

Terrestrisches Laserscanning und seine Anwendungen in der Ingenieurvermessung

Thorsten Schulz, ETH Zürich
Hans-Martin Zogg, Cyra Technologies, Inc.
Hilmar Ingensand, ETH Zürich

Zusammenfassung: Laserscanning hat sich als geodätische Messtechnik etabliert. Eine Vielzahl von Herstellern bieten ihre Laserscanner an. Dabei unterscheiden sich diese Produkte in vielerlei Hinsicht wie Reichweite, Distanzmessverfahren, Genauigkeit, Auflösung, Erfassungsgeschwindigkeit und Scanbereich (Field of View.). In dem vorliegenden Beitrag wird auf den Laserscanner Imager 5003 der Firma Zoller+Fröhlich eingegangen sowie seine Einsatzmöglichkeiten für Aufgaben aus dem Bereich der Ingenieurvermessung erläutert. Als Beispiel dafür wird das Ergebnis eines Tunnelscannings vorgestellt.

1 Grundlagen

Laserscanning ist neben Tachymetrie, Photogrammetrie und Satellitengeodäsie eine weitere geodätische Messtechnik. Der Vorteil liegt in hoch auflösenden Aufnahmen von komplexen und detailreichen Objekten innerhalb kurzer Zeit mit Aufnahmezeiten von z.T. wenigen Minuten. Bei allen terrestrischen Laserscannern wird ein Laserstrahl mittels bewegender Spiegel derart abgelenkt, dass die Aufnahme von Vertikal- oder Horizontalprofilen, eines begrenzten Ausschnitts oder des gesamten sichtbaren Bereiches möglich ist. Zu jedem Objektpunkt werden dreidimensionale Koordinaten sowie die Intensität des reflektierten Laserstrahls abgeleitet.

Die Distanzmess- und Winkelabgriffssysteme entsprechen denen anderer geodätischer Instrumente (z.B. Tachymeter). Eine entscheidende Bedeutung kommt dem verwendeten Distanzmessverfahren zu. Es beeinflusst und bestimmt die maximale Reichweite und die Genauigkeit. Beide Parameter sind miteinander korreliert. Beispiele für die verwendeten Distanzmessverfahren in Laserscannern sind Interferometrie und optische Triangulation (Nahbereich bis wenige Meter), Phasenvergleichsverfahren (mittlere Entfernungen bis ca. 70 m) sowie Impulsmessverfahren (grosse Entfernungen bis einige 100 m). Weitere Einzelheiten

über Distanzmess- und Winkelmessverfahren in geodätischen Instrumenten können Deumlich und Staiger (2002) sowie Joeckel und Stoiber (1999) entnommen werden.

Hauptanwendungsbereiche des Laserscannings sind die Erfassung, Dokumentation und Modellierung komplexer Objekte (Fabrikanlagen, Raffinerien etc.) sowie Objekte des Denkmalschutzes und Kulturerbes (Fassaden, Denkmäler, Statuen, Kirchen etc.). Bei diesen Anwendungen kommt es weniger auf eine hohe Genauigkeit als vielmehr auf eine detailtreue Visualisierung an. Im Gegensatz dazu stehen die Anforderungen aus der Ingenieurvermessung, die eine weitaus höhere Genauigkeit verlangen. Sollen mittels Laserscanning Genauigkeiten von wenigen Millimetern garantiert werden, sind präzise Untersuchungen zu den verschiedenen Einflussfaktoren notwendig. Die Distanzmessung ist beim derzeitigen Stand der Technik der entscheidende Faktor für die Genauigkeit. Erschwerend kommt hinzu, dass im Gegensatz zu Distanzmessungen mit Reflektoren die Intensität des reflektierten Laserstrahls eine zentrale Rolle spielt. Die Intensität des reflektierten Strahls nimmt umgekehrt proportional zum Quadrat der Distanz ab (Gerthsen und Vogel, 1993). Mit niedrigerer Intensität verschlechtert sich auch die Genauigkeit der Distanzmessung. Die Distanz ist jedoch nicht der alleinige Einflussfaktor auf die Intensität des reflektierten Laserstrahls. Hinzu kommen Parameter wie Auftreffwinkel, Oberflächenbeschaffenheit (Farbe, Rauigkeit, Reflexionseigenschaft, etc.).

