wichmann, Heidelberg.
- Holst, C. (2015): Analyse der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 760, München 2015, ISBN 978-3-7696-5172-0.
- Holst, C., Jurek, T., Blome, M., Marschel, L., Petersen, M., Kersten, T.P., Mechelke, K., Lindstaedt, M., Wehmann, W., Wunderlich, T., Wasmeier, P., Wiedemann, W., Kern, F., Kuhlmann, H. (2018): Empirische Ergebnisse von TLS-Prüffeldern: Gibt es Auffälligkeiten?. In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018), DVW-Schriftenreihe, Band 93, Augsburg, 9–40. <https://geodaeis.info/sr/terrestrisches-laserscanning-2018-tls-2018/7933/1951>.
- Holst, C., Kuhlmann, H. (2016): Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. *J. Appl. Geodesy*, 10 (1), 17–25.
- Holst, C., Kuhlmann, H. (2018): Bestimmung der Verformung und Stabilität von Radioteleskopen mit terrestrischem Laserscanning. In: *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018*, Hrsg: Luhmann, T., Schumacher, C., Wichmann Verlag, Berlin.
- Holst, C., Medić, T., Kuhlmann, H. (2018): Dealing with systematic laser scanner errors due to misalignment at area-based deformation analyses. *J. Appl. Geodesy*, 12 (2), 169–185.
- Holst, C., Neuner, H., Wieser, A., Wunderlich, T., Kuhlmann, H. (2016): Calibration of Terrestrial Laser Scanners. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 6/2016, 147–157.
- Holst, C., Nothnagel, A., Blome, M., Becker, P., Eichborn, M., Kuhlmann, H. (2015): Improved area-based deformation analysis of a radio telescope's main reflector based on terrestrial laser scanning. *J. Appl. Geodesy*, 9 (1), 1–14.
- Holst, C., Nothnagel, A., Haas, R., Kuhlmann, H. (2019): Investigating the gravitational stability of a radio telescope's reference point using a terrestrial laser scanner: Case study at the Onsala Space Observatory 20-m radio telescope. *ISPRS J. Photogramm.*, 149, 67–76.
- Holst, C., Schmitz, B., Schraven, A., Kuhlmann, H. (2017): Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? Eine Fallstudie anhand von Laserscans einer Holzplatte und einer Staumauer. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 2/2017, 98–110.
- Holst, C., Schunck, D., Nothnagel, A., Haas, R., Wennerbäck, L., Olofsson, H., Hammargren, R., Kuhlmann, H. (2017): Terrestrial laser scanner two-face measurements for analyzing the elevation-dependent deformation of the Onsala Space Observatory 20-m radio telescope's main reflector in a bundle adjustment. *Sensors*, 17 (8), 1833.
- Holst, C., Zeimetz, P., Nothnagel, A., Schauerte, W., Kuhlmann, H. (2012): Estimation of focal length variations of a 100-m radio telescope's main reflector by laser scanner measurements. *J. Surv. Eng.*, 138 (3), 126–135.
- Janßen, J., Holst, C., Kuhlmann, H. (2019): Zielzeichenbasierte Registrierung von Laserscans: Erhöhung der Genauigkeit durch Algorithmus und Zielzeichendesign. In: *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019*, Hrsg: Luhmann, T., Schumacher, C., Wichmann Verlag, Berlin.
- Jurek, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2017): Impact of spatial correlations on the surface estimation based on terrestrial laser scanning. *J. Appl. Geodesy*, 11 (3), 143–155.
- Kauker, S., Harmening, C., Neuner, H., Schwieger, V. (2017): Modellierung und Auswirkung von Korrelationen bei der Schätzung von Deformationsparametern beim terrestrischen Laserscanning. In: *ingenieurvermessung 17, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*, 321–336, Wichmann, Heidelberg.
- Kauker, S., Holst, C., Schwieger, V., Kuhlmann, H., Schön, S. (2016): Spatio-Temporal Correlations of Terrestrial Laser Scanning. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 6/2016, 170–182.
- Kuhlmann, H., Holst, C. (2016): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning: Messtechnik, flächenhafte Modellierungen und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings. In: Freedon, W., Rummel, R. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie: 5 Bände*, Springer, Berlin Heidelberg, 1–46.
