

# Anwendungsbezogene TLS-Prüfung – Untersuchung der Formtreue von Phasenvergleichsscannern<sup>\*)</sup>

## Application-Related TLS-Testing – Analyze the Shape Accuracy of Phase Comparison Scanners

Michael Geist, Olaf Grewe, Lisa Knaack

In dem Beitrag werden die Untersuchungen zur Formtreue terrestrischer Laserscanner (TLS) vorgestellt. Grundlage der Untersuchungen bilden die erhöhten Anforderungen beim Einsatz von Laserscannern im industriellen Umfeld. Vorgestellt werden die Vergleichsergebnisse von fünf Phasenvergleichsscannern in Verbindung mit einem alternativen Prüfkörper. Aus den durchgeführten Analysen ergibt sich für die Anwendungen der Bedarf zusätzlicher Kenngrößen, die die bisherigen Vorschläge zur Prüfung von TLS ergänzen.

**Schlüsselwörter:** Terrestrisches Laserscanning, Prüfverfahren, Phasenvergleichsscanner, Formtreue

*The article presents the analysis of shape accuracy of terrestrial laser scanner. The basis for the study is the increased requirements on laser scanner in the industrial surrounding. The article describes the results of measurement with five phase comparison scanner combined with an alternative extensive test specimen. The analysis shows that there is need for additionally parameters which complement the existing suggestions for testing terrestrial laser scanner.*

**Keywords:** Terrestrial laser scanner, full test procedure, phase comparison scanner, shape accuracy

### 1 MOTIVATION

Die Bedeutung schnell einsetzbarer berührungsloser 3D-Messsysteme in der industriellen Fertigung von Großstrukturen nimmt immer mehr zu. /Grewe, Geist 2010/ zeigt das Potenzial von TLS-Systemen für schiffbauliche Anwendungen auf. Bei der umfassenden Geometrieerfassung von Großstrukturen im Schiffbau und der Windkraftindustrie ergeben sich durch die Nutzung der Vorteile von TLS-Systemen eine Vielzahl neuartiger Ansätze für Qualitätssicherungsmaßnahmen, Prozesssteuerung und Vorfertigungsunterstützung. Die zu erfassenden Strukturen bestehen zu einem Großteil aus hydro- bzw. aerodynamisch optimierten Freiformflächen. Für die Modellierung von Freiformflächen auf Basis von 3D-Punktwolken und den Nachweis flächenhafter Fertigungsabweichungen spielt die Formtreue des verwendeten Messsystems eine entscheidende Rolle.

Derzeit gibt es zwar Vorschläge, aber noch keine festgelegten Prüfverfahren und Kenngrößen für TLS. Die bisherigen Vorschläge für die flächenhafte Prüfung von TLS beziehen sich nur auf einen sehr geringen Teil des Messvolumens. Die Kenngröße Antastabweichung  $R$  beschreibt das lokale Antastverhalten für den Prüfkörper Kugel /Kern 2008/. Für die Kenngröße Ebenheitsabweichung werden von /Heister 2006/ Prüfflächen mit einer Länge von  $LQ = 0,04 \dots 0,06 d$  und Breite  $BQ = 0,01 \dots 0,02 d$  vorgeschlagen. Dies entspricht bei einem Messvolumen  $d$  von 20 m nur  $1,2 \times 0,4 \text{ m}^2$ .

Im Folgenden sollen die Untersuchungen zur flächenhaften Antastung mit einem wesentlich größer dimensionierten Prüfkörper vorgestellt werden.

<sup>\*)</sup> Überarbeitete Fassung des im Tagungsband „Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013“ (Hrsg. Th. Luhmann, Ch. Müller), Wichmann, VDE-Verlag, veröffentlichten Beitrages.

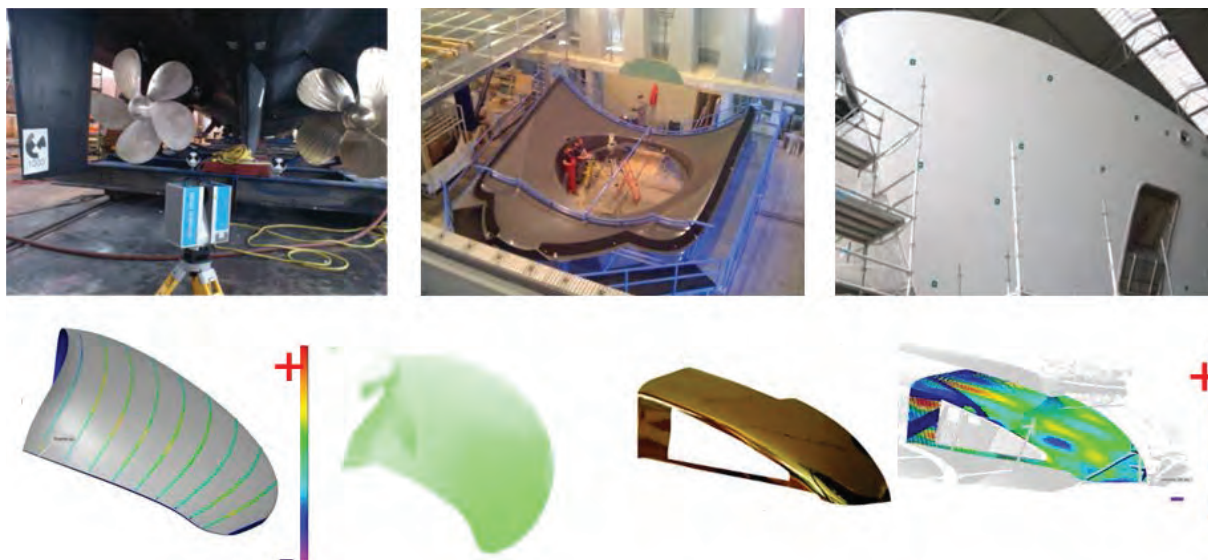


Abb. 1 | Anwendungsbeispiele

## 2 ANWENDUNGEN

Insbesondere für Großstrukturen stellen Laserscanner aufgrund der hohen Erfassungsrate und des großen Messvolumens ein geeignetes Digitalisierungswerkzeug dar. Mit den Entwicklungstendenzen immer schneller und genauer werdender Messsysteme werden Laserscanner für fertigungsbegleitende Qualitätssicherungsmaßnahmen, Konturerfassungen zur Vorfertigung von Einbauteilen und dem Nachweis flächenhafter Formabweichungen zunehmend für eine umfassende Aufnahme von Objekten eingesetzt. Das Anwendungsspektrum am Fraunhofer Anwendungszentrum für Großstrukturen in der Produktionstechnik umfasst dabei die flächenhafte Erfassung von Schiffspinneln, die Prüfung von CFK/GFK-Bauteilen aus der Windkraftindustrie bis hin zur Digitalisierung der Außenhaut von Megayachten (Abb. 1).

Charakteristisch für den Einsatz terrestrischer Laserscanner in diesem Anwendungsgebiet sind ein hoher Anteil an Freiformflächen, beengte Platzverhältnisse und ein begrenztes Zeitfenster für die Messaufnahme. Die Modellierung von Freiformflächen auf Basis der Punktwolken ist ein Werkzeug zur Steuerung von Prozessschritten. Anwendungsbeispiele sind die Spachtelsimulation von Megayachten /Grewe, Geist 2012/ und die Bereitstellung von Ist-Konturdaten zur Vorfertigung von Einbauteilen. Für solche Reverse-Engineering-Aufgaben sind das Messrauschen und die Formtreue der eingesetzten Instrumente von besonderer Bedeutung.

## 3 PRÜFSZENARIO

### 3.1 Prüfkörper

Aus den Anwendungen leiten sich die folgenden Anforderungen an einen alternativen Prüfkörper ab:

- Objektbezogene Beurteilung wird angestrebt.
- Flächenhafte Betrachtungen sollen ermöglicht werden.
- Unabhängigkeit von herstellereigenen Targets.
- Ein für die Anwendungen maßgebliches Messvolumen.

- Anwendungsspezifische Reflektivität der Oberfläche sollte verwendet werden.
- Ermittlung der Fähigkeit des Messsystems zur formtreuen Abbildung.
- Bestimmung eines Kennwertes zur Abschätzung des zu erwartenden „Messrauschens“ auf der Oberfläche als Kennwert für die Formtreue (Antastabweichung).

Die Fertigung einer industriellen Struktur aus Freiformflächen ist sehr kosten- und entwicklungsintensiv. Aus diesem Grund wird für die Untersuchung der Formtreue eine freistehende Ziegelstruktur genutzt. Eine dunkelrot lackierte Oberfläche soll die bei stahlbaulichen Anwendungen vorherrschenden Reflexionsbedingungen repräsentieren. Die Reflektivität beträgt ca. 50 %. An der Wand sind 10 Kugeln mit einem Durchmesser von 145 mm angebracht.

Diese Messwand mit einer Ausdehnung von 7,5 m x 1,5 m x 2,5 m wurde mit einem Streifenlichtprojektor GOM ATOS III digitalisiert. Die für flächenhafte Betrachtungen maßgebliche Ebenheitsmessabweichung des verwendeten Messfeldes beträgt laut Kalibrierzertifikat 0,038 mm für eine Einzelaufnahme. Zur Referenzierung der 192 Streifenlichtscans wurde mittels eines Industriephotogrammetriesystems ein übergeordnetes Koordinatensystem erzeugt. Die mittlere Transformationsabweichung lag bei 0,07 mm.

Als Ergebnis liegt ein trianguliertes Flächenmodell der Messwand vor (Abb. 2), das als Sollmodell in übergeordneter Genauigkeit dient.

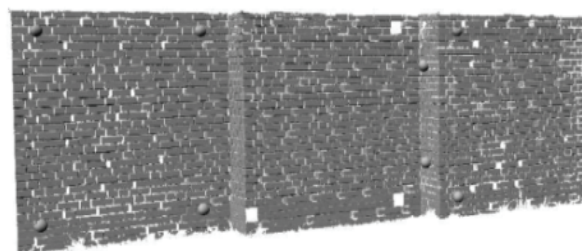


Abb. 2 | Trianguliertes, bereinigtes Flächenmodell

Durch diese aufwendige Digitalisierung des Prüfkörpers wird eine flächenhafte Betrachtung in einem für die Anwendung maßgeblichen Messvolumen ermöglicht.

