

Untersuchung zum Auflösungsvermögen terrestrischer Laserscanner mittels BÖHLER-Stern

UWE HUXHAGEN¹, FREDIE KERN¹ & BETTINA SIEGRIST¹

Zusammenfassung: Der vorgestellte Artikel befasst sich mit dem Thema des Auflösungsvermögens terrestrischer Laserscanner (TLS). Praktische Fragestellungen dahingehend lauten z. B.: Wie breit muss eine Mauerfuge sein, damit sie zweifelsfrei als solche in einer TLS-Punktwolke erkannt werden kann?

Einen wichtigen praktischen Gesichtspunkt stellt die einheitliche Vergleichbarkeit der am Markt erhältlichen TLS dar. Trotzdem werden vergleichbare Qualitätsangaben seitens der Hersteller zu den einzelnen Systemen selten mitgeteilt. Ebenso fehlen für die Anwender einheitliche Ansätze, um die Angaben der Hersteller nachvollziehen und überprüfen zu können. So fällt es bisweilen schwer, gleichartige Aussagen zur Leistungsfähigkeit terrestrischer Laserscanner zu treffen. Entscheidungen zur Auswahl des für das jeweilige Projekt geeigneten Scanners werden daher oft nur aufgrund von Erfahrungswerten auf der Anwenderseite gefällt. Geeigneter dafür erscheinen jedoch vereinheitlichte Kennwerte und standardisierte Prüfverfahren. Eine Kenngröße, die die Vergleichbarkeit verschiedener TLS ermöglicht, ist das Auflösungsvermögen.

Auf Grundlage eines Ansatzes mit einem weiterentwickelten BÖHLER-Stern werden verschiedene TLS hinsichtlich ihres Auflösungsvermögens untersucht und die erzielten Ergebnisse analysiert, diskutiert und bewertet. Ebenso wie die konstruktive Umsetzung des Prüfkörpers wird auch eine dazugehörige Auswertesoftware vorgestellt, die eine standardisierte Bestimmung und Bewertung der Kenngröße Auflösungsvermögen zulässt.

1 Einleitung

Als Konkretisierung und Erweiterung des Vorschlages von (HEISTER, 2006) wurde in (HUXHAGEN, KERN & SIEGRIST, 2009) ein Konzept für Prüfverfahren vorgestellt, dass sich ähnlich (VDI/VDE, 2002 und VDI/VDE, 2006) für optische 3D-Messsysteme mit flächenhafter Antastung, auf die Bestimmung und Berechnung möglichst weniger, prägnanter Kennwerte beschränkt.

Ein Entwurf einer Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von terrestrischen Laserscannersystemen ist unter www.laserscanning.org veröffentlicht. Die darin beschriebenen Kennwerte sind dabei so definiert, dass sie zur Bestimmung nur wenig Messaufwand benötigen und nur geringe Anforderungen an die Prüfkörper und deren Installationen stellen. Zugleich aber sind die Kennwerte so gewählt, dass sie zur Qualitätsbeurteilung für praktische Fragestellungen aussagekräftig sind.

Die im Entwurf der Prüfrichtlinie spezifizierten Kennwerte bilden aus vielerlei pragmatischen Gründen nur einen - möglichst breiten - Ausschnitt dessen ab, was zur vollständigen Beschreibung der Messqualität eines TLS nötig wäre. Die Kennwerte ergeben sich entweder aus den

¹ Uwe Huxhagen, M. Eng., Prof. Dr.-Ing Fredie Kern, Bettina Siegrist, M. Sc., Fachhochschule Mainz - i3mainz, Lucy-Hillebrand-Straße 2, 55128 Mainz, {fredie.kern, huxhagen, bettina.siegrist}@geoinform.fh-mainz.de

Messinformationen einer „Einzelansicht“, also aus einer einzelnen, von einem Standpunkt aus beobachteten, unreferenzierten Punktwolke, oder aus der Kombination mehrerer zueinander referenzierter Ansichten bzw. Punktwolken. Die Messungen sind grundsätzlich unter den vom Hersteller definierten Betriebs- und Umweltbedingungen durchzuführen, bzw. zwischen Hersteller und Anwender im Rahmen einer Abnahmevereinbarung festzuhalten. Als Prüfkörper werden Zielmarken und Kugeln verwendet, deren Dimensionierung und Materialparameter vom Hersteller näher spezifiziert werden können. Bei der Berechnung aller vorgeschlagenen Kenngrößen sind grundsätzlich Approximationen im Sinne der Minimierung der Fehlerquadratsumme auf Grundlage der Punktwolken durchzuführen.