- Kuhlmann, H., Klingbeil, L. (2016): Mobile Multisensorsysteme. In: Freedon, W., Rummel, R. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie: 5 Bände*, Springer Berlin Heidelberg, 1–36. DOI: 10.1007/978-3-662-46900-2_20-1.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z), *ISPRS J. Photogramm.*, 82, 10–26.
- Leica Geosystems (2015): Leica Nova TS60 Datenblatt. www.leica-geosystems.com, letzter Zugriff: 08.02.2019.
- Leica Geosystems (2017): Leica ScanStation P50. Weil jedes Detail zählt. www.leica-geosystems.com, letzter Zugriff: 08.02.2019.
- Leica Geosystems (2018): Leica RTC360 3D Reality Capture Solution. Fast. Agile. Precise. www.leica-geosystems.com, letzter Zugriff: 08.02.2019.
- Lienhart, W., Ehrhart, M., Grick, M. (2017): High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations. *J. Appl. Geodesy*, 11 (1), 1–8.
- Lösler, M., Lossing, T., Neidhardt, A., Lehmann, R. (2014): Untersuchung zur automatisierten Bestimmung des IVS-Referenzpunktes am TWIN Radioteleskop Wettzell. *ingenieurvermessung 14: Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich*, 14.–17. Januar 2014, Wichmann Verlag, Berlin, 335–346.
- Luhmann, T. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie. 4. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Medić, T., Holst, C., Kuhlmann, H. (2017): Towards System Calibration of Panoramic Laser Scanners from a Single Station. *Sensors*, 17 (5), 1145.
- Medić, T., Holst, C., Janßen, J., Kuhlmann, H. (2019a): Empirical stochastic model of detected target centroids: Influence on registration and calibration of terrestrial laser scanners. *J. Appl. Geodesy*, accepted for publication.
- Medić, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2019b): Automatic in-situ self-calibration of a panoramic TLS from a single station using 2D key-points. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Geospatial Week 2019*, 10–14 Juni, Enschede, accepted for publication.
- Muralikrishnan, B., Ferrucci, M., Sawyer, D., Gerner, G., Lee, V., Blackburn, C., Phillips, S., Petrov, P., Yakovlev, Y., Astrelin, A., Milligan, S., Palmateer, J. (2015): Volumetric performance evaluation of a laser scanner based on geometric error model. *Precis. Eng.* 40, 139–150.

- Neitzel, F., Gordon, B., Wujanz, D. (2014): Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). DVW-Merkblatt 7-2014. www.dvw.de/merkblatt, letzter Zugriff 10/2018.
- Neuner, H., Holst, C., Kuhlmann, H. (2016): Overview on Current Modeling Strategies of Point Clouds for Deformation Analysis. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 11-12/2016, 328–339.
- Nothnagel, A., Holst, C., Haas, R. (2019): A VLBI delay model for gravitational deformations of the Onsala 20 m radio telescope and the impact on its global coordinates. *J. Geod.*, under review.
- Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T. (2011): Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: DVW e.V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge*. DVW-Schriftenreihe, Band 66, Augsburg, 147–157.
- Rüeger, J. M. (1996): Electronic distance measurement—an introduction. 4. Auflage, Springer, Heidelberg/Berlin.
- Sarti, P., Vittuari, L., Abbondanza, C. (2009a): Laser Scanner and Terrestrial Surveying Applied to Gravitational Deformation Monitoring of Large VLBI Telescopes' Primary Reflector. *J. Surv. Eng.*, 135 (4), 136–148.
- Sarti, P., Abbondanza, C., Vittuari, L. (2009b): Gravity-dependent signal path variation in a large VLBI telescope modelled with a combination of surveying methods. *J. Geod.*, 83 (11), 1115–1126.
- Sarti, P., Abbondanza, C., Petrov, L., Negusini, M. (2011): Height bias and scale effect induced by antenna gravitational deformations in geodetic VLBI data analysis. *J. Geod.*, 85 (1), 1–8.
- Schill, F. J. (2018): Überwachung von Tragwerken mit Profilscannern. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 820, München 2018, ISBN 978-3-7696-5231-4.
- Schmitz, B., Holst, C., Medić, T., Lichti, D. D., Kuhlmann, H. (2019a): How to effectively determine the range precision of 3D terrestrial laser scanners? Sensors, accepted for publication.
