

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“
Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie“

Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS 2019)

Beiträge zum 184. DVW-Seminar am
2. und 3. Dezember 2019 in Fulda



Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“
Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie“

Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS 2019)

Beiträge zum 184. DVW-Seminar am
2. und 3. Dezember 2019 in Fulda

Redaktion:
Jens-André Paffenholz

Herausgeber:
DVW e.V. – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement



Schriftenreihe des DVW
Band 96
Wißner-Verlag

Herausgeber:
DVW e. V. – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 96

Tipps zur Navigation in der PDF-Datei:

Die PDF enthält zur Navigation Lesezeichen und Hyperlinks.
Der Mausklick auf ein Lesezeichen führt zur ersten Seite des ausgewählten Beitrags.
Der Mausklick auf einen dunkelblau markierten Abbildungs- oder Tabellenverweis im Text führt zur verknüpften Abbildung oder Tabelle. Zurück zur ursprünglichen Stelle im Text gelangt man mit dem Klick auf den dunkelblau markierten Verweis in der Abbildungsunterschrift oder Tabellenüberschrift.
Internetadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.
Kostenfreier PDF-Download unter www.geodaesie.info.

Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):
Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS 2019). DVW-Schriftenreihe,
Band 96, Augsburg, 2019, S. x–y.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-95786-231-0
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2019
www.geodaesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: Johannes Bureick, Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlags.

Inhalt

Vorwort	5
---------	---

Session 1: TLS und BIM

Andreas Wieser Jens-André Paffenholz Ingo Neumann Sensoren, Features und Physik – Zum aktuellen Stand der Entwicklung bei Laserscannern	9
---	---

Christian Clemen AIA, BAP & Co – Ändert sich die 3D-Bestandsdokumentation wegen der BIM-Methode?	23
--	----

Shahzad Sayyad Kai Tamms 3D-Punktwolken und BIM – Praxisbeispiele von der Erfassung bis zum Modell	35
--	----

Session 2: Laserscanning mit Multi-Sensor-Plattformen

Christian Hesse Karsten Holste Ingo Neumann 3D HydroMapper, ein innovatives Über- und Unterwasserscansystem zur Bauwerksinspektion	53
--	----

Johannes Bureick Sören Vogel Ingo Neumann Dmitri Diener Hamza Alkhatib Geo-Referenzierung von Unmanned Aerial Systems über Laserscannermessungen und 3D-Gebäudemodelle	63
--	----

Susanne Lipkowski Markus Mettenleiter Terrestrische Laserscanner – Im Fokus der Genauigkeit	75
--	----

Christoph Holst Tomislav Medić Martin Blome Heiner Kuhlmann TLS-Kalibrierung: in-situ und/oder a priori?	89
---	----

Session 3: 3D-Punktwolke und dann?

Nikolaus Studnicka | Christoph Effkemann
Vollautomatische TLS-Datenregistrierung in der Praxis –
Vermessung eines Parkhauses in Fulda _____ 107

Joscha Hüge | Kay-Michael Nichelmann | Christoph Crause
Modellierung aus 3D-Punktwolken bei Infrastruktur- und
Anlagenbauprojekten _____ 119

Daniela Lorenzcat | Eric Bergholz
Aufnahme- und Auswertestrategien für das Laserscanning von
komplexer technischer Gebäudeausstattung _____ 133

Session 4: Aktuelle Projekte und Anwendungsfelder

Tobias Dobers
Baubegleitendes Laserscanning zur Qualitätskontrolle von
Industrieanlagen beim CERN _____ 145

Peter Wintjens | Daniel Wujanz | Ralf Lichtenberger | Frank Gielsdorf
Hochgenaues Laserscanning in industriellen Anwendungen _____ 153

Thorsten Strübing | Wolfgang Lochner
3D-Vermessung unzugänglicher Hohlräume und Schächte im
Salzbergwerk Berchtesgaden _____ 163

Clara Lehmann | Stephan Och
Messsystem NavVis Trolley M6 – Praxisbericht vom Ingenieurbüro
für Vermessungswesen _____ 175

Vorwort

Das terrestrische Laserscanning (TLS) als voll etabliertes Messverfahren besitzt ein enormes Leistungsspektrum und eröffnet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten sowohl innerhalb der klassischen Berufsfelder der Geodäsie als auch in angrenzenden Bereichen.

Mit dem diesjährigen DVW-Seminar soll ein weiterer Beitrag zur Information und Diskussion des technologischen Potenzials, der Anwendungs- und Geschäftsfelder sowie der konkreten projektbezogenen Lösungen, die häufig im interdisziplinären Umfeld realisiert werden, geleistet werden.

Die erste Session „*TLS und BIM*“ startet mit einem Beitrag zum aktuellen Stand der Entwicklung bei Laserscannern hinsichtlich Sensoren, Features und Physik. Hieran schließen sich zwei Vorträge aus dem Themenfeld BIM an. Zum einen wird es um die Frage gehen, ob sich die 3D-Bestandsdokumentation wegen der BIM-Methode ändert und zum anderen wird anhand von Praxisbeispielen die Kette von der Erfassung bis zum Modell aufgezeigt.

Die zweite Session „*Laserscanning mit Multi-Sensor-Plattformen*“ beginnt mit der spannenden Thematik der Bauwerksinspektion mittels eines Über- und Unterwasserscansystems. Der zweite Beitrag zeigt die Geo-Referenzierung von Unmanned Aerial Systems über Laserscannermessungen und 3D-Gebäudemodelle. Im dritten Beitrag steht der terrestrische Laserscanner im Fokus der Genauigkeit. Der abschließende vierte Beitrag widmet sich der Thematik der TLS-Kalibrierung.

„*3D-Punktwolke und dann?*“ Um die Beantwortung dieser Frage geht es in Session 3. Zu Beginn wird die vollautomatische TLS-Datenregistrierung in der Praxis thematisiert. Im zweiten Beitrag steht die Modellierung aus 3D-Punktwolken bei Infrastruktur- und Anlagenbauprojekten im Fokus. Der abschließende Vortrag beschäftigt sich mit Aufnahme- und Auswertestrategien für das Laserscanning von komplexer technischer Gebäudeausstattung.

„*Aktuelle Projekte und Anwendungsfelder*“ werden in Session 4 besprochen. Den Anfang macht das baubegleitende Laserscanning zur Qualitätskontrolle von Industrieanlagen beim CERN. Der zweite Vortrag geht in das Themenfeld des hochgenauen Laserscanning in industriellen Anwendungen. Die 3D-Vermessung unzugänglicher Hohlräume und Schächte im Salzbergwerk Berchtesgaden entführt die Teilnehmer im dritten Beitrag unter Tage. Den Abschluss bildet ein Praxisbericht vom Ingenieurbüro für Vermessungswesen über das Messsystem NavVis Trolley M6.

Die Zielgruppe des Seminars sind die Kolleginnen und Kollegen in der Praxis, Forschung oder Ausbildung aus den Bereichen der Geodäsie, der Geoinfor-

mation und aus Nachbardisziplinen, die sich über dieses hochaktuelle Teilgebiet der elektrooptischen Messtechnik umfassend und unabhängig von Anbietern informieren möchten.

Die Organisatoren und die DVW-Arbeitskreise 3 „Messmethoden und Systeme“ sowie 4 „Ingenieurgeodäsie“ freuen sich darauf, mit Ihnen in Fulda Anregungen und Gedanken zu diesem weiterhin zukunftsorientierten, innovativen Thema auszutauschen. Ein besonderer Dank geht an alle Autorinnen und Autoren, die durch ihre sorgfältig ausgearbeiteten schriftlichen Beiträge die Entstehung dieses Tagungsbandes möglich gemacht haben.

Ingo Neumann
Leibniz Universität Hannover,
Geodätisches Institut

Jens-André Paffenholz
Technische Universität Clausthal,
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen

Session 1: TLS und BIM

Sensoren, Features und Physik – Zum aktuellen Stand der Entwicklung bei Laserscannern

Andreas Wieser | Jens-André Paffenholz | Ingo Neumann

1 Einleitung

Seit der Markteinführung der ersten terrestrischen Laserscanner vor etwas über 20 Jahren wurde die zugrunde liegende Technologie rasant weiterentwickelt. Die Instrumente haben einen sehr hohen Reifegrad erreicht, sind außerordentlich leistungsfähig, einfach zu bedienen und vielseitig einsetzbar. Das zugrunde liegende Messprinzip hat sich seit den ersten Laserscannern jedoch nicht geändert: ein Laserstrahl wird für rasch aufeinanderfolgende reflektorlose Distanzmessungen um zwei Achsen kontrolliert und weitgehend kontinuierlich abgelenkt. Aus dieser aktiven Messung in monostatischer Konfiguration (also ohne Basislinie)

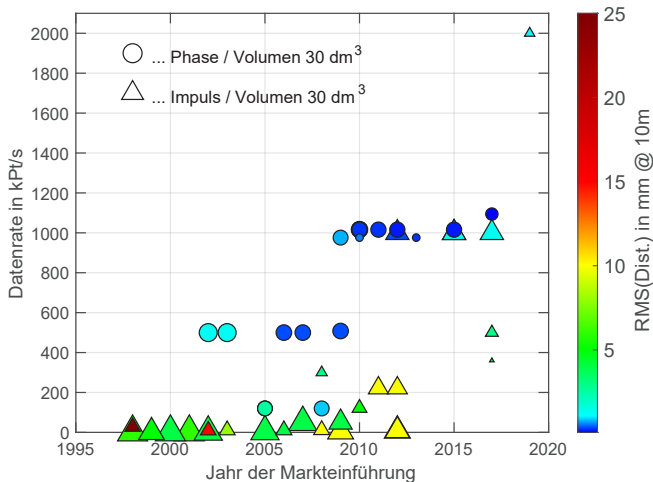


Abb. 1: Entwicklung ausgewählter Parameter von Laserscannern über die Zeit (repräsentative, aber nicht vollständige Auswahl von Laserscannern (5 Hersteller), Symbolgröße proportional Größe des Laserscanners (Volumen), Farbe zeigt spezifiziertes Distanzmessrauschen in 10 m Entfernung; alle Werte aus Datenblättern).

ergibt sich eine 3D-Punktwolke mit Intensitätsinformation, die die sichtbaren Oberflächen in der Umgebung des Laserscanners repräsentiert.

Von anfänglichen Datenraten um 1000 Punkte pro Sekunde hat die Entwicklung jeweils innerhalb weniger Jahre auf 0,5 Millionen, dann 1 Million und mittlerweile 2 Millionen Punkte pro Sekunde geführt (siehe [Abb. 1](#)), wobei hohe Scangeschwindigkeiten und geringes Messrauschen bis vor etwa sieben Jahren Laserscannern vorbehalten waren, die die Distanz mittels Phasenvergleichsverfahren messen. Diese Laserscanner erreichen darüber hinaus seit Jahren im Nahbereich (und auf geeignete Oberflächen) ein Distanzmessrauschen von wenigen 0,1 mm. Mittlerweile haben Laserscanner, die das Impulsverfahren nutzen, bezüglich der maximalen Datenrate aber praktisch gleichgezogen (ein Laserscanner mit einer Variante des Impulsverfahrens ist sogar der schnellste Laserscanner in [Abb. 1](#)), übertreffen in der Regel die phasenbasierten Laserscanner deutlich an Reichweite, und erzielen ein Messrauschen, das zwar nominal etwas über dem der phasenbasierten Laserscanner liegt, für viele praktische Anwendungen aber völlig ausreicht, zumal die Unsicherheit der Punkte in der 3D-Punktwolke in der Regel nur zu einem geringen Teil dem Distanzmessrauschen geschuldet ist. Es versteht sich fast von selbst, dass die Laserscanner über die Zeit auch leichter und kleiner geworden sind (siehe [Abb. 1](#)), sowie mittlerweile fast durchgängig Laserklasse 1 zuzuordnen sind und damit ohne besondere Vorkehrungen in der Praxis eingesetzt werden können.

Für eine detaillierte Beschreibung der Laserscannerentwicklung, sowie weiterführende Informationen zu Scantechnologie, Auswerteverfahren und Anwendungen wird auf Shan und Toth (2018) verwiesen. Eine gute allgemeine Einführung in die Thematik findet sich bei Vosselman und Maas (2010), und für einen kompakten, deutschsprachigen Überblick über Laserscannerarchitekturen und Auswerteverfahren, mit Schwerpunkt auf flächenhafter Überwachungsmessung, verweisen wir auf Kuhlmann und Holst (2017). Im vorliegenden Beitrag soll ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand der Entwicklungen, vor allem hinsichtlich der Sensoren und ihrer Features gegeben werden, und über physikalische Limitationen, die dazu führen, dass es für einen Großteil der Anwendungen nicht sinnvoll oder möglich erscheint, die Messpräzision, Reichweite, oder Scangeschwindigkeit ähnlich rasant weiterzuentwickeln, wie in der Vergangenheit.

2 Strahldivergenz und Footprint

Der Messwert bei der reflektorlosen Distanzmessung mit Hilfe eines Laserstrahls bezieht sich auf den ganzen „Footprint“, d. h. die vom Laserstrahl ausgeleuchtete Fläche am Objekt, nicht auf einen einzigen Punkt. Dies folgt aus der räumlichen

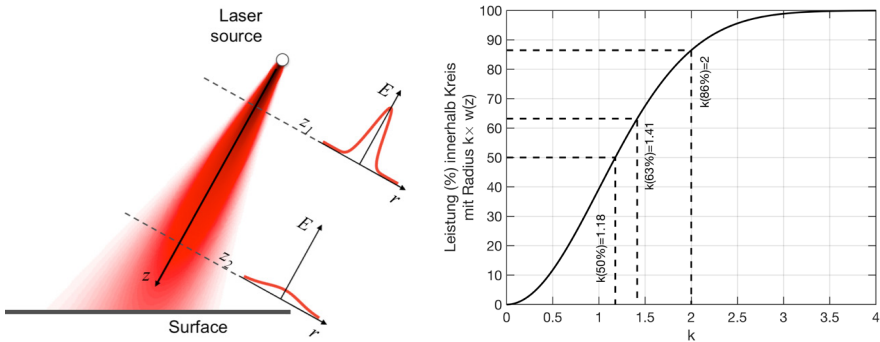


Abb. 2: Gauß-Strahl – Verteilung der Bestrahlungsstärke (schematisch, links); Strahlungsleistung innerhalb eines Kreises mit Radius $k \times w(z)$ um die Mitte (vgl. auch Gl. (1) und (2)).

Ausdehnung des Laserstrahls, dessen Beleuchtungsstärke E (in W/m^2) mit der Entfernung vom Instrument und der Entfernung von der Mitte des Strahls abnimmt (siehe Abb. 2, links).

Wenn die Distanzunterschiede innerhalb des Footprints klein sind, kann der Messwert genähert als gewichtetes Mittel aller Distanzen innerhalb des Footprints interpretiert werden; das Gewicht hängt dabei in erster Linie von der Beleuchtungsstärke und der Reflektanz des reflektierenden Materials ab. Stark reflektierende Flächen nahe der Strahlmitte tragen also mehr zum Messwert bei, als schwach reflektierende Flächen weiter außen. Gibt es innerhalb des Footprints starke Unterschiede der Reflektanz und – im Verhältnis zum Auflösungsvermögen der EDM-Komponente – große Distanzunterschiede, so können

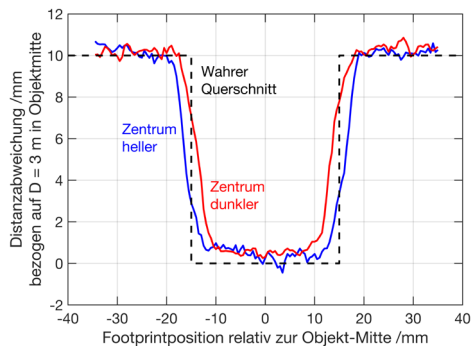
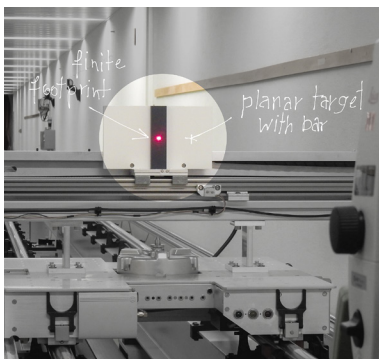


Abb. 3: Reflektorlose EDM-Messung (Leica TS60) auf Ziel mit rechteckigem Querschnitt und unterschiedlicher Reflektanz (Zentrum 30 mm breit, 10 mm näher am Instrument; Situation links für „Zentrum dunkler“).

beträchtliche Distanzabweichungen gegenüber der Entfernung in Strahlmitte auftreten (siehe Abb. 3).

Das bedeutet einerseits mögliche grobe Abweichungen, wenn der Footprint Kanten enthält bzw. der Laserstrahl Objekte in unterschiedlicher Entfernung zugleich beleuchtet (Mixed-Pixel-Effekte). Andererseits bedeutet es aber auch, dass die Oberflächenrauigkeit oder -topographie innerhalb der Footprintgröße bei der Abschätzung der Messunsicherheiten von Laserscans miteinbezogen werden muss. In aller Regel kann das (spezifizierte) Genauigkeitspotenzial des Laserscanners nur beim Erfassen homogener, weitgehend glatter, diffus reflektierender Oberflächen erreicht werden; andernfalls muss mit Abweichungen in Größenordnung der Oberflächenrauigkeit gerechnet werden. Es ist daher praxisrelevant, die Größe des Footprints zu kennen. Leider sind die Angaben in den Datenblättern der Laserscanner, soweit überhaupt enthalten, häufig schwer zu interpretieren und schwer zu vergleichen.

Die Ursache liegt darin, dass der Laserstrahl – und damit der Footprint – nicht scharf begrenzt ist. Ein etabliertes und für Abschätzungen ausreichend genaues Modell der Beleuchtungsstärke im Laserstrahl ist der sogenannte Gauß-Strahl, siehe z. B. Marshall (1985). Demnach nimmt E bei gegebener Entfernung z von der Strahlmitte (i. d. R. nahe am Instrument) mit dem radialen Abstand r von der Strahlmitte entsprechend einer Gauß'schen Glockenkurve ab (siehe Gl. (1)). Der Formparameter $w(z)$ in dieser Gleichung hat die Funktion eines Strahlradius. Er hängt seinerseits ebenfalls von der Entfernung ab, darüber hinaus von der Wellenlänge λ und dem Tailenradius w_0 (siehe Gl. (2)).

$$E(r, z) = E_0(z) \frac{w_0^2}{w(z)^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2w(z)^2}\right) \quad (1)$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\lambda z / 4\pi w_0^2\right)^2} \quad (2)$$

Durch Differenzieren kann daraus der zugehörige Divergenzwinkel θ_{hw} berechnet werden (Gl. (3)). Er beschreibt, wie der Strahlradius mit der Entfernung zunimmt:

$$\theta_{hw} = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{dw}{dz} = \frac{\lambda}{4\pi w_0} \quad (3)$$

Man kann nun zeigen, dass bei diesem Gauß-Strahl nur etwa 39 % der Strahlungsleistung innerhalb eines Kreises mit Radius $w(z)$ liegen; dieser Radius eignet sich also nicht gut als praxisrelevante Größe für den Strahl oder den

Footprint. **Abb. 2** (rechts) zeigt, welcher Prozentsatz der Leistung innerhalb eines Kreises mit Radius $k \times w(z)$ liegt; der Prozentsatz wird nach Marshall (1985) wie folgt berechnet:

$$P_l(k) = 1 - \exp\left(-k^2/2\right). \quad (4)$$

Es erscheint nun sinnvoll, den Strahldurchmesser eines Laserscanners so zu definieren, dass die Leistung außerhalb für die Messung im Allgemeinen vernachlässigbar ist. Dafür gibt es keinen klar definierten Schwellwert (der Einfluss hängt ja auch von der Reflektanz der Objekte ab). Die Instrumentenhersteller benutzen daher unterschiedliche Definitionen. Gängig sind vor allem die Angaben als „Full Width Half Power“ (FWHP), wobei 50 % der Energie innerhalb des spezifizierten Strahls liegen, als „ $1/e^2$ “ (ca. 86 % innerhalb) oder als „ $1/e$ “ (ca. 63 % innerhalb). Die betreffenden Durchmesser ergeben sich aus $w(z)$ durch Multiplikation mit einem Faktor, der von der Definition abhängt (siehe **Tab. 1**, 3. Spalte). Dieselben Faktoren müssen auch benutzt werden, um die Strahldivergenz θ_{hw} auf die Divergenz des Durchmessers bezüglich der jeweils gewählten Definition umzurechnen. Je nach gewählter Definition können die Zahlenwerte, die in der Spezifikation des Instruments den Strahldurchmesser beschreiben, sich demnach bei physikalisch gleichem Strahl um bis zu 70 % voneinander unterscheiden (letzte Spalte). Darüber hinaus finden sich in manchen Spezifikationen überhaupt keine Angaben, wie „Strahldurchmesser“ oder „Divergenz“ zu verstehen sind.

Tab. 1: Gängige Definitionen der Strahlparameter in Scannerdatenblättern

PI	k	D	D($1/e^2$) : D(PI)
50 %	1,18	$2,36 \times w(z)$	1.7
$1-1/e = 63 \%$	1,41	$2,82 \times w(z)$	1.4
$1-1/e^2 = 86 \%$	2,00	$4,00 \times w(z)$	1

Abb. 4 visualisiert die Schwierigkeit, die der Praktiker bei der Abschätzung des Strahldurchmessers hat. Für drei derzeit aktuelle Laserscanner verschiedener Hersteller zeigen die gestrichelten Linien den Strahldurchmesser am bzw. nahe dem Instrument (Wert bei $z = 0$) und die in der Spezifikation angegebene Strahldivergenz (Anstieg der gestrichelten Linien). Die durchgezogenen Linien zeigen dagegen den Strahldurchmesser jeweils auf die für viele praktische Anwendungen wohl sinnvollste Definition ($1/e^2$) bezogen und sie werden damit vergleichbar gemacht. Wenngleich die gestrichelten Linien nicht korrekt die Interpretation von Strahldurchmesser und Divergenz widerspiegeln,

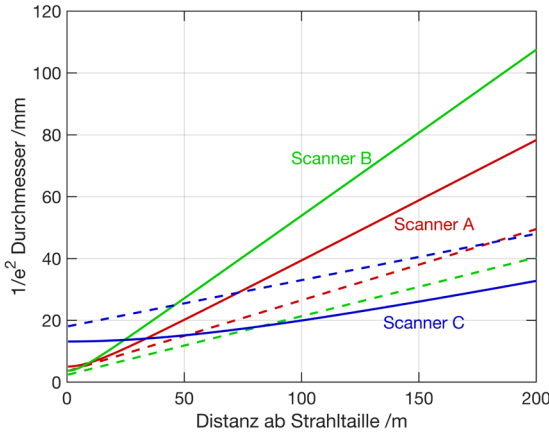


Abb. 4: Strahldurchmesser in Abhängigkeit von der Distanz für drei reale Laserscanner (durchgezogen: approximiert für 86 % Strahlungsleistung ($1/e^2$) aus Spezifikation; gestrichelt: Durchmesser und Strahldivergenz laut Spezifikation ohne Berücksichtigung der Definition).

entsprechen sie doch dem, was man ohne detaillierte Auseinandersetzung mit der oben umrissenen Theorie auf Basis der Spezifikationen abschätzen könnte.

Die Abb. 4 zeigt klar, dass kleine Zahlenwerte für Divergenz oder Strahldurchmesser nicht tatsächlich auch einen kleineren realen Strahldurchmesser bedeuten müssen. Darüber hinaus zeigen Sie, in Übereinstimmung mit Gl. (3) auch, dass die Instrumentenhersteller beim Design des Instruments einen Kompromiss hinsichtlich Strahldurchmesser eingehen müssen: entweder wird der Strahl stark fokussiert, sodass er in einer bestimmten Distanz besonders schlank ist (günstig für die Messgenauigkeit in dieser Distanz), oder er wird so konzipiert, dass sich der Durchmesser nur geringfügig mit der Distanz ändert. Vor allem, für Scans über größere Entfernungsbereiche dürfte Letzteres in der Praxis vorteilhaft sein.

3 Refraktion

Die Messungen eines Laserscanners, also Richtung und Laufzeit optischer Signale, werden von der Atmosphäre in dreierlei Weise beeinflusst: Extinktion führt zur entfernungsabhängigen Abschwächung, die Dichte der Luft bestimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit, und räumliche Dichteveriationen führen zur Signalausbreitung entlang eines gekrümmten Strahls. Alle diese Effekte und, soweit möglich, ihre Korrektur sind in der Geodäsie unter dem Überbegriff Refraktion seit langem bekannt, siehe z.B. Brunner (1984). Im Zusammenhang mit dem terrestrischen Laserscanning (TLS) haben sie bisher wenig Beachtung gefunden. Das liegt vor allem daran, dass sie im Vergleich zu anderen Ursachen für Messunsicherheiten von Laserscannern geringe Auswirkungen haben, vor

allem bei kurzen Entfernungen (z. B. < 100 m). Angesichts der Verfügbarkeit von Laserscannern mit Reichweiten von mehreren Kilometern oder mit spezifiziertem Messrauschen von wenigen Zehntel Millimetern ist es jedoch angebracht, die Refraktionseinflüsse beim TLS zu bedenken und unter Umständen zu berücksichtigen. Friedli et al. (2019) haben zum Beispiel gezeigt, dass bereits unmittelbar nacheinander aufgenommene 3D-Punktwolken einer alpinen Hangrutschung refraktionsbedingte Scheindeformationen von mehreren Dezimetern aufweisen können.

Extinktion erhöht das Messrauschen und limitiert, vor allem bei schlechten Sichtbedingungen, die Reichweite von Messungen des Laserscanners. Dies stellt in der Regel nur bei besonderen Anwendungen ein Problem dar (z. B. beim Monitoring über größere Entfernungen und mit einzuhaltenden Messzeitpunkten) und wird hier nicht weiter beleuchtet.

Alle Distanzmessverfahren, die in aktuellen Laserscannern eingesetzt werden, beruhen auf der Messung der Laufzeit (direkt beim Impulsverfahren und seinen Varianten, indirekt beim Phasenvergleichsverfahren). Zur Umrechnung in eine Distanz wird der Mittelwert des Brechungsindex entlang des gesamten Signalwegs benötigt, siehe z. B. Rüeger (1990). Bei geodätischen Netzmessungen wird großer Aufwand betrieben, um diesen mit der nötigen Genauigkeit, z. B. anhand der Formeln von Ciddor und Hill (1999), zu approximieren und die gemessenen Distanzen meteorologisch zu korrigieren. Dagegen bieten derzeit nur sehr wenige Laserscanner überhaupt die Möglichkeit, aktuelle atmosphärische Parameter für die Korrektur von Distanzmessungen zu verwenden, und den Manuals ist in der Regel nicht zu entnehmen, ob bzw. welche meteorologischen Korrekturen die Software automatisch anbringt.

Werden die Laufzeiten mit einem festen Wert des Brechungsindex in Distanzen umgerechnet, so weisen die vom Laserscanner ermittelten Distanzen Maßstabsabweichungen auf, die direkt von den Unterschieden zwischen den jeweils aktuellen meteorologischen Bedingungen und jenen Werten abhängen, die dem festen Brechungsindex zugrunde liegen. Die Tab. 2 zeigt, wie groß diese Maßstabsabweichungen in der Praxis sein können. Demnach ergibt sich die größte Unsicherheit durch den Luftdruck; sie kann bereits bei Entfernungen von 100 m Abweichungen von 4 mm verursachen. Auch Temperaturabweichungen sind relevant. Die übrigen Einflüsse (insbesondere Luftfeuchtigkeit, CO_2 -Gehalt) sind in der Regel vernachlässigbar.

Je nach Zweck der 3D-Punktwolke, Leistungsfähigkeit des Laserscanners, und Beschaffenheit der gescannten Oberflächen, können diese Geschwindigkeitseffekte häufig vernachlässigt werden – im Allgemeinen dürften sie bei wenigen Millimetern pro 100 m liegen und damit unkritisch sein. Darüber hinaus ist es möglich, dass die Laserscanner automatisch Korrekturen auf Basis eingebauter Temperatur- und Drucksensoren anbringen, sodass nur noch die

Tab. 2: Einfluss der atmosphärischen Parameter auf die Distanzmessung

Parameter	Einfluss/ppm	Annahmen
Temperatur (T)	± 20	T liegt zwischen -5 und $+35$ °C, Instrument rechnet mit 15 °C
Luftdruck (p)	± 40	p variiert am Ort um bis zu 40 hPa (Wetter/Jahreszeit), Scan erfolgt zwischen 0 und 2000 m über dem Meeresspiegel, Instrument rechnet mit Normdruck für 1000 m
Relative Luftfeuchtigkeit (u)	$\pm 0,2 - 1$	T liegt zwischen -5 und $+35$ °C, Instrument rechnet mit $u = 50$ %, tatsächlich ist u aber zwischen 0 und 100 %

Unterschiede zwischen den Parametern im Instrument und denen im Objekt-raum eine Rolle spielen. Wenn jedoch unter Ausnutzung der hohen Redundanz und mittels filternder Verfahren (z. B. anpassen geometrischer Primitive an Teile der 3D-Punktwolken) der Einfluss zufälliger Abweichungen reduziert wird, können diese Refraktionseffekte relevante Genauigkeitslimitationen darstellen. Eine Korrektur, während der Messung oder im Post-Processing, ist derzeit mit Standardsoftware nur bei wenigen Instrumenten möglich.

Größeren Einfluss als die unsichere Ausbreitungsgeschwindigkeit kann bei Laserscannern die Krümmung des Strahls haben (siehe Abb. 5), die sich aufgrund der Änderung des Brechungsindex quer zur Strahlrichtung ergibt (vgl. Brunner 1984, Rieger 1990, Friedli et al. 2019). Da sowohl Luftdruck als auch Temperatur in erster Linie einen vertikalen Gradienten aufweisen, ergibt sich beim TLS insbesondere eine Krümmung des Strahls in vertikaler Richtung. Der Laserscanner registriert den Winkel ζ'_i , unter dem der Strahl das Instrument verlässt bzw. erreicht. Aufgrund der Strahlkrümmung trifft der Strahl die Oberfläche aber nicht in Richtung dieser Geraden sondern in Richtung einer um δ'_i (Refraktionswinkel) verschwenkten Geraden. Die Distanzmessung liefert (nach der meteorologischen Korrektur) die Länge ρ'_i des gekrümmten Signalwegs, die genau genug (sub-mm) mit der Länge ρ_i der Sehne übereinstimmt. Der Punkt, dessen Koordinaten aus der Winkel- und Distanzmessung berechnet werden, kann aufgrund der Strahlkrümmung erheblich von der Stelle abweichen, an der der Laserstrahl tatsächlich reflektiert wurde.

Die Abb. 5 (rechts) zeigt die mögliche Größenordnung dieser Abweichung für einen nahezu horizontalen Strahl in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten (der Druckgradient wurde konstant mit $0,1$ hPa/m angenommen). Während der Effekt in der freien Normatmosphäre (z. B. weit vom Boden entfernt, Temperaturgradient -6 K/km) für die meisten TLS-Anwendungen vernachlässigbar sein

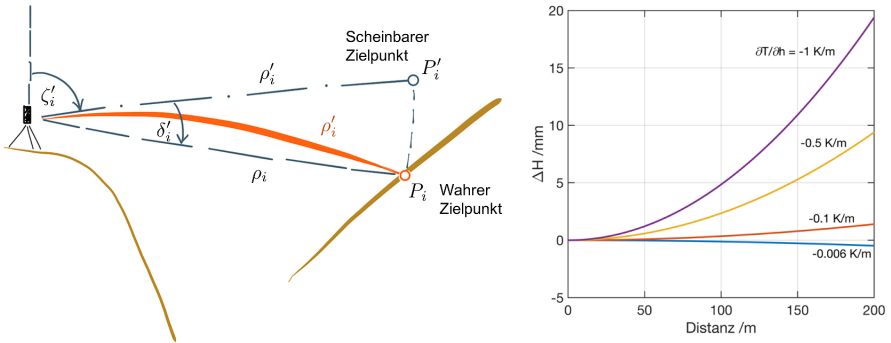


Abb. 5: Auswirkung der refraktionsbedingten Strahlkrümmung auf die Punktabweichung; Situation (links), Abweichung $\overline{P_i P'_i}$ bei annähernd horizontalem Strahl ($\zeta'_i \approx 90^\circ$)

dürfte, kann er an sonnigen Tagen in Bodennähe (Strahl verläuft wenige Meter über dem Boden, Betrag des Temperaturgradienten 0,1 K/m oder mehr) bereits bei 100 m Entfernung einige Millimeter erreichen. Außerdem wächst der Effekt schlimmstenfalls quadratisch mit der Entfernung (abhängig von der Topographie).

Mit Ausnahme von Punkten, bei denen die Intensitätswerte auch für die Messung verwendet werden (z. B. Zielzeichenerfassung für die Georeferenzierung) ist nicht der Unterschied zwischen wahren und scheinbarem Reflexionspunkt an sich kritisch, sondern der Abstand des scheinbaren Punktes von der wahren Oberfläche orthogonal zu dieser (im Falle einer Flächenanpassung an die 3D-Punktwolke) oder in Richtung des scheinbaren, geradlinigen Strahlverlaufs (im Falle einer Auswertung von Distanzbildern). Je nach Neigung der reflektierenden Oberfläche gegenüber dem Messstrahl kann der Effekt daher vernachlässigbar (wenn die Oberfläche etwa orthogonal zum Strahl ist), oder aber gegenüber dem in Abb. 5 (rechts) ausgewiesenen Höhenversatz $\overline{P_i P'_i}$ sogar vergrößert sein. Eine Korrektur dieses Effekts ist mit den derzeit verfügbaren Messmethoden nicht möglich. Es empfiehlt sich, abzuschätzen, ob der Effekt relevant ist, und im gegebenen Fall entweder die Auswertemethodik anzupassen, oder die Messzeitpunkte so zu wählen, dass die Refraktion im gesamten gescannten Bereich möglichst homogen ist (z. B. Messungen in der Nacht oder bei Bewölkung).

4 Der Scanner als Multi-Sensor-System

Aktuelle terrestrische Laserscanner sind Multi-Sensor-Systeme (MSS). Den Kern bilden die EDM-Komponente zur linearen Distanzmessung und die Einrichtungen zur Messung bzw. Ableitung der Winkel um die primäre und sekundäre

Rotationsachse. Da es nicht möglich ist, die instrumentellen Abweichungen etwa durch Zwei-Lagen-Messung direkt zu kompensieren, müssen alle relevanten instrumentellen Abweichungen mathematisch korrigiert werden. Das wird durch Laserscannerkalibrierung erreicht, siehe z. B. Wang et al. (2017) und Holst et al. (2016).

Viele aktuelle Laserscannermodelle haben eine Kamera zur Erfassung von RGB-Panoramabildern, mit deren Hilfe die 3D-Punktwolken eingefärbt werden können. Zunehmend verfügen die Laserscanner sogar über mehrere Kameras, wodurch der Bildaufnahmeprozess beschleunigt oder die Aufnahme von Zusatzinformation (z. B. Wärmestrahlung) möglich wird. Schließlich verfügen die meisten modernen Laserscanner über Sensoren zur Unterstützung geräteinterner Korrekturen (z. B. Temperatursensoren) und zur Unterstützung der Registrierung oder Georeferenzierung: z. B. Neigungsmesser, Altimeter, GNSS, Magnetfeldsensoren, und teilweise sogar eine klassische oder kameragestützte Inertialmesseinheit (IMU), mit deren Hilfe die Bewegung des Laserscanners zwischen den Standpunkten erfasst wird.

5 On-board-Software und Features

Auffällige Innovationen in den vergangenen Jahren betreffen in vielen Fällen die On-board-Software, die die Laserscanner besonders einfach zu bedienen macht, die Datenqualität verbessern hilft, und teilweise die Datenauswertung bzw. -aufbereitung, bereits während des Scannens bzw. des Transports von einem Standpunkt zum nächsten am Laserscanner, durchführt.

In diesem Zusammenhang ist der Trend zur Registrierung der Daten direkt am Instrument zu nennen, der einerseits durch Zusatzsensorik ermöglicht wird (IMU, Kameras, etc.), andererseits durch deutlich höhere Rechenleistung oder sogar getrennte Prozessoren für Messung und Datenauswertung im Hintergrund. Auch Möglichkeiten zur Fernsteuerung der Laserscanner, zur Live-Datenübertragung (z. B. auf ein drahtlos kommunizierendes Tablet) oder zur direkten Kommunikation mit einem Cloud-Server finden sich zunehmend bei Laserscannern verschiedener Hersteller. Und schließlich ist erkennbar, dass die Hersteller Zusatzfunktionalität entwickeln, die vor allem für bestimmte Anwendungsbereiche bzw. Märkte attraktiv sind: z. B. automatisierte Funktionstests bzw. Bestimmung bestimmter Korrekturparameter, Mehrfachscan zur Elimination bewegter Objekte in der Szene, Bildaufnahme während des Scans, Feinscannen ausgewählter Bereiche der Szene, oder Freie Stationierung über Zielzeichen.

6 Kinematisches Laserscanning

Terrestrische Laserscanner, wie bis hierher beschrieben, sind primär dafür konzipiert, statisch eingesetzt zu werden (also während der Messung stationär) und statische Szenen zu erfassen. Sie verfügen in der Regel aber über die nötigen instrumentellen Voraussetzungen, um auch für kinematisches Laserscanning eingesetzt zu werden, welches in bestimmten Fällen eine besonders effiziente Datenerfassung ermöglicht. Nach Kutterer et al. (2009) versteht man darunter zwei Messstrategien, die jeweils eine zeitabhängige, bewegungsbezogene Komponente haben:

1. Die objektbezogene Kinematik beschreibt die Messstrategie, bei der sich das Objekt während der Messungen mit einem statischen Laserscanner räumlich bewegt. Dies führt insbesondere zum punktwolkenbasierten Monitoring sich bewegender bzw. deformierender Objekte, vergleichbar mit dem klassischen geodätischen Monitoring bis hin zur Deformationsanalyse. Einen Einstieg in die Thematik der flächenhaften Deformationsanalyse geben u. a. Holst et al. (2017). Sie wird hier nicht weiter ausgeführt.
2. Die sensorbezogene Kinematik beschreibt die Messstrategie, bei der sich der Laserscanner auf einer mobilen Plattform bezüglich des statisch betrachteten Objektes während der Erfassung bewegt. Hierbei wird vom Laserscanner in der Regel lediglich eine 2D-Profilmessung durchgeführt, so dass sich die 3D-Punktwolke aus der Bewegung der mobilen Plattform mit dem Laserscanner im Raum ergibt. Essenziell für diese Messstrategie, auch als mobile Laserscanning oder mobile Mapping bezeichnet, ist die fortlaufende Bestimmung der Position und Orientierung der mobilen Plattform. Die Bestimmung der Trajektorie erfolgt durch zusätzliche Positions- und Navigationssensoren (referenzierende Sensoren) und erfordert darüber hinaus eine entsprechende Synchronisation der einzelnen Sensordaten zur korrekten Georeferenzierung der mobilen Plattform. Weiterhin muss die relative Position und Orientierung der referenzierenden Sensoren bezüglich des Laserscanners bekannt sein, so dass eine 3D-Punktwolke des kinematisch erfassten statischen Objektes berechnet werden kann. Es ergibt sich ein MSS aus dem objekterfassenden Sensor, hier dem Laserscanner, und den referenzierenden Sensoren, hier Positions- und Navigationssensoren. Oftmals verschwimmen die klaren Grenzen zwischen der Objekterfassung und Georeferenzierung immer mehr, da auch die erfassenden Sensoren mit zur Georeferenzierung bzw. Registrierung beitragen. Für eine detaillierte Diskussion der Thematik wird beispielsweise auf Neitzel und Neumann (2012) sowie Kuhlmann und Klingbeil (2016) verwiesen.

Das kinematische Laserscanning mit sensorbezogener Kinematik ist ein besonders effizientes Vorgehen zur Erfassung von großräumigen, verteilten und

langgestreckten Objekten, wie zum Beispiel Straßen- und Schienennetzen, in kürzester Zeit. Nahezu alle großen Hersteller von Laserscannern bieten eine Möglichkeit der Integration ihrer Laserscanner in ein MSS (vgl. hierzu die Webseiten der Hersteller).

Projektbeispiele für das MSS-basierte kinematische Laserscanning zeigen unter anderem: Keller (2016), der sich mit einem MSS zum kinematischen Laserscanning innerhalb von Gebäuden auseinandersetzt; Hesse et al. (2019), die ein Scansystem zur Bauwerksinspektion über und unter Wasser vorstellen; Bureick et al. (2019), die sich der Georeferenzierung von Unmanned Aerial Systems über Laserscannermessungen und 3D-Gebäudemodelle widmen. Einen guten Einstieg in die Thematik gibt auch Kutterer (2010).

7 Zusammenfassung und Ausblick

Terrestrische Laserscanner haben inzwischen einen hohen instrumentellen Reifegrad erreicht. Es ist zu erwarten, dass die weitere Entwicklung hinsichtlich Messrauschen, Messgeschwindigkeit und Reichweite abflacht. Dies einerseits, weil die weitere Verbesserung hinsichtlich dieser Parameter zunehmend schwierig ist und diese Parameter miteinander gekoppelt sind (eine größere Reichweite geht wegen der Signallaufzeit im Allgemeinen mit einer geringeren Datenrate und wegen der abnehmenden Leistung der empfangenen Signale mit einer Zunahme des Messrauschens einher; eine höhere Datenrate mit einer geringeren Empfangsleistung pro Punkt und damit einem höheren Messrauschen). Andererseits ist ein Abflachen, vor allem im High-End-Bereich auch zu erwarten, weil der praktische Nutzen größerer Reichweiten (wegen Refraktion und Größe des Footprints) sowie geringeren Messrauschens (wegen der Unsicherheitsbeiträge von Oberflächeninhomogenitäten, Refraktion, Laserscannerkalibrierung, Registrierung etc.) eingeschränkt ist. Soweit es durch neue instrumentelle Lösungen gelingt, die Datenrate bei etwa gleichbleibender Datenqualität und Reichweite zu steigern, ist das für den Markt aber sehr wohl interessant und zu erwarten, dass die Hersteller daran arbeiten.

Interessante Entwicklungen dürfen besonders hinsichtlich weiterer Funktionalität (z. B. stärkere Integration der Bildinformationen, mitgelieferte Qualitätsinformation zu den Daten, oder weitere Reduktion des Post-Processing-Aufwands) erwartet werden. Darüber hinaus versprechen neue Messansätze, wie etwa hyperspektrales TLS (z. B. Hakal et al. 2012, Salido-Monzù und Wieser 2018) das Potenzial, 3D-Punktwolken mit zusätzlicher Information über die angemessenen Objekte bzw. Materialien anzureichern, und es ist zu erwarten, dass solche Ansätze in zukünftigen Laserscannern zu finden sein werden.

Literatur

- Brunner, F.K. (Hrsg.) (1984): Geodetic Refraction. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 216 S.
- Bureick, J., Vogel, S., Neumann, I., Diener, D., Alkhatib, H. (2019): Geo-Referenzierung von Unmanned Aerial Systems über Laserscannermessungen und 3D-Gebäudemodelle. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS 2019). DVW-Schriftenreihe, Band 96, Augsburg, (Dieser Tagungsband).
- Ciddor, P.E., Hill, R.J. (1999): Refractive index of air, *Applied Optics* 38: 1663–1667.
- Friedli, E., Presl, R., Wieser, A. (2019): Influence of atmospheric refraction on terrestrial laser scanning at long range. In: Proc.: 4th Joint Intl. Symp. On Deformation Monitoring (JISDM), 15.–17. Mai, Athen.
- Hakala, T., Suomalainen, J., Kaasalainen, S., Chen, Y. (2012): Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning, *Opt. Express* 20, 7119–7127.
- Hesse, C., Holste, K., Neumann, I. (2019): 3D HydroMapper, ein innovatives Über- und Unterwasserscansystem zur Bauwerksinspektion. In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS 2019). DVW-Schriftenreihe, Band 96, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Holst, C., Neuner, H., Wieser, A., Wunderlich, T., Kuhlmann, H. (2016): Calibration of Terrestrial Laser Scanners. *AVN* 123, 147–157.
- 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 Stauwand. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 2/2017, 142. Jg., 98–110. DOI: [10.12902/zfv-0158-2017](https://doi.org/10.12902/zfv-0158-2017).
- Keller, F.: Entwicklung eines forschungsorientierten Multi-Sensor-Systems zum kinematischen Laserscanning innerhalb von Gebäuden. Dissertation. Shaker Verlag GmbH.
- Kuhlmann, H., Holst, C. (2017): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. In: Schwarz, W. (Hrsg.): *Ingenieurgeodäsie*. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 167–212.
- Kuhlmann, H., Klingbeil, L. (2016): Mobile Multisensorsysteme. In: Freeden, W., Rummel, R. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1–36.
- Kutterer, H. (2010): Mobile mapping. In: Vosselman, G., Maas, H.-G. (Ed.): *Airborne and terrestrial laser scanning*. Dunbeath: Whittles Publishing, 293–311.
- Kutterer, H., Paffenholz, J.-A., Vennegeerts, H. (2009): Kinematisches terrestrisches Laserscanning. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 2/2009, 134. Jg., 79–87.
- Marshall, G. (1985): Gaussian Laser Beam Diameters. In: Marshall, G. (Ed.): *Laser Beam Scanning*, Marcel Dekker, New York, 289–301.
- Neitzel, F., Neumann, I. (2013): Scanning in Motion – Kinematisches TLS mittels mobiler Plattformen. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2013 (TLS 2013)*. DVW-Schriftenreihe, Band 72, Augsburg, 89–106.
- Rüeger, J.M. (1990): *Electronic Distance Measurement*. 3. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, 266 S.

- Salido-Monzú, D., Wieser, A. (2018): Simultaneous distance measurement at multiple wavelengths using the intermode beats from a femtosecond laser coherent supercontinuum. *Opt. Eng.* 57. DOI: [10.1117/1.OE.57.4.044107](https://doi.org/10.1117/1.OE.57.4.044107).
- Shan, J., Toth, C. (2018): *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. 2. Aufl., Taylor and Francis, 638 S.
- Vosselman, G., Maas, H.-G. (2010): *Airborne and Terrestrial Laserscanning*. Whittles Publishing. 336 S.
- Wang, L., Muralikrishnan, B., Rachakonda, P., Sawyer, D. (2017): Determining geometric error model parameters of a terrestrial laser scanner through two-face, length-consistency, and network methods. *Measurement Science and Technology* 28. DOI: [10.1088/1361-6501/aa6929](https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa6929).

Kontakt

Andreas Wieser
ETH Zürich
Stefano-Franscini-Platz 5, 8093 Zürich, Schweiz
andreas.wieser@geod.baug.ethz.ch

Jens-André Paffenholz
Technische Universität Clausthal, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen
Erzstraße 18, 38678 Clausthal-Zellerfeld
jens-andre.paffenholz@tu-clausthal.de

Ingo Neumann
Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
neumann@gih.uni-hannover.de

AIA, BAP & Co – Ändert sich die 3D-Bestandsdokumentation wegen der BIM-Methode?

Christian Clemen

1 Einleitung und Motivation

Dieser Beitrag versucht, die BIM-spezifischen Anforderungen gegen die traditionelle Bestandsmodellierung mit CAD abzugrenzen. Da das Building Information Modeling (BIM) das integrierte, kollaborative und modellbasierte Arbeiten unterstützen soll, ist ein gegenseitiges Verständnis von Informationsbesteller (Planung) und Informationslieferanten (Vermessung) unbedingt erforderlich. Wenn es um das Informationsmanagement geht, fallen in letzter Zeit häufig die Begriffe „Auftraggeber-Informationen-Anforderungen“ (AIA) und BIM-Projektabwicklungsplan (BAP). Im Rahmen der AIA sind relevante Ziele und Anwendungen vom Auftraggeber beschrieben. Der BAP regelt die Vorgehensweise zur Erreichung der projektbezogenen Ziele aus den AIA. Gewöhnungsbedürftig ist in der aktuellen BIM-Richtlinienreihe des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI 2552, Blatt 1 bis Blatt 8) der Begriff „Bestandsmodell“. Dieser bezeichnet den Planungszustand eines Gebäudes. Das ingenieurgeodätische „As is“ Modell wird aus Sicht der Planung der Gruppe „Grundlagenmodelle“ zugeordnet, weil es die Grundlage für die weitere Planung bildet.

Es ist für die Ingenieurgeodäsie also wichtig zu verstehen, welche Form, Inhalt und Struktur die Auftraggeber-Informationen-Anforderungen (AIA) und BIM-Abwicklungspläne (BAP) für BIM-Projekte aufweisen können. Ein häufig in den AIA formuliertes Ziel ist die strategische Ausrichtung des Informationsmanagements am langfristigen „Lebenszyklus“ der Datennutzung. Idealerweise – aber praktisch schwer realisierbar – sollen die Daten zum Bauwerk über alle Leistungsphasen (Planen, Bauen, Betreiben) einheitlich und medienbruchfrei in einer gemeinsamen Datenumgebung (engl. common data environment, CDE) genutzt werden. Insbesondere sollen schon in einer frühen Planungsphase die Informationsanforderungen für den Betrieb des Bauwerkes berücksichtigt werden. Die gemeinsame Datenumgebung muss dabei nicht notwendiger Weise eine monolithische Datenbank sein, sondern kann aus verteilten, aber verknüpften Informationsquellen bestehen. Im Bauwesen werden diese verteilten Informationsquellen sehr generisch „Informationscontainer“ genannt, um deren Abgeschlossenheit und damit identifizierbare Verantwortlichkeit zu betonen.

Für die ingenieurgeodätische Vermessung, Modellierung und Qualitätssicherung stellt sich die Frage, wie (sehr große) Punktwolken, semantische und objektstrukturierte 3D-Modelle sowie Bauteilbibliotheken in der gemeinsamen Datenumgebung verwaltet und genutzt werden. Wenn es um Haftung und Eigentum im Kontext der BIM-Methode geht, stellt sich die Frage, was der rechtliche Begriff „Funktionaler Mangel von Vermessungsleistungen“ bedeutet. Hier bestehen derzeit große Sorgen, wenn das Ingenieurbüro das Grundlagenmodell, mit der in BIM üblichen hohen (bautechnischen) Detaillierung, umfangreichen Bauteil-Attributierung und („intelligente“) Volumenmodelle mit parametrischer Modellierung liefert. Trotz aller Sorgen sollte aus berufspolitischer Sicht der derzeitige Paradigmenwechsel des Bauwesens genutzt werden, um die ingenieurgeodätischen Leistungen, zum Beispiel in BIM-Projekten, die zukünftig nach ISO19650 zertifiziert werden, explizit zu benennen, mit Qualitätsmodellen zu versehen und in die Standardprozesse des Informationsmanagements für das Planen, Bauen und Betreiben von Bauwerken zu integrieren.

2 BIM-Gesamtprozess nach ISO 19650¹

Der internationale Standard ISO19650-1 definiert Konzepte und Prinzipien für das Informationsmanagement von Geschäftsprozessen des Bauwesens (engl. built environment sector), die nach der BIM-Methode organisiert sind. Der Standard ist eingebettet in die allgemeinen, bauunabhängigen Standards zur Qualitätssicherung (siehe [Abb. 1](#)). Die Norm ISO19650-2 legt spezifische Anforderungen an das Informationsmanagement entlang der Leistungsphasen eines Projektes (engl. delivery phase) fest.

Nach ISO19650 gründet das prozessintegrierte Informationsmanagement nach der BIM-Methode auf der Festlegung der Informationsaustauschs-Anforderungen, Planung der Informationslieferung und der tatsächlichen Lieferung der Information zu einem „gebauten Vermögenswert“ (engl. built asset). Die Lieferung der Information erfolgt in „strukturierten Informationscontainern“ (Modelle, Tabellen, Datenbanken) oder „unstrukturierten Informationscontainern“ (Datenblätter, Fotos, ...) die gemeinsam das „Informationsmodell“ bilden. Der Begriff Informationsmodell ist dabei etwas kritisch, weil im Kontext der Softwareentwicklung das „Informationsmodell“ die konzeptionelle Ebene, nicht die eigentliche Dokumenteninstanz adressiert. Der Standard unterscheidet die Informationsaustausch-Anforderungen des Informationsbestellers zwischen

¹ Dieser Abschnitt entspricht Clemen, C.: Standards für die Qualitätssicherung mit der BIM-Methode. In: DVW e. V. (Hrsg.): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2019. DVW-Schriftenreihe, Band 95, Augsburg, 2019, S. 47 ff.

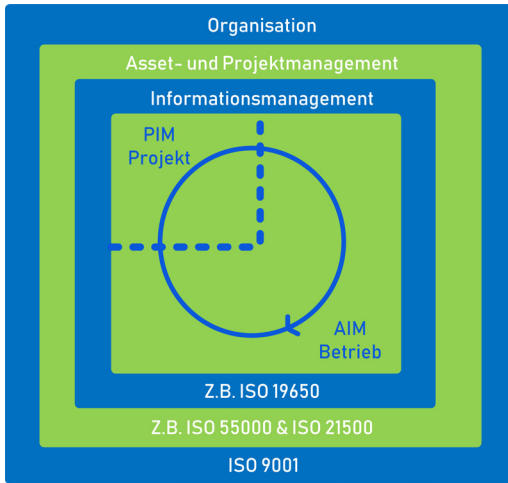


Abb. 1: Informationsmanagement mit dem Asset Information Model (AIM) und Projekt-Informationsmodell (PIM) entlang des Lebenszyklus der Bauwerksinformation nach ISO 19650-1

den strategischen (OIR) und projektspezifischen (PIR) Anforderungen (siehe Abb. 2). Zwischen Informationsbesteller und -lieferant werden die bestandsbezogenen AIR bzw. projektbezogenen EIR in den Auftraggeber-Information-Anforderungen (AIA) vereinbart, die die tatsächliche Informationslieferung, das Informationsmodell, spezifizieren.

Die ISO 19650 ist sehr umstritten, weil Sie eher für Projekte angewendet werden kann, die durch einen großen Auftraggeber und Generalunternehmer abgewickelt werden. Für mittlere und kleine Projekte und Projektpartner können jeweils nur Teilaspekte umgesetzt werden.

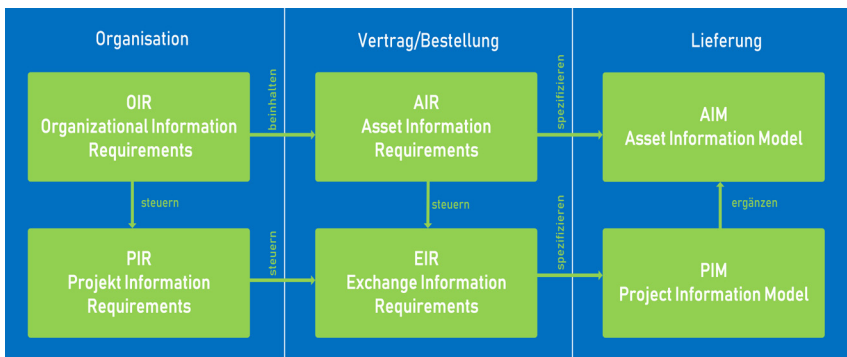


Abb. 2: Hierarchie der unterschiedlichen Informationsaustausch-Anforderungen

3 Das ingenieurgeodätische Grundlagenmodell

Eine ingenieurgeodätische Erfassung und Modellierung der vorhandenen Bausubstanz, der umgebenen Topographie und weiterer Geobasisdaten (Gelände, Topographie, Liegenschaften) in Form der Entwurfsvermessung oder planungsbegleitenden Vermessung bildet die Grundlage für die digitale Planung. Das Grundlagenmodell muss aktuell, vollständig, zuverlässig, ausreichend detailliert und informationstechnisch integriert sein.

3.1 Messtechnische Datenerfassung für BIM

Die Sensortechnik und ingenieurgeodätische Rohdaten sind agnostisch gegenüber der BIM-Methode – auch wenn „die Punktwolke“ häufig in einem Atemzug mit BIM genannt wird. Allerdings müssen bei der Messdatenerfassung, die die geometrische Digitalisierungsreferenz für die Modellierung liefert, einige Besonderheiten berücksichtigt werden. Diese Besonderheiten sollten passend zu BIM-Terminologie und Technologie beschrieben und zwischen Informationsbesteller und -lieferanten vereinbart werden.

Die *geometrische Auflösung* ist für Messung und Modell zu unterscheiden. Für die reine Datenerfassung kann die Messgenauigkeit nach DIN 18710-Ingenieurvermessung angegeben und vertraglich vereinbart werden. Zusätzlich sollte nachgewiesen werden, dass die Messgenauigkeit und geometrische Auflösung den angestrebten geometrischen Detaillierungsgrad des Modells auch tatsächlich unterstützen.

