

## Terrestrisches Laserscanning (TLS)

### Definition



Beim terrestrischen Laserscanning (TLS) werden die Objekte flächenhaft oder profilweise mittels Laserlicht (LiDAR) mit Messraten von bis zu mehr als 1 Mio. Punkten pro Sekunde abgetastet. Gewöhnlich werden die Objekte von mehreren, frei wählbaren Scanstandorten aus erfasst. Das Ergebnis pro Scan ist eine 3D-Punktwolke in einem lokalen Koordinatensystem, die im Zuge einer *Registrierung* und Georeferenzierung zusammengeführt werden. Enorme Datenmengen mit mehreren Millionen bzw. Milliarden Punkten stellen hohe Anforderungen an die Verarbeitungshardware und -software.

(Witte/Sparla/Blankenbach 2020 S. 204)

### Anwendungsfall

#### Anwendungsbereich

- 
- Geometrische Dokumentation von dreidimensionalen Objekten mit einer nahezu dimensionsunabhängigen Genauigkeit von 2 bis 10 mm
  - Quantitative Erfassung von Oberflächenänderungen wie z.B. Abplatzungen oder Kantenausbrüchen sowie von Verformungen, insbesondere über die Zeit
  - Vielfach einsetzbar im Massiv- und Stahlbau für Objekte mit beliebiger Größe.
  - Vermessung und Monitoring von Nahbereichsobjekten in 5 bis 250 m Entfernung (z.B. Deformationen im Stahlwasserbau)
  - Generierung von 3D-Oberflächenmodellen
  - Schadensdetektion von Abplatzungen, Aussinterungen, Kantenabbrüchen, freiliegender Bewehrung
  - Abplatzungsidentifikation
  - Verformungsmessungen

#### Rahmenbedingungen

- 
- Einsatz bei allen Lichtverhältnissen möglich (auch in Dunkelheit)
  - Niederschlagsfreiheit beim Einsatz im Außenbereich erforderlich
  - Spiegelnde Oberflächen können zu Ergebnisverfälschungen führen
  - Der sinnvolle Einsatz ist besonders gegeben bei Bedarf einer detaillierten Erfassung mit einer gleichzeitig hohen Informationsdichte.

### Technischer Hintergrund

#### Erläuterung der Funktionsweise



Laserscanner verwenden gebündeltes und kohärentes (Lichtwellen mit gleicher Phasenlage) Laserlicht mit einer Wellenlänge im nahen Infrarot und sind ein aktives Multi-Sensor-System, optional ausgestattet mit Neigungssensoren, Kompass, Kamera, Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und *Inertialmesseinheit* (IMU). In der Bauart als 3D-Scanner registriert ein Scanner originär dreidimensionale Polarkoordinaten, indem die Objektoberflächen systematisch in vordefinierten Winkelschritten und in Verbindung mit einer simultanen Distanzmessung durch den Laser abgetastet werden. Die Messelemente setzen sich aus zwei Winkeln sowie einer Schrägdistanz zusammen, die für die Weiterverarbeitung in kartesische (X/Y/Z)–Koordinaten umgerechnet werden. Die meisten Scanner sind in der Lage, neben der geometrischen Information zusätzlich Intensitätswerte und Attribute wie Echopulsverformungen als radiometrische Informationen zu registrieren, die die Reflektivität der Objektoberflächen widerspiegeln. Die Streckenmessungen sind, abhängig von der Bauart, zentimeter- oder subzentimetergenau und beruhen entweder auf dem *Impulslaufzeitverfahren* (Time of Flight, ToF) oder dem *Phasenvergleichsverfahren*. Häufig werden die Laserscanner zusätzlich mit internen oder externen RGB-Kameras ausgestattet. Anhand der Kamerabilder können die Punktwolken dann bei der Weiterverarbeitung durch perspektivische Projektion der Pixel auf die Punkte eingefärbt werden. Bei den terrestrischen Laserscannern lassen sich hinsichtlich des Sichtfeldes die drei Bauformen Kamera-, Panorama- und Hybrid-Scanner unterscheiden. Hiervon hängt ab, ob pro Scan eine Abtastung bereichsbegrenzt ähnlich eines Kamerabildes oder vertikal und horizontal in einer 360°-Umgebung (Panorama) erfolgt. Für die Weiterverwendung überführt der Registrierungsvorgang die Punktwolken der einzelnen Aufnahmen in ein gemeinsames Koordinatensystem, für den entsprechende Software des Herstellers mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad zur Verfügung steht. Die *Registrierung* kann über hochreflektierende *Zielzeichen* (Reflexfolien, -kugeln oder -zylinder, die als Passpunkte dienen), in den Punktwolken extrahierbare Merkmale wie Ecken, Kanten oder Ebenenstücke sowie über die Punktwolken selbst erfolgen.