- Schmitz, B., Kuhlmann, H., Holst, C. (2019b): Investigating the resolution capability of terrestrial laser scanners and its impact on the stochastic model of the point cloud. In preparation.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., Teunissen, P. (2011): Scanning geometry: influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS J. Photogramm.*, 66, 389–399.
- Sovers, O. J., Fanselow, J. L., Jacobs, C. S. (1998): Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results. *Rev. Mod. Phys.*, 70 (4), 1393–1454.
- Staiger, R. (2009): Push the Button – or Does the »Art of Measurement« Still Exist? Proceedings of the FIG Working Week, Eilat, Israel, May 2009.
- Ullrich, A., Fürst, C. (2017): Vollautomatischer Ansatz für die Onboard-Datenregistrierung im terrestrischen Laserscanning. In: DVW e.V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017)*. DVW-Schriftenreihe, Band 88, Augsburg, 145–153. <https://geodaeisie.info/sr/terrestrisches-laserscanning-2017-tls-2017/7109/1950>.
- Wiedemann, W., Wagner, A., Wunderlich, T. (2017): Ableitung von 3D-Verschiebungsvektoren aus fusionierten Laserscan- und Bilddaten. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 11-12/2017, 362–369.
- Witte, B., Sparla, P. (2015): *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. 8. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Wujanz, D. (2016): *Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 775, München 2016, ISBN 978-3-7696-5172-0.
- Wujanz, D., Burger, M., Mettenleiter, M., Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. *ISPRS J. Photogramm.* 125, 146–155.
- Wujanz, D., Burger, M., Tschirschitz, M., Nietzschmann, T., Neitzel, F., Kersten, T. P. (2018): Determination of Intensity-Based Stochastic Models for Terrestrial Laser Scanners Utilising 3D-Point Clouds. 18 (7), 2187.
- Wujanz, D., Gielsdorf, F., Romanschek, E., Clemen, C. (2019): Ebenenbasiertes Baufortschrittsmonitoring unter Verwendung von terrestrischen Laserscans. In: *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019*, Hrsg.: Luhmann, T., Schumacher, C., Wichmann Verlag, Berlin.
- Wujanz, D., Holst, C., Neitzel, F., Kuhlmann, H., Niemeier, W., Schwieger, V. (2016): Survey Configuration for Terrestrial Laser Scanning. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 6/2016, 158–169.
- Wujanz, D., Schaller, S., Gielsdorf, F., Gründig, L. (2018): Ebenenbasierte Registrierung von mehreren Tausend Laserscans. In: DVW e.V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018)*. DVW-Schriftenreihe, Band 93, Augsburg, 95–108. <https://geodaeisie.info/sr/terrestrisches-laserscanning-2018-tls-2018/7933/1951>.
- Wunderlich, T., Niemeier, W., Wujanz, D., Holst, C., Neitzel, F., Kuhlmann, H. (2016): Areal Deformation Analysis from TLS Point Clouds – The Challenge. *avn – allgemeine vermessungs-nachrichten*, 11-12/2016, 340–351.
- Wunderlich, T., Wasmeier, P., Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T., Reidl, F. (2013): Objektivierung von Spezifikationen Terrestrischer Laser-scanner – Ein Beitrag des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München. Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, Heft 20, 02/2013.
- Zámečníková, M., Neuner, H. (2018): Methods for quantification of systematic distance deviations under incidence angle with scanning total stations. *ISPRS J. Photogramm.*, 144, 268–284.
- Zámečníková, M., Wieser, A., Woschitz, H., Ressl, C. (2014): Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning. *J. Appl. Geodesy*, 8 (4), 311–326.
- Zimmermann, F., Holst, C., Klingbeil, L., Kuhlmann, H. (2018): Accurate georeferencing of TLS point clouds with short GNSS observation durations even under challenging measurement conditions. *J. Appl. Geodesy*, 12 (4), 289–301.
- Zoller + Fröhlich (2018): *Z+F Imager 5016* Datenblatt, bezogen über info@zf-laser.co.
- Zoller + Fröhlich (2019): www.zf-laser.com/Blue-Workflow.3dscanning.0.html, letzter Zugriff: 08.02.2019.

Kontakt

Dr.-Ing. Christoph Holst
 Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation
 Nußallee 17, 53115 Bonn
 c.holst@igg.uni-bonn.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaeisie.info.