

# Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern – eine Standortbestimmung\*

Reinhard Gottwald, Hansbert Heister und Rudolf Staiger

## Zusammenfassung

Terrestrisches Laserscanning (TLS) ist auf dem guten Weg, sich zu einem festen Bestandteil des »vermessungstechnischen Standardwerkzeugkoffers« zu etablieren. Leider fehlen bisher vereinheitlichte Kenngrößen für einen objektiven und direkten Vergleich verschiedener TLS-Systeme und für den Anwender nachvollziehbare, einfache und wirtschaftliche Feldprüfverfahren.

In diesem Artikel wird nach einer Standortbestimmung versucht, Ansätze für mögliche TLS-Prüfverfahren aufzuzeigen, welche die Grundlage für eine künftige ISO-Prüf-Norm (z. B. ISO 17123 Teil 9) bilden könnten.

## Summary

*Terrestrial Laser Scanning (TLS) is well on the way to becoming part of the surveyor's »standard metrology toolbox«. For the time being, standardized specifications for an objective TLS system comparison and simple and economic field test procedures are still lacking.*

*After a short state of the art review, solutions for TLS field test procedures are given as a possible basis for a future ISO test standard (e. g. ISO 17123 part 9).*

## 1 Einleitung

Terrestrische Laserscanner sind seit ca. zehn Jahren auf dem Markt. Ihr Bekanntheitsgrad ist groß und die Anwendungen sind äußerst vielfältig. Trotzdem hat sich das flächenhafte Erfassungssystem »Laserscanner« kombiniert mit der Auswertung der resultierenden Punktwolken noch zu keinem anerkannten Standardverfahren der Vermessungstechnik entwickelt. Dafür gibt es viele Gründe: Eine Ursache wird in der fehlenden Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Erfassungs- und Auswertesysteme gesehen. Für einen direkten und objektiven Vergleich sind einheitliche Kenngrößen und nachvollziehbare Qualitätsangaben eine notwendige Voraussetzung. Diese Bedingung ist für terrestrische Laserscanner heute noch keineswegs erfüllt.

In diesem Beitrag wird die aktuelle Situation zur Prüfung und Kalibrierung von Laserscannern beschrieben.

\* Überarbeitete Fassung des gleichnamigen Vortrages beim 79. DVW-Seminar »Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008)« am 6. und 7. November 2008 in Fulda. Die Seminarbeiträge sind als Band 54 in der Schriftenreihe des DVW erschienen und können beim Wißner-Verlag bestellt werden.

Die Autoren verbinden damit auch den Wunsch nach vermehrten Aktivitäten auf diesem Gebiet, um allen Anwendern einheitliche und aussagekräftige Prüf- und Kalibrierverfahren zugänglich zu machen.

## 1.1 Motivation

Eine große Anzahl von Veröffentlichungen zu Prüf- und Kalibrierverfahren von TLS (vgl. Gottwald 2008, Heister 2006, Kern 2008, Kersten et. al. 2007) unterstreicht die Bedeutung des Themengebietes.

Prinzipiell werden beim TLS und bei Messungen mit dem Tachymeter zwar dieselben Messungselemente beobachtet. Bei näherer Betrachtung zeigen sich jedoch gravierende Unterschiede, die auch weitreichende Konsequenzen auf die Anwendung beider Methoden haben (Tab. 1).

Tab. 1: Systemische Unterschiede zwischen Tachymetrie und Laserscanning

Tachymetrie	Terrestrisches Laserscanning
■ wenige Punkte werden präzise beobachtet	■ sehr viele Punkte werden mit mäßiger Genauigkeit beobachtet
■ Aufwand pro Punkt ist hoch	■ Aufwand pro Punkt ist minimal
■ Messungen sind reproduzierbar und überbestimmt	■ Messungen sind nicht reproduzierbar und nicht überbestimmt
■ Punkte sind repräsentativ, z. B. Hausecken	■ zufällige Punkte, regelmäßiges Raster
■ Punkte sind dauerhaft vermark	■ Punkte existieren nicht dauerhaft
■ Punktauswahl »vor Ort«	■ Punktauswahl bei der Auswertung
■ punktbezogene Qualitätsmaße	■ elementbezogene Qualitätsmaße

Es findet ein Paradigmenwechsel vom punkt- zum elementorientierten Messen statt.

Dem Anwender stehen – mit der Generation der aktuellen Scanner – äußerst leistungsfähige 3D-Digitizer zur Verfügung, die in kürzester Zeit eine genaue und detailreiche Erfassung von Objekten ermöglichen. Allerdings sind einige Einschränkungen zu nennen:

- Für den Anwender kommen die Koordinaten aus einer Blackbox. Er kann heute nur – mithilfe zusätzlicher

Messmittel – exemplarische Stichproben auf geometrische Maßhaltigkeit durchführen.

- Der Anwender hat keine Zugriffsmöglichkeit auf die Kalibrierparameter des Messsystems (Vergleich Tachymeter: Kipp- und Zielachsfehler).
- Es gibt keinen Scanner, der die Möglichkeit bietet, Qualitätsmaße aus den Punktwolken abzuleiten oder Instrumentenfehler durch die Messungsanordnung zu eliminieren (Vergleich Tachymeter: Zwei-Lagen-Messung).
- Effiziente Prüfverfahren, die eine schnelle Aussage über die spezifikationskonforme Funktionstüchtigkeit der Messausrüstung zulassen, sind noch nicht verfügbar.

Aus diesen Gründen müssten nicht nur verantwortungsbewusste Anwender, sondern alle Beteiligten – wozu auch Hersteller, Hochschulen, und Prüfinstitutionen zu zählen sind – ein großes Interesse an Fortschritten auf diesem Gebiet haben.

## 1.2 Technische Spezifikationen der Hersteller

Ungeachtet der Notwendigkeit elementbezogener Angaben beschreiben die Hersteller die Eigenschaften ihrer Scanner oft mit punktbezogenen Maßen oder Kenngrö-

Die technischen Daten verschiedener Systeme lassen sich nur eingeschränkt oder gar nicht vergleichen, da je nach Hersteller unterschiedliche Qualitätsbegriffe und -maße genutzt werden (Tab. 2). Die Qualitätsangaben der Hersteller sind, wie schon vor drei Jahren (Staiger 2005b), uneinheitlich, unvollständig und wenig aussagekräftig. Aus Sicht der Metrologie – der Wissenschaft vom Messen – erfolgt die Quantifizierung der Genauigkeiten teilweise falsch und dilettantisch.

## 1.3 Geometrische Qualität der Rohdaten

Die geometrische Qualität einer Scanner-Punktwolke kann grob durch die Parameter Punktdichte und Richtigkeit der 3D-Koordinaten charakterisiert werden.

Die radiale Punktdichte ist durch die instrumentell gegebene Winkelraasterung begrenzt. Für eine »nützliche Punktdichte« darf die Genauigkeit der Messungselemente (Winkel und Strecke) sowie der Durchmesser des Laserpunktes auf dem Objekt nicht vernachlässigt werden.

Die Genauigkeit (Richtigkeit) eines 3D-Punktes ist das Ergebnis eines komplexen Prozesses und stellt das Endresultat aus Sicht des Herstellers dar. Für den Anwender ist die Genauigkeit der Koordinate eine Ausgangsinformation, um daraus die Genauigkeit der Maße abzuschät-

Tab. 2: Herstellerangaben zur geometrischen Qualität (Stand September 2008)

Hersteller	Modell	Winkel	Strecke	Position
Callidus	CPW 8000	A <sup>2)</sup> : 0,002° (H+V)	A <sup>1)</sup> : 2 mm / 30 m	
Faro	Photon	R: 0,009° (H+V)	E <sup>3)</sup> : ±3mm / 25 m R <sup>4)</sup> : 0,45 - 2,9mm	
Leica	Scanstation 2	A <sup>1)</sup> : 60 µrad	A <sup>1)</sup> : ±4 mm / 50 m	A <sup>1)</sup> : 6 mm / 50 m
Optech	ILRIS 3D		A: 7 mm @ 100 m	A <sup>1)</sup> : 8 mm / 100 m
Riegl	LMS Z 420 i	R: 0,0025°	A: 10 / 5 mm <sup>6)</sup>	R: 5 mm
Trimble	GX	A: 12" (H), 14" (V)	St <sup>5)</sup> : 1,4–6,5 mm A: 7 mm / 100 m	A <sup>1)</sup> : 12 mm / 100 m
Z+F	IMAGER 5006	R: 0,0018° (H+V) A: 0,007° (H+V)	L: <1 mm / 50 m N <sup>7)</sup> : 0,4–7,5 mm	

A Genauigkeit (Accuracy)

P Präzision (Precision)

E Fehler (Error)

R Auflösung (Resolution)

L Linearität (Linearity)

St Standardabweichung

<sup>1)</sup> 1 Sigma

<sup>2)</sup> Ausgabegenauigkeit

<sup>3)</sup> systematischer Distanzfehler

<sup>4)</sup> Abhängig von Filterung, Reflektivität und Entfernung (hier 10 bis 25 m)

<sup>5)</sup> Standardabweichung für 4 Messungen zw. 50 und 200 m

<sup>6)</sup> gemittelt

<sup>7)</sup> Abhängig von Reflektivität und Entfernung (hier 10 bis 50 m)

ßen, die sich direkt auf die Messungselemente »Strecke«, »Winkel« oder »Position« (Einzelpunkt) beziehen. Allerdings sind das Maße, die nicht verifiziert werden können. LEICA ist vorbildlich und gibt nicht nur für die Scanstation 2 (und Vorgängermodelle) ein Genauigkeitsmaß an, das sich auf die Bestimmung eines geometrischen Elements (Ebene) bezieht, sondern spezifiziert auch eine Genauigkeit für die Bestimmung der Targetkoordinaten. Diese Größe ist von weitreichender Bedeutung bei der Verknüpfung mehrerer Punktwolken.

zen, die je nach Aufgabenstellung erforderlich sind (Böhler und Marbs 2004).

Viele Faktoren beeinflussen die Genauigkeit der Punktkoordinaten (Abb. 1), weshalb nur eine Systemkalibrierung verlässliche und reproduzierbare Ergebnisse liefern kann. Im Wesentlichen besteht die Systemkalibrierung hier aus einem Soll-Ist-Vergleich bekannter Objekte, z. B. Zylinder oder Kugeln mit bekannter Geometrie (Staiger und Ettl 2003). Die Fehlerursachen und Einflüsse einzelner Komponenten lassen sich dagegen nur exemplarisch und mit viel Aufwand bestimmen.

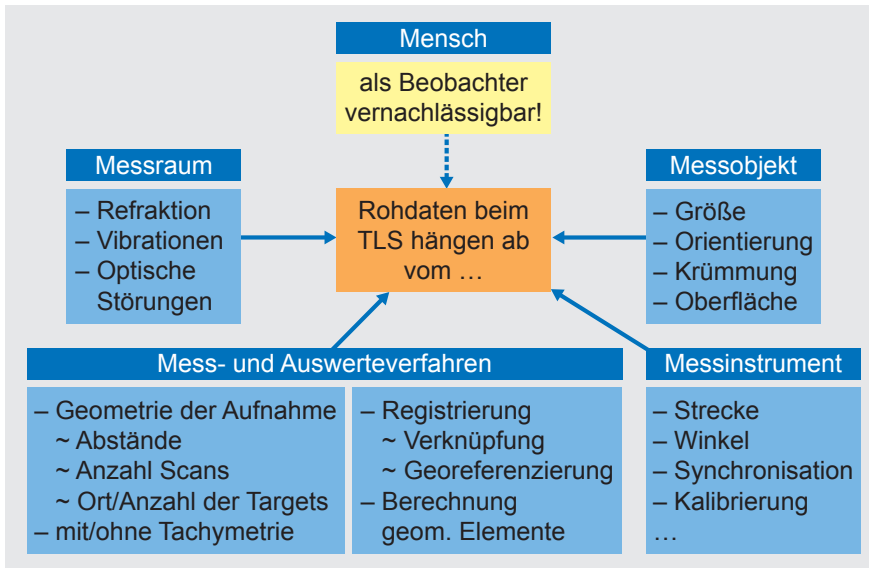


Abb. 1: Einflussgrößen und Abhängigkeiten beim TLS

### 1.4 Prüfen und Kalibrieren von Instrumenten

Im Rahmen einer Prüfung wird festgestellt, inwieweit ein Prüfobjekt (hier ein Laserscanner bzw. eine erzeugte Punktwolke) eine Forderung erfüllt. Mit dem Prüfen ist immer eine Entscheidung verknüpft (Forderung erfüllt oder nicht erfüllt). Bei der Prüfung eines Messgerätes werden hauptsächlich die Messabweichungen des Instrumentes festgestellt und mit den Herstellerangaben verglichen.