(Witte/Sparla/Blankenbach 2020 S. 204, Pfeifer/Mandlbürger/Glira 2017 S. 431, Kuhlmann/Holst 2017 S. 167)

## Mehrwert

### Erreichbarkeit / Arbeitssicherheit



- Aufnahmen aus großer Entfernung sind unproblematisch bzw. stellen eine Stärke des Verfahrens dar
- Kurze Aufenthaltszeiten vor Ort erleichtern die Einhaltung von Vorschriften zur Arbeitssicherheit

### Zeitersparnis Inspektion



- Die Zeitersparnis ist in erster Linie bei den Arbeiten vor Ort gegeben. Den größten Zeitumfang beansprucht die Auswertung der Punktwolken, wenn weitere geometrische Strukturinformationen gewünscht sind. Der Aufwand hängt vom Dokumentationsziel und den Automatisierungsmöglichkeiten ab, wobei objektabhängig mehrere Tage bzw. Wochen anzusetzen sind. Ein Projekt in der Größe z.B. einer Schleuse beansprucht ca. 3 bis 5 Tage.

## Kosten

- Erfassungssensorik (Laserscanner): ca. 50.000,- bis 100.000,- EUR (abhängig von der Scanrate und Messgenauigkeit, Marktrecherche 2022)
- Verarbeitungs- und Auswertesoftware: ca. 10.000,- bis 20.000,- EUR (abhängig vom Leistungsumfang und Automatisierungsgrad, Marktrecherche 2022)
- Personalkosten für Aufnahmen und Auswertung



## Datenqualität

- Die Punktwolken dokumentieren in erster Linie die geometrischen, weniger die bildlich-*semantischen* Objekteigenschaften wie zum Beispiel Färbung der Oberfläche.
- Die geometrische Genauigkeit beträgt nahezu unabhängig von der Scandistanz 2 bis 10 mm für die Standardabweichung von Einzelpunkten. Verformungsmessungen mit höherer Genauigkeit sind mit spezieller Hardware und entsprechendem Messdesign möglich.

(Witte/Sparla/Blankenbach 2020 S. 207, Kuhlmann/Holst 2017 S. 178)



## Voraussetzungen

### Hardware

- Laserscanner (inklusive Stativ)
- Geodätisches Messinstrument für die Einmessung von Passpunkten
- Reflexfolien, -kugeln oder -zylinder als Passpunkte für die *Registrierung*/Georeferenzierung der Punktwolken
- Computer mit hoher Leistung (z.B. i7-Prozessor, 64 GB RAM Arbeitsspeicher) zur Prozessierung, Auswertung und Betrachtung von 3D-Punktwolken
- Software für *Registrierung*, Georeferenzierung und Auswertung



### Vorbereitung Untersuchungsobjekt

- Generell keine Vorbereitung des Untersuchungsobjektes notwendig
- Einrichtung und Einmessung von Passpunkten für *Registrierung*/Georeferenzierung
- Ggf. Präparierung (Abdeckung) von spiegelnden Flächen



