

Laserscanning – Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen

Thorsten SCHULZ, Hilmar INGENSAND

Zusammenfassung

Der folgende Beitrag beschäftigt sich mit dem Thema Laserscanning - Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen. Die Untersuchungen werden dabei auf das terrestrische Laserscanning beschränkt. Nach einer kurzen Einführung in die Thematik wird im Speziellen auf den Laserscanner Imager 5003 von Zoller+Fröhlich GmbH eingegangen. Geräteuntersuchungen bezüglich Taumelfehler und Distanzgenauigkeiten werden aufgezeigt. Weiterhin werden die Problematik Auftreffwinkel sowie Materialeigenschaften untersucht. Abschließend werden Laserscanning- Aufnahmen einer Kapelle und eines Tunnels dargestellt.

1 Terrestrisches Laserscanning

1.1 Allgemeines

Laserscanning hat sich als eine weitere geodätische Messtechnik etabliert. Der Vorteil gegenüber „traditionellen“ Messtechniken wie Tachymetrie und Satellitengeodäsie ist eine berührungslose Erfassung großflächiger und detailreicher Objekte mit geringen Aufnahmezeiten (z. T. wenige Minuten). Das Ergebnis sind Punktwolken mit einer hohen Punktdichte, die für jeden einzelnen Punkt 3D-Koordinaten sowie die Intensität des reflektierten Laserstrahls beinhalten. Damit hebt sich Laserscanning gegenüber der Photogrammetrie ab, die eine nachträgliche Erzeugung von Koordinaten aus den Bildern erfordert und mehr auf die Extraktion von Kanten ausgelegt ist.

Die Aufnahme der Objekte geschieht über einen Laserstrahl, der mittels bewegender Spiegel (oszillierende oder rotierende Spiegel) abgelenkt wird. Je nach Konstruktion des Laserscanners können Horizontalprofile, Vertikalprofile, einzelne Ausschnitte und/ oder 360 °-Scans aufgenommen werden. Die Reichweite der Laserscanner variiert dabei vom Nahbereich (einige Meter) bis in den mittleren Entfernungsbereich (mehrere hundert Meter). Als Distanzmessverfahren sind das Impulsmess- sowie Phasenvergleichsverfahren üblich, aber auch Interferometrie und optische Triangulation sind möglich. Erzielbare innere Genauigkeiten der Distanzmessung erstrecken sich, je nach verwendetem Distanzmessverfahren, von Submillimetern bis hin zu einigen Zentimetern.

Laserscanning bedeutet nicht nur die Aufnahme von Objekten mit einem Laserscanner, sondern auch die weitere Verarbeitung der Punktwolken mittels geeigneter Software. Dazu zählen die Aufbereitung der Messdaten sowie die Ableitung weiterer Informationen wie Modellierung von Objekten (Vektordaten) und Ableitung mathematischer Informationen (Volumen- und Massenberechnungen, Abstandsberechnungen etc).

1.2 Laserscanner Imager 5003 von Zoller+Fröhlich GmbH

Der Laserscanner Imager 5003 ist ein terrestrischer Laserscanner für Nahbereichsanwendungen mit Entfernungen bis zu 54 m. Die Distanzen werden mittels des Phasenvergleichsverfahrens bis auf wenige Millimeter aufgelöst. Eine Grobfrequenz dient zur Auflösung der Mehrdeutigkeiten (Wellenlängen $\lambda \sim 108$ m und $\lambda \sim 54$ m; je nach gewähltem Messbereich von bis zu 54 m oder bis zu 27 m). Über eine Feinfrequenz wird die Distanzmessung simultan verbessert (Wellenlängen $\lambda \sim 6.7$ m). Der Laserstrahl wird über einen Spiegel, der um eine horizontale Achse (Kippachse) rotiert, abgelenkt. Zusätzlich dreht der Scanner um eine Vertikalachse (Stehachse). Damit sind sowohl Vertikal- als auch Horizontalprofile, spezielle Ausschnitte und 360°-Scans möglich. Die hohe Datenerfassungsrate ermöglicht die Aufnahme von mehreren Millionen Punkten innerhalb weniger Minuten.