Neben der *Dokumentation der Aufnahme* (Beobachtungstopologie in Bezug zum Bauwerk) sind bereits bei der Datenerfassung vor Ort die *Typologie der Bauteile* (z. B.: Fenstertyp, Türtyp, usw.) sowie Sachattribute (Raumnummer, Bodenbelag, ...) zu erfassen. Wiederkehrende Bauteile erhalten eine Typbezeichnung und/oder Typidentifikation, damit sie bei der Modellierung in der Bauteilbibliothek verwaltet werden können.

Alle BIM-Teilmodelle müssen in ein gemeinsames, georeferenziertes oder lokales *Koordinatensystem* transformiert werden können. Das ist originäre geodätische Expertise. Die AIA legen den Zeitpunkt und die Verantwortlichkeiten der Georeferenzierung fest. Die physikalische Realisierung eines Koordinatensystems erfolgt in Form von Vermessungspunkten oder GNSS-Diensten. Aufgrund der großen Bedeutung sollten zum Beispiel vermarktete Vermessungspunkte (im Außen- und Innenbereich) in das BIM-Grundlagenmodell aufgenommen werden, auch wenn weder BIM-Software noch herstellernerneutrale Austauschformate wie die Industry Foundation Classes (IFC) das Konzept „Vermessungspunkt“ auf semantischer Ebene unterstützen.

Die erfassten Messdaten, insbesondere Punktwolken, können einen erheblichen Datenübertragungs- und Speicherbedarf verursachen. Es muss unbedingt geklärt werden, ob und wie originäre ingenieurgeodätische Messdaten in der *Gemeinsamen Datenumgebung* (vgl. DIN SPEC 91391) verwaltet werden.

3.2 Ingenieurgeodätische Bauwerksmodellierung für BIM

3.2.1 Level of Accuracy (LOA)

Mit dem Level of Accuracy (LOA) Specification Guide des U.S. Institute of Building Documentation (USIBD 2016) hat sich ein Industriestandard etabliert, mit dem die Qualität der ingenieurgeodätischen Dienstleistungen „BIM-konforme 3D-Bestandsdokumentation auf Basis von 3D-Punktwolken“ im Hochbau beschrieben werden kann. Die Einteilung der Genauigkeitsklassen basiert auf der DIN 18710-1.

Der Standard ist explizit für die bauteilstrukturierte, 3D-BIM-Methode entwickelt worden und zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Getrennte Angabe von Mess- und Modellgenauigkeit (siehe [Abb. 3](#))
- Definition von Standardfällen (Normal, Denkmalpflege, Metrisch, Imperial)
- Unterschied zwischen relativer und absoluter Genauigkeit
- Qualitätsangaben für jeden Bauteiltypen unterschiedlich (Bauteilorientierung!)
- Angaben zur Kontrolle (Validierung)

Der Standard wird ergänzt durch eine datierbare Tabellenkalkulation, die die Spezifikationsmatrix des LOA anwendbar macht.

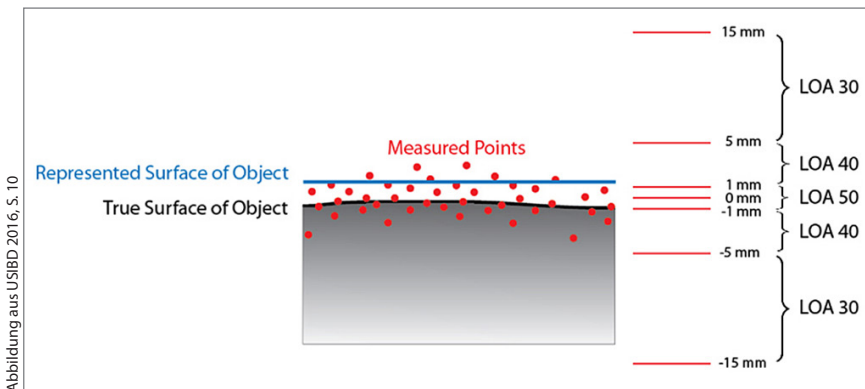


Abbildung aus USIBD 2016, S. 10

Abb. 3: LOA-Metrik zur Beschreibung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Auflösung der Messung (rot) und des Abstraktionsgrades des aus der Messung abgeleiteten Bauwerksmodells (blau).

3.2.2 Detaillierung des digitalen Bauwerksmodells (LOIN)²

Qualitätssicherung erfordert es, dass die relevanten Anforderungen an das Produkt (hier das digitale Bauwerksmodell) festgelegt werden. Die Kommunikation der Anforderungen an den Detaillierungsgrad des Bauwerksmodells führt in der Praxis regelmäßig zu Missverständnissen, weil die Fachgewerke unterschiedliche Begriffe verwenden oder weil nicht klar ist, was der Begriff „Detaillierung“ eigentlich genau bezeichnet. Gleichzeitig bieten BIM-Modelle enorme Möglichkeiten (3D-Visualisierung, intelligente Objekte, viele Sachdaten, automatisierte Analyse) und wecken damit sehr hohe Erwartungen beim Informationsbesteller, die das gelieferte Modell nicht immer voll erfüllen kann.

Eine europaeinheitliche Begrifflichkeit zur Beschreibung der „Level of Information Need (LOIN)“ wird derzeit in CEN/TC 442/WG 2/TG1 festgelegt/beschrieben/definiert/erklärt/, die voraussichtliche Nummer dieses Standards ist (DIN) EN 17412. Der Begriff „Level of Information Need“ wechselt die Perspektive: Spricht man derzeit noch vom Modelldetaillierungsgrad oder Modellfertigstellungsgrad als Eigenschaft des Modells, wird im Sinne der Qualitätssicherung die Erwartungshaltung (Need) des Informationsbestellers explizit in die Bezeichnung des Standards aufgenommen. Der Europäische Standard verzichtet bewusst auf eine Metrik (LOD100, LOD200, ...), um nicht mit den nationalen Standards zu konkurrieren. Stattdessen liefert der Standard eine Begriffsmatrix (Framework) für Beschreibung des Modelldetaillierungsgrades, die in [Abb. 4](#) schematisch dargestellt ist.

Der geometrische Detaillierungsgrad (LOG) wurde „vor BIM“ weitestgehend implizit über den Zeichnungsmaßstab festgelegt. Beim modellbasierten Arbeiten nach der BIM-Methode muss die „Detaillierung“, wie in Spalte LOG in [Abb. 4](#) dargestellt, vielschichtiger festgesetzt werden. Besonders die Fähigkeit, die geometrische Ausprägung eines Bauteils „intelligent“ aus Parametern zu berechnen, ist eine Kernfunktionalität von BIM-Software (vgl. z. B. Hausknecht und Liebich, S. 70). Die Übertragung dieser geometrischen Bauteilintelligenz von der Software des Informationsbereitstellers zur Software des Informationsbestellers stellt sich in der Praxis häufig als sehr schwierig dar und sollte nur dann vereinbart werden, wenn das erstellte Bauwerksmodell vom Informationsbesteller tatsächlich weiter geometrisch bearbeitet werden soll. Für den Zweck der Visualisierung oder Koordination ist die Anforderung „Parametrisches Verhalten“ nicht unbedingt erforderlich.

² Dieser Abschnitt entspricht Clemen, C.: Standards für die Qualitätssicherung mit der BIM-Methode. In: DVW e. V. (Hrsg.): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2019. DVW-Schriftenreihe, Band 95, Augsburg, 2019, S. 47 ff.

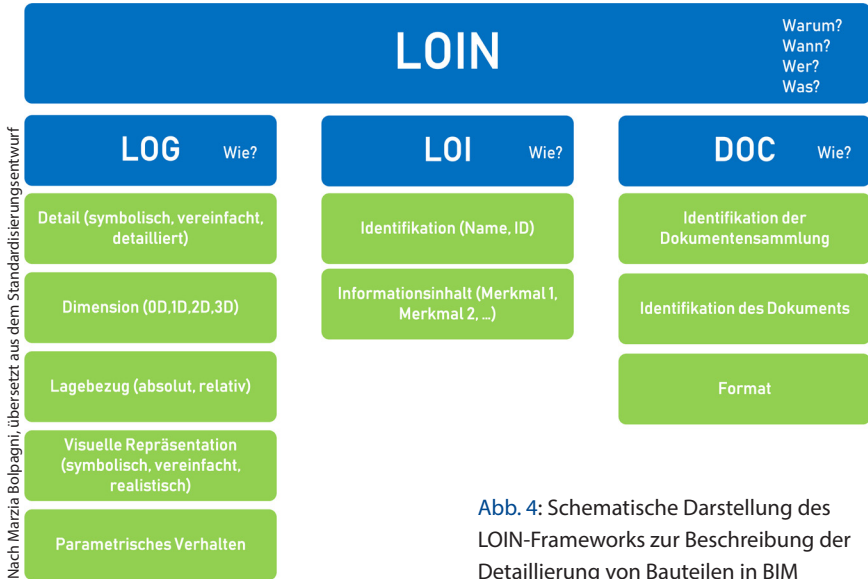


Abb. 4: Schematische Darstellung des LOIN-Frameworks zur Beschreibung der Detaillierung von Bauteilen in BIM

Darüber hinaus müssen die Art der Objektidentifikation (Name, ID) sowie die Art und Struktur der Objektklassifizierung und -attributierung mit dem „Level of Information“ (LOI) festgelegt werden. Die Erfassung und Übertragung von Sachdaten ist kein informationstechnisches Problem. Vielmehr ist es im BIM-Prozess vorgesehen, dass Bauteile sukzessiv mit zusätzlicher Information (Klassifizierung, Material, Baukosten, Termine, etc.) annotiert werden.

Was bedeutet LOI für die BIM-gerechte Bestandsdokumentation, die durch einen Geodäten erstellt wird? Die wesentliche Schwierigkeit ist, dass die Vielseitigkeit der Merkmale (des bestehenden Gebäudes) nicht von einem einzigen Fachingenieur erfasst werden können. Geodäten liefern das geometrisch präzise und bauteilstrukturierte Grundlagenmodell, das „BIM-Fachmodell Vermessung“. Dieses bildet den Kern der Informationsinfrastruktur der weiteren Planung, Bauausführung und Bewirtschaftung. Es muss deswegen genau vereinbart werden, welche Sachdaten (Attribute) von welchem Fachingenieur in das Bauwerksmodell eingepflegt werden. Hierfür sollten projektbezogen interdisziplinäre Teams gebildet, die dem geodätischen Grundlagenmodell zusätzliche Informationen (Baugrund, Tragwerk, Technische Anlagen, Bauphysik, FM, etc.) hinzufügen.

Der Level of Documentation (LOC) regelt den Grad der Detaillierung und den Umfang der (externen) Dokumente, die zusätzlich zum virtuellen Bauwerksmodell geliefert werden. Beispiele sind Raumbücher, Inventarlisten, schriftliche Gutachten, Datenblätter, Handbücher, Fotos oder Detailzeichnungen.

4 Auftraggeber-Informations-Anforderungen (AIA) und BIM-Abwicklungspläne (BAP)³

Die AIA sind Teil der Ausschreibungsunterlagen. Sie beschreiben Art und Struktur der Fachmodelle (Grundlagenmodell, Architekturmodell, TGA, ...) sowie deren Detailtiefen, eine grobe Zuordnung der Rollen und Aufgaben in Form von Verantwortlichkeitsmatrizen, Zeitpunkte der Informationslieferung und eine Liste der zu verwendenden Normen und Standards. Die Beschreibung des Formats umfasst z. B. die Datenaustauschformate mit Versionsnummer oder Namenskonventionen für Dateien und Bauteilklassen. Eine ausführliche Beschreibung des Inhaltes und der Struktur der AIA findet man zum Beispiel in VDI 2552 Blatt 1 (6.3) und VDI 2552 Blatt 10 (voraussichtlich ab 2020 verfügbar). In BMVI (2019) wurde im Rahmen des Forschungsprojekts Bim4Infra2020 ein allgemeiner Leitfaden und ein Muster für Auftraggeber-Informations-Anforderungen veröffentlicht.

Der Auftraggeber sollte in den AIA ausdrücklich Angaben zum Projektbasispunkt, zum Koordinatenreferenzsystem und zur Transformation zwischen amtlichen Geo- und Projektkoordinatensystem fordern bzw. festlegen. (vgl. BMVI 2019) Der Auftraggeber sollte in den AIA projektspezifische Angaben zur Notwendigkeit einer Bestandsdokumentation („as-is“-Grundlagenmodell) und abschließende Dokumentation der Bauleistung („as-built“) klarstellen.

Aus geodätischer Sicht ist es besonders wichtig, dass festgelegt wird, ob das zu liefernde Grundlagenmodell (Baubestand, Topographie) im Koordinationsmodell lediglich referenziert wird, oder ob/wie die aufgemessenen und modellierten Objekte von anderen BIM-Autoren geometrisch oder semantisch verändert/ergänzt werden. Daneben müssen Aktualität, Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Koordinatendimension (2D/3D), Objektdimension (Punkt, Linie, Fläche, Körper), Positionierung (relativ vs. absolut) und Art der Georeferenzierung in den AIAs festgelegt werden.

Der Auftraggeber sollte in den AIA die Rolle des Geodäten (Vermessungsingenieur/GIS-Experte) ausdrücklich nennen, besonders dann, wenn Geodaten aus unterschiedlichen Datenquellen (Amtliche Geobasisdaten, Unternehmensdaten, Vermessung) genutzt werden.

AIA und der BIM-Abwicklungsplan (BAP) sind zusätzliche Vertragsanlagen. Der BAP stellt den Fahrplan eines jeden BIM-Projekts bezüglich der Erstellung, Weitergabe und Verwaltung von Daten dar. Der Prozess zur Herstellung der geforderten Daten ist unter Festlegung aller dafür notwendigen Rollen,

³ Dieser Abschnitt entspricht größtenteils Clemen, Blankenbach, Becker: BIM – Management und Prozesse. In: DVW e. V. und Runder Tisch GIS e. V. (Hrsg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0. Buhl/München, 2019, S. 110 ff.

Funktionen, Abläufe, Schnittstellen, Interaktionen sowie der genutzten Technologien in einem BIM-Abwicklungsplan zu definieren (BMVI 2015b).

Die VDI 2552 unterscheidet zwischen dem BAP als Teil des Angebots (BAP-Entwurf), der vom Bieter angefertigt wird und dem „BAP nach Vergabe“, der unter der Verantwortung des Auftraggebers gemeinsam mit allen Projektbeteiligten angefertigt wird und sich kontinuierlich als „lebendes Dokument“

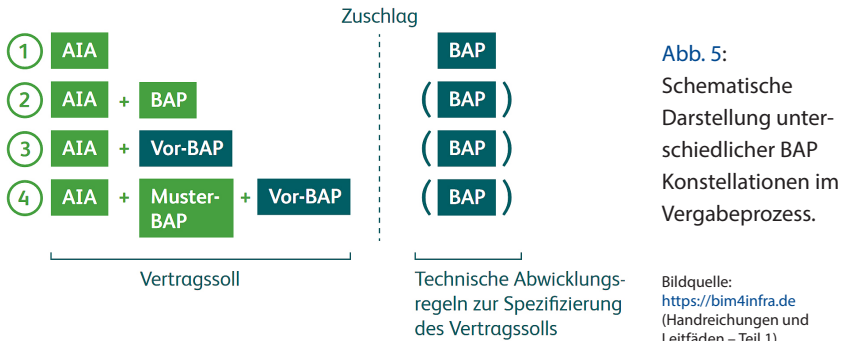


Abb. 5:
Schematische Darstellung unterschiedlicher BAP Konstellationen im Vergabeprozess.

Bildquelle:
<https://bim4infra.de>
(Handreichungen und Leitfäden – Teil 1)

entwickelt. Der Prozess mündet im BIM-Pflichtenheft für den Informationsaustausch in einem Bauprojekt. Wie detailliert der BAP vor der Auftragserteilung im Vergabeprozess ausgearbeitet werden muss, kann sich abhängig von der Projektorganisation stark unterscheiden (siehe Abb. 5).

Im BAP, als Teil des Angebots, stellt der Bieter dar, wie (und vor allem, dass!) er die Kapazitäten und Kompetenzen besitzt, um die im AIA formulierten Aufgaben zu erfüllen. Im detaillierten BAP nach Vergabe werden die Details zur Realisierung der gemeinsamen Datenumgebung festgelegt. Es werden zum Beispiel Angaben zur Loseinteilung, zum Umgang mit Daten von und für Unterauftragnehmer getroffen.

Nach dem Aufstellen des BIM-Pflichtenhefts wird allen Beteiligten in der sogenannten Mobilisierungsphase noch Zeit eingeräumt, die eigenen BIM-Fertigkeiten auszubauen und speziell für das Projekt zu entwickeln.

5 Haftung und funktionaler Mangelbegriff

Die BIM-Anforderungen „müssen dem jeweiligen Vertrag und seinem Leistungsbild ggf. konkret entnommen werden, sind aber in der heutigen Praxis oft nicht einmal explizit beschrieben, sondern müssen alsdann aus dem Verwendungszweck der Vermessungsergebnisse erschlossen werden“ (Eschenbruch 2019). Ein funktionaler Mangel entsteht dann, wenn das ingenieurgeodätische

Grundlagenmodell nicht entsprechend der BIM-Methode genutzt werden kann. Hierfür kann das Vermessungsunternehmen haftbar gemacht werden. Dies betrifft sowohl die Rohdatenerfassung (z. B. unvollständige Punktwolke, weil Bauteile verdeckt und damit nicht als Volumenkörper modellierbar sind) als auch die Modellierung, wenn zum Beispiel parametrische Bauteilbibliotheken verwendet werden, die im Zielsystem des Planers geometrisch nicht oder falsch gedeutet werden können. Folgende BIM-spezifischen Anforderungen an die Software (Hausknecht und Liebich 2017) müssen hierbei berücksichtigt werden, wenn nach der BIM-Methode gearbeitet wird:

- Modellelementbasiertes Arbeiten mit Parametrik
- Definition von Abhängigkeiten zwischen Modellelementen
- Logische Strukturelemente in einem BIM-Modell
- Dynamische Planableitung aus dem BIM-Modell
- Erstellung von Listen und anderen Auswertungen aus dem BIM-Modell
- Integration mit anderen BIM-fähigen Softwareprodukten über offene Schnittstellen

Für traditionelle (nicht-BIM) Leistungen muss die Funktion des erstellten Modells natürlich auch verstanden und vertraglich vereinbart werden. Allerdings erfordert die BIM-Methode spezielle Absprachen damit die durchgängige digitale Datennutzung auch tatsächlich gelingt. Um hier eine gemeinsame Sprache zu finden müssen Informationslieferant (Vermessungsingenieur) und Informationsbesteller (Planer) die gleiche, am besten standardkonforme, Begrifflichkeit verwenden. Umfassendes und gegenseitiges Verständnis für die jeweiligen Lösungskompetenzen und die Kenntnis der BIM-Methode sind hierfür das Projektgelingen und die zukunftsorientierte Unternehmensentwicklung entscheidend.

Literatur

- Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J. (2015): Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis (VDI-Buch), Wiesbaden, 591 S., ISBN: 9783658056063.
- CEN/TC 442/WG 2 – Building Information Modelling, Level of Information Need – Concepts and principles, TC 442 WI 00442009.
- DIN 18710-1:2010-09 – Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. DOI: [10.31030/1705315](https://doi.org/10.31030/1705315).
- DIN EN ISO 16739:2017-04 – Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauindustrie und im Anlagenmanagement (ISO 16739:2013).
- DIN EN ISO 19650-1:2018-04 – Entwurf, Organisation von Daten zu Bauwerken – Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Konzepte und Grundsätze (ISO/DIS 19650-1.2:2018). DOI: [10.31030/2812594](https://doi.org/10.31030/2812594).

- DIN EN ISO 19650-2:2018-04 – Entwurf, Organisation von Daten zu Bauwerken – Informationsmanagement mit BIM – Teil 2: Lieferphase der Assets (ISO/DIS 19650-2.2:2018). DOI: [10.31030/2812595](https://doi.org/10.31030/2812595).
- DIN EN ISO 21597-1:2018-10 – Entwurf, Informationscontainer zur Datenübergabe – Austausch-Spezifikation – Teil 1: Container (ISO/DIS 21597-1:2018). DOI: [10.31030/2873237](https://doi.org/10.31030/2873237).
- DIN EN ISO 29481-1:2018-01 – Bauwerksinformationsmodelle – Handbuch der Informationslieferungen – Teil 1: Methodik und Format (ISO 29481-1:2016). DOI: [10.31030/2773897](https://doi.org/10.31030/2773897).
- DIN SPEC 91391-1:2019-04 – Gemeinsame Datenumgebungen (CDE) für BIM-Projekte – Funktionen und offener Datenaustausch zwischen Plattformen unterschiedlicher Hersteller – Teil 1: Module und Funktionen einer Gemeinsamen Datenumgebung; mit digitalem Anhang. DOI: [10.31030/3044838](https://doi.org/10.31030/3044838).
- DIN SPEC 91391-2:2019-04 – Gemeinsame Datenumgebungen (CDE) für BIM-Projekte – Funktionen und offener Datenaustausch zwischen Plattformen unterschiedlicher Hersteller – Teil 2: Offener Datenaustausch mit Gemeinsamen Datenumgebungen. DOI: [10.31030/3044839](https://doi.org/10.31030/3044839).
- Eschenbruch, K. (2019): Geodäsie und BIM – die rechtlichen Aspekte. In: DVW e. V. und Runder Tisch GIS e. V. (Hrsg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0, Bühl/München, 2019, 103 ff. www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2019/11_DVW-Merkblatt_LeitfadenGeodäsieundBIM_2019_0.pdf.
- Hausknecht, K., Liebich, T. (2017): BIM-Kompendium Building Information Modeling als neue Planungsmethode. Stuttgart, ISBN: 9783816794899.
- USIBD U.S., Institute of Building Documentation (2016): USIBD Level of Accuracy (LOA) Specification Guide. Version 2.0 – 2016. <https://usibd.org>.
- VDI 2552 Blatt 2 – Building Information Modeling – Begriffe (2018). ICS: 35.240.67.
- VDI 2552 Blatt 5 – Building Information Modeling – Datenmanagement (2018). ICS: 35.240.67.

Kontakt

Prof. Dr. Christian Clemen
HTW Dresden
Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
christian.clemen@htw-dresden.de

3D-Punktwolken und BIM – Praxisbeispiele von der Erfassung bis zum Modell

Shahzad Sayyad | Kai Tamms

1 Einführung

Building Information Modeling (BIM) ist in den letzten Jahren zu einem zentralen Thema für die Fortentwicklung der Architektur, der Infrastruktur und dem Facility Management geworden. Durch die verstärkte Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten, die verbesserte Datenvisualisierung und -verwaltung, die Reduzierung der Fehlerquellen und infolgedessen die erheblichen Kosteneinsparungen im gesamten Lebenszyklus der Projekte, hat sich erwiesen, dass BIM ein effizienter modellbasierter Prozess ist. In diesem Beitrag wird anhand von Praxisbeispielen aus den Bereichen Architektur (Kliniken und Wohn- und Geschäftszentren) und Infrastruktur (Brücken u. ä.), der Weg von der Planung, über die Erfassung (mittels TLS, UAV und/oder Indoor-Mobile-Mapping) bis zum fertigen BIM-Modell beschrieben, um nur einige Leistungen hervorzuheben.

2 BIM-Einleitung

Der klassische 2D-CAD-Plan oder BIM? Diese Frage haben sich Architekten, Ingenieure, Vermesser und Facilitymanager in den letzten Jahren häufiger gestellt. Um diese Frage zu beantworten, muss man die folgenden Themen genauer betrachten.

- Was ist BIM?
- Was sind die BIM-Standards?
- Welche Vorteile hat diese Methode im Vergleich zur klassischen Vorgehensweise?
- Wie kann man die BIM-Daten mit anderen Projektbeteiligten austauschen?

2.1 BIM-Begriffserklärung

Building Information Modeling (BIM) ist ein sehr weitgefaster Begriff und beschreibt eine Methode zur optimierten Planung, Ausführung und Bewirtschaftung von Bauwerken und deren Inhalt mithilfe von entsprechender Software.

Dabei werden alle relevanten Bauwerksdaten digital erfasst, kombiniert, vernetzt und als vielfältiges 3D-Computer-Modell dargestellt. Der stetig synchronisierte und digitale Zwilling dient allen Planungsbeteiligten als BIM-Koordinationsmodell, welches auch für das Facility Management verwendet werden kann.

2.2 BIM-Standards

Der sogenannte „Level of Development“ (kurz: LOD; deutsch: Fertigstellungsgrad) bezieht sich auf eine Disziplin und Leistungsphase und definiert den notwendigen Informationsgehalt (LOI) und Detaillierungsgrad der digitalen

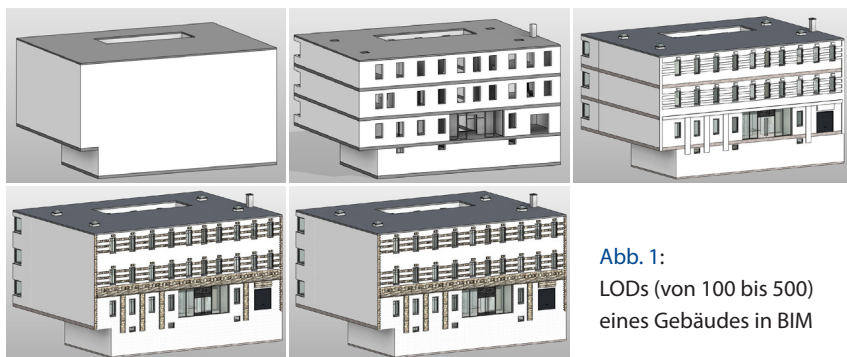


Abb. 1:
LODs (von 100 bis 500)
eines Gebäudes in BIM

Gebäudemodelle (LOG). Eine einheitliche und bauteilübergreifende Standardisierung der LODs gibt es derzeit nicht und wäre sehr wünschenswert. Er kann sowohl von der jeweiligen Disziplin als auch von der Leistungsphase abhängig sein. Die LODs sind entsprechend unserer Spezifikationen wie folgt definiert (siehe [Abb. 1](#)):

- LOD 100: Es ist eine rein konzeptionelle Modelldarstellung und stellt Informationen auf der Basisebene bereit. Es werden Parameter wie Fläche, Höhe, Volumen und Ausrichtung definiert.
- LOD 200: Es ist eine schematische Darstellung von Gebäudeteilen. Mittlerweile sind die Wände, Decken, Treppen schon erkennbar.
- LOD 300: Präzise Modellierung, bei denen Elemente mit exakten Abmessungen, Materialien und Positionierung definiert werden.
- LOD 400: Es ist eine produktspezifische Darstellung und beinhaltet eine detaillierte Darstellung der Modellelemente mit vollständigen geometrischen und nicht-geometrischen Informationen.
- LOD 500: Dieser Fertigstellungsgrad stellt das As-Built-Modell des Bauobjektes dar. Die Daten dienen als Grundlage zur Bewirtschaftung der Gebäude im Facility Management.

Das IBD liefert As-Built-Modelle bis zum LOD 400. Weiterführende Information können im Zuge der ersten Bestandsermittlung nicht ermitteln werden. Diese Informationen müssen zu einem späteren Zeitpunkt nacherfasst werden. Hierfür wären z. B. Kernbohrungen notwendig, um den exakten Wandaufbau rekonstruieren zu können oder Herstellerangaben zu identifizieren.

Darüber hinaus hat die Vorgabe des damaligen Verkehrsministers Alexander Dobrindt, dass ab 2020 alle Verkehrsinfrastrukturprojekte im Bereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) nur noch mit der BIM-Methode erfolgen sollen, Bewegung in die Projektabläufe gebracht. So wurden die Auftraggeberinformationsanforderungen (AIA) und der BIM-Ausführungs-/Abwicklungsplan (BAP) als Antwort der Auftragnehmer als feste Bestandteile ebenso als Standards eingeführt, wie die Datenübergabepunkte (Data-Drops) und die Nutzung eines Common Data Environment als Datenmanagementdrehscheibe. Im Sinne des Open-BIM-Gedankens wurde die Nutzung der offenen, herstellerneutralen Datenformate wie IFC (siehe Abschnitt 2.4), OKSTRA, GAEB, etc. im BIM-Stufenplan festgelegt. Die BIM-Kompetenz der Bewerber für die Projekte wird jetzt als Eignungskriterium bei der Vergabe herangezogen.

2.3 BIM-Vorteile

Unter BIM versteht man mehr als nur einen reinen Datenaustausch zwischen den Planungsbeteiligten. Ein effizienter und zielorientierter Einsatz von BIM bietet darüber hinaus auch unzählige Vorteile über den gesamten Lebenszyklus (Abb. 2)

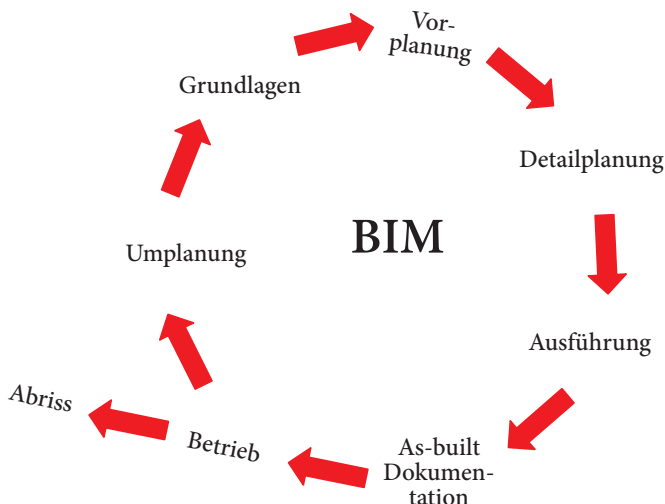


Abb. 2: Bauwerkslebenszyklus im BIM (nach DVW 2018)

eines Bauwerks: vom ersten Entwurf, während des Baus, der langfristigen Wartung, des Betriebs der Gebäude und bis hin zum Abriss des Bauwerks.

Einige Vorteile des Verfahrens sind:

- Bessere Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen alle Projektbeteiligten und infolgedessen eine erhöhte Arbeitseffizienz
- Kontinuierliche und gesicherte Datenaufbereitung während des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks
- Gesteigerte Datenqualität durch kontinuierlichen Informationsaustausch zwischen Planungsbeteiligten
- Reduzierung der Projektkosten durch frühzeitige Erkennung zahlreicher Fehler und potenzieller Kollisionen
- Bereitstellung von realistischen Visualisierungen zur schnelleren Entscheidungsfindung zwischen Auftraggeber und den Projektbeteiligten
- Einbeziehen der Infrastruktur in den Planungsprozess

2.4 BIM-Datenaustausch

Die bauteilorientierte Modellierung wird von vielen namhaften CAD-Herstellern angeboten, wie z. B. ALLplan (Allplan GmbH), ArchiCAD (Graphisoft), Revit (Autodesk) oder Tekla (Trimble). Durch den gewerkeübergreifenden Einsatz von BIM bei Großprojekten wurde ein gemeinsam nutzbares Format nötig. Die von buildingSMART entwickelte und gepflegte IFC (Industry Foundation Classes) ist nach ISO 16739 registriert und ein weltweit bekannter offener Standard für den BIM-Datenaustausch.

Die IFC-Datei setzt sich aus mehreren Elementen zusammen. Ein Teil davon bildet die Geometrie der einzelnen Bauteile. Der andere Teil wird durch eine alphanumerische Codierung beschrieben. Die Teilbereiche stehen in einem besonderen Verhältnis zueinander und bilden das Grundgerüst der Bauteilinformation.

3 BIM-Einführung beim Ingenieurbüro Drecoll

Das am 1. April 1896 gegründete Ingenieurbüro Drecoll (IBD) zählt zu den ältesten Vermessungsbüros Deutschlands und gehört zu dem führenden Anbieter im Bereich Architektur- und Ingenieurvermessungen. Der hohe Stellenwert von BIM wurde bereits Anfang 2010 im Büro erkannt. In Folge dessen wurde eine eigene „BIM-Abteilung“ mit einem schlagkräftigen Team von zehn Mitarbeitern, bestehend aus Vermessungstechnikern, Ingenieuren, sowie Architekten ins Le-

ben gerufen. Das IBD ist auch Gründungsmitglied der BuildingSmart Regionalgruppe Hannover, Braunschweig, Göttingen, Wolfsburg (BuildingSMART-Regionalgruppe 2018).

Aufgrund der zunehmenden Projekte war es unerlässlich auf neue Technologien zur effizienteren Datenerfassung zu setzen. Diese wurde durch die Anschaffung von mehreren terrestrischen Laserscannern (TLS) der Marke FARO® (FARO 2012) realisiert. Diese Scanner ermöglichen ein schnelles und genaues Aufmaß von komplexen Objekten. Eine integrierte HDR-Kamera sorgt für kontrastreiche Bildinformationen in natürlichen Farben.



Abb. 3: Faro (links), TIMMS (Mitte) und UAV (rechts)

Obwohl der terrestrische Laserscanner die schnellste und die kostengünstigste Aufnahme des Objektes ermöglicht, braucht man aber mehrere Scannerpositionen, um die komplexen Objekte vollständig zu erfassen. Zudem ist die erforderliche Stationierung der einzelnen Scans in einem einheitlichen System für die weitere Bearbeitung sehr zeitaufwendig. Ein mobiles Messsystem kann solche Probleme auf gewisse Weise bewältigen. Das IBD hat sich Anfang 2018 dazu entschlossen, den Weg mit einem mobilen Scanner TIMMS (Trimble 2018) zu beschreiten.

Das TIMMS (Trimble Indoor Mobile Mapping Solution) (siehe Abb. 3) wird für präzise Innen- und Außenaufnahmen eingesetzt und erlaubt so große Flächenerfassungen pro Arbeitstag. Dabei kommen mehrere Sensoren zum Einsatz: ein Laserscanner mit einer Erfassungsgeschwindigkeit von rd. 1 Mio. Punkten pro Sekunde, eine Rundumkamera mit 6×2 Megapixeln sowie ein hochwertiges Inertialmesssystem (IMU) und Radsensoren zur Lagebestimmung. Eine Durchfahrt mit dem System liefert 360° Rundumblicke vom ganzen Gebäude (siehe Abb. 5). Vorbereitend müssen für das TIMMS am Boden einige Festpunkte markiert werden. Dies erfolgt mittels Messung mit einem Tachymeter und temporär aufgestellten Prismenreflektoren.

Das TIMMS liefert die folgenden georeferenzierten Datensätze:

- Trajektorie (SBET Format)
- Punktwolke (LAS Format)
- Bilder (JPEG Format)
- Grundrissraster als 2D-Plan (GeoTIFF Format)

Trotz einer Reichweite von 130 m haben die TIMMS-Daten ein relativ geringes Messrauschen (± 2 mm). Eine eigene Untersuchung hat ergeben, dass die Datenqualität vom TIMMS weitaus besser ist, als ein rein SLAM basiertes Messsystem. Die TIMMS-Daten dienen als Grundlage für eine 3D-Modellierung bzw. für das Building Information Modeling (BIM).

Weiterhin, um die großen, schwer erreichbaren oder unzugänglichen Flächen zu vermessen, bieten sich Luftbildaufnahmen mit Hilfe eines Multikopters als ideale Lösung an. Die aus den Bildern gewonnenen 3D-Punktwolken haben eine Auflösung von < 1 cm, liefern also sehr zuverlässige Ergebnisse – eine hervorragende Ergänzung zum Laserscanning. Das IBD besitzt einen eigenen Multikopter, der bereits in vielen BIM-Projekten eingesetzt wurde.

Das IBD hat seit 2010 BIM-Projekte erfolgreich betreut. Einige ausgewählte Projekte stellen wir hier vor.

4 Praxisbeispiele

4.1 Gebäude

Das Ihme-Zentrum (siehe [Abb. 4](#)) liegt am Ufer des namensgebenden Flusses „Ihme“ in Hannover. Es ist ein großes Wohn-, Büro- und ein ehemaliges Einkaufszentrum. Das ursprüngliche Konzept dieses Gebäudes war eine „Stadt in der Stadt“. Der Komplex steht auf dem größten gegossenen Betonfundament Europas.



Abb. 4: Ihme-Zentrum

Einige Fakten zu diesem Objekt sind:

- Grundsteinlegung: 11. November 1971
- Gesamtfläche: 285.000 m²
- Verkaufsfläche: 105.000 m²
- Wohnfläche: 66.000 m²
- Wohnungen: 860

Ein Berliner Investor hatte einen großen Teil des Ihme-Zentrums 2015 übernommen. Anfang 2018 hat die Eigentümerversammlung und die Stadt Hannover zugestimmt, dass die Fassade und ein Teil des Daches instandgesetzt und modernisiert wird. Das IBD wurde beauftragt die erforderlichen Vermessungsarbeiten durchzuführen.

Der Auftrag beinhaltet folgendes:

- 2D-Schnitte: 24 (Gesamtfläche für Schnittbereich ca. 48.000 m²)
- BIM-Modell: nur Fassade (Straßenseite)
- Detailtiefe/LOD: 300

Hier wurde ein kombiniertes Messverfahren aus tachymetrischer Aufnahme, terrestrischem und mobilem Laserscanning eingesetzt. Die Nachbearbeitung der terrestrischen Laserscans und der TIMMS-Daten (siehe [Abb. 5](#)) erfolgte in „FARO® SCENE“ beziehungsweise im „TIMMS Spatial Processor“.

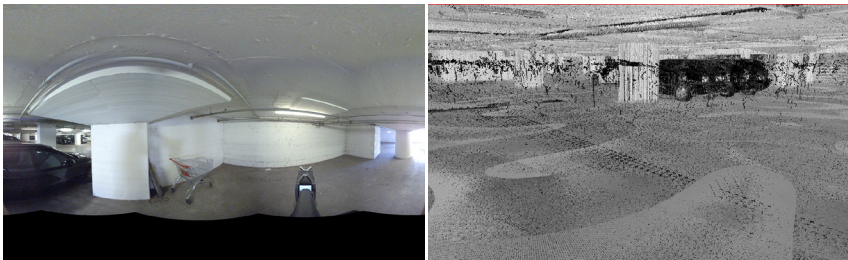


Abb. 5: Panoramabild des TIMMS (links) und der 3D-Punktwolke (rechts)

Die Punktwolken aus TLS und TIMMS wurden dabei zu einer Gesamtpunktwolke (siehe [Abb. 6](#)) verbunden und ins ReCAP-Format umgewandelt, was eine direkte Weiterverarbeitung in REVIT ermöglicht. Die Erstellung von Schnitten erfolgte in AutoCAD und die BIM-Modellierung (siehe [Abb. 7](#)) in REVIT. Eine Erweiterung und Optimierung der BIM-Arbeitsabläufe wurden mit „FARO® AS-Built für REVIT“ und einer Schnittstelle zur grafischen Programmierung (Dynamo) erreicht.

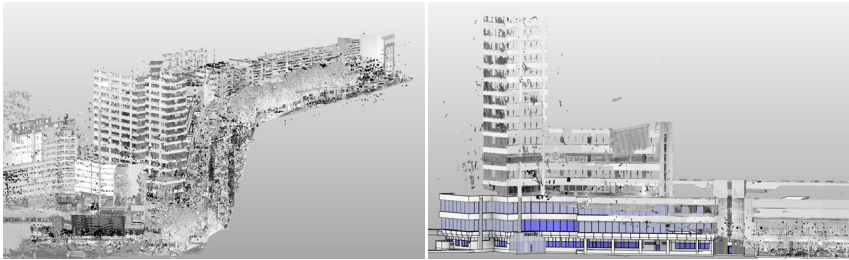


Abb. 6: 3D-Scandaten von Ihme-Zentrum und BIM-Modell

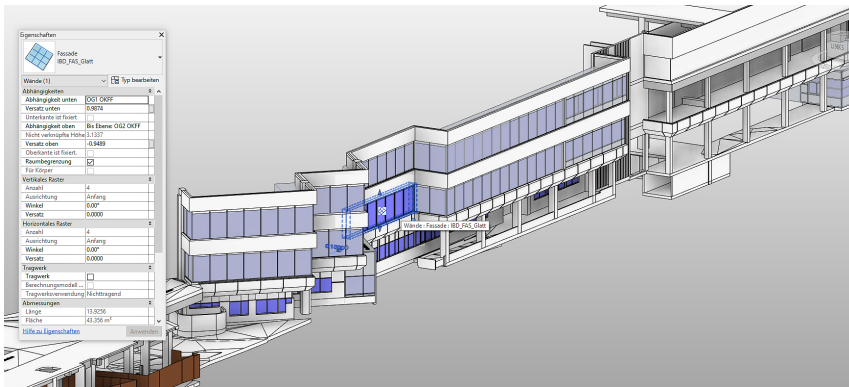


Abb. 7: Detaillierte 3D-Ansicht von einem Bauteil des BIM-Modells

Die Revitalisierung des Ihme-Zentrums ist auch in Bezug auf die notwendige Vermessung eine große Herausforderung.

Einige Schwierigkeiten sind wie folgt:

- Ein großes Problem, mit dem wir konfrontiert wurden, waren die verschiedenen Eigentumsverhältnisse. Die genaue Zuordnung zwischen wohnwirtschaftlichem Eigentum und zukünftiger Handelsflächen war unklar. Infolgedessen hat es uns viel Zeit gekostet, die richtige Zuordnung der Räume zu treffen.
- Nicht zugängliche Dachflächen wurden mithilfe von Hubsteigern erfasst. Dazu war eine erweiterte Netzmessung erforderlich.
- Aufgrund der Prioritäten in der Datenlieferung musste das Projekt zwangsläufig in verschiedene Teilprojekte aufgeteilt werden. Diese Aufteilung hat teilweise doppelte Scans in Schnittbereichen erfordert, was wiederum zur erheblichen Erhöhung der Zeit und Datenmenge geführt hat.
- Zu guter Letzt war die Scan-Rohdatenmenge von ca. 1 TB eine große Herausforderung im Handling.

4.2 Klinikum

Das städtische Klinikum Braunschweig ist eines der größten Krankenhäuser in Niedersachsen. Es hat insgesamt drei Standorte; Klinikum Celler Straße, Klinikum Holwedestraße und Klinikum Salzdahlumer Straße. Der Umbau der künftigen Zentralklinik am Standort Salzdahlumer Straße, welcher der größte Standort des Klinikums ist, ist bereits im Gang. Das IBD und HPM-Vermessung wurden beauftragt, die erforderlichen Vermessungsarbeiten insbesondere die Bestandsaufnahme (Altbau) und der Bauzustandsdokumentation (Neubau), durchzuführen.

Dieses Gemeinschaftsprojekt wurde in zwei Bereiche (Alt- und Neubau) aufgeteilt. Hier wurde ein kombiniertes Messverfahren aus tachymetrischer Aufnahme, TLS, TIMMS und UAV eingesetzt. Die Drohne wurde verwendet, um die unzugänglichen Bereiche zu erfassen. Die weitere Bearbeitung der Bilder d. h. Bildausrichtung, Generierung der georeferenzierten Punktwolke und Orthobilder wurde mit PhotoScan (Agisoft 2017) durchgeführt. Es ist ein weit verbreitetes kommerzielles Programm und basiert auf Structure-from-Motion (SfM). Die Kombination von Bildern und Scandaten führt zu den lückenlosen und umfangreichen Modellen, die in den [Abb. 8 bis 10](#) dargestellt sind. Einige signifikante Informationen sind wie folgt:

- Zustand: Neubau
- Fläche: 36.000 m²
- Aufnahme mittels: Tachymeter, TLS, UAV
- Messdauer: ca. 4 Wochen mit vier Messtrupps
- Registrierung der Punktwolke: ca. 3 Wochen
- BIM-Modellierung: über 1000 Stunden
- Rohdaten: 140 GB, Projektdaten: 550 GB
- Detailtiefe/LOD: 400

- Zustand: Altbau
- Fläche: 47.000 m²
- Aufnahme mittels: TLS, TIMMS, UAV, Tachymeter
- Messdauer: ca. 9 Tage mit 2 Personen
- Registrierung der Punktwolke: ca. 10 Tage
- BIM-Modellierung: über 1200 Stunden
- Rohdaten: 1 TB
- Detailtiefe/LOD: 300

Ein großer Teil der Vermessungsarbeiten wurden während des laufenden Betriebes des Klinikums durchgeführt. Als besondere Herausforderung stellten sich

die Anforderungen der Klinikumleitung heraus. Die Sonderwünsche konnten in der Messplanung jedoch berücksichtigt werden, sodass ein reibungsloser Ablauf gewährleistet werden konnte. Unter anderem sollten folgende Wünsche berücksichtigt werden:

- Bei der Verbindungsvermessung vom Außenbereich in die Etagen, konnten Fenster und Türen nur nach Rücksprache mit dem Stationspersonal geöffnet werden.

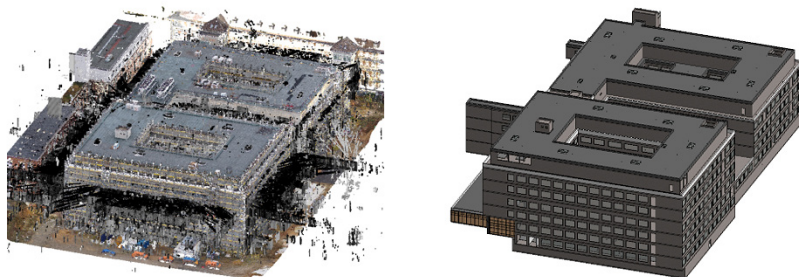


Abb. 8: Kombinierte Punktwolke aus UAV, TLS und TIMMS (links) und das entsprechende BIM-Modell für den Neubau

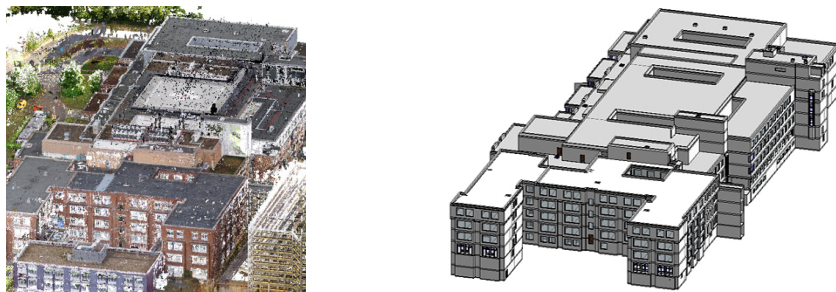


Abb. 9: Kombinierte Punktwolke aus UAV, TLS, TIMMS und entsprechendes BIM-Modell für Altbau

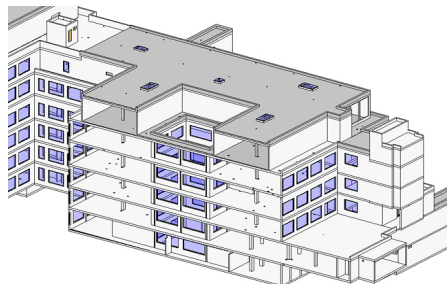


Abb. 10:
Klinikum BIM-Modell,
geschnittene 3D-Ansicht

- Die Auswahl der Standpunkte in den Fluren musste so gewählt werden, dass ein Bettentransport nicht behindert wurde.
- Eine Unkenntlichmachung der Gesichter in den TIMMS-Bilder war erforderlich (Verteilung von Faltfächern für die Patienten).
- Aus hygienischen Aspekten, insbesondere in den OP-Bereichen, musste man der Reinigung der Gerätschaften besondere Aufmerksamkeit schenken.
- Eine genaue Zeitplanung konnte im Vorfeld nicht durchgeführt werden, da die Vermessungsarbeiten in den Funktionsräumen und OP-Bereichen ggf. durch dort laufende Untersuchungen oder Operationen unterbrochen werden mussten.
- Um möglichst geringe Störungen der Betriebsabläufe gewährleisten zu können, mussten wir uns vor Beginn der jeweiligen Messtage in den betroffenen Stationen anmelden. Dort wurde der folgende Ablauf unserer Arbeiten mit Zeitplan erläutert. Diese Arbeitsweise hat auch den Aufwand erhöht.
- Viele Bereiche des Klinikums konnten nur nachts gescannt werden.

Weitere Anforderungen durch bzw. für das beauftragte Architekturbüro:

- Bei der Auswertung gab es unterschiedliche Modellierungsansätze zwischen Architekten und Vermessern, wie z. B. ob Öffnungen ein Teil der Geschossdecke sind oder als eine separate Revit-Familie modelliert werden müssen.
- Der Architekt benötigte zudem kein As-Built-Modell im klassischen Sinn, sondern ein generalisiertes Bestandsmodell. Hierfür wurden die Bauteile mit zusätzlichen Fehlerklassen in Form von Attributen versehen, um den Schritt der Generalisierung nachvollziehen zu können.
- Festlegung eines gemeinsamen Koordinatensystems bzw. des BIM-Vektors für das Projekt (siehe [Abb. 11](#)).

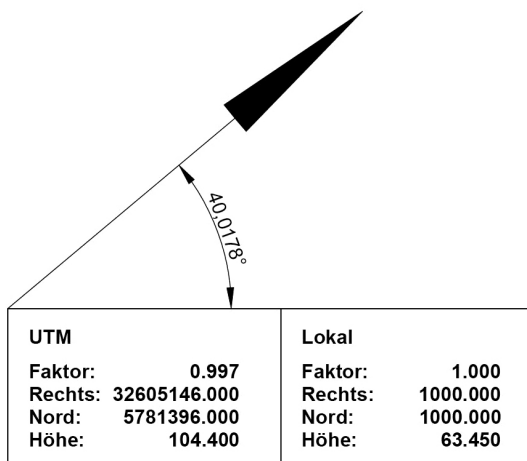


Abb. 11:
Beispiel eines
BIM-Vektors

4.3 Infrastruktur

BIM für Infrastruktur stellt eine besondere Herausforderung dar. Der Begriff „BIM“ wurde ursprünglich für die Architekturindustrie entwickelt. Es ist relativ einfach, sich ein 3D-Modell eines Gebäudes und aller seiner Komponenten innerhalb einer definierten Struktur vorzustellen. Infrastrukturprojekte sind dagegen vielfältiger und komplexer, da hier die Daten über einen großen geometrischen und zeitlichen Raum miteinander verknüpft werden müssen. Eine leicht modifizierte Interpretation von BIM (Building Information Modeling) könnte hier das BIMFI (Building Information Model for Infrastructure) sein.

Trotz skeptischen Anfangs kann man einen stetigen Zuwachs von Infrastrukturprojekte erkennen. Das IBD hat in den letzten Jahren auch Infrastrukturprojekte erfolgreich durchgeführt. Die Friesenbrücke Weener ist ein Beispiel dafür.



Abb. 12: Friesenbrücke Weener nach der Kollision

Die im Zeitraum von 1924 bis 1926 gebaute Eisenbahnbrücke war im Zuge der Bahnstrecke von Leer nach Groningen über die Ems in sieben Felder aufgeteilt und mit einer Länge von 336 m eine der längsten Eisenbahnklappbrücken Deutschlands. Die Brücke wurde Mitte April 1945 durch deutsche Wehrmachtssoldaten teilweise gesprengt und von 1950 bis 1951 in gleicher Form wiederaufgebaut. Die Bahnstrecke war bis etwa 1975 die kürzeste Verbindung von Hamburg nach Amsterdam. Die Ems ist hier Teil der Seeschiffahrtsstraße Untere Ems bis einschließlich zum Hafen Papenburg. Am Abend des 3. Dezember 2015 wurde der Klappteil der geschlossenen Brücke durch das Frachtschiff „Emsmoon“ zerstört (siehe Abb. 12). Infolgedessen kann die Bahnstrecke Leer–Groningen bis auf Weiteres nicht genutzt werden.

Die Instandsetzungskosten wurden auf ca. 26 Millionen Euro geschätzt. Die Neubaukosten hingegen werden bei etwa 70 Millionen Euro liegen, wovon ein Betrag von 20 Millionen Euro vom Bund getragen wird. Anfang 2016 wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie überprüft, ob eine Instandsetzung möglich ist, oder ein Neubau sinnvoller erscheint. Da es sich um einen Wiederaufbau nach dem Zweiten Weltkrieg handelt, stehen lediglich die unzureichende Bestandspläne aus dieser Zeit zur Verfügung, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit geben. Das IBD wurde beauftragt die erforderlichen Vermessungsarbeiten durchzuführen mit dem Ziel, ein detailliertes 3D-Modell der Brücke mit den vollständigen topografischen Informationen zu liefern. Aus einer Kombination unterschiedlicher Messprozesse und Messsensoren erfolgte die Bestandsaufnahme der Brücke. Die eingesetzten Sensoren sind Tachymeter, GNSS, Digitalnivellier, TLS, TIMMS und eine Vermessungsdrohne. Mehr als 120 Scannerpositionen und 1000 Bilder waren notwendig, um eine vollständige Aufnahme der Brücke zu gewährleisten.



Abb. 13: TLS-Punktwolke von Friesenbrücke (links) und TIMMS-Punktwolke der Zufahrten (rechts)

Aufgrund der Flexibilität und Schnelligkeit der Datenerfassung wurde das TIMMS für die Erfassung der Zufahrten (siehe [Abb. 13](#)) eingesetzt. Die Datenerfassung vor Ort von ca. 3 km wurde innerhalb von einem halben Tag bewerkstelligt. Die erforderliche Registrierung der Scans und die Ausrichtung der Bilder wurde mithilfe von „FARO® SCENE“ beziehungsweise mit RealityCapture (RealityCapture 2016) durchgeführt (siehe [Abb. 14](#)). Die TIMMS-Daten wurden mit „TIMMS Spatial Processor“ prozessiert und die georeferenzierten Punktwolken wurden im LAS-Format exportiert. Als nächstes wurde die gesamte Punktwolke ins RECAP-Format konvertiert. Die Gesamtheit aller erfassten Daten bildet die Basis für das mit AutoCAD erzeugte 3D- bzw. mit REVIT erzeugte BIM-Modell (siehe [Abb. 15](#)).

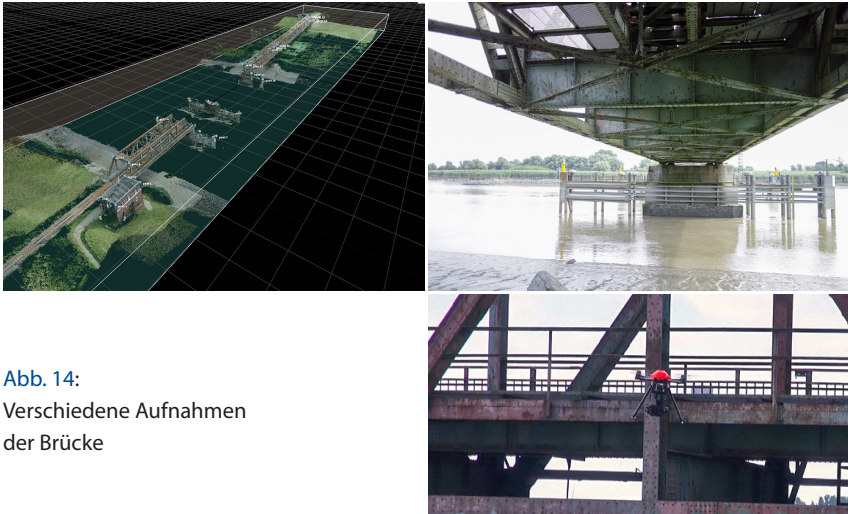


Abb. 14:
Verschiedene Aufnahmen
der Brücke

Das Bestandsaufmaß und die Erstellung des 3D-Modells der Brücke war auch in Bezug auf die notwendige Vermessung bzw. Modellierung eine große Herausforderung. Einige Schwierigkeiten waren wie folgt:

- Die Brücke, wie bereits vorhin schon erwähnt, wurde in verschiedenen Phasen gebaut. Die einzelnen Bauteile waren nicht DIN-konform, sondern wiesen unterschiedliche Maße auf, sodass der Aufwand für die Modellierung der Bauteile mit der erforderlichen Genauigkeit (5 mm) sehr hoch war.
- Der beschädigte Brückenteil erschien irreparabel und wurde per Schwimmkran herausgehoben, damit Seeschiffe die Unfallstelle wieder passieren konnten. Aus diesem Grund musste für die Aufnahme der beiden Seiten mehrmals ein Umweg von 25 km gemacht werden.
- Durch die hohe Vegetation (Schilf bis 3,5 m Höhe) war es erforderlich, mittels GPS zusätzliche topographische Punkte im Bereich der Brücke nachzuerfassen.
- Die Erfassung der Uferlinie wurde durch den hohen Tidenhub behindert.