2 Untersuchungen des Laserscanners Imager 5003

Intensive Untersuchungen des Laserscanners Imager 5003 sind von Zogg (2003) und Schulz et al. (2003) vorgenommen worden. Einige dieser Ergebnisse werden im Folgenden herausgegriffen und erläutert. Die dargelegten Ergebnisse sind in den Messlaboratorien des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich erhoben worden.

2.1 Distanzgenauigkeit

Die Distanzmessung des Laserscanners Imager 5003 basiert auf dem Phasenvergleichsverfahren. Mittels zweier Grobfrequenzen (je nach gewähltem Entfernungsbereich) werden die Mehrdeutigkeiten bis ca. 26 m (Wellenlänge $\lambda \sim 54\text{ m}$) und 57 m ($\lambda \sim 108\text{ m}$) gelöst. Anschliessend erfolgt über eine Feinfrequenz ($\lambda \sim 7\text{ m}$) die Bestimmung der Distanz auf wenige Millimeter. Auf der Messbahn des IGP kann mittels eines Interferometers die Distanz auf einer Länge von ca. 52 m bis auf wenige Mikrometer ermittelt werden. Damit kann die gemessene Distanz des Laserscanner mit diesem Sollwert verglichen werden. In der Abbildung 1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Als Zielmarke wurde eine weisse Tafel mit schwarzer Skalierung verwendet. Es ist zu erkennen, dass bis zu einer Distanz von ca. 40 m die Genauigkeit unter einem Zentimeter

liegt. In mehreren Messreihen mit verschiedenen Intervallen (1 m, 5 m und 10 m) wurde die Reproduzierbarkeit dieser Ergebnisse verifiziert.

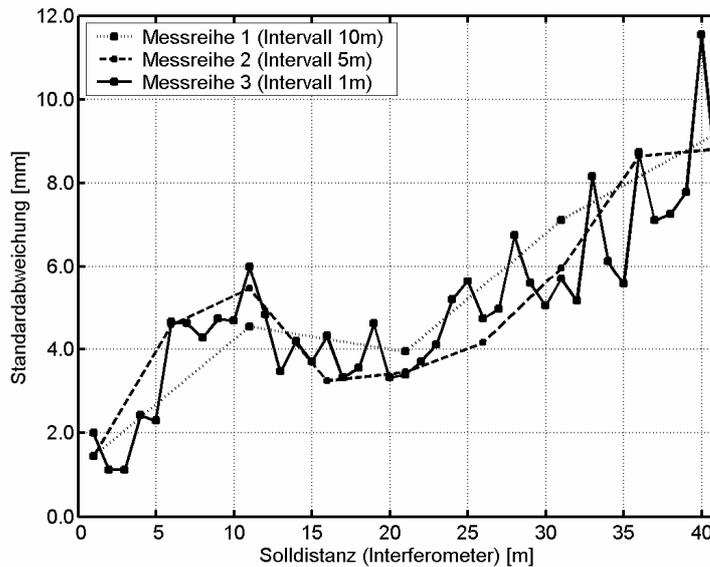


Abbildung 1 : Genauigkeit des Distanzmesssystems des Laserscanners Imer 5003

2.2 Auftreffwinkel

Der Auftreffwinkel des reflektierten Laserstrahls beeinflusst die Intensität und damit die Genauigkeit der Distanzmessung. Für die Bestimmung des Einflusses dieses Parameters wird die unter Abschnitt 2.1 erwähnte Zieltafel auf der Messbahn des IGP um diskrete Winkel verschwenkt, so dass der Laserstrahl mit der Zieltafel verschiedene Auftreffwinkel einschliesst. Bei einem rechtwinklig einfallendem Laserstrahl beträgt der Winkel 90° .

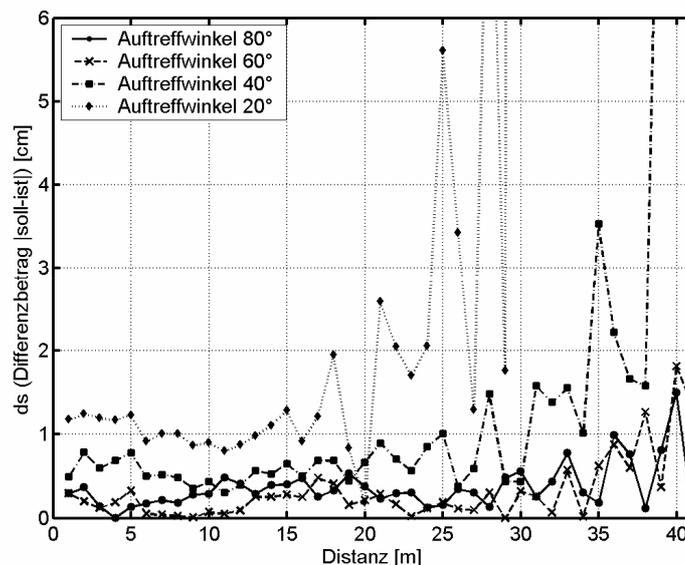


Abbildung 2: Differenzen der mit dem Laserscanner ermittelten Distanz zur Solldistanz bei verschiedenen Auftreffwinkeln

In der Abbildung 2 sind zu verschiedenen Auftreffwinkeln die Differenzen der mit dem Laserscanner ermittelten Distanzen zur Solldistanz dargestellt. Es ist deutlich der Einfluss des Auftreffwinkels auf die Genauigkeit der Distanzmessung zu erkennen. Mit kleiner werdendem Winkel steigen die Differenzen an. Dies ist gleichbedeutend damit, dass die für eine bestimmte Genauigkeit mögliche Distanz abnimmt. So beträgt bei einem Auftreffwinkel von 20° die maximale Distanz 15 m , wenn eine Genauigkeit von ca. 1 cm garantiert werden soll.

2.3 *Verschiedene Materialien*

Die Distanzgenauigkeit des Laserscanners wurde nicht nur auf die bereits erwähnte weisse Zieltafel, sondern auch auf weitere Materialien untersucht. Dabei lassen sich vor allem die spezifischen Reflexionsverhalten der jeweiligen Materialien interpretieren. In einer Testreihe wurden die Materialien Holz, Styropor (mit einer Dicke von 2 cm und 5 cm) und Metall untersucht. Die Genauigkeiten der Messungen auf Holz entsprechen denjenigen auf die weisse Zieltafel (vgl. Abbildung 1). Dagegen bei Styropor und Metall sind zwei systematische Effekte zu erkennen. Je nach Porengrösse und Dichte des Styropors dringt der Laserstrahl unterschiedlich stark in das Material ein (hier ca. 1.5 cm). Bei Metall sind bis zu einer Distanz von ca. 30 m keine akzeptablen Ergebnisse zu erzielen. Die Ursache liegt darin, dass die Intensität des reflektierten Laserstrahls bis zu dieser Entfernung für das Messsystem zu hoch ist. Ebenso ist die Messung auf Prismen von diesem Effekt beeinflusst und daher nicht möglich.

2.4 *Weitere Einflussgrössen*

Eine umfassende Darstellung aller Einflussgrössen beim Laserscanning auf die Genauigkeit ist im vorliegenden Beitrag nicht möglich. Die Betrachtung beschränkt sich auf die wesentlichen Parameter, die die Distanzgenauigkeit beeinflussen. Weitere Einflussgrössen sind z.B. Ziel- und Kippachsenfehler, Einfluss der Stehachsenschiefe, Winkelauflösung, Laserspotgrösse und Taumelfehler (vgl. Schulz et al., 2003).

3 *Praktische Anwendung des Laserscanners Imager 5003*

Als eine mögliche Anwendung des terrestrischen Laserscannings aus dem Bereich der Ingenieurvermessung ist das Tunnelscanning zu sehen. Wichtige Aspekte betreffen dabei z.B. Deformationsuntersuchungen der Tunnelwand, die Lage der Gleisachse bzw. Schienen, die Untersuchung und Einhaltung des Lichtraumprofils sowie Detektierung der Fahrbahnoberleitung und Signalanlagen. Neben der Genauigkeit, die durch das Instrument limitiert wird, ist ebenso die Genauigkeit der Referenzierung von entscheidender Bedeutung. Beim Laserscanning sind meist Aufnahmen von verschiedenen Standpunkten aus erforderlich. Um die lokalen einzelnen Aufnahmen in ein einheitliches System zu überführen, sind verschiedene Verfahren möglich. Dabei müssen Passpunkte als

identische Punkte verwendet werden, die entweder lokale oder globale Koordinaten aufweisen. Als Passpunkte können natürliche oder künstliche Punkte (z.B. spezielle Zieltafeln oder Kugeln), aber auch Objekte (Zylinder, Ebenen u.a.) gewählt werden. Diesen Vorgang der Transformation aller Aufnahmen bzw. Scans in ein einheitliches System wird Registrierung genannt.

3.1 Registrierung und Georeferenzierung

Um den hohen Genauigkeitsanforderungen an die Ingenieurvermessung (wenige Millimeter) zu genügen, werden für die Registrierung der verschiedenen Aufnahmen spezielle Kugeln verwendet. Es handelt sich dabei um formstabile Holzkugeln mit Durchmessern von ca. *12 cm* und ca. *15 cm*. Für ein besseres Reflexionsverhalten sind sie mit einer matten weissen Farbe bearbeitet worden. Kugeln bieten sich deshalb als Passpunkte an, da sie symmetrisch sind und von allen Richtungen optimale und gleiche Erkennbarkeit gewährleisten. Als Bezugspunkt für die Georeferenzierung lässt sich das Zentrum der Kugel verwenden. Zu diesem Zweck sind die Kugeln mit einer Zwangszentrierung versehen worden, so dass sie auf Dreifüsse aufgesetzt werden können. Bei bekanntem Offset zwischen Kugel und Prisma sowie bekanntem Radius ist die Umrechnung von den Prismenhöhen auf das Kugelzentrum möglich und damit auch die Georeferenzierung in bestehende Koordinatensysteme. Der Radius sowie der Offset jeder Kugel ist trigonometrisch ermittelt worden.

3.2 Aufnahme des Mühlenbachtunnels VS (Schweiz)

Ein Tunnel stellt hohe Anforderungen an die Planung und Durchführung von Messungen. Ein Tunnel ist ein schmales, lang gestrecktes Objekt. Als problematisch erweisen sich dabei kleine Auftreffwinkel in grösseren Entfernungen. Die Genauigkeitsanforderung (vgl. Abschnitt 2.2) erzwingt es, die einzelnen Standpunkte in dichten Abständen zu legen (ca. *10 m*). Für optimale Voraussetzungen der Registrierung der Aufnahmen sind in jedem Scan mindestens drei Passpunkte verfügbar. Diese Passpunkte sind über trigonometrische Messungen bestimmt worden. Somit ist es einerseits möglich, eine genaue Registrierung zu gewährleisten. Andererseits besteht die Möglichkeit der Georeferenzierung in das bestehende Landessystem der Schweiz. In den Abbildungen 3 und 4 sind die Tunnelröhre und ein Ausschnitt des Tunnels nach der Registrierung zu sehen. In Abbildung 4 sind dabei die Fahrbahnoberleitung, die Gleise und die gemauerte Tunnelwand aus den hoch auflösenden Aufnahmen zu erkennen.

4 Zusammenfassung

Für Anwendungen des terrestrischen Laserscannings in der Ingenieurvermessung sind aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen spezielle Untersuchungen erforderlich. Fehlereinflüsse und Genauigkeiten des verwendeten Laserscanners müssen eingehend geprüft werden. Aber auch eine sorgfältige Pla-

nung und Durchführung der Aufnahmen muss berücksichtigt werden. Ist man sich dieser Aspekte bewusst, ist es möglich, auch im Bereich der Ingenieurvermessung terrestrisches Laserscanning innerhalb der geforderten Genauigkeiten (einige Millimeter) anzuwenden.



Abbildung 3+4: Hoch auflösende Scans des Mühlenbachtunnels VS (Schweiz) nach der Registrierung und Georeferenzierung. Links: Tunnelröhre, rechts: Ausschnitt des Tunnels

Literatur:

- DEUMLICH, F.; STAIGER, R. [2002]: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- GERTHSEN, C.; VOGEL, H. [1993]: Physik. 17., verbesserte und erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- JOECKEL, R.; STOIBER, M. [1999]: Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Wittwer, Stuttgart.
- SCHULZ, T.; RYF, A.; INGENSAND, H. [2003]: Performances and Experiences in Terrestrial Laserscanning. In: Proceedings of the 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich.
- ZOGG, H.-M. [2003]: Untersuchung des Laserscanners Imager 5003 von Zoller+Fröhlich. Diplomarbeit am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich (unveröffentlicht).

Anschriften:

ETH Zürich:

Thorsten Schulz
geomETH, Geodätische Messtechnik
ETH Hönggerberg
8093 Zürich
schulz@geod.baug.ethz.ch

Prof. Dr. Hilmar Ingensand
geomETH, Geodätische Messtechnik
ETH Hönggerberg
8093 Zürich
ingensand@geod.baug.ethz.ch

Cyra Technologies, Inc.:
Hans-Martin Zogg
4550 Norris Canyon Road
San Ramon, CA 94583
hans-martin.zogg@cyra.com