**Kalibrierung** bedeutet, einen Zusammenhang zwischen dem angezeigten und tatsächlichen Messwert herzustellen. Die Kalibrierung dient der Bestimmung von (systematischen) Messabweichungen. Liegen signifikante, reproduzierbare Messabweichungen vor, können diese auch zur Verbesserung der Messgenauigkeit genutzt werden (= Kalibrierparameter).

Eine **Justierung** ist verbunden mit einem dauerhaften mechanischen oder datentechnischen Eingriff in das Messgerät, indem die festgestellten systematischen Abweichungen im Instrument eingestellt oder abgeglichen werden. Die Justierung erfolgt heute hauptsächlich durch das Abspeichern ermittelter Kalibrierparameter.

## 2 Aktuelle Initiativen zur Entwicklung von Richtlinien für TLS

Aktuell gibt es zwei offizielle Initiativen zur Entwicklung von Richtlinien (Normen) für fachgerechtes und einheitliches Prüfen und Kalibrieren. Im Frühjahr 2008 hat sich außerdem während der Oldenburger 3D-Tage spontan ein offenes Forum Laserscanning formiert, das ebenfalls in dieser Richtung aktiv werden möchte ([www.laserscanning.org](http://www.laserscanning.org)).

### 2.1 NIST E57

Die »American Society for Testing and Materials« (ASTM International, [www.astm.org](http://www.astm.org)), gegründet 1898, ist eine offene, in den USA beheimatete, internationale Vereinigung, die ihre Aufgabe in der Standardisierung technischer Produkte und Verfahren sieht.

Das ASTM Komitee E57 für »3D Imaging Systems« wurde 2006 gegründet. Die Mitglieder treffen sich zweimal jährlich (Januar und Juni) zu jeweils dreitägigen technischen Treffen. Die Themen umfassen bildgebende Systeme, insbesondere Laserscanner (LADAR oder Laser radar) und 3D-Kameras (Optical range cameras, LADAR oder 3D range cameras). Im Komitee sind Hersteller, Bundesbehörden, Berufs- und Handelsverbände, sowie Forschungseinrichtungen vertreten. Die Richtlinien (standards) werden im Jahrbuch der ASTM veröffentlicht.

Für E57 gibt es vier Arbeitsgruppen (Subkomitees) mit den thematischen Schwerpunkten:

- Terminology *Terminologie* (E 57.01)
- Test Methods *Testmethoden* (E 57.02)
- Best Practices *Praxisempfehlungen* (E 57.03)
- Data Interoperability *Austauschbarkeit der Daten* (E 57.04)

Wie der Name vermuten lässt, geht es bei Terminologie um Begriffe und Bezeichnungen. Ein erster interner Entwurf liegt dazu vor und ist den Komitee-Mitgliedern zugänglich. Im Rahmen der Testmethoden werden Prüf- und Testverfahren entwickelt. Ein Entwurf für eine Streckenmessmethode liegt vor. Das dritte Thema sind Praxisempfehlungen für fachgerechte und effiziente Strategien bei Erfassung und Auswertung. Ein Ziel der vierten Arbeitsgruppe (Austauschbarkeit der Daten) ist ein binäres Format zum systemübergreifenden Austausch von Daten. Dazu wird versucht, ein gemeinsames Lese- und Schreibformat zu definieren, das hoffentlich möglichst alle Softwarehersteller übernehmen. Gerade der letzte Punkt hat einen direkten Praxisbezug, denn heute ist der Datenaustausch praktisch nur über Textdateien (ASCII-Format) möglich.

### 2.2 ISO 17123

Die ISO-Norm 17123 beschreibt Feldprüfverfahren für geodätische Instrumente. Erschienen sind bisher Normen für Nivelliere (Teil 2), Theodolite (Teil 3), Nahbereichsentfernungsmesser (Teil 4), Elektronische Tachymeter (Teil 5),

Rotationslaser (Teil 6), Lotinstrumente (Teil 7) und GNSS Feldmesssysteme in Echtzeit-Kinematik (Teil 8). Dazu gibt es einen allgemeinen Theorieteil (Teil 1).

Für jedes Instrument werden zwei Feldprüfverfahren, eine vereinfachte Prüfung (simplified procedure) und eine vollständige Prüfung (full procedure), beschrieben. Beide können ohne Sollwerte und Spezialinstrumente ausgeführt werden. Im Frühjahr 2008 hat LEICA dem ISO-Gremium einen Vorschlag für ein Feldprüfverfahren für TLS unterbreitet.

### 3 Feldprüfverfahren – Einfach, schnell und zuverlässig?

Neben der Laborprüfung zum Nachweis der Systemeigenschaften und einer teilweise aufwändigen Kalibrierung von TLS (siehe 4.) ist es notwendig, dem Anwender in der Praxis Möglichkeiten aufzuzeigen, wie er sein Messsystem zum Beispiel vor der Ausführung eines Auftrags möglichst schnell und einfach aber sicher auf seine Spezifikationskonformität (Stimmt die Genauigkeit des Systems noch? Liegen systematische Messabweichungen vor?) überprüfen kann.

Die ISO-Norm 17123 beschreibt Feldprüfverfahren für verschiedene geodätische Sensorsysteme (z. B. Nivelliere, Tachymeter, GNSS-Systeme). Für Terrestrische Laserscanner (TLS) gibt es bis jetzt allerdings keine standardisierten Prüfverfahren. Basierend auf der Grundphilosophie der ISO 17123 sind zurzeit Bestrebungen im Gange, die Grundlagen für eine solche Prüfnorm zu erarbeiten.

Die folgenden Ausführungen wurden als Diskussionsgrundlage für eine vereinfachte Feldprüfung erarbeitet (Müller/Würsch 2001, Rothweiler/Schmid 2007).

#### 3.1 Allgemeine Anforderungen an Feldprüfverfahren

Basierend auf der Grundphilosophie der ISO 17123 TLS werden für Feldprüfverfahren (»simplified test procedure« gemäß ISO 17123) die folgenden Randbedingungen festgelegt:

- Unabhängig vom Funktionsprinzip des TLS (Panorama ViewScanner, CameraViewScanner, PhasenScanner, LaufzeitScanner, ...)
- Sichere Erkennung systematischer Messabweichungen bei Distanz und Richtungen
- Verwendung des mitgeführten Standardzubehörs (Stative, Zielzeichen usw.). Keine Verwendung von anderen Referenzsensoren, speziellen Prüfwerkzeugen oder fest installierten Prüfeinrichtungen oder Prüffeldern
- Die gesamte Prüfung inkl. Auswertung darf nicht länger als eine Stunde dauern.

Die ISO 17123 sieht noch eine umfassendere und aufwändigere Feldprüfung vor, aus der auch statistisch gesicherte Genauigkeitsangaben des TLS abgeleitet werden können (»full test procedure«). Auf diese Verfahren wird hier nicht eingegangen, sondern auf (Gottwald 2008) und (Heister 2006) verwiesen.

#### 3.2 Einfache Feldprüfverfahren für TLS

Auf Basis der Vorgaben gem. 3.1 wurden als Diskussionsgrundlage verschiedene Varianten einfacher Feldprüfverfahren entwickelt und anschließend einem Praxistest unterzogen. Grundidee bei allen Verfahren ist, dass sich die Sensorkomponenten Distanz und Raumrichtung (Hz/V) gegenseitig kontrollieren und am Ende des Prüfprozesses eine Aussage (innerhalb der Spezifikation = »grün«, außerhalb der Spezifikation = »rot«) gemacht werden kann. Die Testmessungen (3.2.2) wurden mit drei verschiedenen Scannern ausgeführt:

- Leica ScanStation 2 (LaufzeitScanner, kalibriert) = SS2
- Leica HDS6000 (PhasenScanner, kalibriert) = 6000
- Leica ScanStation 2 (LaufzeitScanner, nicht kalibriert) = SS2nc

##### 3.2.1 Variantenstudium

**Einzel-Distanz-Verfahren (ED) – Vorgehen (Abb. 2a):**

- Aufbau einer Testlinie 1-2; Länge im gewünschten Scanbereich wählen (ED1 = 1-2 Linie nahezu horizon-

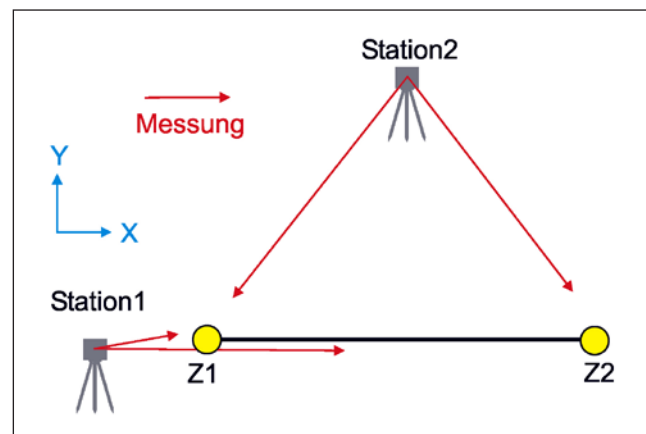


Abb. 2a: Einzel-Distanz-Verfahren (ED)

tal; ED2 = 1-2 mit einem signifikanten Höhenunterschied).

- TLS auf Station 1 in Verlängerung von 1-2. Zielpunkte 1 und 2 messen (Setup1).
- TLS auf Station 2, so dass ein etwa gleichseitiges Dreieck gebildet wird. Zielpunkte 1 und 2 messen (Setup1).
- Distanzdifferenz 1-2 aus Setup1 und Setup2 berechnen und mit der erlaubten Abweichung vergleichen → Entscheidung »grün«/»rot«.

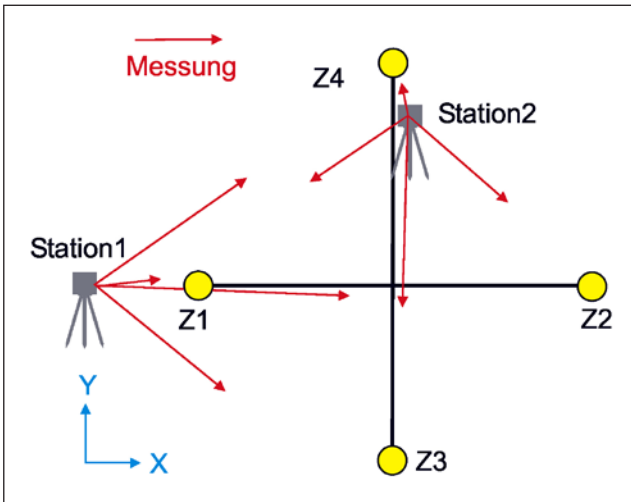


Abb. 2b: Doppel-Distanz-Verfahren (DD)

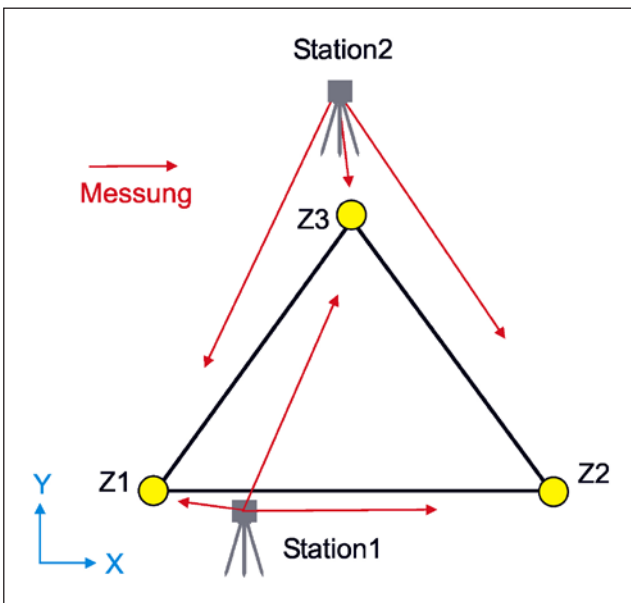


Abb. 2c: Dreiecks-Verfahren (D)

**Doppel-Distanz-Verfahren (DD) – Vorgehen (Abb. 2b):**

- Aufbau von zwei sich rechtwinklig schneidenden Testlinien 1-2, 3-4; Länge im gewünschten Scanbereich wählen (DD1 = 1-4 nahezu horizontal; DD2 = 2 oder 4 mit einem signifikanten Höhenunterschied).
- TLS auf Station 1 in Verlängerung von 1-2. Zielpunkte 1-4 messen (Setup1).
- TLS auf Station 2 in Verlängerung von 3-4. Zielpunkte 1-4 messen (Setup2).
- Distanzdifferenzen 1-2 und 3-4 aus Setup1 und Setup2 berechnen und mit den erlaubten Abweichungen vergleichen → Entscheidung »grün«/»rot«.

**Dreiecks-Verfahren (D) – Vorgehen (Abb. 2c):**

- Aufbau eines nahezu gleichseitigen Dreiecks 1-2-3 (D1 = 1-3 nahezu horizontal; D2 = ein Eckpunkt mit einem signifikanten Höhenunterschied).
- TLS auf Station 1 in Verlängerung von 1-2. Zielpunkte 1-3 messen (Setup1).
- TLS auf Station 2. Zielpunkte 1-3 messen (Setup2).
- Distanzdifferenzen 1-2, 1-3 und 2-3 aus Setup1 und Setup2 berechnen und mit den erlaubten Abweichungen vergleichen → Entscheidung »grün«/»rot«.

Weitere mögliche Testfeldkonstellationen wurden aus verschiedenen Gründen vor der Ausführung von Testmessungen wieder verworfen (Rothweiler/Schmid 2007).

**3.2.2 Testmessungen**

Die Wirksamkeit der vorgängig beschriebenen Verfahren wurde in Testmessungen nachgewiesen. Zur Referenzierung dieser Untersuchungen wurden die »Testfelder« zusätzlich mit einem Tachymeter ausgemessen. Als Beispiel werden hier die Resultate einer solchen Messung mit dem Doppel-Distanz-Verfahren (DD) gezeigt (Tab. 3). Resultate weiterer Messungen sind in (Gottwald 2008) und (Rothweiler/Schmid 2007) finden.

Tab. 3: Ergebnisse von Testmessungen. Zeitbedarf ca. 60 Minuten

Verfahren	TLS	Linie	TLS Station 1 [m]	TLS Station 2 [m]	$\Delta = S1-S2$ [mm]	Tol. S = 99% [mm]	Referenz TCRP1201 [m]
DD1	SS2	1-2	43.046	43.046	0	14	43.049
		3-4	47.478	47.481	-3		47.481
	6000	1-2	43.050	43.048	2	14	43.049
		3-4	47.485	47.483	2		47.481
SS2nc		1-2	42.812	42.724	88	14	42.925
		3-4	47.009	47.105	-96		47.226
DD2	SS2	1-2	43.046	43.046	0	14	43.049
		3-4	45.911	45.911	0		45.913
	6000	1-2	43.050	43.048	2	14	43.049
		3-4	45.913	45.914	-1		47.481
SS2nc		1-2	42.812	42.724	88	14	42.925
		3-4	45.136	44.917	219		45.032



### 3.2.3 Empfehlungen

Mit allen drei vorgestellten Verfahren konnten die nicht spezifikationskonformen Abweichungen der nicht kalibrierten ScanStation 2 (SS2nc) sicher detektiert werden (»rot«). Das Einzel-Distanz-Verfahren (ED) ist am schnellsten auszuführen, hat allerdings im Datensatz keinerlei Überbestimmungen. Doppel-Distanz- und Dreiecks-Verfahren benötigen zur Ausführung etwa die gleiche Zeit (ca. 60 Minuten). Es sollte, wenn möglich, eine Testfeldvariante mit einem möglichst großen Höhenunterschied gewählt werden. Aufgrund der gemachten Erfahrungen wird für eine einfache, schnelle und zuverlässige Feldprüfung eines TLS dem Doppel-Distanz-Verfahren (DD) der Vorzug gegeben.

## 4 Standardisierte Labor-Prüfverfahren

Im vorangegangenen Abschnitt wurden unterschiedliche Vorgehensweisen zur Überprüfung von TLS diskutiert, die vorrangig zum Ziel haben, Fehlfunktionen oder Genauigkeitsdefizite des Instrumentariums zu detektieren. Im Folgenden soll der Vorschlag von Heister 2006 aufgegriffen werden, bei dem im Vordergrund die Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen, Spezifikationen aber auch wichtige Aspekte der Kalibrierung wie z.B. die Rückführbarkeit der Messgröße Länge stehen. Somit richtet sich dieses Verfahren an Instrumenten-Hersteller und unabhängige Prüfinstitutionen, die über entsprechende Qualifikationen und Prüfeinrichtungen verfügen. Für den Anwender sind dann Angaben über die Genauigkeit und Leistungsfähigkeit des Scanners, die diesem Prüfverfahren folgen, nachvollziehbar und untereinander vergleichbar.

### 4.1 Das Konzept des Labor-Prüfverfahrens

Um den Anforderungen an ein zertifiziertes Prüfverfahren zur Abnahme eines Messsystems zu genügen, müssen Prüfkörper festgelegt werden. Dies sind lineare, ebene und räumliche Anordnungen von Formelementen wie z.B. optisch antastbare Kugeln oder Ebenen, aber auch andere geeignete räumliche Körper. Auf jeden Fall sollten diese Prüfkörper eine »Soll«-Form realisieren, also kalibriert sein.

Mit Hilfe der Prüfkörper werden die Kenngrößen für die Abtastabweichung, Abstandsabweichung, Ebenheitsmessabweichung und ihre Messunsicherheiten ermittelt. Sie dienen der Spezifikation des optischen 3D-Mess-

systems »TLS«; eventuell festgelegte Grenzwerte für die Kenngrößen können aber auch für eine Abnahme-prozedur herangezogen werden. Durch dieses einheitliche, bekannte Vorgehen ist somit eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messsysteme möglich. Da die Ergebnisse von der Betriebsart aber auch von den Betriebsbedingungen abhängen, müssen für die Prüfmessungen Einschränkungen bzw. Vorgaben hierfür vereinbart werden.

### 4.2 Messvolumen

Die Bestimmung des Messvolumens ist von entscheidender Bedeutung, da – wie später gezeigt – hiervon weitere Festlegungen für das Prüfverfahren abhängen. Wird mit  $D$  die typische/maximale Messdistanz beim Scannen bezeichnet, dann ergeben sich gemäß Abb. 3a alle wei-

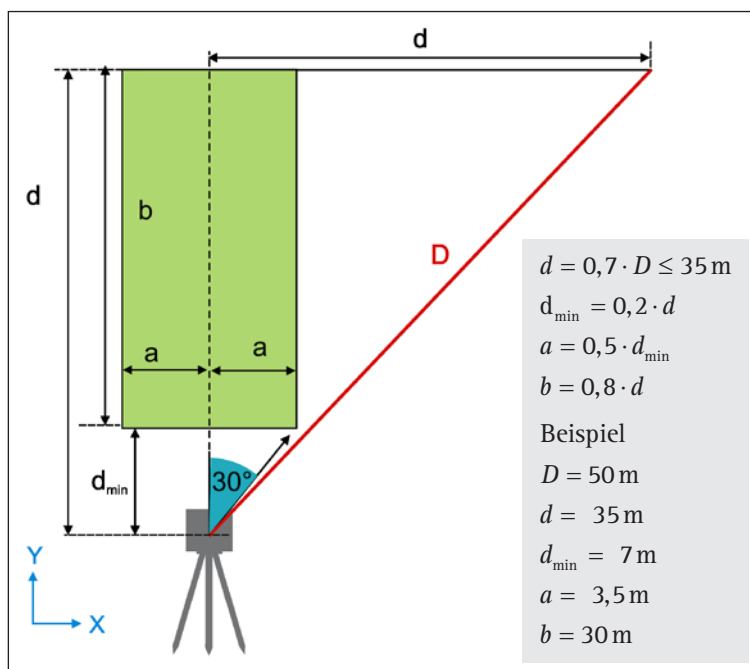


Abb. 3a: Festlegung des Messvolumens

teren Festlegungen des Messvolumens. Beispielhaft wird hier für  $D = 50 \text{ m}$  ein typisches Messvolumen berechnet. Neben den vorgeschlagenen Festlegungen wäre zu diskutieren, ob für die Ausdehnung  $d$  des Messraumes eine Obergrenze z.B.  $d_{\max} = 35 \text{ m}$  angesetzt werden sollte. Da die aktuelle instrumentelle Entwicklung zeigt, dass die Messbereiche so stark divergieren, dass eine einheitliche Behandlung bei einem Prüfverfahren fraglich erscheint, könnte man eventuell auch verschiedene Distanzklassen mit unterschiedlichen Obergrenzen festlegen. Die Höhe  $h$  sollte auf 2–4 m limitiert sein.

### 4.3 Bestimmung der Kenngrößen und Messunsicherheiten

Die Antastabweichung kann als die Spanne des Abstandes zu einem ausgeglichenen Formelement definiert werden. Sie beschreibt das Abweichverhalten des Laserscanners in einem kleinen Teil des Messvolumens. Als Abnahme- und Genauigkeitskriterium werden die mittlere Antastabweichung  $R$  und die Antast-Messunsicherheit  $u_R$  bestimmt.

Der Festlegung des Antastformelementes kommt dabei eine wichtige Bedeutung zu. Für die Bestimmung der Kenngröße  $R$  wird in Anlehnung an die VDI/VDE 2634 eine Kugel mit dem Durchmesser  $D_P$  vorgeschlagen.

*Prüfkörper:* Kugel mit einem Durchmesser  $D_P$  von 0,01 bis  $0,02 \cdot d$ .

Obwohl die Kugel für das Scannen ein problematisches Formelement ist, da in den peripheren Zonen Auftreffwinkel des Messstrahls, die schlechte oder gar fehlerhafte Messungen erzeugen können, nicht zu vermeiden sind, wird dieses Formelement wegen der Symmetrieeigenschaften und einfachen mathematischen Behandlung bei der Auswertung bevorzugt; außerdem ist die Kugel als Zielzeichen für die Registrierung/Georeferenzierung bei vielen Anwendungen unverzichtbar. Die beschriebenen Nachteile könnten durch gewisse Vorgaben z. B. zur Streichung von Messwerten eliminiert werden.

Der Prüfkörper wird an mindestens zehn beliebigen Positionen im Messvolumen angemessen (gescannt). Für jede Position  $j = 1, \dots, 10$  wird eine ausgleichende Kugel mit *unbekanntem* Radius bestimmt. Der Mittelwert aller radialen Abweichungen  $r_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) führt zur *mittleren Antastabweichung*

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

Die *Antast-Messunsicherheit* wird als Mittelwert der Standardabweichungen  $s_{Rj}$  für den unbekanntem Radius der ausgeglichenen Kugel berechnet:

$$u_R = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{10} s_{Rj}^2}{10}} \quad (2)$$

Dieser Teil des Prüfverfahrens kann auch mit Messungen zur Bestimmung der Abstandsabweichung kombiniert werden. Die Kenngröße hierfür beschreibt die Fähigkeit des Scanners zur Längenmessung und kann zusätzlich die Rückführbarkeit der Messgröße Länge zertifizieren. Als Abnahme- und Genauigkeitskriterium werden die mittlere Abstandsabweichung  $\Delta L$  und die Abstands-Messunsicherheit  $u_L$  bestimmt.

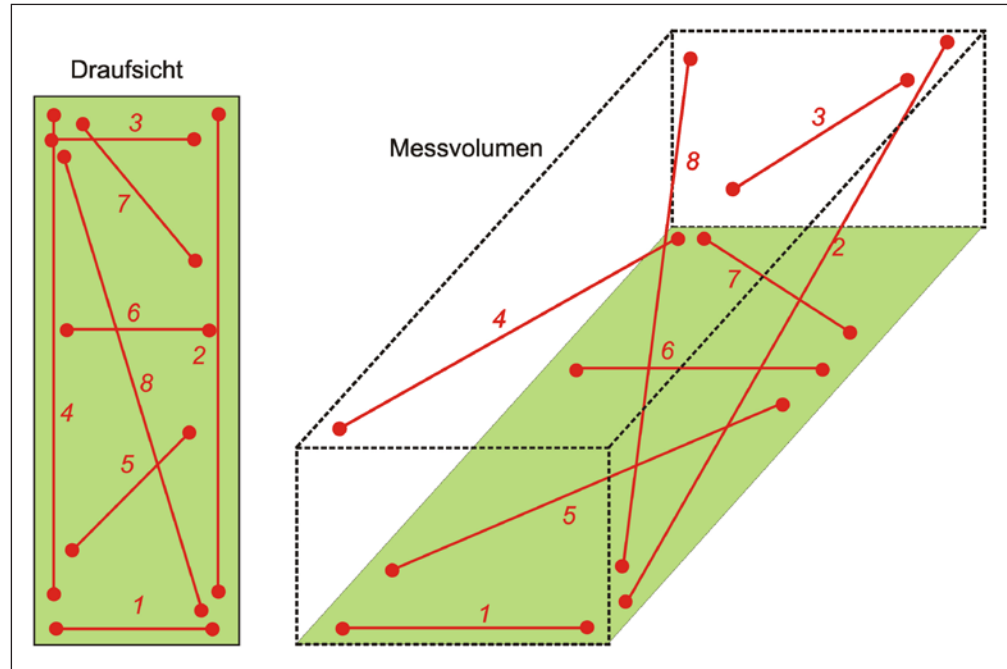


Abb. 3b: Empfehlung zur Anordnung der Prüfkörper

Der Prüfkörper besteht aus den gleichen Formelementen (Kugeln) wie sie bei der Antastabweichung definiert wurden. Ihre Positionierung ist jedoch jetzt paarweise in unterschiedlichen Abständen  $L_P$  im Messvolumen vorzunehmen.

*Prüfkörper:* Kugel mit einem Durchmesser  $D_P$  von 0,01 bis  $0,02 \cdot d$ , paarweise im Abstand  $L_P \geq 0,8 \cdot a$  angeordnet, wobei innerhalb des gesamten Messvolumens eine Verteilung nach Abb. 3b anzustreben ist. Die tatsächlichen Abstände  $l_{kj}$  der Kugelpaare werden mit einem kalibrierten Messsystem, z. B. Präzisionstachymeter oder Lasertracker, begleitend zur Prüfmessung bestimmt.

Zur Bestimmung der Kugelabstandsabweichung werden die angemessenen Flächensegmente der beiden Kugeln mit vorgegebenem Durchmesser (kalibriert) aber unbekanntem Mittelpunktskoordinaten nach der Methode der kleinsten Quadrate angepasst. Aus ihren Koordinatendifferenzen können dann die »gemessenen« Abstände  $l_{mj}$  abgeleitet und mit den Soll-Abständen  $l_{kj}$  verglichen werden. Dies führt dann zur Kugelabstandsabweichung

$$\Delta L_j = l_{mj} - l_{kj} \quad j = 1, \dots, 8 \quad (3)$$

Hieraus ergibt sich somit die mittlere Kugelabstandsabweichung

$$\Delta L = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 |\Delta L_j|. \quad (4)$$

Der Abstandsvergleich ermöglicht ebenfalls eine Genauigkeitsaussage, nämlich die Abstands-Messunsicherheit

$$u_L = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^8 \Delta L_j^2}{8}}. \quad (5)$$

Die Kenngröße Ebenheitsmessabweichung ist die Spanne der vorzeichenbehafteten Abstände der Messpunkte von der ausgleichenden Ebene eines quaderförmigen Prüfkörpers. Als Abnahme und Genauigkeitskriterium werden die mittlere Ebenheitsmessabweichung  $R_E$  und Ebenheits-Messunsicherheit  $u_E$  ermittelt. Es gelten folgende Festlegungen für den

**Prüfkörper:** Quader mit einer Länge  $L_Q$  von 0,04 bis  $0,06 \cdot d$  und einer Breite  $B_Q$  von 0,01 bis  $0,02 \cdot d$ . Die Ebenheit sollte  $\leq 0,2 \cdot R_{zulässig}$  sein. Die Dicke ist materialabhängig festzulegen.

Der Messablauf ist vergleichbar mit dem zur Bestimmung der Abstandsabweichung. Die Prüffläche wird wieder sequentiell jedoch unter verschiedenen Auftreffwinkeln an verschiedenen Positionen im Messvolumen angemessen. Es werden sechs unterschiedliche Orientierungen vorgeschlagen (Heister 2006).

Für jede Lage der Prüffläche wird eine ausgleichende Ebene bestimmt. Über alle  $n$  Residuen  $v_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) kann nun die mittlere Ebenheitsmessabweichung berechnet werden:

$$R_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_i|. \quad (6)$$

Die *Ebenheits-Messunsicherheit* wird als Mittelwert der Standardabweichungen  $s_{Ej}$  berechnet, die sich aus den einzelnen Ebenen-Ausgleichungen entnehmen lässt:

$$u_E = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^6 s_{Ej}^2}{6}}. \quad (7)$$

Für eine *Abnahme* können alle ermittelten Kenngrößen  $K$  nach Abschluss der Prüfmessungen dahingehend bewertet werden, dass sie einem maximal zulässigen Wert gegenübergestellt werden:

$$K_{Gemessen} \leq K_{Zulässig}. \quad (8)$$

Wird diese Bedingung eingehalten, ist die Abnahme erfolgreich bestanden.

#### 4.4 Bewertung des Prüfverfahrens

Erste Erfahrungen (Kern 2008) haben gezeigt, dass die vorgeschlagenen Kenngrößen geeignet sind, die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit unterschiedlicher Instrumententypen zu quantifizieren. Ziel dabei ist es, ein standardisiertes Vorgehen zu erreichen, dass jedem Nutzer – also fachübergreifend – sowohl die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Instrumententypen als auch eine sachgerechte Interpretation der Genauigkeitsangaben ermöglicht. Der Prüfvorgang ist so konzipiert, dass er nicht auf geräte- oder firmenspezifischer Auswertesoftware aufbaut; vielmehr wird bei der Auswertung auf bekannte und bewährte Verfahren der Ausgleichsrechnung zurückgegriffen. Das Verfahren ist somit für jeden Anwender transparent und objektiv.

Die Festlegung von Form und Größe der Prüfkörper bedarf noch weiterer Tests. Kugeln sollten dabei einen Durchmesser von 15 cm nicht unterschreiten, um die beschriebenen Nachteile zu mindern bzw. auszuschalten.

## 5 Kalibrierung

Im Zeitalter komplexer elektrooptischer Messsysteme – wie Laserscanner, zielverfolgende Tachymeter und Digitalnivelliere – ist die Kalibrierung eine Aufgabe des Herstellers und der Anwender ist im Falle des Laserscanners gezwungen, die resultierenden xyz-Koordinaten als »originäre Messwerte« zu betrachten. Die Koordinaten entstehen dabei aus mehreren Sensorwerten, die über ein komplexes mathematisch-physikalisches Modell inkl. Korrekturparameter funktional verknüpft sind.

Auch wenn es in wenigen Fällen die Möglichkeit zur Selbstkalibration gibt (z. B. Tachymeter: Bestimmung und Speicherung von Ziel- und Kippachsfehler oder Digitalnivellier: Bestimmung und Speicherung des Ziellinienfehlers) darf dies nicht darüber hinwegtäuschen, dass der Anwender eine »blackbox« mit Werkskalibrierung nutzt. Er kann bestenfalls Abweichungen von Sollgrößen feststellen. Ein tiefer Eingriff in das Messsystem Laserscanner ist nicht möglich.

Die Autoren halten auch die Forderung nach Offenlegung der Kalibriermodelle und ihrer Parameter für wenig zielführend. Viel wichtiger ist es, einheitliche und geräteunabhängige Prüfverfahren zu entwickeln, die, ausgehend von den Rohdaten (xyz-Koordinaten) geeigneter Messobjekte, Rückschlüsse auf die geometrische Qualität der Punktwolken zulassen.

## 6 Ausblick

Der Anwender braucht dringend Regeln und Verfahren zur Prüfung seines Messsystems. Der Aufwand sollte da-



für wirtschaftlich vertretbar sein, d.h. erste Ergebnisse liegen nach einer Stunde Prüfarbeit vor.

Die Instrumentenhersteller haben diese Aufgabe bisher völlig ignoriert, denn es wurden bislang weder Prüfverfahren empfohlen, noch wurden die Anwender für die Thematik der »Messabweichungen« sensibilisiert.

Institutionen wie DIN, ISO und NIST sind gefordert, zusammen mit der ganzen Gemeinschaft, d.h. Herstellern, Anwendern sowie Hochschul- und Forschungseinrichtungen, standardisierte Feldprüfverfahren für den Nutzer und Richtlinien zur Spezifikation der geometrischen Leistungsfähigkeit für Hersteller bereitzustellen.

### Literatur

- Böhler, W., Marbs, A.: Vergleichende Untersuchungen zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Scanner. In: Luhmann T. (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, S. 82–89, Wichmann-Verlag, 2004.
- Gottwald, R.: Routine-Feldprüfverfahren für geodätische Sensoren – Grundsätzliche Überlegungen und Strategien. In: Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik. DVW-Schriftenreihe 42/2001, pp.179–188. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 2001.
- Gottwald, R., Hugelshofer, D., Weibel, R.: ISO 17123 – Trimble S6 auf dem Prüfstand. Allgemeine Vermessungsnachrichten 04/2006, S. 135–141, 2006.
- Gottwald, R.: Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS) – A contribution to a future ISO standard. FIG Working Week 2008. Stockholm, Sweden 14–19 June 2008. [www.fig.net/pub/fig2008/papers/ts02d/ts02d\\_02\\_gottwald\\_2740.pdf](http://www.fig.net/pub/fig2008/papers/ts02d/ts02d_02_gottwald_2740.pdf)
- Heister, H.: Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). In: Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006). Schriftenreihe des DVW, Band 51, Wißner-Verlag, Augsburg 2006, S. 15–34.
- Huep, W.: Normen zur Überprüfung der Genauigkeit geodätischer Instrumente – Stand und Ausblick. In: Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik. DVW-Schriftenreihe 42/2001, pp. 152–178. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 2001.
- International Organization for Standardization (2001–2007): ISO 17123 Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 1–8.
- Kern, F.: Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern. In: Luhmann/Müller, Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008.
- Kersten, T., Sternberg, H., Mechelke, K.: Investigations into the Accuracy Behavior of the Laser Scanning System Mensi GS100. In: Gruen/Kahmen, Optical Measurement Techniques VII, Vol. 1, pp. 122–131, 2005.

- Müller, D., Würsch, M.: Cyrax 2500 Laserscanner – Feldprüfverfahren und Verifizierung. Diploma-Thesis, Fachhochschule bei der Basel, Muttentz, unpublished, 2001.
- Rothweiler, M., Schmid, L.: Grundlagen für eine ISO-Prüfnorm für Terrestrische Laserscanner (TLS). Diploma-Thesis, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttentz, unpublished, 2007.
- Reshetyuk, Y.: Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. Licentiate thesis in Geodesy, Royal Institute of Technology (KHT), Stockholm, 2006.
- Staiger, R., Ettl, M.: Untersuchungen des Laser-Scanner Imager 5003 von Zoller & Fröhlich. DGPF-Jahrestagung, Bochum, 2003.
- Staiger, R. (2005a): The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS). FIG Working Week 2005, Cairo, TS 38, [www.fig.net/pub/cairo/papers/ts\\_38/ts38\\_05\\_staiger.pdf](http://www.fig.net/pub/cairo/papers/ts_38/ts38_05_staiger.pdf)
- Staiger, R. (2005b): Terrestrisches Laserscanning – eine neue Universal-messmethode? In: Terrestrisches Laserscanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft. Schriftenreihe des DVW, Band 48, Wißner-Verlag, Augsburg 2005, S. 3–15.
- VDI/VDE 2634, Blatt 2: Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung. Beuth-Verlag, Berlin, 2002.

### Anschrift der Autoren

Reinhard Gottwald  
 Fachhochschule Nordwestschweiz  
 Gründenstrasse 40, 4132 Muttentz, Schweiz  
[reinhard.gottwald@fhnw.ch](mailto:reinhard.gottwald@fhnw.ch)

Hansbert Heister  
 Institut für Geodäsie, UniBw München  
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85 579 Neubiberg  
[h.heister@unibw.de](mailto:h.heister@unibw.de)

Rudolf Staiger  
 Hochschule Bochum  
 Lennershofstraße 140, 44801 Bochum  
[rudolf.staiger@hs-bochum.de](mailto:rudolf.staiger@hs-bochum.de)