Das Resultat der Machbarkeitsstudie war, dass die beschädigte Brücke nicht mehr repariert, sondern bis spätestens Ende 2024 durch einen Neubau ersetzt werden soll. Das Modell der Brücke wird aus diesem Grund nicht weiterverwendet.

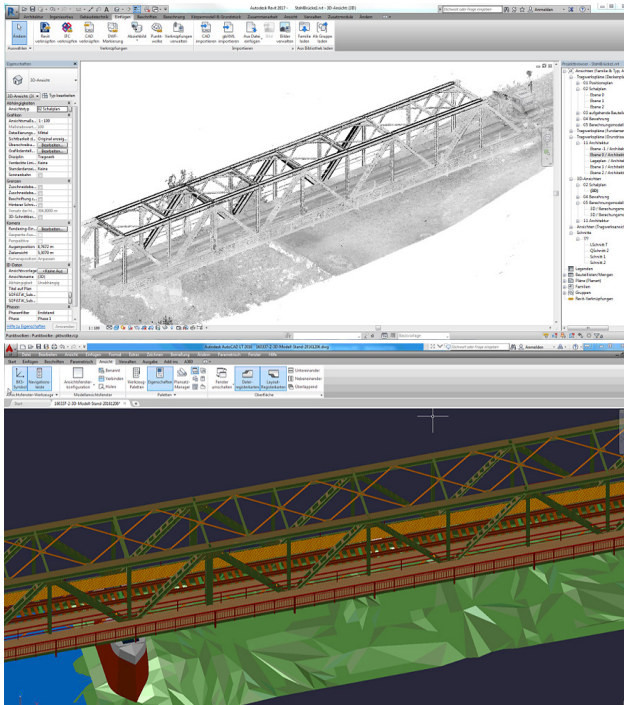


Abb. 15:
3D-Modell der
Brücke mit
AutoCAD (oben)
und BIM-Modell
(LOD: 300) mit
REVIT (unten)

5 Zusammenfassung

Der Einsatz der BIM-Methode hat im Laufe der Jahre weltweit stark zugenommen. Nach anfänglichen Startschwierigkeiten nimmt das Verfahren auch in Deutschland immer mehr Fahrt auf. Dadurch verändern sich die (Bau-)Prozesse radikal. Die Einführung von BIM hat in der Bauindustrie viele positive Änderungen mit sich gebracht und zu einer Steigerung der Produktivität geführt. Es liegt auf der Hand, dass in naher Zukunft nicht alle Probleme mit der BIM-Planungsmethode gelöst werden, doch ein großer Teil dieser Probleme wird mit Sicherheit durch die konsequente BIM-Umsetzung gelöst. Man sollte sich daher eher früher als später mit BIM auseinandersetzen, um die Herausforderungen der zukünftigen Projekte meistern zu können.

Wie bei allen neuen Entwicklungen muss man die Kosten für die notwendige Schulung der Mitarbeiter in Kauf nehmen. Eine weitere zu lösende Aufgabe ist die des richtigen Informationsaustausches zwischen der unterschiedlichen BIM-Software. Die bisherigen Erfahrungen haben uns gezeigt, dass eine fehlerfreie und lückenlose Dateninterpretation über die IFC-Schnittstelle nur bedingt möglich ist.

Literatur

Agisoft (2017): www.agisoft.com, letzter Zugriff 09/2019.

BuildingSMART-Regionalgruppe (2018): www.buildingsmart.de/bim-regional/rg-h-bs-goewob, letzter Zugriff 09/2019.

FARO (2012): www.faro.com/de-de/produkte/bausektor-bim-cim/faro-focus, letzter Zugriff 09/2019.

Kaden, R., Clemen, C., Seuß, R., Blankenbach, J., Beck, R., Eichhorn, A., Donaubaue, A., Kolbe, T., Gruber, U. (2018): Leitfaden Geodäsie und BIM (DVW-Merkblatt 11/2018). Version 1.2. Hrsg.: DVW e.V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement. www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2018/11_DVW-Merkblatt_LeitfadenGeod%C3%A4sieundBIM_2018.pdf.

RealityCapture (2016): www.capturingreality.com, letzter Zugriff 09/2019.

Trimble (2018): <https://allterra-dno.de/indoor-mobile-mapping-timms>, letzter Zugriff 09/2019.

Kontakt

Dr.-Ing. Shahzad Sayyad | Dipl.-Ing Kai Tamms (ÖbVI)
Ingenieurbüro Drecoll
Berliner Allee 13a, 30175 Hannover
sayyad@drecoll.de | tamms@drecoll.de

Session2: Laserscanning mit Multi-Sensor-Plattformen

3D HydroMapper, ein innovatives Über- und Unterwasserscansystem zur Bauwerksinspektion

Christian Hesse | Karsten Holste | Ingo Neumann

1 Motivation

Während Brücken und deren Zustand im Hinblick auf eine alternde Verkehrsinfrastruktur in aller Munde sind, unterliegen auch Wasserbauwerke wie Häfen, Schleusen, Spundwände und Böschungen einem Alterungsprozess. Dieser manifestiert sich aufgrund der Exposition in noch viel stärkerem Maße als dies bei der landseitigen Infrastruktur der Fall ist.

Ein wesentlicher Unterschied besteht insbesondere in Flüssen und Häfen entlang der deutschen Nordseeküste in einem sehr hohen Sedimentgehalt, der in aller Regel dafür sorgt, dass Zustand und strukturelle Integrität von Verkehrswasserbauwerken nur mit extrem hohem Aufwand durch Taucher ermittelt werden können. Im Falle von Seehäfen, wie z. B. in Emden ist die Sichtweite sogar auf wenige Zentimeter begrenzt, kommt gerade in den Hafenbecken durch die Besonderheiten der Hydrodynamik eine fast dickflüssige Sedimentschicht, „Fluid Mud“ genannt, hinzu.

Für eine Bauwerksprüfung, die nachgelagerte Instandsetzungsplanung sowie das Erhaltungsmanagement des Betreibers ist es jedoch von hohem Wert, den Zustand der Wasserbauwerke nicht nur vollständig, sondern auch reproduzierbar zu erfassen. Nur hierdurch können Schäden frühzeitig erkannt und Veränderungen zuverlässig festgestellt werden.

2 Das 3D HydroMapper Projekt

Ausgehend von den vorbenannten Defiziten wurde im Dezember 2018 das vom Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur geförderte 3D Hydro Mapper Projekt gestartet (BMVI 2019).

In diesem Konsortium arbeiten die Büros Dr. Hesse und Partner Ingenieure, die WKC Hamburg GmbH, das Geodätische Institut der Leibniz Universität Hannover, die Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP sowie die beiden großen Infrastrukturbetreiber Niedersachsen

Ports und die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes bis zum Jahr 2021 an der Entwicklung und Erprobung eines Systems zur hybriden 3D-Bestandsdatenerfassung mit nachfolgender modellgestützter Prüfung von Verkehrswasserbauwerken.

Bezogen auf die Bauwerksprüfung und Bewirtschaftung von Verkehrswasserbauwerken wurden folgende Ziele bei einer gleichzeitig deutlich verbesserten und vor allem reproduzierbaren Datengrundlage gesetzt:

1. Beschleunigung der Erfassung um den Faktor 5
2. Erhöhung der Vollständigkeit um den Faktor 16
3. Reduzierung des Kostenaufwandes um mindestens 60 %

Die Erhöhung der Leistungsparameter soll unter anderem durch die Entwicklung einer neuartigen Multi-Sensor-Plattform erfolgen, die aus einer Trägerplattform und der darauf befindlichen Sensorplattform besteht. [Abb. 1](#) zeigt die Trägerplattform mit darauf adaptierten bildgebenden Sensoren sowie einem Tachymeter zur Positionierung und eines UAV für die Vervollständigung der 3D-Daten oberhalb der Kaianlagen.

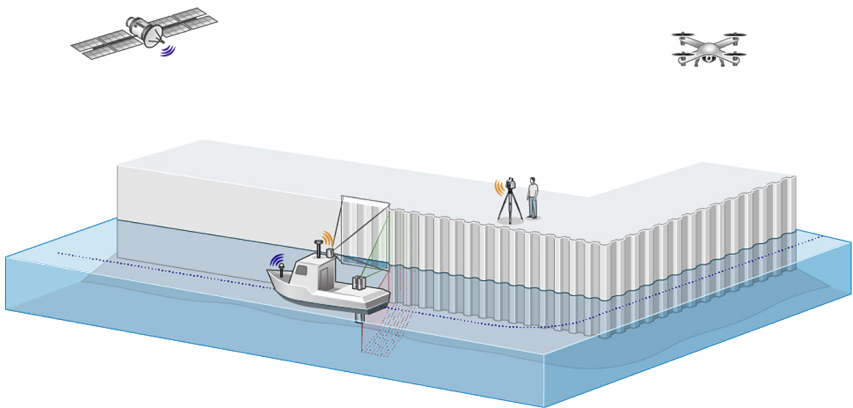


Abb. 1: HydroMapper Träger- und Sensorplattform mit UAV

Neben der reinen Entwicklung von Träger- und Multi-Sensor-Plattform sollen im Rahmen des Projektes auch eine qualitätsoptimierte Routenplanung, KI-Verfahren zur automatischen Schadenserkennung und Klassifizierung, zur automatischen Modellierung der Bauwerke nach BIM-Standard sowie Verfahren zur Integration in Hafenbewirtschaftungsprozesse samt diesbezüglicher Normungen umgesetzt werden.

Für einen ausführlicheren Überblick über das Projekt sei auf Hesse et al. (2019) verwiesen.

3 Bauwerksprüfung

3.1 Angestrebte Ziele durch die Digitalisierung

Mit dem Verbundprojekt 3D HydroMapper wird die Bauwerksprüfung auf ein neues Niveau gehoben. Die derzeit überwiegend händisch und wenig reproduzierbaren Aufnahme- und Bewertungsprozesse werden digitalisiert und strukturiert, sodass der Bauwerkszustand qualifiziert bewertet und auch bei der Folgeinspektion die Schadensentwicklung sowie der aktuelle Bauwerkszustand nachvollzogen werden können. Berücksichtigt wird dabei auch, dass die aufgenommenen Bauwerksdaten OPEN BIM-fähig strukturiert werden, um Instandsetzungs- oder Ersatzmaßnahmen auf dieser Basis durchführen zu können (siehe Abb. 2).

Für die Dokumentation der Bauwerksinspektion über Wasser existieren bereits Schadenskataloge, an denen sich der Bauwerksprüfer hinsichtlich der Schadensbewertung orientiert. Für die Inspektionen unter Wasser sind diese Kataloge nicht vorhanden, weil hier bislang kaum Inspektionen stattfanden. Aufgrund des Alters der Infrastrukturbauwerke und der dadurch erforderlichen Maßnahmen im Bestand wird hier ein Umdenken erforderlich.

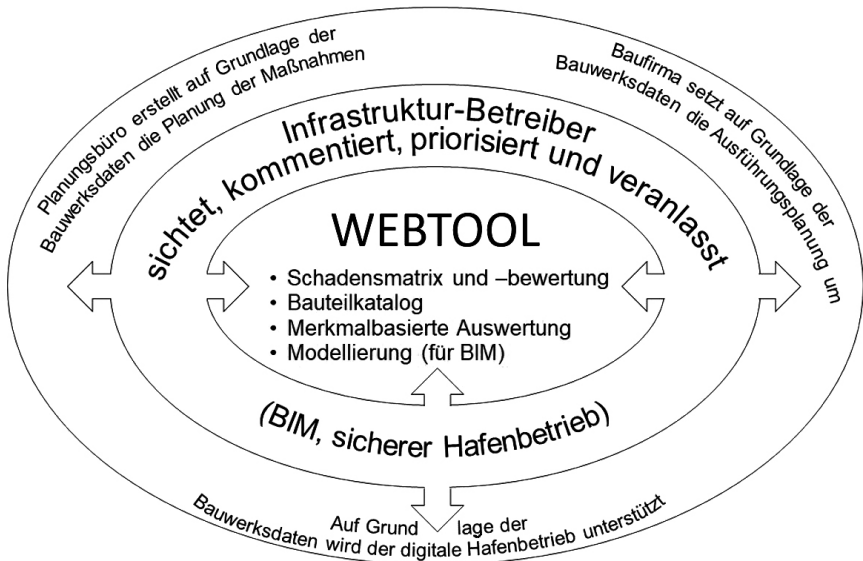


Abb. 2: Digitalisierungslösung im Webtool

Die humansensorischen Prüfungen und Schadensaufnahmen unter Wasser mit Tauchern sind in Qualität und Quantität starken Variationen unterworfen. Schadenslage, Schadensklassifizierung und Schadensentwicklung sind bei regelmäßigen Bauwerksprüfungen aufgrund der subjektiven Wahrnehmungen kaum reproduzierbar. Ein flächiges Abtauchen findet zudem nur in Sonderfällen statt. Entweder kann das Wasser im Bauwerk gelenzt werden und die Untersuchung wird im Trockenen durchgeführt oder die unter Wasser befindlichen Konstruktionsteile werden in Abständen von rund 50 bis 100 m abgetaucht, dabei gleitet der Taucher an der Konstruktion hinunter und versucht gleichzeitig zu strömungsbedingten Einflüssen die Konstruktion abzutasten oder im günstigsten Fall visuell zu inspizieren.

Aufgrund der Sedimentbedingungen kann die visuelle Inspektion an der deutschen Küste allenfalls im Bereich der Ostsee und in wenigen Bereichen der Nordsee stattfinden. Insbesondere im Bereich der Ems, der Weser und der Elbe sind jedoch teilweise Sedimentgehalte vorhanden, die eine visuelle Inspektion unmöglich machen und als Fluid-Mud bezeichnet werden. Die genannten Sedimentbedingungen führen zur Verschlickung von Hafenanlagen und auch dazu, dass die Unterwasserstruktur der Hafenanlage nur „blind“ abgetastet werden kann.

Mit der in den folgenden Abschnitten dargestellten Trägerplattform wird der Blindflug unterbrochen – das Bauwerk wird unter Wasser flächig gescannt, die Ergebnisse werden dem Bauwerksprüfer und den Tauchern in Echtzeit bereitgestellt, damit die Inspektion von Auffälligkeiten erfolgen kann. Somit wird der Taucher durch den HydroMapper zu den Lokationen gelenkt, die von besonderem Interesse sind. Ein aufwendiges händisches und flächiges Abtauchen kann daher unterbleiben, weil die hydroakustischen Ergebnisse bereits vorliegen.

Für die BIM-fähige Strukturierung der Bauwerksdaten ergibt sich derzeit eine durchaus spannende Situation: Gemäß „Stufenplan digitales Planen und Bauen“ wird bis 2020 eine erweiterte Pilotphase mit einer größeren Anzahl von Projekten durchgeführt, um Daten, Prozesse und Qualifikationen mit den an Planung und am Bau Beteiligten gemeinsam entwickeln zu können. Dies beinhaltet, dass derzeit nur wenige, gesetzte Strukturen vorhanden sind und in Abhängigkeit vom Infrastrukturbetreiber auf völlig unterschiedliche Leistungsniveaus aufgesetzt werden muss, damit die aufgenommenen, ausgewerteten und strukturierbaren Daten vom Betreiber verwendet werden können.

Im Rahmen des Projektes wurde daher eine Web-App entworfen, die eine extrem niedrige Einstiegsschwelle aufweist. Mit der App können Punktwolken, 360°-Panoramen, statische Auswertungen und BIM Views auf Mobilgeräten am Bauwerk oder auch stationär für Planungs- und Ausführungsprozesse vom Betreiber oder den anderen Beteiligten genutzt werden.

3.2 BIM und Strukturierung der Messdaten

Durch die konsequente Digitalisierung der Bauwerksprüfung ergeben sich nicht nur enorme Effizienzgewinne im eigentlichen Prozess, sondern auch in den nachfolgenden Planungsphasen sowie in der Ausführung der Bauwerksinstandsetzung. Dabei wird durch die Nutzung einer Web-App eine Mehrfachbefundung des Bauwerks verhindert, weil bereits im Rahmen der Bauwerksinspektion über und unter Wasser ein vollständiger digitaler Zwilling des Bauwerks erzeugt wird. Dieser digitale Zwilling wird dann mit den entsprechenden Auswertungen den an der Maßnahme Beteiligten zur Verfügung gestellt.



Abb. 3: OPEN BIM-Nutzung der Bauwerksdaten im Webtool

Im Planungsprozess werden die im Rahmen der Inspektion aufgenommenen Daten als Grundlage genutzt, um den Entwurf und die Ausschreibung vollständig und transparent anfertigen zu können (siehe Abb. 3). Für die sich anschließende Ausführungsplanung, die in Deutschland noch regelmäßig an die ausführenden Unternehmen vergeben wird, können die Bauwerksdaten dann im Sinne einer OPEN BIM-Lösung ebenfalls genutzt werden.

Insbesondere in dem sich an Planung und Bau anschließenden Bauwerksbetrieb versetzt das Multimodellsystem den Betreiber in die Lage, eigene Schadensmeldungen zu integrieren oder auch Schäden abzumelden, so dass stets der aktuelle Bauwerkszustand auf mobilen oder stationären Geräten dargestellt werden kann.

4 Hybride Multi-Sensor-Plattform und Positionierung

4.1 Rahmenbedingungen

Im Rahmen der Entwicklung der hybriden Multi-Sensor-Plattform sind neben der elektrischen, softwareseitigen und mechanischen Integration verschiedener

Sensoren zwei zentrale Aufgaben zu lösen. Zum einen ist eine Kalibrierung von Unter- und Überwasserscanner zueinander und in Relation zum Body-System der Trägerplattform zu entwickeln und praxisreif zu erproben.

Dies ist insbesondere deshalb einer Herausforderung, da sich beide Scansensoren in unterschiedlichen Medien (Wasser/Luft) befinden und eine zum Teil komplementäre Charakteristik aufweisen.

Zum anderen ist eine Positionierungslösung zu konzipieren, die auch unter schwierigen GNSS-Empfangsbedingungen (Brücken, Kräne, sehr hohe Kaimauern) zuverlässig und präzise arbeitet.

4.2 Positionierungslösung

Für die Positionierung der Trägerplattform sowie der darauf befindlichen Multi-Sensor-Plattform war grundsätzlich eine klassische GNSS/IMU Ultra-Tight-Coupled-Lösung vorgesehen, die sich bereits in einer Vielzahl von anderen Systemen bewährt hat.

Als Herausforderung bei diesem Projekt dürfen die zum Teil sehr schwierigen Umgebungsbedingungen gelten, die sich im Hafbereich und entlang von Wasserstraßen ergeben. Hierzu zählen insbesondere Brücken, Kräne und Containerbrücken sowie sehr hohe Kaianlagen mit darauf befindlichen Gütern oder Verladeeinrichtungen. Hierdurch werden GNSS Signale zum Teil so stark abgeschattet oder durch Multipath-Effekte verfälscht, dass eine präzise und zuverlässige Positionierung nicht mehr möglich ist.

Zur Kompensation dieser Nachteile wurde eine hochfrequent messende Totalstation vom Typ Leica MS60 in das Positionierungskonzept integriert. Die Aufgabe hierbei bestand darin, eine Zeitsynchronisation im unteren Millisekundenbereich zwischen Totalstation und dem auf der Trägerplattform befindlichen GNSS-Empfänger herzustellen.

Herausfordern ist hierbei die Tatsache, dass eine Kabelverbindung zur Trägerplattform auf dem Wasser nicht möglich ist und auch das im Leica ProScan System verwendete kabellose Synchronisationsverfahren (Hesse und Vennegeerts 2014) aufgrund der Schiffsdynamik nicht zum Einsatz kommen kann.

Stattdessen wurde ein spezieller Embedded-Rechner mit Echtzeitbetriebssystem (RTOS) und GNSS-Empfänger entwickelt, der an das Tachymeter angeschlossen werden kann und dessen Aufgabe in der Steuerung des Messablaufes am Tachymeter sowie in der Triggerung der Windows-CE Onboard-Unit der MS60 besteht.

Mit Hilfe der von Leica entwickelten Measure-and-Stream-App für MS60 Geräte unter Captivate kann das Tachymeter somit in einer Art Ping-Pong-Verfahren die GPS Zeit des Echtzeitrechners über die Onboard-Unit auf die interne

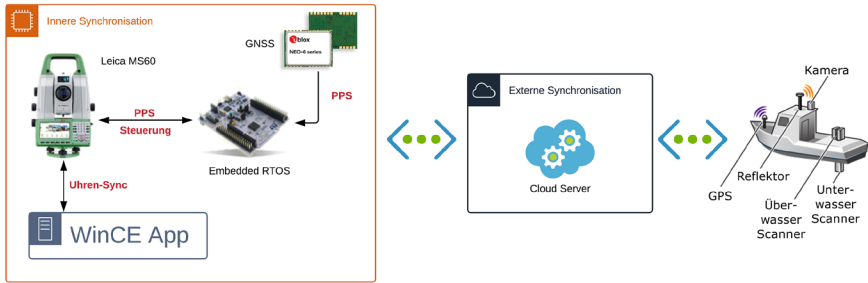


Abb. 4: Sensorsynchronisation zwischen Tachymeter und GNSS/IMU

Systemzeit des Tachymeters übertragen. Nach ersten Tests gelingt eine Synchronisierung mit Hilfe dieses Mechanismus mit Latenzen von wenigen Millisekunden.

Abb. 4 zeigt die zur Synchronisierung des Tachymeters notwendigen Bestandteile sowie die Distribution der echtzeitreferenzierten Messwerte über einen Cloud-Server, so dass die Georeferenzierung nicht nur am Tachymeter, sondern auch auf der Trägerplattform selbst oder für externe Anwendungen genutzt werden kann.

5 Bootseinheit als Trägerplattform

5.1 Rahmenbedingungen und Aufnahmestrategie

Die Grundlage für die sich an die Bauwerksaufnahme anschließenden effizienten Auswertungsprozesse des HydroMappers ist die in Abschnitt vier beschriebene Positionierungslösung sowie die am Bauwerk erzielte Aufnahmequalität. Aufgrund z. B. der unterschiedlichen Konstruktionsarten der Hafenanlage sowie der Wassertiefe ergibt sich hier eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die beachtet werden müssen, um die Vermessungssensoren optimal vor dem Objekt positionieren zu können.

Durch die Einteilung der Bauwerksaufnahme in einzelne Messfahrten lassen sich dabei dann auch die für die unterschiedlichen Aufnahmeelemente wie z. B. den Kolkschutz, die Spundwand oder den Stahlbetonholm angemessenen Toleranzen konsequent realisieren (siehe Abb. 5).

Neben diesen statischen und konstruktionsbedingten Aufnahmeparametern ergeben sich auch dynamische Einflüsse wie zum Beispiel wind-, wellen- oder driftinduzierte Bewegungen der Trägerplattform, die bereits während der Messfahrt kompensiert werden müssen, um eine optimale Aufnahmequalität erzielen zu können.

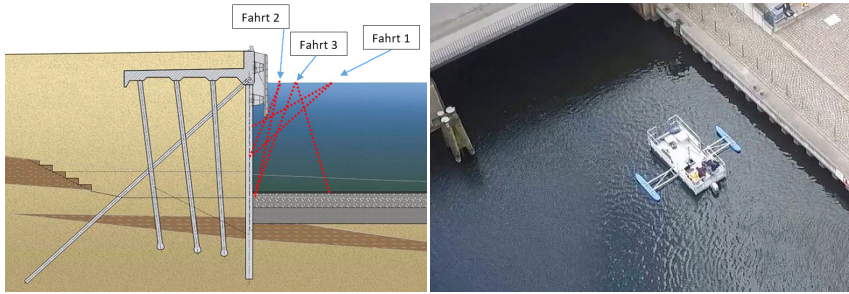


Abb. 5: Querschnitt einer Hafenanlage mit Angabe der Messfahrten

Diese Kompensation kann dabei sehr gut durch die Entkopplung von Trägerplattform (Bootseinheit) und Sensorplattform erreicht werden. Durch eine entsprechende Routenplanung ergibt sich dann zusätzlich zum Driftausgleich die Möglichkeit, die Sensorik mit einer aktiven Objektausrichtung auszustatten. Bei faltwerkartigen Aufnahmestrukturen, wie zum Beispiel bei Spundwänden, wird die Sensorik unter Wasser bei der jeweiligen Messfahrt entsprechend der Flansch- oder Stegneigung ausgerichtet. Die Einzelfahrten werden anschließend zu einem Gesamtmodell zusammengefügt.

6 Qualitätsgesicherte Routenplanung und Schadensdetektion

Ein wesentlicher Faktor für eine qualitativ hochwertige Objektaufnahme stellt eine Routenplanung dar, die die jeweiligen Objekteigenschaften berücksichtigt (vgl. Kap. 5.1). Als eigentliche Routenplanung wird der Prozess bezeichnet, der zum einen die Stellgrößen bei der Fortbewegung (Kinematik) der Trägerplattform bestimmt und zum anderen die Ausrichtung (und somit Interaktion zum Objekt) der Sensorplattform festlegt. Typische Ergebnisse einer Routenplanung sind die Trajektorie, Fahrtgeschwindigkeit, die Angaben zur Ausrichtung der Sensorplattform zum Objekt und weitere Stellgrößen, die das Material und die Konstruktionsparameter des Objektes während der Objektaufnahme berücksichtigen. Je mehr Einflussgrößen auf die Qualität der Messung im Rahmen der Routenplanung berücksichtigt werden können (optimiert werden können), desto besser sind die Präzision, Genauigkeit, Auflösung, etc. (allg. Qualität) der Objektaufnahme.

Hierfür müssen grobe Bestandspläne bzw. 3D-Daten als Vorinformationen vorhanden sein. Anders als bei herkömmlichen Routingaufgaben steht hier nicht die Suche nach dem kürzesten Pfad zwischen zwei Punkten im Vordergrund, sondern die vollständige und zuverlässige Aufnahme des Objektes mit gesicherten Qualitätsvorgaben. Die Genauigkeiten ergeben sich z. B. an dieser

Stelle maßgeblich aus dem Auftreffwinkel des Laserstrahles beziehungsweise der Multibeam-Messungen sowie der Messentfernung zum Objekt. Zusätzlich zu Abstand und Auftreffwinkel fließen auch die Pegelstände in die Berechnung mit ein. So kommt am Ende nicht nur eine optimale Trajektorie zur Aufnahme des Objektes heraus, sondern auch Zeitfenster, zu denen unter optimalen Bedingungen erfasst werden kann.

Für die eigentliche mathematische Lösung des Problems werden die möglichen Bereiche für die Trajektorie (Korridor der Fortbewegung) mit den jeweiligen Einflussgrößen nach ihrer Qualität untergliedert. Dies kann sowohl durch ein Ampelsystem (vgl. Abb. 6, grün: geeignet, rot: ungeeignet) oder gezielte Berechnungen der zu erreichenden Qualitätsstufen erfolgen. Mittels eines Algorithmus wird dann die Route ausgewählt, die die Qualität mindestens erreicht oder aber die beste Qualität für das aufzunehmende Objekt ermöglicht. Nach erfolgter Aufnahme kann im Postprocessing auf ähnliche Weise eine finale Berechnung der tatsächlich erreichten Qualität erfolgen.

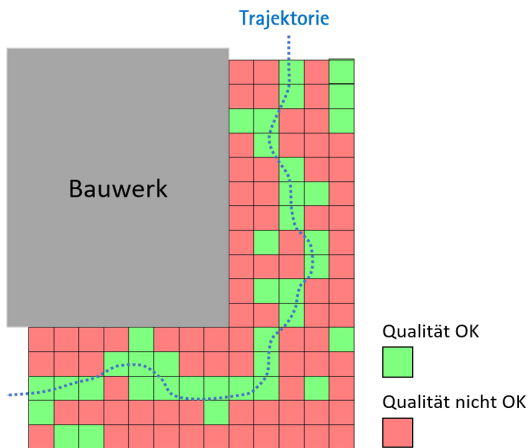


Abb. 6:
Qualitätsgesicherte
Routenplanung für das
Projekt 3D HydroMapper
mittels Ampelsystem

Im Anschluss an die Objektaufnahme werden bei der Schadensdetektion mittels geometrischer Verfahren die gewonnen 3D-Punktwolken durch Freiformflächen approximiert. Eine spezielle Art von Freiformflächen kommen insbesondere B-Splines zum Einsatz. Splines sind Funktionen, die stückweise aus Polynomen n -ten Grades zusammengesetzt sind. Dabei werden an den Knoten (Punkten, an denen die Segmente verbunden sind) bestimmte Bedingungen, wie z. B. stetige Differenzierbarkeit, gestellt. In den B-Spline-Flächen wird anschließend nach Schäden gesucht. Aufgrund der Komplexität dieser Ansätze wird auf die Literatur (z. B. Bureick et al. 2016) und kommende Publikationen zu dem Projekt 3D HydroMapper verwiesen.

7 Zusammenfassung

Mit dem 3D Hydromapper kann die Bauwerksprüfung digitalisiert und auf ein völlig neues Niveau gehoben werden. Durch das flächige Scannen der Bauteiloberflächen über und unter Wasser können Schadensverdachtspunkte zuverlässig erfasst und einer Verifikation zugeführt werden.

Mit der innovativen Positionierungslösung und der aktiven Objektausrichtung im Zusammenspiel mit der qualitätsgesicherten Routenplanung können dabei insbesondere unter Wasser Messgenauigkeiten erzielt werden, die auch für die Bauüberwachung von Unterwasserbetonsohlen oder Pfahltragwerken von z. B. See- oder Binnenhafenkonstruktionen geeignet sind.

Ein Vergleich von verschiedenen Messepochen – so wie sie im Rahmen von Bauwerksprüfungen alle sechs Jahre durchzuführen sind – wird somit auch für Konstruktionen unter Wasser möglich, sodass die Schadensentwicklung und die Lebensdauer dieser für unsere Volkswirtschaft wichtigen Bauwerke zukünftig besser beobachtet und ausgewertet werden kann.

Literatur

- BMVI (2013): Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/KI-Projekte/3d-hydromapper.html, letzter Zugriff 10/2019.
- Bureick, J., Neuner, H., Harmening, C., Neumann, I. (2016): Curve and Surface Approximation of 3D Point Clouds. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 123, Jahrgang (2016), Nr. 11–12, 315–327.
- Hesse, C., Holste, K., Neumann, I., Hake, F., Alkhatib, H., Geist, M., Knaack, L., Scharr, C. (2019): 3D HydroMapper – Automatisierte 3D-Bauwerksaufnahme und Schadenserkennung unter Wasser für die Bauwerksinspektion und das Building Information Modelling. Hydrographische Nachrichten, HN113, 06/2019, Deutsche Hydrographische Gesellschaft e. V., Rostock.
- Hesse, C., Vennegeerts, H. (2014): Referenzierung kinematischer Laserscansysteme mit IMU und Tachymeter. In: DVW e. V. (Hrsg.): Multi-Sensor-Systeme – Bewepte Zukunftsfelder. DVW-Schriftenreihe, Band 75, Augsburg.

Kontakt

Dr.-Ing. Christian Hesse

Dr. Hesse und Partner Ingenieure, Veritaskai 6, 21079 Hamburg
ch@dmpi.com

Karsten Holste

WKC Hamburg GmbH, Veritaskai 8, 21079 Hamburg
karsten.holste@wk-consult.com

Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann

Geodätisches Institut Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
neumann@gih.uni-hannover.de

Geo-Referenzierung von Unmanned Aerial Systems über Laserscannermessungen und 3D-Gebäudemodelle

Johannes Bureick | Sören Vogel | Ingo Neumann | Dmitri Diener | Hamza Alkhatib

1 Motivation

Durch wachsende Leistungsfähigkeit und andauernde Miniaturisierung von Hardware und Sensoren ist es heutzutage möglich, unzählige Arten von perfekt auf den jeweiligen Messeinsatz angepassten Multi-Sensor-Systemen (MSS) zu bauen. In der Ingenieurgeodäsie werden MSS häufig genutzt, um die Umgebung effizient zu erfassen (siehe z. B. Dennig et al. 2017 oder Hartmann et al. 2018). In den meisten Fällen ist es notwendig, die erfassten Daten in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu transformieren. Der Prozess zur Bestimmung der dazu notwendigen Transformationsparameter wird *Georeferenzierung* genannt. Die Transformationsparameter hängen von der Position und Orientierung des erfassenden Sensors im übergeordneten Koordinatensystem ab. In der Regel werden Position und Orientierung über drei Translationen und drei Rotationen, also insgesamt sechs Freiheitsgrade (engl.: six Degrees of Freedom; 6 DoF), beschrieben.

Zu einer nützlichen, bezahlbaren und weitverbreiteten Plattform für die MSS haben sich im letzten Jahrzehnt die Unmanned Aerial Vehicles (UAV) entwickelt. Sie bilden für viele Messeinsätze in der Geodäsie und hier speziell in der Ingenieurgeodäsie die optimale Plattform. MSS, die als Plattform ein UAV verwenden, werden im Folgenden als *Unmanned Aerial System* (UAS) bezeichnet.

Die kontinuierliche Georeferenzierung eines UAS ist eine große Herausforderung. Häufig werden dazu Daten des Global Navigation Satellite System (GNSS) und Inertialer Messeinheiten (IMU) verwendet. Preiswerte GNSS-Empfänger erreichen grundsätzlich Genauigkeiten von einigen Metern. Durch differenzielles GNSS und Korrekturdaten können deren Genauigkeiten unter guten Bedingungen noch auf Dezimeter bis Zentimeter gesteigert werden. Allerdings ergeben sich im urbanen Bereich durch Abschattung und Mehrwegeeffekte zusätzliche Probleme, die im ungünstigsten Fall zu einem kompletten Signalverlust führen können. Günstige IMUs erreichen für die Orientierung Genauigkeiten im Bereich weniger Zehntelgrad, wobei hier insbesondere der Gierwinkel

deutlich ungenauer bestimmt werden kann als der Roll- oder Nickwinkel (siehe z. B. SBG 2019 oder VectorNav 2019). Durch eine GNSS-IMU-Fusion kann die Genauigkeit des Gierwinkels gesteigert werden. Gerade günstige IMUs weisen außerdem häufig einen signifikanten systematischen Drift auf.

Eine weitere Möglichkeit zur Georeferenzierung ist die Bestimmung mit einem externen Sensor, wie z. B. einem Tachymeter oder einem Lasertracker. Dies ist im Falle der Georeferenzierung eines UAS aufgrund von Verdeckungen und einer begrenzten Sicht- und Reichweite eine mühselige bzw. ineffiziente Möglichkeit, wenngleich auch hohe Genauigkeiten erzielt werden können.

Das Geodätische Institut Hannover (GIH) und das Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Leibniz Universität Hannover arbeiten daher gemeinsam an einem, im Folgenden *UAS-Projekt* genannten, Forschungsprojekt. Das UAS-Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und zielt auf die hochpräzise Trajektorienbestimmung eines UAS mittels Integration von Kamera- und Laserscannerdaten mit generalisierter Objektinformation ab.

Dazu wird ein, u. a. mit einem 3D-Laserscanner, zwei Kameras, einem GNSS-Empfänger und einer IMU ausgestatteten, UAS entwickelt. Mithilfe der Laserscanner- und Kameramessungen soll die Trajektorie des UAS verbessert bzw. bestimmt werden. Der Bezug zum übergeordneten Koordinatensystem wird dabei über ein 3D-Gebäudemodell hergestellt. Im hier vorgestellten Ansatz des GIH werden die Laserscannermessungen (und in einem weiteren Schritt auch die Kameramessungen) zu vorhandenen Gebäuden in einem *iterativen erweiterten Kalman Filter* (IEKF) mit dem, in der Regel, generalisierten 3D-Gebäudemodell verknüpft. Mithilfe dieses speziellen IEKF ist es möglich, die durch den Ansatz entstehenden, impliziten Messgleichungen zu modellieren. Finales Ziel des UAS-Projektes ist es, die Trajektorie des UAS kontinuierlich genauer als 10 cm in der Position und genauer als $0,1^\circ$ in der Orientierung zu bestimmen, ohne dass dabei dauerhaft GNSS- und (genaue) IMU-Messungen zur Verfügung stehen. Der Vorteil liegt darin, dass zusätzliche Sensoren des MSS unmittelbar georeferenziert und einsatzfähig sind, ohne dass ein GNSS-Empfang oder die kostspielige Anschaffung einer sehr genauen IMU notwendig ist. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes zur Georeferenzierung ist es, dass Differenzen zwischen Realität und 3D-Gebäudemodell präzise Elementen des 3D-Gebäudemodells zugeordnet werden können. Durch die so zugeordneten Differenzen ist es möglich das 3D-Gebäudemodell unter Erhaltung seiner Topologie zu verbessern bzw. zu modifizieren.

In Kap. 2 wird die Grundidee des entwickelten Ansatzes vorgestellt. Kap. 3 enthält eine kurze Darstellung des entwickelten UAS. In Kap. 4 werden erste auf realen Datensätzen basierende Ergebnisse des IEKF eines ähnlichen MSS vorgestellt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und dem Ausblick.

2 Grundidee

Im Rahmen dieses Beitrages wird auf eine detaillierte Beschreibung des entwickelten IEKF und eine umfangreiche Darstellung des Standes der Forschung verzichtet. Diese Beschreibung würde zum einen den hier gegebenen Rahmen sprengen und zum anderen existiert sie bereits in Vogel et al. (2019) und Bureick et al. (2019). In Vogel et al. (2019) wird die grundlegende Anwendung des IEKF zur Georeferenzierung allgemein eingeführt. Vogel et al. (2019) erläutern dabei wie explizite und implizite Messgleichungen sowie (nicht-)lineare Restriktionen in Form von Gleichungen und Ungleichungen in eine rekursive Parameterschätzung zur Georeferenzierung integriert werden können. Bureick et al. (2019) setzen die von Vogel et al. (2019) gegebene Theorie für die Georeferenzierung eines UAS anhand simulierter Daten um. Im Folgenden soll die Grundidee des Ansatzes aus Bureick et al. (2019) und die daraus resultierenden Messgleichungen vorgestellt werden.

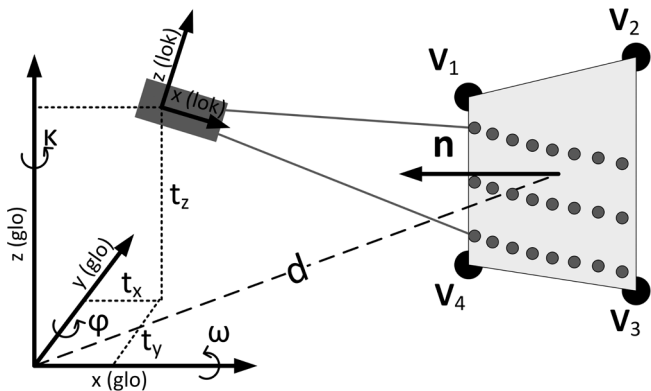


Abb. 1:
Die Grundidee
des Ansatzes

Die Grundidee des Ansatzes ist grafisch in [Abb. 1](#) dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung ist eine Ebene dargestellt, die durch die vier Eckpunkte V_1 bis V_4 begrenzt ist. Die Eckpunkte V_1 bis V_4 sind in einem 3D-Gebäudemodell in einem übergeordneten Koordinatensystem (glo) gegeben. Mathematisch kann diese Ebene durch den Normalenvektor $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]^T$ und den Abstandsparemeter d in der Hesseschen Normalform repräsentiert werden. Voraussetzung dafür ist, dass \mathbf{n} auf die Länge 1 normiert ist, also Formel (1) erfüllt ist.

$$|\mathbf{n}| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = 1 \quad (1)$$

Der Laserscanner – in [Abb. 1](#) als dunkelgraue, rechteckige Fläche dargestellt – misst Punkte, die auf der Ebene liegen. Diese Punkte sind in [Abb. 1](#) als dunkel-

graue Kreise auf der oben beschriebenen Ebene dargestellt. Diese Punkte liegen allerdings im lokalen Koordinatensystem des Laserscanners (lok) vor. Um die Punkte vom lokalen Koordinatensystem (lok) in das übergeordnete Koordinatensystem (glo) zu transformieren, werden die im Zuge der Georeferenzierung zu bestimmenden sechs Transformationsparameter $t_x, t_y, t_z, \omega, \varphi$ und κ benötigt.

Die Grundidee des Ansatzes zur Georeferenzierung ist es, die Transformationsparameter mit den Ebenenparametern (n, d) und den Messungen des Laserscanners in einem funktionalen Zusammenhang zu verknüpfen. Zur Vermeidung eines Datumsdefektes müssen – anders als in Abb. 1 dargestellt – mindestens drei unterschiedlich orientierte Ebenen vom Laserscanner angemessen und somit an der Ausgleichung beteiligt sein. Anders ausgedrückt handelt es sich bei dem Georeferenzierungsansatz um eine Art räumlichen Rückwärtschnitt mit Ebenen anstatt Punkten.

Der funktionale Zusammenhang ist in Formel (2) dargestellt.

$$n^T \times \underbrace{\left[\begin{matrix} t_x & t_y & t_z \end{matrix} \right]^T + \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) \times \left[\begin{matrix} x_{\text{lok}} & y_{\text{lok}} & z_{\text{lok}} \end{matrix} \right]^T}_{\left[\begin{matrix} x_{\text{glo}} & y_{\text{glo}} & z_{\text{glo}} \end{matrix} \right]^T} - d = 0 \tag{2}$$

Ein beliebiger vom Laserscanner gemessener Punkt $[x_{\text{lok}}, y_{\text{lok}}, z_{\text{lok}}]^T$ liegt im lokalen Koordinatensystem des Laserscanners vor. Dieser kann mithilfe der sechs Transformationsparameter $t_x, t_y, t_z, \omega, \varphi$ und κ in das übergeordnete Koordinatensystem transformiert werden. Die Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)$ wird dabei über die Formeln (3) bis (6) berechnet (vgl. Luhmann 2010).

$$\mathbf{R}(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\mathbf{R}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\mathbf{R}(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) = \mathbf{R}(\omega) \times \mathbf{R}(\varphi) \times \mathbf{R}(\kappa) \tag{6}$$

Der in das übergeordnete Koordinatensystem transformierte Punkt $[x_{\text{glo}}, y_{\text{glo}}, z_{\text{glo}}]^T$ wird nun in die Hessesche Normalform der Ebene eingesetzt. Durch Umformung ergibt sich die in Formel (2) dargestellte implizite Form des nichtlinearen funktionalen Zusammenhangs. In Formel (7) ist die implizite Form in allgemeiner Formulierung gegeben.

$$\mathbf{f}(\tilde{\mathbf{L}}, \tilde{\mathbf{X}}) = 0 \quad (7)$$

Die wahren Beobachtungen $\tilde{\mathbf{L}}$ stehen in einem (untrennbaren) Zusammenhang mit den wahren Parametern $\tilde{\mathbf{X}}$. D. h. es ist in diesem Falle nicht möglich die wahren Beobachtungen durch eine Funktion der wahren Parameter zu beschreiben und dadurch eine explizite Form $\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{X}})$ zu erreichen.

An dieser Stelle sollen einige Überlegungen zur Einordnung der verschiedenen (Mess-)Größen vorgestellt werden. Grundsätzlich werden Größen als Parameter, als Beobachtung oder deterministisch, also fest, eingeführt. Im funktionalen Zusammenhang in Formel (2) ist klar, dass die Transformationsparameter $t_x, t_y, t_z, \omega, \varphi$ und κ zu schätzende Parameter sind. Ebenso ist der vom Laserscanner gemessene Punkt $[x_{\text{lok}}, y_{\text{lok}}, z_{\text{lok}}]^T$ eindeutig eine Beobachtung. Bei der Einordnung der Ebenenparameter (\mathbf{n}, d) hingegen ist es möglich, diese als Beobachtung, deterministisch oder gar als Parameter einzuführen.

Führt man die Ebenenparameter als Beobachtung ein, werden sie im Rahmen der Ausgleichung und anhand des zuvor spezifizierten stochastischen Modells verbessert. Möglicherweise kommt es dabei in der Ausgleichung zu numerischen Problemen. Hier ist auch zu beachten, dass die Länge des Normalenvektors $|\mathbf{n}|$ (siehe Formel (1)) durch die angebrachten Verbesserungen von der Länge 1 abweichen kann.

Eine weitere und vielfach verwendete Möglichkeit, ist die Einführung der Ebenenparameter als deterministische Größe. D. h. sie werden als feste Größe in den funktionalen Zusammenhang eingeführt und im Rahmen der Ausgleichung nicht verändert. Dies hat zur Folge, dass es keine Datumsproblematik in der Ausgleichung gibt. Ebenso bleibt die Länge des Normalenvektors $|\mathbf{n}|$ bei 1. Andererseits werden vorhandene (Mess-)Unsicherheiten bei der Bestimmung der Ebenenparameter vernachlässigt. Dies kann zum einen zu einer systematischen Beeinflussung der Schätzergebnisse führen. Zum anderen werden dadurch unrealistische Ergebnisse für die geschätzten Genauigkeiten der Parameter erzielt. Aus letztgenannten Gründen und der weiteren Zielsetzung des UAS-Projektes auch das 3D-Gebäudemodell im Messprozess zu verbessern werden die Ebenenparameter als Parameter eingeführt.

Sollen die Ebenenparameter ebenfalls als Parameter in die Ausgleichung eingeführt werden, ergibt sich zunächst eine Datumsproblematik. Sowohl die Veränderung der Ebenenparameter als auch der Transformationsparameter kann zu

einer Minimierung des impliziten funktionalen Zusammenhangs in Formel (2) führen. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass die Länge des Normalenvektors $|\mathbf{n}| = 1$ beträgt. Andernfalls kann der implizite funktionale Zusammenhang durch die Trivillösung $\mathbf{n} = [0,0,0]^T$ und $d = 0$ minimiert werden. Die Datumsproblematik wird aufgelöst, in dem zusätzlich die Eckpunkte der Ebenen $\mathbf{V}_i = [V_{x,i}, V_{y,i}, V_{z,i}]^T$ als Parameter eingeführt werden. In dem Zuge werden zusätzlich zwei weitere funktionale Zusammenhänge eingeführt. Der funktionale Zusammenhang in Formel (8) besagt, dass die Eckpunkte der Ebenen ebenfalls die Hessesche Normalform der Ebene erfüllen müssen.

$$\mathbf{n}^T \times \mathbf{V}_i - d = 0 \quad (8)$$

Durch den funktionalen Zusammenhang in Formel (8) ist die erwähnte Datumsproblematik noch nicht gelöst. Deshalb werden die ursprünglichen Eckpunkte des 3D-Gebäudemodells $\mathbf{V}_{0,i} = [V_{x,0,i}, V_{y,0,i}, V_{z,0,i}]^T$ als Beobachtung eingeführt (siehe Formel (9)).

$$\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_{0,i} = 0 \quad (9)$$

Zur Verhinderung der Trivillösung $\mathbf{n} = [0,0,0]^T$ wird des weiteren eine Restriktion eingeführt (siehe Formel (10)), die eine Normierung der Länge des Normalenvektors auf 1 sicherstellt.

$$g(\mathbf{X}) = |\mathbf{n}| - 1 = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} - 1 = 0 \quad (10)$$

Da in der Anwendung die gesamte Trajektorie des UAS bestimmt werden soll, ist es sinnvoll die aufgezeigten funktionalen Zusammenhänge in eine Filter-Lösung zu integrieren. Die oben beschriebenen Parameter bilden in der Filter-Lösung die Zustandsparameter. Aufgrund der impliziten Form der nichtlinearen funktionalen Zusammenhänge bietet sich hier die Verwendung eines IEKF an. Für die konkrete Umsetzung des IEKF sei an dieser Stelle auf Bureick et al. (2019) verwiesen. Dort ist ebenfalls erläutert, wie die vom Laserscanner gemessenen Punkte den Ebenen des Gebäudemodells zugeordnet werden.

3 System

Abb. 2 zeigt den schematischen und einen beispielhaften tatsächlichen Aufbau des UAS. In der finalen Ausbaustufe werden noch zwei Kameras in das UAS integriert. Als Laserscanner wird der VLP-16 der Firma Velodyne verwendet. Durch insgesamt 16 Scanlinien erreicht dieser Laserscanner ein Sichtfeld (Field

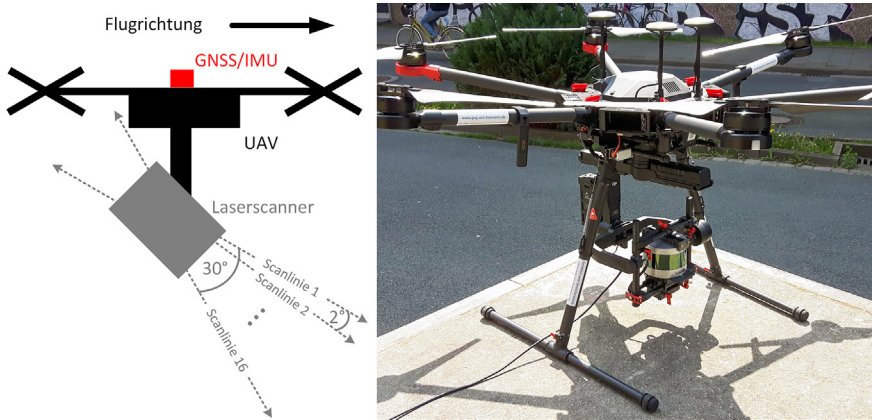


Abb. 2: Ein schematischer und ein tatsächlicher Aufbau des UAS (linker Teil der Abbildung übersetzt aus Bureick et al. 2019)

of view) von $360^\circ \times 30^\circ$ und damit eine flächenhafte Erfassung. Beim VLP-16 korrespondiert die Auflösung innerhalb der Scanlinie mit der Messfrequenz. Mit der geringsten Messfrequenz von 5 Hz erreicht der VLP-16 eine Auflösung von $0,1^\circ$. Mit der höchsten Messfrequenz von 20 Hz reduziert sich die Auflösung auf $0,4^\circ$. Für die spätere Anwendung wird letztere Konfiguration gewählt.

Der Einsatzbereich des UAS ist der urbane Bereich. Hauptsächlich soll das UAS knapp oberhalb der Traufhöhe der Gebäude fliegen. So ist es möglich die Dachstrukturen zu erfassen. Die erfassten Dachstrukturen bieten notwendige Informationen für die Berechnung der Höhe des UAS t_z . Trotz der geplanten Flughöhe ist im urbanen Bereich mit den bereits erwähnten Abschattungen und Mehrwegeeffekten beim GNSS zu rechnen.

4 Ergebnisse

In Bureick et al. (2019) wurde für das UAS eine Simulationsumgebung geschaffen, um die Funktionsweise des IEKF und die Herausforderungen zu evaluieren. Im Rahmen dieses Beitrags sollen die Ergebnisse erster realer Messungen mit einem ähnlichen MSS gezeigt werden. Die Messdaten wurden ebenfalls mit dem in Bureick et al. (2019) beschriebenen IEKF ausgewertet.

Bei dem MSS handelt es sich um eine bodengebundene Plattform auf die der VLP-16 Laserscanner montiert wurde. Ebenfalls wurde ein lowcost GNSS-Empfänger (Garmin GPS18x LVC) und eine lowcost IMU (Tinkerforge IMU Brick 2.0) verbaut. Als Referenz wurde ein 360° -Miniprisma auf der Plattform montiert. Dies wurde während der Messung mit einem Tachymeter (Leica MS50)

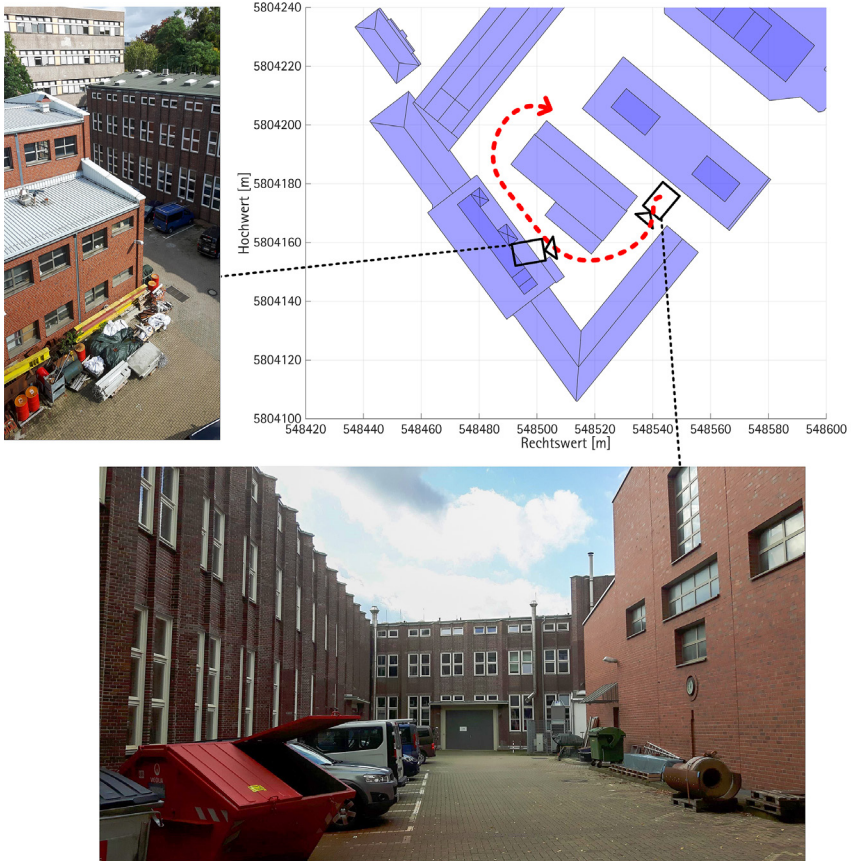


Abb. 3: Testumgebung auf dem Gelände der Leibniz Universität Hannover

verfolgt. Das MSS und das Tachymeter wurden allerdings nicht synchronisiert, weshalb die gefilterte und die vom Tachymeter gemessene Trajektorie nur visuell vergleichbar ist. Außerdem erfolgte keine Kalibrierung zwischen 360°-Prisma und Zentrum des Laserscanners, weshalb hier mit einem geringfügigen Versatz von ca. 15 cm zu rechnen ist. Da durch das bodengebundene MSS keine Dachflächen erfasst werden konnten, wurde für den Parameter t_z eine konstante Beobachtung eingeführt. Sowohl die GNSS- als auch die IMU-Daten wurden in den nachfolgenden Ergebnissen nicht verwendet, um die Leistungsfähigkeit der reinen Laserscanner basierten Georeferenzierung beurteilen zu können.

Als Testumgebung wurde ein Innenhof auf dem Gelände der Leibniz Universität Hannover gewählt. Die umstehenden Gebäude sind in einem Level of Detail 2 (LoD2) Gebäudemodell modelliert (siehe Abb. 3 oben rechts). Dieses

3D-Gebäudemodell wird von der Stadt Hannover offen und kostenlos zur Verfügung gestellt (siehe Stadt Hannover 2019). Laut Angaben der Stadt Hannover (2019) wurde das LoD2-Gebäudemodell aus einer Laserscanning-Befliegung abgeleitet und ist mit einer Höhengenaugigkeit von ± 1 m spezifiziert. Im Innenhof befinden sich verschiedenste Störobjekte. Unter anderem befinden sich dort Park- und Materiallagerflächen (siehe Abb. 3 links und unten). Auf letzteren werden zum Teil bis auf Traufhöhe Materialien gelagert.

Die ungefähr gefahrene Trajektorie ist als gestrichelter roter Pfeil in Abb. 3 oben rechts eingezeichnet. Das LoD2-Gebäudemodell ist zum Teil deutlich generalisiert. Vor allem bei der Fassade des U-förmigen Gebäudes linksseitig der gefahrenen Trajektorie treten zwischen Realität und 3D-Gebäudemodell signifikante Abweichungen auf.

Die Näherungswerte für die erste Position und Orientierung wurden anhand der Tachymetermessungen und einer manuellen Verschiebung und Ausrichtung der gemessenen Laserscannerpunktvolke zum 3D-Gebäudemodell bestimmt. Somit wird der IEKF mit sehr guten Startwerten initialisiert. Die Güte der Startwerte ist schwer zu präzisieren, liegt aber im Bereich der angestrebten Genauigkeit der Georeferenzierung von 10 cm in der Position und $0,1^\circ$ in der Orientierung. Das Systemmodell wurde aus Bureick et al. (2019) übernommen. Die als Beobachtungen eingeführten Eckpunkte des ursprünglichen 3D-Gebäudemodells wurden trotz bekannter höherer Ungenauigkeiten (insbesondere in der Höhenkomponente) und Generalisierungseffekte mit 0,1 mm als sehr genau eingeführt. Dadurch wird das 3D-Gebäudemodell als nahezu fix eingeführt. Dies wiederum führt zu einer deutlichen Reduktion der Rechenzeit des IEKF.