2 Geräte- Untersuchung

Im folgenden Kapitel werden einige Untersuchungen und Ergebnisse des Laserscanners Imager 5003 beschrieben. Im Einzelnen werden der Einfluss des Taumelfehlers, die Genauigkeit des Distanzmesssystems sowie der Einfluss des Auftreffwinkels und verschiedene Materialien untersucht. Weitere Untersuchungen und Ergänzungen sind zu finden in INGENSAND ET AL. 2003.

2.1 Taumelfehler

Die Drehachse des Laserscanners behält bei Rotation nicht in aller Strenge ihre Lage im Raum. Der Taumelfehler ist ein instrumenteller Fehler, der durch die Bewegung der momentanen Drehachse gegenüber der idealen Drehachse (Stehachse) verursacht wird. Er beeinflusst die Vertikalwinkel und Distanzen. Der Taumelfehler äußert sich in einer harmonischen Schwingung (MATTHIAS 1961). Ursachen für Taumelfehler sind in der mechanischen Konstruktion des Drehlagers zu suchen (Verschleißeffekte, Verunreinigungen durch Schmiermittel, Fertigungsungenauigkeiten etc.).

In verschiedenen Untersuchungen ist der Einfluss des Taumelfehlers auf die Drehachse untersucht worden. Im Detail wird eine Untersuchung vorgestellt. Sie besteht aus drei Messreihen, wobei nach jeder Messreihe der Scanner um 60° verdreht wurde. Ist der Taumelfehler mathematisch beschreibbar, sollten in den einzelnen Messreihen die charakteristischen Größen des Taumelfehlers entweder konstant oder die Verdrehung von 60° erkennbar sein.

Für die Bestimmung des Taumelfehlers ist ein Neigungssensor zentrisch im Drehpunkt des Laserscanners befestigt worden. Durch die zentrische Anbringung werden Einflüsse des Gewichtes des Neigungssensors auf den Scanner minimiert. Als Neigungssensor wurde der Nivel 20 von Leica Geosystems verwendet. Er weist neben einer hohen Genauigkeit ($\mu\text{m}/\text{mm}$) zwei zueinander senkrechte Neigungsbestimmungen (x_i, y_i) je Messung auf.

$$s_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i \quad (2)$$

$$t_i = v - s_i \quad (3)$$

Somit kann aus diesen Messungen die momentane Drehachse s_i für jeden Messpunkt (1) bestimmt werden. Nach anschließender Berechnung der mittleren Stehachse v (2) kann als neue Beobachtung der Taumelfehler t_i (3) abgeleitet werden. Die neuen Beobachtungen sind frei von systematischen Fehlern (wie Einfluss der Stehachsenschiefe). Neben zufälligen Fehlern sind vor allem Einflüsse des Taumelfehlers Ursache für die harmonischen Schwingungen (**Abb. 1**).

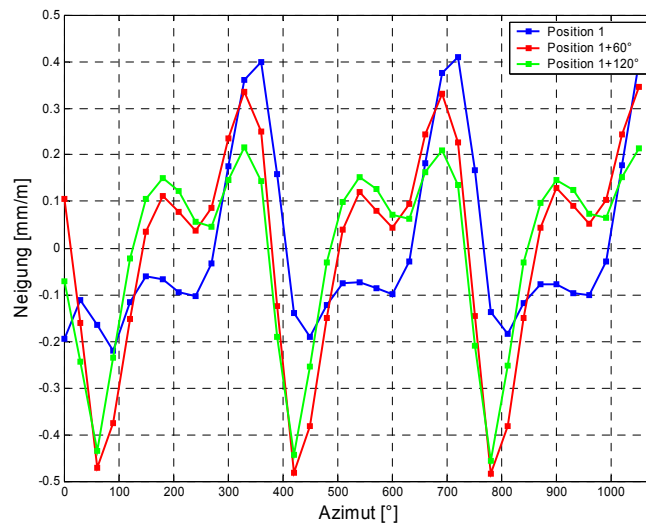


Abb. 1: Messreihen der abgeleiteten Beobachtungen

Für eine bessere Interpretation sind diesen Daten einer Fourier-Transformation unterzogen worden. Jede Messreihe zeichnet sich durch die Summe von Sinus- und Cosinusschwingungen aus. Jede Sinus- und Cosinusschwingung lässt sich beschreiben mit Amplitude, Frequenz und Phasenwinkel. Sind signifikante Frequenzen vorhanden, so heben sich diese von den übrigen Frequenzen ab. Das Frequenzspektrum ist in **Abb. 2** dargestellt.

Für jede Messreihe sind zwei signifikante Frequenzen erkennbar. Die Frequenzen besitzen jeweils eine Periodenlänge von 180° und 360° . Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse lässt sich feststellen, dass einerseits die Frequenzen konstant sind, andererseits aber die Amplituden nicht. Ebenso sind die Phasenwinkel beider Frequenzen weder konstant innerhalb der Messreihen noch korrelieren sie mit dem Versatz von 60° (vgl. **Tabelle 1**).

Die Amplitude der signifikantesten Frequenz lässt sich als Taumelfehler bzw. Einfluss des Taumelfehlers beurteilen. Rechnet man den maximal möglichen Einfluss bei einer Distanz von 60 m aus, so erhält man einen Wert von ca. 1 cm. Für präzise Anwendungen im Bereich der Ingenieurvermessung sowie der Genauigkeitszielsetzung des Laserscanners ist dieser Wert nicht zwingend vernachlässigbar. Aufgrund der bisherigen Untersuchungen ist eine Modellierung des Taumelfehlers jedoch derzeit noch nicht möglich.

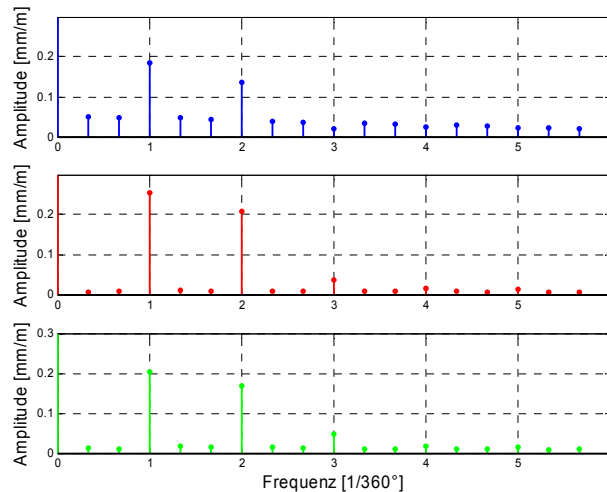


Abb. 2: Frequenzspektren der Messreihen (oben: Position 1, mitte: Position 1+60°, unten: Position 1+120°)

Tabelle 1: Parameter der Fourier- Transformation für die Messreihen

Messreihe	Frequenz 1		Frequenz 2		Stehachschiefe [mm/m]
	Amplitude [mm/m]	Phasenwinkel [°]	Amplitude [mm/m]	Phasenwinkel [°]	
1	0.21	119	0.15	126	1.24
1 + 60°	0.26	177	0.21	131	1.27
1 + 120°	0.20	199	0.17	139	1.26

2.2 Distanzgenauigkeit

Der Laserscanner Imager 5003 bietet die Möglichkeit Messungen durchzuführen, ohne dass der Spiegel um die horizontale Kippachse und der Scanner um die vertikale Drehachse rotieren. Bei Ausrichtung auf ein Zielobjekt lassen sich somit Einzelpunktmessungen durchführen, ähnlich einem Tachymeter.

Das Distanzmesssystem ist auf der Interferometerbahn des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie untersucht worden. Über eine Länge von ca. 50 m wird mittels eines Interferometers die Distanz bestimmt. Mit einer Genauigkeit von wenigen Mikrometern ist diese

Distanz nahezu um einen Faktor 1000 besser als die vom Hersteller angegebene Genauigkeit des Laserscanners von wenigen Millimetern und kann daher als Soll-Distanz angesehen werden. Im Einzelnen wurden mehrere Messreihen mit verschiedenen Intervallen (1 m, 5 m und 10 m) durchgeführt. Zu jedem Messpunkt sind die theoretische Standardabweichung und die Differenz zur Soll-Distanz ermittelt worden (vgl. **Abb. 2a + 2b**). Als Zielobjekt diente eine weiße Tafel mit schwarzer Skalierung.

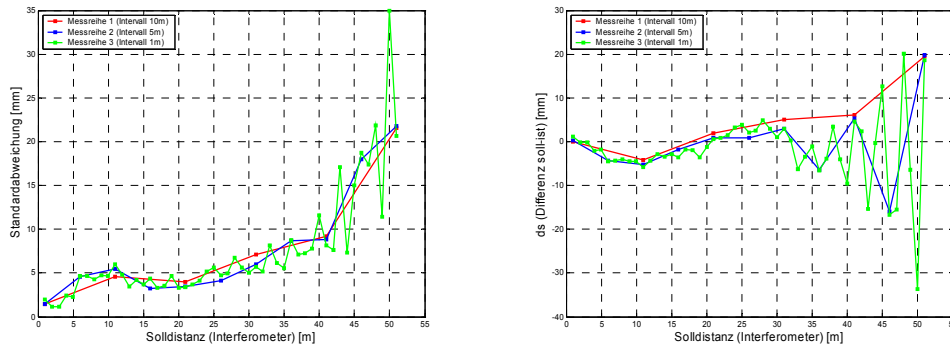


Abb. 2a + 2b: Distanzgenauigkeit des Laserscanners (links: theoretische Standardabweichung; rechts: Differenzen der gemessenen Distanzen zur Soll-Distanz)

In den beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass mit zunehmender Distanz die Genauigkeit ab- und die Differenzen zur Soll-Distanz zunehmen. Diese Zunahme der Differenzen geschieht in einer harmonischen Schwingung, deren Periode der halben Wellenlänge des Feinmassstabes entspricht (ca. 3.3 m). Ursachen dafür können Mehrwegeausbreitungen und ein optisches oder elektrisches Übersprechen sein, wenn z.B. zwei Zielobjekte den Laserstrahl reflektieren. Dies kann beispielsweise auftreten, wenn der Laserspot die Zieltafel überragt oder Staubpartikel auf dem Spiegel vorhanden sind. Andere Gründe für die abnehmende Genauigkeit können auch sein, dass die Korrekturparameter für die Distanzmessung nicht über den gesamten Messbereich des Laserscanners gültig sind.

2.3 Auftreffwinkel und Materialeigenschaften

Bei Messungen auf natürliche oder künstliche Objekte ohne Reflektoren oder Prismen ist die Intensität des zurückgesendeten Messstrahls entscheidend für die Genauigkeit der Distanzmessung. Dabei nimmt die Intensität bzw. Beleuchtungsstärke (E) umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung (s) ab ($E \sim 1/s^2$, KNEUBÜHL 1982). Die Intensität wird dabei von vielen Parametern beeinflusst, als zwei entscheidende neben der Entfernung sind der Auftreffwinkel und die Materialeigenschaften zu nennen.

Für die Untersuchung des Einflusses des Auftreffwinkels kann die verwendete Zieltafel um diskrete Winkel verschwenkt werden. Ein senkrecht auftreffender Messstrahl hat einen Auftreffwinkel von 90° . In **Abb. 3** sind die Ergebnisse einzelner Auftreffwinkel dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass mit abnehmendem Auftreffwinkel die Differenzen zur Soll-Distanz zunehmen. Je nach gestellten Genauigkeitsanforderungen ist der maximale Messbereich in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel anzupassen.

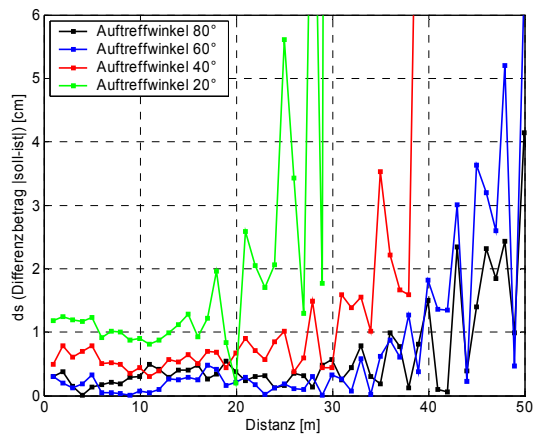


Abb. 3: Einfluss des Auftreffwinkels (dargestellt sind die Beträge der Differenzen der gemessenen Distanzen zur Soll-distanz)

Für die Untersuchung des Einflusses verschiedener Materialien sind im Einzelnen Styropor, Holz und Metall als Zielobjekte untersucht worden. Die Ergebnisse sind in **Abb. 4** dargestellt. Dabei sind zwei systematische Einflüsse erkennbar. In Styropor dringt der Messstrahl (je nach Körnung) in das Material ein (hier: bis zu 1.5 cm) und bei Metall ist die Intensität des reflektierten Messstrahls bis zu einer Entfernung von ca. 30 m zu hoch, so dass keine auswertbaren Messungen vorliegen. Dagegen sind bei Holz vergleichbare Ergebnisse wie mit der Zieltafel ersichtlich.

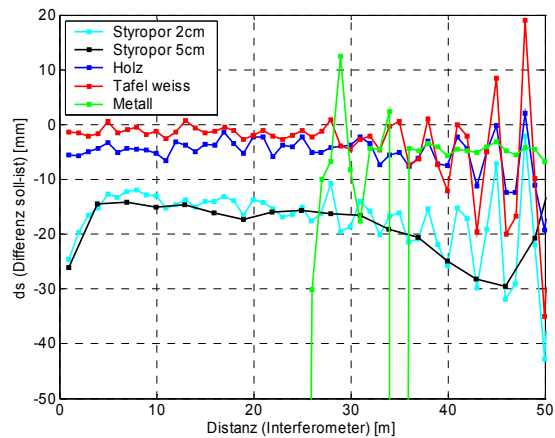


Abb. 4: Untersuchung verschiedener Materialien (dargestellt sind die Differenzen der gemessenen Distanzen zur Soll-distanz)

3 Anwendungen

Bei der Aufnahme von Objekten sind meist mehrere Standpunkte erforderlich. Um die separaten Punktwolken miteinander verknüpfen zu können, sind sog. Verknüpfungspunkte notwendig. Diese können künstlicher oder natürlicher Herkunft sein. Als ideale Objekte eignen sich Kugeln, da sie symmetrisch sind und von allen Seiten gleiche und optimale Erkennbarkeit gewährleisten. Ist eine ausreichende Anzahl von Verknüpfungspunkten vorhanden, so lassen sich die einzelnen Scans gegenseitig orientieren. Dieser Vorgang wird Registrierung genannt.

Im Folgenden werden zwei Beispiele angegeben. Der Schwerpunkt lag dabei mehr bei der Aufnahme und Orientierung als auf einer Visualisierung. Bei dem ersten Objekt handelt es sich um eine Kapelle und damit eine Anwendung, die in das „Cultural Heritage“ (Kulturerbe und Kulturbesitz) eingeordnet werden kann. Das zweite Objekt, ein Tunnel, repräsentiert dagegen eine Anwendung der Ingenieurvermessung. Bei allen Anwendungen ist es notwendig, dass die Aufnahmen sorgfältig vorbereitet werden müssen. Dies betrifft beispielsweise die Wahl der Standpunkte des Laserscanners, das Platzieren der Verknüpfungspunkte, die Entfernung zum Objekt und die Auflösung der Scans.

Schwierigkeiten bei beiden Objekten betrafen die beengten Raumverhältnisse. Die Kapelle war umgeben von einer Strasse, einem Fluss sowie einer Eisenbahnlinie (vgl. **Abb. 5a**). Insgesamt ist von allen vier Seiten die Kapelle aufgenommen worden respektive der notwendigen Verknüpfungspunkte. Die Punktwolke in **Abb. 5b** zeigt das Ergebnis nach der Registrierung, die aus mehreren Millionen Punkten besteht.

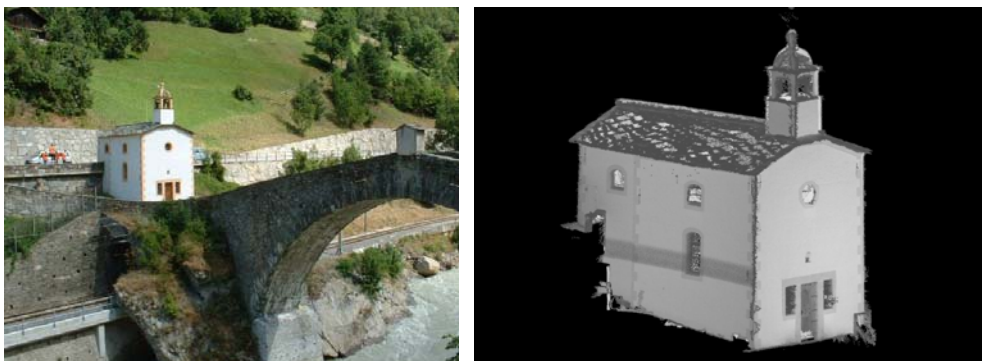


Abb. 5a + 5b: Kapelle (links: Situation; rechts: 3D-Laserscanner-Punktwolke)

Bei einem Tunnel handelt es sich meist um ein schmales, lang gestrecktes Objekt. Beachtet werden muss dabei der Auftreffwinkel, der in größeren Entfernungen die Genauigkeit der Distanzmessung beeinflusst und schleifende Schnitte mit dem Objekt (Tunnelwand) verursacht. Daher ist der Abstand zwischen zwei Standpunkten auf ca. 10-15 m begrenzt worden. Insgesamt waren bei einer Länge von ca. 150 m zwölf Standpunkte erforderlich, von denen der Tunnelausschnitt sowie die Verknüpfungsobjekte aufgenommen wurden. In den **Abb. 6a** und **Abb. 6b** sind die Tunnelröhre und ein Tunnelausschnitt dargestellt. Dabei sind

beim Tunnelausschnitt deutlich Details wie die gemauerte Tunnelwand, die Gleise sowie die Fahrhahnoberleitung erkennbar.

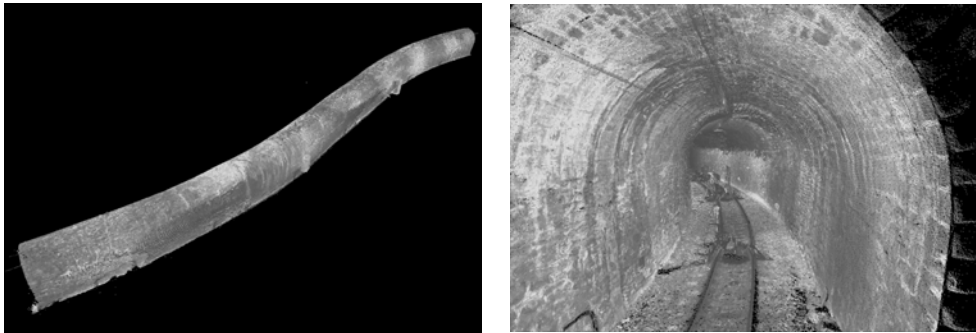


Abb. 6a + 6b: 3D-Laserscanner-Punktwolken des Tunnels (links: Tunnelröhre; rechts: Tunnelausschnitt)

4 Ausblick

Der Laserscanner Imager 5003 von Zoller+Fröhlich GmbH ist bezüglich verschiedener Genauigkeitsaspekte untersucht worden. Diese betreffen den Einfluss des Taumelfehlers, die Genauigkeit des Distanzmesssystems sowie weitere Einflussgrößen auf die Distanzgenauigkeit wie Auftreffwinkel und verschiedene Materialien. An zwei praktischen Beispielen ist die Anwendung des Laserscanners getestet worden.

Dabei ist deutlich geworden, dass das Potenzial des Laserscanners bezüglich Genauigkeit, Bedienerfreundlichkeit und Anwendbarkeit noch nicht ausgeschöpft ist. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um präzisere Angaben für die Genauigkeit und Leistungsfähigkeit des Laserscanning zu bekommen. Jedoch ist es möglich, mittels Laserscanning den Genauigkeitsbereich von wenigen Millimetern zu erreichen und damit in Anwendungsbereiche der Ingenieurvermessung vorzudringen.

5 Literatur

Kneubühl, F. (1982): *Repetitorium der Physik*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Teubner Stuttgart.

Matthias, H. (1961): *Umfassende Behandlung der Theodolitachsenfehler auf vektorieller Grundlage unter spezieller Berücksichtigung der Taumelfehler der Kippachse*. Verlag Leemann, Zürich.

Ingensand, H. & Ryf, A. & Schulz, T. (2003): *Performances and Experiences in Terrestrial Laserscanning*. In: Proceedings of the 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich.