

Zum Einfluss der räumlichen Auflösung und verschiedener Qualitätsstufen auf die Modellierungsgenauigkeit einer Ebene beim terrestrischen Laserscanning

The Impact of Spatial Resolution and Different Quality Levels on the Modeling Accuracy of a Plane Using Terrestrial Laser Scanning

Erik Heinz, Christoph Holst, Heiner Kuhlmann

Terrestrische Laserscanner sind in der Lage, unsere Umgebung in Form von Punktwolken dreidimensional zu erfassen. Hierbei kann geräteintern in der Regel zwischen verschiedenen räumlichen Auflösungsstufen und auch Qualitätsstufen, bezogen auf die Genauigkeit eines einzelnen Punktes, gewählt werden. In der Praxis steht jedoch meist nur eine begrenzte Zeit für die Messung zur Verfügung. Daher stellt sich die Frage, ob es zur Erreichung einer vorgegebenen Genauigkeit von aus Punktwolken abgeleiteten Modellen grundsätzlich besser ist, mehr Punkte mit geringerer Genauigkeit (höhere Auflösungsstufe) oder weniger Punkte mit höherer Genauigkeit (höhere Qualitätsstufe) zu erfassen. Beides führt in der Theorie zu einer Verbesserung der Modellgenauigkeit, aber gleichzeitig auch zu einer Verlängerung der Messdauer. Zur Analyse dieser Fragestellung wird eine planare Zieltafel mit einem Leica HDS 6100 und einer Leica Scan-Station P20 in verschiedenen Distanzen mit variierenden Auflösungs- und Qualitätsstufen abgescannt. Aus den Scans werden mithilfe einer Ausgleichung Ebenenmodelle bestimmt, deren Genauigkeit über eine Varianzkomponentenschätzung abgeleitet wird. Die Ergebnisse zeigen, dass es im vorliegenden Fall prinzipiell besser ist, eine höhere Auflösungsstufe zu wählen, da in kürzerer Messdauer gleiche Modellgenauigkeiten erreichbar sind. Insbesondere bei längeren Distanzen ist eine höhere Auflösung wichtig, um eine ausreichend gute Punktverteilung und Redundanz für die Modellschätzung zu gewährleisten. Zudem erfolgt die Objekterfassung detaillierter. Bei kürzeren Distanzen wird durch die Erhöhung der Auflösung jedoch ab einem gewissen Punkt kein Genauigkeitsgewinn mehr erzielt, sodass sich Messdauer und Datenrate unnötig erhöhen.

Schlüsselwörter: Terrestrisches Laserscanning, Auflösungsstufe, Qualitätsstufe, Punktgenauigkeit, Modellierungsgenauigkeit

Terrestrial laser scanners are widely used for the acquisition of our environment in the form of 3D point clouds. In the course of this, operators can typically choose between different settings for the spatial resolution of the point cloud as well as different quality levels with respect to the accuracy of single points. In practice, however, usually a limited amount of time is available for the measurement. Therefore, the question arises whether a sufficient accuracy of scan-based models can rather be achieved by acquiring more points with lower accuracy (higher resolution) than by acquiring less points with higher accuracy (higher quality level). In theory, both strategies lead to an improvement of the model accuracy, but at the

same time to an extension of the measurement time. For analyzing this issue, a planar target is scanned with different resolution and quality settings at varying distances using a Leica HDS 6100 and a Leica ScanStation P20. Based on the scans, a least squares approach is used to determine plane models for the target. The accuracy of these models is derived by variance component estimation. The results indicate that, in the present case, it is favorable to choose a higher resolution since similar model accuracies can be achieved in a shorter measurement time. Especially at larger distances, a higher resolution is crucial for providing a sufficient point density for the model estimation. In addition, objects can be captured with more details. At shorter distances, however, the improvement of the model accuracy by choosing a higher resolution is limited, needlessly increasing measurement time and data rate.

Keywords: *Terrestrial Laser Scanning, spatial resolution, quality level, point accuracy, modeling accuracy*

1 EINLEITUNG

Terrestrisches Laserscanning gehört heute zu den anerkannten Messverfahren innerhalb der Geodäsie und wird für eine Vielzahl von Anwendungen genutzt. Dazu zählen zum Beispiel Denkmalpflege /Pilhatsch et al. 2015/, /Pritchard et al. 2017/, Bestandsdokumentationen für BIM (Building Information Modeling) /Clemen & Manthe 2015/, /Loges & Blankenbach 2017/ oder auch Deformationsanalysen /Holst et al. 2017/, /Paffenholz et al. 2018/. Einen Einblick in das breite Anwendungsspektrum geben Sammelwerke, wie beispielsweise /Vosselman & Maas 2010/, /Mettenleiter et al. 2015/ oder /Kuhlmann & Holst 2016/.

In der Datenauswertung werden aus den erfassten Punktwolken in der Regel Modelle abgeleitet, wozu vielfältige Modellierungsansätze eingesetzt werden können /Ohlmann-Lauber & Schäfer 2011/, /Neuner et al. 2016/. Die Genauigkeit dieser abgeleiteten Modelle hängt unter anderem von der Anzahl der Punkte auf der Objektfläche sowie der Genauigkeit der einzelnen Punkte ab. Moderne terrestrische Laserscanner sind in diesem Zusammenhang in der Lage, Punktwolken mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungsstufen sowie Qualitätsstufen, bezogen auf die Genauigkeit eines Einzelpunktes, zu erfassen. Eine höhere Qualitätsstufe wird dadurch erreicht, dass die Rotationsgeschwindigkeit des Umlenkspiegels verlangsamt wird, sodass zeitlich bzw. räumlich aufeinanderfolgende Punkte gemittelt werden können, um die Präzision des gemittelten Einzelpunktes zu steigern /Kurz et al. 2013/, /Mettenleiter et al. 2015/. Der Nachteil dieser Vorgehensweise liegt jedoch darin, dass sich die Messdauer verlängert und die Messungen einer zusätzlichen Vorprozessierung unterliegen, bei der Punkte gemittelt werden, die streng genommen nicht korrespondieren.

Zur Steigerung der Modellgenauigkeit kann anstelle der Erhöhung der Qualitätsstufe auch die Auflösung am Objekt erhöht und dafür mit einer niedrigeren Qualitätsstufe gescannt werden. Dabei liegt die vereinfachte Annahme zugrunde, dass viele ungenaue Punkte zur gleichen Modellgenauigkeit führen sollten wie wenige genaue Punkte. Der Vorteil bei der Erhöhung der Auflösung liegt darin, dass die Messwerte weniger vorprozessiert werden und die Objekterfassung insgesamt detaillierter erfolgt. Allerdings erhöht sich hier neben der Messdauer auch die Datenmenge in der Auswertung, weil insgesamt mehr Punkte gespeichert werden.

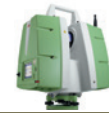
Es stellt sich somit die Frage, ob es zur Erreichung einer vorab zu definierenden Modellgenauigkeit prinzipiell besser ist, weniger Punkte mit höherer Genauigkeit oder mehr Punkte mit geringerer Genauigkeit zu erfassen. Darüber hinaus ist von Interesse, wie groß der Genauigkeitsgewinn bei der Wahl einer höheren Auflösungs- bzw. Qualitätsstufe tatsächlich ist. Dies ist häufig unklar und kann dazu führen, dass suboptimale Scaneinstellungen für die jeweilige Messaufgabe gewählt werden. Im ungünstigsten Fall resultieren daraus Zeit- bzw. Qualitätseinbußen für die abgeleiteten Produkte. Vor diesem Hintergrund besteht ein gesteigertes Interesse an der Adressierung dieser Fragestellung.

Entsprechende Untersuchungen erfolgen im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch für die beiden terrestrischen Laserscanner Leica HDS 6100 und Leica ScanStation P20 (Abschnitt 2). Dazu wird eine planare Zieltafel mit beiden Laserscannern mit variierenden Auflösungs- und Qualitätsstufen in verschiedenen Distanzen von 5 m, 10 m und 20 m abgescannt (Abschnitt 3). Über einen Ausgleich nach der Methode der kleinsten Quadrate mit integrierter Varianzkomponentenschätzung wird für jeden Scan anschließend ein Ebenenmodell mit einer dazugehörigen Genauigkeit abgeleitet (Abschnitt 4). Basierend darauf lässt sich unter Berücksichtigung der für die Datenerfassung benötigten Zeit feststellen, ob es im vorliegenden Fall zur Erreichung einer gewissen Modellgenauigkeit prinzipiell besser ist, eine höhere Auflösungsstufe oder eine höhere Qualitätsstufe zu wählen (Abschnitt 5). Daraus lassen sich anschließend Handlungsempfehlungen für die Praxis ableiten (Abschnitt 6).