Abb. 4 zeigt den visuellen Vergleich zwischen der vom Tachymeter erfassten Trajektorie und der gefilterten Trajektorie des IEKF. Grundsätzlich liegen beide Trajektorien eng zusammen. Maximale visuell erkennbare Abweichungen der beiden Trajektorien liegen zwischen 30 und 40 cm und sind zumeist nach gefahrenen Kurven zu beobachten. Die Angabe einer konkreten Abweichung, z. B. in Form des Helmertschen Punktfehlers, ist aufgrund der fehlenden Synchronisierung und Kalibrierung nicht möglich. Die dargestellten Abweichungen lassen sich nicht auf die fehlende Kalibrierung zurückführen, da das 360° -Prisma in Fahrtrichtung links vom Laserscannerzentrum liegt. Im östlichen und südlichen Bereich scheint aber die mit dem Tachymeter erfasste Trajektorie – zumindest nach gefahrenen Kurven – eher rechts von der mit dem IEKF gefilterten Trajektorie zu liegen. Grundsätzlich lassen sich diese Abweichungen zum Teil auf die Generalisierung des 3D-Gebäudemodells zurückführen. Bei dem Gebäude links der Trajektorie wurden größere im Grundriss dreieckige Vorsprünge an den Wänden durch die Generalisierung entfernt. Dadurch kann es zu einer systematischen Verschiebung der Trajektorie kommen.

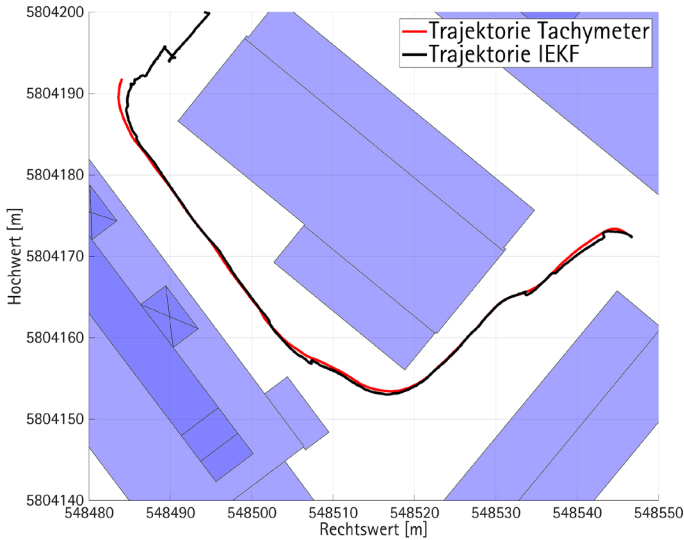


Abb. 4:
Visueller
Vergleich
zwischen der
durch das
Tachymeter
erfassten Tra-
jektorie und
der gefilterten
Trajektorie
des IEKF

Im nordwestlichen Bereich zeigen sich größere Abweichungen zwischen den beiden Trajektorien. Dieser Bereich wird in [Abb. 5](#) fokussiert. Am Ende der mit dem Tachymeter erfassten Trajektorie ergeben sich größere Abweichungen zu der mit dem IEKF gefilterten Trajektorie. Im Anschluss weicht die gefilterte Trajektorie immer stärker von der eigentlich gefahrenen, aber nicht mehr durch das Tachymeter erfassten, Trajektorie ab. Diese Abweichung ist auf verschiedene herausfordernde Störobjekte in der Umgebung zurückzuführen. So war eine Wand eines Gebäudes zum Teil eingerüstet und nicht durch den Laserscanner zu erfassen ([Abb. 5](#) oben). Des Weiteren befanden sich hohe Stapel von Steinen in dem Bereich ([Abb. 5](#) rechts). Beide Störobjekte können zu Fehlzuordnungen und damit zu einer systematischen Beeinflussung der Filterergebnisse geführt haben.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Grundidee eines Ansatzes zur Georeferenzierung eines UAS vorgestellt. In diesem Ansatz werden Laserscannermessungen mit den Transformationsparametern der Georeferenzierung und Ebenen eines 3D-Gebäudemodells verknüpft. Der resultierende implizite Zusammenhang wird in einen IEKF integriert. Erste Ergebnisse mit einem ähnlichen MSS sind vielversprechend, zeigen aber auch noch Schwierigkeiten und Herausforderungen auf.

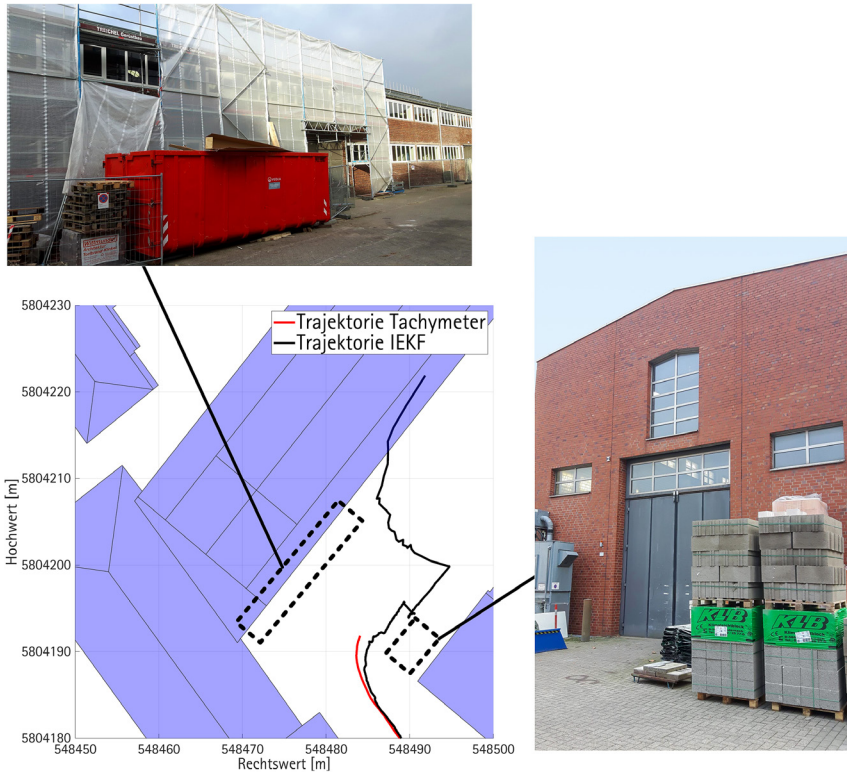


Abb. 5: Herausfordernde Umgebungen für den präsentierten Ansatz

In naher Zukunft soll für das UAS mit der gesamten Sensorik die Flug- und Messbereitschaft hergestellt werden. Derzeit befindet sich die benötigte Aufnahme für die Sensorik und Hardware im Konstruktions- und Fertigungsprozess.

Ein weiterer herausfordernder Schritt wird die Integration der Kameramesungen in den IEKF sein. Da keine Stereokameras verwendet werden, müssen Beobachtungen in den IEKF integriert werden, die zu verschiedenen Epochen erfasst wurden. Ein oder mehr Bilder eines Verknüpfungspunktes wurden in der Vergangenheit und ein Bild wurde in der aktuellen Epoche erfasst.

Zur effizienteren Berechnung, insbesondere bei einer steigenden Anzahl an Ebenen des Gebäudemodells und zusätzlichen Beobachtungen, ist eine Umstellung des IEKF in einen Dual State Kalman Filter geplant.

Dank

Das UAS-Projekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – NE 1453/5-1 gefördert. Die Entwicklung des IEKF wird ebenfalls im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs 2159 (GRK 2159) – Integrität und Kollaboration in dynamischen Sensornetzen (i.c.sens) gefördert. Die Autoren danken der DFG für die erhaltene Förderung.

Literatur

- Bureick, J., Vogel, S., Neumann, I., Unger, J., Alkhatib, H. (2019): Georeferencing of an unmanned aerial system by means of an iterated extended Kalman filter using a 3D City Model. *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science (PFG)*, akzeptiert.
- Dennig, D., Bureick, J., Link, J., Diener, D., Hesse, C., Neumann, I. (2017): Comprehensive and highly accurate measurements of crane runways, profiles and fastenings. *Sensors* 17(5). Basel. DOI: [10.3390/s17051118](https://doi.org/10.3390/s17051118).
- Hartmann, J., Trusheim, P., Alkhatib, H., Paffenholz, J. A., Diener, D., Neumann, I. (2018): High accurate pointwise (geo-)referencing of a k-tls based multi-sensor-system. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-4*. 81–88. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-4-81-2018](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-81-2018).
- Luhmann, T. (2010): *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 3., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin.
- SBG (2019): www.sbg-systems.com/products/ellipse-2-series, letzter Zugriff 09/2019.
- Stadt Hannover (2019): www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Verwaltung-gen-Kommunen/Die-Verwaltung-der-Landeshauptstadt-Hannover/Dezernate-und-Fachbereiche-der-LHH/Baudezernat/Fachbereich-Planen-und-Stadtentwicklung/Geoinformation/Open-GeoData/3D-Stadtmodell-und-Gel%C3%A4ndemodell/Digitales-3D-Stadtmodell, letzter Zugriff 09/2019.
- VectorNav (2019): www.vectornav.com/products, letzter Zugriff 09/2019.
- Vogel, S., Alkhatib, H., Bureick, J., Moftizadeh, R., Neumann, I. (2019): Georeferencing of Laser Scanner-Based Kinematic Multi-Sensor Systems in the Context of Iterated Extended Kalman Filters Using Geometrical Constraints. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 19 (10). DOI: [10.3390/s19102280](https://doi.org/10.3390/s19102280).

Kontakt

Johannes Bureick | Sören Vogel | Ingo Neumann | Dmitri Diener | Hamza Alkhatib
Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
bureick@gih.uni-hannover.de | vogel@gih.uni-hannover.de |
neumann@gih.uni-hannover.de | diener@gih.uni-hannover.de |
alkhatib@gih.uni-hannover.de

Terrestrische Laserscanner – Im Fokus der Genauigkeit

Susanne Lipkowski | Markus Mettenleiter

1 Einleitung

Das terrestrische Laserscanning hat sich in vielen Bereichen der dreidimensionalen Erfassung von Objekten etabliert. Der Einsatz von terrestrischen Laserscannern (TLS) führt teilweise zu einem Umdenken bei der Erfüllung traditioneller Vermessungsaufgaben. Wurden ursprünglich beim Einsatz von Theodoliten und Tachymetern¹ Zielpunkte durch den Anwender selbst angezielt, so bieten TLS die Möglichkeit, den gesamten Sichtbereich mit einer wesentlich höheren räumlichen Auflösung automatisch zu erfassen. Bei Scanentfernungen von 10 m können Objekte mit einer Punktdichte von unter 1 mm aufgemessen werden. Diese enorme Datendichte eröffnet die Möglichkeit einer wesentlich detaillierteren messtechnischen Auswertung.

Nicht der einzelne Messpunkt steht im Fokus, sondern ganze Punktbereiche, die flächenhaft ausgewertet werden können. Den Mehrwert eines flächenhaften Auswerteansatzes zeigt Holst (2019) an ausgewählten Beispielen (Deformationsanalyse einer Staumauer, Erdmassenberechnung, usw.) und Wujanz (2019). Da der Anwender beim Einsatz von TLS selbst aktiv keine Anzielungen der Messpunkte vornimmt und die Punktwolken automatisch generiert werden, kann der Eindruck entstehen, dass vermessungstechnische Kenntnisse nicht mehr erforderlich sind. Doch der Schein trügt, wenn eine zuverlässige dreidimensionale Erfassung von Objekten durchgeführt werden soll.

In diesem Beitrag wird die Arbeitsweise von TLS allgemein erläutert. Am Beispiel des IMAGER® 5016 werden die einzelnen Baugruppen und deren Funktionsweise beschrieben. Im Anschluss folgt ein Einblick in die Prozesse der Werkskalibrierung der Firma Zoller+Fröhlich GmbH. In Kap. 4 wird der Fokus auf die Genauigkeit von TLS gelegt. Für die Spezifikation von TLS werden von den Herstellern in den Datenblättern unterschiedlichste Angaben und Begriffe verwendet, diese werden zusammengetragen und erläutert. Basierend auf Herstellerangaben wird die erreichbare 3D-Punktgenauigkeit exemplarisch berechnet. Eine erweiterte Betrachtung bietet Kap. 5. Hier wird eine Übersicht zu verschiedensten Einflüssen gegeben, die sich auf die Unsicherheit der Messwerte und somit auf die 3D-Koordinaten auswirken können.

1 Motorisierte Tachymeter mit Scanfunktion werden hier nicht betrachtet.

2 Funktionsprinzip

Alle terrestrischen Laserscanner arbeiten nach dem gleichen Funktionsprinzip. Sie rastern punktförmig die Umgebung sequenziell ab. Jedem Messpunkt werden zwei Winkel (φ, θ), eine Entfernung d und ein Intensitätswert q zugeordnet. Aus den polaren Messelementen werden im Anschluss die kartesischen 3D-Koordinaten berechnet. Im Allgemeinen bestehen Laserscanner aus drei Baugruppen: einem elektronischen Entfernungsmessgerät (EDM, Distanzmesseinheit), einem mechanischen Laserstrahlablenksystem (Winkelmesseinheit) und Steuer-elementen. Die Abb. 1 zeigt einen Querschnitt durch den IMAGER® 5016.

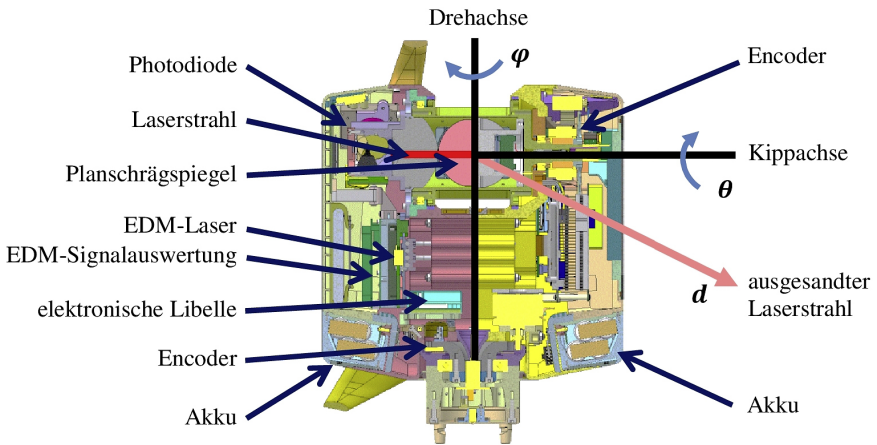


Abb. 1: Querschnitt durch den IMAGER® 5016

Rot dargestellt ist der Laserstrahl, dieser ist auf das Drehzentrum des Planschrägspiegels ausgerichtet. Der Planschrägspiegel rotiert um die Kippachse (etwa 25 bis 50 Umdrehungen pro Sekunde) und lenkt dabei den reflektierten Laserstrahl, idealerweise kreisförmig, in einer Ebene ab. Der Winkelbereich für θ beträgt 0 bis 360°, dieser Bereich wird als Profil bezeichnet. Gleichzeitig dreht sich der Laserscanner wesentlich langsamer (ca. 180° in 3 bis 4 Minuten) um die Drehachse. Um die vom Rotationszentrum des Laserscanners aus sichtbare Umgebung mit dem Laserstrahl vollständig abtasten zu können, genügt ein Winkelbereich φ von 0 bis 180° und θ von 0 bis 360°. Für jeden Messpunkt am Objekt werden die Entfernung d , ein Intensitätswert q , sowie die Winkel φ und θ bestimmt.

3 Kalibrierung

Im Folgenden Kapitel wird die Kalibrierung von Laserscannern exemplarisch und vereinfacht beschrieben, es werden die Parameter der Kalibriermodelle für die Distanzmesseinheit, die Winkelmesseinheit, den Kompensator und die Farbkamera automatisch berechnet und dokumentiert.

Die Kalibrierprozesse und die Räumlichkeiten sind optimal aufeinander abgestimmt und bieten die Möglichkeit, zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, die eine Rückführung auf die nationale Normale ermöglichen.

3.1 Distanzmesseinheit

In den terrestrischen Laserscannern der Firma Zoller+Fröhlich werden die Entfernungen zum Objekt über das Phasenvergleichsverfahren ermittelt. Die detaillierten Ausführungen zur Kalibrierung von Phasenvergleichsmessern können in Joeckel et al. (2008) nachgelesen werden. Im Rahmen der Kalibrierung werden die Laserscanner in Klimakammern hinsichtlich temperaturbedingter Veränderungen untersucht. Basierend auf den Ergebnissen werden Korrekturfunktionen berechnet. Anschließend wird in einem klimatisierten Labor der zyklische Phasenfehler und die Nullpunktkorrektur über Messungen auf einer Interferometerbahn bestimmt (siehe [Abb. 2 und 3](#)).

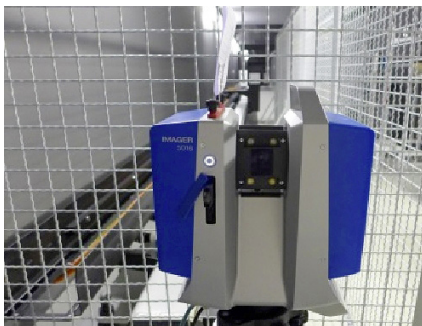


Abb. 2: Interferometerbahn mit Sicherheitsbarriere aus Scannersicht

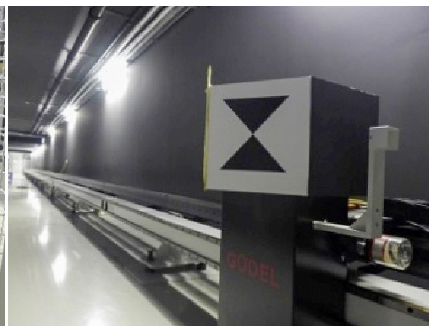


Abb. 3: Interferometerbahn mit Schlitten

Ein Messschlitten ([Abb. 3](#)) wird in definierten Schritten automatisch über die gesamte Bahn bewegt. Für jede Position werden die Distanzenunterschiede zwischen den Laserscanner- und Interferometermesswerten bestimmt. Diese fließen in die Berechnung der Korrekturfunktionen ein. Der gesamte Kalibrierprozess wird für verschiedene Zieloberflächen durchgeführt, die am Schlitten montiert sind.

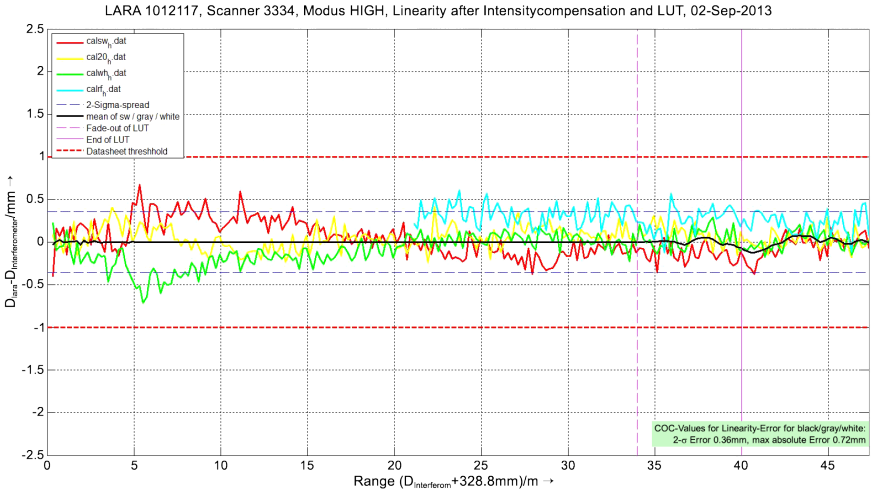


Abb. 4: Beispiel einer Distanzkalibrierung

In Abb. 4 ist ein Beispiel für eine Distanzkalibrierung dargestellt, die Ergebnisse für verschiedene Zieloberflächen sind mit unterschiedlichen Farben abgebildet.

3.2 Winkelmessseinheit

Die Kalibrierung der Winkelmessseinheit wird für den gesamten Beobachtungsbereich der Laserscanner in einem speziellen klimatisierten Kalibrierraum durchgeführt. In diesem Raum befindet sich ein Targetfeld, das aus über 150 Targets besteht (siehe Abb. 5). Das gesamte Targetfeld wird regelmäßig aufgemessen und hinsichtlich Verformungen überwacht.

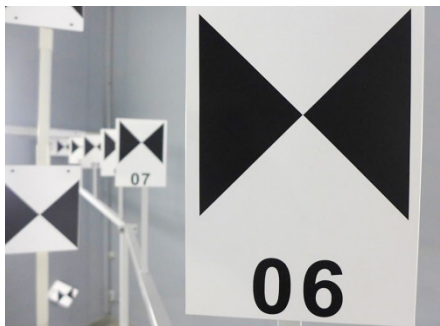


Abb. 5: Ausschnitt des Referenzpunktfeldes

Für alle Kontrollpunkte liegen die dreidimensionalen Koordinaten mit einer Genauigkeit von unter 0,1 mm vor.

Basierend auf diesen Kontrollpunkten werden die Kalibrierparameter für jeden Laserscanner automatisch über einen komplexen Ausgleichungsansatz berechnet. Detaillierte Ausführungen sind an dieser Stelle zu umfangreich.

3.3 Kompensator

In einigen Laserscannern sind Kompensatoren verbaut. Diese ermöglichen es, die Bewegungen des Laserscanners während des Scanvorgangs zu überwachen und jeden Messpunkt durch die aufgezeichneten Kippänderungen zu korrigieren. Damit leistet der Kompensator einen wesentlichen Beitrag zur Sicherung der Messqualität und ermöglicht es, die Zuverlässigkeit der Messdaten zu erhöhen. Im IMAGER[®]5016 ist ein Zweiachskompensator mit einer Auflösung von $0,001^\circ$, einer Genauigkeit von $<0,004^\circ$ und einem Messbereich von $\pm 0,5^\circ$ integriert. Zur Überprüfung und Kalibrierung der Zweiachskompensatoren wird ein NIVEL210 als Referenz-Neigungssensor verwendet, dieser Präzisions-Neigungssensor hat eine Auflösung von $0,02''$ und eine Genauigkeit von $1''$.

3.4 Farbkamera



Abb. 6: Beispielscan, links in RGB-Farben, rechts Intensitätsdarstellung

Der ausgesandte Laserstrahl der terrestrischen Laserscanner ist monochromatisch und hat somit nur eine definierte Trägerwellenlänge. Das am Objekt zum Laserscanner hin zurückgestreute Signal besitzt eine Intensität, die von der Objektentfernung und der Oberfläche abhängig ist. Aus der Intensität des empfangenen Messsignals können nur Grauwerte für den jeweiligen Messpunkt generiert werden (siehe Abb. 6 rechts). Um Farbinformationen für jeden Messpunkt zu erhalten, wird die gescannte Szene zusätzlich mit einer Farbkamera aufgenommen (siehe Abb. 6 links).

Im Imager[®]5016 ist eine sehr rauscharme Farb-CMOS-Kamera im Rotor integriert. Diese ermöglicht es, HDR-Farbbilder für perfekte Farben – auch unter schwierigsten Lichtverhältnissen – für alle Messpunkte zu erzeugen. Bei der Kalibrierung der Farbkamera werden die inneren und äußeren Kameraparameter bestimmt. Hierzu werden Kontrollpunkte, sowohl vom Laserscanner, als auch von der Farbkamera aufgenommen. Über einen automatischen Kalibrierprozess werden der Scan und die Kameradaten ausgewertet. Die Beobachtungen fließen

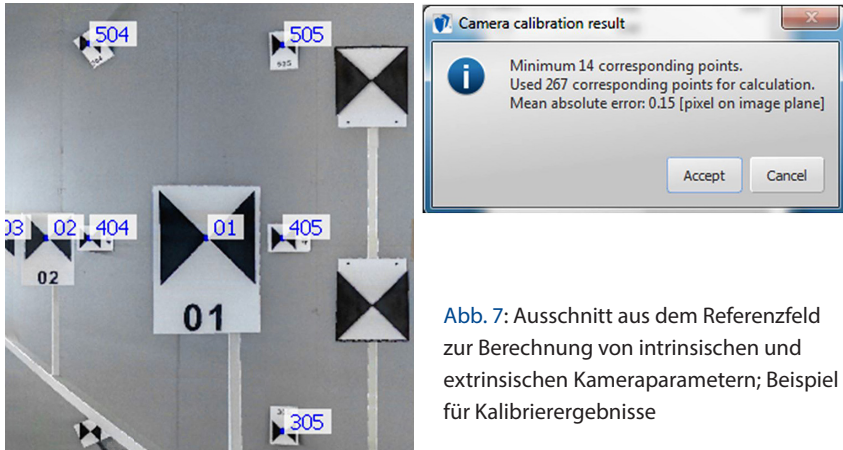


Abb. 7: Ausschnitt aus dem Referenzfeld zur Berechnung von intrinsischen und extrinsischen Kameraparametern; Beispiel für Kalibrierergebnisse

in einen gemeinsamen Ausgleichungsansatz ein. Ein Ausschnitt des für die Kalibrierung verwendeten Referenzpunktfeldes ist in [Abb. 7](#) (links) dargestellt.

4 Systemspezifikation

Für die Spezifikation von terrestrischen Laserscannern werden von den Herstellern in den Datenblättern unterschiedlichste Angaben und Begrifflichkeiten verwendet. Dies macht es dem Nutzer schwer, verschiedene Systeme vergleichen und die Performance bewerten zu können. Im Hinblick auf die Genauigkeit werden im Folgenden Begriffe aus den Datenblättern verschiedener TLS zusammengetragen und erläutert. Es werden lediglich die Begriffe aus den Datenblättern verwendet, welche die Entfernung- und Richtungs-/Winkelmessung spezifizieren (siehe auch Gottwald 2009).

4.1 Validierung

Grundsätzlich ist es zwingend erforderlich, dass Laserscanner, die für vermessungstechnische Aufgaben verwendet werden sollen, die Möglichkeit für einen Spezifikationstest bieten. Es ist ratsam, diesen in regelmäßigen Abständen vor Messbeginn durchzuführen. Dies trägt zur Steigerung der Zuverlässigkeit von terrestrischen Laserscannern bei und gibt dem Anwender ein Hilfsmittel, die Spezifikation teilweise selbst zu jeder Zeit zu überprüfen.

4.2 Datenblätter

Im Bereich des Vermessungswesens werden Laserscannersysteme von verschiedensten Herstellern angeboten. Zu den bekanntesten Herstellern zählen: Rieg (Österreich), Optech (Kanada), Faro (USA), Trimble (USA), Topcon (Japan), Surphaser (USA), Zoller+Fröhlich (Deutschland) und Leica (Schweiz). Da die Spezifikationen der Messgenauigkeiten für Datenblätter nicht standardisiert sind (Gottwald 2009), werden dort verschiedenste Angaben und Begriffe verwendet (siehe hierzu Tab. 1). Die Genauigkeitsangaben werden in den Datenblättern üblicherweise als 1 Sigma-Werte ausgegeben, d.h. 68 % der Messwerte liegen innerhalb des angegebenen Genauigkeitsbereiches. Wichtig für den Nutzer ist zu verstehen, welche Bedeutungen diese Angaben haben. Grundsätzlich müssen für alle Laserscanner, die für vermessungstechnische Aufgaben genutzt werden sollen, Angaben hinsichtlich der Distanzmessgenauigkeit und der Winkel-/Richtungsmessgenauigkeit bekannt sein. Sind in den Datenblättern lediglich Angaben zur Präzision oder zur Auflösung dokumentiert, ist das für eine Beurteilung der Genauigkeit unzureichend.

4.2.1 Linearitätsfehler

Die Entfernungsmesseinheit des terrestrischen Laserscanners (EDM) wird auf einer Interferometerbahn kalibriert (vgl. hierzu Abschnitt 3.1).

Die für jede Position des Messschlittens berechneten Entfernungsunterschiede aus den Messwerten der Interferometerbahn und des EDMs, fließen in die Kalibrierung ein. Aus diesen systematischen Abweichungen werden die Kalibrierparameter des Korrekturmodells ermittelt. Über die Residuen E wird der im Datenblatt angegebene Linearitätsfehler E_{RMS} als RMS-Wert berechnet.

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N E_i^2}$$

Da die Residuen eine Distanzabhängigkeit aufweisen, stellt die Angabe des RMS-Wertes eine aussagekräftige Größe dar.

4.2.2 Entfernungsruschen

Wie jede physikalische Messung ist auch die Distanzmessung des EDMs mit einer rein zufälligen Unsicherheit, hier „Rauschen“ genannt, behaftet. Da sich die Messung auf die Auswertung des empfangenen Laserlichtes stützt, hängt das Rauschen von der Menge des empfangenen Lichtes und damit von der Entfernung EDM-Objekt, sowie der Objektfläche ab. Je geringer die Reflektivität

Tab. 1: Übersicht

Begriffe	Erläuterung
Genauigkeit (Accuracy)	Maß für die Abweichung zwischen einem Messergebnis und dem wahren Wert (Bezugswert)
Exaktheit	Im englischen Datenblatt wurde „Accuracy“ verwendet
Spezifikation der Winkel-/Richtungsmessgenauigkeit	
Richtungs-/Winkelgenauigkeit	Abweichung zwischen dem gemessenen und dem wahren Richtungs-/Winkelwert
Spezifikation der Distanzmessgenauigkeit	
Linearitätsfehler	Restliche Abweichung zwischen Soll-Entfernung und kalibriertem Entfernungsmesswert des TLS – berechnet als RMS-Wert (Abschnitt 4.2.1)
Entfernungsmessgenauigkeit (Ranging accuracy)	Abweichung zwischen dem gemessenen und dem wahren Entfernungsmesswert
Reichweitengenauigkeit	
Systematischer Entfernungfehler	Der maximal zu erwartende systematische Fehler der Entfernungsmessung
Spezifikation der Punktgenauigkeit	
3D-Punktgenauigkeit (3D point accuracy)	Maximaler Wert für die 3D-Punktgenauigkeit (Abschnitt 4.2.3)
3D-Lagegenauigkeit	$m_{3D} = \sqrt{(m_{\varphi} \cdot d)^2 + (m_{\theta} \cdot d)^2 + (m_d + \Delta_d + \Delta_{ppm})^2}$
Spezifikation der Distanzqualität	
Entfernungsruschen	Unsicherheit der Entfernungsmessung abhängig von der Objektentfernung und der Objektoberfläche (Abschnitt 4.2.2)
Weitere Angaben	
Wiederholgenauigkeit (Repeatability)	Älterer Begriff für Präzision
Präzision (Precision)	Beschreibt die Übereinstimmung von Messergebnissen, die unabhängig voneinander durch Wiederholungsmessungen unter vorgegebenen Bedingungen ermittelt wurden.
Auflösung (Resolution)	Kleinste nachweisbare Änderung eines Messwertes

tät des Objektes im Spektralbereich des ausgesandten Laserlichtes oder je weiter entfernt das Objekt, desto größer wird das Distanzrauschen. Die Meßrate (Distanzmessungen pro Sekunde: 1000 Messungen pro Sekunde = 1 KHz) ist ebenfalls wichtig: je schneller gemessen wird, desto weniger Zeit bleibt zum Mitteln, desto größer wird also das Rauschen. Speziell bei Hochgeschwindigkeits-Laserscannern, die bis über einer Million Messungen pro Sekunde (1000 KHz) aufnehmen, spielt dies eine entscheidende Rolle. Die Spezifikation des Distanzrauschens ER_{spec} ist deshalb nur unter Angabe der verwendeten Referenzmessrate F_{spec} aussagekräftig.

4.2.3 3D-Punktgenauigkeit

Aus den polaren Messergebnissen des terrestrischen Laserscanners werden die dreidimensionalen kartesischen Koordinaten x, y, z berechnet über

$$\begin{aligned} x &= d \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\theta), \\ y &= d \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\theta), \\ z &= d \cdot \sin(\theta), \end{aligned} \quad (1)$$

wobei d die kalibrierte gemessene Entfernung, φ den kalibrierten Drehwinkel und θ den kalibrierten Kippwinkel bezeichnen. Über Varianzfortpflanzung wird die 3D-Punktgenauigkeit m_{3D} wie folgt berechnet:

$$m_{3D} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} m_x^2 \\ m_y^2 \\ m_z^2 \end{bmatrix} = F \cdot C_U \cdot F^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial d} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial d} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \\ \frac{\partial z}{\partial d} & \frac{\partial z}{\partial \varphi} & \frac{\partial z}{\partial \theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_d^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_\varphi^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_\theta^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial d} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial d} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \\ \frac{\partial z}{\partial d} & \frac{\partial z}{\partial \varphi} & \frac{\partial z}{\partial \theta} \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

wobei m_G die Genauigkeiten der Werte G bezeichnen, z. B.: m_x = Genauigkeit der x -Koordinate. Die Jacobi-Matrix F enthält die partiellen Ableitungen. In der **Abb. 8** ist die 3D-Punktgenauigkeit für den gesamten Beobachtungsbereich eines TLS exemplarisch für eine Entfernung von 10 m dargestellt.

In der **Abb. 8** (rechts) wird ersichtlich, dass die 3D-Punktgenauigkeit nicht einheitlich für den gesamten Beobachtungsbereich des TLS ist. Der maximale Wert für die 3D-Punktgenauigkeit ergibt sich im Horizont der dargestellten Kugel, zu den Polen hin nimmt dieser Wert ab. In einigen TLS-Datenblättern wird

Beispielrechnung:

$$d = 10$$

$$m_\delta = m_\theta = 18'' = 8,7 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

$$m_d = m_D + \Delta_d + \Delta_{ppm}$$

$$m_d = 0,001 \text{ m}$$

$$\Delta_d = 0,0004 \text{ m}$$

$$\Delta_{ppm} = 10 \text{ ppm}$$

$$= 10 \cdot 10^{-6} \cdot d = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

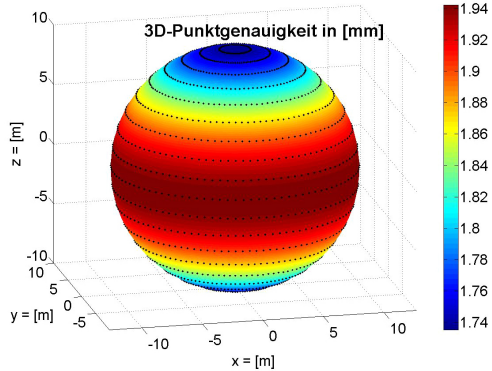


Abb. 8: 3D-Punktgenauigkeit, links verwendete Werte, rechts grafische Darstellung der 3D-Punktgenauigkeit, m_θ bezeichnet das konstante Glied und Δ_{ppm} das distanzabhängige Glied der Entfernungsmessgenauigkeit, Δ_d das Entfernungsrauschen.

der maximal Wert für die 3D-Punktgenauigkeit m_{3Dmax} für verschiedene Entfernungen d angegeben. Dieser lässt sich wie folgt berechnen:

$$m_{3Dmax} = \sqrt{(m_\phi \cdot d)^2 + (m_\theta \cdot d)^2 + m_d^2} \quad (4)$$

Entsprechend den Beispieldaten aus Abb. 8 ergibt sich über Formel (4) $m_{3Dmax} = 1,9 \text{ mm}$.

5 3D-Messunsicherheit

Die im Abschnitt 4.4 dargestellten Betrachtungen zur Genauigkeit beziehen sich auf die theoretisch erreichbaren 3D-Punktgenauigkeiten, basierend auf den Herstellerangaben. Im folgenden Kapitel wird diese Betrachtungsweise erweitert und die 3D-Messunsicherheit behandelt. Nach einer kurzen Einführung in die Thematik wird eine Übersicht hinsichtlich möglicher Unsicherheitseinflüsse gegeben.

5.1 Definition nach GUM

Um die Qualität und Zuverlässigkeit von Messdaten bewerten zu können, müssen diese stets mit Genauigkeitsangaben ausgegeben werden. Eine international anerkannte Genauigkeitsangaben ist die Messunsicherheit. Diese ist im Leitfa-den GUM (ISO/IEC 2008) beschrieben. Die Messunsicherheit nach GUM bietet

die Möglichkeit, Fehlereinflüsse mit verschiedenen Verteilungen gemeinsam zu berücksichtigen. Es werden hier Fehlereinflüsse nach Typ A und Typ B unterschieden. Fehlereinflüsse nach Typ A sind aufgrund von statistischen Erkenntnissen ermittelt. Als Typ B werden hingegen die Fehlereinflüsse bezeichnet, die basierend auf Erfahrungen, Informationen und Annahmen abgeschätzt werden.

5.2 Unsicherheitseinflüsse

Aus den Messwerten der terrestrischen Laserscanner werden die 3D-Koordinaten über Formel (1) berechnet. In Abschnitt 4.2.3 wird die 3D-Punktgenauigkeit basierend auf Herstellerangaben dargestellt. Diese Herstellerspezifikationen machen allerdings nur einen Anteil an der Gesamtunsicherheit der 3D-Koordinaten aus. In der [Abb. 9](#) werden verschiedenste Unsicherheitseinflüsse zusammengetragen, die sich auf die Unsicherheit der aus den TLS-Messwerten berechneten 3D-Koordinaten auswirken können. Betrachtet wird hier die 3D-Punktwolke von einem Scanstandpunkt. Ausgespart sind Unsicherheitseinflüsse die bei der Weiterverarbeitung der Punktwolken relevant wären, beispielsweise würden Unsicherheitseinflüsse durch die Registrierung und Modellierung der Punktwolken zusätzlich berücksichtigt werden müssen.

Das Messsystem selbst liefert Messwerte mit vom Hersteller spezifizierten Genauigkeiten. Anwender sollten ausgewählte Spezifikationen durch einen vom Hersteller bereitgestellten Test in regelmäßigen Abständen überprüfen. Neben dem Messsystem hat das Messobjekt selbst einen Beitrag an der zu erwartenden Gesamtunsicherheit der 3D-Koordinaten. Sowohl die geometrischen Objekteigenschaften, als auch die Objekt Oberfläche sind hier relevant.

Abhängig von der Oberflächenstruktur und dem Material sind Unsicherheitsbeiträge für die Entfernungsmessung zu berücksichtigen. Untersuchungen hinsichtlich Eindringtiefe und erhöhter Streuung wurden beispielweise in Vogtle et al. (2008) und Gordon (2008) durchgeführt. Abhängig von der Wellenlänge des Messsignals kann dieses in bestimmte Oberflächen eindringen und zu einer systematischen Verfälschung der Entfernungsmessung führen, ein kritisches Material ist beispielsweise Marmor. In den Untersuchungen wurde auch gezeigt, dass die Objektentfernung, der Auftreffwinkel und die Reflektivität der Objekt Oberfläche einen direkten Einfluss auf das Entfernungsmessrauschen haben. Die sich hieraus ergebenden Unsicherheitseinflüsse, könnten, wie in Wujanz et al. (2017) beschrieben, über intensitätsbasierte stochastische Modelle abgebildet werden.

Einen weiteren Einfluss auf die Unsicherheit der 3D-Koordinaten nimmt indirekt auch der Anwender selbst. Die Messrate und die Auflösung des Scans muss im Hinblick auf die Messanforderung entsprechend der Objekt Oberfläche

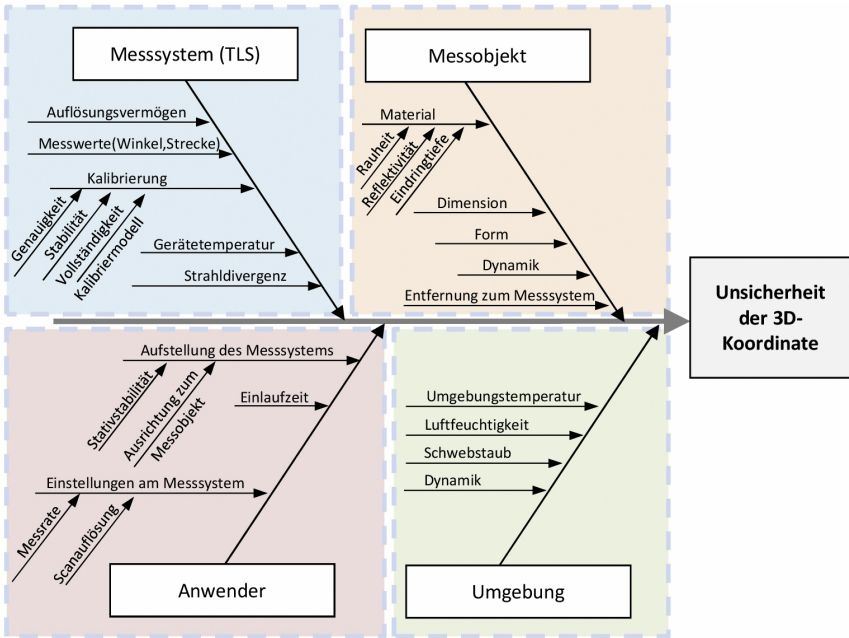


Abb. 9: Übersicht zu Unsicherheitseinflüssen auf 3D-Koordinaten

und der Objektentfernung intelligent gewählt werden. Darüber hinaus muss der Anwender darauf achten, dass das Messsystem während des Scanvorganges stabil gelagert ist.

Einige TLS haben Zweiachskompensatoren verbaut, die eine Neigungsänderung während des Scanvorganges erfassen und in einem gewissen Bereich rechnerisch korrigieren können. Einsinkbewegungen von Stativen sind hier jedoch sehr kritisch und nicht korrigierbar. Die Verwendung des Zweiachskompensators bietet die Möglichkeit die Zuverlässigkeit der Scandaten zu erhöhen, indem die Bewegung des Scanners während des gesamten Scanvorganges aufgezeichnet wird. Werden kritische Bewegungen des Scanners erfasst, wird der Anwender gewarnt und die Messung kann direkt wiederholt werden.

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird die Funktionsweise der terrestrischen Laserscanner am Beispiel des IMAGERS® 5016 erläutert. Dem schließt sich die Darstellung der Werkskalibrierung an, die aufgrund der Komplexität nur exemplarisch dargestellt wird.

Die zusammengetragenen Begrifflichkeiten, über die TLS-Hersteller ihre Systeme in den Datenblättern spezifizieren, sollen zeigen, wie vielseitig und teilweise irreführend die verwendete Terminologie ist.

Terrestrische Laserscanner werden von vielen Anwendern als BlackBox-Systeme angesehen, deren Messdaten blind vertraut wird. Um die Messergebnisse jedoch korrekt auswerten und interpretieren zu können, darf der Anwender das vermessungstechnische Denken auch beim Einsatz von TLS nicht ablegen.

Literatur

- Böhler, W., Bordas Vicent, M., Marbs, A. (2003): Investigating laser scanner accuracy. In: Proceedings of XIXth CIPA Symposium, Antalya, Türkei.
- Gordon, B. (2008): Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner. Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität.
- Gottwald, R., Heister, H., Staiger, R. (2009): Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern – eine Standortbestimmung. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 2/2009, 134. Jg., 88–96.
- Hennes, M. (2013): Zum Umgang mit Unsicherheiten bei geodätischen Mess- und Auswertverfahren. In: DVW e. V. (Hrsg.): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswertverfahren. DVW-Schriftenreihe, Band 71, Augsburg, 25–46.
- Holst, C. (2019): Terrestrisches Laserscanning 2019: Von großen Chancen, großen Herausforderungen und großen Radioteleskopen. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 2/2019, 143. Jg., 94–108. DOI: [10.12902/zfv-0256-2019](https://doi.org/10.12902/zfv-0256-2019).
- ISO/IEC (2008): Guide to the expression of uncertainty of measurement. ISO/IEC Guide 98-3 Uncertainty of measurement – Part 3.
- Joekel, R., Stober, M., Huep, W. (2008): Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. 5. Auflage, Heidelberg.
- Kern, F. (2011): Praktische Erfahrung bei der TLS-Prüfung. 4. Hamburger Anwendungsforum Terrestrisches Laserscanning am 23.06.2011, HafenCity Universität Hamburg. Presentation. www.geomatik-hamburg.de/tls/tls2011, letzter Zugriff 09/2019.
- Voegtle, T., Schwab, I., Landes, T. (2008): Influences of different materials on the measurements of a terrestrial laser scanner (TLS). In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37, 1061–1066.
- Wujanz, D. (2019): Araneo: Bestimmung eines erweiterten Unsicherheitsbudgets für die Deformationsmessung basierend auf terrestrischen Laserscans. AVN, 3/2019.
- Wujanz, D., Burger, M., Mettenleiter, M., Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 125, 146–155.

Kontakt

Susanne Lipkowski | Markus Mettenleiter
 Zoller+Fröhlich GmbH, Simoniustrasse 22, 88239 Wangen im Allgäu
s.lipkowski@zofre.de

TLS-Kalibrierung: in-situ und/oder a priori?

Christoph Holst | Tomislav Medić | Martin Blome | Heiner Kuhlmann

1 Motivation

Abb. 1 stellt den Aufbau eines terrestrischen Laserscanners (TLS) schematisch dar. Terrestrische Laserscans werden, ähnlich wie tachymetrische Messungen, durch konstruktionsbedingte instrumentelle Abweichungen verfälscht. Bezugnehmend auf Abb. 1 könnte z. B. der rotierende Spiegel eine Neigungsabweichung

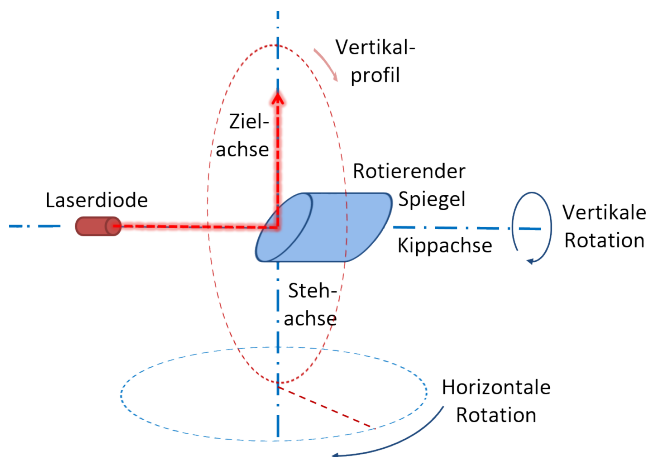


Abb. 1:
Schematischer
Aufbau eines
TLS

Holst 2019, Medić et al.
2017

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 (Muralikrishnan et al. 2015) listet 18 mögliche Abweichungsursachen auf, wobei sich diese auf Konstruktionsabweichungen und interne Abweichungen der Winkelencoder und der Distanzmesseinheit aufteilen.

Zwar erlauben es messtechnisch gesehen einige TLS, Messobjekte wiederholt in unterschiedlichen Messlagen 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 (Holst 2019).

Als Konsequenz weisen alle Messpunkte systematische Abweichungen auf, die für hochgenaue Anwendungen nicht zu vernachlässigen sind. [Abb. 2](#) zeigt beispielsweise die eindeutig systematisch verteilte räumliche Differenz (M3C2-Punktwolkenvergleich) zwischen zwei Laserscans der Leica ScanStation P50. Aufgrund der Ausdehnung des Objekts – es handelt sich um eine Maschinenhalle, die das später beschriebene Kalibrierfeld beherbergt – sind im ersten Laserscan einzelne Objektteile in erster Lage aufgenommen wurden, wiederum

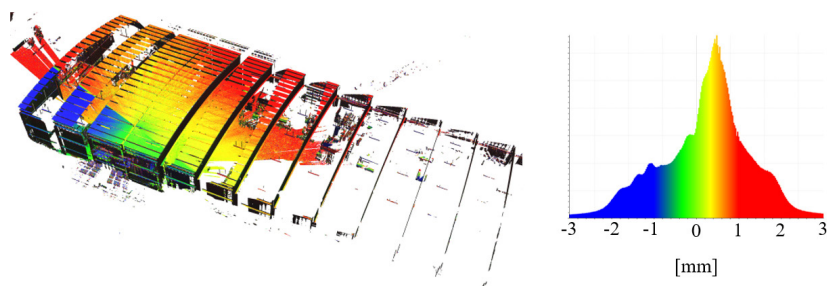


Abb. 2: M3C2-Punktwolkenvergleich zwischen zwei Laserscans einer Maschinenhalle, jeweils aufgenommen in Lage 1 und Lage 2

andere in zweiter Lage. Hierfür hat sich der Laserscanner horizontal von 0° bis 180° gedreht. Für den zweiten Laserscan wurde der Messbereich horizontal auf 180° bis 360° gesetzt, sodass alle Objektteile in zum ersten Laserscan unterschiedlicher Messlage aufgenommen wurden. Der jeweilige Wechsel zwischen Lage 1 und Lage 2 ist durch den Vorzeichenwechsel der systematischen Abweichungen erkennbar. Die Messdistanzen betragen ca. fünf bis 70 Meter. Die resultierenden Abweichungen von bis zu ± 3 mm sind zwar innerhalb der Spezifikationen des Herstellers. Dennoch ist deutlich zu erkennen, dass diese Systematiken für Geometrieanalysen der Wand im Millimeterbereich relevant werden könnten.

Da die in [Abb. 2](#) dargestellten Auswirkungen instrumenteller Abweichungen nicht in einer punktbasierter Vollsatzauswertung eliminiert werden können, treten gerade beim Laserscanning 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 Prototyp eines solchen TLS-Prüffeldes auf,

Holst et al. (2018a) 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 herstellenseitig kalibriert (Holst et al. 2016), regelmäßige Kalibrierungen sind jedoch aufgrund der fehlenden Vollsatzauswertung wichtig, falls konstant hohe Genauigkeiten erzielt werden sollen.

Dieser Artikel widmet sich der TLS-Kalibrierung. Hierbei werden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, um die Auswirkungen instrumenteller Messabweichungen rechnerisch zu minimieren. Insbesondere werden dabei zwei unterschiedliche Konzepte anhand von empirischen Ergebnissen diskutiert: Die a priori-Kalibrierung von TLS in extra errichteten Kalibrierfeldern und die in-situ-Kalibrierung während der Messaufgabe. Es wird insbesondere besprochen, welche Vor- und Nachteile beide Konzepte haben und wann sich die Durchführung von nutzerseitigen von a priori- und/oder in-situ-Kalibrierungen lohnt.

Die folgenden Abschnitte 3 bis 5 besprechen dabei sowohl die grundsätzlichen Ideen der beiden Konzepte, ihre Vor- und Nachteile, mögliche Realisierungen und ihren potenziellen Erfolg bei der Reduktion instrumenteller Abweichungen. Abschnitt 2 erläutert vorab Grundlagen zur TLS-Kalibrierung an sich.

2 TLS-Kalibrierung: Grundlagen und Entwicklungen

Nach Heister (2000) ist es das Ziel einer Kalibrierung, den Zusammenhang zwischen den ausgegebenen Werten eines Messsystems und dem wahren Wert der Messgröße herzustellen. Hierbei wird der Sollwert in der Regel durch Vergleichsnormale oder Kalibrieranlagen bereitgestellt, wobei eine Rückführung auf die nationalen Standards nachzuweisen ist. Das Ergebnis einer Kalibrierung umfasst sowohl Kalibrierparameter und Kalibrierfunktionen als auch die Schätzung der verbleibenden Messabweichungen. Diese Kalibrierung sollte regelmäßig durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass veränderbare Eigenschaften einzelner Systemkomponenten erfasst werden. Woschitz und Heister (2016) führen diese Erläuterungen noch detaillierter aus.

Damit ein Messinstrument also mit einer geringen Messunsicherheit messen kann, muss es kalibriert werden. Hersteller terrestrischer Laserscanner setzen

dies auch nach Abschluss des Herstellungsprozesses und vor Auslieferung des Messgeräts um: So wird in der Regel jeder einzelne TLS werkskalibriert (Achssystem nach [Abb. 1](#) und Distanzmesseinheit) und die verbleibende Messunsicherheit quantifiziert (z. B. Mettenleiter et al. 2015). Dies wird dem Kunden bescheinigt durch Ausgabe eines Kalibrierzertifikats. Die meisten Hersteller empfehlen dem Kunden, diese Kalibrierung regelmäßig durchzuführen, um die o. g. veränderbaren Eigenschaften einzelner Systemkomponenten in der Werkskalibrierung berücksichtigen zu können. Diese zeitlich veränderbaren Eigenschaften können nämlich dazu führen, dass Kalibrierparameter ihren Wert über die Zeit signifikant ändern (Lichti 2007, siehe auch Abschnitt 3).

Trotz dieser Möglichkeiten der Herstellerkalibrierung wächst der Bedarf nach nutzerseitigen Kalibrierungen. Dies hat vor allem zwei Gründe:

1. Eine Werkskalibrierung dauert inkl. Transport des Instruments mindestens einige Tage. Während dieser Zeit ist der TLS also nicht einsetzbar. Zudem ist eine Werkskalibrierung in der Regel mit etwa vierstelligen Geldsummen verbunden¹.
2. Obwohl die Werkskalibrierung dazu führt, dass der Laserscanner unmittelbar danach innerhalb seiner Spezifikationen arbeitet, können bei hochgenauen Anwendungen Restsystematiken negativen Einfluss auf die Datenanalyse haben (siehe auch [Abb. 2](#)).

Diese Restsystematiken können bei nutzerseitigen Kalibrierungen bei geeigneter Durchführung der Kalibrierung weiter minimiert werden. Gründe hierfür sind zum einen, dass der Nutzer seinen TLS unmittelbar vor (a priori) oder auch während (in-situ) der Messaufgabe kalibrieren könnte. Demnach sind zum einen im besten Fall alle veränderbaren Eigenschaften einzelner Systemkomponenten durch die zeitlich sehr aktuelle Kalibrierung erfasst worden. Zum anderen kann der Nutzer die Kalibrierung, die im Rahmen der Kalibrierfunktionen und Messanordnung immer nur eine Approximation der bestmöglichen Realisierung sein kann, an die konkreten Anforderungen der folgenden Messaufgabe bestmöglich anpassen. Eine Übersicht über die nutzerseitigen Strategien zur TLS-Kalibrierung geben Holst et al. (2016).

Nutzerkalibrierungen werden in der Regel sehr ähnlich zu einer Herstellerkalibrierung durchgeführt. In beiden Fällen finden zunehmend Systemkalibrierungen Anwendung, im Gegensatz zu Komponentenkabrierungen. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen Hersteller- und Nutzerkalibrierung ist jedoch, dass die zweitgenannten abweichend von der Beschreibung nach Heister (2000) in vielen Fällen als Selbstkalibrierung (siehe auch Woschitz und Heister

¹ Einige Hersteller bieten auch Supportverträge an, in denen eine jährliche Werkskalibrierung enthalten ist.

2016) durchgeführt werden. Auch Hersteller implementieren in die Software der Laserscanner zunehmend die Möglichkeit zur vereinfachten Selbstkalibrierung (z. B. FARO: On-Site Compensation; Leica Geosystems: Check & Adjust).

Bei einer Selbstkalibrierung werden die Kalibrierparameter auf Basis einer Vielzahl von Beobachtungen geschätzt, ohne dass ein Sollwert bzw. Vergleichsnormale mit Rückführung auf nationale Standards vorliegt. Als Konsequenz sind bei diesen Realisierungen – auch abhängig von der konkreten geometrischen Umsetzung – nicht alle Kalibrierparameter schätzbar, wie z. B. der Maßstab der Distanzmessung.

Diese Strategien zur (Selbst-)Kalibrierung sollten immer in regelmäßigen Intervallen oder nach besonderen Ereignissen durchgeführt werden. In jedem Fall werden sie vor der eigentlichen Messaufgabe des Prüflings, für die gewisse Genauigkeitsanforderungen eingehalten werden sollen, durchgeführt. Sie sind also als a priori-Kalibrierung zu verstehen (siehe Abschnitt 3).

Im Gegensatz dazu steht die nutzerseitige in-situ-Selbstkalibrierung (Abschnitt 4). Da die Kalibrierung zeitgleich mit der interessierten Messung, deren Beobachtungen von Kalibrierrestabweichungen befreit werden sollen, durchgeführt wird, spielen hier veränderbare Eigenschaften einzelner Systemkomponenten kaum eine Rolle.

3 A priori-Kalibrierung in Kalibrierfeldern

Die a priori-Kalibrierung lässt sich mit unterschiedlichen Strategien durchführen (Abschnitt 3.1). Abschnitt 3.2 beschreibt die Realisierung am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn und Abschnitt 3.3 empirische Ergebnisse zu Kalibrierungen und zeitlichen Änderungen der Ergebnisse.

3.1 Möglichkeiten zur Durchführung der a priori-Kalibrierung

Nutzerseitige a priori-Kalibrierungen basieren auf wiederholten Messungen von verschiedenen Standpunkten und/oder in zwei Lagen, wobei Zielzeichen (Medić et al. 2017), Ebenen (Rietdorf et al. 2004), Zylinder (Chan und Lichti 2012), und/oder aus den Scans nachträglich detektierte radiometrische Merkmale (Medić et al. 2019a) erfasst werden. Deren Position wird über eine Netzausgleichung bzw. Bündelausgleichung in einem übergeordneten Koordinatensystem zusammen mit den Kalibrierparametern geschätzt; hierbei ist nach Medić et al. (2019c) das stochastische Modell von großer Bedeutung. Holst et al. (2016) geben einen ausführlicheren Überblick.

3.2 Kalibrierfeld am Institut für Geodäsie und Geoinformation

Das Kalibrierfeld zur a priori-Kalibrierung von TLS besteht aus 14 Zielzeichen, die in einem Messvolumen von 25 m × 20 m × 8 m angebracht sind. Sechs dieser Zielzeichen sind auf Kippachshöhe, acht von ihnen sind auf circa 8 m Höhe installiert. Diese Zielzeichen werden von zwei Standpunkten jeweils in zwei Lagen gescannt, wobei die beiden Standpunkte etwa 20 m entfernt voneinander liegen. Der gesamte Kalibrierprozess dauert etwa eine Stunde. Weitere Einzelheiten zur Anordnung sind Medić et al. (2019d) zu entnehmen.

Zur Kalibrierung werden zehn Parameter geschätzt (Tab. 1), wobei diese die Streckenmessung r_j^i , Horizontalwinkelmessung φ_j^i und Vertikalwinkelmessung θ_j^i , jeweils von Standpunkt j zum Zielpunkt i , mit $\Delta r_j^i, \Delta \varphi_j^i, \Delta \theta_j^i$ beeinflussen:

$$\Delta r_j^i = x_2 \sin(\theta_j^i) + x_{10} \tag{1}$$

$$\Delta \varphi_j^i = \frac{x_{1z}}{r_j^i \tan(\theta_j^i)} + \frac{x_3}{r_j^i \sin(\theta_j^i)} + \frac{x_{5z-7}}{\tan(\theta_j^i)} + \frac{2x_6}{\sin(\theta_j^i)} + \frac{x_{1n}}{r_j^i} \tag{2}$$

$$\Delta \theta_j^i = \frac{x_{1n+2} \cos(\theta_j^i)}{r_j^i} + x_4 + x_{5n} \cos(\theta_j^i) - \frac{x_{1z} \sin(\theta_j^i)}{r_j^i} - x_{5z} \sin(\theta_j^i) \tag{3}$$

Tab. 1: Kalibrierparameter des Kalibrierfelds der Universität Bonn

Beschreibung	Parameter
Horizontal beam offset	x_{1n}
Vertical beam offset	x_{1z}
Horizontal axis offset	x_2
Mirror offset	x_3
Vertical index offset (Höhenindexabweichung)	x_4
Horizontal beam tilt	x_{5n}
Vertical beam tilt (Kippachsabweichung)	x_{5z}
Mirror tilt (Zielachsabweichung)	x_6
Horizontal axis error (Kippachsabweichung)	x_7
Rangefinder offset (Nullpunktabweichung)	x_{10}

Hierbei sind die in [Tab. 1](#) kursiv dargestellten Parameter von geringerer Relevanz, da sie sich nur in geringerem Maße in systematischen Abweichungen in der Punktwolke niederschlagen. Die fünf nicht kursiv dargestellten Parameter sind dagegen die mit der größten Auswirkung, wie es auch bei der Tachymetrie der Fall ist². [Medić et al. \(2019b\)](#) analysieren die Wichtigkeit dieser Kalibrierparameter und die Sensitivität des Kalibrierfelds zur Schätzung dieser Parameter.

3.3 Empirische Ergebnisse von a priori-Kalibrierungen

[Abb. 3](#) und [Abb. 4](#) zeigen die geschätzten Zielachs- und Höhenindexabweichungen eines Langzeitversuches, in dem eine Leica ScanStation P50 über einen Zeitraum von drei Monaten insgesamt an acht Tagen bis zu fünfmal im o. g. Kalibrierfeld kalibriert wurde. Beide Parameter können im Kalibrierfeld mit einer Standardabweichung von etwa 0,5 Zoll geschätzt werden.

Diese Ergebnisse von Zielachs- und Höhenindexabweichung veranschaulichen zwei Effekte:

- Zwischen den unterschiedlichen Kalibriertagen liegen signifikante systematische Abweichungen von einigen Bogensekunden zwischen den geschätzten Parametern vor.
- Die aufeinanderfolgenden Kalibrierungen (bis zu fünfmal, siehe Rechtsachsen in [Abb. 3](#) und [Abb. 4](#)) führen zu einem – teilweise linearen – Trend von bis zu etwa zwei Bogensekunden innerhalb der geschätzten Parameter.

Der zweite Effekt ist der Aufwärmphase des Laserscanners zuzuschreiben. Durch seine Aufwärmung verändern sich die dargestellte Zielachsabweichung offensichtlich systematisch; Für die Höhenindexabweichung ist das auf Basis dieser Daten nicht eindeutig zu klären. Um den ersten Effekt näher zu klären, zeigt [Abb. 5](#) die geschätzten Höhenindex- und Zielachsabweichung der jeweils ersten Tageskalibrierung abhängig von der Durchschnittstemperatur des jeweiligen Tages. Hier ist zu erkennen, dass die systematischen Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Kalibriertagen offensichtlich auf Änderungen der Außentemperatur zurückzuführen sind. Ein linearer Trend kann hier ebenfalls erahnt werden. Es ist zu beachten, dass diese Aussagen auch auf weitere Kalibrierparameter, nicht aber auf alle übertragbar sind.

² Es ist zu beachten, dass die Parameter x_{sz} und x_7 – beide entsprechen der Kippachsabweichung in der Tachymetrie – aufgrund starker funktionaler Ähnlichkeit einmal kombiniert und einmal separat in den Gl. (2) und (3) auftauchen.

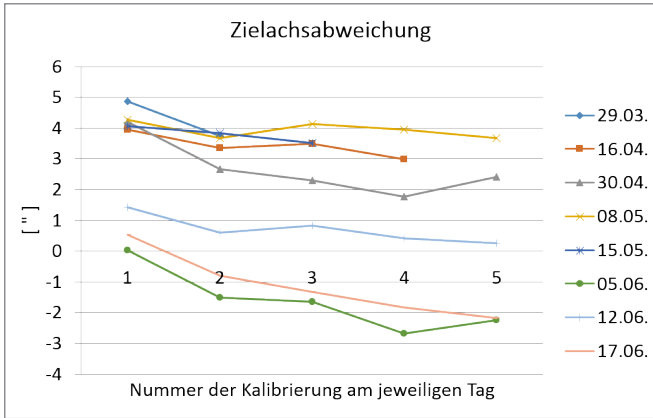


Abb. 3: In einem Langzeitversuch geschätzte Zielachsabweichung der Leica ScanStation P50

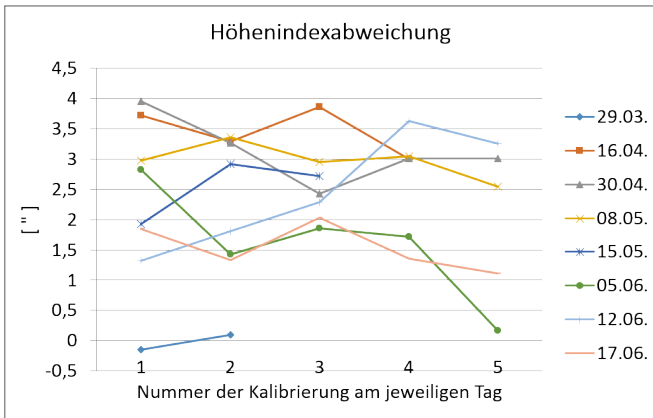


Abb. 4: In einem Langzeitversuch geschätzte Höhenindexabweichung der Leica ScanStation P50

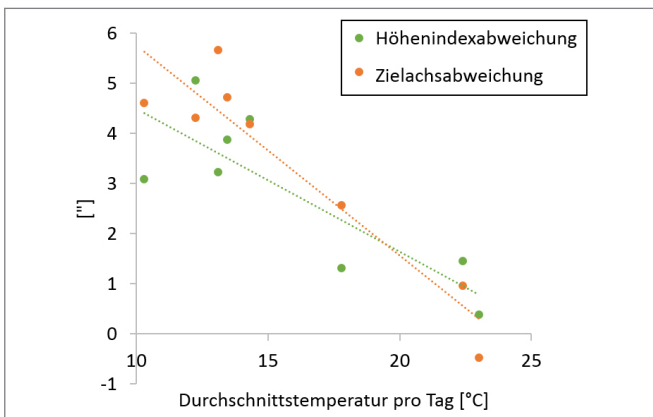


Abb. 5: In einer a priori-Kalibrierung geschätzte Höhenindex- und Zielachsabweichung abhängig von der durchschnittlichen Tagestemperatur

3.4 Erfolg der empirischen a priori-Kalibrierungen

Da es für den Nutzer schwierig ist, die Richtigkeit der Kalibrierparameter aufgrund fehlender Sollwerte abzuschätzen, ziehen wir als Erfolg der Kalibrierung die räumlichen Differenzen zwischen Zwei-Lagen-Scans, analog zu [Abb. 2](#), heran. Bei einer erfolgreichen Kalibrierung sollten die in [Abb. 2](#) dargestellten systematischen Abweichungen demnach minimiert sein.

[Abb. 6](#) zeigt die Punktwolkendifferenzen der Zwei-Lagen-Scans, aufgenommen am 16.4.2019, wobei die Scans unmittelbar davor a priori mit Hilfe unseres Kalibrieransatzes kalibriert wurden. Die zugehörige Zielachs- und Höhenindexabweichung sind in [Abb. 3](#) und [Abb. 4](#) dargestellt. Es ist erkennbar, dass der räumliche Versatz in den Differenzen nahezu herausgerechnet wurde. Zudem sind die Differenzen normalverteilt mit einer signifikant geringeren Standardabweichung als in [Abb. 2](#).

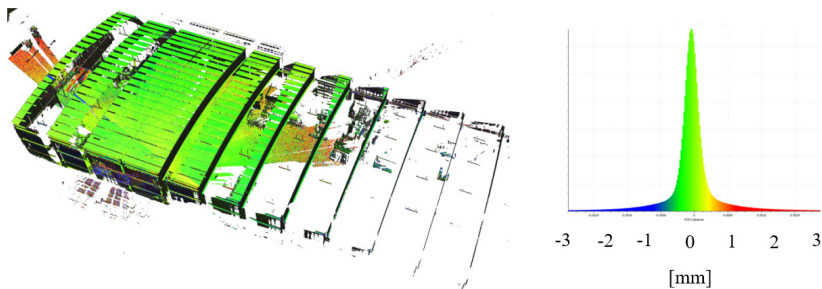


Abb. 6: M3C2-Punktwolkenvergleich zwischen zwei Laserscans einer Maschinenhalle, jeweils aufgenommen am 16.4.2019 in Lage 1 und Lage 2 mit der Leica ScanStation P50, mit a priori-Kalibrierung am 16.4.2019

In [Abb. 7](#) wurden die zu [Abb. 6](#) identischen Scans rechnerisch korrigiert. Diesmal jedoch mit Kalibrierparametern vom 29.3.2019 (auch teilweise in [Abb. 3](#) und [Abb. 4](#) dargestellt). Zwar sind auch jetzt spürbar geringere Differenzen als in [Abb. 2](#) zu sehen. Dennoch ist der Erfolg der Kalibrierung geringer als in [Abb. 6](#). Die 18 Tage alten Kalibrierparameter geben die sich mittlerweile veränderten Eigenschaften einzelner Systemkomponenten anscheinend nur noch unzureichend wieder.

Dass die Unterschiede in den Ergebnissen nur relativ gering sind, ist zum Großteil damit zu begründen, dass die Temperaturunterschiede zwischen dem 29.3.2019 und dem 16.4.2019 im Schnitt nur etwa 1 °C betragen. Dennoch wird deutlich, dass zur Beurteilung, ob eine bereits durchgeführte a priori-Kalibrierung für meine nächste Messaufgabe ausreichend ist, entscheidend ist, ob die

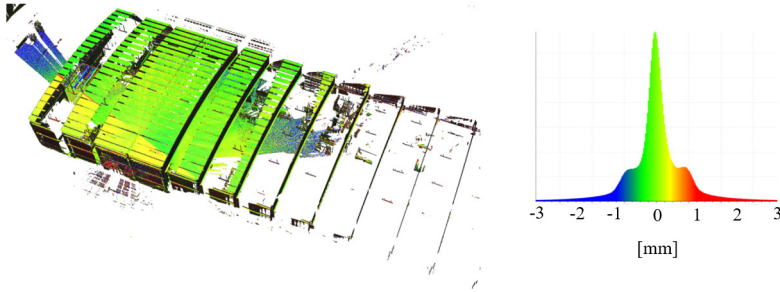


Abb. 7: M3C2-Punktwolkenvergleich zwischen zwei Laserscans einer Maschinenhalle, jeweils aufgenommen am 16.4.2019 in Lage 1 und Lage 2 mit der Leica ScanStation P50, mit a priori-Kalibrierung am 29.3.2019 (18 Tage alte Kalibrierparameter)

Kalibrierparameter die derzeitigen Eigenschaften der Systemkomponenten noch korrekt beschreiben.

4 In-situ-Kalibrierung während der Messaufgabe

Als in-situ wird eine Kalibrierung bezeichnet, wenn die Messungen, die eigentlich zur Bearbeitung der aktuellen Messaufgabe aufgenommen werden, auch zur Kalibrierung des Laserscanners verwendet werden. In-situ-Kalibrierungen werden also nicht in einem extra erschaffenen Kalibrierfeld durchgeführt, sondern sind je nach vorliegender Messaufgabe an die Gegebenheiten bestmöglich anzupassen. Abschnitt 4.1 beschreibt Möglichkeiten, wie eine in-situ-Kalibrierung durchgeführt werden kann, Abschnitt 4.2 den Erfolg einer Realisierung. Holst et al. (2018b, 2019) diskutieren die generellen Vorgehensweisen bei einer in-situ-Kalibrierung ausführlicher.

4.1 Möglichkeiten zur Durchführung der in-situ-Kalibrierung

In-situ-(Selbst-)Kalibrierungen wie auch die in Abschnitt 3 beschriebenen a priori-Kalibrierungen bauen darauf auf, die durch instrumentelle Abweichungen auftretenden systematischen Abweichungen in den Messelementen zu extrahieren und zu parametrisieren. Auch hier werden also Parameter geschätzt. Das Ziel dieser in-situ-Kalibrierung ist aber nicht, möglichst lang gültige Kalibrierparameter mit hoher Präzision zu bestimmen, sondern lediglich, die Messungen bestmöglich von instrumentellen Abweichungen zu befreien.

Daher ist der Begriff in-situ-Kalibrierung nicht im Sinne einer nach Heister (2000) definierten Kalibrierung zu verstehen, die darauf abzielt, alle instrumen-

tellen Abweichungen zu identifizieren und erwartungstreu zu schätzen. Auch hat eine in-situ-Kalibrierung in der Regel nicht den Anspruch, mechanisch korrekte Zusammenhänge zwischen den vom Messsystem ausgegebenen Werten und den wahren Werten herzustellen. Lediglich soll die Analyse der aktuell aufgenommenen Messungen nicht negativ von einer unzureichenden a priori-Kalibrierung beeinflusst werden. Da diese Vorgehensweise in vielen Fällen zu einer signifikanten Reduktion systematischer Messabweichungen geführt hat, wird sie wissenschaftlich aktuell breit diskutiert (z. B. Abbas et al. 2017, Holst et al. 2019).

Methodisch basieren in-situ-Kalibrierungen darauf, dass aus unterschiedlichen Scans automatisiert identische Bereiche extrahiert werden. Dies kann entweder über das Erkennen von punkthaften Merkmalen, z. B. im Distanz- oder Intensitätenbild, realisiert werden (Medić et al. 2019a) oder über das Erkennen geometrischer Objekte, z. B. Ebenen (Rietdorf et al. 2004) oder komplexerer Körper (Holst et al. 2018b). Werden diese identischen Bereiche in zwei Lagen und/oder von unterschiedlichen Standpunkten gescannt, können analog zur a priori-Kalibrierung alle instrumentellen Abweichungen, die sich in systematischen Abweichungen in der Ausgleichung niederschlagen, parametrisiert und damit in das funktionale Modell der Ausgleichung mit aufgenommen werden. Holst et al. (2019) diskutieren dies ausführlicher.

4.2 Erfolg der in-situ-Kalibrierung mit Nutzung von Punktmerkmalen

Für die aktuelle Studie wurde eine ScanStation P20 in-situ kalibriert. Grundlagen bilden Laserscans, aufgenommen in zwei Lagen von einem einzigen Standpunkt. Das gemessene Objekt ist die Kalibrierhalle, die wie ein Abschnitt 3 beschrieben auch zur a priori-Kalibrierung von Laserscannern verwendet wird. Abweichend von Abschnitt 3 werden jetzt jedoch keine Zielzeichen extrahiert, sondern aus den Scans werden automatisiert Features mit dem Förstner-Operator extrahiert und daraufbasierend alle für diese Scans relevanten Kalibrierparameter aus Gl. (1) bis (3) geschätzt (Medić et al. 2019a).

Abb. 8 zeigt die Ergebnisse vor (oben) und nach (unten) der Kalibrierung, links jeweils die räumlichen Differenzen als Histogramm und rechts die identischen Differenzen bei Betrachtung des gemessenen Dachs der Kalibrierhalle. Analog zu Abb. 2, 6 und 7 ist der Erfolg der Kalibrierung durch die signifikante Minimierung der systematischen Abweichungen erkennbar.

Bei diesen Ergebnissen ist sicherlich zu beachten, dass diese Messkonfiguration für eine in-situ-Kalibrierung sehr gutmütig ist, da sie geometrisch nahezu identisch mit der vorher beschriebenen a priori-Kalibrierung aufgrund iden-

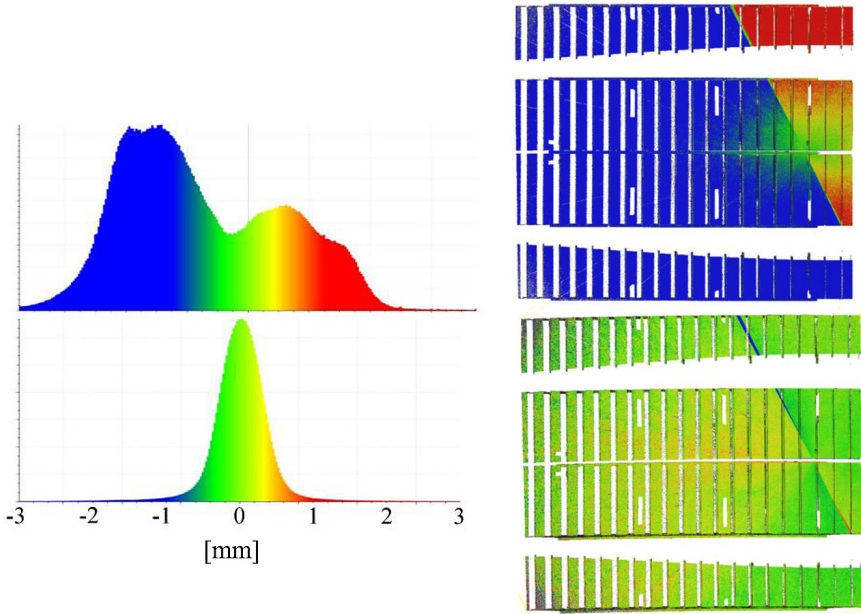


Abb. 8: M3C2-Punktwolkenvergleich ohne Kalibrierung (oben) und mit in-situ-Kalibrierung; links: Histogramm, rechts: Scans des Dachs einer Kalibrierhalle (Mediç et al. 2019a)

tischer Dimensionen des Messobjekts (wenn auch einmal repräsentiert durch Zielzeichen und einmal durch Features) ist.

4.3 Erfolg der in-situ-Kalibrierung mit Nutzung von geometrischen Objekten

Dass in-situ-Kalibrierungen aber auch bei weniger gutmütigen Anwendungen zu einer signifikanten Minimierung instrumenteller Messabweichungen führen können, zeigt Abb. 9. Hier wurde der Hauptreflektor eines Radioteleskops mehrfach in veränderter Messkonfiguration kopfüber mit einer Leica ScanStation P20 gescannt (Holst et al. 2015). Da immer Bereiche des Hauptreflektors im lokalen Zenit des Laserscanners lagen (Schnittpunkt der beiden schwarzen Linien in Abb. 9) – wo Zielachs- und Kippachsabweichung bekanntermaßen maximal wirken –, liegen hohe systematische Abweichungen von bis zu ± 5 mm vor. Wird der Laserscanner über eine Bündelausgleichung in-situ kalibriert, wobei der Hauptreflektor selber geometrisch approximiert wird und somit als identischer Bereich zwischen den Scans fungiert, so sind alle wesentlichen instrumentelle

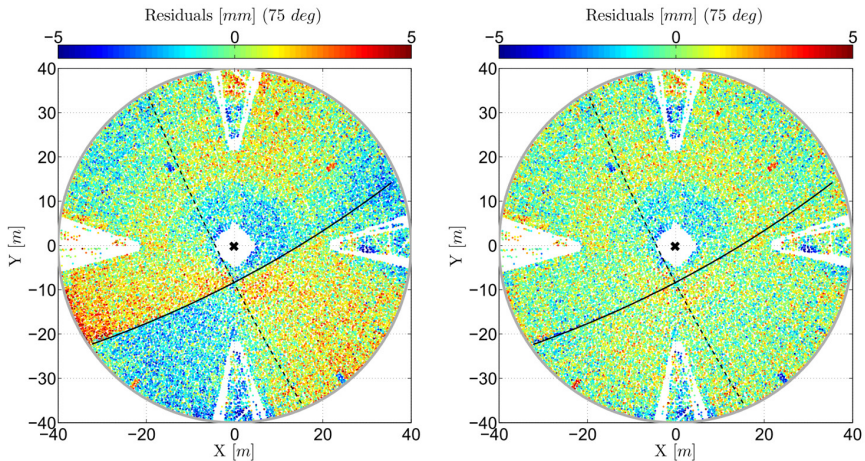


Abb. 9: Residuen bei Approximation des Hauptreflektors eines Radioteleskops ohne Kalibrierung (links) und mit in-situ-Kalibrierung (rechts) Holst et al. 2015

Systematiken aus der Ausgleichung entfernt (Abb. 8 rechts). Holst et al. (2018b, 2019) zeigen dies ausführlicher.

5 Diskussion

Konstruktionsbedingte instrumentelle Abweichungen terrestrischer Laserscanner führen zu systematischen Messabweichungen ähnlich denjenigen eines Tachymeters. Um diese zu minimieren, können TLS kalibriert werden. Neben der Werkskalibrierung des Herstellers treten zunehmend Nutzerkalibrierungen in das Blickfeld der Wissenschaft. Diese können als a priori-(Selbst-)Kalibrierung oder als in-situ-(Selbst-)Kalibrierung realisiert werden. Hierbei werden je nach Realisierung weder Vergleichsnormale verwendet, noch zwangsweise der vollständige Zusammenhang zwischen den ausgegebenen Werten eines Messsystems und dem wahren Wert der Messgröße hergestellt. Diese Nutzerkalibrierungen weichen also gegebenenfalls von den ursprünglichen Definitionen einer Kalibrierung, z. B. nach Heister (2000) oder Woschitz und Heister (2016), ab.

Bei einer a priori-Kalibrierung ist es das Ziel, alle relevanten Kalibrierparameter mit hoher Präzision zu schätzen. Diese Parameter sollen die Eigenschaften der Systemkomponenten möglichst lange repräsentieren, sodass die Kalibrierparameter auf andere Anwendungen übertragbar sind. Langzeitkalibrierungen zeigen aber, dass dies nur begrenzt gelingt. Der Einfluss von Raum- und Sensortemperatur muss hier allerdings noch eingängiger untersucht werden.

Die in-situ-Kalibrierung zielt auch darauf ab, systematische Abweichungen in der Punktwolke zu minimieren. Dies bedeutet aber nicht zwangsläufig, dass alle signifikant vorliegenden Konstruktionsabweichungen parametrisiert werden. Lediglich diejenigen Parameter sind relevant, die die aktuelle Messung – in-situ – negativ beeinflussen. Da die Kalibrierung zum Zeitpunkt der eigentlich relevanten Messaufgabe durchgeführt wird, parametrisiert die Kalibrierung die aktuell vorliegenden Eigenschaften der Systemkomponenten. Damit diese Kalibrierung gelingt, müssen punkthafte Merkmale oder geometrische Parameter detektierbar sein und in einem wohlüberlegten Mess- und Schätzprozess zur Minimierung der Messabweichungen verwendet werden. Der Erfolg dieser Vorgehensweise ist stark von der aktuellen Realisierung abhängig.

6 Fazit

- Terrestrische Laserscanner werden ab Werk kalibriert, damit die Spezifikationen des Herstellers eingehalten werden. In der Regel werden die Spezifikationen sogar übertroffen.
- Um die dennoch verbleibenden Restsystematiken weiter zu reduzieren, können Nutzerkalibrierungen sinnvoll sein.
- Nutzerkalibrierungen können a priori über Kalibrierfelder realisiert werden. Hier ist die zeitliche Stabilität der Kalibrierparameter entscheidend für die Übertragung der Parameter auf eine spätere Messaufgabe.
- Alternativ können in-situ-Kalibrierungen durchgeführt werden. Hierfür sind jedoch abhängig von der Messaufgabe geeignete Mess- und Auswertekonzepte zu entwickeln. Der Erfolg ist vorab oftmals nur aufwendig abschätzbar.
- Eine Kombination aus (zeitlich naher) a priori-Kalibrierung und in-situ-Kalibrierung liefert demnach die beste Chance, Geometrieanalysen frei von konstruktionsbedingten instrumentellen Messabweichungen durchführen zu können.

Literatur

- Abbas, M. A., Lichti, D. D., Chong, A. K., Setan, H., Majid, Z., Lau, C. L., Idris, K. M., Ariff, M. F. M. (2017): Improvements to the accuracy of prototype ship models measurement method using terrestrial laser scanner. *Measurement*, 100, 301–310.
- Chan, T. O., Lichti, D. D. (2012): Cylinder-Based Self-Calibration of a Panoramic Terrestrial Laser Scanner. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci* 39: 169–174.
- Heister, H. (2000): Zur Überprüfung Geodätischer Instrumente. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation der Universität der Bundeswehr München*, 60, Bd. 1, 69–89.

- Holst, C. (2019): Terrestrisches Laserscanning 2019: Von großen Chancen, großen Herausforderungen und großen Radioteleskopen. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 2/2019, 143. Jg., 94–108. DOI: [10.12902/zfv-0256-2019](https://doi.org/10.12902/zfv-0256-2019).
- 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. (2018a): 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.
- Holst, C., Medić, T., Kuhlmann, H. (2018b): Dealing with systematic laser scanner errors due to misalignment at area-based deformation analyses. *J. Appl. Geod.* 12, 169–185.
- Holst, C., Medić, T., Nothnagel, A., Kuhlmann, H. (2019): Analyzing shape deformation and rigid body movement of structures using commonly misaligned laser scanners: the radio telescope case, 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15–17 May 2019, Athens, Greece.
- Holst, C., Neuner, H., Wieser, A., Wunderlich, T., Kuhlmann, H. (2016): Calibration of Terrestrial Laser Scanners. *Allgem. Verm. Nachr.* 6/2016, 147–157, Berlin.
- 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.
- Lichti, D.D. (2007): Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 61, 307–324.
- Medić, T., Holst, C., Janßen, J., Kuhlmann, H. (2019c): Empirical stochastic model of detected target centroids: Influence on registration and calibration of terrestrial laser scanners. *Journal of Applied Geodesy*, Volume 13, Issue 3, Pages 179–197, ISSN (Online) 1862–9024.
- Medić, T., Holst, C., Kuhlmann, H. (2017): Towards System Calibration of Panoramic Laser Scanners from a Single Station. *Sensors*, 17 (5), 1145.
- Medić, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2019a): Automatic in-situ self-calibration of a panoramic TLS from a single station using 2D keypoints. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-2/W5, 413–420.
- Medić, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2019b): Sensitivity Analysis and Minimal Measurement Geometry for the Target-Based Calibration of High-End Panoramic Terrestrial Laser Scanners. *Remote Sens.*, 11 (13), 1519.
- Medić, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2019d): Designing a cost-efficient calibration field for the target-based self-calibration of panoramic terrestrial laser scanners: A case study, in preparation.
- Mettenleiter, M., Härtl, F., Kresser, S., Fröhlich, C. (2015): *Laserscanning. Die Bibliothek der Technik*, Nr. 371, Verlag Moderne Industrie, ISBN 978-3-86236-077-2.
- 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.
- Rietdorf, A., Gielsdorf, F., Gruendig, L. (2004): A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners. Proc. FIG Work. Week. Athens, Greece 1–10.
- Woschitz, H., Heister, H. (2016): Überprüfung und Kalibrierung der Messmittel in der Geodäsie. Handbuch der Geodäsie: 5 Bände, Band „Ingenieurgeodäsie“, W. Schwarz (Hrsg.), Springer, Berlin Heidelberg, 1–59.
- Wunderlich, T., Wasmeier, P., Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T., Reidl, F. (2013): Objective specifications of terrestrial laserscanners – a contribution of the geodetic laboratory at the Technische Universität München. Blue Series Books at the Chair of Geodesy, Volume 21, 03/2013, Technische Universität München.

Kontakt

Christoph Holst | Tomislav Medić | Martin Blome | Heiner Kuhlmann
Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation
Nußallee 17, 53115 Bonn
c.holst@igg.uni-bonn.de

Session 3: 3D-Punktwolke und dann?

Vollautomatische TLS-Datenregistrierung in der Praxis – Vermessung eines Parkhauses in Fulda

Nikolaus Studnicka | Christoph Effkemann

1 Zusammenfassung

Bereits seit fast zwei Jahrzehnten wird das terrestrische Laserscanning zur Vermessung von Bauwerken eingesetzt. So nach und nach wurden die Laserscanner mit kalibrierten Kameras (Zehetner und Studnicka 2005) und einer Vielzahl von Sensoren komplettiert. Unterstützt durch neu entwickelte Algorithmen ist man dadurch heute in der Lage, in kurzer Zeit eine Vielzahl von Scanpositionen aufzunehmen. Die Scandaten können ohne Zuhilfenahme von Verknüpfungspunkten automatisch zusammengefügt und anschließend ausgewertet werden.

Diese Arbeit soll am Beispiel der Vermessung eines Parkhauses zeigen, wie der Ablauf von der Datenaufnahme bis zum fertigen dreidimensionalen Modell vonstattengehen kann. Die äußeren Bedingungen sind bei so einem Objekt für eine Scannervermessung dabei durchaus herausfordernd, da vor allem in den unteren Etagen des Parkhauses der GNSS (Global Navigation Satellite System) Empfang und die Lichtverhältnisse stark eingeschränkt sind. Außerdem stellen üblicherweise wiederkehrende Elemente eines Gebäudes hohe Anforderungen an die automatische und korrekte Registrierung der Scandaten.

Gerade aber die Garagenvermessung wird in naher Zukunft an Praxisbezug gewinnen. Für die Instandhaltung der Gebäude sind hochgenaue Vermessungen notwendig. Auch werden 3D-Modelle – zum Beispiel für die autonome Mobilität – immer wichtiger. In nicht allzu ferner Zukunft sollten selbstfahrende Fahrzeuge eigenständig ihre Parkplätze ansteuern können.

2 Vermessung mittels terrestrischem Laserscanner

Am Vormittag vor dem 177. DVW-Seminar „Terrestrisches Laserscanning 2018“ wurden am 13. Dezember 2018 Scandaten des Parkhauses vor dem Hotel Esperanto in Fulda aufgenommen. Dieses verfügt über vier Etagen, wobei das oberste Parkdeck kein Dach aufweist. Die überdachte Fläche beträgt circa 13.000 Quadratmeter.

2.1 Datenerfassung

Für die Vermessung wurde der moderne RIEGL VZ-400i Laserscanner (RIEGL 2019) eingesetzt (Tab. 1, Abb. 1). Er zeichnet sich neben der hochpräzisen Messtechnik vor allem auch durch seine zahlreichen eingebauten Sensoren aus: Beschleunigungssensoren, magnetischer Feldsensor, IMU (Inertial Measuring Unit), Barometer, Temperatursensor, Luftfeuchtesensor und ein RTK (Real Time Kinematic)-fähiger GNSS-Empfänger. Bei dieser konkreten Messkampagne



Abb. 1: RIEGL VZ-400i Laserscanner bei der Datenaufnahme im Parkhaus

wurde jedoch auf die Verwendung von GNSS-Korrekturdaten verzichtet, die Genauigkeit der absoluten Positionsmessung lag also bei circa zwei Metern, die Genauigkeit der relativen Positionsmessung zwischen den Scanpositionen im Millimeterbereich.

Die Vielzahl von Sensoren bietet gemeinsam mit den geeigneten Algorithmen gute Möglichkeiten die Scanpositionen möglichst rasch und genau zu registrieren, also lagerichtig zusammenzusetzen. Damit dies auch von vielen unterschiedlichen Anwendern des Scanners korrekt, robust und zuverlässig wiederholbar eingesetzt werden kann, wurde die Messvorschrift im Feld stark vereinfacht.

- Die Bedienung im Feld wurde auf einen Tastendruck pro Scanposition reduziert. Das Weiterschalten in die nächste Scanposition wird dabei durch die Neigungssensoren automatisch angestoßen.

Tab. 1: Spezifikationen des terrestrischen Laserscanners

Laser Scanner	RIEGL VZ-400i
Sichtfeld des Laser Scanners	100° vertikal × 360° horizontal
Scanmuster	„Panorama40“
Winkelauflösung	0,040° (7 mm in 10 m Distanz)
Messungen/Scan	circa 22,5 Millionen
Präzision	3 mm in 100 m Distanz (siehe Datenblatt)
Durchschnittliche Zeit pro Scanposition (inklusive Umstellung)	circa 81 Sekunden
Aufgesetzte Kamera	Nikon D850 mit 14 mm-Objektiv
Anzahl von Fotos pro Scanposition	5

- Die Scanpositionen sollen sich möglichst in einer Reihe aneinanderfügen.
- Das Umstellen des Dreibeinstativs soll vor allem bei schlechtem GNSS-Empfang maximal 20 bis 30 Sekunden dauern. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Daten der eingebauten inertialen Messeinheit (IMU) nicht zu stark driften.
- Die ersten Scanpositionen werden bei gutem GNSS-Empfang durchgeführt und man arbeitet sich Schritt für Schritt in das Innere des Bauwerkes vor.

„Panorama40“ wurde als Standard-Scanmuster gewählt, dies entspricht einer Winkelauflösung von 0,040° (7 mm in 10 m Abstand). Die reine Scanzeit beträgt mit diesen Einstellungen 45 Sekunden pro Position. Für ein terrestrisches Scanprojekt können also in dieser Konstellation in einem Acht-Stunden-Arbeitstag mehr als 400 einzelne Laserscans aufgenommen werden.

Insgesamt wurden bei dieser Vermessung 165 Scanpositionen in und um das Parkhaus aufgenommen. Diese Arbeit wurde von einem Operator in 3 Stunden und 42 Minuten durchgeführt. Der durchschnittliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Scanpositionen betrug circa acht Meter. Diese relativ geringe Distanz ermöglicht es, die sogenannten Scanschatten auf ein Minimum zu reduzieren und ausreichende Überlappungsbereiche für die automatische Registrierung zu gewährleisten. So wird das Gebäude sehr komplett vermessen und der anschließende Registrierprozess kann zuverlässig und automatisch – und damit zeiteffizient – durchgeführt werden. Es wird im Allgemeinen empfohlen, vereinzelte Kontrollpunkte zusätzlich mit einer Totalstation zu vermessen. Auf die dabei zum Einsatz kommenden retro-reflektierenden Folien wurde bei diesem Projekt verzichtet.

2.2 Automatische Registrierung der Scanpositionen

Um die Scandaten für den nachfolgenden Registrierungsprozess vorzubereiten, wird die unregelmäßige Punktwolke in einem ersten Schritt in ein festes 3D-Raster – den „3D-Voxeldatensatz“ – umgerechnet. Die kritischen Parameter für die automatische Registrierung sind die Voxelgröße, die Anzahl der beteiligten Voxel und die automatische Anpassung an das Projekt. Die Voxelgröße kann manuell an das jeweilige Scan-Szenario angepasst werden (Tab. 2), kann aber auch automatisch durch den Algorithmus ausgewählt werden.

Ein Voxel wird nur dann erzeugt, wenn es von mindestens drei Scanpunkten belegt ist. So ist es möglich, Ebenen in diese Voxel zu schätzen. Für jedes Voxel werden der Mittelwert des Reflexionsvermögens, die Anzahl der Messpunkte und ein Formatattribut (Linie, Ebene, Volumen) gespeichert. Die maximale „Reichweite“ der Registrierung kann relativ einfach ermittelt werden. Wählt man zum Beispiel die Szene „innen, großräumig“, so werden bis in die Entfernung 0,1 Meter \times 512 Zellen = 51,2 Meter Voxel erstellt.

Tab. 2: Typische Voxelgröße und -anzahl der Voxel für die jeweiligen Scan-Szenarien

Szene	Voxel Größe	Anzahl der Voxel
innen, kleinräumig	0,05 m	512
innen, großräumig	0,10 m	512
außen städtisch	0,25 m	512
außen naturräumlich	0,50 m	512

Die folgenden Messdaten der einzelnen Scanpositionen werden für den Registrierungsprozess verwendet:

- GNSS-Position
- Orientierung durch Beschleunigungssensoren und Magnetfeldsensor (zuverlässiges Rollen und Neigen, unzuverlässiges Gieren)
- relative Position und Ausrichtung durch IMU-Messung in Bezug auf die vorherige Scanposition
- Barometer

Sie werden mit Referenzdaten von bereits registrierten Scanpositionen kombiniert, dem sogenannte „Projekt-Voxeldatensatz“.

Der Registrierungsprozess selbst findet dann zunächst im „Spektralraum“ statt, bekannt auch als „phase-only matched filtering“, wie in Ullrich (2017) vorgestellt. Dadurch sind die Scanpositionen in der Größenordnung einer Voxelgröße genau bestimmt, und die letzten beiden Scanpositionen werden



Abb. 2: Dreidimensionale Ansicht der registrierten Punktwolke

anschließend mithilfe extrahierter Ebenen auf wenige Millimeter genau registriert.

Diese Art von reflektorlosem Registrierungsverfahren wurde bereits 2017 (Ullrich 2017) konzipiert und seither in vielen realen Scanprojekten intensiv getestet. Sie zeichnet sich durch eine hohe Robustheit aus, vor allem wenn die Empfehlungen betreffend der Scankette und der Logistik des Scanprozesses eingehalten werden. Durch die Anwendung dieses Workflows können Hunderte von Scanpositionen zuverlässig und automatisch registriert werden (vgl. Abb. 2). Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass diese Registrierung auch am Laserscanner selber ablaufen kann, seit Ende 2019 sogar im „real-time“-Tempo.

Der gesamte Registrierprozess dauerte für dieses Projekt auf einem Standard-Computer circa 38 Minuten, also durchschnittlich 14 Sekunden pro Scanposition.

2.3 Blockausgleich von Scanpositionen

Nach erfolgreicher Registrierung aller Scanpositionen können in den Daten kleine Klaffungen entstehen, zum Beispiel wenn die durch eine Scankette gebildete Schleife geschlossen wird. Um diese Klaffungen zu kompensieren, wird der in der nativen RiSCAN PRO-Software implementierte neu entwickelte Algorithmus „Multi Station Adjustment 2“ (oder Blockausgleich) empfohlen. Dieser Algorithmus führt zu einer rigorosen Anpassung mittels Scandaten (GNSS-Messungen),

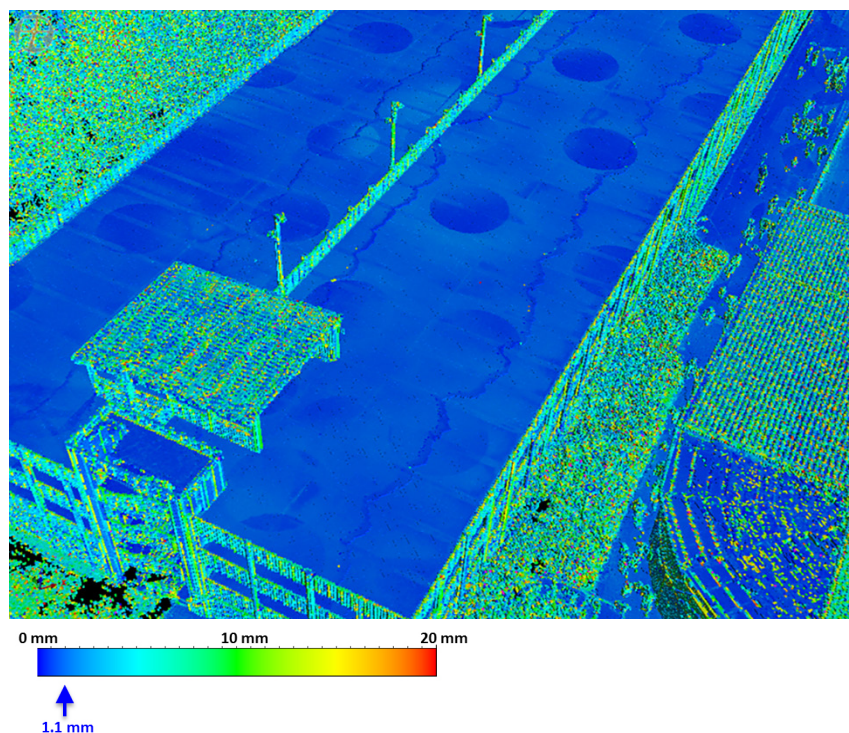


Abb. 3: 3D-Ansicht des resultierenden Voxeldatensatzes zur visuellen Überprüfung

Scanner-internen Sensordaten und allen verfügbaren Kontrollpunkten. Die durchschnittliche Berechnungszeit pro Scanposition betrug bei diesem Projekt etwa 14 Sekunden.

Die Scandaten können anschließend in der 3D-Ansicht des resultierenden Voxeldatensatzes visuell überprüft werden. Die Standardabweichung der resultierenden Ebenenschätzungen aus verschiedenen Scans innerhalb eines Voxels wird farbig dargestellt (Abb. 3). Die Abweichungen liegen in der Regel im Millimeterbereich. Abschließend wird automatisch ein detaillierter Bericht erstellt.

3 Dreidimensionale Modellierung

3.1 Art der Modellierung

Die Art der Modellierung hängt nicht nur von der Art der Daten, sondern vor allem vom Anwendungszweck ab. Der Detaillierungsgrad, eine Liste der zu

erfassenden Objekte und die Struktur des Modells sollten sinnvollerweise vor Beginn der Modellierung festliegen. Andernfalls kann die Auswertung schnell unwirtschaftlich werden. Der Bearbeitungsaufwand für ein As-Built-Modell mit wenigen Millimetergenauigkeit kann um ein Vielfaches höher sein als für ein schematisches Modell mit einer Genauigkeit von 1 bis 2 cm. Das Modell des Parkhauses wurde mit ca. 1 cm Genauigkeit erstellt. Das bedeutet, dass nicht immer die maximale Auflösung der Punktwolke von 1 bis 3 mm ausgenutzt wurde, sondern regelmäßig angeordnete Elemente wie z. B. Stahlstützen exakt senkrecht, parallel zum Gebäude und in gleichmäßigen Abständen generiert wurden. Nur konstruierte Objekte, die mehr als 1 cm von der Punktwolke abwichen, wurden anschließend verschoben oder gedreht.

Eine zu hohe Präzision kann dazu führen, dass Ansichtszeichnungen und Schnitte unübersichtlich werden. Zum Beispiel wird bei einer um wenige Millimeter schief stehenden Wand in einer automatisch generierten Grundrisszeichnung nicht nur die Schnittlinie als breite Linie dargestellt, sondern direkt daneben die durch die Schiefstellung nun sichtbar gewordene untere Kante als dünne Linie.

Würde man jede Stahlstütze des Parkhauses mit maximaler Präzision in die Punktwolke einpassen, könnte es im Extremfall vorkommen, dass in einer Schnittzeichnung sämtliche 40 hintereinanderliegende Stahlstützen teilweise dargestellt werden, weil sie nicht exakt orthogonal zur Schnittansicht ausgerichtet sind, sondern minimal von der Achse abweichen. Mit einer höheren Genauigkeit als gefordert zu modellieren, verlängert nicht nur die Zeit für die Erstellung des 3D-Modells, sondern führt zu Mehrarbeit für die manuelle Bereinigung der daraus abgeleiteten Zeichnungen. Effektiver ist es, mit einer noch ausreichenden Genauigkeit das Modell möglichst regelmäßig zu erstellen und Abweichungen zwischen dem Modell und der Punktwolke separat darzustellen.

3.2 Modellierung mit PHIDIAS

Für die Erstellung des Modells wurde PHIDIAS eingesetzt, eine Software, die es als Anwendung für MicroStation und den AECOSim Building Designer von Bentley Systems möglich macht, direkt BIM-Modelle aus Punktwolken und Fotos zu erzeugen. Die große Datenmenge erforderte eine Konvertierung der 3D-Punktwolken in das Pointools-Format POD. Dabei werden die Daten für schnellen Zugriff komprimiert und räumlich strukturiert. Die POD-Datei der Gesamtpunktwolke mit mehr als 1 Mrd. Punkte hat eine Größe von 12 GByte. Eine reduzierte Punktwolke mit 185 Mio. Punkten und 2 GByte Größe wurde zusätzlich erstellt, um bei Operationen mit dynamischer Ansichtsrotation die Aktualisierungsfrequenz zu erhöhen.

PHIDIAS kann für die Auswertung neben den 3D-Punktwolken auch die Fotos der mit dem Scanner gekoppelten Nikon D850 mit einer Auflösung von 45 Megapixeln verwenden. Die Fotos sind vor allem vorteilhaft, wenn Details, die in der Punktwolke nicht identifizierbar sind (wie z. B. Blechdicken), zu messen sind. Das Bild hilft oft auch bei der Interpretation der Objekte. Die Farbdarstellung ist natürlicher als die Intensitäts- und Reflektivitätsdarstellung der Scandaten und auch die Winkelauflösung ist mit 0,018 Grad besser als beim Scanner mit 0,040 Grad. [Abb. 4](#) zeigt die Überlagerung des Bildes mit den modellierten Stahlelementen.



Abb. 4: Bildauswertung von Details in PHIDIAS

Der überwiegende Anteil der Modellierung konnte allein anhand der Scandaten erfolgen. Dazu wurden horizontale oder vertikale Schnitte durch die Punktwolke gelegt und zweidimensionale Querschnitte von Bauteilen manuell gezeichnet oder aus der Bauteilbibliothek eingepasst und zu 3D-Volumenelementen extrudiert. Für die Darstellung der Scandaten stehen wie allgemein üblich verschiedene Darstellungsstile zur Verfügung, unter anderem Reflektivitätswerte in Graustufen oder Falschfarben oder die Echtfarbdarstellung der eingefärbten Punktwolke. Wenn es um die Erkennung von Tiefenunterschieden geht, ist dagegen die farbcodierte Darstellung der Tiefen effektiver. Relativ zu einer beliebigen Ebene, nicht zwingend die horizontale XY-Ebene, werden die Farben abhängig vom Abstand zur gewählten Ebene gesetzt. In der 2D-Darstellung sind danach Tiefenunterschiede sehr deutlich erkennbar ([Abb. 5](#)). Bereiche mit konstanter Tiefe sind einheitlich gefärbt, schräge Flächen bilden einen

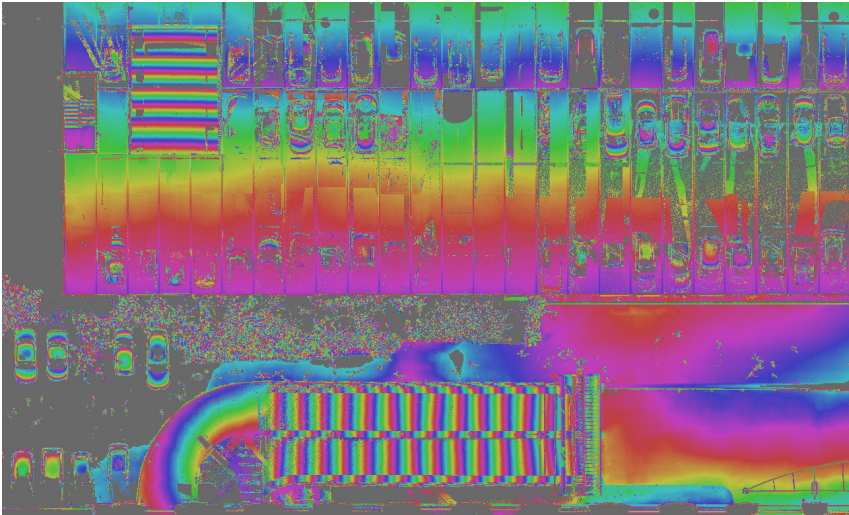


Abb. 5: Höhendcodierung mit Regenbogenfarbskala, Wiederholung nach 20 cm

gleichmäßigen Farbverlauf und Tiefensprünge machen sich mit Farbsprüngen bemerkbar. Ist der Tiefenunterschied größer als der gewählte Tiefenbereich, wird die Farbpalette mehrfach wiederholt. An der Wiederholfrequenz des Streifenmusters ist demnach die Steigung der Fläche ablesbar.

Die Genauigkeit der Modellierung ist sehr einfach und schnell überprüfbar, indem wie schon in Kapitel 3.1 angesprochen, der Abstand zwischen der Punktwolke und den Flächen- und Volumenelementen mit einer Regenbogenfarbskala visualisiert wird (Abb. 6).

Da die Modellierung direkt im Bentley AECOSim Building Designer erfolgte, sind für sämtliche Elemente direkt Bauteilbezeichnungen und Bauteilgruppen zugeordnet worden. Der Austausch mit BIM-Software andere Anbieter ist über den offenen Standard IFC (Industry Foundation Classes) möglich, in dem zusätzlich zur Geometrie auch Bauteilklassen und weitere Attribute enthalten sind.

Im Rahmen von Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen besteht aktuell ein großer Bedarf an der 3D-Dokumentation von Parkhäusern und anderen Stahlbetonbauwerken. Aufgrund von tausalzbedingter Korrosion gibt es zahlreiche Schäden, die häufig noch in analog geführten Bauwerksbüchern dokumentiert werden. Es wäre aber wesentlich effektiver und übersichtlicher, die Schadenskartierung basierend auf einem 3D-Modell digital durchzuführen (Effkemann 2019).

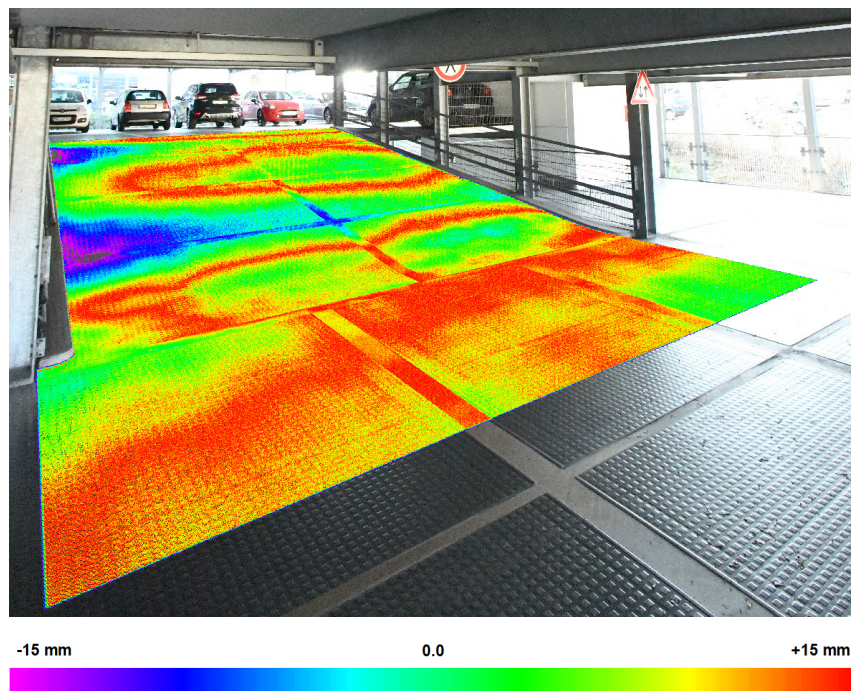


Abb. 6: Visualisierung der Abstände zwischen Modell und Scanpunkten

3.3 Ergebnisse

Der Gesamtaufwand für die Modellierung der wichtigsten Bauelemente (Stahlträger, Betondecken, Rampen, Wände, Treppenhäuser, Geländer) betrug ca. 30 Arbeitsstunden. Einige Objekte wie z.B. Elektroinstallationen, kleinere Leuchten, Regentraufen, Fahrbahnmarkierungen sind nicht enthalten (siehe [Abb. 7](#) und [Abb. 8](#)). Der Zeitaufwand kann selbstverständlich nicht direkt auf anders geartete Objekte übertragen werden. Nur unter der Voraussetzung, dass die Elemente entweder relativ simpel und regelmäßig angeordnet sind, oder dass komplexere Elemente schon in Bauteilbibliotheken vorliegen, kann man mit einer Leistung von mehr als 1100 m³ pro Stunde auswerten. Bei einem anderen Objekt, einem großen Fabrikgebäude, das bereits zahlreiche Umbauten hinter sich hatte, war die Situation vollkommen anders. Das Stahlträgerfachwerk war sehr komplex und unregelmäßig und die Ziegelmauerwände waren zu einem großen Teil schief und mit vielen Vor- und Rücksprüngen und Fassadenschmuck versehen. In dem Fall betrug die Leistung weniger als 400 m³ pro Stunde.

4 Fazit

Die Erstellung von BIM-Modellen von Bestandsbauwerken aus Laserscandaten kann sehr effektiv und wirtschaftlich sein. Mit BIM-Software ist es nicht nur möglich, die Geometrie der Modelle mithilfe von Bauteilbibliotheken effektiv zu rekonstruieren, sondern mit zusätzlichen attributiven und semantischen Informationen zu versehen, die für den Betrieb des Gebäudes wertvoll sein können.

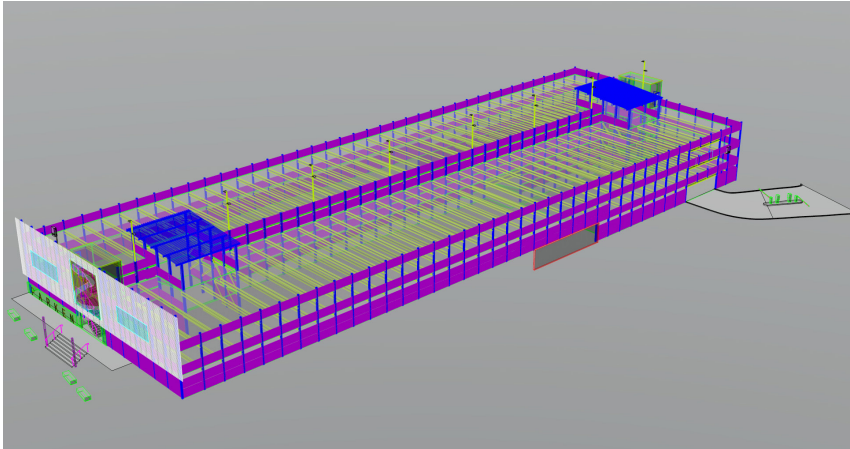


Abb. 7: Ansicht des Gesamtmodells

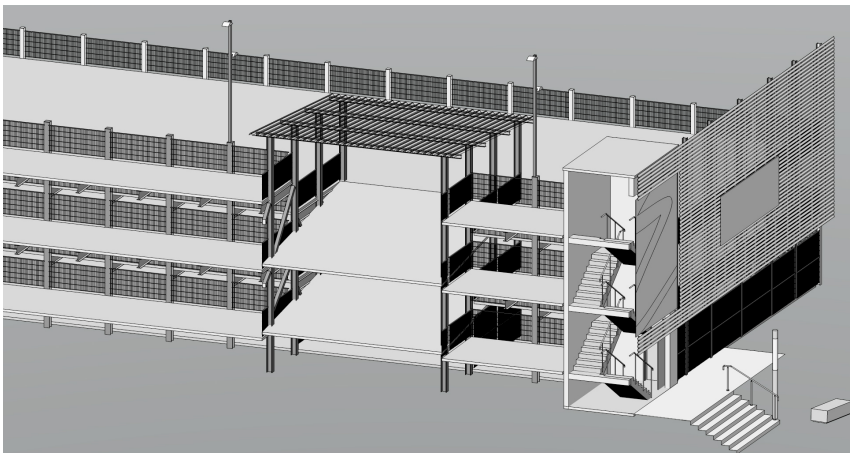


Abb. 8: Dynamischer Längsschnitt durch das Parkhausmodell

Literatur

- Effkemann, C. (2019): Anwendung von 3D-Laserscanning und Photogrammetrie zur as-built-Dokumentation von Gebäuden. In: DVW e.V. und Runder Tisch GIS e.V. (Hrsg.): Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0. www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2019/11_DVW-Merkblatt_LeitfadenGeodäsieundBIM_2019_0.pdf, letzter Zugriff 10/2019.
- RIEGL (2019): www.riegl.com, letzter Zugriff 10/2019.
- 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. <https://geodaesie.info/sr/terrestrisches-laserscanning-2017-tls-2017/7109/1950>.
- Zehetner, F., Studnicka N. (2005): Cultural heritage documentation by combining near-range photogrammetry and terrestrial laser scanning – St. Stephens Cathedral, Vienna. LACONA VI Proceedings, Vienna, Austria, Sept. 21–25, 2005, Lasers in the Conservation of Artworks. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-72310-7_67.

Kontakt

Nikolaus Studnicka
RIEGL Laser Measurement Systems GmbH
Riedenburgstraße 48, 3580 Horn
nstudnicka@riegl.com

Christoph Effkemann
PHOCAD GmbH
Heisterner Straße 9, 52379 Langerwehe
effkemann@phocad.de

Modellierung aus 3D-Punktwolken bei Infrastruktur- und Anlagenbauprojekten

Joscha Hüge | Kay-Michael Nichelmann | Christoph Crause

1 Einführung

Im Aufgabenspektrum der Ingenieurvermessung lässt sich ein wesentlicher Teil der Projekte den Bereichen der Infrastruktur bzw. des Anlagenbaus zuordnen. In beiden Aufgabenfeldern spielt die Erfassung dreidimensionaler Objekte eine entscheidende Rolle. In diesem Kontext nimmt das terrestrische Laserscanning (TLS), welches in der heutigen Zeit neben der Tachymetrie und dem Nivellement zum Standardinstrumentarium der Ingenieurvermessung gezählt werden kann, eine entscheidende Rolle ein. Mit dem sich stetig weiterentwickelnden Instrumentarium der 3D-Laserscanner ist es heutzutage problemlos möglich Infrastrukturbauwerke wie z. B. eine Autobahnbrücke oder industrielle Anlagen, wie beispielsweise ein Zementwerk, hochgenau dreidimensional zu erfassen. Nach der Erfassung des jeweiligen Messobjekts stellt sich jedoch die Frage nach der weiteren Auswertung der erzeugten Messdaten. Hierbei rückt nach der Registrierung bzw. der Verknüpfung der einzelnen Standpunkte zu einer Gesamtpunktwolke die Auswertung der Gesamtpunktwolke des jeweiligen Messobjekts in den Fokus. Der vorliegende Beitrag soll einen Eindruck davon vermitteln wie die Modellierung aus 3D-Punktwolken ablaufen kann. Dabei werden im Folgenden zwei Projekte des Vermessungsbüros RMK aus den Bereichen der Infrastruktur und des Anlagenbaus vorgestellt. Für jedes der vorgestellten Projekte erfolgt eine kurze Beschreibung der Aufgabenstellung sowie des eingesetzten Instrumentariums. Auf die Erfassung der Örtlichkeit sowie die Registrierung der Messdaten wird ebenfalls kurz eingegangen. Darauf aufbauend wird die durchgeführte Modellierung des Messobjekts detailliert beschrieben und näher auf die genutzten Softwareprodukte und Arbeitsmethoden eingegangen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die hier aufgeführten Arbeitsabläufe keine allgemeine Anleitung für die Auswertung von 3D-Punktwolken darstellen, sondern lediglich einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten einer 3D-Punktwolkenauswertung liefern sollen. Für jedes Projekt ist die entsprechende Auswertung auf die Anforderungen des Auftraggebers und die individuellen Charakteristika des Messobjekts anzupassen.

2 Projektbeispiele

Die folgenden Projektbeispiele des Vermessungsbüros RMK lassen sich in die Bereiche der Infrastruktur und des Anlagenbaus unterteilen. Für jeden dieser Bereiche wird ein aktuelles Projekt vorgestellt. Wie zuvor erwähnt, muss die Auswertung bzw. die Modellierung von 3D-Punktwolken dem Messobjekt bzw. den Anforderungen des Auftraggebers angepasst werden.

Dabei müssen im Rahmen der Projektbearbeitung insbesondere die folgenden Fragen geklärt werden:

- Welche Bereiche bzw. welche Objekte sind zu erfassen?
- In welcher Genauigkeit muss die Aufnahme der Örtlichkeit erfolgen?
- Welche der erfassten Elemente sind im Rahmen der Modellierung zu berücksichtigen?
- In welcher Genauigkeit sollen die einzelnen Elemente modelliert werden?
- Wird ein Flächen- oder ein Volumenmodell benötigt?
- Sind die Objekte mit Attributen zu versehen?
- In welchem Datenformat benötigt der Auftraggeber die modellierten Elemente?

Die Beantwortung dieser Fragen geht Hand in Hand mit der Auswahl des Messinstrumentariums sowie der zu verwendenden Auswertesoftware und bedingt somit den individuellen Charakter jedes einzelnen Messprojekts.

2.1 Infrastrukturprojekt: Bestandsmodellierung Huntebrücke

Projekte aus dem Bereich der Infrastruktur sind häufig durch eine große räumliche Ausdehnung gekennzeichnet. Dies trifft z. B. auf Brücken sowie auf Tunnel oder auch Bauwerke aus dem Bereich der Schifffahrt zu. Des Weiteren sind diese Ingenieurbauwerke in ein weitläufiges Verkehrsinfrastrukturnetz eingebunden und müssen daher zumeist im laufenden Betrieb aufgenommen werden. Diese Einschränkungen in der Aufnahme müssen bereits im Vorfeld für die resultierende Modellierung berücksichtigt werden. Im Folgenden wird die BIM-konforme Bestandsmodellierung der Huntebrücke als Teil der A29 bei Oldenburg näher erläutert.

Die Huntebrücke bildet einen 441 Meter langen Abschnitt der Bundesautobahn 29 östlich der Stadt Oldenburg (siehe [Abb. 1](#)). Seit ihrer Fertigstellung im Jahr 1978 überspannt die Brücke das Tal der unteren Hunte in einer Höhe von etwa 26 Metern. Das Bauwerk besteht aus zwei getrennten Überbauten und wird durch insgesamt 18 Doppelpfeiler in 9 Pfeilerreihen gestützt.



Abb. 1:
Huntebrücke
bei Oldenburg
(A29)

Eine Untersuchung des Bauwerks ergab, dass der bestehende Überbau durch einen Stahlverbundüberbau ersetzt werden muss, um auch den zukünftig zu erwartenden Verkehrsbelastungen standzuhalten. Die Widerlager sowie die Pfeiler inklusive ihrer Fundamente sollen in diesem Zusammenhang weiterverwendet werden. Die 3D-Bestandserfassung des Brückenbauwerks ist als Teil des Pilotprojekts der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr (NLStBV) für die Planungsmethodik BIM konzipiert. In diesem Kontext sollte das Ingenieurbauwerk sowie das umgebende Gelände durch RMK erfasst und ein digitales bauteilorientiertes Modell als Datengrundlage für Entwurfsplanung und Bauablaufplanung erstellt werden. Die Modellerstellung erfolgte dabei in Kooperation mit der Contelos GmbH.

2.1.1 Messtechnische Erfassung

Der Messbereich wurde von der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr im Vorfeld festgelegt. Dieser umfasste das gesamte Ingenieurbauwerk sowie das umgebende Gelände. Die Struktur der Huntebrücke sollte dabei sowohl von der Unterseite, als auch von der Oberseite erfasst werden. Zusätzlich sollten die vorhandenen Pfeilerköpfe sowie die Widerlagerinnenräume detailliert aufgenommen werden. Die Aufnahmegenaugigkeit wurde von Seiten des Auftraggebers dabei auf 1 cm festgelegt. Unter Berücksichtigung der vorgeschriebenen Genauigkeit und des definierten Messbereichs erfolgte die Auswahl des Messinstrumentariums.

Zum Einsatz kamen eine Leica ScanStation P30 sowie ein Leica BLK360 Laserscanner. Mit Hilfe der Leica P30 wurde das Bauwerk von unten und oben

in ca. 120 Standpunkten erfasst. Der BLK360 diente der Erfassung der Pfeilerköpfe und der Widerlagerinnenräumen in ungefähr 80 Standpunkten. Insgesamt wurde die Huntebrücke somit in etwa 200 Standpunkten messtechnisch erfasst.

2.1.2 Auswertung der Messdaten

Für die Auswertung der Messdaten wurden die Software Leica Cyclone sowie Leica Register360 verwendet. Die Messdaten der P30 wurden unter Verwendung von Schwarz-Weiß- und Kugel-Targets in Cyclone miteinander verknüpft. Zusätzlich erfolgte eine Georeferenzierung der Messdaten mit Hilfe tachymetrischer Koordinatenbestimmung ausgewählter Targets. Die Messdaten des BLK360 wurden in Register360 mittels Cloud-to-Cloud-Algorithmen verknüpft. Die Einbindung in die Messdaten der P30 erfolgte ebenfalls auf Cloud-to-Cloud-Basis. Für die weitere Bearbeitung der Messdaten wurde die erzeugte Gesamtpunktwolke in Cyclone ausgedünnt und in mehrere Abschnitte aufgeteilt um die Datenmenge zu reduzieren.

2.1.3 BIM-konforme Bestandsmodellierung

Die BIM-konforme Bestandsmodellierung erfolgte unter Einsatz diverser Softwarelösungen. Es wurden unter anderem Leica Cyclone und Autodesk Revit sowie das Leica Plug-In Cloudworx für Revit verwendet. Des Weiteren kamen Autodesk ReCap sowie die Revit Erweiterung Dynamo zum Einsatz. Für die Bestandserfassung sollten sämtliche in der Punktwolke sichtbaren Objekte anhand dieser modelliert werden. Die nicht sichtbaren Objekte wie beispielsweise die Fundamente der Brückenpfeiler sollten aus Bestandsplänen in das Modell integriert werden. Es ist von besonderer Bedeutung im Vorfeld der Auswertung gemeinsam mit dem Auftraggeber die zu modellierenden Objekte festzulegen, falls dies noch nicht im Zuge der Auftragserteilung erfolgt sein sollte. Des Weiteren muss neben der Messgenauigkeit auch eine Modellierungsgenauigkeit mit dem Auftraggeber abgestimmt werden. Sowohl Modellierungsumfang, als auch Modellierungsgenauigkeit sind von entscheidender Bedeutung um ein Bestandsmodell zu erzeugen, welches den Anforderungen des Auftraggebers entspricht. Auch der Auftraggeber ist hierbei in der Verantwortung eine Definition der Parameter vorzugeben, welche dem nachgeordneten Zweck des Modells entspricht. Es ist sowohl für Auftraggeber als auch für Auftragnehmer nicht zielführend ein Modell zu erzeugen, welches entweder weit über die Anforderungen an das Modell hinausgeht oder deutlich hinter den Erwartungen zurückbleibt. Für das hier vorgestellte Projekt sollte am Ende des Modellierungsprozesses ein BIM-konformes Volumenmodell des Bestands vorliegen.

Zu Beginn der Bestandsmodellierung wurde die vorliegende Gesamtpunktwolke des Brückenbauwerks in Cyclone bearbeitet. In diesem Zusammenhang wurden die Brückenpfeiler sowie der Brückenüberbau näher betrachtet. Cyclone bietet dem Anwender die Möglichkeit verschiedene benutzerdefinierte Zeichen- und Schnittebenen zu erzeugen. Diese Ebenen können anhand eines frei definierbaren Koordinatensystems oder auch anhand von bestehenden Objekten erstellt werden. Da die Punktwolke über die durchgeführte Georeferenzierung bereits im Zielkoordinatensystems der NLStBV vorlag wurden für die

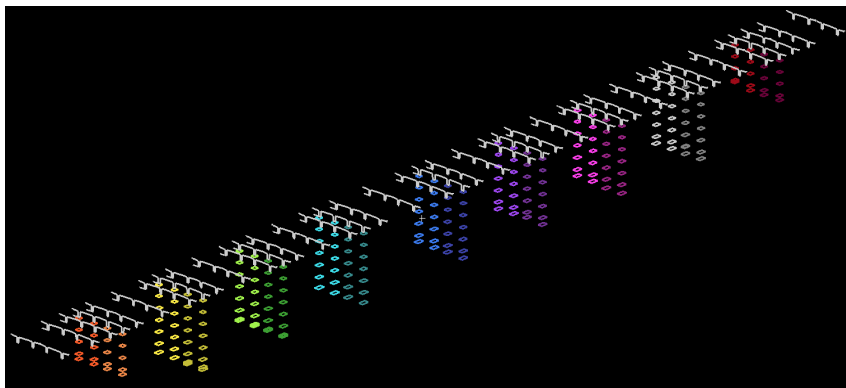


Abb. 2: In Leica Cyclone erfasste Geometrien der Brückenpfeiler und des Brückenüberbaus

Auswertung der Brückenpfeiler Horizontalebenen auf Basis des vorliegenden Koordinatensystems erzeugt. Diese Horizontalebenen wurden auf unterschiedlichen Höhen entlang der Brückenpfeiler angelegt. Innerhalb dieser Ebenen, welche gleichzeitig als Schnitt- und Zeichenebenen definiert wurden, konnte die Objektgeometrie der einzelnen Brückenpfeiler in den unterschiedlichen Höhen abdigitalisiert werden. Dazu bietet Cyclone dem Nutzer die Möglichkeit unterschiedlicher Zeichenfunktionen. Unter Verwendung der bereitgestellten Funktionen, in diesem Fall ein geschlossenes Polygon, konnte die Geometrie des Brückenpfeilers durch einen Linienzug approximiert werden. In diesem Zusammenhang spielt neben der bereits angesprochenen Modellierungsgenauigkeit die Generalisierung von Objektgeometrien eine Rolle. So ist es im Rahmen der Bestandsmodellierung unumgänglich Generalisierungen der Objektstruktur durchzuführen, um den Aufwand der Modellierung in einem angemessenen Rahmen zu halten. So ist z. B. auf Unebenheiten in Betonkonstruktionen hinzuweisen, welche innerhalb der Modellierungsgenauigkeit liegen würden, aber für den Zweck des Modells nicht relevant sind. Mit den hier vorgestellten Methoden wurden nacheinander die einzelnen Brückenpfeiler in unterschiedlichen Höhen abdigitalisiert. Am Ende dieses Arbeitsprozesses lag für jeden Pfeiler eine

Geometrieapproximation auf Basis der gezeichneten Linien vor. Für die Auswertung des Brückenüberbaus wurde ein benutzerdefiniertes Koordinatensystem angelegt, bei welchem eine Koordinatenachse entlang der Brückenachse ausgerichtet wurde. Mit Hilfe dieses temporären Koordinatensystems konnten vertikale Zeichen- und Schnittebenen entlang der Brückenachse konstruiert werden. Die Erfassung der Bauwerksstruktur erfolgte hierbei analog zur Approximation der Brückenpfeiler. Nach der Geometrieerfassung von Brückenpfeilern und Brückenüberbau ergibt sich das in [Abb. 2](#) dargestellte Bild.

Die Geometrieelemente wurden im Anschluss zur weiteren Modellierung des Brückenbauwerks im *coe*-Datenformat exportiert. Des Weiteren wurde auch die reduzierte und in Teilbereiche aufgeteilte Punktwolke zur weiteren Modellierung aus Cyclone im *pts*-Format exportiert.

Die weiterführende Modellierung erfolgte mit Autodesk Revit. Um die Punktwolke in Revit zu hinterlegen, wurde diese zunächst in Autodesk ReCap importiert und ins *rcp*-Datenformat umgewandelt. Die resultierenden *rcp*-Dateien für die einzelnen Punktwolkenabschnitte konnten dann im Anschluss in Revit importiert werden. Diese Variante ermöglichte es, die Bestandsmodellierung möglichst genau an der gemessenen Punktwolke durchzuführen. Hinzu kommt, dass für die Erstellung des 3D-Modells keine Regelgeometrien herangezogen werden konnten, da es sich um eine Modellierung des Bestands handelte. Auf Grund dessen wurde ein Großteil der Bauteile mit Hilfe von adaptiven Familien erzeugt. Revit wurde hierbei als Modellierungsprogramm genutzt, da es in diesem Bereich die meisten Konstruktionsmöglichkeiten bietet. Um eine zeitintensive manuelle Modellierung in einigen Bereichen zu umgehen, wurde zudem das visuelle Programmierungstool Dynamo verwendet. Dieses ermöglicht die automatische Erstellung von Geometrien über eine Schnittstelle zu Revit.

Zu Beginn der Modellierung in Revit wurde ein Raster angelegt, welches die Achse des Bauwerks und die jeweiligen Lagerachsen der Pfeiler und Widerlager beinhaltete. Des Weiteren wurde ein den Bestandsunterlagen entsprechendes Ebenensystem angelegt. Auf Basis des Rastersystems wurden im Anschluss Schnitte angelegt, um bestmögliche Konstruktionsebenen zu erzeugen. Im Anschluss an die Erstellung der Konstruktionsebenen wurden die bereits in Leica Cyclone erfassten Linienzüge betrachtet (siehe [Abb. 2](#)). Diese dienen als Grundlage für die semi-automatische Modellierung der Brückenpfeiler und des Brückenüberbaus mit Dynamo. In diesem Kontext wurden die erfassten Geometrien über das Plug-In Cloudworx für Revit von Leica, welches unter anderem den direkten Import von *coe*-Dateien in Revit ermöglicht, importiert. Für die Erzeugung der Brückenpfeiler sowie der Überbaukonstruktion wurde jeweils ein eigenes Dynamo-Skript erstellt.

Die Linienzüge eines einzelnen Pfeilers konnten vom erstellten Dynamo-Skript erfasst, sortiert und zu einem Volumenkörper verbunden werden.

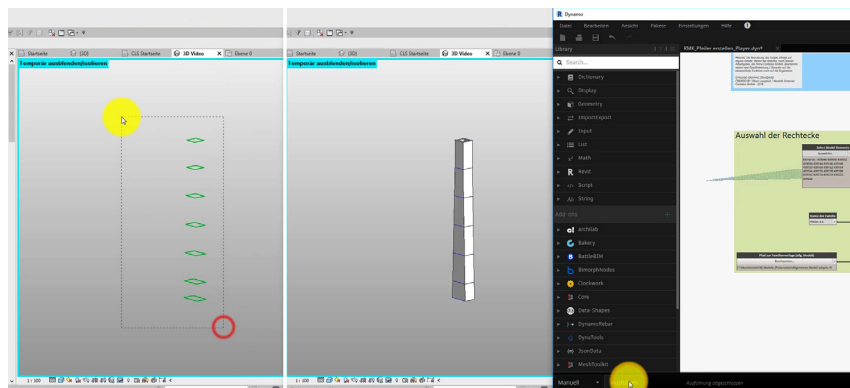


Abb. 3: Semi-automatische Erzeugung der Brückenpfeiler mit Dynamo

Auf diese Weise ließen sich die einzelnen Pfeiler nahezu automatisch als Volumenkörper modellieren (siehe Abb. 3). Die mittels Dynamo entstandenen Bauteile sind ladbar, attribulierbar und veränderbar.

Um die Innenräume der Pfeiler, welche gemäß den Bestandsunterlagen hohl sind zu erzeugen, wurde ein weiteres Dynamo-Script erstellt, welches die Außenkanten des Pfeilers automatisiert in Richtung der Pfeilerinnenseite versetzte. Die in den erzeugten Pfeilerinnenräumen vorhandenen Objekte, u. a. die Podeste, wurden anschließend aus den Bestandsunterlagen in den Hohlraum konstruiert.

Das Dynamo-Skript für die Erzeugung des Überbaus berücksichtigte je fünf Querschnitte (siehe Abb. 2) zur Erzeugung eines Teilabschnitts des Überbaus. Diese Querschnitte befanden sich jeweils in Bereichen der Stegverjüngung bzw. Stegaufweitung. Im Kontext der Modellierung ist zu berücksichtigen, dass der Überbau einer Klothoide folgt und zudem ein wechselhaftes Längsgefälle aufweist wodurch diese generalisiert erstellt werden musste. Die mittels Dynamo erzeugten Abschnitte des Überbaus sind wie die Pfeiler ladbar, attribulierbar und veränderbar.

Für die weiteren Bauteile des Ingenieurbauwerks wurden die Standardfunktionen von Revit verwendet. Bauteile wie z. B. Steigleitern, Rohrleitungen und Pfeilerpodeste wurden als parametrisch veränderbare Familien aufgebaut. Die Geometrie kann dabei nach dem Platzieren der Familie im Projekt mittels einer Wertangabe an die tatsächlichen Proportionen durch die Angabe unterschiedlicher Maße angepasst werden (siehe Abb. 4).

In diesem Zusammenhang wurden für die verschiedenen zu modellierenden Elemente des Brückenbauwerks unterschiedliche adaptive Bauteilfamilien angelegt. Die entsprechenden Bauteile konnten im Anschluss unter Berücksichtigung der hinterlegten Punktwolke detailgenau nachmodelliert werden. So wurden die Widerlager zunächst nach den vorliegenden Bestandunterlagen modelliert und

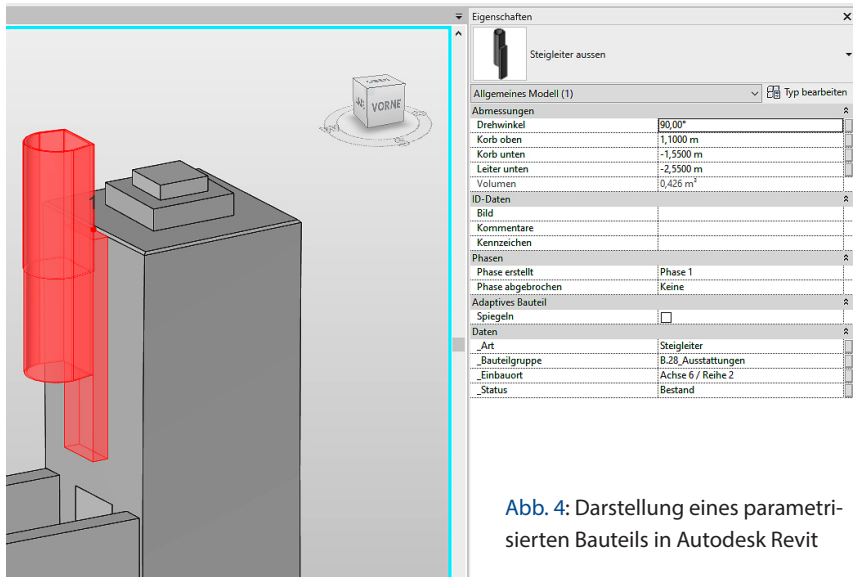


Abb. 4: Darstellung eines parametrisierten Bauteils in Autodesk Revit

in das Modell eingepasst. Im Anschluss wurde das konstruierte Widerlager anhand der aufgenommenen Punktwolke an die tatsächlich vorliegende Geometrie angepasst. Auf diese Art und Weise der Modellierung konnten Abweichungen zwischen der Modellierung anhand der Punktwolke gegenüber den Bestandsunterlagen im Bereich der Widerlagerbänke von über 10 cm aufgedeckt und berücksichtigt werden. Da sich die Fundamente der einzelnen Pfeiler im Erdreich befinden lagen für diese dementsprechend keine Messdaten vor. Die Fundamente wurden daher auf Basis der Bestandsunterlagen konstruiert und mittig unter den Brückenpfeilern positioniert. Die Geometrie der Lagersockel wurde durch einen Querschnitt an der Oberkante des Sockels aus der Punktwolke abgegriffen, mittels Dynamo in Richtung der Pfeileroberkante extrudiert und mit dieser verschritten.

Im Anschluss an die Modellierung wurden die einzelnen Bauteile attribuiert. In diesem Kontext wurde zunächst eine Excelliste erzeugt, in welcher unter anderem Attributnamen, Parametertypen und IFC-PropertySet-Namen eingetragen wurden. Mit Hilfe von Dynamo wurde im Anschluss eine Datei mit gemeinsam genutzten Parametern angelegt und eingelesen. Für die gezielte Übernahme der Attribute wurde dann der Smart Browser verwendet.

Als Ergebnis des Mess- und Auswerteprozesses liegt schließlich ein detailgenaues und BIM-konformes Bestandsmodell des gesamten Ingenieurbauwerks vor, auf dessen Basis die Entwurfsplanung mit der Konstruktion des neuen Überbaus ansetzen kann (siehe Abb. 5).

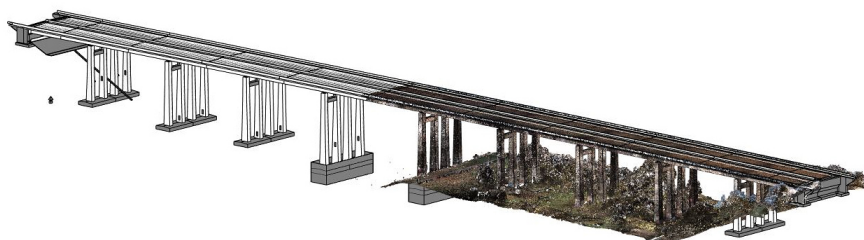


Abb. 5: Bestandsmodell der Huntebrücke in Autodesk Revit

2.2 Anlagenbauprojekte: Bestandsmodellierung Zementwerk

Projekte aus dem Bereich des Anlagenbaus sind häufig durch eine Vielzahl an unterschiedlichen miteinander verbundenen Bauteilen, welche sich zugleich über mehrere Ebenen erstrecken, charakterisiert. Dies trifft z. B. auf Zement- sowie Stahlwerke zu. Des Weiteren sind die Anlagen in diesen Werken häufig rund um die Uhr in Betrieb und müssen daher zumeist im laufenden Betrieb aufgenommen werden. Zusätzlich sind die vorhandenen Flächen in den Werken dicht bebaut, sodass mit einem geringen Platzangebot und Sichtverdeckungen zu rechnen ist. Diese Einschränkungen in der Aufnahme müssen bereits im Vorfeld für die resultierende Modellierung berücksichtigt werden. Im Folgenden wird die Modellierung in einem Zementwerk näher erläutert.

Im Rahmen einer Um- bzw. Neubaumaßnahme wurde die Bestandserfassung und -modellierung eines Bereichs um den Wärmetauscher in einem Zementwerk notwendig. Der gesamte Bereich um den Wärmetauscher sollte dabei durch RMK mittels terrestrischem Laserscanning messtechnisch erfasst und die vorhandenen Elemente auf Basis der aufgenommenen Punktwolke modelliert werden. Die Modellierung sollte dabei unter anderem den Massivbau, den Stahlbau sowie die Rohrleitungen, die Maschinen und die Anlagen enthalten.

2.2.1 Messtechnische Erfassung

Der Messbereich wurde vom Auftraggeber vorgegeben und umfasste verschiedene Ebenen des vorhandenen Wärmetauschers und der angrenzenden Objekte. Als Zielgröße für die Aufnahme wurde eine Genauigkeit von 1 cm vorgegeben. Unter Berücksichtigung der vorgeschriebenen Genauigkeit und des definierten Messbereichs erfolgte die Auswahl des Messinstrumentariums. Zum Einsatz kam eine Leica ScanStation P30, mit welcher der Messbereich durch insgesamt 150 Standpunkte aufgenommen wurde.

2.2.2 Auswertung der Messdaten

Für die Auswertung der Messdaten wurden die Software Leica Cyclone verwendet. Die Messdaten der P30 wurden unter Verwendung von Schwarz-Weiß- und Kugel-Targets in Cyclone miteinander verknüpft. Zusätzlich erfolgte eine Georeferenzierung der Messdaten mit Hilfe tachymetrischer Koordinatenbestimmung ausgewählter Targets. Zudem wurde die erzeugte Gesamtpunktwolke in Cyclone für die weitere Bearbeitung reduziert.

2.2.3 Bestandsmodellierung

Für die Bestandserfassung sollten sämtliche in Kapitel 2.2 erläuterten und diverse weitere Elemente anhand der Punktwolke modelliert werden. Für das hier vorliegende Projekt sollte schlussendlich ein Störkantenmodell des Wärmetauschers sowie des angrenzenden Bereichs entstehen.

Die Modellierung der Objekte erfolgte ausschließlich mit Leica Cyclone. In diesem Zusammenhang wurden insbesondere die in Cyclone vorhandenen Funktionen zur semi-automatischen Erkennung von Rohrleitungen bzw. Stahlbauelementen genutzt, auf welche im Folgenden detaillierter eingegangen wird.

Cyclone bietet dem Nutzer die Möglichkeit Stahlbauelemente sowie Rohrleitungen semi-automatisch in eine vorhandene Punktwolke einzupassen. Es ist zudem möglich Normierungskataloge einzubinden, sodass lediglich im Katalog vorhandene Normgrößen für die Objektschätzung herangezogen werden.

Für die semi-automatische Modellierung eines Stahlträgers, benötigt Cyclone einen Punktwolkenausschnitt des Bauteils. Hierzu wurde zunächst der Bereich um das gewünschte Element aus der Gesamtpunktwolke ausgeschnitten und in ein separates Fenster kopiert. Die Unterteilung der Gesamtpunktwolke in kleinere Teilbereiche hat den Vorteil, eine bessere Übersichtlichkeit der zu modellierenden Elemente zu gewährleisten. In dieser neuen Ansicht wurden in einem weiteren Arbeitsschritt die Punkte, welche einen Stahlträger repräsentieren selektiert. Anschließend konnte über die integrierte Cyclone Funktion das entsprechende Stahlbauelement automatisch in die selektierte Punktwolke eingepasst werden (siehe [Abb. 6](#)). Cyclone bietet dem Nutzer hierbei die Auswahl zwischen verschiedenen Stahlbauelementen. So ist es unter anderem möglich Doppel-T-Träger, sowie U- und L-Profile zu erzeugen. Sind die gewünschten Elemente erzeugt worden, so können diese ausgewählt, in die Gesamtmodellierung eingefügt und ein neuer Teilbereich zur weiteren Modellierung herangezogen werden.

Für die Modellierung von Rohrleitungen bietet es sich ebenfalls an die Gesamtpunktwolke in mehrere Bereiche zu unterteilen. In der Punktwolke wurden dann mehrere Punkte entlang des Rohrverlaufs auf der Rohroberfläche ausgewählt. Ist der gesamte Rohrverlauf ausgewählt, so kann mittels der integrierten

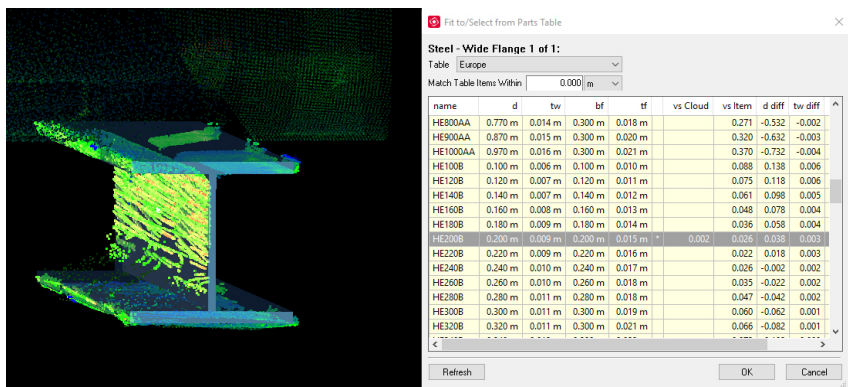


Abb. 6: Modellierung von Stahlbauelementen in Leica Cyclone

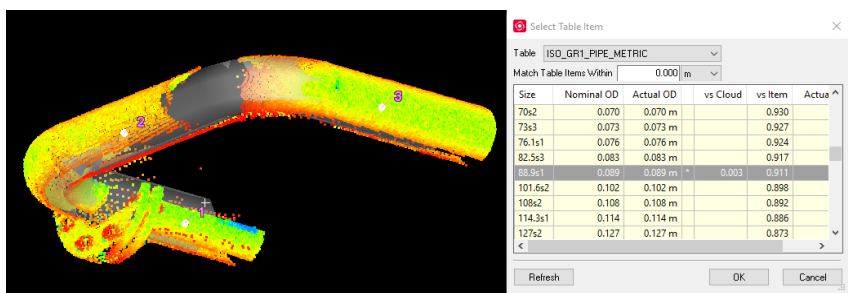


Abb. 7: Modellierung von Rohrleitungen in Leica Cyclone

Cyclone Funktion eine Rohrleitung entlang des gewählten Verlaufs in der Punktwolke geschätzt werden. Die Einpassung der Rohrleitungen ist dabei auch in der Lage abknickende Rohrverläufe zu detektieren und diese zu modellieren (siehe Abb. 7). Die erstellten Elemente konnten im Anschluss ausgewählt und in die Gesamtmodellierung eingefügt werden.

Für die Modellierung des Massivbaus sowie der Anlagen und Maschinen konnten keine semi-automatischen Modellierungsfunktionen herangezogen werden. Ein Teil der entsprechenden Elemente wurde deshalb mittels den in Cyclone vorhandenen Zeichenfunktionen aus zuvor angelegten Schnittebenen digitalisiert. Wurden die in Kapitel 2.1.3 erfassten Linienzüge noch als Grundlage für die Modellierung des Bestands in Autodesk Revit verwendet, so dienen die erfassten Strukturen in diesem Projekt der direkten dreidimensionalen Modellierung in Cyclone. Nachdem die Schnittebenen entweder durch ein benutzerdefiniertes Koordinatensystem oder anhand vorliegender Objekte konstruiert wurden, konnte die vorliegende Geometrie abdigitalisiert werden. Der erstellte Linienzug wurde dann in der weiteren Bearbeitung in ein Flächenstück

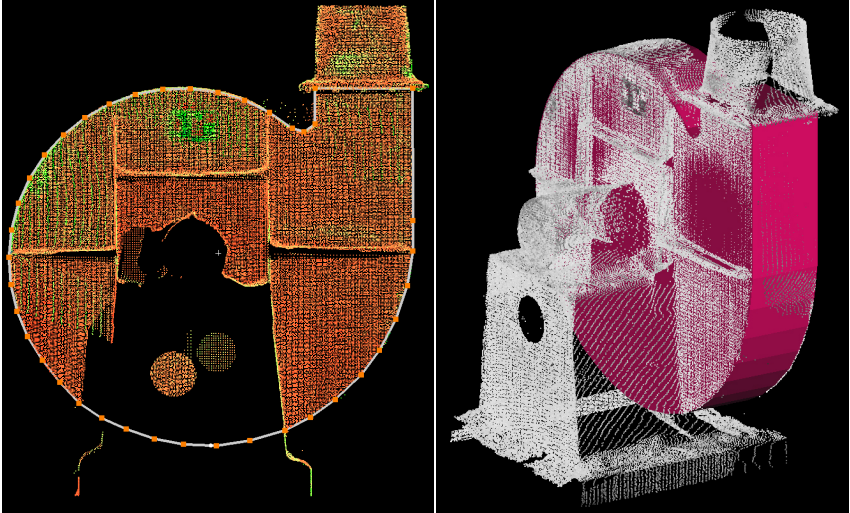


Abb. 8: Modellierung eines Gebläses in Leica Cyclone

überführt. Auf Grundlage dieser Flächen konnte abschließend ein dreidimensionaler Körper erzeugt werden, welcher das zu modellierende Objekt approximiert (siehe Abb. 8).

Die zuvor dargestellte Variante der Modellierung funktioniert jedoch nicht bei allen Objekten, da die Erzeugung eines dreidimensionalen Objekts auf Basis eines Flächenstücks nur im rechten Winkel erfolgen kann. Unterliegt das zu modellierende Objekt sowohl Dimensions- als auch Richtungsänderungen, so bleibt lediglich die Modellierung mit einzelnen Flächen übrig. Diese Art der Modellierung ist jedoch sehr zeitaufwendig und sollte im Idealfall möglichst

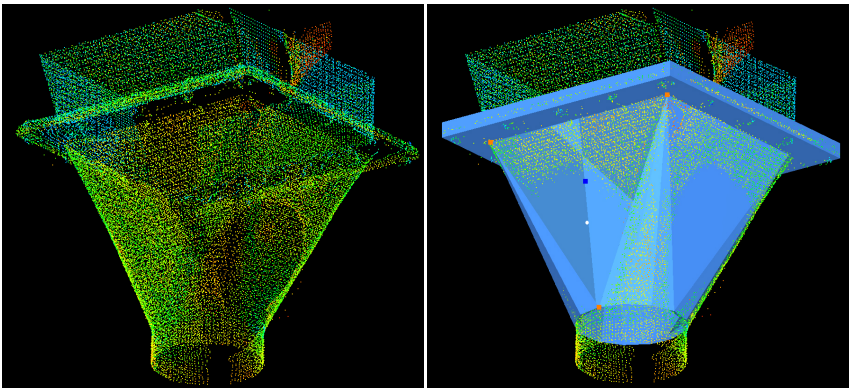


Abb. 9: Modellierung eines Rohrleitungsübergangs in Leica Cyclone

vermieden werden. Hierbei wurden die verschiedenen Eckpunkte des Objekts durch Punktobjekte konstruiert. Anschließend konnten Linien zwischen den einzelnen Konstruktionspunkten erzeugt werden, welche die Außenkanten des Objekts darstellen. Auf Basis der vorliegenden Außenkanten des Objekts wurden Dreiecksflächen auf der Außenfläche erstellt (Abb. 9). Die Geometrie eines Objekts wird somit durch eine Vielzahl an Dreiecken repräsentiert. Diese Variante stellt die detaillierteste der vorgestellten Modellierungsansätze dar, ist aber gleichzeitig mit dem größten Arbeitsaufwand verbunden.

Als Ergebnis des Mess- und Auswerteprozesses liegt schließlich ein detailgenaues Bestandsmodell des gesamten Messbereichs vor (siehe Abb. 10), auf dessen Basis die Planung der Um- bzw. Neubaumaßnahme ansetzen kann.

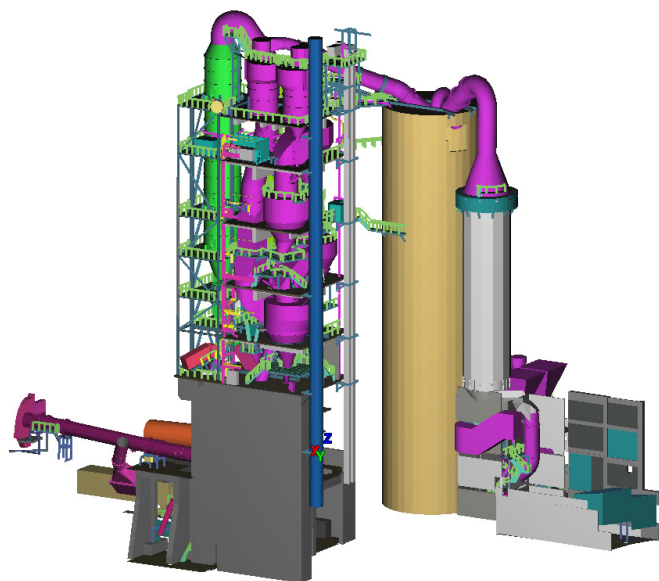


Abb. 10:
Bestandsmodell
eines Wärme-
tauschers in
Leica Cyclone

3 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Objektmodellierung für jedes Projekt individuell gestaltet werden muss. Sie ist insbesondere von den Vorgaben des Auftraggebers sowie der Aufnahmeconfiguration abhängig. Bereits im Vorfeld der messtechnischen Erfassung müssen die Anforderungen an die spätere Modellierung vorliegen um eine bestmögliche Grundlage für die spätere Punktwolkenauswertung zu schaffen. Die Anforderungen des Modells bedingen zudem die Auswahl der Modellierungssoftware. Schlussendlich existieren

eine Vielzahl an möglichen Varianten zur Auswertung von Punktwolken. Die hier dargestellten Praxisbeispiele sollen einen Eindruck vermitteln, wie die Auswertung von Punktwolken im Infrastrukturbereich sowie im Anlagebau ablaufen kann. Ein allgemeingültiger Lösungsansatz kann in diesem Zusammenhang nicht bereitgestellt werden. Für die Auswertung von Punktwolken sollte jedoch als übergeordneter Gedanke stets der Zweck des Modells im Hinterkopf behalten werden. So ist es sowohl für Auftraggeber als auch für Auftragnehmer von zentraler Bedeutung ein den im Vorfeld festgelegten Ansprüchen entsprechendes Modell zu erstellen.

Kontakt

Joscha Huge | Kay-Michael Nichelmann | Christoph Crause

RMK

Breite Straße 32, 29221 Celle

joscha.huge@rmkconsult.de | kay-michael.nichelmann@rmkconsult.de |

christoph.crause@rmkconsult.de

Aufnahme- und Auswertestrategien für das Laserscanning von komplexer technischer Gebäudeausstattung

Daniela Lorenzcat | Eric Bergholz

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich das terrestrische Laserscanning (TLS) nicht nur im Vermessungswesen etabliert, sondern es spielt auch eine immer stärkere Rolle in der Wirtschaft und Industrie. Insbesondere durch das Thema Building Information Modeling (BIM) wird das TLS fokussiert und in der Zukunft in vielen Bereichen zunehmend zur Anwendung kommen. Die immer höhere Geschwindigkeit der Datenerfassung, die Steigerung der Datenqualität auf schwierigen Oberflächen und die softwaretechnische Weiterentwicklung erhöhen den Wert der Technologie für die Arbeitsprozesse. Zunehmend wird die Erfassung mit TLS bei komplexen Industrieanlagen, großen Bauwerken der Infrastruktur und Gebäuden mit umfangreicher technischer Gebäudeausstattung (TGA) angewandt.

Der folgende Artikel wird sich mit dem Aufnahmeprozess von komplexer TGA mittels des TLS und mit der darauffolgenden Auswertung der Scandaten auseinandersetzen.

2 Vorbetrachtung

Die oberste Priorität bei der Planung und Durchführung eines 3D-Scans von technischen Anlagen beschäftigt sich mit der Frage, wie detailliert das Ergebnismodell benötigt wird. Diese Festlegung wirkt sich auf den gesamten Verarbeitungsprozess aus und ist ein entscheidender Faktor für die Kosten- und Zeitkalkulation.

In einem TGA-Projekt muss das Modell am Ende unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden. Neben den Anforderungen der Architekten ist der Bedarf der Fachplaner an diesen Modellen von wesentlichem Interesse.

Ein weiterer Faktor liegt in den variierenden Softwareanwendungen. Möchte der Kunde direkt mit dem Modell arbeiten, es mit Sachdaten füllen, Elemente verändern, löschen oder umplanen, empfiehlt sich das Arbeiten in der

Kundensoftware. Soll das Modell ausschließlich als Referenzmodell dienen, eignet sich der Datenaustausch über die IFC-Schnittstelle; die Wahl der Software gestaltet sich in diesem Fall flexibler. Die Abb. 1 bis 4 zeigen einige Beispiele von Kundenanforderungen aus der Praxis.

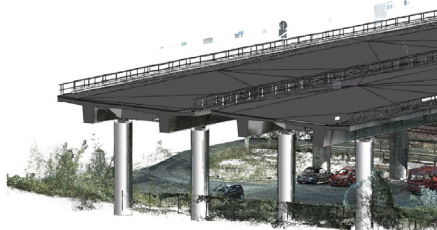


Abb. 1: Infrastruktur – Brücken

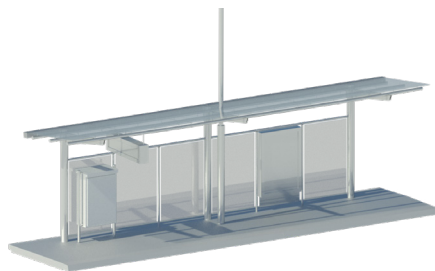


Abb. 2: Infrastruktur – Haltestelle

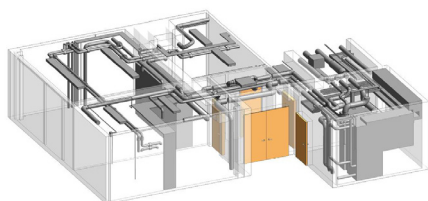


Abb. 3: TGA



Abb. 4: Architektur/Denkmalpflege

Wie die Abbildungen zeigen, gibt es komplexere und weniger komplexe Anforderungen – meist in Abhängigkeit von der Objektdichte. Im Bereich der Infrastruktur und Architektur liegt der Fokus stärker auf den tragenden Elementen. Bei der TGA sind die Objektdichte, schlechte Zugänglichkeit, exakte Definition der Leitungen und reflektierende Oberflächen die Schwierigkeit.

Um die Modellierungsrichtlinien mit dem Auftraggeber einfacher zu definieren, wurde mit dem Building Information Modeling (BIM) in den letzten Jahren eine einheitliche Festlegung des Detaillierungsgrades etabliert. Das Level of Detail (auch als Level of Development (LOD) bezeichnet) bezeichnet mehrere Stadien der detaillierten Darstellung einzelner Objekte.

Die Abb. 5 zeigt die unterschiedlichen Abstufungen an dem konkreten Beispiel einer Leitung mit einem Verbindungsstück (Flansch).

Die einfachste Stufe ist das LOD 100. Hier wird der Flansch im Modell vernachlässigt. Diese Stufe ist für konzeptionelle Prozesse gut geeignet.

Beim LOD 200 ist der Flansch mit generalisierter Darstellung enthalten. Das LOD 200 bietet sich für Abfragen in Bezug auf Massenermittlungen an. Zudem

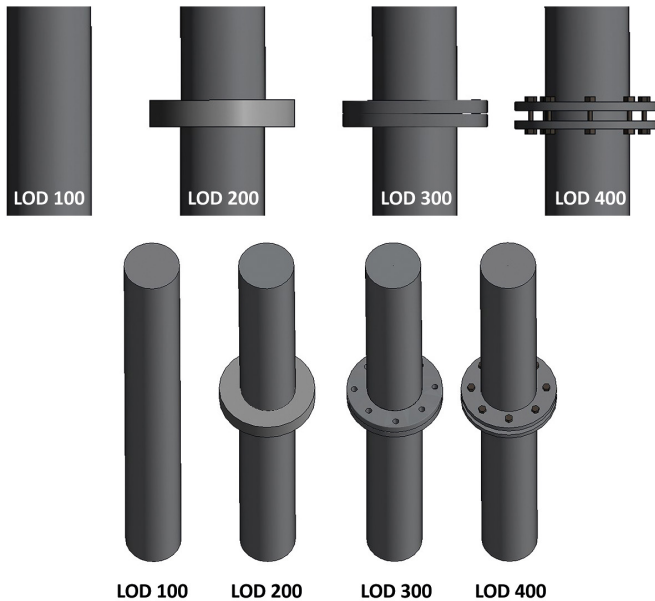


Abb. 5:
LOD am Beispiel
einer Leitung
mit einem
Flansch

eignet es sich sehr gut als Grundlage für Umbauplanungen in Bereichen mit hoher Objektdichte und wenig Platz, da alle relevanten Störkonturen erkennbar sind.

Das Modell mit einem Fertigstellungsgrad von LOD 300 zeigt bereits genauere Geometrien. Dass das Verbindungsstück aus zwei einzelnen Elementen besteht, ist klar erkennbar; zusätzlich können die Positionen der Schraubverbindungen der Leitungen abgeleitet werden.

Die höchste Abstufung in einem Modell, welches rein aus Scandaten generiert werden kann, ist das LOD 400. Hierbei sind die Schraubverbindungen detailliert erkennbar; auch die reale Form des Flansches ist ersichtlich. Dieses Modell ist zur Ausführungsplanung nutzbar.

Zum einen ist die Wahl des Detaillierungsgrades für die spätere Nutzung des Modells ausschlaggebend, zum anderen sind der zeitliche Aufwand während der Modellerstellung und die daraus resultierende Datenmenge des Ergebnisses weitere wichtige Aspekte. Diese beiden Faktoren sind in [Abb. 6](#) in Abhängigkeit der unterschiedlichen LOD-Stufen dargestellt. Das Diagramm verdeutlicht, dass sich besonders der Zeitfaktor stark erhöht, je detaillierter modelliert wird. Somit ist eine ausführliche Absprache mit dem Kunden diesbezüglich essenziell.

In diesem Artikel wird nicht auf das LOD 500 eingegangen, da eine Bestimmung der Materialien rein aus den Scandaten nicht für ein gesamtes Modell durchführbar ist.

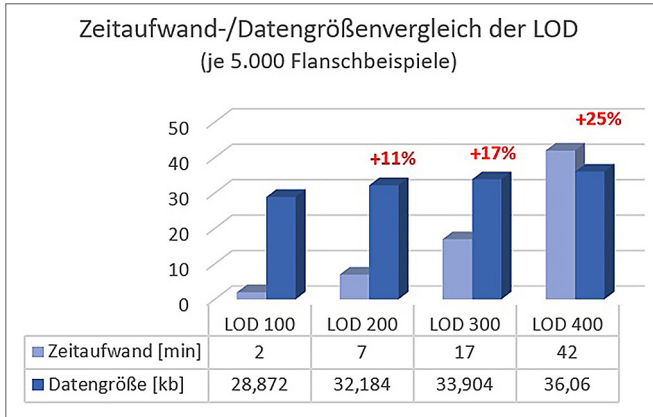


Abb. 6:
Vergleich von
Zeitaufwand
und Datengrößen
der LOD

3 Besonderheiten beim Scanning von TGA

- Farbe, nur relevant bei Einfärbung der Rohre.
- Je nach Komplexität sind mehr Standorte notwendig.
- Je nach Ausdehnung und gefordertem LOD reicht eine niedrigere Scanauflösung.
- Bei einigen Materialien muss die Qualität des Scannings erhöht werden.
- Je nach Größe des Projektes ist es empfehlenswert, mit einem geodätischen Lage- und Höhennetz zu arbeiten.

Je nachdem welcher Detaillierungsgrad vom Kunden gefordert ist, muss der Operator die Aufnahmesystematik anpassen. Grundsätzlich muss für die Erfassung von komplexer TGA aufgrund der Anlagendichte mehr Zeit eingeplant werden als bei der verhältnismäßig einfachen Erfassung von Gebäuden.

Hierbei sollten Scanner genutzt werden, die eine höhere Genauigkeit aufweisen. Verschiedene Hersteller bieten dafür kompakte Scanner, die die Genauigkeitsanforderungen erfüllen und sich in der Handhabung ähneln. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass TGA-Anlagen oftmals aus stark reflektierenden Materialien, wie z. B. silberfarbenen Isolierungen, bestehen (vgl. Abb. 7). Diese sind mit einigen Scannern schlechter zu erfassen. Hier ist es ratsam, zuvor eine Testmessung durchzuführen. In der Praxis sind vorwiegend sehr neue Anlagen mit stärker reflektierenden Oberflächen kritisch zu betrachten. Aufgrund von Staub und anderen Ablagerungen auf den glänzenden Oberflächen liefern die Scandaten von älteren Anlagen oftmals qualitativ bessere Ergebnisse als Störungen durch Reflektionen.

Ein primär zeitlicher Aspekt ist die Frage, ob Farbinformationen in der Punktwolke gewünscht sind. Eine kolorierte Punktwolke wird oft für repräsentative

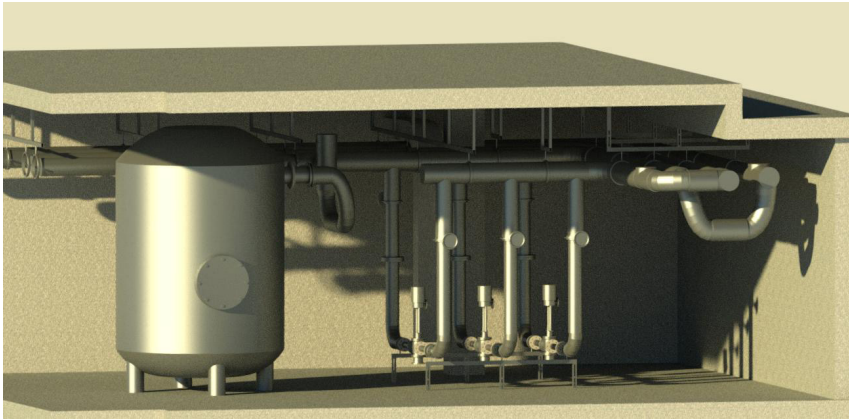


Abb. 7: Ansicht TGA mit reflektierenden Oberflächen

Zwecke benötigt. Wenn die RGB-Daten gefordert werden, muss der Dienstleister für den Erfassungszeitraum mehr Zeit kalkulieren, da die Aufnahme der Fotos nach dem Scannen hinzukommt. Hierbei entwickeln die Hersteller derzeit unterschiedliche Lösungen. Die Option von HDR-Bildern kann bedeutend sein, wenn die TGA-Installationen schlecht ausgeleuchtet sind. Eine kolorierte Punktwolke ist zweckmäßig, wenn z. B. bei einem Rohrleitungssystem die einzelnen Farben den Rohren zugeordnet werden müssen.

Beim TLS ohne die Erfassung von Farbwerten werden die Ergebnisdaten nur in Grauwerten oder Intensitäten dargestellt. Diese ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Oberflächenmaterialien.

Der reale Farbwert kann im Nachgang nicht mehr aus den Scandaten abgeleitet werden. In der Praxis hat es sich bewährt, einen oder zwei Standorte mit der Erfassung von Fotos durchzuführen. So werden alle relevanten Informationen für die Erstellung des Modells erfasst und der zeitliche Aufwand ist überschaubar.

Bei einer TGA, die weit mehr als 100 Scans zur Erfassung benötigt, ist es sinnvoll ein geodätisches Netz zur Stabilisierung der Scandaten anzulegen. Damit wird die Fehlerfortpflanzung während des Scannens verringert und ausgeglichen. Insbesondere für eine automatisierte Auswertung von Scandaten ist eine fehlerfreie Registrierung essenziell.

Die oftmals propagierte Cloud2Cloud-Registrierung ist im Wesentlichen eine auf Standardabweichungen bzw. gemittelten Werten angelegte Zusammenführung der Scandaten. Hier hat der Operator keinen direkten Einfluss auf die Registrierung einzelner Scans. Probleme in der Registrierung können im Nachgang nicht oder nur sehr aufwendig im Büro behoben werden. Mit steigender Anzahl der Scans steigen häufig auch die Probleme bei der Cloud2Cloud-Registrierung.

4 Besonderheiten der Auswertestrategien von TGA-Scandaten

Ausgangslage für das Modellieren ist eine registrierte Punktwolke. Ist die Erfassung mit einem TLS erfolgt, stehen zusätzlich die Panoramaansichten zur Verfügung (siehe [Abb. 8](#)). Vorhandene Bestandszeichnungen und/oder -modelle, Fotos von komplizierten Bereichen und verschiedene Sachinformationen unterstützen zusätzlich die Modellierung.

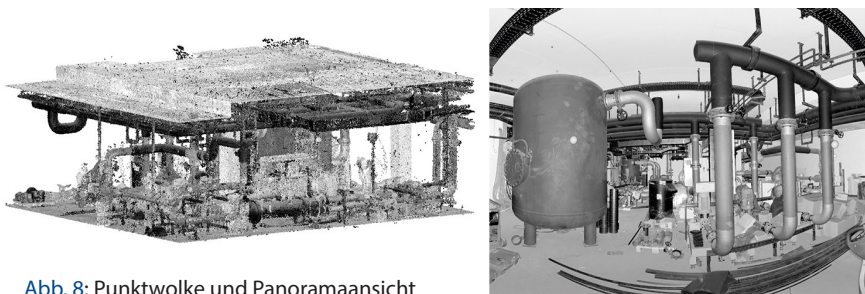


Abb. 8: Punktwolke und Panoramaansicht

Bei der Modellierung wird in der Regel vom Großen ins Kleine modelliert. Am Beispiel einer komplexen TGA bedeutet dies von der Gebäudegeometrie zur Armatur. In [Abb. 9](#) wird ein Workflow zum Modellierungsablauf mit der Software Revit von Autodesk und PointCab dargestellt.