### 3.2 Geprüfte TLS-Systeme

Für die Erfassung industriell gefertigter Strukturen werden aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen Phasenvergleichsscanner bevorzugt eingesetzt. Die Eignung dieser Scannertypen für industrielle Anwendungen wird durch die Hersteller in den Spezifikationen beworben. Für die Untersuchungen standen fünf Phasenvergleichsscanner zur Verfügung. Folgende Scannertypen wurden überprüft:

- Zoller + Fröhlich Imager 5010i
- Trimble FX
- Leica HDS 6000
- 2x Faro Focus 3D

### 3.3 Messreihen

Mit den durch Hochschulen und Anwender zur Verfügung gestellten Scannern wurde der Sollkörper, nach dem in *Abb. 3* dargestellten Schema, von jeweils 24 Standpunkten in unterschiedlichen Entfernung und Winkeln erfasst.

Die Auswertungen beschränken sich bisher auf die 10 Standpunkte mit unterschiedlichen Entfernungen zum Objekt. Angestrebt wurden möglichst gleiche metrologische Bedingungen, insbesondere keine Sonneneinstrahlung und geringe Temperaturunterschiede. Die gewählten Scanparameter sollten den in der Anwendung bevorzugten Einstellungen entsprechen und sind für alle Standpunkte gleich, d.h. möglichst 6 mm@10 m bei einer Scanzeit von maximal 10 min für einen 360°-Scan. Abweichend von dieser Vorgabe wurde beim

Trimble FX 5 mm@10 m der two-pass Modus verwendet. Um systematische Einflüsse im Überlappungsbereich der Scanner zu vermeiden, wurden alle Scans mit Nullstellung rechtwinklig zum Objekt durchgeführt. Die Prüfung der Überlappungsbereiche erfolgte getrennt von der vorgestellten Auswertung.

### 3.4 Kennwerte

Die Kenngröße Antastabweichung  $R$  beschreibt das auf der Oberfläche zu erwartende Messrauschen. Zur Bestimmung der Antastabweichung erfolgte für jeden Standpunkt eine Vorausrichtung der Punktwolken über die auf dem Referenzkörper angebrachten Kugeln. Anschließend wurden durch einen Best-Fit nach der Methode der kleinsten Quadrate die Punktwolken bestmöglich an den Prüfkörper angepasst. Aus den Residuen lässt sich die Kenngröße Antastabweichung berechnen. Durch dieses Vorgehen wird der Forderung nach einer möglichst objektbezogenen Betrachtung nachgegangen. /Kern 2008/ und nachfolgende Untersuchungen zeigen, dass die Berechnungsart für den Gerätevergleich unerheblich ist. Aus diesem Grund wird nur die von /Kern 2008/ vorgeschlagene Kenngröße berechnet. Anstatt der radialen Abstände zu einer Ausgleichskugel werden die Residuen zum Prüfkörper eingesetzt. Die Abweichungen  $r$  ergeben sich aus dem Soll/Ist-Vergleich und sind als kürzeste Punkt-zur-Fläche-Distanz definiert.

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (1)$$

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Abweichungen von Scanpunkten zum triangulierten Flächenmodell des Prüfkörpers ermöglicht die Nutzung einer nicht-kontinuierlichen Struktur für die Ermittlung der Formtreue.

## 4 UNTERSUCHUNG DER FORMTREUE

### 4.1 Entfernungsabhängige Antastabweichung

Für die Untersuchung der Formtreue lassen sich die berechneten Antastabweichungen in Form von Kennlinien über die Entfernung auftragen. Ein ähnliches Vorgehen schlägt /Gordon 2008/ vor.

In Abb. 4 sind Kennlinien der Antastabweichung für Entfernungen bis 30 m vom Prüfkörper dargestellt. Für die Standpunkte unter 3,75 m Entfernung wurde nur der mittlere Teil der Wand ausgewertet, um den Einfluss des Auftreffwinkels möglichst gering zu halten.

Für die Phasenvergleichsscanner ist eine deutliche Abhängigkeit der Kenngröße von der Entfernung zum Objekt ab einem Abstand von 10 m zu erkennen. Für die Entfernungen unterhalb von 10 m ist der Anteil der Antastabweichung, der durch die Oberflächenbeschaffenheit bedingt ist, als wesentlich größer einzuordnen. Für die Anforderung eines möglichst geringen Messrauschens ergibt sich damit für die Oberfläche ein optimaler Abstand von 10 m. Für den Abstand 10 m zum Objekt liegen zwei Scanner außerhalb der Spezifikation des Herstellers (Tab. 1).

Laserscanner	Herstellerangabe [mm]	Antastabweichung [mm]
Z+F5010i	0,4@10m	0,4@10m
HDS6000	0,8@10m <sup>1</sup>	1,0@10m
Faro Focus I	0,9@10m <sup>1</sup>	0,9@10m
Faro Focus II	0,9@10m <sup>1</sup>	1,0@10m
Trimble FX	1@15m	0,5@10m / 0,9@15m