Die Kenngrößen des Prüfverfahrens sind die *Antastabweichung*, die *Kugelradienabweichung*, die *Abstandsabweichung* und das *Auflösungsvermögen*. Bis auf das Auflösungsvermögen sollten die Kenngrößen sowohl für Einzelansichten als auch für Mehrfachansichten bestimmt werden. Mit der Antastabweichung soll das lokale Abweichungsverhalten des flächenhaft messenden TLS quantitativ beschrieben werden. Es beschreibt demnach, allgemein ausgedrückt, das üblicherweise zu erwartende Rauschen an einer Objektoberfläche. Kugeln sind zur Bestimmung dieser Kenngröße besonders geeignet, da aufgrund der Kugelgestalt unterschiedliche Auftreffwinkel des Messstrahls realisiert werden. Im Umkehrschluss beschreibt die Antastabweichung die Abwesenheit von systematischen Abweichungen im Lokalen.

Die Kugelradienabweichung als Mittelwert der Differenzen zwischen geschätztem und Sollradius beim Prüfkörper Kugel wird als weitere Kenngröße berechnet. Sie spiegelt etwaige systematische *Formabweichungen im Lokalen* wieder. Die Abstandsabweichung soll die *Maßtreue* des TLS im Messvolumen abschätzen und überprüft somit die Fähigkeit zur Rückführbarkeit auf ein Längennormal. Durch Messungen in einem 3D-Prüffeld mit mind. 12 koordinierten, vom Hersteller empfohlenen Zielmarken kann die Abstandsabweichung sehr schnell bestimmen werden. Im folgenden Abschnitt wird die Kenngröße Auflösungsvermögen detailliert beschrieben.



Abb. 1: Grenzen des Auflösungsvermögen eines TLS dargestellt anhand eines Mauerausschnitts. Links: Photo, Mitte: Punktwolke, Rechts: vermaschte Punktwolke

2 Kennwert Auflösungsvermögen

Die Kenngröße Auflösungsvermögen (AV) soll die Fähigkeit des TLS auf quantitative Weise beschreiben, inwieweit eine dreidimensionale Oberflächenstruktur, z.B. Mauerfugen oder in Stein gemeißelte Formen, durch die abgetastete Punktmenge diskretisiert werden kann. Bezogen auf eine häufige Fragestellung in der Denkmalpflege ausgedrückt lautet die Frage: Wie breit muss eine Mauerfuge sein, so dass sie zweifelsfrei als solche in der Punktwolke erkannt und von

ihrer Umgebung abgegrenzt werden kann? Ein anschauliches Beispiel ist in Abb. 1 zu erkennen, in welcher das Auflösungsvermögen eines TLS mit einem Photo der gleichen Szene gegenübergestellt wird. Die relativ breiten Fugen zwischen den Ziegelsteinen der Mauer zeichnen sich hier nicht ausreichend deutlich in der Punktwolke ab, so dass das betreffende TLS-System zur Bauwerksdokumentation hier nicht eingesetzt werden konnte.

Das Auflösungsvermögen wird u.a. beeinflusst durch die Abtastrate (Winkelinkremente), die Strahldivergenz, den Auftreffwinkel und die Fähigkeit der Signalverarbeitung, Echos in Mischsignalen voneinander trennen zu können. Diese Einflussgrößen verändern sich mit der Variation der Messentfernung, so dass das Auflösungsvermögen indirekt eine Funktion der Messentfernung ist. Zudem kann eine Abhängigkeit von der Orientierung einer Mauerfuge u.a. zur Abtastrichtung nicht ausgeschlossen werden. Das Auflösungsvermögen lässt sich mittels eines BÖHLER-Sterns bestimmen (BÖHLER, BORDAS VICENT & MARBS, 2003).

3 Prüfkörper BÖHLER-Stern

3.1 Definition und Konstruktionsvorschrift

Ein BÖHLER-Stern besteht aus einer planaren Vorderfront und Rückwand aus dünnem, diffus streuendem Material (z.B. Photokarton oder Siebdruckpappe), die parallel zueinander im Abstand b angeordnet sind. Die Vorderfront (Schablone) hat regelmäßig angeordnete Öffnungen (Spalten) und Stege, zweckmäßigerweise in Gestalt von Kreissektoren mit dem Zentriwinkel γ . Im Zentrum S_M der zusammenlaufenden Sektoren bleibt fertigungstechnisch ein Steg mit Radius r_0 bestehen. Durch die Gestalt und kreisförmige Anordnung der Spalten werden sämtliche Spaltenbreiten von $r_0\gamma$ bis $r_{max}\gamma$ in allen Raumlagen realisiert. Es sind Ausprägungen als Voll-, Halb- oder Viertelkreis denkbar. Zur Bestimmung des AV wird der BÖHLER-Stern in Kippachshöhe des TLS orthogonal zum TLS ausgerichtet und mit höchster bzw. gewünschter Abtastrate abgescannt. Das Auflösungsvermögen AV kann ausgehend von obiger Konstruktionsidee zur Nachahmung von Mauerfugen oder ähnlichen Strukturen wie folgt definiert werden:

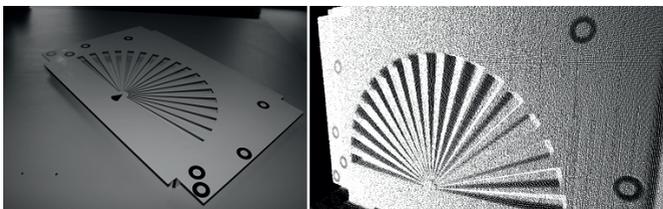


Abb. 2: BÖHLER-Sterns mit einer als Kegelfläche ausgeformten Rückwand (Schräge der Kegelfläche = Zentriwinkel $\gamma=5^\circ$, $r_{max}=180\text{mm}$) (li.), Beispiel einer Punktwolke des BÖHLER-Sterns (HDS6000@3m) (re.)

Definition: Das Auflösungsvermögen AV ist durch diejenige minimale Spaltenbreite $r_{min}\gamma$ am BÖHLER-Stern gegeben, bei der die Punktwolkenmenge im Abstand r_i vom Zentrum S_M in die zur Vorderfront gehörige und die zur Rückwand gehörige Punktwolkenmengen mit der Irrtumswahrscheinlichkeit α getrennt werden kann.

Eine zur Übertragbarkeit der Ergebnisse in die praktische Anwendung wichtige Spezialisierung des BÖHLER-Sterns mit einer konstanten Spalttiefe für alle Spaltbreiten ergibt sich, wenn als Rückwand ein Kegel gewählt wird. Die Kegelspitze befindet sich dabei im Zentrum der Kreis-sektoren und sein Öffnungswinkel wird so gewählt, dass für alle Bereiche des Sterns die Spalt-tiefe gleich der Spaltbreite ist. Der Abstand zwischen Vorder- und Rückseite variiert also mit dem Radius: $b(r) = r\gamma$.

3.2 Berechnen des Auflösungsvermögens AV

Bei der praktischen Auswertung werden Kreisringe $r_i + \Delta r$ ausgeschnitten und deren Abstände zur Vorderfront bestimmt. Die Abstände d_i sind aufsteigend zu sortieren. Die ersten 50% der Punkte ($d_i < Q_{50}$) in dieser Reihe werden der Vorderfront zugeordnet und die der verbleibenden 50% der großen Abständen der Rückwand ($d_i \geq Q_{50}$). Diese Aufteilung ist möglich, da durch die symmetrische Verteilung der Stege und Spalten theoretisch gleich viele Punkte auf der Vorder- und der Rückwand gemessen sein müssen. Für beide Teilpunkt-mengen wird der Median der Abstände berechnet (Q_{25} bzw. Q_{75}). Die Mediane dienen als robuste Schätzwerte für die Entfernungen der Fronten zum TLS, die aufgrund der Mischsignale am Übergang zwischen Steg und Spalt zwangsläufig stark verfälscht sind. Die Differenz dieser Mediane wird auf signifikante Abweichung von der Solltiefe des Spaltes getestet. Bei dem Kreisring r_{min} , bei dem eine signifikante Vorder-/Hintergrundtrennung angezeigt wird, ist das gesuchte Auflösungsvermögen mit der Wahrscheinlichkeit $1-\alpha$ nachgewiesen. Die bei diesem Test einfließende Standardabweichung der Differenz der Mediane wird aus jeweils der um 10% Extremwerte reduzierte Punktmenge berechnet; also aus den Mengen $\{Q_{2,5}, Q_{47,5}\}$ und $\{Q_{57,5}, Q_{97,5}\}$.

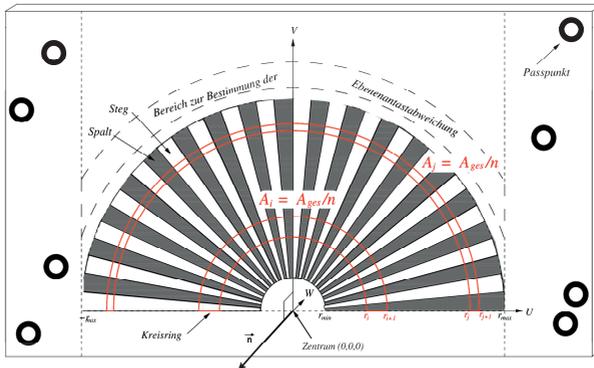


Abb. 3: Illustration der Begriffe und Formelzeichen am BÖHLER-Stern.

Der Schablonenbereich von r_{min} bis r_{max} kann in Kreisringe mit einer festen Kreisdicke Δr zerlegt werden. Dies hat aber den Nachteil, dass für kleine Radien in Zentrumsnähe deutlich weniger Stichproben zur Berechnung zur Verfügung stehen als für die äußeren Kreisringe. Daher sollten die Segmentgrenzen r_i und r_{i+1} des i -ten Kreisringes so gewählt werden, dass bei einer Zerlegung in n Kreisringe, jeder Kreisring den gleichen Flächenanteil $A_i = A_{ges} / n$ an der Gesamtfläche der Schablone erhält. So bleibt der Stichprobenumfang annähernd über alle Radien gleich groß.

3.3 Anfertigen eines BÖHLER-Sterns

Die besondere Ausprägung des hier vorgestellten BÖHLER-Sterns hat eine schräge Rückwand in Form eines Kegels, der mit der Kegelspitze im Zentrum des Sterns liegt (Abb. 2). Die zu erkennenden, auf der Sternschablone angebrachten, Zielmarken (weißer Kreis auf schwarzen Grund) dienen zur exakten Ausrichtung der Punktvolke bei der automatisierten Auswertung. Die besondere Eignung der verwendeten Zielmarken für diese sensible Referenzierungsaufgabe ist in (KERN et al., 2010) untersucht und dargestellt worden.

Für die hier vorgestellten Prüfungen wurden erstmals alle Komponenten eines BÖHLER-Sterns mit kegeliger Rückwand maschinell mit hoher Genauigkeit ($\sim 0,2$ mm) angefertigt. Vorlage für das verwendete Laserschneidegerät (Eurolaser M-800) waren CAD-Konstruktionen. Als Material kamen Photokarton (Rückwand) sowie Siebdruckpappe (Vorderfront) zum Einsatz. Das endgültige Zusammenfügen der Komponenten erfolgte händisch. Dies konnte aufgrund der hohen Fertigungsgüte der Einzelteile leicht realisiert werden. Eine abschließende Fertigungskontrolle des Prüfkörpers mittels Streifenprojektion (GOM Atos III) lieferte Aussagen zur Fertigungsgüte. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich der realisierte Kegel mit geringen Abweichungen fertigen lies. Aus den Atos-Messungen wurde für die Schablone eine Ebene approximiert ($\pm 0,1$ mm). Für den Kegel konnte ebenso eine Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm festgestellt werden. Die Abweichung des Winkels zwischen Schablonenfront (Ebene) und Kegel beträgt weniger als $0,1^\circ$, womit eine Genauigkeit innerhalb der geforderten Toleranz nachgewiesen werden konnte. Die konstruktionsbedingte maximale Abweichung der Spalttiefe kann beim verwendeten Stern mit $0,3$ mm angenommen werden.

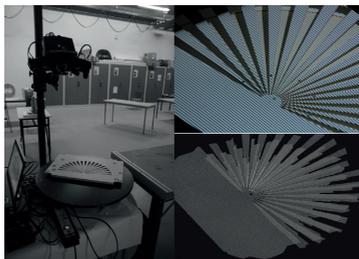


Abb. 4: Fertigungskontrolle BÖHLER-Stern: Ansicht des Messaufbaus mittels GOM Atos III (li.), Ansicht des Scanvorgangs mittels Streifenprojektion (o. re.), Ansicht der Ist-Geometrie als Punktvolke (u. re.)

4 Auflösungsbestimmung bei verschiedenen TLS-Systemen im Nahbereich

4.1 Prüflinge und Prüfsituation

Als Prüfumgebung kam das am i3mainz im Februar neu eingerichtete Prüffeld zum Einsatz. Der BÖHLER-Stern wurde darin in verschiedenen Entfernungen aufgestellt und orthogonal zum jeweiligen Scanner ausgerichtet. Die Untersuchungen wurden unter normalen klimatischen Bedingungen im Labor durchgeführt. Die Abtastung des Prüfkörpers erfolgte im Falle der Phasenscanner mit höchster Auflösung. Von den untersuchten Impulsscannern wurden jeweils Punktwolken mit einem Punktabstand von 1 mm aufgezeichnet. Die untersuchten fünf Instrumente sind in Tab. 1 aufgeführt.

4.2 Auswertung mittels i3mainzscene

Für die automatisierte Auswertung der Messungen wurde in der Eigenentwicklung i3mainzScene ein spezielles Modul „BÖHLER-Stern“ implementiert. Ausgangspunkt ist entweder eine grob selektierte Punktwolke im PTS- oder PTG-Format. Um die Kreisringe entsprechend Kap. 3.2 auszuwählen bedarf es einer genauen Ausrichtung der Punktwolke zum lokalen BÖHLER-Stern-Koordinatensystem. Hierzu sind außerhalb des entscheidenden Prüfbereiches links und rechts acht Zielmarken im Design „weißer Kreis“ aufgeklebt. Durch grobes Anpicken von mind. drei Zielmarkenzentren im Remissionsbild und einen Streckenvergleich zwischen Soll- und Istkoordinaten zur Identifikation der Zielmarkennummern sowie einer Kreisapproximation des „weißen Kreises“, kann die Transformation mit einer Güte von besser als 0,2 mm vorgenommen werden. Anschließend werden nacheinander, vom kleinsten zum größtmöglichen Radius, Punktselektionen in dem Umfang vorgenommen, dass alle Kreisringe den gleichen Flächeninhalt haben. Der Ist-Abstand zwischen Vorderfront und Rückwand wird wie unter Kap. 3.2 über die Mediane der zwei Punktwolkenbereiche bestimmt und dem Soll-Abstand gegenübergestellt und einem Signifikanztest unterzogen. Das Programm i3mainzScene schreibt alle Ergebnisse in tabellarischer Form in eine Textdatei. Darauf aufbauend können mit dem Programm Gnuplot die im Kap. 4.3. gezeigte Grafiken leicht erzeugt werden. Ein kompletter Auswertedurchgang benötigt inkl. des erforderlichen Datenexports vom Original- in eines der allgemeinen Austauschformate, der Analyse und der Bewertung weniger als 15 min.

Zur Verifizierung der mittels i3mainzscene erhaltenen Ergebnisse (Abb. 6), die ungewöhnliche Ablagen aufzeigen, wurden die zur Berechnung verwendeten Punktwolken mit der Atos-Referenzmessung verglichen (Abb. 5). Dabei zeigten sich ähnliche Charakteristiken der untersuchten Geräteklassen (Phasen-, Impulsscanner). So kann beobachtet werden, dass Phasenscanner den Abstand zw. Vorderfront und Kegel tendenziell zu groß bestimmen, wohingegen Impulsscanner Abstände mit zufälliger Natur aufweisen und kein Offset haben.

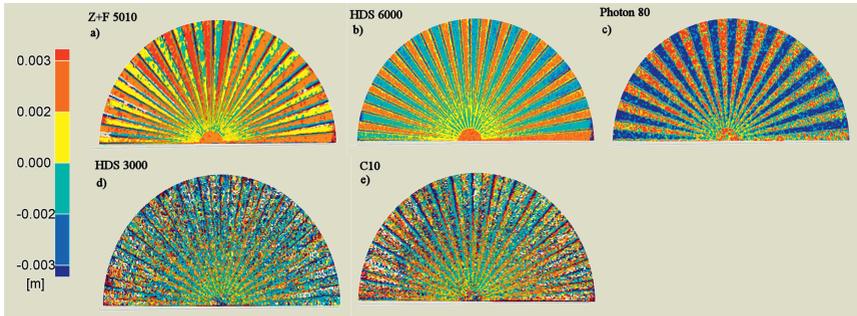


Abb. 5: 3D-Vergleich der ATOS-Referenzmessungen mit der TLS-Punktwolke (3m) des BÖHLER-Sterns

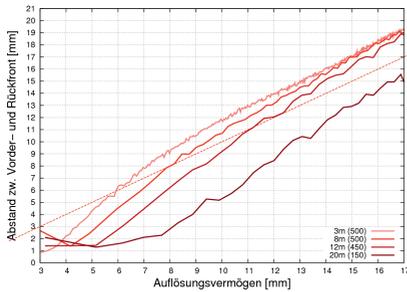
4.3 Ergebnisse

Die Auswertungen der Kenngröße Auflösungsvermögen – dargestellt als Ist-Abstand zwischen Vorderfront und Rückwand über die verschiedenen Messentfernungen in Abb. 6 – zeigen, dass es eine deutliche Entfernungabhängigkeit bei den Phasenscannern gibt und diese erhebliche (Größenordnung ± 4 mm) Offsets zur Solltiefe liefern. Demgegenüber stellt sich bei den Impulsscannern heraus, dass diese streckenunabhängige Ergebnisse liefern und geringe Offsets aufweisen (± 2 mm). Bei der ScanStation C10 werden Spaltentiefen systematisch (dem Trend nach) zu kurz ermittelt. Sehr homogene Ergebnisse liefert hingegen der HDS 3000, wo sich im Ergebnis keine signifikanten Streckenabhängigkeiten und Systematiken erkennen lassen. Durch die Steigung der dargestellten Kurven für die Phasenscanner im Vergleich zur Sollgeometrie des Sterns ist zu erkennen, dass der Abstand zw. Vorder- und Rückseite stets zu groß gemessen wird. Dieser Effekt bestätigt sich auch im 3D-Vergleich der Punktwolken mit der mittels Streifenprojektion erfassten Soll-Geometrie (Abb. 5).

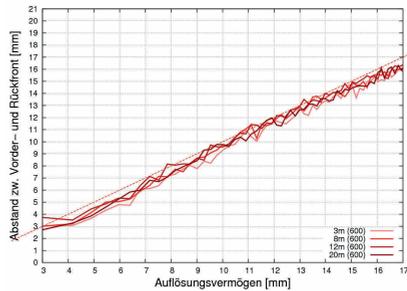
Die Kurven in der Abb. 6 a-e entsprechen nicht den Erwartungen, die sich aus der Grundidee des Prüfkörpers ergeben. Bis auf den HDS 3000 schmiegen sich diese mit zunehmender Spaltbreite/-tiefe kaum der Linie der Solltiefe im Bereich des AVs von 2 bis 6 mm an. Vielmehr bilden sich mit zunehmender Tiefe die Offsets immer besser aus. Die Definition des AVs bewertet diese Offsets nicht, so dass sich anhand des Signifikanztestes die in der Tab. 1 eingetragenen Werte ergeben. Interessant ist dort zu sehen, dass das Nachfolge-Modell Z+F Imager 5010 des Leica HDS 6000 etwas schlechtere Ergebnisse liefert.

Tab. 1: Entfernungabhängigen Auflösungsvermögen der untersuchten TLS-Systeme (Angaben in mm).

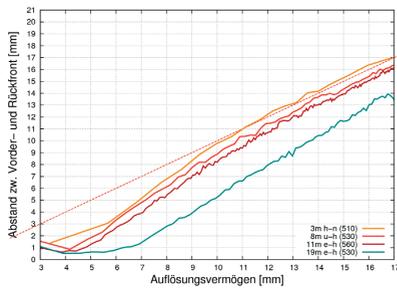
Mess- entfernung	Phasenscanner			Impulsscanner	
	Leica HDS 6000 (Z+F Imager 5006)	Zoller+Fröhlich Imager 5010	Faro Photon 80	Leica HDS 3000	Leica ScanStation C10
3 m	4	5	3	4	4
8 m	5	6	4	4	5
12 m	7	7	5	4	4
20 m	9	11	5	4	4
34 m	-	-	-	-	4
59 m	-	-	-	-	6



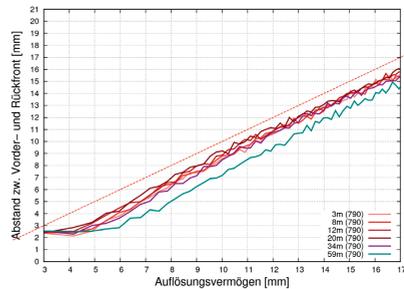
a) Leica HDS 6000



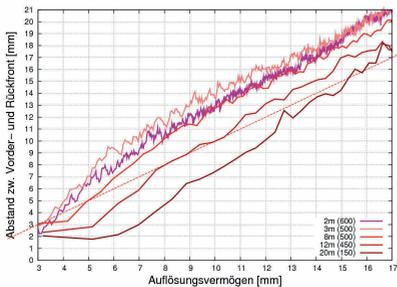
d) Leica HDS 3000



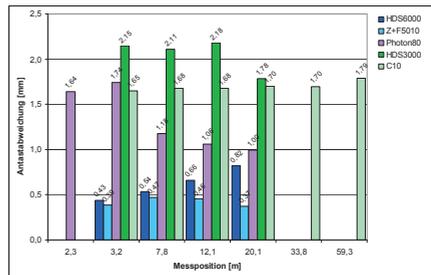
c) Z+F Imager 5010



e) Leica ScanStation C10



b) Faro Photon 80



f) Ebenenantastabweichung

Abb. 6: Die resultierenden Spaltentiefen (Solltiefe ist rot gestrichelt) verschiedener TLS in Variation des Kreisringradiuses zur Beurteilung des Auflösungsvermögens bei verschiedenen Messentfernen in a) bis e) sowie Darstellung der ermittelten Anastabweichung in f) (Anm. die geklammerten Werte in der Legende geben den Stichprobenumfang an).

In Erweiterung der Prüfrichtlinie wurde aus den Messungen auf den BÖHLER-Stern die Kenngröße Ebenenantastabweichung aus dem in der Abb. 3 markierten Bereich berechnet. Der Ver-

gleich der Auswertung der Ebenenantastabweichung Abb. 6f zeigt unterschiedliche Ergebnisse innerhalb der untersuchten Geräteklassen. So ist erkennbar, dass sich im Falle des Faro Photon 80 sowie beim Leica HDS 6000 eine starke Entfernungabhängigkeit zeigt. Vergrößert sich die ermittelte Kenngröße beim HDS 6000 mit zunehmender Messentfernung, so ist erkennbar, dass sich beim Photon 80 ein gegenläufiger Trend abzeichnet. Im Falle des Z+F Imager 5010 zeigen sich sehr geringe und konstante Antastabweichungen $<0,5$ mm im untersuchten Entfernungsreich.

Die Scanner Leica HDS 3000 sowie die ScanStation C10 zeigen andere Verläufe und eine Abhängigkeit der Kenngröße mit der Messentfernung ist nicht erkennbar. Es kommt deutlich heraus, dass die ScanStation C10 annähernd gleich bleibende Ergebnisse über die untersuchte Messentfernung liefert. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass sich im Vergleich zum älteren Scanner HDS 3000, die Messwerte der C10 verbessert darstellen. Es darf festgehalten werden, dass die Phasenscanner gegenüber den Impulsscannern eine deutlich geringes Rauschen auf planeren Flächen zeigen und sich dieses mit dem Fortschreiten der Technik weiter verbessert hat. Ein Grund für die deutlichen Offsets in Abb. 6a-c könnten nun aufgrund der Antastabweichung darin vermutet werden, dass bei den Phasenscannern die in großer Anzahl zu verzeichnenden Mischsignale – Kometenschweif entlang der Stegkanten – dazu führen, dass die histogrammbasierte Vorder-/Hintergrundtrennung stark verfälschte Spaltentiefen produziert. Damit sind zunächst einmal nur zu klein bestimmte Tiefen erklärt. Zu groß bestimmte Tiefen wie in Abb. 6a, c und Abb. 5a-c zu sehen, müssen andere Ursachen, wie z.B. Überkompensation bei der Datenfilterung, haben. Damit wären zugleich auch die semantischen Unterschiede zwischen Messrauschen, Auflösungsvermögen und Abstandsabweichung verdeutlicht: Ein geringes Messrauschen bedeutet nicht zwangsläufig eine hohes Maß an „Richtigkeit“.

5 Fazit und Ausblick

Im vorgestellten Artikel wurde das Thema Bestimmung des Auflösungsvermögens terrestrischer Laserscanner behandelt und Ergebnisse von fünf Instrumenten (Individuen!) vorgestellt. Diese Kenngröße ist Teil der *Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von Terrestrischen Laserscanner-Systemen*. Als Prüflinge kamen die Geräte Leica HDS 3000, HDS 6000 sowie eine ScanStation C10, ein Faro Photon 80 sowie ein Z+F Imager 5010 zum Einsatz. Der bei den Untersuchungen eingesetzte BÖHLER-Stern ist nach aktuellen Vorgaben präzise gefertigt worden, zeigte jedoch im Laufe der vorgestellten Untersuchungen Verbesserungsansätze hinsichtlich der erreichbaren Sensitivität. Der für die Scanner relevante Bereich im Zentrum des Sterns ist von der Fläche nicht ausreichend groß, so dass eine sinnvolle Stichprobenanzahl für die kleinen Kreisringe zur Verfügung steht. Die oberen Kreisringe hingegen liefern kaum noch zusätzliche Erkenntnisse, da sie ein für die untersuchten TLS großes AV repräsentieren. Die Problematik könnte einfach dadurch behoben werden, dass der Sterns mit z.B. 3°-Sektoren und entsprechend angepasstem Kegel ausgestalten wird.

Die Prüfungen zeigten die grundsätzliche Eignung des Prüfkörpers BÖHLER-Sterns zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von TLS. Dies gilt uneingeschränkt für Impulsscanner. Bei den Phasenscanner hingegen traten unerwartete und bei der Auswertung störende Offsets auf, deren Ursache noch der Klärung bedarf.

Der bisherige Prüfrichtlinien-Entwurf enthält keine Kenngröße „Ebenenantastabweichung“. Wie sich zeigt, können mit dieser aber ein sehr prägnanter Vergleich der TLS bezüglich des allgemeinen Messrauschens durchgeführt werden.

Weiter ist festzustellen, dass bei dem hier vorgestellten Prüfkörper die Bestimmung eines longitudinalen Auflösungsvermögens in Richtung der Streckenmessung im Vordergrund steht. Interessant wäre aber auch die Leistungsfähigkeit von TLS hinsichtlich eines lateralen Auflösungsvermögens, welches sicher stark von der Ortsauflösung und Strahldivergenz etc. abhängt. Wie hierfür der Prüfkörper aussehen müsste, ist eine Frage für die nächsten Arbeiten.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des BMBF unter dem Förderkennzeichen 17N3708 gefördert.

6 Literaturverzeichnis

- BÖHLER, W., BORDAS VICENT, M. & MARBS, A. (2003): *Investigation Laser Scanner Accuracy*. Proceedings of XIX. CIPA Symposium, Antalya.
- HEISTER, H. (2006): *Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*. Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006). Augsburg: Wißner, (DVW-Schriftenreihe Band 51/2006). S. 35–44
- HUXHAGEN, U., KERN, F. & SIEGRIST, B. (2009): *Vorschlag für eine TLS-Prüfrichtlinie*. In: Luhmann, T. (Hrsg.) & Müller, Ch. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik*. Heidelberg, Wichmann, 2009, S. 3-12
- KERN, F. (2008): *Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern*. Luhmann, Thomas (Hrsg.) ; Müller, Christina (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3DMesstechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008*. Heidelberg : Herbert Wichmann Verlag, 2008, S. 306–316
- KERN, F. & HUXHAGEN, U. (2008): *Ansätze zur Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern*. Boochs, F. (Hrsg.) ; Klonowski, J. (Hrsg.) ; Müller, H. (Hrsg.): *Aktuelle Arbeiten auf dem Gebiet der Informations- und Messtechnik – Festschrift zum 10. Jahrestag der Gründung des i3mainz*. Shaker (Schriftenreihe Informations- und Messtechnik Band 7)
- KERN, F., SIEGRIST, B., HUXHAGEN, U. & MEHLIG, S. (2010): *Genauigkeitsvergleich verschiedener Zielmarkendesigns*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, **117**, Heft 5, 2010, S. 170-175
- KERN, F. (2010): *Vorschlag für ein binäres, offenes TLS-Austauschformat*. In: Riedel, B. & Schäfer, M. & Niemeier, W. (Red.): *Terrestrisches Laserscanning – TLS 2010 mit TLS-Challenge*. Beiträge zum 101. DVW-Seminar am 6. und 7. Dezember 2010 in Fulda, DVW-Schriftenreihe Band 64, Wißner, Augsburg, 2010, S. 27-42
- VDI/VDE (2002): *Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Atastung*. VDI/VDE-Richtlinie 2634 Blatt 2
- VDI/VDE (2006): *Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten*. VDI/VDE-Richtlinie 2634 Blatt 3 – Entwurf
- OFFENES FORUM TERRESTRISCHES LASERSCANING: www.laserscanning.de