### Vorbereitung Datenerhebung

- Definition der angestrebten 3D-Genauigkeit in den Punktdaten; ggf. Simulationsrechnungen im Vorfeld mit Planung der Scanstandorte



- Definition der Scanparameter (Winkelschritte, Streckenmessgenauigkeit) im Hinblick auf die notwendige Detailerkennbarkeit und Punktdichte

(Witte/Sparla/Blankenbach 2020 S. 204, Kuhlmann/Holst 2017 S. 167)

## Umweltbedingungen



- Kein Niederschlag bei Datenerhebung

## Erforderliche Genehmigungen



- Keine Genehmigungen erforderlich (Ausnahmen in sicherheitsrelevanten Einrichtungen)

## Umsetzung

### Datenerhebung



- Einrichtung und Einmessung der Passpunkte/*Verknüpfungspunkte*
- Durchführung der Laserscans und Aufzeichnung der Punktwolken gemäß den Vorüberlegungen zur Datenerhebung

(Witte/Sparla/Blankenbach 2020 S. 204)

### Datenprozessierung



- Koordinatenberechnung der Passpunkte/*Verknüpfungspunkte*
- Durchführung der Punktwolkenregistrierungen
- Ableitung von Folgeprodukten aus den Punktwolken: Dreiecksvermaschung, Digitale Oberflächenmodelle (DOM) mit und ohne Texturierung
- Profilerfassung in den Punktwolken anhand von horizontalen/vertikalen/schrägen Schnittebenen
- Konturbezogene Erfassung von Strukturen in den Punktwolken in Form von Ecken, Kanten und Ebenen
- 3D-Modellierung von Bauwerken, fallweise in Kombination mit Objektbildung (z.B. für Building Information Modeling (BIM))

(Witte/Sparla/Blankenbach 2020 S. 204, Kuhlmann/Holst 2017 S. 167)

### Kompatibilität mit anderen innovativen Methoden



- Terrestrisches Laserscanning ist vorteilhaft mit RGB- und UAV-Photogrammetrie kombinierbar, da beide Verfahren die Nachteile des jeweils anderen kompensieren: z.B. besitzt das Laserscanning nicht

die Entfernungsabhängigkeit bei der Tiefenmessgenauigkeit, wogegen Photogrammetrie Vorteile bei der Messung von Ecken bzw. Kanten und in der Detailauflösung aufweist.

## Output



### Informationen

- Dichte Punktwolken
- 3D-Oberflächenmodelle
- Schnittpläne
- 3D-Bauwerksmodelle

### Dateiformate



- Alle gängigen Datenformate für die Speicherung von Punktwolken; offene (herstellerunabhängige) Formate wie LAS, E57 etc. sind empfehlenswert im Hinblick auf die Zukunftssicherheit.
- Konvertierbarkeit in beliebige, andere Datenformate generell möglich

## Referenzen

### Beispielanbieter



- Geodätisches Institut der RWTH Aachen (gia, <http://www.gia.rwth-aachen.de>)
- PHOCAD GmbH ([www.phocad.de](http://www.phocad.de))
- Abteilung Wasserbau BAW (<https://www.baw.de/DE/wasserbau/wasserbau.html>)

### Beispielanwendungen



- Modellierung Neue Schleuse Trier (Abschlussbericht 2019)
- Prüfung von Verkehrswasserbauwerken (Hesse/Holste/Neumann 2019)
- Monitoring von Infrastrukturbauwerken (Paffenholz/Stenz/Wujanz/Neitzel/Neumann 2017)

### Quellen



- Geodätisches Institut RWTH Aachen: Abschlussbericht zur Konzeption der Bestandsdatenerfassung und BIM-basierten Modellierung von Wasserbauwerken mit Evaluation am Demonstrator Neue Schleuse Trier (2019)
- Hesse C./Holste K./Neumann I.: 3D HydroMapper, ein innovatives Über- und Unterwasserscansystem zur Bauwerksinspektion. In: Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS 2019), 184. DVW Seminar, Fulda (2019)
- Kuhlmann H./Holst C.: Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. In: Ingenieurgeodäsie (Hrsg. Wilfried Schwarz), Springer Verlag Deutschland Berlin (2017)

- Paffenholz J.-A./Stenz U./Wujanz D./Neitzel F./Neumann I.: 3D-Punktwolken-basiertes Monitoring von Infrastrukturbauwerken am Beispiel einer historischen Gewölbebrücke. In: Ter-restrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017), 165. DVW Seminar, Fulda (2017)
- Pfeifer N./Mandlbürger G./Glira P.: Laserscanning. In: Photogrammetrie und Fernerkundung (Hrsg. Christian Heipke) , Springer Verlag Deutschland Berlin (2017)
- Witte B./Sparla P./Blankenbach J.: Vermessungskunde für das Bauwesen mit Grundlagen des Building Information Modeling (BIM) und der Statistik. VDE Verlag GmbH, Berlin Offenbach (2020)

## Glossar:

Impulslaufzeitverfahren:	Für die Streckenmessung wird bei jedem Laserschuss die Laufzeit des zurückkommenden Signals gemessen. Zusammen mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit kann auf der Grundlage des Weg-Zeit-Gesetzes die Strecke berechnet werden. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Zeitmessung ist die Genauigkeit i.a. geringer als beim Phasenvergleichsverfahren, allerdings sind damit größere Reichweiten erzielbar.
Inertialmesseinheit:	Eine Inertialmesseinheit kombiniert verschiedene Inertialsensoren wie Accelerometer, Gyroskop und Magnetometer in einem Sensorsystem. Benutzt werden Inertialsensoren für die Trägheitsnavigation, d.h. die Positions- und Orientierungsbestimmung von bewegten Objekten (z.B. Fahrzeugen), und häufig in Kombination mit globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS), um bspw. bei GNSS-Ausfall die Positionsbestimmung nahtlos fortführen zu können.
Phasenvergleichsverfahren:	Beim Phasenvergleichsverfahren arbeitet der Laserscanner mit einer sinusförmigen Welle, die eine feste, definierte Länge besitzt. Die Strecke setzt sich aus der Anzahl ganzer Schwingungen sowie einem Wellenreststück zusammen. Das Reststück wird durch den Vergleich der Phasenlage mit einem geräteinternen Referenzsignal ermittelt. Im Unterschied zum Impulslaufzeitverfahren ist die Streckenmessung tendenziell genauer und es können deutlich höhere Scanraten (> 1 Mio. Punkte/sec) erzielt werden. Die maximalen Messdistanzen sind jedoch durch die Wellenlängen limitiert (max. 100-200 m).
Registrierung:	Die Punktwolken werden originär in dem Sensorkoordinatensystem des Laserscanner erfasst. Die einzelnen Scans werden im Zuge der Registrierung durch räumliche Transformationen zu einer Gesamtpunktwolke in einem lokalen oder übergeordneten Koordinatensystem zusammengebracht.
Semantische Eigenschaften:	Neben der Geometrie beherbergen die Punktwolken die Informationen über die semantischen Eigenschaften der Objekte. Diese werden durch Interpretation zum Zwecke der Objektbildung erfasst und umfassen die inhaltlichen Objekteigenschaften (Attribute) wie beispielsweise die Konstruktionsart.
Verknüpfungspunkte:	Bei der Registrierung erfolgt die Verknüpfung der Scans zu einer Gesamtpunktwolke über identische Merkmale in den Punktwolken. Häufig werden hierzu Passpunkte als Verknüpfungspunkte verwendet, die über das Objekt verteilt in den einzelnen Scans detektiert werden.

**Zielzeichen:**

Mit Zielzeichen kann die Verknüpfung unter den Punktwolken im Rahmen der Registrierung hergestellt werden (Passpunkte). Üblich sind kreisförmige, kugelförmige und zylindrische Zielzeichen, die gewöhnlich stark reflektierenden Eigenschaften besitzen, so dass diese automatisch detektiert werden können.