5 Einarbeitung zusätzlicher Informationen zur TGA

Durch das Scanning können nur geometrische Daten erfasst werden; durch die zusätzlichen Farbinformation kann die Fachkraft eine mögliche Funktion ableiten. Zur weiteren Datenverarbeitung und -verwendung der TGA werden aber weitaus mehr Informationen (z. B. Material, Innendurchmesser, Druckangaben) benötigt. In enger Zusammenarbeit mit den Fachplanern sollten die zusätzlichen Sachdaten erhoben und mit dem Modell verknüpft werden.

6 Automatisierte Auswertung

Neben der klassischen manuellen Auswertung der Scandaten sind in den letzten Jahren unterstützende Softwarelösungen auf den Markt gekommen. Wir haben zwei der teilautomatisierten Anwendungen getestet: zum einen die automatisierte Modellierungssoftware EdgeWise von ClearEdge3D und zum anderen das Punktwolken-Handhabungstool InfiPoints von Elysium.

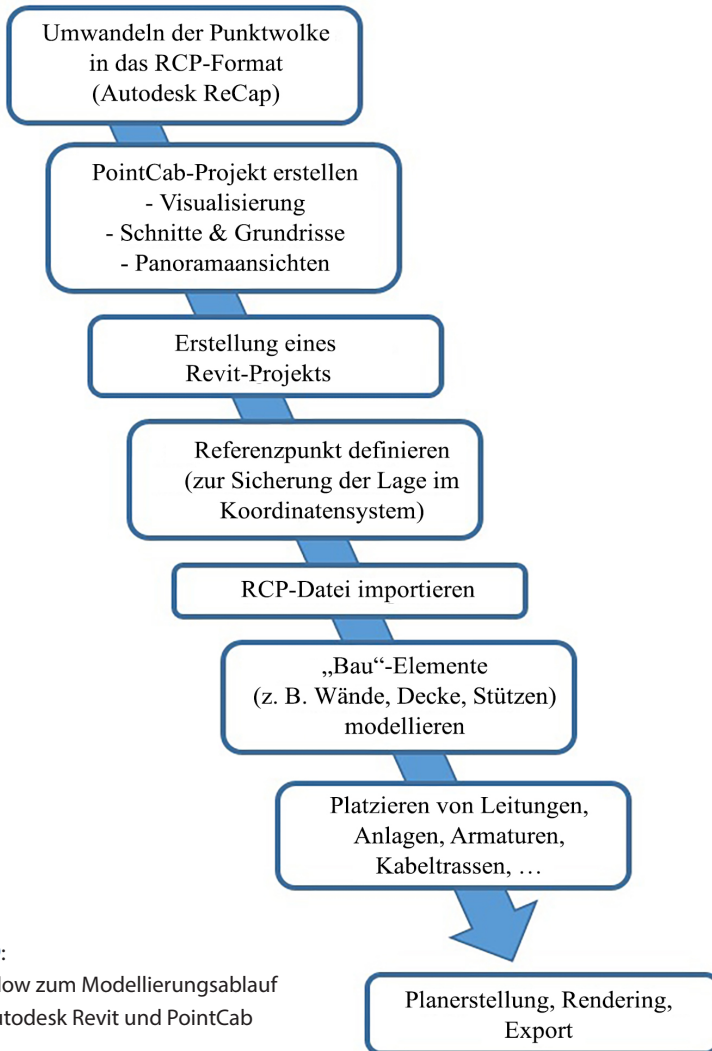


Abb. 9:
Workflow zum Modellierungsablauf
mit Autodesk Revit und PointCab

Der bisherige Workflow wird hierbei durch den Automatismus verändert und beschleunigt. Beide Programme führen automatisch in der Punktwolke eine Rohrerzeugung durch. Die so generierten Leitungen können anschließend durch benutzerspezifische Einstellungen (z. B. Anwendung der ISO-Norm) optimiert und verfeinert werden. Die vorhandenen Bibliothekselemente ermöglichen dem Modellierer schnell und unkompliziert die benötigten Armaturen an der richtigen Geoposition zu platzieren.

Durch die gängigen Exportmöglichkeiten (Autodesk Revit, AutoCAD, Plant 3D, ...) können die ermittelten Daten flexibel in die Software des Kunden übergeben und ins Bestandsmodell integriert werden.

In unseren Tests haben wir speziell den Export der Daten zur Software Autodesk Revit betrachtet. Es hat sich gezeigt, dass die Weiterverarbeitung der generierten Rohrleitungen in Revit mit der Software von ClearEdge3D praktikabler ist. Die importierten Elemente sind bereits „Revit-Elemente“ und nicht nur Projektelemente. Das hat zur Folge, dass in Autodesk Revit Änderungen, das Hinzufügen von Attributen, Abfragen und das neue Setzen von Elementen, wie zum Beispiel Armaturen, möglich sind.

In Tab. 1 wird verglichen, inwieweit sich die Ergebnisse aus der automatischen Extraktion der Rohre in der Weiterverarbeitung in Autodesk Revit unterscheiden.

Tab. 1: Verwendung der Ergebnisse in EdgeWise und InfiPoints

Kriterium	EdgeWise	InfiPoints
Import der Elemente	REVIT-Elemente	Projektelemente
Änderung der Elemente	Ja	Ja, nur über Projektfamilie
Attribute ergänzen/ hinzufügen	Ja	Ja, nur über Projektfamilie
Listen/Abfragen	Ja	Nein
Bearbeitungswerkzeuge	Alle REVIT- Rohrwerkzeuge	Nur REVIT- Familienwerkzeuge
Platzierung neuer Elemente (Armaturen)	Ja	Nein
FAZIT	Einfache Weiterverarbeitung	Komplizierte Weiterverarbeitung

7 Weitere Erkenntnisse zur automatischen Modellierung

Bei sehr guten Scandaten (hohe Dichte und wenig Rauschen) können Rohrleitungen bereits ab 20 mm Durchmesser erkannt werden. In der Praxis sind jedoch Störungen im Scanprozess häufig nicht vermeidbar. Aus diesem Grund wird die automatische Erkennung erst ab 50 mm Durchmesser empfohlen.

Für den Prozess der automatischen Extraktion sollten die Scandaten in strukturierter Form (scan-zentrische Daten) vorliegen. Bei Daten aus mobilen Scansystemen ist die automatische Auswertung nur beschränkt möglich, d. h. die

Auswahl des auszuwertenden Leitungsbereiches muss manuell in der Punktwolke erfolgen.

Die Bögen und Verbindungsstücke können nach der Erstellung der Leitungen in einem weiteren Automatismus generiert werden.

Die Erkennung von Armaturen ist bisher nicht möglich. Sie müssen manuell platziert werden.

Die automatische Extraktion von Luftkanälen ist nur teilweise automatisiert. Die Auswahl der Bereiche muss hier ähnlich wie bei mobilen Scandaten manuell erfolgen.

8 Fazit

Für die Aufnahme komplexer technischer Gebäudeausstattung sind die modernen Scanverfahren besonders gut geeignet. Das vollständige Abbild des teilweise realen komplexen Zustandes und die Zeitersparnis vor Ort sind dabei die entscheidenden positiven Aspekte. Durch die Themen BIM, 3D-Planung und digitaler Zwilling erhöht sich der Fokus auf diese Technologie.

Speziell im Auswerteprozess müssen vorab exakte Festlegungen bezüglich des Informationsgehalts und der Detaillierung stattfinden. Spätere Änderungen an bestehenden Modellen sind meist sehr zeitaufwendig und können bestehende Verknüpfungen und Abhängigkeiten zerstören.

Die Verwendung von Softwarelösungen zur automatischen Rohrerkennung kann schnell ein verlässliches Leitungsmodell liefern. Durch verschiedene Import- und Exportmöglichkeiten wird das so generierte Teilmodell in das Bestandsmodell integriert und erleichtert damit die Weiterbearbeitung.

Die Erhebung von Sachdaten über die Geometriedaten hinaus erfordert eine enge Zusammenarbeit mit den Fachplanern. Die Art und Weise der Verknüpfung dieser Sachdaten mit dem Modell sollte vorab ebenfalls exakt definiert werden.

Die Wahl der Software und der Auswertestrategie steht in engem Zusammenhang mit der zeitlichen und finanziellen Betrachtung und sollte immer unter dem Aspekt Aufwand/Nutzen kritisch beurteilt und festgelegt werden.

Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Daniela Lorenzcat
Laserscanning Europe GmbH, Burgsdorffstraße 12, 01129 Dresden
daniela.lorenzcat@laserscanning-europe.com

Dipl.-Ing. (FH) Eric Bergholz
Laserscanning Europe GmbH, Talstraße 8, 73249 Wernau
eric.bergholz@laserscanning-europe.com

Session 4: Aktuelle Projekte und Anwendungsfelder

Baubegleitendes Laserscanning zur Qualitätskontrolle von Industrieanlagen beim CERN

Tobias Dobers

1 Einführung

Dieser Vortrag beschreibt einige der beim CERN durchgeführten Laserscanningprojekte, die zur baubegleitenden Qualitätskontrolle dienen. Dazu kommen spezifische Anwendungen und Anpassungen des Zubehörs an die speziellen Gegebenheiten des Umfeldes.

1.1 Einführung zum CERN

CERN, die Europäische Organisation für Hochenergiephysik, ist eine internationale Organisation mit über 20 Mitgliedsstaaten. Sein Sitz ist in Genf, aber die Firmengelände liegen sowohl in der Schweiz als auch im benachbarten Frankreich (<http://cern.ch/fplinks/map.html>).

Die Aufgabe des CERN ist es, Internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Hochenergiephysik zu etablieren und entwirft, baut und betreibt zu diesem Zweck Beschleuniger und die zugehörigen Detektoren. Zurzeit arbeiten über 10.000 Benutzer aus Forschungsinstituten der ganzen Welt mit diesen Anlagen um ihre Experimente durchführen zu können.

Der Beschleunigerkomplex beim CERN ist eine Folge von Maschinen mit ansteigender Energie. Jede Maschine injiziert den Teilchenstrahl in die nächste, die dazu dient, ihn zu höherer Energie zu beschleunigen, usw. Das Flaggschiff dieses Komplexes ist der Large Hadron Collider (LHC) (Abb. 1).

Dieser Beschleuniger mit einem Umfang von etwa 27 km wird in den nächsten Jahren aufgerüstet, um die Beschleunigerenergie um den Faktor fünf zu erhöhen, und dadurch neue Entdeckung in der Hochenergiephysik möglich zu machen.

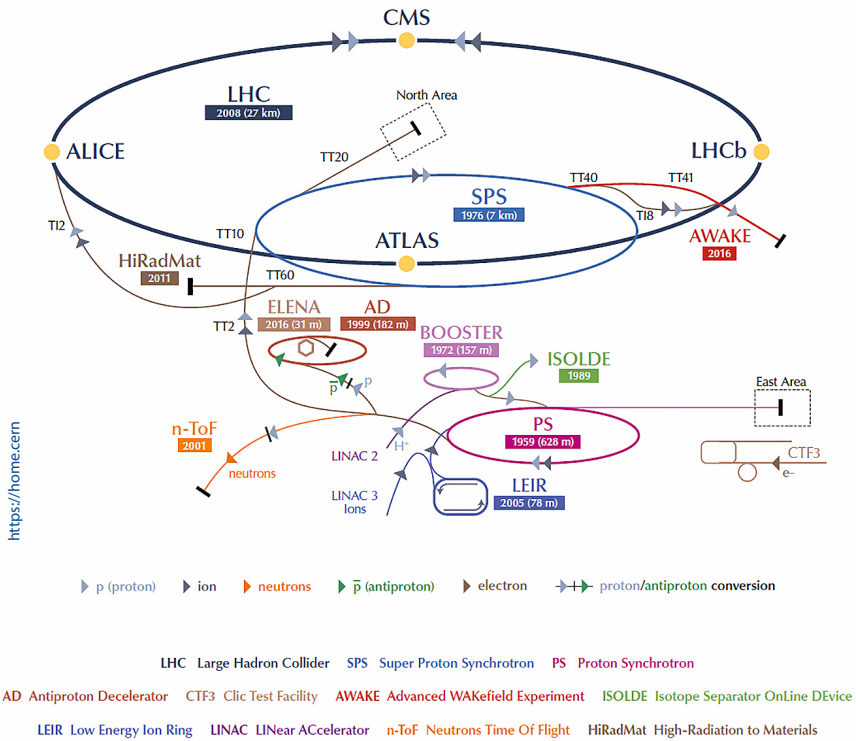


Abb. 1: CERN-Beschleunigerkomplex

2 Laserscanning beim CERN

2.1 Geschichte

In den Jahren der Konstruktion des LHC (2000–2008) traten beim CERN vermehrt Integrationsaufgaben in den Vordergrund, bei denen es einerseits darum ging, bestehende Bauwerke und Installationen zu modifizieren, und andererseits neue Kavernen oder Tunnelabschnitte während und nach der Bauphase zu dokumentieren, mit allen schon vorhandenen Installationen.

Diese Aufgaben wurden zunächst mit Hilfe von Profilmesstechniken mit Totalstationen erledigt. Häufig kam es dabei aber zu Problemen, da einige Gewerke und Einbauten eventuell nicht innerhalb des Profilgitters lagen, und man deshalb ein weiteres Mal spezielle Profilverdichtungen messen musste.

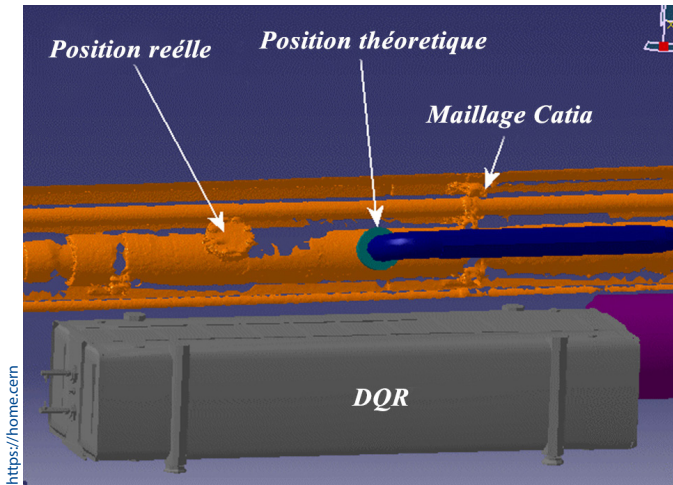


Abb. 2:
Falsche Position
eines Rohr-
anschlusses

Deshalb wurde ab 2004 die Laserscanning Technologie beim CERN eingeführt, und bis heute hat sich diese Vorgehensweise mehr als bezahlt gemacht, wie ein einfaches Integrationsproblem zeigt (Abb. 2).

2.2 Instrumente und Zubehör

Neben einem Laserscanner (z. Zt. ein LEICA HDS6200) besitzen wir noch einen DPI-8X Handheld Scanner, zur Ergänzung, und einen LAS (ein mit einem AT960 gekoppelter Handheld Scanner). Als Zielmarken setzen wir die üblichen runden und flachen Schwarz-Weiß-Targets ein, von denen wir einige mit speziellen Adaptern versehen, um sie in die Magnetmessmarken einsetzen zu können, die auf dem Taylor-Hobson Aligment System basieren (Abb. 3). Des



Abb. 3: Zieltafel mit Zylinderadapter für Taylor-Hobson-Kugel

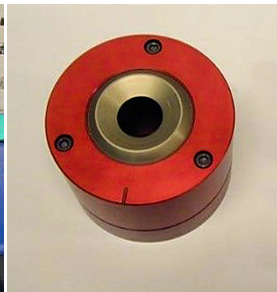


Abb. 4: Kugel mit Nest

METROLOGWORKS und CERN

Weiteren benutzen wir matte 1,5 Zoll-Kugeln, die wir in hauseigene magnetische Nester einfügen können, um denselben Punkt zu messen, den wir mit einer Totalstation bestimmt haben (Abb. 4).

Um eine gleichbleibende Qualität der Scanresultate zu gewährleisten, führen wir seit einigen Jahren das vom DVW vorgeschlagene Feldprüfverfahren für TLS bei uns durch.

3 Projekte

Um einen Einblick in die vielfältigen Scanaufgaben beim CERN zu erhalten, werden im Folgenden Projekte aus drei verschiedenen Bereichen der Anlagen des CERN erläutert, und deren Spezifität hervorgehoben.

3.1 Teilchenbeschleuniger

In einer der LHC-Kavernen soll nächstes Jahr ein neues Experiment eingefügt werden, dass die Reste der Elementarteilchen messen wird, die 400 m weiter aus dem ATLAS-Detektor austreten.

Um eine umfassende Studie mit allen beteiligten Gewerken zu ermöglichen, wurde ein Scan dieser Zone durchgeführt. Neben der Georeferenzierung auf Magnetmesspunkte, die im CCS (CERN Coordinate System) vorliegen, wurde auch eine Einfärbung des Scans mit Hilfe von Panoramabildern vorgenommen.



Abb. 5: Scan für das FASER Experiment im LHC-Tunnel

Diese Bilder waren in gleichen Arbeitsgang wie der Scan auf denselben Stationen aufgenommen und danach in den Scan integriert worden (Abb. 5).

Die jetzt angefangene Studie soll zeigen, ob es möglich ist, alle für das Experiment notwendigen Bauteile ohne Schwierigkeiten von der Transportseite (links in der Abb. 5) über die LHC-Magnete auf die andere Seite zu bekommen – und das trotz vieler Kabel, Stützen und Ähnlichem. Dabei kommt es oft auf jeden Zentimeter an, und ohne Scan wäre es in dieser Umgebung schwierig, eine zuverlässige Aussage über die Machbarkeit zu erhalten.

3.2 Detektoren

Die vier LHC-Detektoren, in denen die Teilchenkollisionen stattfinden, stellen sehr komplizierte Bauwerke dar, da sie aus Million von Einzelkomponenten, durchzogen von Kilometern und Kilometern von Kabeln und Leitungen, bestehen. Einer dieser Detektoren, Compact Muon Solenoid (CMS) (Abb. 6), war hier für Wartungsarbeiten geöffnet und für einen Scan zugänglich.

Selbst wenn es zahlreiche Detailpläne von diesem Detektor gibt, wurden wir nach einem Scan gefragt, um danach ein „As-Built“-Modell zu erstellen.

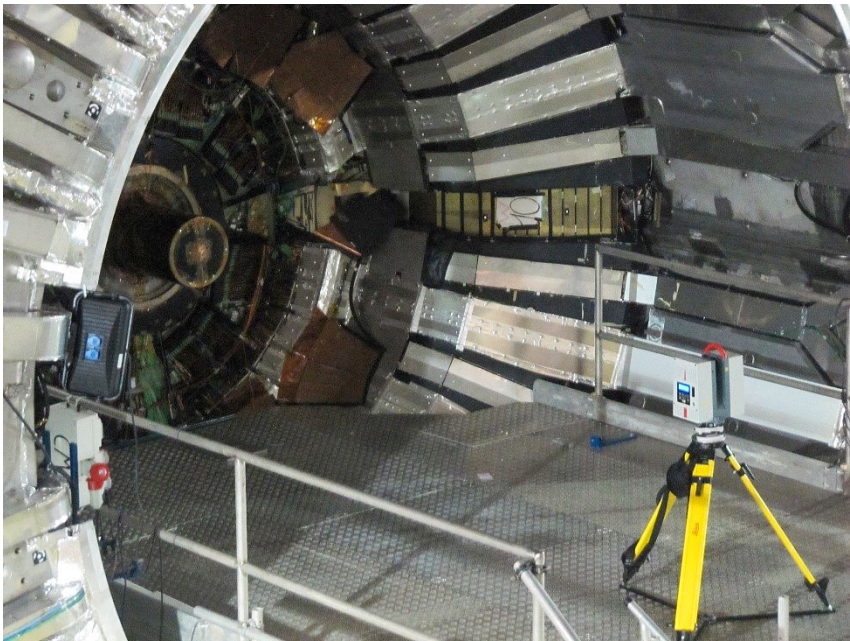


Abb. 6: Blick in den CMS-Detektor mit dem Scanner in Strahlhöhe

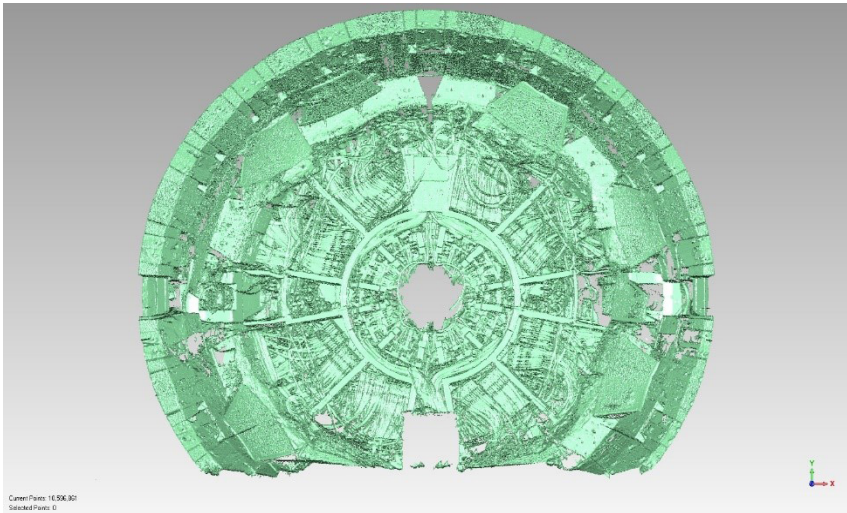


Abb. 7: Modellierung des sogenannten Bulkhead des CMS-Detektors

In einem ersten Schritt wurde der Bereich gescannt, und zwar mit maximaler Punktdichte, und vielen Stationen, um möglichst wenige Schatteneffekte zu haben und alle sichtbaren Bauteile gut zu erfassen.

Nach der Georeferenzierung und Filterung, aber auch der „Reinigung“ von virtuellen Punkten, z. B. an Kanten und dem Ausschneiden von nicht benötigten Objekten (wie z. B. Gerüste o. ä.) erfolgte eine minutiöse Aufarbeitung und Modellierung mit GEOMAGIC (Abb. 7).

Hält man sich den Durchmesser von mehreren Metern dieses Objektes vor Augen, kann man ermessen, dass dies eine lange und aufwendige Arbeit war, aber das Resultat war dann letztendlich sehr nützlich für alle Beteiligten, die Aufgrund dieses Modells die geplanten Modifizierungen des inneren Detektors vorausschauend planen konnten.

3.3 Außenanlagen

Als Beispiel für eine Scananwendung außerhalb der unterirdischen Beschleunigtunnel oder Detektoren kann die Aufnahme von etwa 20 Zugangsanlagen für den SPS Tunnel herangezogen werden. Dabei handelte es sich um ein Projekt, dass die aus den 70er Jahren stammende Anlage durch eine modernere ersetzen soll. Diese Anlage wird einen getrennte Personen- und Materialzugang bieten; ersterer mit Iriserkennung, letzterer mit Bewegungsmeldern im Inneren, um einen unerlaubten Personenzugang über diese Anlage zu vermeiden.

Die Projektleitung wollte als Zusatzinformationen zu Plänen auch eine präzise As-Built-Dokumentation erstellen, und bat um einen georeferenzierten Scan im Bereich der geplanten Anlage.

Der Scan konnte allerdings nur zu bestimmten definierten Zeiten durchgeführt werden, da bei laufendem Teilchenbeschleuniger die Türen der Zugangsanlage innerhalb von 30 Sekunden wieder geschlossen sein müssen. So wurde letztlich entschieden, die Scans an die einige Stunden pro Monat dauernden dringenden Wartungsarbeiten zu koppeln.

Als Ergebnis wurde ein Scan mit TrueView geliefert, in dem die ersten Verifizierungen vorgenommen und danach die Punktwolke in das CAD-System integriert und dem 3D-Modell gegenübergestellt werden konnte.

4 Zusammenfassung

Dieser aus der täglichen Praxis bei der Vermessungsabteilung des CERN entstandene Vortrag sollte zum einen die Vielseitigkeit der dort zur Anwendung kommenden Laserscanaufgaben erläutern, und zum anderen zeigen, dass Laserscanning in Integrations-, Planungs- und Dokumentierungsprozessen nicht mehr wegzudenken ist, und bei uns das Zauberwort BIM schon lange tägliches Brot ist, wenn wir es auch nicht immer so nennen.

Kontakt

Tobias Dobers
CERN EN-SMM-ASG
Esplanade des Particules 1, 1211 Genf 23, Schweiz
tobias.dobers@cern.ch

Hochgenaues Laserscanning in industriellen Anwendungen

Peter Wintjens | Daniel Wujanz | Ralf Lichtenberger | Frank Gielsdorf

Zusammenfassung

Der folgende Beitrag beschreibt das hochgenaue Nahbereichsscanning von großen Bauteilen im industriellen Bereich, als eine sinnvolle, effiziente Erweiterung zu Technologien wie z. B. Lasertracker, Photogrammetrie und Streifenprojektion. Unterschiedliche Methoden der Punktwolkenregistrierung werden beschrieben und Anwendungsbeispiele vorgestellt.

1 Einleitung

Nahezu alle Hersteller von terrestrischen Laserscannern konzentrieren sich auf das Erreichen immer größerer Reichweiten, höherer Messgeschwindigkeiten und der Integration von HDR-Farbkameras.

In der Industrievermessung hingegen kommt es oft auf Genauigkeiten im Submillimeterbereich an. Die Nische der hochgenauen Nahbereichsmessung wird nicht von vielen Herstellern bedient. Der US-amerikanische Hersteller Basis Software Inc. (SURPHASER) hat sich auf diese Nische fokussiert und bietet unterschiedliche Modelle mit hoher Messgenauigkeit und sehr kleinem Messrauschen für den Einsatz im Nahbereich an.

2 Nahbereichsscanner im Vergleich mit konventionellen TLS

2.1 Messbereich, Strahldurchmesser, Genauigkeit

Für die hochgenaue Industrievermessung werden häufig Nahbereichsscanner eingesetzt. Nahbereichsscanner sind auf einen begrenzten Messbereich optimiert. Bei den SURPHASER-Nahbereichscannern beginnt der Messbereich bei 20 cm und endet bei ca. 10 m. In diesem optimierten Messbereich liegen die 3D-Genauigkeiten bei 0,15 mm bis 0,3 mm (1 Sigma) und das Messrauschen im Bereich von 0,025 mm.

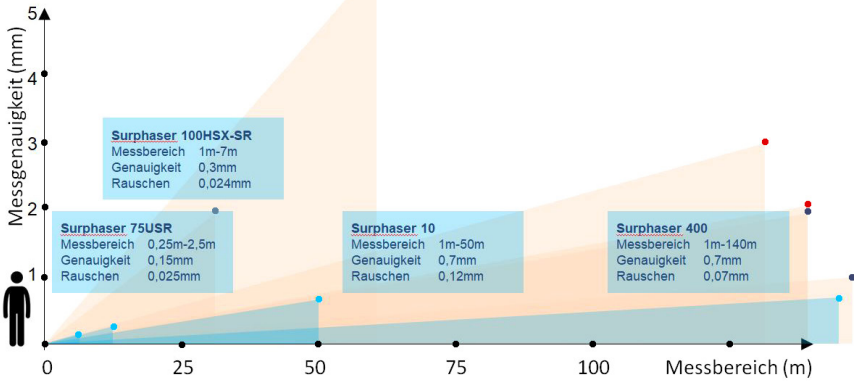


Abb. 1: Vergleich Messbereich und Messgenauigkeit

Das Messrauschen eines Nahbereichsscanners sollte möglichst gering sein, da durch eine hohe Datenqualität der zeitaufwendige Prozess zur Datenbereinigung und Filterung entfällt bzw. minimiert werden kann.

Für eine hohe Ortsauflösung ist auch die Messfleckgröße von wesentlicher Bedeutung. Der Strahldurchmesser konventioneller TLS am Austrittsfenster liegt üblicherweise bei ca. 2 mm bis 3 mm. Bei einer Divergenz von ca. 0,25 mrad wächst die Messfleckgröße alle 10 m um weitere 2,5 mm. Um einen kleinen Messfleckdurchmesser über den gesamten optimierten Messbereich zu erreichen, wird bei den SURPHASER-Scannern mit einem Strahldurchmesser von ca. 1 mm am Austrittsfenster und der Positionierung der Strahltaile in der Mitte des Messbereichs gearbeitet.

In Abb. 1 werden schematisch der Messbereich und die Genauigkeit von konventionellen TLS (rot) mit denen der SURPHASER-Scanner (blau) verglichen. Tab. 1 gibt einen Überblick über verschiedene SURPHASER-Modelle.

Tab. 1: Verschiedene SURPHASER-Modelle im Überblick

Modell	Empfohlener Arbeitsbereich (m)	Messrauschen (mm)	Genauigkeit (mm)	Laserklasse	Farbkamera
75USR	0,25 ... 2,5	0,025	< 0,15 bei 1,5 m	3R (685 nm)	integriert
80USR	0,25 ... 3	0,045	< 0,15 bei 1,5 m	1 (1550 nm)	integriert
100HSX-SR	1 ... 7	0,024 bei 4 m	< 0,3 bei 3 m	3R (685 nm)	Option
Model 10	1 ... 50	0,12 bei 15 m	< 0,7 bei 15 m	1 (1550 nm)	integriert
	1 ... 110	0,25 bei 15 m	< 0,9 bei 15 m		

2.2 Registrierung

Für die vollständige Digitalisierung großer Bauteile sind meist Scans von unterschiedlichen Standpunkten notwendig und eine möglichst genaue Registrierung von großer Bedeutung. Es stehen unterschiedliche Möglichkeiten der Punktwolken-Registrierung wie Best Fit, die Nutzung von Zielzeichen und ebenenbasierte Verfahren zur Verfügung. In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf die Verwendung von Zielzeichen/Kontrasttargets und ebenenbasierten Verfahren.

Bei der Verwendung von Zielmarken werden spezielle Marken (Schachbrettmuster, Kugeln oder Kreise) ausgebracht. Diese dienen als Verknüpfungspunkte in den verschiedenen Scans.

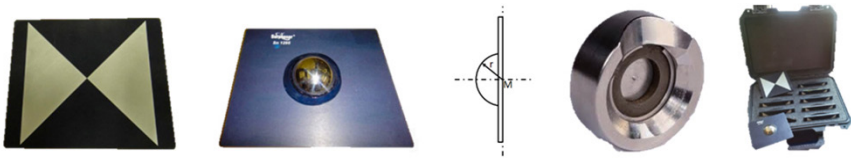


Abb. 2: SURPHASER-Kontrasttargets und Tracker-Nest (SMR)

In spezifischen Fällen besteht auch die Notwendigkeit, die Punktwolke in ein gegebenes Objektkoordinatensystem zu transformieren. Dabei kann es sich zum Beispiel um ein mit einem Lasertracker erzeugtes Festpunktnetz handeln. SURPHASER nutzt hierzu Kontrasttargets, deren Mittelpunkt mit einer Genauigkeit von weniger als $50\ \mu\text{m}$ mit dem Mittelpunkt der rückseitig montierten 1,5 Zoll-Halbkugel übereinstimmt (siehe Abb. 2). Die SURPHASER-Software erkennt automatisch die Kontrasttargets, registriert die Scans zueinander und richtet sie am vorgegebenen Festpunktnetz aus.

Bei der ebenenbasierten Registrierung werden zunächst planare Flächen in den erfassten Punktwolken ermittelt. Diese bilden anschließend die Grundlage für eine paarweise Registrierung der Scans. Der Prozess wird durch eine Blockausgleichung abgeschlossen, in der mögliche Widersprüche ermittelt werden können. Die wesentlichen Vorteile dieser Strategie sind die Verbesserung des Fehlerbudgets, als auch dessen Invarianz gegenüber der Punktverteilung analog zu kugelförmigen Zielmarken.

Durch den erstgenannten Aspekt kann, je nach Genauigkeitsforderung, ganz auf künstliche Zielmarken verzichtet werden oder deren notwendige Anzahl zur selektiven Stützung eines Netzes stark reduziert werden. Eine Voraussetzung für diese Strategie ist die ausreichende Existenz planarer Flächen sowie deren Verteilung. Eine detaillierte Beschreibung dieser Registrierungsstrategie ist in Wujanz et al. (2018) zu finden, ein Vergleich verschiedener Registrierungsalgorithmen wurde in Wujanz et al. (2019) durchgeführt.

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Tetraeder (Kalibrierkörper von OPUS Metrology)

Ein Kalibrierkörper in Form eines Tetraeders, welcher hochgenau vermessen und ein UKAS-Kalibrierzertifikat besitzt, wurde mit einem SURPHASER 100HSX-SR von unterschiedlichen Standpunkten gescannt (siehe Abb. 3). Die Auflösung betrug 60 Linien pro Grad, was einem Punktabstand von ca. 0,6 mm in 2 m Abstand beträgt. Die Registrierung der Punktwolken erfolgte mittels Zielmarken.



Abb. 3: Tetraeder-Kalibrierkörper

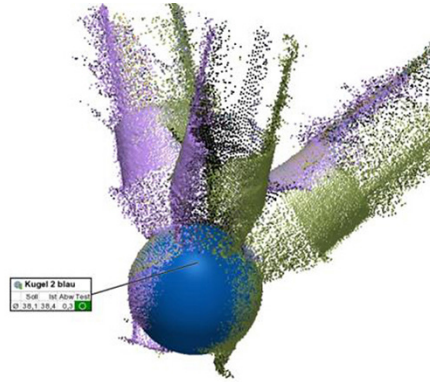


Abb. 4: Ausschnitt Punktwolke

Die Punktwolken der matten Stahlkugeln wurden mittels POLYWORKS-Software an Kugelgeometrien gefittet (siehe Abb. 4) und anschließend deren Mittelpunkte bestimmt. Die Berechnung der Gesamtseitenlängen des Tetraeders erfolgte auf Basis der bestimmten Durchmesser und der Abstände der Kugelmittelpunkte (siehe Abb. 5). Insgesamt konnte bei der Bestimmung der Seitenlängen eine mittlere Abweichung von $-0,39$ mm und maximal von $-0,43$ mm gegenüber den zertifizierten Werten erreicht werden (siehe Tab. 2 und Tab. 3).

3.2 Rotorblatt

Um ein Rotorblatt wurde mit einem Lasertacker ein Netz mit 31 Festpunkten erzeugt. Von 16 Standpunkten wurden Scans mit einem SURPHASER 100HSX-SR durchgeführt, um die Oberfläche des Messobjektes zu erfassen. Jeder einzelne Scan wurde über mindestens drei Festpunkte registriert und ins Objektkoordinatensystem transformiert.

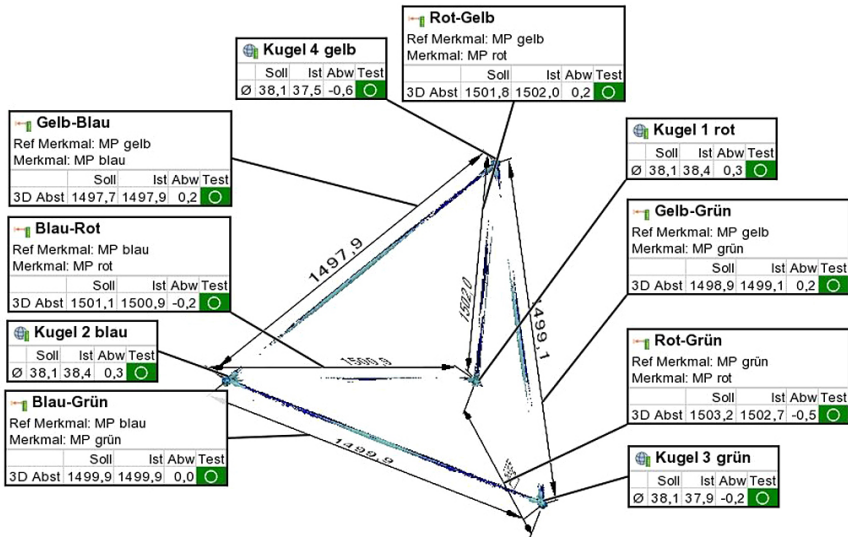


Abb. 5: Kugel-Fit, Bestimmung von Durchmessern und Längen

Tab. 2: Kugeldurchmesser

	Zertifikat/mm	Scan/mm	Abweichung/mm
Gelb	38,101	37,5	0,6
Grün	38,100	37,9	0,2
Blau	38,100	38,4	-0,3
Rot	38,101	38,4	-0,3

Tab. 3: Seitenlängen

Kugel 1	Kugel 2	Seitenlängen Zertifikat/mm	Seitenlängen Scan/mm	Abweichung/mm
Gelb	Blau	1535,845	1535,9	0,01
Grün	Gelb	1536,965	1536,8	-0,16
Blau	Grün	1537,976	1538,1	0,07
Rot	Blau	1539,184	1539,3	0,12
Rot	Gelb	1539,945	1540,0	0,01
Rot	Grün	1541,28	1540,0	-0,43

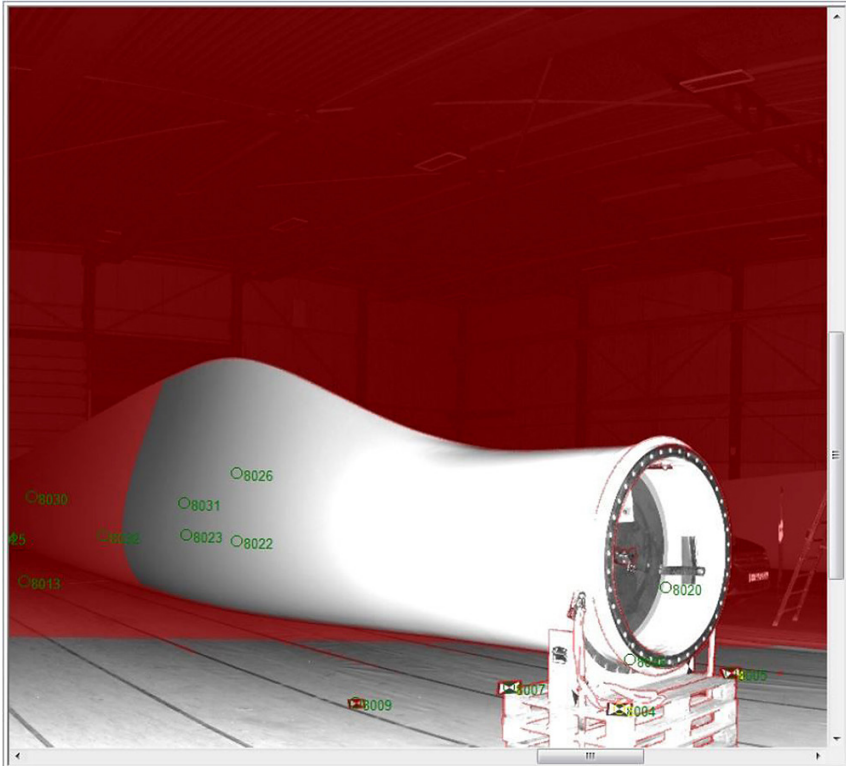


Abb. 6: Intensitätsbild des Rotorblattes mit eingeblendeten Festnetzpunkten

Abb. 6 zeigt das Intensitätsbild eines Scans (2D) mit einem Overlay der Festpunkte. Da es sich um ein Overlay handelt, werden in dieser Darstellung Festpunkte, die hinter dem Messobjekt liegen, auf dessen Oberfläche dargestellt.

Die erfassten Daten wurden anschließend mit drei verschiedenen Registrierungsstrategien verarbeitet:

- a) der rein zielzeichenbasierten Registrierung
- b) der zielzeichenbasierten Registrierung mit Anschluss an das Lasertrackernetz
- c) einem ebenenbasierten Ansatz.

Bezüglich der Aufnahmekonfiguration (siehe Abb. 7) ist zu erwähnen, dass diese auf die Registrierung von Zielmarken abgestimmt wurde. Für die rein zielzeichenbasierte Registrierung wurden zunächst die Zielzeichenzentren in der Software des Scannerherstellers detektiert. Alle weiteren im Folgenden aufgeführten Ergebnisse wurden mit Scantra 2.3 berechnet. Insgesamt wurden 27 Zielzeichen (kleine Kreise in Abb. 7) um das Rotorblatt verteilt, die zu ins-

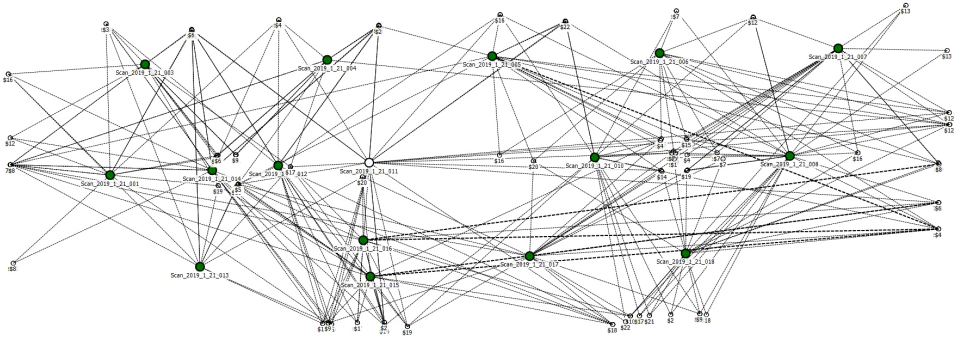


Abb. 7: Übersicht über Standpunkte (große Kreise), Zielmarken (kleine Kreise) und Korrespondenzen (gestrichelte Linien)

gesamt 308 Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen (gestrichelte Linien) zwischen den Scans führten. Die mittleren Residuen belaufen sich auf 1,09 mm und charakterisieren so die nachbarschaftliche Genauigkeit. Anschließend erfolgte eine Fehlerfortpflanzung, bei der die Stationierungsgenauigkeiten (grüne Kreise) in Relation zu einer Referenzstation (weißer Kreis) bestimmt wurden. Diese Zahlen charakterisieren in gewisser Weise ein „wackeln“ der Stationen relativ zur fehlerfrei angenommenen Referenz und somit die absolute Genauigkeit. Im Mittel beträgt die Stationierungsgenauigkeit 0,41 mm, welche die gesamte Netzkonfiguration berücksichtigt.

Zur Stabilisierung des Netzes wurde die zuvor beschriebene Konfiguration mit den 31 Lasertrackerpunkten verknüpft, was zu 97 zusätzlichen Korrespondenzen führte. Im Mittel betragen die Residuen zum Trackernetz 0,87 mm, die Residuen zwischen den benachbarten Scans betragen 1,24 mm im Mittel während die mittlere Stationierungsgenauigkeit auf 0,32 mm verbessert werden konnte.

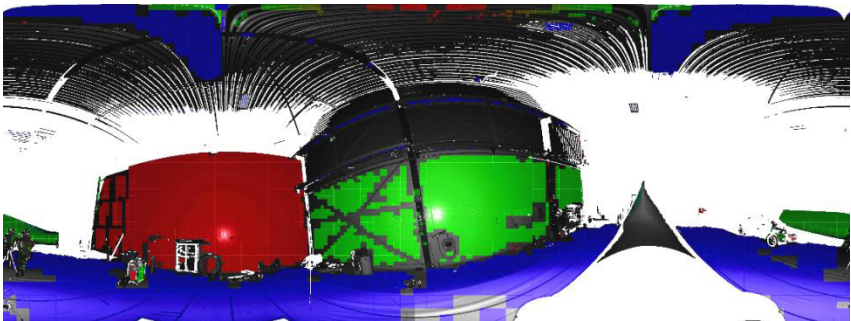


Abb. 8: Detektierte Ebenen in einem Scan

Die Grundlage für die letzte Strategie bilden die in den Punktwolken basierten Ebenen, die in **Abb. 8** dargestellt sind. Unterschiedliche Orientierungen der Ebenen werden durch unterschiedliche Farben hervorgehoben. Nach der Ebenendetektion findet ein Ebenenmatching statt, aus dem paarweise Transformationsparameter hervorgehen. Abschließend wird eine Blockausgleichung durchgeführt, die Widersprüche aufdeckt und Spannungen im Netz minimiert. Eine detaillierte Darstellung ist in Wujanz et al. (2018) zu finden.

Abb. 9 zeigt die Netzkonfiguration nach der Blockausgleichung, wobei die Lagerung des Netzes analog zur in **Abb. 7** dargestellten Situation gewählt wurde. Blaue Linien kennzeichnen hier ebenenbasierte Registrierungen zwischen Scans. Auf Grund der zuvor beschriebenen Aufnahmeconfiguration konnten im Vergleich zur zielzeichenbasierten Strategie weniger Registrierungen zwischen Scans berechnet werden. Dennoch konnten eine mittlere Stationierungsgenauigkeit von 0,39 mm erreicht werden. Die relativen Genauigkeiten zwischen benachbarten Scans betragen im Mittel 0,61 mm.

Abb. 10 zeigt das Messobjekt mit dem Festpunktnetz als vermaschte Punktwolke.

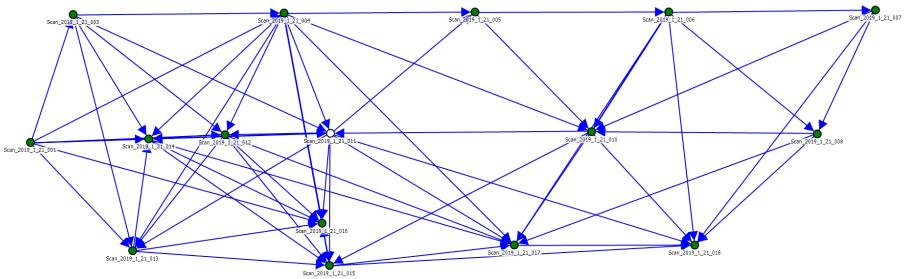


Abb. 9: Übersicht über Standpunkte (große Kreise), Zielmarken (kleine Kreise) und Registrierungen (blaue Linien) zwischen Scans

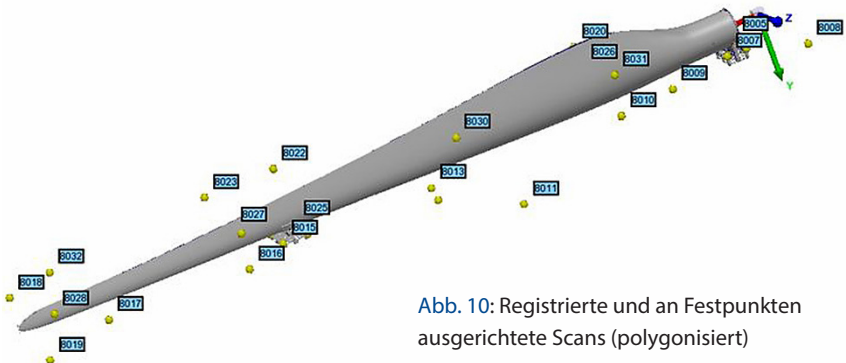


Abb. 10: Registrierte und an Festpunkten ausgerichtete Scans (polygonisiert)

3.3 Anwendungsbeispiel Automobilbau, Cubing

Die Genauigkeitsanforderungen im Automobilbau, insbesondere im Bereich „Cubing“, sind sehr hoch. Ein Cubing-Modell ist eine mehrteilige massive Rohbaukarosse, die alle Funktionalitäten (Aufnahmen, Halter, Bolzen, etc.) bereithält, um Nullteile (Teile, die noch nicht in Serie sind), alle Anbau und Verkleidungsteile aufzunehmen.

Eine Registrierung von Einzelscans über Best Fit-Algorithmen wird bei dieser Anwendung nicht akzeptiert. Daher ist die Kombination von SURPHASER-Nahbereichsscanner mit den schon beschriebenen Kontrasttargets zur Referenzierung zu bestehenden Festpunktnetzen erfolgsversprechende Lösung.

An jedem Cubing-Modell sind Festpunkte angebracht, die das Objektkoordinatensystem definieren. Über die 1,5 Zoll-Nester werden die Einzelscans registriert und ins PKW-Koordinatensystem transformiert. In [Abb. 11](#) links ist das Intensitätsbild mit den automatisch gefunden Kontrasttargets dargestellt. Rechts wird die Punktwolke, bestehend aus den Scans von verschiedenen Standpunkten, gezeigt.

Die erreichten Genauigkeiten für jeden Scan werden in einer Datei gespeichert. Die Datei beinhaltet die Bezeichnung des Festpunktes, Soll-Koordinaten, Ist-Koordinaten, 3D-Fehler, Distanzfehler sowie dem horizontalen und vertikalen Winkelfehler (siehe [Tab. 4](#)).

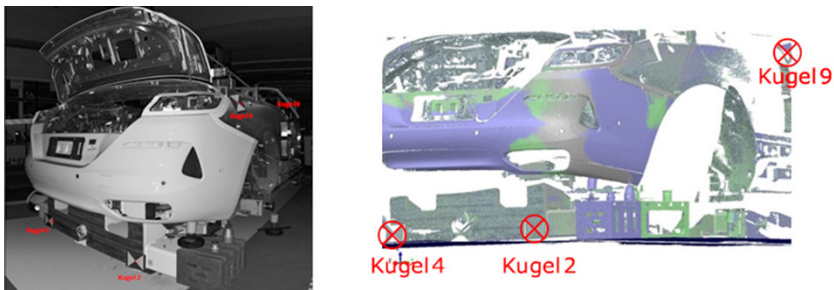


Abb. 11: Beispiel „Cubing“, Intensitätsbild und Punktwolke mit Festnetzpunkten

Tab. 4: Beispiel „Cubing“, Messabweichungen

Name	Base X	Base Y	Base Z	Scan@B X	Scan@B Y	Scan@B Z	3D Error	Dist Error	Hor Error (arc sec)	Vert Error (arc sec)
Kugel 2	3578744	479910	-345855	3578748	479914	-345863	10	-1	0,02	-1,24
Kugel 4	3578559	-480097	-345776	3578562	-480114	-345784	19	15	-1,04	-0,26
Kugel 9	3150022	875738	559750	3150014	875753	559767	24	3	2,18	2,07

Eine weitere Auswertung der Registriergenauigkeit von Scan zu Scan wird ebenfalls ausgegeben. In diesem Anwendungsbeispiel lag der Registrierungsfehler der gezeigten drei Einzelscans zwischen 96 μm und 112 μm bei Verwendung eines SURPHASER 75USR.

Die oben gezeigten Beispiele verdeutlichen, das die hochgenauen SURPHASER-Nahbereichsscanner ihren Markt in Industrien, wie Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie, Zugbau, Energieerzeugern u. a. gefunden haben.

Für die genaue Vermessung von großen Bauteilen, bei der häufig interdisziplinär gearbeitet werden muss, stehen die SURPHASER-Scanner als eine sinnvolle, effiziente Erweiterung zu Technologien wie z. B. Lasertracker, Photogrammetrie und Streifenprojektion zur Verfügung.

Literatur

- Basis Software Inc.: Datenblätter und Webseite des Surphaser-Herstellers, Stand 2018/2019. www.surphaser.com.
- Ferrucci, M., et al. (2013): Ranging performance evaluation of a laser scanner. ASPE conference 2013. www.aspe.net/publications/Short%20Abstracts%2013A/3783.pdf.
- Greg Dolphin: New ScanStation Portfolio Intro, 2015. www.slideshare.net/GregDolphin/new-scanstation-portfolio-intro-48157062.
- Jurdeczka, U. (2018): Beitrag zur modellbasierten Vollständigkeitsprüfung von Anbauteilen an Stahlbau-Strukturen.
- Muralikrishnan, B., et al. (2013): Volumetric performance evaluation of a laser scanner. ASPE conference 2013. www.aspe.net/publications/Short%20Abstracts%2013A/3784.pdf.
- technet (2019): Scantra – Hochgenaue Scanregistrierung ohne Targets. www.technet-gmbh.com/produkte/scantra, letzter Zugriff 08.10.2019.
- Wujanz, D., Barazzetti, L., Previtali, M., Scaioni, M. (2019): A comparative study among three registration algorithms: performance, quality assurance and accuracy. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W9, 779–786. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-779-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-779-2019).
- 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://geodaesie.info/sr/terrestrisches-laserscanning-2018-tls-2018/7933/1951>.

Kontakt

Dr.-Ing. Daniel Wujanz | Dr.-Ing. Frank Gielsdorf
technet GmbH, Am Lehnshof 8, 13467 Berlin
daniel.wujanz@technet-gmbh.com | frank.gielsdorf@technet-gmbh.com

Dipl. Ing. (FH) Peter Wintjens | Dipl.-Phys. Ralf Lichtenberger
Limes Messtechnik & Software GmbH, Gripswaldstraße 37, 47804 Krefeld
peter.wintjens@limes.com | ralf.lichtenberger@limes.com

3D-Vermessung unzugänglicher Hohlräume und Schächte im Salzbergwerk Berchtesgaden

Thorsten Strübing | Wolfgang Lochner

1 Einleitung

Im Salzbergwerk Berchtesgaden wird seit über 500 Jahren Salz untertägig abgebaut (Ambatiello 2002). Dabei wird das im Gestein enthaltene Salz zumeist in Bohrspülwerken mittels Süßwasser gelöst und die entstehende Sole zur Weiterverarbeitung nach Bad Reichenhall gefördert. Die Abbauhohlräume müssen regelmäßig vermessen werden, um die Standsicherheit des Grubengebäudes zu gewährleisten und das Abbauvolumen zu analysieren.

Die bisherigen vermessungstechnischen Verfahren erfordern zumeist das händische Vermessen der Abbauhohlräume, welches mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Insbesondere der erweiterte Schachtdurchmesser mit seinen Schachteinbauten und die eingeschränkte Bewegungsfreiheit der Messtrupps im Abbauhohlraum sind dabei problematisch. Vor diesem Hintergrund hat das Salzbergwerk Berchtesgaden in Kooperation mit dem Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München eine Messsonde entwickelt, welche auch bei geringem Schachtdurchmesser eine zentralisierte und autonome Vermessung durchführt. Dabei werden sowohl die Geometrie des Schachtes als auch die des Hohlraumes detailliert erfasst.

2 Historische Entwicklung

Im Salzbergwerk Berchtesgaden wird seit 1517 Salz abgebaut. Die Lagerstätte des Salzbergwerkes Berchtesgaden liegt im „Alpinen Salinar“ entlang der nördlichen Kalkalpen und ist Teil einer Kette von nicht verbundenen Salz-, Gips- bzw. Anhydrit führenden Aufschlüssen, welche sich von Hall in Tirol bis Puchberg am Scheeberg erstrecken (Schauberger 1986). Die Charakteristik der Lagerstätte, die insbesondere durch die heterogene Ausbildung und das in fein verteilter Form vorliegende Salz gekennzeichnet ist, erfordert den sogenannten „Nassen Abbau“. Bei diesem Abbauverfahren wird Süßwasser in bergmännisch erstellte Abbauhohlräume geleitet und das herausgelöste Salz in Form von Sole abgepumpt.



Abb. 1:
Vermessung mit
Markscheider-
Hängezeug im
Ablasswerk

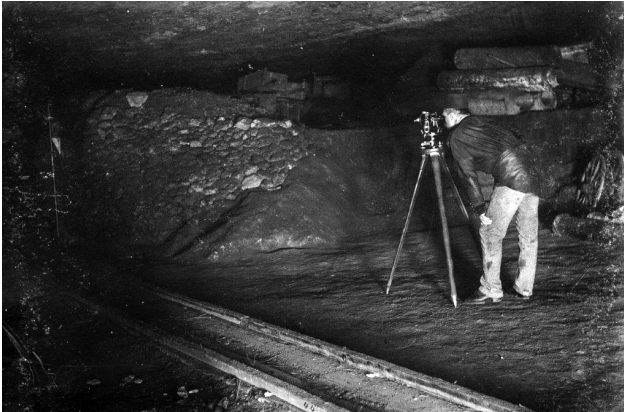


Abb. 2:
Polaraufnahme
mit Theodolit im
Ablasswerk

Bis in die 1930er Jahre wurden diese Abbauhohlräume zwischen zwei Stollensohlen angelegt, wobei die Abbauhohlräume von der oberen Sohle mit Süßwasser gefüllt wurden und die Sole nach Erreichen des vollen Salzgehaltes über die untere Sohle abgelassen wurde.

Um den Abbaufortschritt überwachen zu können, wurde nach einer solchen Entleerung der jeweilige Abbauhohlraum geöffnet und für die Markscheider zugänglich gemacht. Die Vermessung dieser Hohlräume erfolgte terrestrisch entweder durch Messen eines Ringpolygons (**Abb. 1**) und anschließender Orthogonalaufnahme oder durch eine Polaraufnahme mit Theodolit und Maßband (**Abb. 2**). Die Orientierung bzw. der Anschluss an das Grubennetz erfolgte klassisch über einen Polygonzug.

Ab den 1930er Jahren war die über der Talsohle erreichbare Salzlagerstätte soweit abgebaut, dass mit dem Auffahren von Abbauhohlräumen ca. 30 m unter der untersten Sohle begonnen wurde. Ebenso wurde die Solegewinnung



Abb. 3:
Vermessung mit
Markscheider-
Hängezeug

optimiert, so dass seither die Sole kontinuierlich gewonnen wird. Bei diesem Verfahren wird permanent Süßwasser in den Hohlraum eingeleitet und gleichzeitig Sole aus dem Hohlraum abgepumpt. Dies führt dazu, dass der Werkshohlraum permanent mit Sole gefüllt ist.

Bei diesen „Schachtsinkwerken“ war der herkömmliche Anschluss mittels Polygonzug nicht mehr möglich. Der Anschluss erfolgte nun über eine einfache Schachtlotung. Die Orientierung wird mithilfe eines Bussolenzuges erreicht. Bei diesen Vermessungen wird der Werkshohlraum in der Regel nicht mehr komplett entleert. Zur Vermessung wird der Solespiegel lediglich ca. 1,6 m abgesenkt. Danach werden Boote zur Befahrung über den Schacht eingebaut und die Vermessung vom Boot aus durchgeführt (Abb. 3). Bis 2014 erfolgte diese

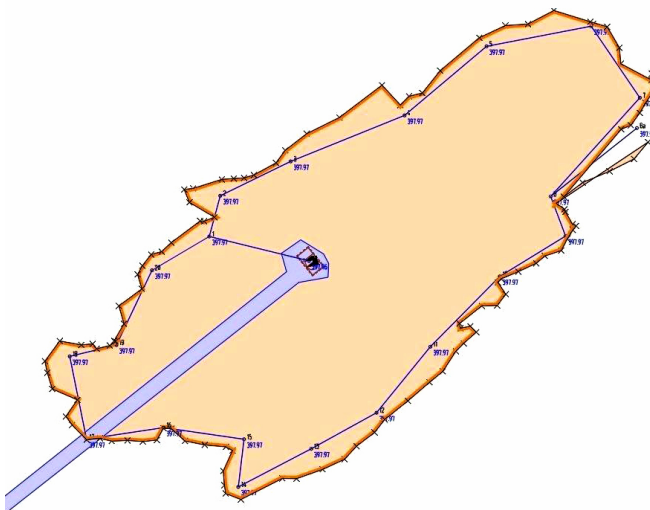


Abb. 4:
Ergebnisse einer
klassischen Werks-
vermessung

Vermessung klassisch durch Messen eines Schnurpolygons und Detailerfassung im Orthogonalverfahren. Die Ergebnisse einer solchen Vermessung sind in [Abb. 4](#) ersichtlich.

Seit 2014 erfolgt die Erfassung des Werkshohlraumes durch den Einsatz eines terrestrischen Laserscanners (TLS). In Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr München wurde ein Messboot konzipiert, mit dem es möglich wurde, den Werkshohlraum als 3D-Punktwolke zu erfassen und durch Generalisierung der Scandaten die Messergebnisse im vorhandenen Risswerk nachzutragen. Dabei konnte das Datenvolumen weitestgehend minimiert werden (Timm 2011, Becker 2013).

2.1 Umstellung auf Zentralvermessung

Im Zuge von Optimierungsmaßnahmen der Soleproduktion werden derzeit Überlegungen angestellt, das Abbauverfahren vom Abbau über einen befahrbaren Schacht unter atmosphärischen Bedingungen auf ein Abbauverfahren unter Druck im Bohrlochbergverfahren umzustellen. Bei diesem Abbauverfahren wird der Solprozess lediglich über ein schmales Bohrloch betrieben. Somit wurde es notwendig, ein Messverfahren zu entwickeln, welches in der Lage ist, den Abbauhohlraum gemäß den Vorgaben der Markscheiderbergverordnung vollständig über ein Bohrloch zu erfassen und darstellen zu können (Marksch-BergV 1998).

Das im Bereich von Gasspeicherkavernen eingesetzte Messverfahren auf Sonarbasis zeigte sich bei hiesigen Vergleichsmessungen für diese spezielle Anwendung in unserer Lagerstätte nur als bedingt einsetzbar. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr München das Konzept einer Messsonde entwickelt, das es uns ermöglicht, das Bohrloch und die neu zu erstellenden Abbauhohlräume je nach Entwicklungsfortschritt in ihrer Ausdehnung möglichst vollständig und richtig zu erfassen. Die Erfahrung, dass sich der Abbauhohlraum beim bisherigen Laugverfahren je nach Gebirge mitunter sehr inhomogen entwickelt, machte es notwendig sicherzustellen, dass der Werkshohlraum als möglichst kompakte Punktwolke erfasst wird. Gleichzeitig soll mit einer Videokamera der Werkshohlraum auch visuell dokumentiert werden. Ferner konnte bisher beobachtet werden, dass durch das neue Sondenverfahren unter Druck kompaktere Abbauhohlräume entstehen, welche durch eine Vermessung von einem zentralen Punkt, dem Bohrlochmittelpunkt, vollständig erfasst werden können.

2.2 Anforderungen an das neue Messsystem

Basierend auf den bisherigen Erfahrungen und den Vorgaben der Markscheidebergverordnung wurde das folgende Anforderungsprofil für die Konzeption der Messsonde festgelegt:

- Einsatz der Messsonde in Bohrlöchern mit < 300 mm Durchmesser
- Erfassung der Bohrlochgeometrie mittels Lidar
- Einsatz der Messsonde in Bohrlöchern mit bis zu 400 m Teufe
- Richtungsübertragung muss über die gesamte Teufe möglich sein
- Reichweite des TLS bis zu 100 m, um die Erfassung von Werkshohlräumen mit einem Durchmesser von bis zu 200 m gewährleisten zu können
- Messdatenerfassung muss so gestaltet sein, dass sie den Anforderungen der Markscheidebergverordnung entspricht und mit einer handelsüblichen Auswertesoftware bearbeitet werden kann
- Möglichkeit zur visuellen Dokumentation des Schachtes und des Werkshohlraumes

3 Messsystem

3.1 Überblick und Funktionsweise

Das Messsystem wurde in Form einer stabförmigen Messsonde realisiert, deren Durchmesser allein durch die Dimensionen des verwendeten TLS begrenzt wird. [Abb. 5](#) zeigt den typischen Messaufbau an einem Bohrspülwerk. Das gesamte Messsystem ist schienengebunden. Die Messsonde wird über eine Umlenkrolle vertikal in den Bohrlochschacht eingeführt. Die angehängte Winde verfährt die Messsonde mit einer maximalen Geschwindigkeit von 25 m/Min., wobei das Windenseil die Stromversorgung und die Datenübertragung ermöglicht. Im Anschluss an die Winde folgt ein weiterer Wagon, auf dem die Steuereinheit der Winde und die Steuereinheit der Messsonde in Form eines Laptops mit angeschlossenem Monitor platziert sind.

[Abb. 6](#) zeigt die Messsonde im Detail. Sie wird über eine Kupplung mit dem Windenseil verschraubt. Im oberen Bereich befinden sich die elektronischen Komponenten zur Stromversorgung und Datenverarbeitung. Dabei werden sämtliche Rohmessdaten in einem lokalen Mini-PC erfasst und gespeichert, sowie in aufbereiteter Form an die Steuereinheit übertragen, so dass der Operateur den Messprozess stetig überwachen kann. Die in [Abb. 6](#) erkennbare Aussparung im oberen Bereich enthält zwei Profilschanner, welche als Nahbereichsscanner für die Schachtvermessung eingesetzt werden. Im Anschluss folgen die Sensoren für die Orientierungsübertragung.



Abb. 5: Aufbau der Messsonde mit Messwinde am Schachtkranz

Mittig innerhalb der Messsonde befindet sich der terrestrische Laserscanner, welcher für die Vermessung der Abbauholräume eingesetzt wird. Den Abschluss bildet eine PTZ-Kamera, welche frei schwenk- und zoombar ist. Die bis zu 25-fach optisch zoombare Infrarotkamera ermöglicht eine optische Inspektion der Abbauholräume auf eine Entfernung von bis zu 200 m. Ferner dient die Kamera zur Navigationskontrolle während der Schachtbefahrung.

3.2 Orientierungsübertragung

Die konzeptionellen Vorgaben erfordern eine präzise Orientierungsübertragung über bis zu 400 m Tiefe. Von der Genauigkeit dieser Sensoren hängt maßgeblich die Qualität der resultierenden Lidar-Messungen ab. Vor diesem Hintergrund wurden zwei Sensorsysteme verbaut, um eine optimale Orientierungsbestimmung zu gewährleisten.

Die Orientierungsübertragung erfolgt einerseits über den Einsatz elektronischer Bussolen. Die Sensoren liefern eine magnetische Kompassanzeige, welche mittels entsprechender Korrekturen und Reduktion in ein Azimut überführt werden kann. Damit ist eine direkte Vermessung ohne Anschlussrichtung möglich. Nachteilig ist allerdings, dass die Sensorik sehr sensibel auf magnetische Einflüsse reagiert. Diese werden u. a. verursacht durch metallische Elemente in der Umgebung, sowie elektromagnetische Einflüsse der Messsonde selbst, begründet durch Transformatoren und andere elektrische Bauteile.



Abb. 6:
Einsatzbereite Messsonde

Ergänzend kommt eine inertielle Messeinheit (IMU) zum Einsatz. Die IMU liefert im Gegensatz zur Bussole Messwerte mit hoher Frequenz und ist weitestgehend unempfindlich gegenüber magnetischen Störeinflüssen. Jedoch ist der Sensor verhältnismäßig teuer und liefert nur eine relative Orientierung, wodurch eine Anschlussrichtung realisiert werden muss. Hinzu kommen die bei entsprechenden Sensoren bekannte Driftproblematik und die Temperaturempfindlichkeit, welche jedoch aufgrund der im Bergwerk vorherrschenden Temperaturstabilität sehr gut kompensiert werden können.

3.3 Lidar-Systeme

Für die Schachtvermessung kommen zwei Profils Scanner zum Einsatz. Aufgrund des begrenzten Öffnungswinkels müssen zwei entgegengesetzte Sensoren verbaut und synchronisiert werden. Die Scanner haben einen Messbereich von 20 mm bis 4 m bei einer Messfrequenz von bis zu 10 Hz.

Die übrigen Vermessungen werden mit einem TLS durchgeführt. Dabei entsteht eine dreidimensionale Punktwolke der Umgebung, welche allein durch die vier Stäbe und die beiden Deckplatten des Sondengehäuses verdeckt werden (Abb. 6). Der Laserscanner hat eine Reichweite von bis zu 120 m. Da es sich um ein völlig autarkes Messsystem handelt, muss bei der Integration in die Messsonde u. a. das Problem der Synchronisation gelöst werden.

4 Messvorgang

4.1 Schachtkranzvermessung

Der zentralisierte Messvorgang eines Bohrspülwerks besteht im Wesentlichen aus der Schacht- und der Hohlraumvermessung. Vorab muss die Messsonde initialisiert und eine Orientierungsmessung im Schachtkranz vorgenommen werden.

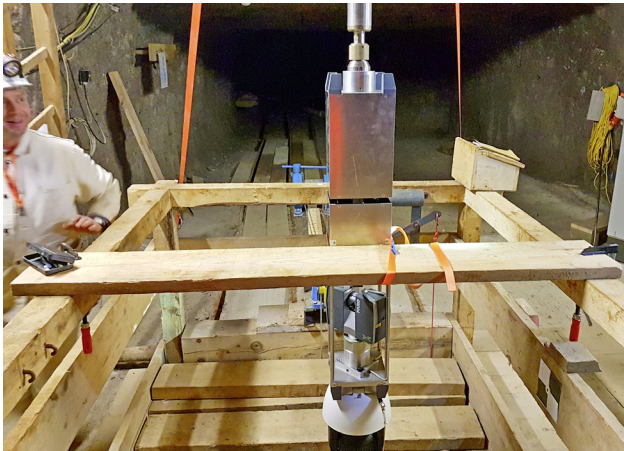


Abb. 7:
Anschlag für die
Überprüfung der
IMU

Bei der Initialisierung wird die Messsonde an die Winde angeschlossen und mit Strom versorgt. Der integrierte Mini-PC fährt selbstständig hoch und beginnt direkt mit der Aufzeichnung der Sensordaten. Nach Berücksichtigung einer Einlaufzeit der IMU wird die Messsonde an einem Anschlag fixiert (Abb. 7). Dort erfolgt die Bestimmung des gegenwärtigen, linearen Driftanteils in Ruhelage. Ferner kann durch Anschläge der Messsonde in verschiedenen Lagen der gegenwärtige Skalierungsfaktor ermittelt werden. Die Initialisierung endet mit dem Aufruf der eigens entwickelten Softwarekomponente „Messung“, mit welcher die Funktionen der Messsonde überwacht werden können (Abb. 8).

Im Bereich des Schachtkranzes befinden sich mehrere metallische Gegenstände und elektromagnetische Felder, aufgrund dessen die Azimutbestimmung der Bussolen gestört wird. Die relative Orientierung der IMU muss in Folge an eine absolute Orientierung im übergeordneten Koordinatensystem des Bergwerkes angeschlossen werden. Dazu werden vier Passpunkte mit Kugeln signalisiert und anschließend durch einen TLS-Scan erfasst. Die Messsonde muss hierbei vom Anschlag gelöst und ggf. in der Höhe verfahren werden. Der TLS wird via Fernzugriff über das Webinterface des Scanners im Internetbrowser kontrolliert.

4.2 Schachtvermessung

Zu Beginn der Schachtvermessung wird die Messsonde hinsichtlich der Tiefe auf ihre Referenzposition gefahren. Letztere bildet die Schnittebene der Bodenoberfläche im Schachtkranz mit der Oberkante der Messsonde. Der Teufengeber der Winde wird in dieser Position auf Null gesetzt.

Die Datenerfassung der beiden Profils Scanner läuft bereits seit Aktivierung des Mini-PCs der Messsonde. Der Operateur bedient die Steuereinheit der Winde und verfährt die Messsonde entlang des Schachtes mit einer maximalen Geschwindigkeit von 5 m/Min. Dabei wird er

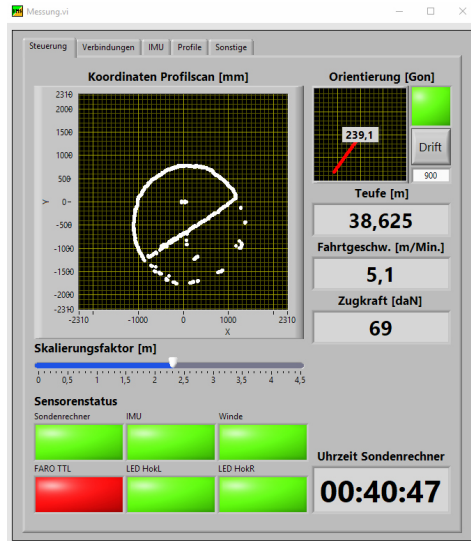


Abb. 8: Softwarekomponente „Messung“

durch die Videoinformationen der PTZ-Kamera unterstützt. Parallel kann der Operateur die Messdaten der Profils Scanner, die gegenwärtige Orientierung, sowie die Messbereitschaft sämtlicher Sensoren der Messsonde in Echtzeit über die Softwarekomponente „Messung“ überwachen (Abb. 8).

4.3 Hohlraumvermessung

Der Abbauhohlraum wird mittels TLS vermessen. Dazu wird die Messsonde so weit hinabgelassen, bis die Profils Scanner außerhalb ihres Messbereiches liegen. An dieser Position befindet sich der TLS knapp unterhalb des Himmels. Diese Position bietet die bestmöglichen Einstrahlwinkel auf die untere Hälfte des Abbauhohlraums. An dieser Stelle werden zwecks Redundanz der Messdaten zwei TLS-Scans durchgeführt.

Um bessere Einstrahlwinkel für die obere Hälfte der Abbauhohlraumes gewinnen zu können, wird die Messsonde mit Hilfe der PTZ-Kamera so weit wie möglich an die Wasseroberfläche der Sole herangefahren. Auch hier werden zwei TLS-Scans durchgeführt, so dass der Abbauhohlraum insgesamt durch vier Scans erfasst wird.

Die Vermessung des Bohrspülwerks ist an dieser Stelle grundsätzlich abgeschlossen. Dennoch wird die Messsonde mit einer Geschwindigkeit von maximal 5 m/Min. emporgezogen, um eine zweite, unabhängige Schachtvermessung durchzuführen. Im Schachtkranzbereich wird der Anschlag erneut genutzt, um den linearen Driftanteil und den Skalierungsfaktor der IMU zu überprüfen. Der gesamte Messvorgang benötigt weniger als zwei Stunden zuzüglich Rüstzeit und kann in einer Tagesschicht zweimal durchgeführt werden.

4.4 Auswertung

Für die Auswertung der Messdaten wird im Nachgang die eigens programmierte Softwarekomponente „Auswertung“ verwendet, wobei zunächst die unterschiedlichen Messdaten synchronisiert und korrigiert werden. Ferner müssen im Vorfeld aus den binären TLS-Rohdaten lesbare ASCII-Daten in Form von PTX-Dateien erzeugt werden.

Ziel der Auswertung ist die Homogenisierung der einzelnen Punktwolken zu einer Gesamtpunktwolke, die zunächst in einem örtlichen System koordiniert sind. Dabei werden die Profildaten anhand der Orientierungsinformationen korrigiert.

Hinsichtlich gleicher Teufe redundante Profile werden eliminiert, um das Datenvolumen zu reduzieren. Anschließend werden die TLS-Scans zeilenweise anhand der Orientierungsinformationen korrigiert.

Die homogenisierte Gesamtpunktwolke besteht aus insgesamt sechs Punktwolken (Abb. 9) und wird als ASCII-Daten in eine externe Auswertesoftware reimportiert. Dort erfolgt über die Passpunkte im Schachtkranz die finale Transformation in das übergeordnete Koordinatensystem des Bergwerks. Die weitere Auswertung besteht in der 3D-Vermaschung der Punktwolke, aus der Volumenberechnungen und horizontale Schnitte abgeleitet werden.

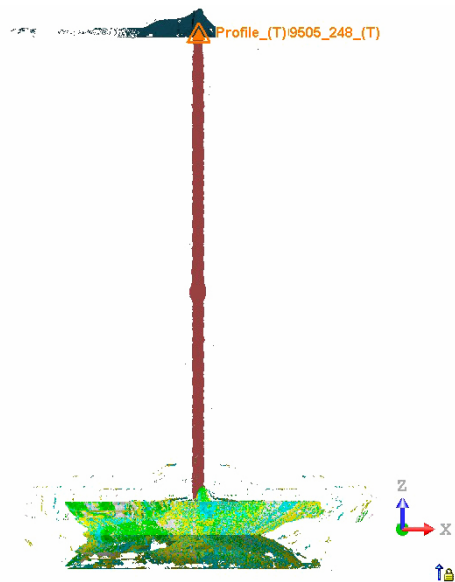


Abb. 9: Homogenisierte Gesamtpunktwolke

5 Validierung des Messsystems

Im Laufe der Entwicklung der Messsonde wurden in bestehenden Abbauhohlräumen verschiedene Testmessungen durchgeführt. Die Erfassung von Werkshohlräumen mit einer Himmelsfläche bis zu 2500 m² gelang dabei für den luftgefüllten Bereich vollständig. Anhand der Remissionen der Scandaten können unter Umständen Rückschlüsse auf die Geologie getroffen werden. Ein Vergleich der Ergebnisse der Messsonde mit einem konventionell vermessenen Abbauhohlraum ergab eine weitgehende Übereinstimmung der beiden Vermessungen (Abb. 10). Die verbleibenden Abweichungen liegen innerhalb der vorgegebenen Toleranzen.

Eine vollständige Auswertung und 3D-Verma- schung des Abbauhohlraumes zeigt, dass der gesamte luftgefüllte Werkshohlraum mit einer Punktdichte von 5 cm Rasterstärke erfasst und dargestellt werden kann. Nicht erfassbare Hinterschnedungen können eindeutig detektiert und bei der Auswertung im Nach- gang bewertet werden.

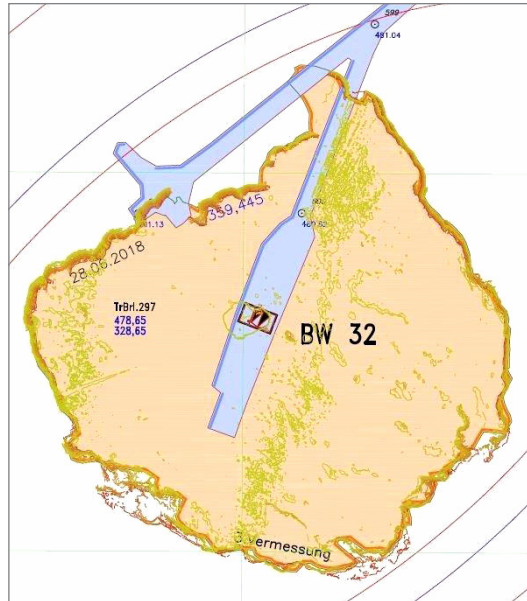


Abb. 10: Vergleich der Messsonde (orange) mit konventioneller Vermessung (rosa)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ein in-situ-Vergleich mit einem konventionell vermessenen Werkshohlraum und weitere Testmessungen in Abbauhohlräumen, welche bereits mit dem neuen Sondenverfahren erstellt wurden, haben gezeigt, dass mit der Messsonde von einem zentralen Punkt aus ein Werkshohlraum vollständig erfasst werden kann. Nicht erfassbare Bereiche sind eindeutig zu detektieren und können bewertet werden. Mit dem Messverfahren konnten sehr gute Übereinstimmungen zwi-

schen Füllvolumen des Hohlraumes und des Volumenkörpers aus der Punktwolke des Messverfahrens erzielt werden.

Als Potenzial für eine weitere Entwicklung sind die Einbindung von Ultraschallsensorik und der Einsatz von Drohnen bzw. Messbooten zur Erfassung von Abschattungen und Verschneidungen zu sehen. Ebenso kann erforscht werden, inwieweit die Messdaten des TLS zur Erfassung und Bewertung der geologischen Strukturen der Himmelsfläche herangezogen werden können. Darüber hinaus ist zu prüfen, inwieweit der Durchmesser der Messsonde aufgrund künftiger TLS-Entwicklungen weiter reduziert werden kann.

Literatur

- Ambatiello, P. (2002): Das Salzbergwerk Berchtesgaden. Geschichte von Berchtesgaden. Bd. III/2, Berchtesgaden.
- Becker, F. (2013): Ein Vergleich geeigneter markscheiderischer Messverfahren zur Hohlraumvermessung im Lösungsbergbau am Beispiel der SÜDSALZ GmbH, Salzbergwerk Berchtesgaden. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft, Montanuniversität Leoben.
- MarschBergV (1998): Verordnung über markscheiderische Arbeiten und Beobachtungen der Oberfläche (Markscheider-Bergverordnung – MarschBergV). Ausfertigungsdatum: 19.12.1986, zuletzt geändert durch Art. 4 V v. 10.8.1998 I 2093.
- Schauberger, O. (1986): Bau und Bildung der Salzlagerstätten des ostalpinen Salinars. Archiv für Lagerstättenforschung, Geologische Bundesanstalt, 217–254, Wien.
- Timm, C. (2011): Optimierung der Aufnahme und Auswertung von Bohrspülwerken mittels terrestrischem Laserscanning. Diplomarbeit an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Geodäsie, Universität der Bundeswehr München.

Kontakt

Thorsten Strübing
Institut für Geodäsie – Geodätisches Labor, Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg
thorsten.struebing@unibw.de

Wolfgang Lochner
Südwestdeutsche Salzwerke AG
Salzbergwerk Berchtesgaden
Bergwerkstraße 83, 83471 Berchtesgaden
wolfgang.lochner@salzwerke.de

Messsystem NavVis Trolley M6 – Praxisbericht vom Ingenieurbüro für Vermessungswesen

Clara Lehmann | Stephan Och

1 TPI/NavVis

Die TPI Vermessungsgesellschaft mbH ist seit 2016 NavVis-Partner. Die ersten Mapping-Projekte wurden mit dem M3-Trolley realisiert. Aktuell ist bei TPI der M6 Trolley im Einsatz mit – im Vergleich zum M3 – verbesserten Laserscannern und der Möglichkeit, Rampen u. ä. zu befahren. Im Zeitalter von Industrie 4.0 (Digitaler Zwilling, Smart Factory, BIM, IOT, KI, Augmented Reality, Virtual Reality u. ä.) ist der Einsatz von Digitalisierungssensoren (UAV, terrestrische Laserscanner, Mobile Mapping-Systeme u. a.) für einen Dienstleister wie TPI aufgrund der Kundenanforderungen selbstverständlich. In der täglichen Praxis werden oft verschiedene Sensoren für die Digitalisierungsprojekte eingesetzt.

2 Indoor Mobile Mapping System (NavVis M6)

NavVis GmbH ist ein weltweit führendes Unternehmen für die mobile Kartierung, Navigation und Visualisierung (NavVis) im Innenbereich. Das Unternehmen führte 2013 den Trolley M3 und 2018 das Nachfolgermodell M6 ein, ein mobiles Kartierungssystem, engl. Indoor Mobile Mapping System (IMMS). Das M6 IMMS basiert auf der Nutzung eines Schiebewagens (Trolley), in den mehrere Laserscanner, Kameras und Inertialsensoren integriert sind.

Neben der Hardware gehört zum M6-System auch Software, die während der Aufnahme und zur Nachbereitung der aufgezeichneten Datensätze verwendet wird, um Innenbereiche zu digitalisieren. Die NavVis Mapping Software läuft während des Aufnahmevorgangs. Das Programm NavVis SiteMaker wird zur Prozessierung der Daten benötigt und die Indoorviewer Software ermöglicht die Browser-basierte Ansicht der 3D-Daten sowie die Bewegung durch die Punktwolke. Der NavVis Indoor Navigator bietet eine visionsbasierte Positionierung, Standortbestimmung und auch Navigation für digitalisierte Räume an. Das NavVis Software Development Kit (SDK) stellt eine Sammlung von Programmierwerkzeugen zur Verfügung, mit der die Erstellung einer eigenen App möglich ist, die auf den erhobenen Daten basiert (NavVis GmbH 2018a, S. 4).

2.1 Technische Beschreibung

Der Aufbau des Trolley M6 gliedert sich in Head-, Body- und Wheel-Unit (siehe Abb. 1). Die Head-Unit umfasst die Laserscanner und die Kameras. Für niedrige Durchgangshöhen lässt sich diese in der Höhe auch während der Datenaufnahme verstellen. In der Body-Unit sind ein Display, Festplatte und die Griffe zum

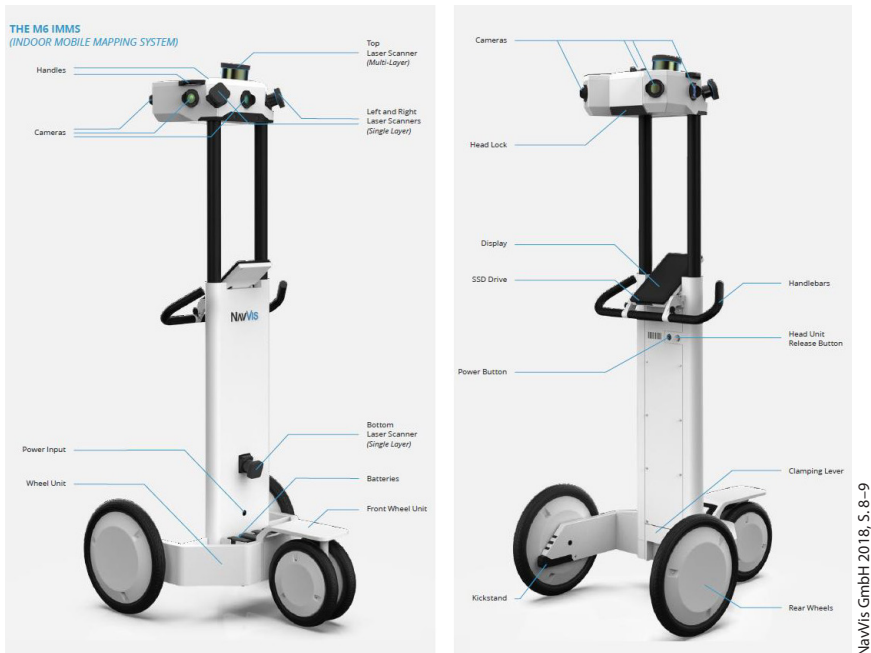


Abb. 1: Aufbau des NavVis M6

Schieben des Trolleys untergebracht. Die Wheel-Unit lässt sich innen und außen montieren, um sich auch geringen Durchgangsbreiten anpassen zu können. Allerdings führt die Montage der Reifen auf die Innenseite zu einer Abnahme der Stabilität des Trolleys.

Das M6 IMMS verwendet zwei unterschiedliche Typen von Laserscannern. Der Velodyne LiDAR Puck, der auf der Head-Unit sitzt und drei UTM-30LX-EW Laserscanner der Firma Hokuyo, die seitlich an der Head-Unit angebracht sind (siehe Abb. 2). Der größere Laserscanner Velodyne LiDAR Puck misst bis zu einer Reichweite von 100 m bei einer Genauigkeit von 30 mm (Velodyne Lidar 2019). Die kleineren Laserscanner, die hauptsächlich die Umgebung in unmittelbarer Nähe erfassen, besitzen eine Reichweite von bis zu 30 m. Die Genauigkeit

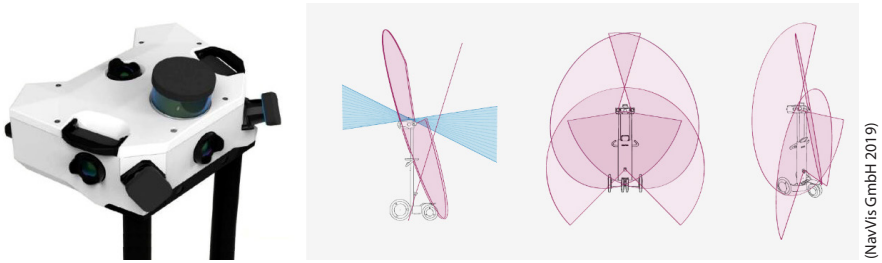


Abb. 2: Head-Unit des M6 mit Sichtfelder der Laserscanner

in bis zu 10 m Entfernung beläuft sich auf 30 mm, und zwischen 10 m und 30 m Reichweite auf eine Genauigkeit von 50 mm.

Die Kombination der Scanner ermöglicht dem System eine 3D-Kartierung der Umgebung zu erstellen. Der VL-Puck ist ein horizontaler Laserscanner, der die Umgebung im 360°-Umkreis erfasst und somit im Indoorbereich von der hohen Reichweite profitiert. Die drei UTM-30LX-EW Laserscanner scannen in annähernder vertikaler Richtung um Boden, Decke und auch seitliche Wände zu erfassen (siehe Abb. 2).

Zur Technologie des M6 gehören außerdem sechs Kameras, die 360°-Aufnahmen erstellen, welche die fotorealistische Einfärbung der Punktwolke ermöglichen und hochauflösende Panoramabilder ergeben. Sie sitzen ebenfalls seitlich an der Head-Unit (siehe Abb. 2). Durch die Anordnung der Kameras entsteht ein toter Winkel, durch den gewährleistet wird, dass der Nutzer des Systems nicht miterfasst wird.

Zur Lokalisierung des Systems im Raum vergleicht das M6-System kontinuierlich die aktuellen Laserdaten aller Laserscanner mit vorherigen Messungen (NavVis GmbH 2018, S. 38). Ein inertiales Messsystem (Inertial Measurement Unit (IMU)) VN-100 der Firma VectorNav Technologies erfasst außerdem alle Bewegungsänderungen des Systems. Die IMU verfügt über einen 3-Achsen-Beschleunigungsmesser, einen 3-Achsen-Kreisel, einen 3-Achsen Magnetsensor, einen Luftdrucksensor sowie einen 32-Bit-Prozessor (VectorNav Technologies o.J.). Des Weiteren verfügt das M6 über Sensoren, die Emissionen von Bluetooth-Sendern, WLAN-Signalen und Magnetfelddaten nachverfolgen. Die Erfassung dieser Daten dient der Navigationsanwendung.

Die NavVis Mapping Software wird während des Mapping-Vorgangs verwendet und auf dem Tablet angezeigt, das sich an der Body-Unit befindet (siehe Abb. 1). Vor Beginn der Aufnahme eines Gebäudes muss das inertielle Messsystem des Trolley M6 kalibriert werden. Dafür ist die Angabe des geografischen Standortes erforderlich. Eine grobe Näherung, wie die Angabe des Landes und der nächstgelegenen Stadt, reichen aus. Daraufhin findet eine Beschleunigungsmesser-Kalibrierung statt, für die der M6 Trolley auf ebenen Grund gestellt

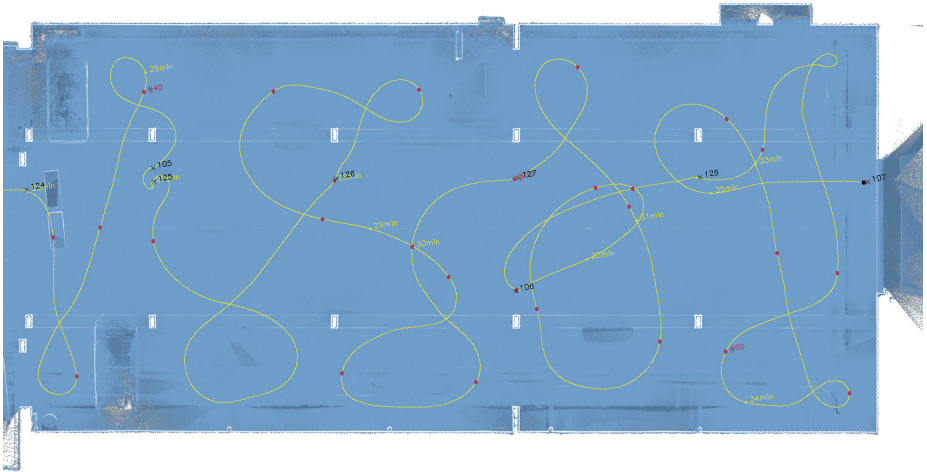


Abb. 3: Die Quality Map zeigt die Scanflächen (blau) in der Draufsicht. Die gelbe Linie stellt die Trajektorie dar. Die Aufnahmepunkte der Panoramafotos sind in Rot dargestellt und die Passpunkte sind durchnummeriert.

werden muss. Die Magnetometer-Kalibrierung wird durchgeführt, indem der Trolley zweimal langsam um seine eigene Achse gedreht wird. Nach erfolgreicher Kalibrierung kann mit dem Messvorgang begonnen werden (M6 Calibration, NavVis GmbH 2019). Dabei wird der Trolley M6 langsam durch die aufzunehmenden Innenräume geschoben.

Schon während des Mappens entsteht eine 2D-Karte des Datensatzes in der Draufsicht, die auf dem Tablet gezeigt wird (siehe Abb. 3). Die sogenannte Quality Map zeigt die Trajektorie des IMMS, die Erfassungspositionen der Fotos, die SLAM Passpunktpositionen und die Dichte der Punktwolke für den Bereich an, in dem bereits gescannt wurde. Eine größere und genauere Version der Quality Map entsteht beim Post-Processing (Glossary, NavVis GmbH 2019).

2.2 Registrierung und Georeferenzierung des IMMS

Das IMMS von NavVis besitzt die Fähigkeit gleichzeitig zu Lokalisieren und zu Kartieren, engl. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). Das mobile Mapping System ist in der Lage, sich selbst in der Karte, die vom System während des Messvorgangs erstellt wird, zu positionieren. Diese Technologie basiert auf dem SLAM-Positionierungs-Algorithmus, der die Sensorinformationen der IMU nutzt, um schrittweise aus den Scanmessungen ein 3D-Modell des Innenraums zu erstellen. Dabei werden die einzelnen Scans mit Hilfe von Überlappungsbereichen registriert. Der aktuelle Laserscan wird dafür mit dem vorherigen Scan verglichen und das System berechnet wie weit und in welche Richtung

es sich bewegt hat und wie sich die Distanz zur bereits erfassten Umgebung verändert hat (NavVis GmbH 2018a, S. 38). Durch die Verknüpfung der Scans entsteht eine Trajektorie. Die Trajektorie ist eine Kette kartesischer Koordinaten, die beschreibt, an welcher Stelle sich das IMMS bezogen auf den Datenursprung am wahrscheinlichsten während der Messung befand (Glossary, NavVis GmbH 2019). Durch die Verkettung der Messungen kann im Laufe der Zeit eine Abweichung in der M6-Positionierungsschätzung entstehen, da die Positionierungsschätzung unter anderem auf Grundlage relativ messender Sensoren entsteht. Relativ messende Sensoren unterliegen einer Drift, d. h. kleine Abweichungen in den Messungen akkumulieren sich und führen mit Voranschreiten der Zeit zu größeren Abweichungen. Dieser Drift macht sich als Abweichung zum wahren Verlauf der Trajektorie bemerkbar. Im Falle der Mapping-Ergebnisse zeigt sich der Drift demnach als Verzerrung oder Biegung langer Korridore im Vergleich zur tatsächlichen Gebäudegeometrie aus.

Um die Messgenauigkeit während des Mappings zu verbessern, empfiehlt der Hersteller NavVis mit Schleifen, sogenannten „Loop Closures“ zu arbeiten (siehe Abb. 4). Durch die Schleife

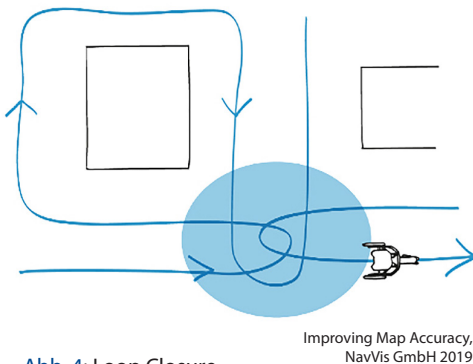


Abb. 4: Loop Closure

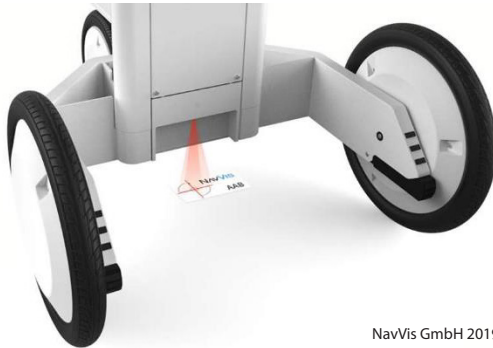
schneidet das IMMS seinen bereits zurückgelegten Weg und die Software des Post-Processings erkennt die zuvor erfasste Umgebung anhand der Laser-scandaten. Die Karte wird dementsprechend ausgerichtet und die seither aufgetretene Drift wird verringert (Improving Map Accuracy, NavVis GmbH 2019).

Eine weitere Methode die Stabilität eines Datensatzes zu verbessern, ist es, SLAM Anchors zu verwenden. SLAM Anchors sind Passpunkte am Boden, die mit dem M6 über ein kalibriertes Laserkreuz aufgenommen werden können (siehe Abb. 5). Sie dienen als absolute Referenz für die Trajektorie.

Mit Hilfe des SLAM-Algorithmus wird die geschätzte Trajektorie während des Mappings berechnet und beim Post-Processing nochmals verbessert. Wenn die Passpunkte tachymetrisch eingemessen sind, dann helfen sie nicht nur die Genauigkeit der Datensätze zu verbessern, sie automatisch auszurichten und zu entzerren, sondern ermöglichen auch noch die Georeferenzierung (SLAM Anchors explained, NavVis GmbH 2019).

SLAM Passpunkte, die nicht eingemessen wurden, haben die nicht als Referenz und können deshalb nicht für die Entzerrung der Trajektorie eingesetzt

werden. Sie können jedoch den Ausrichtungsprozess der Datensätze zueinander vereinfachen, indem die Passpunkte detektiert werden, die in mehreren Datensätzen aufgenommen wurden. Die Verteilung der SLAM Passpunkte im Raum ist abhängig vom Gebäudeplan. Es ist sinnvoll, mindestens alle 25 m, in Ecken und am Ende langer Korridore die Passpunkte zu setzen. Wenn sie mit Hilfe



NavVis GmbH 2019

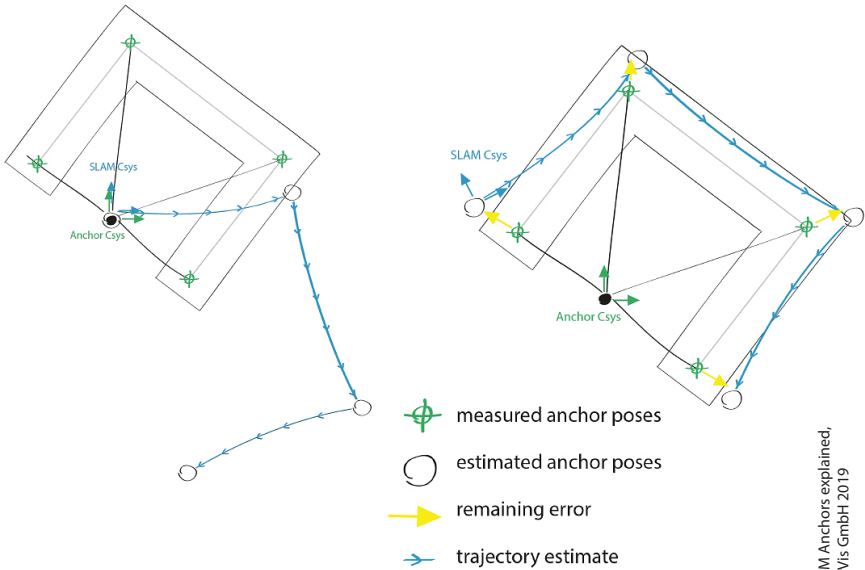
Abb. 5: Laserkreuz zur Aufnahme von SLAM Anchor Bodenpasspunkten

die Ausrichtung der Datensätze mit einer starren Transformation (siehe Abb. 6) statt. Während die Koordinaten der SLAM Passpunkte in dem System sind, in dem sie mittels Tachymeter eingemessen wurden, liegen die Datensätze, die mit dem IMMS aufgenommen worden sind, noch in einem lokalen Koordinatensystem mit Ursprung am Startpunkt der Trajektorie. Über eine Ausgleichung nach Methode der kleinsten Quadrate wird das lokale Koordinatensystem der Datenaufnahme in das übergeordnete Koordinatensystem der Tachymetermessung transformiert, sodass die Abweichungen in den Passpunkten minimal werden. Je nach Einfluss der Drift und Ungenauigkeiten in der Positionierung können jedoch Restabweichungen von einigen Zentimetern bestehen bleiben.

Erst in einem zweiten Schritt verbessert nun die Software die geschätzte Trajektorie mit den Informationen der gemessenen Passpunktkoordinaten mit einem Entzerrungsalgorithmus. Die verbleibenden Abweichungen werden eliminiert, indem die Trajektorie in einem gewissen Bereich vor und nach den SLAM Passpunkte mit dem Entzerrungsalgorithmus den übergeordneten Koordinaten aus der Tachymetermessung angeglichen wird. Mit abnehmender Entfernung zu einem SLAM Passpunkt fällt die Anpassung der Trajektorie stärker aus. Auf Wunsch können auch einzelne Passpunkte von dem Entzerrungsalgorithmus vernachlässigt werden (siehe Abb. 7). In den somit resultierenden Abweichungen kann beispielsweise der Einfluss des Drifts in den Abweichungen zu den SLAM Passpunkten abgelesen werden.

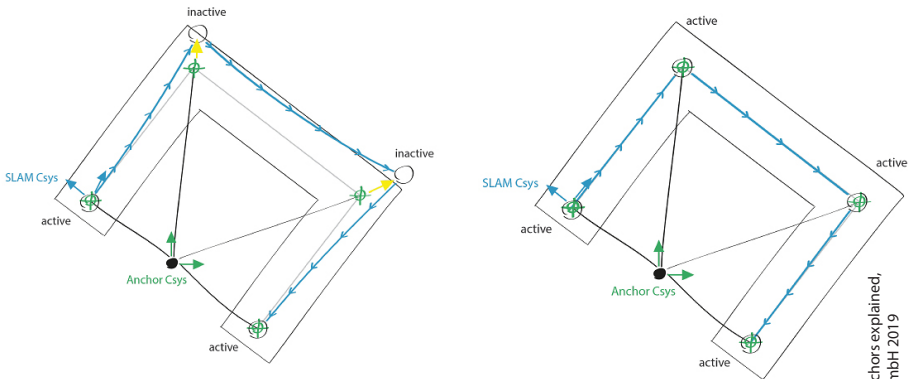
eines Tachymeters eingemessen worden sind und mit ihren Koordinaten beim Post-Processing mit einbezogen werden sollen, dann müssen die Koordinaten der Passpunkte in einer Datei aufgelistet und in der Software SiteMaker hinterlegt werden.

Im Post-Processing wird die Trajektorie über die Position der SLAM Passpunkt verbessert. In einem ersten Schritt findet



SLAM Anchors explained,
NavVis GmbH 2019

Abb. 6: In einem ersten Schritt wird eine starre Transformation gerechnet, um das lokale System anhand der SLAM Passpunkten in ein übergeordnetes System zu transformieren.



SLAM Anchors explained,
NavVis GmbH 2019

Abb. 7: In einem zweiten Schritt wird ein Entzerrungsalgorithmus angewandt, um die Trajektorie den SLAM Passpunkten anzupassen.

3 Genauigkeitsanalyse des Messsystems NavVis Trolley M6

Im Rahmen einer Bachelorarbeit, die durch die TPI Vermessungsgesellschaft mbH begleitet wurde, ist eine Genauigkeitsanalyse des M6 IMMS durchgeführt worden. Nach einem eigens erarbeiteten Konzept wurde geprüft, wie hoch die erreichbare Genauigkeit einer Punktwolke des mobilen Mapping-Systems M6 von NavVis ist und welchen Einfluss die SLAM Anchor Passpunkte dabei auf die Genauigkeit haben.

Für die Analyse wurde in einem Aufnahmeobjekt eine Referenzmessung mit dem statischen Laserscanner, der ScanStation P40 von Leica, gemacht. Daraufhin wurden verschiedene Messläufe mit dem M6-System durchgeführt. Die Messlaufvarianten gingen von der Herstellerempfehlung, mit möglichst vielen Loop closures zu laufen, bis hin zu einem komplett geradlinigen Lauf. Die M6-Rohdatensätze wurden jeweils mit und ohne Passpunkte prozessiert, um Unterschiede durch den Entzerrungsalgorithmus in den resultierenden Punktwolken analysieren zu können.

Es wurden koordinatenmäßige Abweichungen in Lage und Höhe, anhand von Stützenmittelpunkten und Unterzugkantenschnittpunkte ermittelt. Lageabweichungen wurden in Längs- und Querabweichungen zu dem schlauchförmigen Aufnahmeobjekt unterteilt.

Wie zu erwarten, haben die Laufvarianten nach der NavVis Herstellerempfehlung, im Vergleich zu den anderen Laufvarianten, die höchsten Genauigkeiten erzielt. Der Einsatz von SLAM Anchor Passpunkten verbessert die Genauigkeit der Punktwolken jedoch nochmal. Selbst wenn die Läufe nicht exakt nach dem Prinzip der Herstellerempfehlung durchgeführt wurden, können durch den Miteinbezug der Passpunkte ähnliche Genauigkeiten erzielt werden. Unter den Bedingungen des Aufnahmeobjektes wurden in der Längsrichtung mit Passpunkten eine Genauigkeit von $3 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ und ohne Passpunkte eine Genauigkeit von $3 \text{ mm} \pm 16 \text{ mm}$ erreicht. In der Querrichtung mit Passpunkten wurde eine Genauigkeit von $4 \text{ mm} \pm 6 \text{ mm}$ und ohne Passpunkte $-8 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}$ erzielt und die Genauigkeit der Höhe mit Passpunkten erreichte $12 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ und ohne Passpunkte $12 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$. In den Höhenabweichungen zeigt sich ein konstanter Offset von 1 cm, dessen Ursache weiter untersucht werden sollte. Ein weiterer Test der inneren Genauigkeit bestätigt die Herstellerangaben der Genauigkeiten der eingesetzten Laserscanner mit $5 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, mit dem die Herstellerangabe des Laserscanners eingehalten wird.

Der Einfluss der Verteilung und Anzahl von Passpunkten auf die Genauigkeit wurde überprüft, indem ein Lauf nach Herstellerempfehlung in mehreren Varianten an Verteilungs- und Anzahl unterschieden prozessiert wurde. Die Abweichungen zwischen der Referenzpunktwolke und der Punktwolke einer Passpunktvariante wurde farblich dargestellt (siehe [Abb. 8](#)).

Ergebnis dieser Auswertung ist, dass die Passpunkte möglichst gut im Aufnahmeobjekt verteilt sein müssen, um die Punktwolke zu stabilisieren und Abweichungen zu verhindern. Um die Drift zu Beginn des Laufes direkt reduzieren zu können, sollte möglichst sofort nach Messbeginn ein Passpunkt vom M6-System erfasst werden.

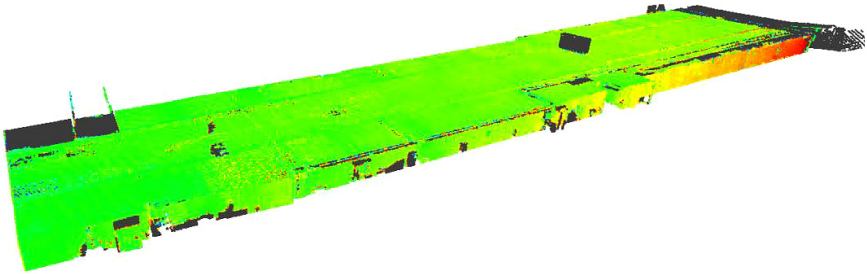


Abb. 8: Aufnahmeobjekt Tiefgarage mit etwa 100 m Länge. Die farbliche Darstellung zeigt die Abweichungen einer NavVis-Punktwolke zu einer Referenzpunktwolke. Im rechten Teil ist durch die rötliche Einfärbung der Punktwolke der Einfluss der Drift zu sehen, da in diesem Bereich keine Passpunkte genutzt wurden. Rot spiegelt eine Abweichung von etwa 9 cm wider.

4 Beispielprojekt Bestandsaufnahme Gewerbeimmobilie

Das Mobile Mapping Systems NavVis wurde zur digitalen Aufnahme von circa 40.000 m² einer Gewerbeimmobilie genutzt. Ziel war aktuelle Bestandspläne für eine geplante Sanierungsmaßnahme zu erstellen. Das Aufnahmeobjekt wird heutzutage als Gewerbepark für diverse Unternehmen vornehmlich aus dem Bereich der Medien genutzt. Zum Zeitpunkt der Messungen wurde ein Großteil der Flächen noch immer genutzt und niemand sollte in seiner täglichen Arbeit gestört werden sollte.

Durch den M6 Trolley konnten alle Räumlichkeiten besonders schnell und nahezu geräuschlos vollständig digital erfasst werden. Ohne große Aufmerksamkeit konnten circa 40.000 m² über acht Stockwerke in wenigen Tagen erfasst werden. An für den Trolley unzugänglichen Stellen, wie Treppenhäuser, kam ein terrestrischer Laserscanner zum Einsatz.

Ergebnis der Scans ist eine vollständige, farbrealistische Punktwolke in 3D (siehe [Abb. 9](#)). Diese wurde in eine CAD-Software eingelesen, um 2D-Grundrisse und Schnitte des gesamten Aufnahmeobjektes zu erstellen. Aber auch virtuelle Begehungen oder die Erstellung eines 3D-Modells sind im Nachgang möglich.

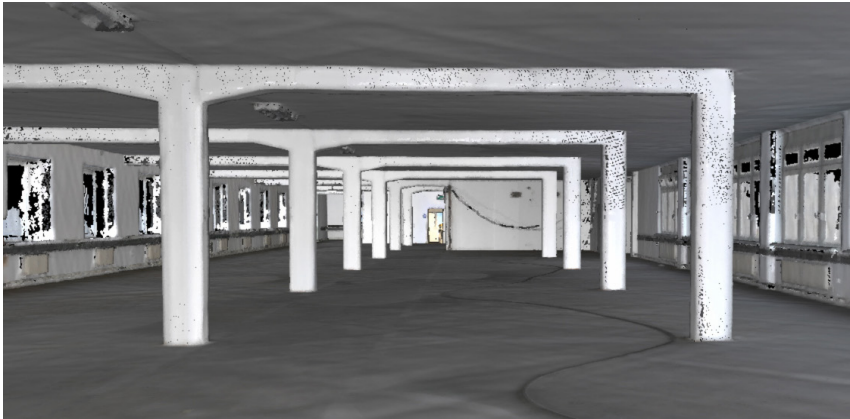


Abb. 9: Darstellung der Punktwolke einer Gewerbeimmobilie, die mit dem M6 Trolley aufgenommen wurde.



Abb. 10: Fotoansicht aus dem Indoor Viewer einer Durchfahrtsstraße, die mit dem M6 Trolley aufgenommen wurde.

5 Beispielprojekt Ermittlung von Durchfahrtshöhen

Eine Fahrstraße mit technischer Gebäudeausrüstung im Deckenbereich (siehe Abb. 10) wurde mit dem M6 Trolley digitalisiert. Die Punktwolke lässt sich nutzen um Durchfahrtshöhen zu bestimmen und zu kategorisieren (siehe Abb. 11).

Im Indoor Navigator werden die Fotos genutzt, die Fahrstraße zu visualisieren und die Durchfahrtshöhen an gewünschten Stellen einzublenden. Die Handhabung der Software ist Browser-basiert und intuitiv bedienbar.

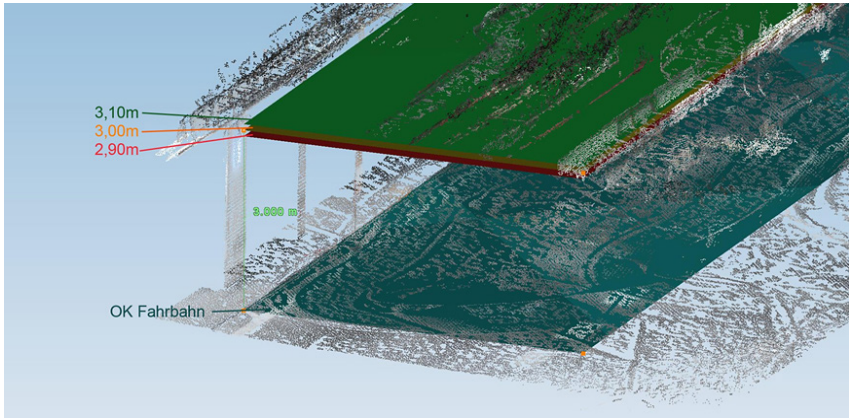


Abb. 11: Nutzung der Punktwolke zur Kategorisierung der Durchfahrtshöhen

Literatur

- NavVis GmbH (2018): M6-1 User Guide. <http://portal-beta.navvis.com>, letzter Zugriff 10/2019.
- NavVis GmbH (2019): Technische Dokumentation. <http://portal-beta.navvis.com>, letzter Zugriff 10/2019.
- VectorNav Technologies (o. J.): VN-100 IMU/AHRS. www.vectornav.com/products/vn-100, letzter Zugriff 10/2019.
- Velodyne Lidar (2019): Velodyne LiDAR Puck. www.mapix.com/wp-content/uploads/2018/07/63-9229_Rev-H_Puck-_Datasheet_Web-1.pdf, letzter Zugriff 10/2019.

Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Stephan Och
TPI Vermessungsgesellschaft mbH
Otto-Hahn-Straße 46, 63303 Dreieich
stephan.och@tpi-vermessung.de

Das terrestrische Laserscanning (TLS) als voll etabliertes Messverfahren besitzt ein enormes Leistungsspektrum und eröffnet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten sowohl innerhalb der klassischen Berufsfelder der Geodäsie als auch in angrenzenden Bereichen.

Mit dem diesjährigen DVW-Seminar soll ein weiterer Beitrag zur Information und Diskussion des technologischen Potenzials, der Anwendungs- und Geschäftsfelder sowie der konkreten projektbezogenen Lösungen, die häufig im interdisziplinären Umfeld realisiert werden, geleistet werden.

Die Themenfelder sind:

- TLS und BIM
- Laserscanning mit Multi-Sensor-Plattformen
- 3D-Punktwolken und dann?
- Aktuelle Projekte und Anwendungsfelder

Wibner

ISBN: 978-3-95786-231-0



9 783957 862310

Schriftenreihe des DVW
Band 96 / 2019
Printversion: 29,00 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaesie.info