2 UNTERSUCHTE LASERSCANNER

Bei den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden die beiden terrestrischen Laserscanner Leica HDS 6100 /Leica Geosystems 2009/ sowie Leica ScanStation P20 /Leica Geosystems 2013/ verwendet. Obwohl sich bereits neuere Laserscanner auf dem Markt befinden, sind beide Instrumente aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit im oberen Marktsegment anzusiedeln und für geodätische Anwendungen geeignet. Während der phasenbasierte Leica HDS 6100 eine Reichweite von 79 m aufweist und eine Scanrate von bis zu 508 000 Punkten/Sekunde erreicht, arbeitet die Leica

Messdauer für Panoramascan und Anzahl gemittelter Punkte							
Auflösung bei 10 m	50 mm	25 mm	12,5 mm	6,3 mm	3,1 mm	1,6 mm	0,8 mm
Qualitätsstufe 1	0,1 min (8 Pt.)	0,2 min (4 Pt.)	0,8 min (4 Pt.)	1,7 min (2 Pt.)	3,4 min (1 Pt.)	13,5 min (1 Pt.)	53,9 min (1 Pt.)
Qualitätsstufe 2	0,2 min (16 Pt.)	0,4 min (8 Pt.)	1,7 min (8 Pt.)	3,4 min (4 Pt.)	6,7 min (2 Pt.)	27,0 min (2 Pt.)	107,8 min (2 Pt.)
Qualitätsstufe 3	0,4 min (32 Pt.)	0,8 min (16 Pt.)	3,4 min (16 Pt.)	6,7 min (8 Pt.)	13,5 min (4 Pt.)	53,9 min (4 Pt.)	–
Qualitätsstufe 4	–	1,7 min (32 Pt.)	6,7 min (32 Pt.)	13,5 min (16 Pt.)	27,0 min (8 Pt.)	–	–



Tab. 1 | Konfigurationen der Leica ScanStation P20. Für jede Kombination aus Auflösungs- und Qualitätsstufe wird die Messdauer für einen Panoramascan in Minuten sowie die Anzahl gemittelter Punkte angegeben (nach /Leica Geosystems 2013/ sowie persönlichen Mitteilungen von Leica Geosystems).

Messdauer für Panoramascan und Anzahl gemittelter Punkte							
Auflösung bei 10 m	50 mm	25 mm	12,5 mm	6,3 mm	3,1 mm	1,6 mm	0,8 mm
Qualitätsstufe L	0,4 min (–)	–	1,7 min (–)	3,4 min (–)	6,7 min (–)	13,5 min (–)	–
Qualitätsstufe H	–	–	3,4 min (–)	6,7 min (–)	13,5 min (–)	–	–



Tab. 2 | Konfigurationen des Leica HDS 6100. Für jede Kombination aus Auflösungs- und Qualitätsstufe wird die Messdauer für einen Panoramascan in Minuten angegeben. Anders als bei der Leica ScanStation P20 ist den Autoren die Anzahl gemittelter Punkte nicht bekannt (nach /LeicaGeosystems 2009/ sowie persönlichen Mitteilungen von Leica Geosystems).

ScanStation P20 mit der WFD-Technologie und ist im Distanzbereich bis 120 m in der Lage, bis zu 1 000 000 Punkte/Sekunde aufzunehmen.

Bei beiden Instrumenten kann zwischen mehreren Auflösungs- und Qualitätsstufen ausgewählt werden, wobei die Auflösung jeweils als Punktabstand in 10 m Entfernung angegeben wird. Die Genauigkeit liegt in Abhängigkeit der gewählten Einstellungen bei guten Messbedingungen in der Größenordnung von Millimetern. Die Punktgenauigkeit lässt sich jedoch nicht allgemeingültig angeben, da sie stark von instrumentellen und atmosphärischen Einflüssen, der Messkonfiguration (Distanz und Auftreffwinkel) sowie der Beschaffenheit der Objektoberfläche (Farbe, Material und Rauigkeit) abhängt /Kuhlmann & Holst 2016/. Diesbezüglich existieren viele Studien, die die oben genannten Einflüsse analysieren, z. B. /Soudarissanane et al. 2011/, /Lindstaedt et al. 2012/, /Wunderlich et al. 2013/, /Zámečnicková et al. 2014/, /Stenz et al. 2017/ /Bolkas & Martinez 2018/.

Hinsichtlich der Präzision der Streckenmessung belegen kürzlich publizierte Arbeiten, dass der Einfluss von Messkonfiguration und Objektbeschaffenheit über die Intensität des reflektierten Laserstrahls codiert werden kann. Diese Betrachtungsweise erlaubt es, intensitätsbasierte stochastische Modelle zur Beschreibung der Präzision von Einzelpunkten abzuleiten /Wujanz et al. 2017/, /Wujanz et al. 2018/, /Heinz et al. 2018/, /Lambertus et al. 2018/. Die intensitätsbasierten stochastischen Modelle gelten jedoch immer nur für die jeweils gewählte Scanrate, da in Abhängigkeit der Scanrate die bereits erwähnte Mittelung von aufeinanderfolgenden Punkten unterschiedlich ausfällt. Diese Erkenntnisse sind für die vorliegende Arbeit insofern relevant, als dass die Wahl der Auflösungs- bzw. Qualitätsstufe die Scanrate des Instruments festlegt und damit einen

maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Einzelpunkte sowie der daraus abgeleiteten Modelle hat.

Für die Leica ScanStation P20 ergeben sich insgesamt 24 Möglichkeiten, die verschiedenen Auflösungs- und Qualitätsstufen miteinander zu kombinieren (Tab. 1), beim etwas älteren Leica HDS 6100 stehen dem Nutzer acht Konfigurationsmöglichkeiten zur Verfügung (Tab. 2). Daraus resultieren Punktwolken mit unterschiedlicher Punktdichte und Genauigkeit, bezogen auf die Einzelpunktmessung. Am Beispiel der Leica ScanStation P20 soll dies etwas detaillierter betrachtet werden. In Tab. 1 ist erkennbar, dass die Erhöhung der Qualitätsstufe innerhalb einer festen Auflösungsstufe jeweils eine Verdopplung der Anzahl gemittelter Punkte nach sich zieht. Um die ausgewählte Auflösung zu erhalten, muss also die Rotationsgeschwindigkeit des Umlenkspiegels halbiert werden, sodass sich die Messdauer verdoppelt. Folglich wächst die Messdauer von der niedrigsten zur höchsten Qualitätsstufe um den Faktor 8 an. Gleichzeitig verringert sich die Scanrate um den Faktor 8.

Steigert man hingegen innerhalb einer festen Qualitätsstufe die Auflösung um jeweils eine Stufe, vervierfacht sich die Anzahl der Punkte im abgetasteten Raster. Dazu muss sowohl die Rotationsgeschwindigkeit des Umlenkspiegels als auch die des Laserscanners um seine Stehachse halbiert werden, wodurch sich die Messdauer um den Faktor 4 verlängert. An manchen Stellen wird jedoch gleichzeitig die Anzahl der gemittelten Punkte halbiert, sodass sich die Messdauer hier jeweils nur verdoppelt. Daraus resultiert, dass je nach Fall die Scanrate entweder beibehalten oder verdoppelt wird. Basierend auf dem Gesetz der Varianzfortpflanzung stellt man fest, dass das Verhältnis zwischen Verlängerung der Messdauer und Genauigkeitsgewinn durch mehr Punkte bzw. Mittelung von Punkten identisch ist. Dies sollte anhand echter Daten überprüft werden.

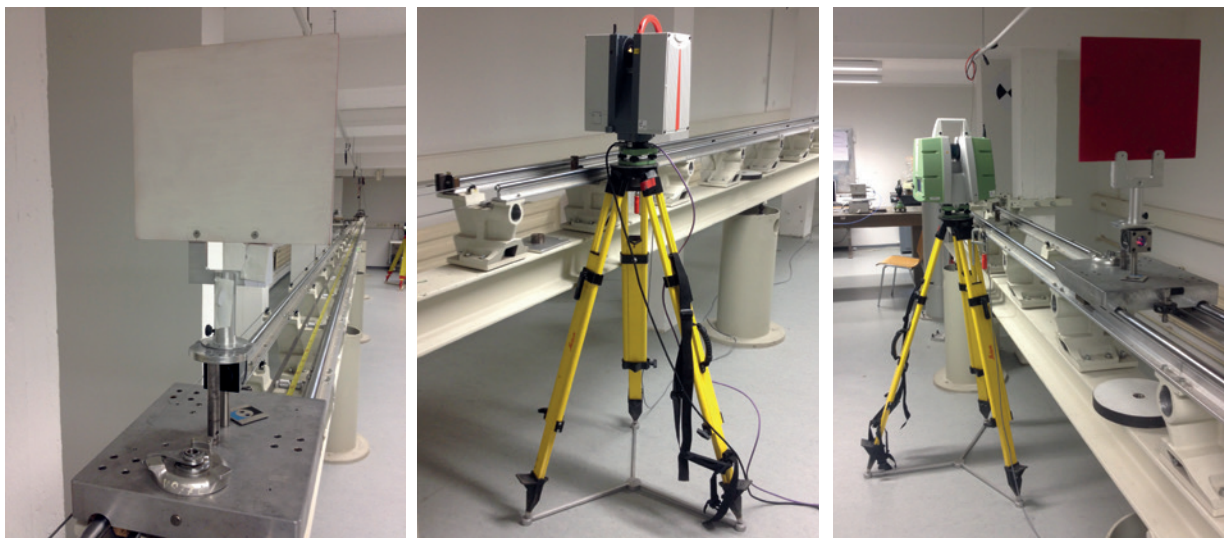


Abb. 1 | Messaufbau zur Untersuchung unterschiedlicher Auflösungs- und Qualitätsstufen (links: planare Zieltafel, Mitte: Leica HDS 6100, rechts: Leica ScanStation P20)

3 DURCHFÜHRUNG DER TESTMESSUNGEN

Die Testmessungen erfolgten im Messlabor des Instituts für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Universität Bonn. Hierzu wurde eine weiße planare Zieltafel mit einer Kantenlänge von $0,25\text{ m} \times 0,25\text{ m}$ in drei verschiedenen Entfernungen (5 m, 10 m und 20 m) vor beiden Laserscannern aufgebaut (Abb. 1). Sowohl für den Leica HDS 6100 als auch die Leica ScanStation P20 erfolgte für jede der drei Entfernungen je ein Scan mit jeder der acht bzw. 24 Konfigurationsmöglichkeiten (Tab. 1 und Tab. 2). Die Zieltafel wurde ungefähr in Kippachshöhe der Laserscanner aufgebaut und rechtwinklig angemessen. Aus den Messungen resultieren 96 Scans, die sich bezüglich Auflösung, Punktgenauigkeit und Messdauer unterscheiden. Abb. 2 zeigt exemplarisch drei Scans der Leica ScanStation P20, die eine identische Messdauer in Anspruch genommen haben, aber hinsichtlich Auflösung und Genauigkeit der Punkte variieren.

4 AUSWERTUNG DER TESTMESSUNGEN

Die Auswertung der Messungen erfolgte auf Basis der Approximation der Scans mit dem Modell einer Ebene. Eine Ebene lässt sich über vier Parameter beschreiben, wobei es sich um den normierten Normalenvektor $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ und den orthogonalen Abstand d der Ebene zum Ursprung des Koordinatensystems handelt. Die vom Laserscanner ausgegebenen kartesischen Koordinaten wurden in Strecken s_i , Horizontalrichtungen r_i und Zenitwinkel v_i umgerechnet, da diese den originären polaren Messelementen entsprechen. Für einen Scanpunkt i auf der Ebene gilt somit das folgende funktionale Modell f :

$$\hat{f}_i = n_x (s_i \sin v_i \cos r_i) + n_y (s_i \sin v_i \sin r_i) + n_z (s_i \cos v_i) - d = 0. \quad (1)$$

Die Approximation der Scans erfolgte über einen Ausgleich nach der Methode der kleinsten Quadrate im Gauß-Helmert-Modell. Auf eine detaillierte Beschreibung der Ausgleichung wird an dieser

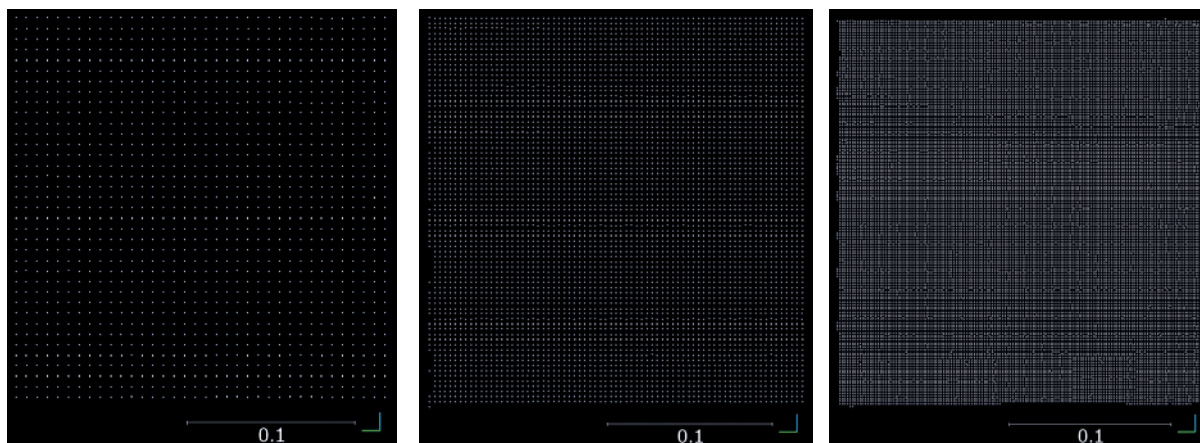


Abb. 2 | Scans der Leica ScanStation P20 in 5 m Entfernung mit identischer Messdauer (links: Auflösungsstufe 6,3 mm + Qualitätsstufe 4; Mitte: Auflösungsstufe 3,1 mm + Qualitätsstufe 3; rechts: Auflösungsstufe 1,6 mm + Qualitätsstufe 1)

Stelle verzichtet und auf die Fachliteratur verwiesen (z. B. /Mikhail & Ackermann 1976/, /Förstner & Wrobel 2016/). Die Approximation einer Ebene aus Laserscans wird zum Beispiel auch in /Holst et al. 2014/ ausführlich beschrieben. Auf eine zentrale Besonderheit der Ausgleichung soll jedoch nachfolgend näher eingegangen werden.

Durch die Verwendung von Polarkoordinaten lassen sich Varianzfaktoren σ_s^2 , σ_r^2 und σ_v^2 in die Kovarianzmatrix der Beobachtungen integrieren, die die Genauigkeit des Laserscanners direkt widerspiegeln und unabhängig von der Lage der Ebene im Koordinatensystem sind. Dies ist bei kartesischen Koordinaten nicht der Fall. Die Aufstellung des stochastischen Modells für die Beobachtungen kann sich zunächst an Herstellerangaben orientieren. Da die Punktgenauigkeit jedoch in Abhängigkeit der gewählten Qualitätsstufe variiert, wäre es grob falsch, das gleiche stochastische Modell für alle Scans zu verwenden. Daher wurde in der Ausgleichung für jeden Scan eine Varianzkomponentenschätzung durchgeführt (z. B. /Niemeier 2008/, /Förstner & Wrobel 2016/). Die Varianzkomponentenschätzung ermöglicht es, aus den Verbesserungen der Beobachtungen empirische Varianzfaktoren $\hat{\sigma}_s^2$, $\hat{\sigma}_r^2$ sowie $\hat{\sigma}_v^2$ für jede Beobachtungsgruppe zu bestimmen. Dies ist analog zur Schätzung des empirischen Varianzfaktors der Gesamtausgleichung, der zur Durchführung des Globaltests herangezogen wird. Die geschätzten Varianzkomponenten können in einem iterativen Verfahren zur Aufstellung eines angepassten stochastischen Modells verwendet werden, mit dem die Ausgleichung erneut durchlaufen wird. Dies wird so lange wiederholt, bis sich die Varianzkomponenten nicht mehr verändern und die Testgröße des Globaltests den Wert 1 annimmt. Unter der Annahme eines korrekten funktionalen Modells f erhält man auf diese Weise ein auf die Beobachtungen angepasstes stochastisches Modell für die Approximation.

Die Ausgleichung liefert neben der Schätzung für die Parameter \hat{p} auch deren Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{p}\hat{p}}$, die die geschätzten Genauigkeiten der Parameter beinhaltet:

$$\hat{p} = \begin{bmatrix} \hat{n}_x \\ \hat{n}_y \\ \hat{n}_z \\ \hat{d} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\Sigma_{\hat{p}\hat{p}} = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{n_x}^2 & \hat{\sigma}_{n_x n_y} & \hat{\sigma}_{n_x n_z} & \hat{\sigma}_{n_x d} \\ \hat{\sigma}_{n_y n_x} & \hat{\sigma}_{n_y}^2 & \hat{\sigma}_{n_y n_z} & \hat{\sigma}_{n_y d} \\ \hat{\sigma}_{n_z n_x} & \hat{\sigma}_{n_z n_y} & \hat{\sigma}_{n_z}^2 & \hat{\sigma}_{n_z d} \\ \hat{\sigma}_{d n_x} & \hat{\sigma}_{d n_y} & \hat{\sigma}_{d n_z} & \hat{\sigma}_d^2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Die Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{p}\hat{p}}$ basiert auf dem stochastischen Modell der Varianzkomponentenschätzung und beinhaltet folglich Parametergenauigkeiten, die sich direkt aus der Streuung der Beobachtungen ergeben. Auf diese Weise lassen sich Unterschiede in der Genauigkeit der Punkte infolge der gewählten Qualitätsstufe in der Ausgleichung datenadaptiv berücksichtigen. Aufgrund vernachlässigter Korrelationen sind die erhaltenen Parametergenauigkeiten aber immer noch als zu optimistisch anzusehen /Jurek et al. 2017/.

Auf Basis der Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{p}\hat{p}}$ der Parameter lässt sich die Genauigkeit des Ebenenmodells anhand einer Positionsgenauigkeit und einer Orientierungsgenauigkeit bewerten. Die Positionsgenau-

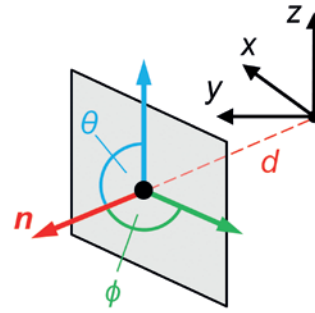


Abb. 3 | Modell einer Ebene, beschrieben durch die Normale n und den orthogonalen Abstand d zum Koordinatenursprung. Anhand der Normale n lässt sich die Orientierung der Ebene über einen Winkel ϕ für die Horizontale und einen Winkel θ für die Vertikale beschreiben.

keit gibt die Genauigkeit der Lage der Ebene relativ zum Ursprung des Koordinatensystems an und lässt sich in Form von $\hat{\sigma}_d$ direkt aus $\Sigma_{\hat{p}\hat{p}}$ abgreifen. Die Zieltafel wurde mit einem Einfallswinkel des Laserstrahls von etwa 0° abgescannt, sodass der geschätzte Parameter \hat{d} dem Abstand von Laserscanner und Zieltafel entspricht. Die Orientierungsgenauigkeit wird durch die Varianz der Ebenennormale beschrieben, die jedoch wenig anschaulich ist. Daher werden aus dem geschätzten Normalenvektor \hat{n} zwei Orientierungswinkel $\hat{\phi}$ und $\hat{\theta}$ für die Horizontale bzw. Vertikale abgeleitet (Abb. 3). Diese werden wie folgt berechnet:

$$\hat{\phi} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{n}_y}{\hat{n}_x} \right), \quad (4)$$

$$\hat{\theta} = \cos^{-1} \left(\frac{\hat{n}_z}{\|\hat{n}\|} \right). \quad (5)$$

Für die beiden Orientierungswinkel $\hat{\phi}$ und $\hat{\theta}$ kann anschließend mithilfe einer Varianzfortpflanzung eine Standardabweichung $\hat{\sigma}_\phi$ bzw. $\hat{\sigma}_\theta$ berechnet werden, die die Orientierungsgenauigkeit der Ebene anschaulich wiedergibt. Dabei ist F die Jacobi-Matrix mit den partiellen Ableitungen von Gl. (4) bzw. Gl. (5):

$$\Sigma_{\hat{\phi}\hat{\theta}} = F \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{n_x}^2 & \hat{\sigma}_{n_x n_y} & \hat{\sigma}_{n_x n_z} \\ \hat{\sigma}_{n_y n_x} & \hat{\sigma}_{n_y}^2 & \hat{\sigma}_{n_y n_z} \\ \hat{\sigma}_{n_z n_x} & \hat{\sigma}_{n_z n_y} & \hat{\sigma}_{n_z}^2 \end{bmatrix} F^T = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_\phi^2 & \hat{\sigma}_{\phi\theta} \\ \hat{\sigma}_{\theta\phi} & \hat{\sigma}_\theta^2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

5 ERGEBNISSE

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Auswertung dargestellt und diskutiert. Dies erfolgt zunächst für die Leica ScanStation P20 in Abschnitt 5.1 und dann für den Leica HDS 6100 in Abschnitt 5.2. Darüber hinaus werden in Abschnitt 5.3 die Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung für die Streckenmessung mit den Herstellerangaben verglichen, bevor in Abschnitt 5.4 die geschätzten Modellgenauigkeiten in Abhängigkeit der dafür benötigten Messdauer betrachtet werden.

5.1 Ergebnisse der Leica ScanStation P20

Die Ergebnisse der Leica ScanStation P20 sind in Abb. 4 dargestellt. Die Plots auf der linken Seite zeigen absteigend für die Entfernungen 5 m, 10 m und 20 m die Positionsgenauigkeiten $\hat{\sigma}_d$