<sup>1</sup>Interpoliert

Tabelle 1 | Ermittelte Antastabweichung

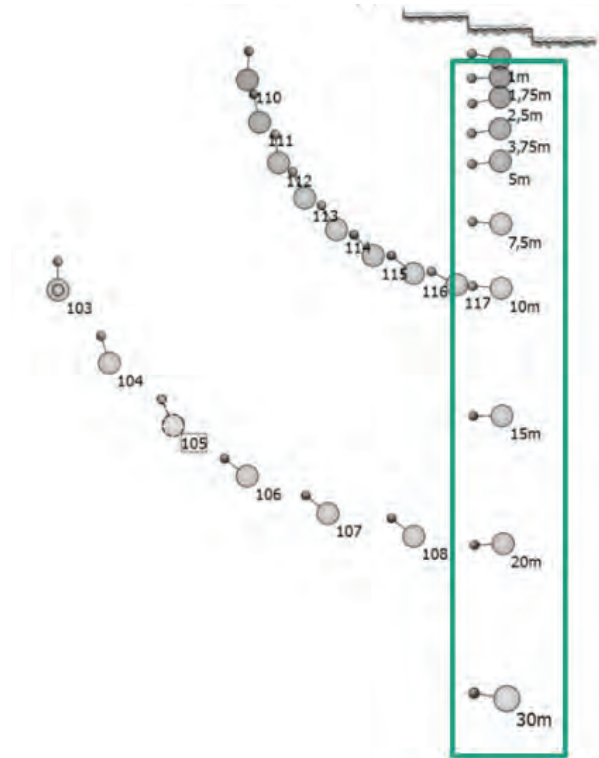


Abb. 3 | Prüfschema

Unter Berücksichtigung der ungünstigen Reflexionseigenschaften und der Tatsache, dass der Einfluss des Auftreffwinkels enthalten ist, kann angenommen werden, dass alle geprüften Scanner für diesen Abstand die Herstellerangaben erfüllen.

Für den Bereich unter 10 m sind bei den beiden Faro Focus 3D bereits nicht kontinuierliche Verläufe der Kennlinien zu erkennen. Der

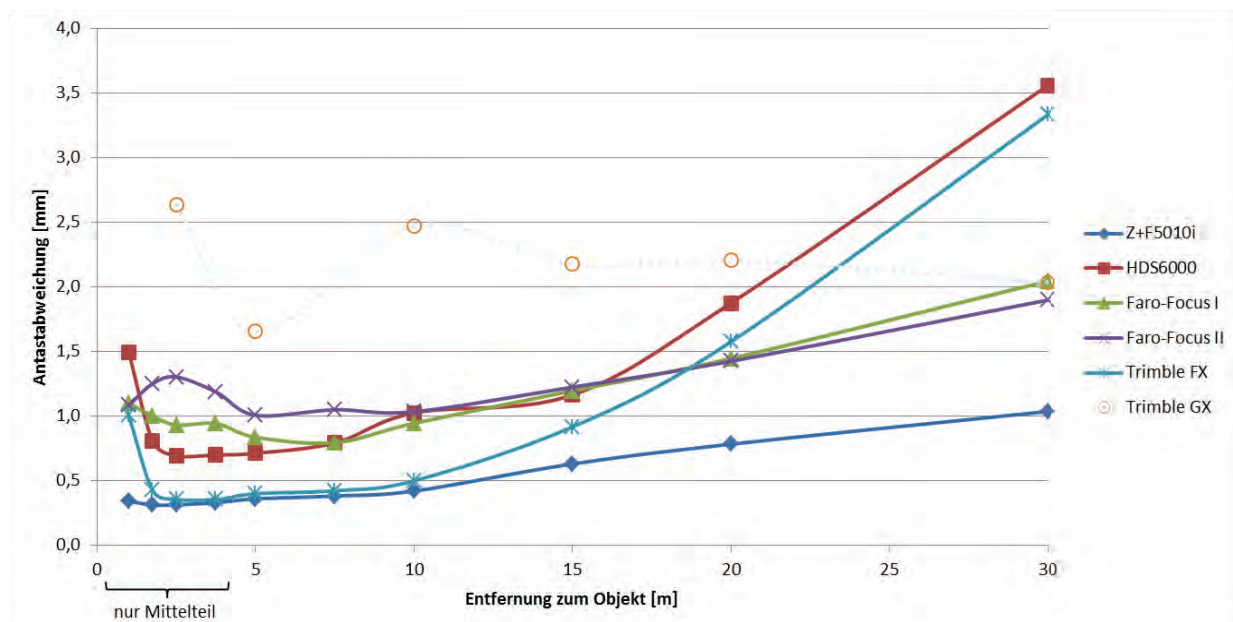


Abb. 4 | Entfernungsabhängige Antastabweichung

Trimble FX und der HDS 6000 zeigen ein deutliches Ansteigen der Antastabweichung im Nahbereich unter 2,5 m auf. Der Z+F 5010i zeigt dieses Verhalten nur für den Abstand 1 m. Laut Herstellerangabe beträgt die Mindestentfernung 0,3 m. Für alle anderen Scanner gibt es keine Spezifikation der Mindestentfernung. Auffällig ist der überproportionale Anstieg des Messrauschens für Trimble FX und HDS 6000 bei Entfernungen über 10 m. Die drei anderen Scanner weisen einen nahezu gradlinigen Anstieg der Antastabweichung auf.

Systematische Abweichungen der Fläche lassen sich nur für die beiden Faro Focus für den Nahbereich unter 10 m vermuten.

Der zusätzlich geprüfte Impulsscanner Trimble GX weist starke Schwankungen in der Antastabweichung auf. Beim Vorgängermodell GS100 wurden aus den Anwendungen heraus bereits Unverträglichkeiten des Lasers mit der roten Farbe vermutet, wie sie auch in /Sternberg et. al. 2005/ beschrieben sind. Der GS100 zeigt in Voruntersuchungen ein derart erhöhtes Messrauschen, dass die Daten nicht mehr auswertbar waren. Eine entsprechende Oberflächenabhängigkeit ist auch für den GX zu vermuten.

### 4.2 Formtreue

Durch die Visualisierung der Fehlervektoren mittels einer Falschfarbendarstellung lassen sich systematische Abweichungen erkennen und Aussagen zur Formtreue auf dem gesamten Prüfkörper ableiten. Beispielhaft werden in Abb. 5 die Ergebnisse eines Soll/Ist-Vergleichs zum Referenzkörper aus einer Voruntersuchung dargestellt. Der Scannerstandort befand sich in ca. 20 m Entfernung bei einem Auftreffwinkel von 45°. Die Darstellung zeigt ein deutliches Schwingungsbild der Residuen. Es bildet sich ein konzentrisches Kreismuster um einen virtuellen Punkt mit Auslenkung 90° zur Startrichtung in der horizontalen Drehebene des Scanners.

In Abb. 5 unten sind Residuen eines Schnittes in X-Richtung des Prüfkörpers dargestellt. Durch eine Schwingungsanalyse der Abweichungen konnte eine Amplitude von 0,6 mm und eine Wellenlänge von 400 mm ermittelt werden.

Die Falschfarbendarstellungen des Soll/Ist-Vergleiches der untersuchten Scanner für einen Abstand von 5 m sind in Abb. 6 dargestellt. Sinusförmige Muster können bei beiden Faro Focus und dem

Trimble FX nachgewiesen werden. Die Amplituden liegen innerhalb der durch den Hersteller angegebenen Genauigkeit. Eine eindeutige Schwingung lässt sich für beide Faro Scanner nicht ermittelt (Abb. 6 unten), da die Abweichungen sehr stark entfernungs- und auftreffwinkelabhängig sind. Faro gibt einen systematischen Distanzfehler von ±2 mm an. Die geschätzte Wellenlänge beträgt 500 mm.

Der Trimble FX zeigt eine konstante Schwingung mit einer Amplitude von 0,14 mm bei einer Wellenlänge von 410 mm und eine leicht konvexe Abweichung von der Sollfläche (Abb. 6 oben links).

Für den HDS 6000 kann eine konvexe Abbildung der Fläche nachgewiesen werden. Durch die Approximationen eines Polynoms 2. Ordnung in den Residuen ergeben sich Abweichungen von -0,15 mm bis +0,15 mm (Abb. 6 oben rechts). Die konvexen Formänderungen hin zu einem Ellipsoid beschreibt /Kern 2008/ als häufig bei Phasenvergleichsscanner vorkommenden Effekt, bei dem die Strecke für Punkte mit einem Auftreffwinkel nah 0° systematisch zu kurz („Zipfelmütze“) und bei zunehmenden Auftreffwinkel systematisch zu lang gemessen wird.

Für den Z+F Imager 5010i konnten keine Formabweichungen innerhalb der Genauigkeit der Referenz nachgewiesen werden.

Die Falschfarbendarstellungen der Residuen ermöglichen eine visuelle Beurteilung der Fähigkeit des Messsystems zur formtreuen Abbildung der Prüffläche. Die dargestellten Auswirkungen systematischer Abweichungen zeigen, dass flächenhafte Betrachtungen und Kenngrößen für die Anwendungen notwendig sind.

Die ermittelten Formabweichungen können für alle Standpunkte bis 10 m nachgewiesen werden. Für Entfernungen über 10 m nimmt das Messrauschen zu, sodass die systematischen Effekte im Rauschen verschwinden.

### 4.3 AUFTREFFWINKELABHÄNGIGE ANTASTABWEICHUNG

Um den Einfluss der Entfernung und des Auftreffwinkels aufzutrennen, kann der Prüfkörper in Zonen gleichen Auftreffwinkels eingeteilt werden (Abb. 7). Für diese Auswertung werden die Standpunkte mit einer Entfernung von 5 m herangezogen, um den für die praktische Anwendung relevanten Bereich bis möglichst 45° Auftreffwinkel /Lindstaedt et. al. 2012/ zu realisieren, ohne in den Bereich von Übersteuerungen im Nahbereich zu kommen.

## Gestaltsabweichung Welligkeit

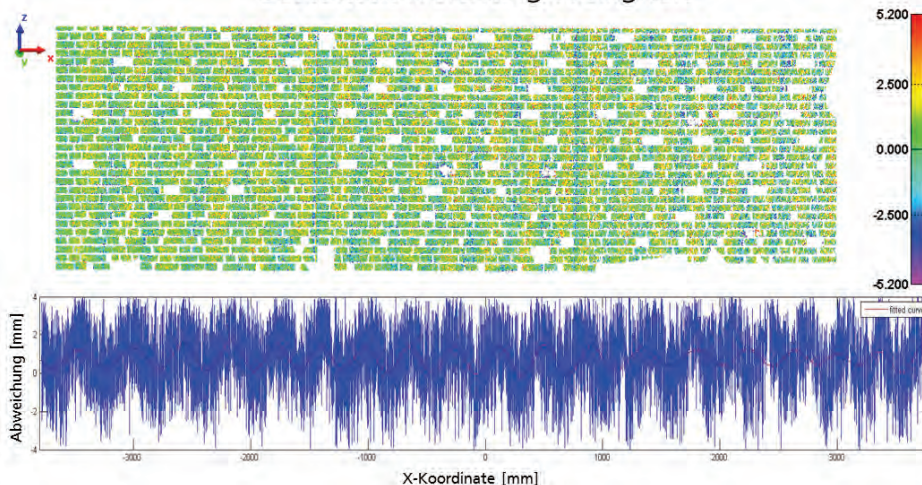


Abb. 5 | Falschfarbendarstellung der Abweichungen

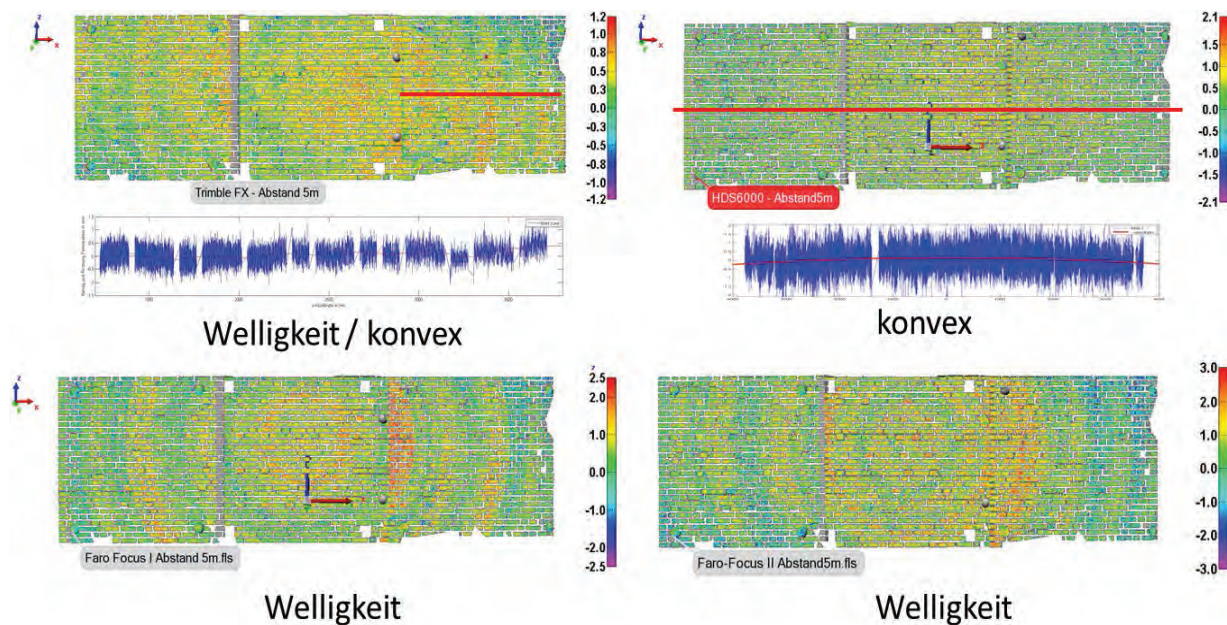


Abb. 6 | Falschfarbendarstellung der Residuen [Skala ±3·R]



Abb. 7 | Einteilung der Sollfläche in Zonen gleichen Auftreffwinkels

Zur Beurteilung der Abhängigkeit des Messrauschens vom Auftreffwinkel wird für jede Zone die Kenngröße Antastabweichung berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 8 dargestellt. Bis zu einem

Auftreffwinkel von 50° lässt sich kein signifikantes Ansteigen der Antastabweichung nachweisen. Aussagen zur Formtreue können nur unzureichend getroffen werden.

#### 4.4 KENNWERT FÜR DIE FORMTREUE

Durch die Berechnungen der Kenngröße Antastabweichung  $R$  können keine relevanten Aussagen zur Formtreue getroffen werden. Abweichungen der digitalen Abbildung von der wahren Gestalt lassen sich durch die Berechnung der mittleren Abweichung von Einzelsegmenten  $d_{seg}$  einer Prüffläche ermitteln.

$$d_{seg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{2}$$

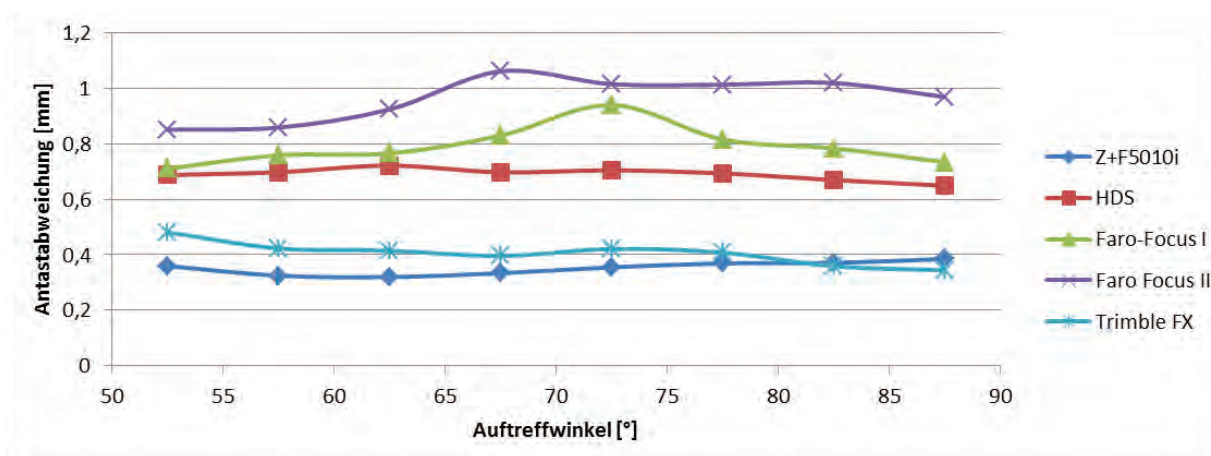


Abb. 8 | Kennlinien der Antastabweichung

Abb. 9 zeigt die Kennlinien aus den mittleren Abweichungen der geprüften Laserscanner für eine Segmentierung der Fläche in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel.

Abb. 9 links zeigt die drei Scanner mit den geringsten Formabweichungen. Deutlich werden die konvexen Abweichungen von der Prüffläche für den HDS 6000 und den Trimble FX. Abb. 9 rechts zeigt die beiden Faro Focus. Eine deutliche Schwingung der mittleren Abweichungen ist erkennbar. Mit einer kleiner werdenden Segmentgröße kann die Größe der Amplituden bestimmt werden.

Aus dem Verlauf der Abweichungen für eine 5°-Unterteilung der Prüffläche lassen sich die systematischen Gestaltsabweichungen nachweisen. Aus dem Minimum und Maximum der Abweichungen ergibt sich ein Kennwert für die Formtreue (Tab. 2).

Laserscanner	$\Delta$ Min / Max $d_{\text{seg}}$ Abweichung [mm]
Z+F5010i	< 0,1
HDS6000	0,4
Faro Focus I	0,5
Faro Focus II	0,7
Trimble FX	0,2

Tabelle 2 | Kennwert Formtreue für einen Abstand 5 m zum Objekt

## 5 NUTZEN ANWENDUNGSBEZOGENER TLS-PRÜFUNGEN

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass trotz intensiver Bemühungen für eine standardisierte TLS-Prüfung nicht alle Nutzer die notwendigen Informationen aus den vorgeschlagenen Kenngrößen ziehen können. Für Anwendungen im Nahbereich, flächenhafte Betrachtungen und Aufgaben mit erhöhten Genauigkeitsforderungen sind anwendungsbezogene Prüfungen notwendig. Die Tab. 3 bis 6 zeigen exemplarisch die Ergebnisse der Berechnung der Antastabweichung aus den zusätzlich am Prüfkörper angebrachten Kugeln. Diese zeigen durchgehend eine zu positive Abschätzung der Kenngröße. Die Ursachen liegen u.a. in der unterschiedlichen Reflektivität gegenüber dem Prüfkörper. Systematische Abweichungen, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, lassen sich aus den berechneten Kenngrößen Antastabweichung und Kugelradienabweichung nicht ableiten.

Die festgestellten systematischen Abweichungen können sich mit schlechter werdenden Bedingungen verstärken, sodass die gezielte Überprüfung der Eignung des Messsystems eine besondere Rolle spielt. Abb. 10 zeigt die Verstärkung der Auswirkungen eines systematischen Distanzfehlers beim Vergleich benachbarter Scans bei der Erfassung eines Schiffskaskos. Im Bereich unterhalb der Wasserlinie mit einer sehr geringen Reflektivität steigt die Amplitude des konzentrischen Kreismusters stark an. Oberhalb der Wasserlinie auf einer weiß geprimerten Fläche sind die Abweichungen in der dargestellten Farbskala nicht nachweisbar.

Zusätzlich zur Prüfung der Eignung des Messsystems lassen sich für die in Abschnitt 2 dargestellten Anwendungen aus den Untersuchungen u.a. Parameter für die Modellierung von Freiformflächen (Steifigkeit, Stützstellen und Fittingparameter) sowie geometrische Restriktionen bei vorgegebenen Toleranzen (Entfernung, Auftreffwinkel) ableiten.

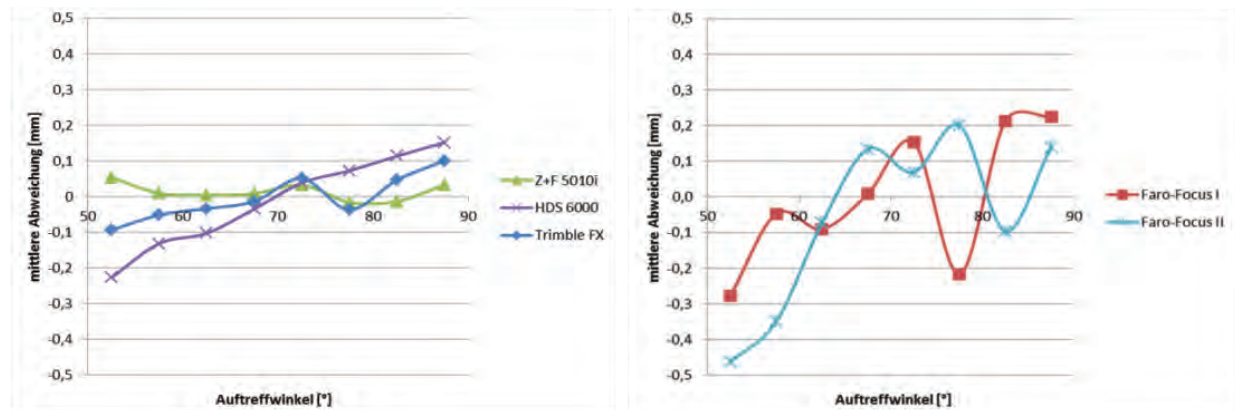


Abb. 9 | Kennlinien der mittleren Abweichungen

Entfernung [m]		3,75	5	7,5	10	15	20
Antastabweichung [mm]	Messwand	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,8
	10 Kugeln	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,7
Kugelradienabweichung [mm]	10 Kugeln	0,1	0,2	0,3	0,4	0,3	-0,1

Tabelle 3 | Zoller + Fröhlich 5010i – Antastabweichung und Radienabweichung in Abhängigkeit von der Entfernung

Entfernung [m]		3,75	5	7,5	10	15	20
Antastabweichung [mm]	Messwand	0,7	0,7	0,8	1,0	1,2	1,9
	10 Kugeln	0,5	0,6	0,8	1,2	1,4	1,6
Kugelradienabweichung [mm]	10 Kugeln	-0,4	-0,2	-0,1	-1,3	-0,5	-2,7

Tabelle 4 | HDS 6000 – Antastabweichung und Radienabweichung in Abhängigkeit von der Entfernung

Entfernung [m]		3,75	5	7,5	10	15	20
Antastabweichung [mm]	Messwand	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	1,2
	10 Kugeln	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,9
Kugelradienabweichung [mm]	10 Kugeln	-0,5	-0,6	-0,4	-0,8	-1,2	-1,5

Tabelle 5 | FaroFocus I – Antastabweichung und Radienabweichung in Abhängigkeit von der Entfernung

Entfernung [m]		3,75	5	7,5	10	15	20
Antastabweichung [mm]	Messwand	0,4	0,4	0,4	0,5	0,9	1,6
	10 Kugeln	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	1,0
Kugelradienabweichung [mm]	10 Kugeln	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,8

Tabelle 6 | Trimble FX – Antastabweichung und Radienabweichung in Abhängigkeit von der Entfernung



Abb. 10 | Oberflächenabhängige Amplitude Verstärkung auf dunklen Oberflächen



## 6 FAZIT UND AUSBLICK

Für Anwendungen mit flächenhaften Anforderungen und sehr engen Toleranzvorgaben sind derzeit vorgeschlagene Prüfverfahren auf Basis von Kugeln und Ebenen geringer Dimension nicht ausreichend. Die vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass im Nahbereich systematische Fehler, die insbesondere die Formtreue beeinflussen, nachgewiesen werden können. Die untersuchten Scanner zeigen mit Ausnahme des Z+F Imager 5010i systematische Abweichungen von der Sollfläche, die sich innerhalb der Genauigkeitsangaben der Hersteller bewegen. Die Ursachen der systematischen Abweichungen konnten bisher trotz intensiver Kontakte zu einigen Herstellern nicht abschließend geklärt werden. Nur die in *Abb. 5* dargestellte konstante Schwingung konnte als Synchronisationsfehler identifiziert werden.

Für flächenhafte Anwendungen sollten auch flächenhafte Kenngrößen bzw. Herstellerangaben angestrebt werden. Ein Vorschlag ist die dargestellte Segmentierung einer Prüffläche. Die Differenz der minimalen und maximalen mittleren Abweichung der Segmente liefert Hinweise auf systematische Abweichungen und beschreibt die Fähigkeit zur formtreuen Abbildung einer Fläche. Offen sind dabei Festlegungen zur Ausdehnung und Art des Prüfkörpers sowie die Segmentgröße.

Für die Zukunft gilt es einen geeinigten Prüfkörper zu entwickeln, der in seiner Oberflächenbeschaffenheit den Anforderungen industrieller Großstrukturen entspricht und es ermöglicht Scansysteme hinsichtlich der formtreuen Erfassung von Objekten zu charakterisieren.

## LITERATUR

Gordon, B. (2008): Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner. Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt.

Grewe, O.; Geist, M. (2010): Einsatz von terrestrischen Laserscannern für Engineering-Prozesse im Schiffbau. In: Tagungsband zur Konferenz Go-3D 2010, 39-54.

Grewe, O.; Geist, M. (2012): Laserscanning als Werkzeug für das Spachteln von Megayachten. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach, 63-69.

Heister, H. (2006): Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). In: Terrestrisches Laserscanning (TLS-2006). Wißner, Augsburg (DWW-Schriftenreihe, Band 51/2006), 35-44.

Kern, F. (2008): Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, Heidelberg, 307-316.

Lindstaedt, M.; Kersten, T.; Mechelke, K.; Graeger, T. (2012): Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, Berlin/Offenbach, 264-275.

Sternberg, H.; Kersten T.; Conseil, N. (2005): Untersuchungen des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 – Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, Heidelberg, 55-65.

### Dipl.-Ing. (FH) Michael Geist

FRAUNHOFER ANWENDUNGSZENTRUM  
FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER  
PRODUKTIONSTECHNIK

Albert-Einstein-Str. 30 | 18059 Rostock  
michael.geist@hro.ipa.fraunhofer.de



### Dipl.-Ing. Olaf Grewe

FRAUNHOFER ANWENDUNGSZENTRUM  
FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER  
PRODUKTIONSTECHNIK

Albert-Einstein-Str. 30 | 18059 Rostock  
olaf.grewe@hro.ipa.fraunhofer.de



### M.Eng. Lisa Knaack

FRAUNHOFER ANWENDUNGSZENTRUM  
FÜR GROSSSTRUKTUREN IN DER  
PRODUKTIONSTECHNIK

Albert-Einstein-Str. 30 | 18059 Rostock  
lisa.knaack@hro.ipa.fraunhofer.de



Manuskript eingereicht: 12.04.2013 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet