
Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)

- Fachautoren:** Frank Neitzel, TU Berlin
Bianca Gordon, Leica Geosystems AG
Daniel Wujanz, TU Berlin
- Weitere Beteiligte:** DVW Arbeitskreis 3
DVW Arbeitskreis 4
Arbeitsgruppe Terrestrisches Laser Scanning – TLS
Gesellschaft zur Kalibrierung geodätischer Messmittel e. V
Technical Committee ISO/TC 172/SC 6
- Beschlussfassung:** Beschlossen vom DVW Arbeitskreis 3 am 25.03.2014
Verabschiedet vom Präsidium des DVW am 16.05.2014

Dokumentenstatus:
verabschiedet

1 Zielsetzung

Ziel dieses Merkblatts ist, eine praxisgerechte und objektive Methode zur Überprüfung von terrestrischen Laserscannern vorzustellen. Damit werden Maßnahmen für die Qualitätssicherung in dieser Instrumentenkategorie eingeführt, die für alle Bauarten anwendbar sind und so einen großen Schritt in Richtung der klassisch-geodätischen Überprüfung von Vermessungsgeräten beschreiben.

Terrestrische Laserscanner (TLS) sind flächenhaft messende Instrumente für die Erfassung von dreidimensionalen Objekten. Aus den originären Messgrößen werden die kartesischen Koordinaten X , Y , und Z im Instrumentensystem berechnet, zudem wird die sogenannte Intensität für jeden gemessenen Punkt angegeben. Diese beschreibt einen Quotienten zwischen ausgesandter und rückgestrahlter Energie des Laserstrahls und dient hauptsächlich zur Visualisierung der erfassten Daten, kann aber auch zur Segmentierung genutzt werden.

Es ist zu beachten, dass bei TLS, analog zu Tachymetern, systematische Abweichungen und grobe Fehler des elektrooptischen Distanzmessers sowie in der Achsmechanik vorliegen können.

Teilweise bieten die auf dem Markt befindlichen TLS-Systeme in ihrer Gerätesoftware inzwischen die Möglichkeit, Instrumentenabweichungen im Rahmen einer Überprüfungsmessung zu bestimmen und permanent im Gerät zu speichern. Die hierfür empfohlenen Messkonfigurationen sind den in diesem Merkblatt vorgestellten Messkonfigurationen teilweise sehr ähnlich. Bietet das TLS-System keine eigene Überprüfungsfunktion, empfiehlt sich die Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit nach dem im Folgenden vorgestellten Verfahren.

Ziel der Überprüfung ist folglich eine Feststellung über die Einhaltung definierter Anforderungen. Werden die Anforderungen nicht eingehalten, ist eine Kalibrierung des Gerätes durchzuführen. Da es für terrestrische Laserscanner noch kein standardisiertes Feldprüfverfahren wie z.B. die ISO-Norm 17123 für Tachymeter gibt, soll dieses Merkblatt eine Anleitung zur regelmäßigen Überprüfung geben. Überblicke über bisherige Arbeiten und Vorschläge zur Prüfung von TLS sind in (Gottwald et al. 2008) sowie (Staiger und Heister 2013) zu finden.

Die in diesem Merkblatt vorgestellten Methoden zur Überprüfung eines TLS legen ihr Hauptaugenmerk auf systematische Instrumentenabweichungen. Leistungsmerkmale, die sich z.B. auf das Rauschverhalten oder die Geometrietreue der erzeugten Laserscans beziehen, sind nicht Gegenstand dieses Merkblattes.

Was ist Sinn und Zweck der Prüfung?

Es soll festgestellt werden, ob der TLS festgelegte Kriterien oder im Datenblatt spezifizierte Angaben erfüllt. Es werden Messabweichungen festgestellt und mit den Herstellerangaben verglichen.

Wann empfiehlt sich die Durchführung der Prüfung?

- Nach längerer Nutzungspause,
- nach „ungewissem“ Transport, z.B. Flug oder Lieferung (Um unsachgemäßen Transport zu ermitteln, empfehlen sich Belastungsindikatoren, die in der Transportkiste des Scanners angebracht werden können),
- vor umfangreichen Messungen,
- vor Messungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen.

Welche Anforderungen sind an ein Feldprüfverfahren zu stellen?

- Das komplette Prüfverfahren mit Messung und Datenauswertung soll maximal ½ Arbeitstag dauern.
- Das Prüfverfahren soll unabhängig vom Funktionsprinzip des TLS-Systems sein.
- Das Prüfverfahren soll mit der Standardausrüstung und -software durchführbar sein.

Was ist das Ziel des Prüfverfahrens?

- Das Vorliegen systematischer Messabweichungen soll möglichst zuverlässig erkannt werden.
- Das Prüfverfahren liefert eine Ja/Nein-Aussage bezüglich der Gebrauchstauglichkeit des TLS.

Was ist zu tun, wenn das Prüfverfahren die Gebrauchsunfähigkeit des TLS anzeigt?

- Es ist eine Kalibrierung und/oder Justierung des Instruments erforderlich.
- Falls das Instrument eine Überprüfungsfunktion in der Gerätesoftware anbietet, empfiehlt es sich, diese instrumenteneigene Überprüfung durchzuführen und ggf. die daraus ermittelten Kalibrierwerte im Gerät zu speichern.
- Kalibrierung und Justierung werden vom jeweiligen Hersteller vorgenommen.

2 Feldprüfverfahren

2.1 Einführung

Das im Folgenden vorgestellte Prüfverfahren zur Aufdeckung systematischer Abweichungen erhebt den Anspruch, reproduzierbar und mittels der Standardausrüstung eines TLS in maximal einem halben Arbeitstag durchführbar zu sein, so dass die Bedingungen für eine regelmäßige Durchführung gegeben sind.

Mit dem Prüfverfahren sollen Messabweichungen ohne Zuhilfenahme von Soll- oder Referenzwerten abgeleitet werden können, die dann mit einer Genauigkeitsvorgabe (z.B. für ein Projekt) oder der Herstellerangabe verglichen werden können. Anhand des Vergleichs lässt sich ableiten, ob das Instrument den Genauigkeitsvorgaben entspricht und sich somit für die Durchführung eines Projektes eignet oder ob sich eine Kalibrierung durch den Hersteller empfiehlt.

Innerhalb des TLS-Prüfverfahrens können potentielle konstante Distanzabweichungen sowie Abweichungen in der Achsgeometrie oder der Richtungs- und Winkelmessung aufgedeckt werden. Es werden keine Sollwerte oder Messungen mit Instrumenten übergeordneter Genauigkeit benötigt. Zur Prüfung werden lediglich Messungen des zu prüfenden TLS herangezogen. Als Hilfsmittel werden die vom Hersteller empfohlenen Zielmarken verwendet. Anmerkungen zur Bestimmung des Instrumentenmaßstabes werden in einem gesonderten Abschnitt gegeben.

2.2 Messsystem

Ein TLS kann als Realisierung eines lokalen Koordinatensystems (Instrumentensystem) angesehen werden, dessen Orientierung im Raum grundsätzlich beliebig ist, siehe hierzu Stahlberg (1997). Aufgrund mechanischer Unzulänglichkeiten kann die Realisierung des abstrakten Instrumentensystems jedoch nie perfekt gelingen. Eine Vielzahl dieser Unzulänglichkeiten, die allesamt die Richtungs- und Winkelmessung beeinflussen (z.B. Ziel- und Kippachsenabweichungen), ist in Deumlich und Staiger (2002, S. 205 ff.) aufgeführt. Ebenso sind dort Erläuterungen zu Abweichungen bei der Streckenmessung (z.B. Additionskonstante und Instrumentenmaßstab) zu finden.

Da sich Instrumentenabweichungen auf das Instrumentensystem beziehen, ist deren Untersuchung und Bestimmung grundsätzlich unabhängig von einer lotrechten Ausrichtung der Drehachse des Instruments. Aus diesem Grund werden für die Richtungen α und die Winkel ζ in Abb. 1 die Bezeichnungen Drehkreisrichtungen und Kippwinkel verwendet, die sich nur auf das Instrument beziehen.

Folgend wird ein Verfahren vorgestellt, das Untersuchungen bezüglich etwaiger systematischer Abweichungen in den Distanzmessungen ermöglicht. Des Weiteren lässt sich der Gesamteinfluss von systematischen Abweichungen aus der Richtungs- und Winkelmessung untersuchen. Da es sich bei dem Prüfverfahren nicht um eine Komponentenuntersuchung einzelner Bauteile oder Baugruppen handelt, ist die Bestimmung einzelner Einflussgrößen (z.B. von Ziel- und Kippachsenabweichung) nicht möglich.

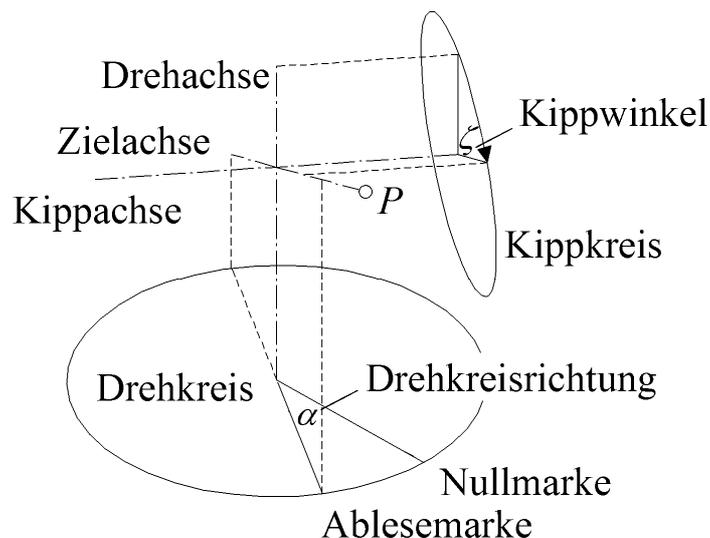


Abb. 1: Realisierung des Instrumentensystems (nach Stahlberg 1997)

2.3 Messaufbau

Der im Folgenden beschriebene Messaufbau lehnt sich an Heister (2009) an. Insgesamt vier Zielmarken, auch Targets genannt, sind in einem horizontalen und einem vertikalen Dreieck anzuordnen. Beide Dreiecke teilen sich jeweils eine Dreieckseite. Innerhalb der gemeinsamen Dreieckseite sind sowohl die beiden Standpunkte S_1 und S_2 als auch die beiden Zielmarken T_1 bzw. T_2 in einer Geraden anzuordnen. Dies ist insbesondere für die Bestimmung einer systematischen Distanzmessabweichung erforderlich. Der Messaufbau ist in Abb. 2 dargestellt. Die Dimensionen der Dreiecke sowie der Abstand zwischen den beiden Instrumentenstandpunkten werden wesentlich von der Reichweite des zu überprüfenden TLS sowie der vom Hersteller zur Erfassung der Zielmarken maximal empfohlenen Entfernung bestimmt. Folgende Empfehlungen sind beim Messaufbau zu berücksichtigen:

- Die beiden Standpunkte S_1 und S_2 sowie die beiden Zielmarken T_1 und T_2 sind in einer Raumgeraden aufzustellen.
- Sowohl das horizontale Dreieck als auch das vertikale Dreieck sind als rechtwinklige Dreiecke zu realisieren (mit einem rechten Winkel jeweils bei Zielmarke T_2).
- Die Hypotenuse des horizontalen Dreiecks $\overline{S_1T_3}$ soll der maximal empfohlenen Entfernung zur Erfassung von Zielmarken entsprechen. Diese wird im Folgenden Maximalstrecke (MS) genannt.
- Die Strecke $\overline{T_2T_4}$ des vertikalen Dreiecks soll so lang gewählt werden, wie es die örtlichen Verhältnisse erlauben. Sie sollte jedoch möglichst mindestens ein Drittel der Maximalstrecke aufweisen. Zudem sollte die Zielmarke T_4 vom Standpunkt S_2 unter einer steilen Visur beobachtet werden. Als Maximalwert für den Kippwinkel, unter dem T_4 von S_2 beobachtet werden sollte, wird 30 gon empfohlen.
- Das anzustrebende Verhältnis der Katheten im vertikalen Dreieck ist 1:1. Wenn möglich soll ein Verhältnis von 2:1 nicht überschritten werden, jedoch nur, wenn es die Örtlichkeit erlaubt, T_4 in ausreichender Höhe zu platzieren.

Nach der Einrichtung des Testfeldes werden die Zielmarken T_1 bis T_4 mindestens dreimal vom Standpunkt S_1 sowie vom Standpunkt S_2 gescannt.

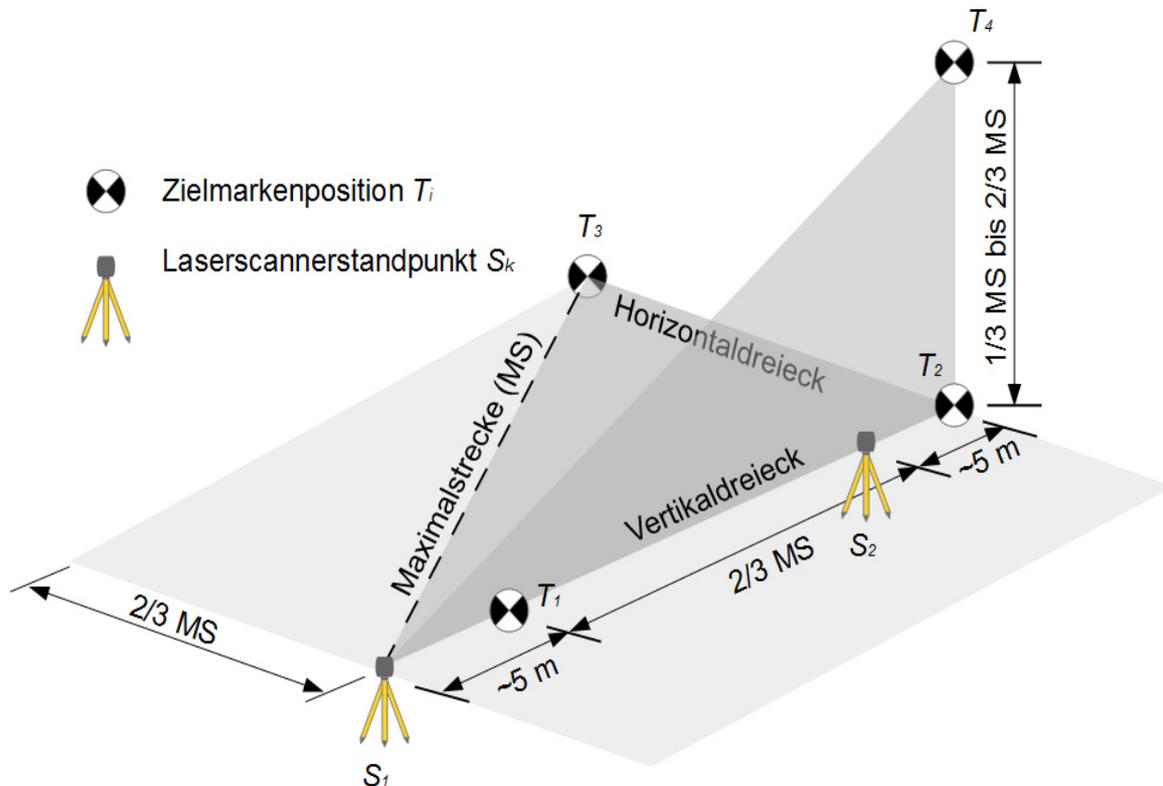


Abb. 2: Messaufbau des TLS-Prüfverfahrens (nach Heister 2009)

2.4 Streckenberechnung

Nach Abschluss der Messungen liegen von den Zielmarken Punktwolken in Form von dreidimensionalen kartesischen Koordinaten vor, aus denen die Mittelpunktkoordinaten z.B. von Kugeln oder Schachbrett-Targets zu bestimmen sind. Für diesen Arbeitsschritt wird empfohlen, die jeweilige Auswertesoftware des Herstellers zu verwenden. Es ist sicherzustellen, dass Störpixel vor der Bestimmung der Zielmarkenmittelpunkte eliminiert werden.

Nach diesem Arbeitsschritt liegen für die Mittelpunkte der Zielmarken T_1 bis T_4 dreidimensionale kartesische Koordinaten vor. Da die Mittelpunktkoordinaten mindestens dreimal bestimmt wurden, können diese auf das Vorhandensein von Ausreißern überprüft werden. Liegen keine Ausreißer vor, kann für jede Zielmarke ein Mittelwert für die Mittelpunktkoordinaten berechnet werden. Unter Verwendung der gemittelten Koordinaten können aus

$$\overline{T_i T_j} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (1)$$

die Strecken $\overline{T_1 T_2}$, $\overline{T_1 T_4}$ und $\overline{T_3 T_4}$ sowohl aus den Messungen auf Instrumentenstandpunkt S_1 sowie aus denen auf Instrumentenstandpunkt S_2 berechnet werden. Anhand der von Standpunkt S_1 bestimmten Strecken $\overline{T_i T_j}(S_1)$ und den von Standpunkt S_2 bestimmten Strecken $\overline{T_i T_j}(S_2)$ können die Differenzen

$$\Delta_{i,j} = \overline{T_i T_j}(S_1) - \overline{T_i T_j}(S_2) \quad (2)$$

berechnet werden. Anhand dieser Differenzen kann auf das Vorhandensein systematischer Messabweichungen geschlossen werden, wenn diese signifikant von null verschieden sind. Für diese Beurteilung ist eine quantitative Abschätzung der Messunsicherheit erforderlich.

2.5 Messunsicherheit

2.5.1 Messunsicherheit u_T der Zielmarkenzentren

Zur Beurteilung der Signifikanz der Streckendifferenzen aus (2) ist es unerlässlich, eine sinnvolle Annahme über die Unsicherheit u_T zu treffen, mit der die Zielmarkenzentren mittels des TLS sowie der Auswertesoftware bestimmt werden können. Einfache Varianten, u_T zu bestimmen bzw. festzulegen, sind:

- Verwendung einer vorhandenen Herstellerangabe für die Bestimmung der Zielmarkenzentren.
- Ermittlung der Standardabweichung der Zielmarkenzentrumskoordinaten aus Mehrfachmessungen von Zielmarken in unterschiedlichen Zielweiten, die in ihrer Größenordnung den Zielweiten im Testfeld entsprechen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die resultierende Standardabweichung nur die innere Genauigkeit widerspiegelt und damit eventuell als zu optimistisch anzusehen ist.

Um jedoch eine möglichst realistische Annahme der Unsicherheit u_T der Zielmarkenzentren zu treffen, sollten so viele unabhängige Einflussfaktoren wie möglich in das Unsicherheitsmaß einfließen. Eine Möglichkeit, mehrere unabhängige Einflussfaktoren zu einer Gesamtunsicherheit zusammenzufassen, bietet der „Leitfaden

zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ (GUM 2008), dessen Anwendung auch in ISO 17123-4 (2012) empfohlen wird.

Im Leitfaden wird zwischen Unsicherheitsgrößen vom Typ A (aus statistischer Auswertung) und Typ B (Komponenten, die auf andere Weise ermittelt wurden) unterschieden. Angaben, die das Rauschverhalten einer Messgröße beschreiben, werden als Unsicherheitsgrößen vom Typ A angesehen (z.B. Standardabweichungen aus Mehrfachmessungen). Weitere Einflüsse werden als Typ B klassifiziert. Unsicherheiten unterschiedlichen Typs können nach dem Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz für unkorrelierte Größen zu einer kombinierten Messunsicherheit

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3)$$

zusammengefasst werden, siehe z.B. Niemeier (2008, S. 72 ff.).

Im Fall einer Unsicherheitsgröße u_T der Zielmarkenzentren können z.B. herangezogen werden:

- **Unsicherheitsgrößen aus statistischer Auswertung (Typ A):**

Eine Unsicherheitsgröße zur Zielmarkengenauigkeit kann in Form einer Standardabweichung aus Mehrfachmessungen von Zielmarken ermittelt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Genauigkeit der Zielmarkenerfassung von der Entfernung zur Zielmarke abhängig sein kann.

- **Herstellerangaben (Typ B):**

Im Datenblatt einiger Hersteller ist eine 3D-Genauigkeit zur Erfassung der empfohlenen Zielmarken zu finden, die direkt als Unsicherheitsgröße vom Typ A in ein Unsicherheitsmass u_T der Zielmarkenzentren einfließen kann. Alternativ kann die 3D-Genauigkeit der Zielmarkenerfassung jedoch auch aus den Angaben zur Winkel- und Streckengenauigkeit abgeleitet werden, wenn zusätzlich die verwendete Punktzahl zur Zielmarkenerfassung und die Modelliergenauigkeit des Zielmarkenzentrums einbezogen wird. Einige Hersteller geben sowohl systematische Messgenauigkeiten als auch ein Messrauschen in Abhängigkeit von Entfernung und Reflektivität an. Diese Angaben können ebenso Berücksichtigung finden.

- **Eigene Erfahrungswerte (Typ B):**

Einflussfaktoren, die aus eigener Erfahrung die Unsicherheit der Zielmarkenzentren beeinflussen, können ebenfalls berücksichtigt werden.

In ISO 17123-4 (2012) wird am Beispiel der elektrooptischen Distanzmessung die Ableitung einer kombinierten Messunsicherheit aufgezeigt.

2.5.2 Unsicherheit U_{Δ} der Streckendifferenzen als Vergleichsgröße

Liegt die Unsicherheitsgröße u_T der Zielmarkenzentren vor, ist die Vergleichsgröße U_{Δ} zur Beurteilung der ermittelten Streckendifferenzen in (2) abzuleiten. Mit u_T ergibt sich zunächst nach dem Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz die Unsicherheit u_S der errechneten Strecken zu

$$u_S = u_T \cdot \sqrt{2} \quad . \quad (4)$$

Mit u_S kann erneut anhand des Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes die Unsicherheit u_{Δ} der Streckendifferenzen

$$u_{\Delta} = u_S \cdot \sqrt{2} = 2 \cdot u_T \quad (5)$$

errechnet werden. Die erweiterte Messunsicherheit

$$U_{\Delta} = k \cdot u_{\Delta} \quad (6)$$

kennzeichnet einen Bereich, der einen Großteil der Messungen beinhaltet, die für die Messwerte als wahrscheinlich erscheinen. Häufig wird $k = 2$ gewählt, was im Falle einer im Ansatz gültigen Normalverteilung einem Vertrauensintervall von 95% entspricht, siehe Niemeier (2008, S. 74).

Für die Betrachtung von Streckendifferenzen ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit mit $k = 2$ zu

$$U_{\Delta} = k \cdot u_{\Delta} = k \cdot 2 \cdot u_T = 4 \cdot u_T \quad . \quad (7)$$

Die Unsicherheit U_{Δ} wird im Folgenden als Vergleichsgröße zur Beurteilung der Streckendifferenzen verwendet.

2.6 Untersuchung der Distanzmessung

Zur Untersuchung einer konstanten Distanzabweichung wird die Strecke $\overline{T_1T_2}$ betrachtet. Auf diese Strecke wirkt sich eine unberücksichtigte konstante Distanzabweichung unter Verwendung der Messungen auf Standpunkt S_1 nicht aus, während unter Verwendung der Messungen von Standpunkt S_2 ihr doppelter Einfluss wirkt, siehe hierzu Abb. 2. Bildet man in Analogie zur „Teilstreckenmethode“ in Deumlich und Staiger (2002, S. 166 ff.) die Differenz

$$\Delta_{1,2} = \overline{T_1T_2}(S_1) - \overline{T_1T_2}(S_2), \quad (8)$$

erhält man den zweifachen Wert einer konstanten Distanzabweichung. Der Wert $\Delta_{1,2}$ ist nun der erweiterten Messunsicherheit aus (7) gegenüberzustellen. Im Fall von

$$|\Delta_{1,2}| > U_{\Delta} \quad (9)$$

ist von einer systematischen Abweichung der Distanzmessung auszugehen. In diesem Fall empfiehlt sich eine Kalibrierung durch den Hersteller oder, falls es der TLS erlaubt, eine Eingabe und Speicherung der ermittelten Abweichung als Korrekturwert im Gerät sowie eine anschließende Kontrollmessung. Von einer Betrachtung weiterer Abweichungen ist abzusehen, da diese vom Einfluss der systematischen Distanzabweichung überlagert werden. Ist

$$|\Delta_{1,2}| \leq U_{\Delta}, \quad (10)$$

kann keine systematische Abweichung der Distanzmessung festgestellt werden und es ist nunmehr sinnvoll, den Einfluss von systematischen Abweichungen in der Richtungs- und Winkelmessung zu untersuchen.

2.7 Anmerkungen zur Maßstabsproblematik

Anzumerken ist, dass das beschriebene Testfeld keine Untersuchung des Instrumentenmaßstabs ermöglicht, da dafür Sollwerte für die Zielmarkenabstände erforderlich sind. Sind diese Sollwerte z.B. aus unabhängigen Messungen mit übergeordneter Genauigkeit bekannt, kann der Instrumentenmaßstab bestimmt werden. Messunsicherheiten wie z.B. Zentrierabweichungen oder unzureichende Berücksichtigung der meteorologischen Verhältnisse sind dabei unbedingt zu vermeiden, da diese sonst als Maßstabskorrektur fehlinterpretiert werden. So verursacht z.B. ein Zentrierabweichungen von 1 mm auf einer 80 m langen Strecke einen Wert von 12,5 ppm für eine

vermeintliche Maßstabskorrektur. Ratsamer ist es daher, den Instrumentenmaßstab mit Hilfe eines fest installierten Prüffeldes zu bestimmen, in dem die Sollstrecken aus tachymetrischer Netzmessung bestimmt wurden, siehe hierzu Feldmann et al. (2011) sowie Staiger und Heister (2013).

2.8 Untersuchung der Richtungs- und Winkelmessung

Zur Untersuchung der Richtungs- und Winkelmessung ist zunächst anzumerken, dass sich Abweichungen im Achssystem von ihrer Sollgeometrie (Ziel- und Kippachsenabweichung) in Abhängigkeit von der Steilheit der Visur auf die Drehkreisrichtung auswirken, siehe hierzu Stahlberg (1997) sowie Deumlich und Staiger (2002, S. 207 ff.). Um Abweichungen festzustellen, ist es daher unerlässlich, in die folgenden Untersuchungen das Hochziel T_4 einzubeziehen. Aus diesem Grund werden die Streckenkombinationen $\overline{T_1T_4}$ sowie $\overline{T_3T_4}$ betrachtet. Unter Verwendung von (2) ergeben sich die Differenzen für diese Strecken zu

$$\Delta_{1,4} = \overline{T_1T_4}(S_1) - \overline{T_1T_4}(S_2), \quad (11)$$

$$\Delta_{3,4} = \overline{T_3T_4}(S_1) - \overline{T_3T_4}(S_2). \quad (12)$$

Die Betrachtung beider Streckendifferenzen ist darin begründet, dass je nach Betrag und Vorzeichen einer systematischen Abweichung sowohl der Drehkreisrichtung als auch des Kippwinkels sich die Einflüsse entweder in $\Delta_{1,4}$ oder $\Delta_{3,4}$ oder in beiden Werten zeigen. Die berechneten Differenzen aus (11) und (12) sind der erweiterten Messunsicherheit aus (7) gegenüberzustellen. Im Falle von

$$|\Delta_{1,4}| > U_\Delta \quad \text{oder} \quad |\Delta_{3,4}| > U_\Delta \quad (13)$$

ist von einer signifikanten systematischen Abweichung entweder der Drehkreisrichtung oder des Kippwinkels oder einer Abweichung von beiden auszugehen. In diesem Fall empfiehlt sich eine Kalibrierung durch den Hersteller.

Im vorgestellten Überprüfungsverfahren ist eine Berechnung der Einzeleinflüsse und deren Berücksichtigung durch den Anwender nicht möglich, da sich z.B. Einflüsse der Achsabweichungen in den untersuchten Streckendifferenzen überlagern oder teilweise kompensieren können. Anzumerken ist, dass die Instrumentenabweichungen zwar zu einer systematischen Abweichung der dreidimensionalen Koordinaten der betrachteten Punkte führen. Da jedoch die Untersuchungen auf Raumstrecken



und somit auf relativen Größen basieren, kann dieser Umstand nicht ausgenutzt werden, um eine differenziertere Betrachtung der einzelnen Abweichungen vorzunehmen.

Falls es das zu prüfende TLS zulässt, wird eine Messung in zwei Lagen empfohlen. Anhand des direkten 2-Lagen-Vergleichs der Zielmarkenmittelpunkte kann, wie bei der Überprüfung eines Tachymeters, direkt auf Achsabweichungen geschlossen werden. In Neitzel (2006) wird gezeigt, wie sich Achsabweichungen aus einer überbestimmten Konfiguration mit Hilfe der Ausgleichsrechnung bestimmen lassen. Steht die Möglichkeit einer 2-Lagen-Messung nicht zur Verfügung, empfiehlt sich das in Rietdorf (2005, S. 67 ff.) beschriebene Verfahren, das jedoch den Rahmen eines praxisnahen Feldverfahrens sprengt.

Eine schematische Übersicht über das hier vorgestellte TLS-Prüfverfahren zeigt Abb. 3 in Form eines Flussdiagramms.

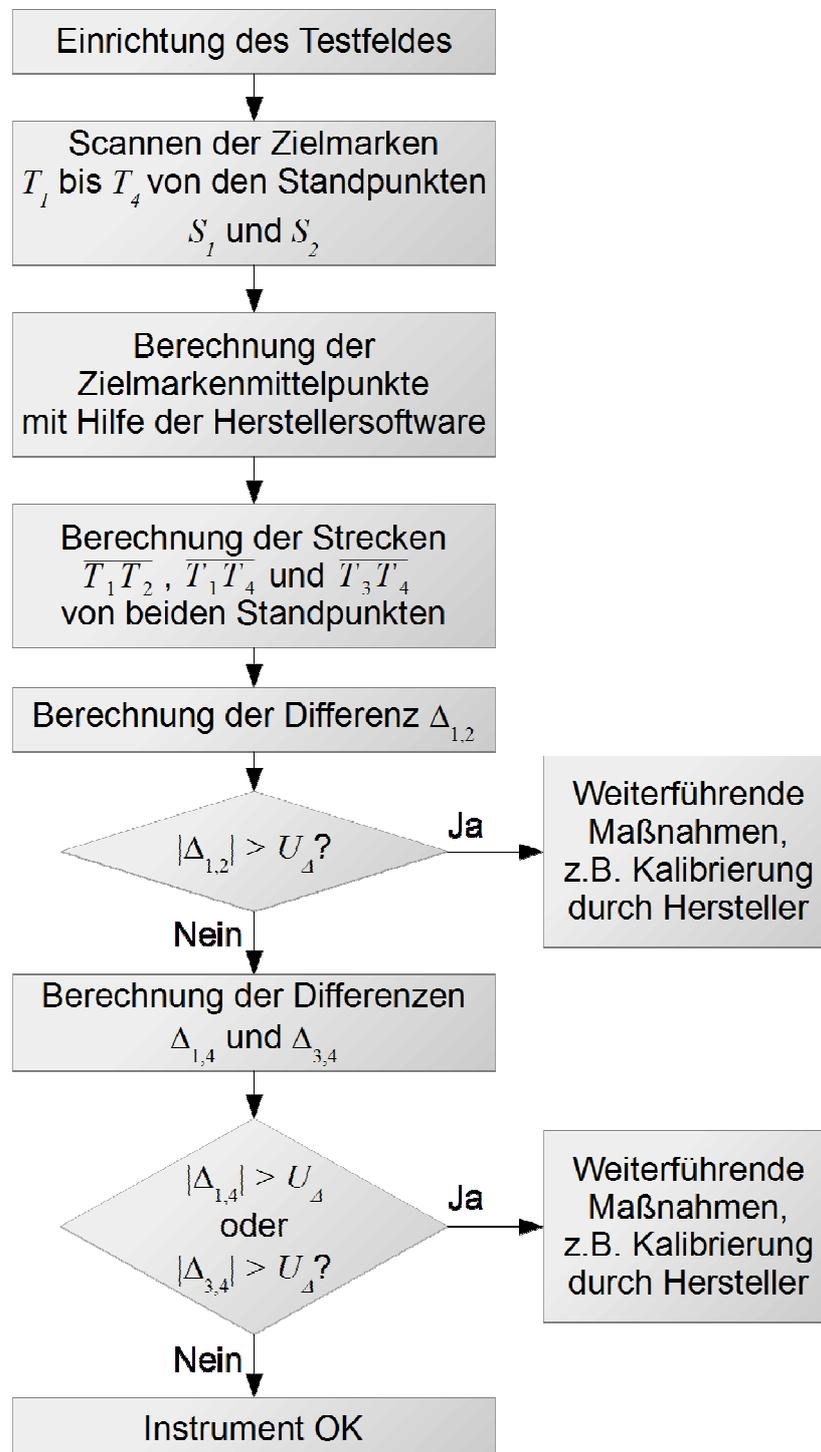


Abb. 3: Flussdiagramm des TLS-Prüfverfahrens

3 Berechnungsformular

Zur vereinfachten Berechnung des Überprüfungsergebnisses liegt ein automatisiertes Berechnungsformular (im XLS-Format) vor. In diesem Berechnungsformular sind folgende Daten als Eingabewerte einzutragen:

- Die in (3) bestimmte Messunsicherheit u_T der Zielmarkenzentren (Abschnitt I).
- Die kartesischen Koordinaten der Zielmarkenmittelpunkte T_1 bis T_4 , beobachtet auf Standpunkt S_1 . Es sollte mindestens eine Dreifachmessung vorliegen (Abschnitt II, erste Tabelle).
- Die kartesischen Koordinaten der Zielmarkenmittelpunkte T_1 bis T_4 , beobachtet auf Standpunkt S_2 . Es sollte mindestens eine Dreifachmessung vorliegen (Abschnitt II, zweite Tabelle).

Im Berechnungsformular werden anhand dieser Eingabewerte die Strecken, Streckendifferenzen sowie eine gegebenenfalls vorliegende konstante Distanzmessabweichung automatisch bestimmt (Abschnitte III und IV). Das Resultat der Überprüfung wird schließlich in Form einer Ampel angezeigt (Abschnitt V). Abb. 4 und Abb. 5 zeigen jeweils anhand des Berechnungsformulars ein Rechenbeispiel zur TLS-Überprüfung.

Im ersten Beispiel (Abb. 4) konnte durch die Streckendifferenz $\Delta_{1,2}$ eine Systematik in der Distanzmessung aufgedeckt werden.

Die Daten des zweiten Beispiels (Abb. 5) enthalten winkelförmige Systematiken, die durch Betrachtung der Streckendifferenzen $\Delta_{1,4}$ und $\Delta_{3,4}$ aufgedeckt werden.



DVW - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V.

Berechnungsformular zum DVW-Merkblatt "Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern"

Datum der Messung: 01. Mrz 14
 Bemerkungen: Beispieldaten einer TLS-Überprüfung mit Aufdeckung einer Abweichung in der Additionskonstanten von 5 mm.

Beobachter: M. Mustermann
 Instrument: Laserscanner xy
 Zielzeichen-Typ: Schachbrett
 Auswertesoftware: Software xy

I. Definition der Testgröße

Messunsicherheit der Zielmarkenzentren (z.B. aus Herstellerangaben):
 u_1 : 1.0 mm

→ Vergleichsgröße U_Δ : 4.0 mm

II. Koordinaten der Zielmarkenmittelpunkte

Standpunkt S	Zielmarke T ₁			Zielmarke T ₂			Zielmarke T ₃			Zielmarke T ₄		
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
	0.9628	4.9011	-0.0992	8.6170	43.8799	0.0547	-30.6282	51.5898	0.1001	8.6147	43.8775	19.9997
	0.9627	4.9017	-0.0999	8.6183	43.8776	0.0522	-30.6278	51.5872	0.0924	8.6138	43.8798	19.9959
0.9628	4.9030	-0.0998	8.6187	43.8780	0.0532	-30.6293	51.5896	0.0988	8.6145	43.8769	19.9993	
gemittelte Koordinaten:	0.9628	4.9019	-0.0996	8.6180	43.8785	0.0534	-30.6284	51.5889	0.0971	8.6143	43.8781	19.9983

Standpunkt S	Zielmarke T ₁			Zielmarke T ₂			Zielmarke T ₃			Zielmarke T ₄		
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
	17.8850	29.7548	-0.0350	-2.5737	-4.2808	0.0978	31.7015	-24.8923	0.1275	-2.5718	-4.2989	20.0443
	17.8869	29.7561	-0.0323	-2.5733	-4.2807	0.0978	31.7044	-24.8887	0.1296	-2.5706	-4.2968	20.0436
17.8851	29.7554	-0.0351	-2.5732	-4.2807	0.0981	31.7044	-24.8887	0.1274	-2.5718	-4.2985	20.0439	
gemittelte Koordinaten:	17.8857	29.7554	-0.0341	-2.5734	-4.2807	0.0979	31.7034	-24.8899	0.1282	-2.5714	-4.2981	20.0439

III. Strecken zwischen den Zielmarken

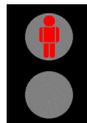
Standpunkt S ₁	Strecke von... nach... [m]	Zielmarke T ₁	Zielmarke T ₂	Zielmarke T ₃
	Zielmarke T ₂	39.7215		
	Zielmarke T ₃	56.3712	39.9967	
	Zielmarke T ₄	44.5153	19.9449	44.6711

Standpunkt S ₂	Strecke von... nach... [m]	Zielmarke T ₁	Zielmarke T ₂	Zielmarke T ₃
	Zielmarke T ₂	39.7121		
	Zielmarke T ₃	56.3655	39.9955	
	Zielmarke T ₄	44.5114	19.9460	44.6702

IV. Streckendifferenzen

Streckendifferenz Δ_{ij} [mm]	Zielmarke T ₁	Zielmarke T ₂	Zielmarke T ₃
Zielmarke T ₂	9.4		
Zielmarke T ₃	5.7	1.2	
Zielmarke T ₄	3.9	-1.1	0.9

V. Ergebnis



Konstante, systemat. Distanzmessabw.: 4.7 mm

Signifikante Distanzabweichung!
 Keine weitere Analyse bzgl. winkelförmiger Abweichungen!

Abb. 4: Rechenbeispiel: Aufdeckung einer Systematik in der Distanzmessung



DVW - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V.

Berechnungsformular zum DVW-Merkblatt "Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern"

Datum der Messung: 01. Mrz 14
 Bemerkungen: Beispieldaten einer TLS-Überprüfung mit Aufdeckung einer Abweichung in Ziel- u. Kippachse von jeweils 30 mgon.

Beobachter: M. Mustermann
 Instrument: Laserscanner xy
 Zielzeichen-Typ: Schachbrett
 Auswertesoftware: Software xy

I. Definition der Testgröße

Messunsicherheit der Zielmarkenzentren (z.B. aus Herstellerangaben):
 u_1 : 1.0 mm

→ Vergleichsgröße U_{Δ} : 4.0 mm

II. Koordinaten der Zielzeichenmittelpunkte

Standpunkt S	Zielmarke T ₁			Zielmarke T ₂			Zielmarke T ₃			Zielmarke T ₄		
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
	0.9615	4.9065	-0.1001	8.5989	43.8860	0.0519	-30.6552	51.5766	0.0937	8.5705	43.8910	40.0010
	0.9611	4.9057	-0.1000	8.5989	43.8850	0.0496	-30.6550	51.5794	0.0941	8.5695	43.8896	40.0024
	0.9614	4.9058	-0.0997	8.5958	43.8879	0.0522	-30.6566	51.5755	0.0994	8.5691	43.8917	40.0003
gemittelte Koordinaten:	0.9613	4.9060	-0.0999	8.5979	43.8863	0.0512	-30.6556	51.5772	0.0957	8.5697	43.8908	40.0012

Standpunkt S	Zielmarke T ₁			Zielmarke T ₂			Zielmarke T ₃			Zielmarke T ₄		
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
	17.8730	29.7671	-0.0336	-2.5748	-4.2876	0.0979	31.7187	-24.8803	0.1267	-2.5341	-4.3297	40.0465
	17.8727	29.7671	-0.0346	-2.5734	-4.2865	0.0977	31.7184	-24.8775	0.1255	-2.5347	-4.3306	40.0475
	17.8747	29.7649	-0.0311	-2.5736	-4.2861	0.0979	31.7153	-24.8801	0.1262	-2.5346	-4.3314	40.0476
gemittelte Koordinaten:	17.8735	29.7664	-0.0331	-2.5739	-4.2867	0.0978	31.7175	-24.8793	0.1261	-2.5345	-4.3306	40.0472

III. Strecken zwischen den Zielmarken

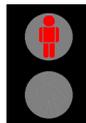
Standpunkt S ₁	Strecke von... nach... [m]	Zielmarke T ₁	Zielmarke T ₂	Zielmarke T ₃
		Zielmarke T ₂	39.7216	
	Zielmarke T ₃	56.3726	39.9998	
	Zielmarke T ₄	56.4429	39.9500	56.4814

Standpunkt S ₂	Strecke von... nach... [m]	Zielmarke T ₁	Zielmarke T ₂	Zielmarke T ₃
		Zielmarke T ₂	39.7206	
	Zielmarke T ₃	56.3723	39.9994	
	Zielmarke T ₄	56.4404	39.9494	56.4724

IV. Streckendifferenzen

Streckendifferenz Δ_{ij} [mm]	Zielmarke T ₁	Zielmarke T ₂	Zielmarke T ₃
Zielmarke T ₂	1.0		
Zielmarke T ₃	0.3	0.4	
Zielmarke T ₄	2.5	0.6	9.0

V. Ergebnis



Konstante, systemat. Distanzmessabw.: 0.5 mm

Signifikante Winkelabweichung!

Abb. 5: Rechenbeispiel: Aufdeckung einer winkelförmigen Systematik

Literatur

- Deumlich, F. und Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Feldmann, E., Petersen, M., Staiger, R. (2011): Erste Erfahrungen mit Feldprüfverfahren für terrestrische Laserscanner. In: Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge, Schriftenreihe des DVW, Band 66, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 77-96.
- Gottwald, R., Heister, H. und Staiger, R. (2008): Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern – eine Standortbestimmung. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008), Schriftenreihe des DVW, Band 54, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 91-110.
- GUM (2008): Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. JCGM 100:2008. GUM 1995 with minor corrections. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html> (letzter Zugriff am 08.05.2014).
- Heister, H. (2009): Terrestrisches Laserscanning – Prüfen und Kalibrieren. Vortrag, INTERGEO 2009, 22. September 2009, Karlsruhe, <http://cms5.hinte-e-services.com/share/public/Intergeo/Archiv/2009/Heister.pdf> (letzter Zugriff am 08.05.2014).
- ISO 17123-4 (2012): Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors), ISO 17123-4:2012, International Organization for Standardization.
- Neitzel, F. (2006): Untersuchung des Achssystems und des Taumelfehlers terrestrischer Laserscanner mit tachymetrischem Messprinzip. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2006), Schriftenreihe des DVW, Band 51, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 15-34.
- Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Rietdorf, A. (2005): Automatische Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 582, München.
- Stahlberg, C. (1997): Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung. ZfV 122, Nr. 5, S. 225-235.
- Staiger, R. und Heister, H. (2013): Praxisnahe Prüfung terrestrischer Laserscanner. In: Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren, Schriftenreihe des DVW, Band 71, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 65-88.