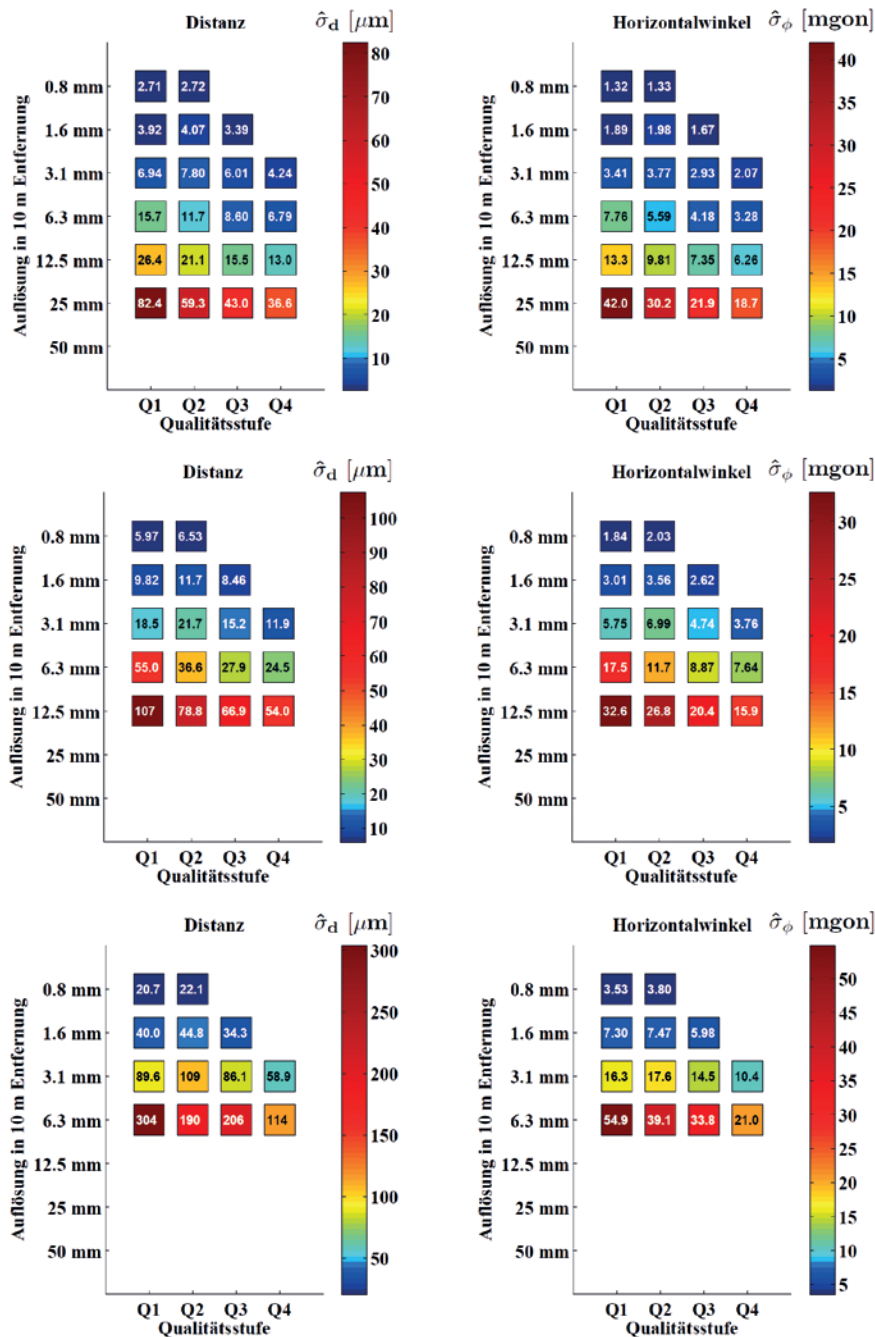


Abb. 4 | Geschätzte Positionsgenauigkeiten $\hat{\sigma}_d$ (links) und Orientierungsgenauigkeiten $\hat{\sigma}_\phi$ (rechts) für die Leica ScanStation P20 für die Entfernungen 5 m (oben), 10 m (Mitte) und 20 m (unten) in Abhängigkeit der unterschiedlichen Auflösungsstufen (Hochachse) und Qualitätsstufen (Rechtsachse)

der Ebenenmodelle, während rechts die dazugehörigen Orientierungsgenauigkeiten $\hat{\sigma}_\phi$ der Horizontalwinkel aufgetragen sind. Auf die Darstellung der Genauigkeiten $\hat{\sigma}_\phi$ für die Vertikalwinkel wird verzichtet, da die Ergebnisse aufgrund der Messkonfiguration praktisch identisch mit denen der Horizontalwinkel sind. Bei der Auswertung wurde darauf geachtet, eine ausreichende Anzahl von mindestens 100 Punkten zur Schätzung der Modellebene zu verwenden. In Abhängigkeit der Entfernung erfüllen die niedrigeren Auflösungsstufen diese Forderung nicht immer, sodass die entsprechenden Werte in den Plots fehlen.

So verbessert sich beispielsweise die Positionsgenauigkeit $\hat{\sigma}_d$ in einer Entfernung von 5 m und bei einer Auflösungsstufe von 25 mm (Abb. 4, links oben) von 82,4 μm auf 36,6 μm . Diese Genauigkeitssteigerung geht mit einer Verachtfachung der Messdauer einher. Auffällig ist, dass innerhalb der Qualitätsstufe 1 die Genauigkeit $\hat{\sigma}_d$ bei Erhöhung der Auflösungsstufe von 25 mm auf 12,5 mm sprunghaft von 82,4 μm auf 26,4 μm ansteigt. Dieser Genauigkeitsgewinn ist größer als derjenige, den man erreicht, wenn man bei einer Auflösung von 25 mm die höchste Qualitätsstufe 4 wählt, und geht nur mit einer Vervierfachung der Messdauer einher.

Wandert man die Plots von unten mäanderförmig nach oben durch, stellt man fest, dass die Genauigkeiten, die innerhalb einer niedrigeren Auflösungsstufe bei den höheren Qualitätsstufen 3 bzw. 4 erreicht werden, auch durch die Wahl einer höheren Auflösung mit niedrigerer Qualitätsstufe 1 bzw. 2 erreichbar sind. Im ersten Fall geht der Genauigkeitsgewinn mit einer Verachtfachung der Messdauer einher, während sich die Messdauer im zweiten Fall nur verdoppelt bzw. vervierfacht (Tab. 1). Dieses Muster ist in allen Plots aus Abb. 4 evident.

Mit steigender Entfernung deutet sich die Tendenz an, dass der absolute Genauigkeitsgewinn durch Wahl einer höheren Auflösungsstufe im Vergleich zur Wahl einer höheren Qualitätsstufe größer wird. So beträgt etwa die Positionsgenauigkeit $\hat{\sigma}_d$ bei einer Auflösung von 6,3 mm und der Qualitätsstufe 4 in 5 m Entfernung (Abb. 4, links oben) 6,79 μm und ist damit fast identisch mit der Genauigkeit von 6,94 μm bei einer Auflösung von 3,1 mm und der Qualitätsstufe 1. Betrachtet man den gleichen Ausschnitt für eine Distanz von 10 m, steigt die Genauigkeit von 24,5 μm auf 18,5 μm (Abb. 4, links Mitte). Bei einer Distanz von 20 m erhält man Werte von 114 μm und 89,6 μm (Abb. 4, links unten).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im vorliegenden Fall durch die Wahl einer höheren Auflösungsstufe anstelle einer höheren Qualitätsstufe die gleiche oder sogar eine bessere Modell-

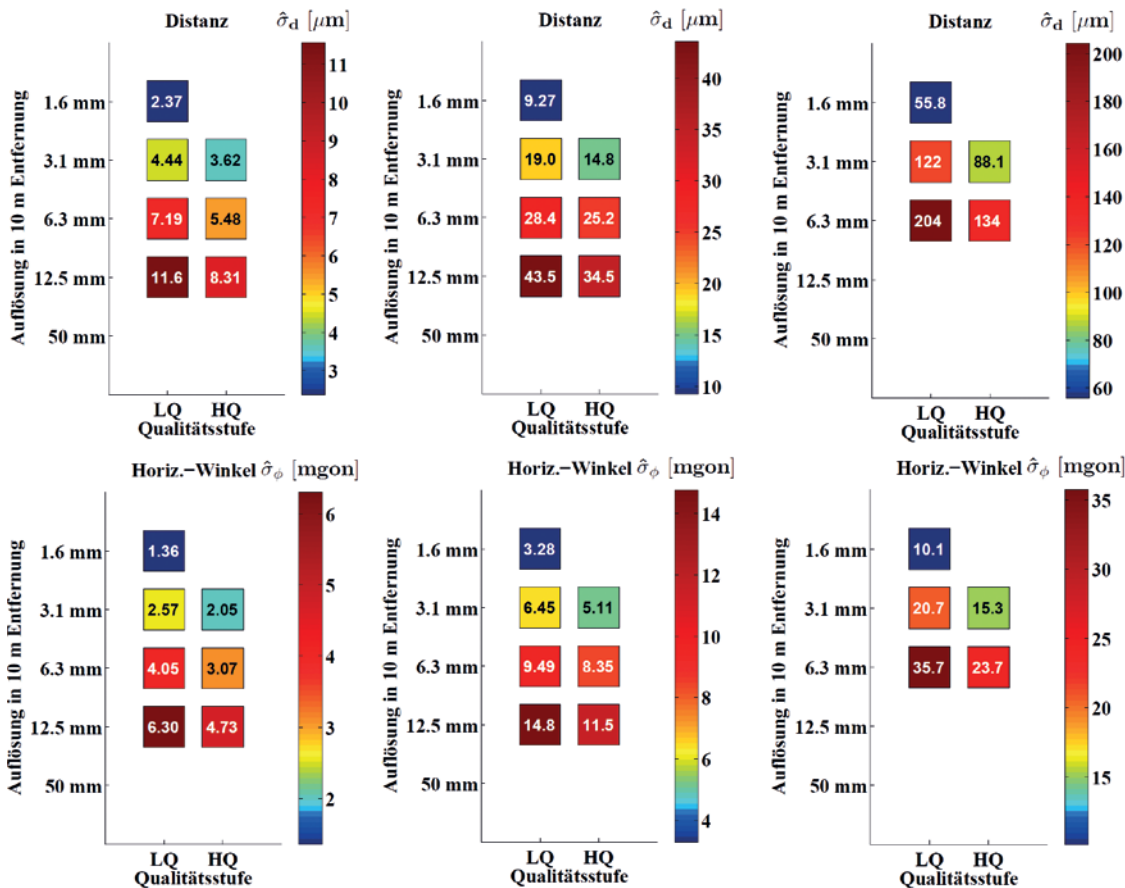


Abb. 5 | Geschätzte Positionsgenauigkeiten $\hat{\sigma}_d$ (oben) und Orientierungsgenauigkeiten $\hat{\sigma}_\phi$ (unten) für den Leica HDS 6100 in den Entfernungen 5 m (links), 10 m (Mitte) und 20 m (rechts) in Abhängigkeit der unterschiedlichen Auflösungsstufen (Hochachse) und Qualitätsstufen (Rechtsachse)

genauigkeit in kürzerer Messdauer erreicht werden kann. Dass sich dieser Trend bei größeren Entfernungen scheinbar verstärkt, liegt vermutlich daran, dass mit abnehmender Auflösung immer weniger Punkte auf der Objektoberfläche liegen. Eine höhere Auflösung führt folglich zu einer besseren Punktverteilung und Redundanz auf dem Objekt, die für eine genaue Modellschätzung offensichtlich wichtiger sind als die Genauigkeit eines einzelnen Punktes. Die Bedeutung der Punktverteilung für die Approximationsergebnisse auf Basis von Laserscandaten wird ausführlich in /Holst et al. 2014/ thematisiert. Die Erkenntnisse sind zunächst auf den vorliegenden Fall beschränkt und nicht uneingeschränkt verallgemeinerbar.

5.2 Ergebnisse des Leica HDS 6100

Die Ergebnisse des Leica HDS 6100 sind in *Abb. 5* dargestellt. Die oberen Plots zeigen von links nach rechts die Positionsgenauigkeiten $\hat{\sigma}_d$ der Ebenenmodelle für die Entfernungen 5 m, 10 m und 20 m, während darunter die zugehörigen Orientierungsgenauigkeiten $\hat{\sigma}_\phi$ der Horizontalwinkel aufgetragen sind. Auf die Genauigkeiten $\hat{\sigma}_\theta$ für die Vertikalwinkel wird aus den in Abschnitt 5.1 genannten Gründen erneut verzichtet.

Im Grunde lassen sich für den Leica HDS 6100 die gleichen Beobachtungen machen wie bei der Leica ScanStation P20. Auch beim Leica HDS 6100 wird bei der Wahl einer höheren

Auflösungsstufe anstelle einer höheren Qualitätsstufe die gleiche oder sogar eine bessere Modellgenauigkeit erreicht, wobei dieser Effekt, bezogen auf die absolute Genauigkeitssteigerung, bei größeren Messdistanzen etwas ausgeprägter ist. Der Unterschied zur Leica ScanStation P20 besteht darin, dass die Messdauer für eine niedrigere Auflösungsstufe mit höherer Qualitätsstufe identisch ist mit der Messdauer für eine höhere Auflösungsstufe mit niedrigerer Qualitätsstufe (*Tab. 2*). Insofern kommt der Gewinn durch Wahl einer höheren Auflösungsstufe für den Leica HDS 6100 erst bei den größeren Messdistanzen zum Tragen. Auch diese Erkenntnisse sind zunächst auf den vorliegenden Fall beschränkt und nicht uneingeschränkt verallgemeinerbar.

5.3 Vergleich der Varianzkomponentenschätzung mit Herstellerangaben

Neben der Betrachtung der geschätzten Genauigkeiten für die Modellparameter ist auch ein Blick auf die geschätzten Varianzkomponenten für die Polarbeobachtungen der Laserscanner interessant. Maßgeblich verantwortlich für die Genauigkeit der Modellparameter ist die Genauigkeit der Streckenmessung. Bedingt durch die Messkonfiguration äußern sich Abweichungen in den Winkelbeobachtungen der Laserscanner kaum, da sie hauptsächlich zu einer horizontalen bzw. vertikalen Parallelverschiebung der Punkte

Entfernung	Auflösungsstufe	Qualitätsstufe	Mittelungen	$\hat{\sigma}_s$
5 m	25,0 mm @ 10 m	Q2	8	0,45 mm
5 m	12,5 mm @ 10 m	Q2	8	0,36 mm
5 m	6,3 mm @ 10 m	Q3	8	0,30 mm
5 m	3,1 mm @ 10 m	Q4	8	0,31 mm
10 m	12,5 mm @ 10 m	Q2	8	0,45 mm
10 m	6,3 mm @ 10 m	Q3	8	0,33 mm
10 m	3,1 mm @ 10 m	Q4	8	0,28 mm
20 m	6,3 mm @ 10 m	Q3	8	0,45 mm
20 m	3,1 mm @ 10 m	Q4	8	0,34 mm

Tab. 3 | Geschätzte Standardabweichungen $\hat{\sigma}_s$ der Streckenmessung der Leica ScanStation P20 für verschiedene Kombinationen aus Auflösungs- und Qualitätsstufe, bei denen jeweils acht Messwerte zu einem Punkt gemittelt werden

auf der Ebene führen. Daraus folgen nur minimale Abweichungen für das Ebenenmodell.

Die geschätzten Standardabweichungen der Strecken variieren je nach Qualitätsstufe und Entfernung für die Leica ScanStation P20 zwischen 0,23 mm (Qualitätsstufe 4, Auflösungsstufe 12,5 mm, Distanz 5 m) und 0,71 mm (Qualitätsstufe 1, Auflösungsstufe 6,3 mm, Distanz 20 m). Erwartungsgemäß erhält man die kleinste Standardabweichung bei der höchsten Qualitätsstufe 4 und der kürzesten Distanz von 5 m und die höchste Standardabweichung bei der niedrigsten Qualitätsstufe 1 und der längsten Distanz von 20 m. Darüber hinaus entsprechen die Werte der vom Hersteller angegebenen Größenordnung. Explizit werden für Messungen auf eine weiße Oberfläche mit einer Reflektivität von 100 % in 10 m und 25 m Entfernung RMS-Werte von 0,4 mm bzw. 0,5 mm im Datenblatt angegeben /Leica Geosystems 2013/. Diese Angaben beziehen sich auf jeweils acht gemittelte Messwerte. Vergleicht man dies mit

den Resultaten der Varianzkomponentenschätzung in Tab. 3, stellt man eine relativ gute Übereinstimmung fest.

Beim Leica HDS 6100 liegen die geschätzten Standardabweichungen der Strecken zwischen 0,17 mm (Qualitätsstufe H, Auflösungsstufe 12,5 mm, Distanz 5 m) und 0,69 mm (Qualitätsstufe L, Auflösungsstufe 1,6 mm, Distanz 20 m). In Analogie zur Leica ScanStation P20 erhält man auch hier die kleinste Standardabweichung bei der höheren Qualitätsstufe H und der kürzesten Distanz von 5 m, während die größte Standardabweichung bei der niedrigeren Qualitätsstufe L und der längsten Distanz von 20 m festgestellt wird. Die Werte sind in der gleichen Größenordnung wie bei der Leica ScanStation P20. Allerdings liegen für den Leica HDS 6100 keine Vergleichswerte seitens des Herstellers vor. Zusammenfassend lässt sich dennoch feststellen, dass die Varianzkomponentenschätzung plausible Resultate liefert.

5.4 Modellgenauigkeit in Abhängigkeit der Messdauer

Wie bereits mehrfach erwähnt, führen sowohl die Erhöhung der räumlichen Auflösung als auch die Steigerung der Qualitätsstufe zwar zu einer Verbesserung der Modellgenauigkeit, aber auch zu einer Verlängerung der Messdauer. Insbesondere bei der Leica ScanStation P20 ergeben sich bei gewissen Einstellungen Scanzeiten für einen Panoramascan zwischen einer knappen halben Stunde bis hin zu fast zwei Stunden. Hierbei handelt es sich um die Einstellungen mit den höchsten Auflösungsstufen von 3,1 mm bis 0,8 mm. Die Plots aus Abb. 4 deuten darauf hin, dass der Genauigkeitgewinn bei den höchsten Auflösungsstufen nur noch äußerst gering ist. Entgegen der bisherigen Feststellung, besser eine höhere Auflösungsstufe anstelle einer höheren Qualitätsstufe zu verwenden, spricht dies dafür, die höchsten Auflösungsstufen nur dann zu verwenden, wenn die hohe Auflösung auch wirklich benötigt wird, beispielsweise bei sehr langen Entfernungen oder bei kleinen Details. In diesem Zusammenhang ist auch die Diskretisie-

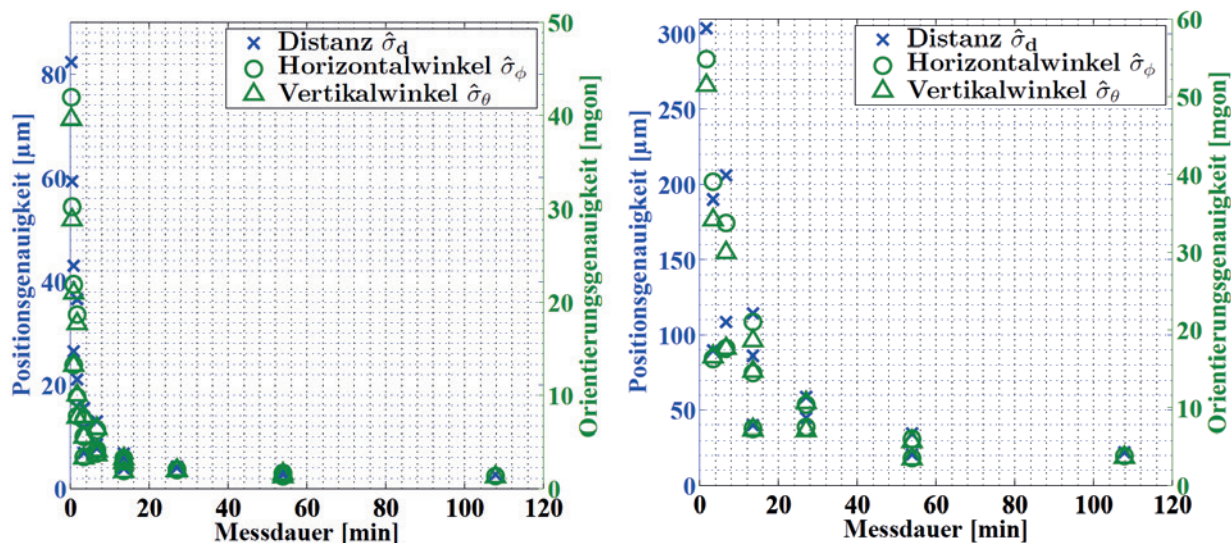


Abb. 6 | Geschätzte Genauigkeiten der Modellparameter als Funktion der Messdauer für einen Panoramascan. Dargestellt sind die Werte für die Leica ScanStation P20 in einer Entfernung von 5 m (links) und 20 m (rechts).

rungsunsicherheit zu beachten, die bei einem halben Winkelschritt liegt. Bei unzureichender Auflösung kann die Diskretisierungsunsicherheit insbesondere bei längeren Entfernungen beträchtlich sein und übersteigt in der Regel sogar deutlich die Genauigkeit eines einzelnen Punktes /Mettenleiter et al. 2015/.

In *Abb. 6* sind die geschätzten Modellgenauigkeiten für die Leica ScanStation P20 in den Entfernungen 5 m (links) und 20 m (rechts) gegen die Messdauer eines Panoramascans aufgetragen. In beiden Fällen bildet sich bei etwa 10–20 Minuten eine Schwelle, ab der kein merklicher Genauigkeitsgewinn mehr erzielbar ist. Für den vorliegenden Fall bedeutet dies, dass alle Einstellungen, die länger als 10–20 Minuten für einen Panoramascan benötigen, die Modellierungsgenauigkeit der Ebene nicht mehr wesentlich verbessern. Auch diese Aussage ist zunächst nur für den vorliegenden Fall gültig und nicht ohne Weiteres verallgemeinerbar. Dennoch deuten die Resultate darauf hin, dass Einstellungen mit sehr langen Scandauern, unabhängig davon, ob diese durch eine hohe Auflösungs- oder Qualitätsstufe verursacht werden, für viele Anwendungen, insbesondere für solche mit kürzeren Zielweiten, gar nicht benötigt werden.

6 Schlussbemerkungen

Dieser Beitrag widmet sich der Fragestellung, ob es zur Erreichung einer vorgegebenen Genauigkeit von aus Punktwolken abgeleiteten Modellen prinzipiell besser ist, die räumliche Auflösung zu erhöhen, also eine größere Anzahl von Punkten aufzunehmen, oder die Einzelpunktgenauigkeit zu steigern und dafür weniger Punkte zu erfassen. Zu diesem Zweck wurde eine weiße planare Zieltafel mit einer Kantenlänge von 0,25 m × 0,25 m in unterschiedlichen Distanzen (5 m, 10 m und 20 m) mit einem Leica HDS 6100 und einer Leica ScanStation P20 mit variierenden Auflösungs- und Qualitätsstufen abgescannt und über ein Ebenenmodell approximiert.

Es zeigt sich, dass es im vorliegenden Fall prinzipiell besser ist, die Auflösungsstufe zu erhöhen, da in kürzerer Messdauer identische Modellgenauigkeiten erreichbar sind. Dies ist insbesondere bei größeren Entfernungen in zunehmendem Maße der Fall, wenn nur noch wenige Punkte auf der Zieltafel liegen. Eine höhere Auflösung führt aufgrund der detaillierteren Erfassung zu einer besseren Punktverteilung und Redundanz auf der Zieltafel, die für eine genaue und stabile Modellschätzung offensichtlich wichtiger sind als die Genauigkeit einzelner Punkte. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass das \sqrt{n} -Gesetz der Varianzfortpflanzung aufgrund von Korrelationen zwischen den Punkten in diesem Fall keine Gültigkeit besitzt. Der Einfluss der in diesem Beitrag vernachlässigten Korrelationen auf das Ergebnis bleibt unklar. Ein Argument für die Wahl einer höheren Auflösungsstufe liegt daher auch in der geringeren Vorprozessierung der Messungen, da weniger Punktmittelungen stattfinden. Die Mittelung von Punkten ist darüber hinaus kritisch, weil Punkte zusammengefasst werden, die streng genommen nicht korrespondieren. Aufgrund wachsender Punktabstände wird dies in größeren Entfernungen zunehmend problematisch.

Die Ergebnisse verdeutlichen auch, dass bei Einstellungen mit sehr langen Scandauern – unabhängig davon, ob diese durch eine sehr hohe Auflösungs- oder Qualitätsstufe verursacht werden – ab

einem gewissen Punkt keine wesentliche Genauigkeitssteigerung mehr möglich ist. Da die Scandauer insbesondere bei den höchsten Auflösungsstufen beachtlich ist, sind diese Einstellungen bei den hier vorliegenden kürzeren Zielweiten wenig sinnvoll, sondern sollten nur dann gewählt werden, wenn aufgrund großer Zielweiten oder vieler Details die hohe Auflösung tatsächlich benötigt wird. In diesem Zusammenhang sollte auch die Diskretisierungsunsicherheit in die Betrachtung einbezogen werden.

In diesem Beitrag wurde unter einer günstigen Messkonfiguration eine weiße planare Zieltafel mit geringen Abmessungen und guten radiometrischen Eigenschaften in vergleichsweise kurzen Distanzen abgescannt. Die Erkenntnisse bleiben zunächst auf diesen Fall beschränkt und sind nicht uneingeschränkt verallgemeinerbar. So kann eine höhere Qualitätsstufe unter Umständen durchaus sinnvoll sein, wenn unter schwierigen Bedingungen gescannt wird. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn aufgrund der Radiometrie der Oberfläche oder einer schlechten Aufnahmeconfiguration mit starkem Rauschen zu rechnen ist. Die Mittelung von Punkten könnte in diesen Fällen dazu beitragen, das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Im Endeffekt obliegt es dem Anwender, unter Berücksichtigung der Messkonfiguration (Distanz und Auftreffwinkel) sowie der Objekteigenschaften (Radiometrie und Detaillierungsgrad) den optimalen Kompromiss zwischen Auflösungs- und Qualitätsstufe für die Messaufgabe zu finden. Dieser Beitrag liefert insofern Entscheidungshilfen, die den beschriebenen Einschränkungen unterliegen. Für die Zukunft wären neben Untersuchungen in größeren Entfernungen und mit radiometrisch andersartigen Oberflächen auch Analysen zu anderen geometrischen Formen sinnvoll. Ferner sollten größer dimensionierte Objekte in realen Messumgebungen eingebunden werden.

LITERATUR

- Bolkas, D.; Martinez, A. (2018): Effect of target color and scanning geometry on terrestrial LiDAR point-cloud noise and plane fitting. In: *Journal of Applied Geodesy* 12(2018)1, 109–127.
- Clemen, C.; Manthe, C. (2015): TLS für das Building Information Modeling (BIM) – Das BIM-Pilotprojekt Erneuerung Hbf Hannover. In: DVW e.V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015)*. DWV-Schriftenreihe 81. Wißner, Augsburg, 65–78.
- Förstner, W.; Wrobel, B. P. (2016): *Photogrammetric Computer Vision – Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction*. Springer International Publishing, Cham, Schweiz.
- Heinz, E.; Mettenleiter, M.; Kuhlmann, H.; Holst, C. (2018): Strategy for Determining the Stochastic Distance Characteristics of the 2D Laser Scanner Z+F Profiler 9012A with Special Focus on the Close Range. In: *Sensors* 18(2018)7, 2253.
- Holst, C.; Artz, T.; Kuhlmann, H. (2014): Biased and unbiased estimates based on laser scans of surfaces with unknown deformations. In: *Journal of Applied Geodesy* 8(2014)3, 169–183.
- Holst, C.; Schunck, D.; Nothnagel, A.; Haas, R.; Wennerbäck, L.; Olofsson, H.; Hammargren, R.; Kuhlmann, H. (2017): Terrestrial laser scanner two-face measurements for analyzing the elevation-dependent deformation of the Onsala Space Observatory 20-m radio telescope's main reflector in a bundle adjustment. In: *Sensors* 17(2017)8, 1833.
- Jurek, T.; Kuhlmann, H.; Holst, C. (2017): Impact of spatial correlations on the surface estimation based on terrestrial laser scanning. In: *Journal of Applied Geodesy* 11(2017)3, 143–155.

- Kuhlmann, H.; Holst, C. (2016): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning: Messtechnik, flächenhafte Modellierungen und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings. In: Freeden, W.; Rummel, R. (Hrsg.): Handbuch der Geodäsie: 5 Bände. Springer, Berlin/Heidelberg, 1–46.
- Kurz, S.; Bliersch, D.; Held, C.; Mettenleiter, M.; Fröhlich, C. (2013): Neues profilgebendes 360°-Laserscansystem von Z+F für Mobile Mapping Trägerplattformen. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013. Wichmann, Berlin/Offenbach, 194–205.
- Lambertus, T.; Belton, D.; Helmholz, P. (2018): Empirical Investigation of a Stochastic Model Based on Intensity Values for Terrestrial Laser Scanning. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 125(2018)3, 43–52.
- Leica Geosystems (2009): Leica HDS6100 – Latest generation of ultra-high speed laser scanner. Technisches Datenblatt. Leica Geosystems, Heerbrugg, Schweiz.
- Leica Geosystems (2013): Leica ScanStation P20 – Industry's Best Performing Ultra-High Speed Scanner. Technisches Datenblatt. Leica Geosystems, Heerbrugg, Schweiz.
- Lindstaedt, M.; Kersten, T.; Mechelke, K.; Graeger, T. (2012): Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012. Wichmann, Berlin/Offenbach, 264–275.
- Loges, S.; Blankenbach, J. (2017): As-built Dokumentation für BIM – Ableitung von bauteilorientierten Modellen aus Punktwolken. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017. Wichmann, Berlin/Offenbach, 290–298.
- Mettenleiter, M.; Härtl, F.; Kresser, S.; Fröhlich, C. (2015): Laserscanning – Phasenbasierte Lasermesstechnik für die hochpräzise und schnelle dreidimensionale Umgebungserfassung. Die Bibliothek der Technik, 371. Süddeutscher Verlag onpact GmbH, München.
- Mikhail, E. M.; Ackermann, F. (1976): Observations and Least Squares. IEP-A Dun-Donnelley Publisher, New York.
- Neuner, H.; Holst, C.; Kuhlmann, H. (2016): Overview on Current Modelling Strategies of Point Clouds for Deformation Analysis. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 123(2016)11-12, 328–339.
- Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung – Statistische Auswertemethoden. 2. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin/New York.
- Ohlmann-Lauber, J.; Schäfer, T. (2011): Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2011 (TLS 2011). DVW-Schriftenreihe 66. Wißner, Augsburg, 161–180.
- Paffenholz, J.-A.; Hüge, J.; Stenz, U. (2018): Integration von Lasertracking und Laserscanning zur optimalen Bestimmung von lastinduzierten Gewölbeverformungen. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 125(2018)4, 75–90.
- Pilhatsch, M.; Müller, F.; Riegel, K.; Effkemann, C. (2015): 3D-Laserscanning des Bonner Münsters. In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015). DVW-Schriftenreihe 81. Wißner, Augsburg, 147–161.
- Pritchard, D.; Sperner, J.; Hoepner, S.; Tenschert, R. (2017): Terrestrial laser scanning for heritage conservation: the Cologne Cathedral documentation project. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-2/W2. 26th International CIPA Symposium, 28. August – 1. September 2017, Ottawa, Kanada, 213–220.
- Soudarissanane, S.; Lindenbergh, R.; Menenti, M.; Teunissen, P. (2011): Scanning geometry: Influencing factors on the quality of terrestrial laser scanning points. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66(2011)4, 389–399.
- Stenz, U.; Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. (2017): A Framework Based on Reference Data with Superordinate Accuracy for the Quality Analysis of Terrestrial Laser Scanning-Based Multi-Sensor-Systems. In: Sensors 17(2017)8, 1886.
- Vosselman, G.; Maas, H.-G. (2010): Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing, Dunbeath, UK.
- Wujanz, D.; Burger, M.; Mettenleiter, M.; Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 125 (2017), 146–155.
- Wujanz, D.; Burger, M.; Tschirschwitz, F.; Nietzschmann, T.; Neitzel, F.; Kersten, T. P. (2018): Determination of Intensity-Based Stochastic Models for Terrestrial Laser Scanners Utilising 3D-Point Clouds. In: Sensors 18(2018)7, 2187.
- Wunderlich, T.; Wasmeier, P.; Ohlmann-Lauber, J.; Schäfer, T.; Reidl, F. (2013): Objektivierung von Spezifikationen Terrestrischer Laserscanner – Ein Beitrag des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München. In: Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, Technische Universität München, 20, 2/2013.
- Zámečnicková, M.; Wieser, A.; Woschitz, H.; Ressel, C. (2014): Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurements and terrestrial laser scanning. In: Journal of Applied Geodesy 8(2014)4, 311–325.

M. Sc. Erik Heinz

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN – INSTITUT FÜR
GEODÄSIE UND GEOINFORMATION (IGG)

Nussallee 17 | 53115 Bonn
e.heinz@igg.uni-bonn.de



Dr.-Ing. Christoph Holst

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN – INSTITUT FÜR
GEODÄSIE UND GEOINFORMATION (IGG)

Nussallee 17 | 53115 Bonn
c.holst@igg.uni-bonn.de



Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN – INSTITUT FÜR
GEODÄSIE UND GEOINFORMATION (IGG)

Nussallee 17 | 53115 Bonn
heiner.kuhlmann@uni-bonn.de



Manuskript eingereicht: 31.07.2018 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet