



Optische 3D-Messsysteme

Tobias Kohoutek, Pascal Theiler

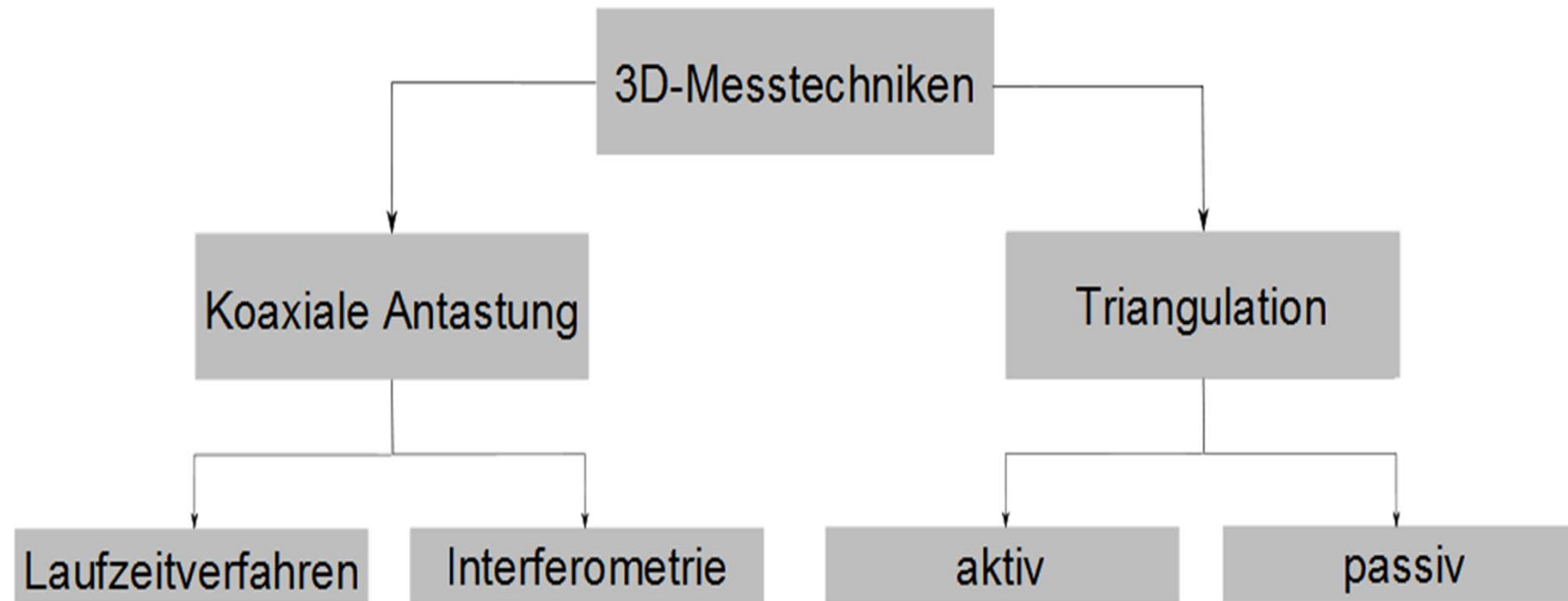
08. Dezember 2010

Inhalt

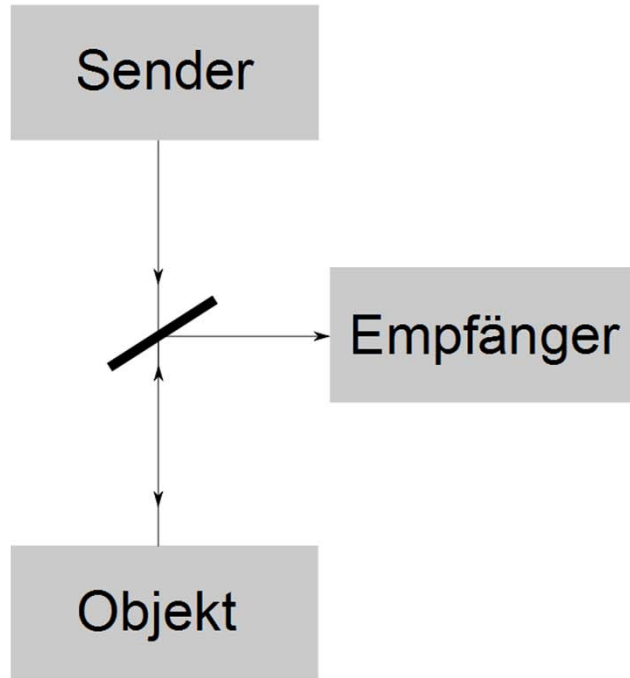
- Einleitung
- Messprinzip
- Messgenauigkeit / Messfehler
- Workflow
- Range Imaging
- Laserscanning
- Demonstration Imager 5006i und SR4000

Inhalt

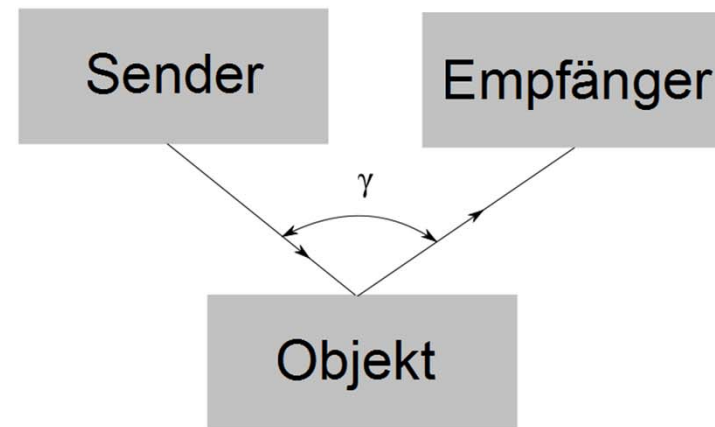
- Einleitung
- Messprinzip
- Messgenauigkeit / Messfehler
- Workflow
- Range Imaging
- Laserscanning
- Demonstration Imager 5006i und SR4000



Einleitung



Koaxiale Antastung ($\gamma = 0^\circ$)



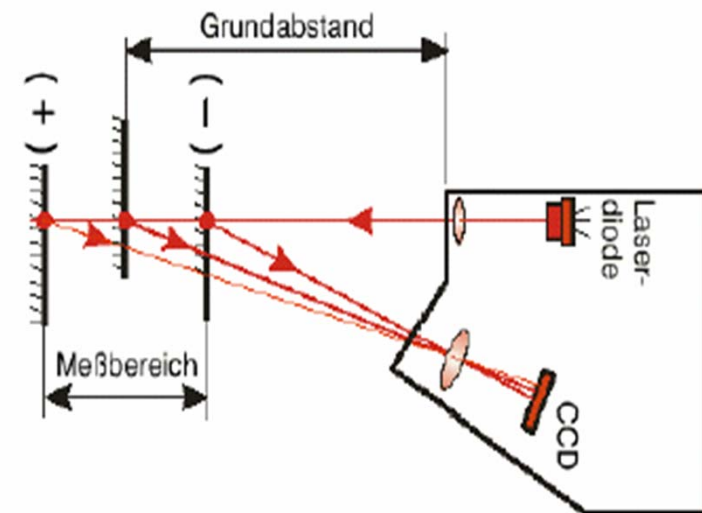
Triangulation ($\gamma \gg 0^\circ$)

Inhalt

- Einleitung
- **Messprinzip**
- Messgenauigkeit / Messfehler
- Workflow
- Range Imaging
- Laserscanning
- Demonstration Imager 5006i und SR4000

Messprinzip - Distanzmessverfahren

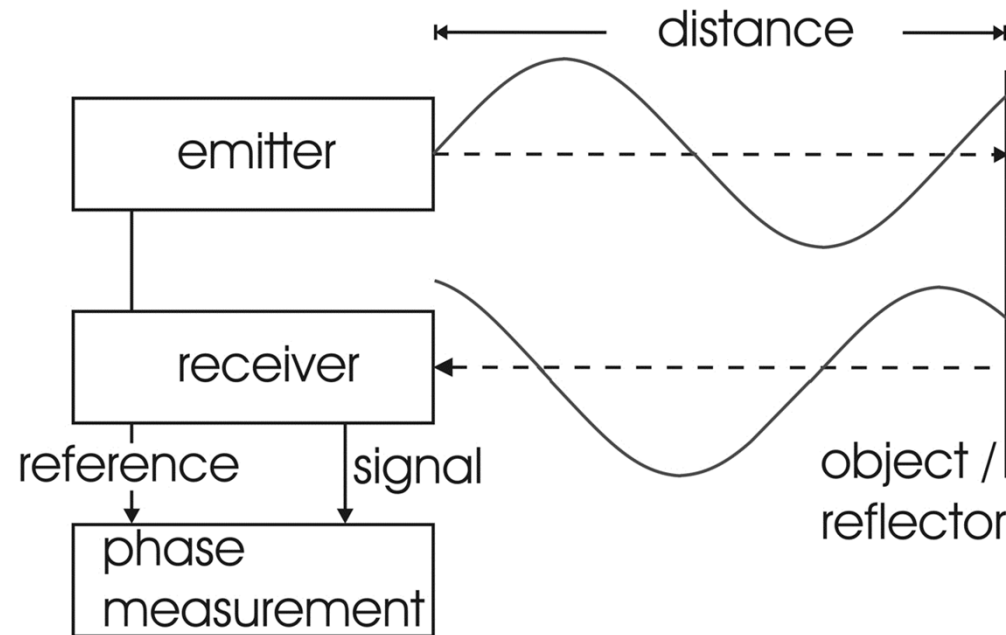
- **Triangulation**
 - feste Basis (Laserdiode – CCD)
 - Vorwärtseinschneiden (mit Distanz, Winkel, Basis)
- Grundabstand: max. 2 m
- Messbereich: ca. 50 mm
- Messfrequenz: 10 Hz – 100 kHz
- Genauigkeit: < 1% vom Messbereich



➔ **Nahbereich, hohe Genauigkeit, hohe Punktauflösung**

- **Indirekte Zeitmessung über Phasenmessung**

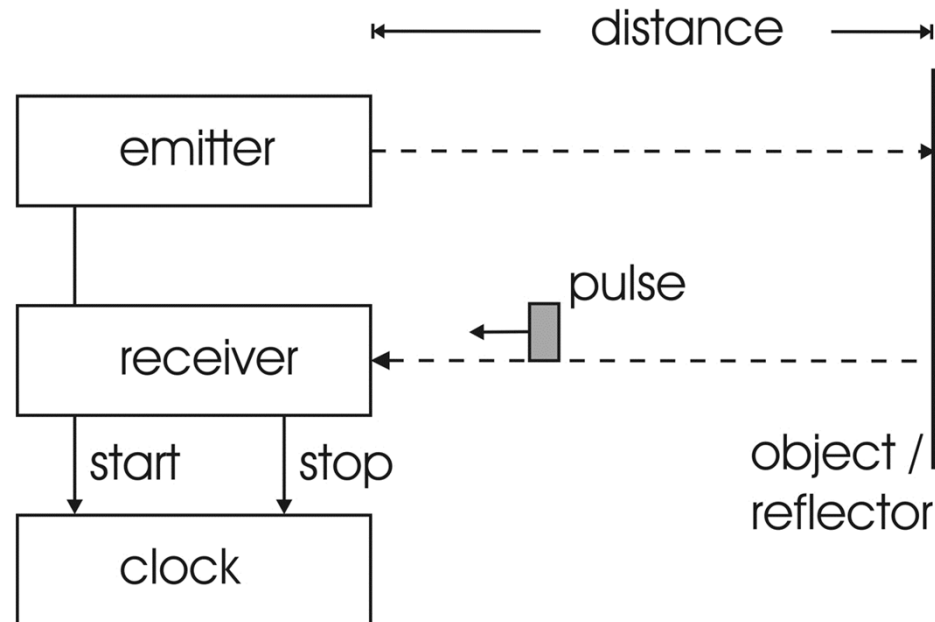
- Messbereich: < 100 m
- Messfrequenz: < 500 kHz
- Genauigkeit: < 1cm



➔ **mittlere Reichweite, höhere Genauigkeit (als Puls-Laufzeit), hohe Messfrequenz**

Messprinzip - Distanzmessverfahren

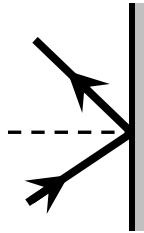
- **Puls-Laufzeit** (Time-of-Flight TOF)
 - Direkte Zeitmessung mittels Puls
- Messbereich: ~ 1000 m
- Messfrequenz: < 50 kHz
- Genauigkeit: ~ 1 cm



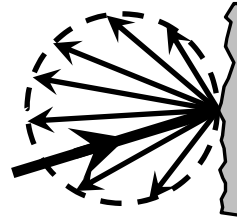
➔ Hohe Reichweite, mittlere Genauigkeit, mittlere Messfrequenz

Distanzmessung

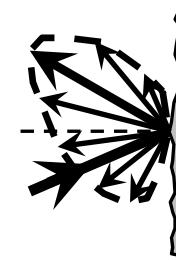
- reflektorlose Distanzmessung auf natürliche Objekte



Spiegelreflexion



Diffuse Reflexion



Gemischte Reflexion

- Einzelmessungen (single shots)
 - 1 Puls = 1 Messung (Mixed Pixel möglich)
 - Differenzierung zwischen first pulse/last pulse auf dem Sensor
- Signal-Rausch-Verhältnis beeinflusst von
 - Distanz
 - Auftreffwinkel
 - Materialeigenschaften (Farbe, Rauigkeit, Körnung, ...)

Inhalt

- Einleitung
- Messprinzip
- **Messgenauigkeit / Messfehler**
- Workflow
- Range Imaging
- Laserscanning
- Demonstration Imager 5006i und SR4000

Messgenauigkeit

- Einflussfaktoren auf die Messgenauigkeit

Sensor

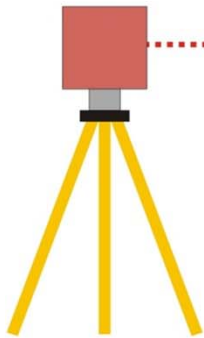
Distanzmessprinzip
Achsabweichungen (Scanner)
Kalibrierung
Temperaturabhängigkeit

Messraum

Meteo-Einflüsse
Hindernisse

Messobjekt

Grösse
Oberfläche
Krümmung



Messanordnung

Standortwahl
Distanz zum Messobjekt
Anzahl Standorte
Passpunkte

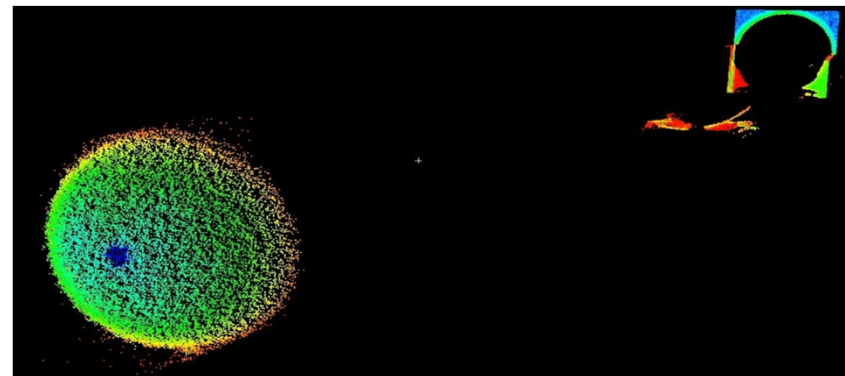
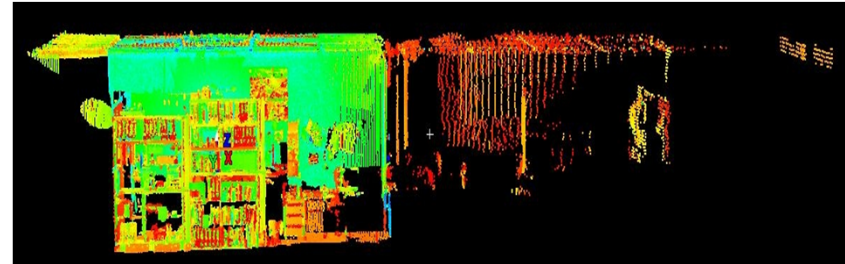
Auswertung

Registrierung
Modellierung



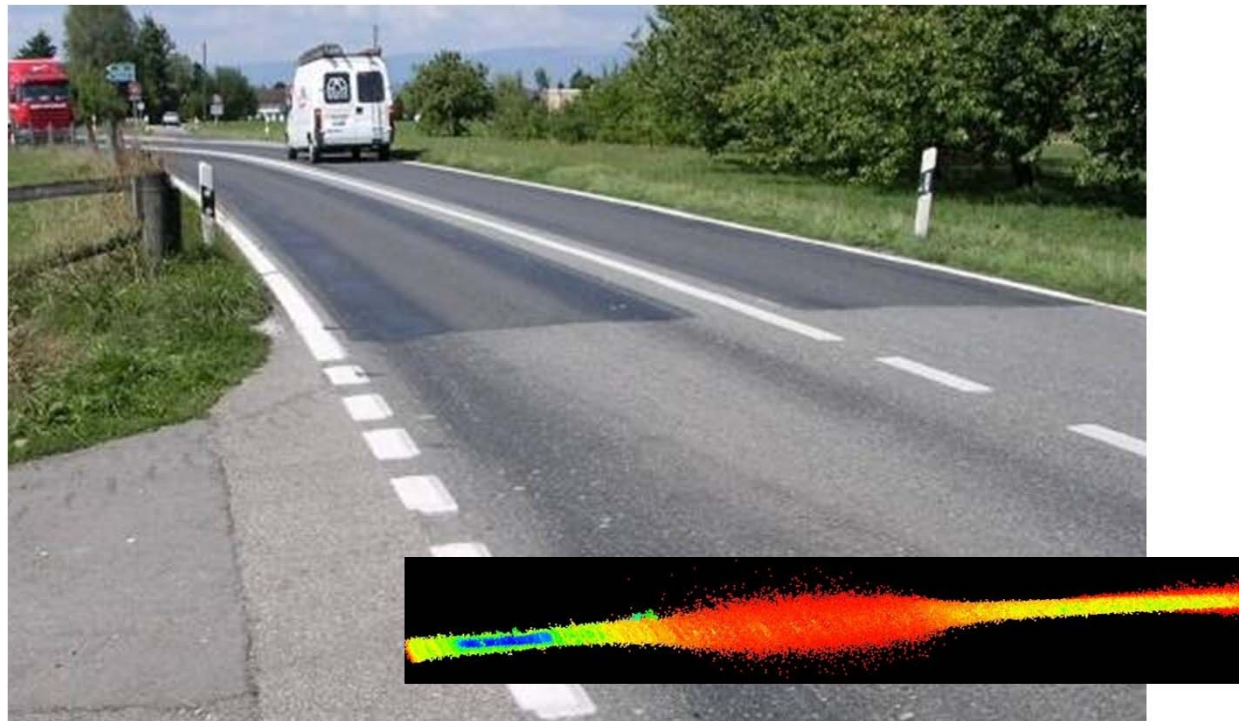
Messfehler

- Messfehler
 - Multipath
 - analog zu GPS: Mehrfachreflexionen des Signals zwischen Sender und Empfänger
 - besonders bei spiegelnden Objekten (Fenster, Metall, ...)
 - „Mixed“-Pixels
 - Laserstrahl wird von mehr als einem Objekt reflektiert
 - Footprint erstreckt sich auf mehrere, räumlich getrennte Objekte
 - Mischphase bei Phasenmesssystemen
 - Punkte liegen vor, zwischen oder hinter den Objekten



Messfehler

- Messrauschen
 - Messrauschen abhängig von
 - Distanz
 - Auftreffwinkel
 - Farbe, Reflektivität des Materials



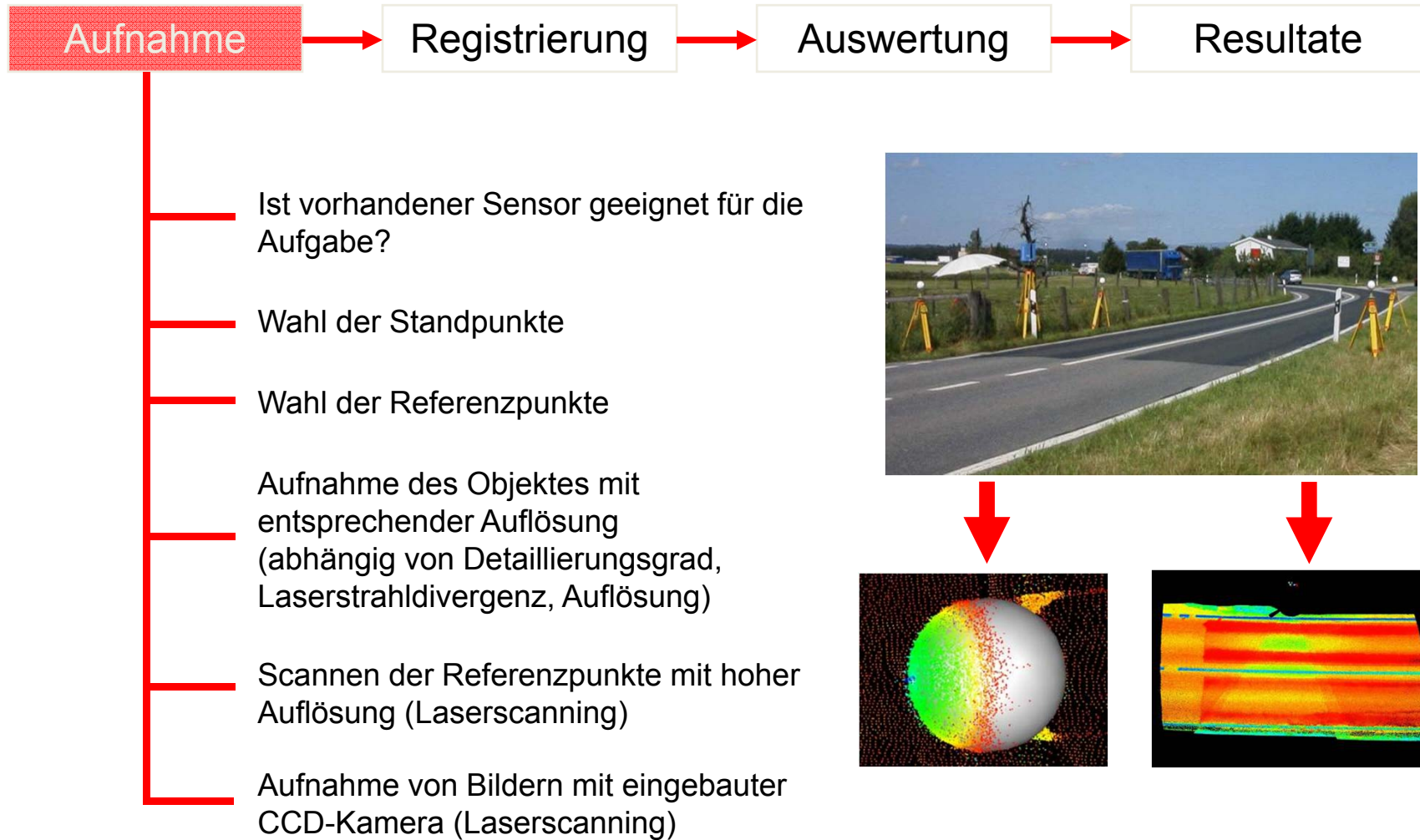
Inhalt

- Einleitung
- Messprinzip
- Messgenauigkeit / Messfehler
- **Workflow**
- Range Imaging
- Laserscanning
- Demonstration Imager 5006i und SR4000

Messablauf - Übersicht

- Vorbereitung: Welcher Sensor?
 - Welche Reichweite
 - Welche Genauigkeit
 - Welche Objektauflösung (Punktabstand)
 - Wie viel Zeit steht zur Verfügung (Messfrequenz)?
- Durchführen der Messungen (Aufnahme)
 - Aufnahmen
 - evtl. tachymetrische Messungen zur Sensor- oder Targetpositionierung
- Aufbereitung der Messungen (Auswertung)
 - Registrierung (Verknüpfung der Aufnahmen)
 - Ableitung von geometrischen Informationen (z.B. Abstands- und Volumenberechnung, Dreiecksvermaschung, 3D-Modellierung)

Verhältnis Aufnahme : Auswertung von ca. 1:10

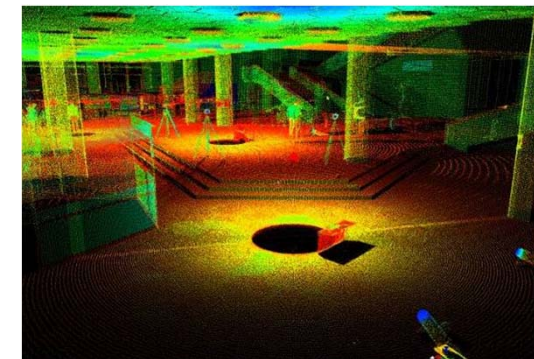




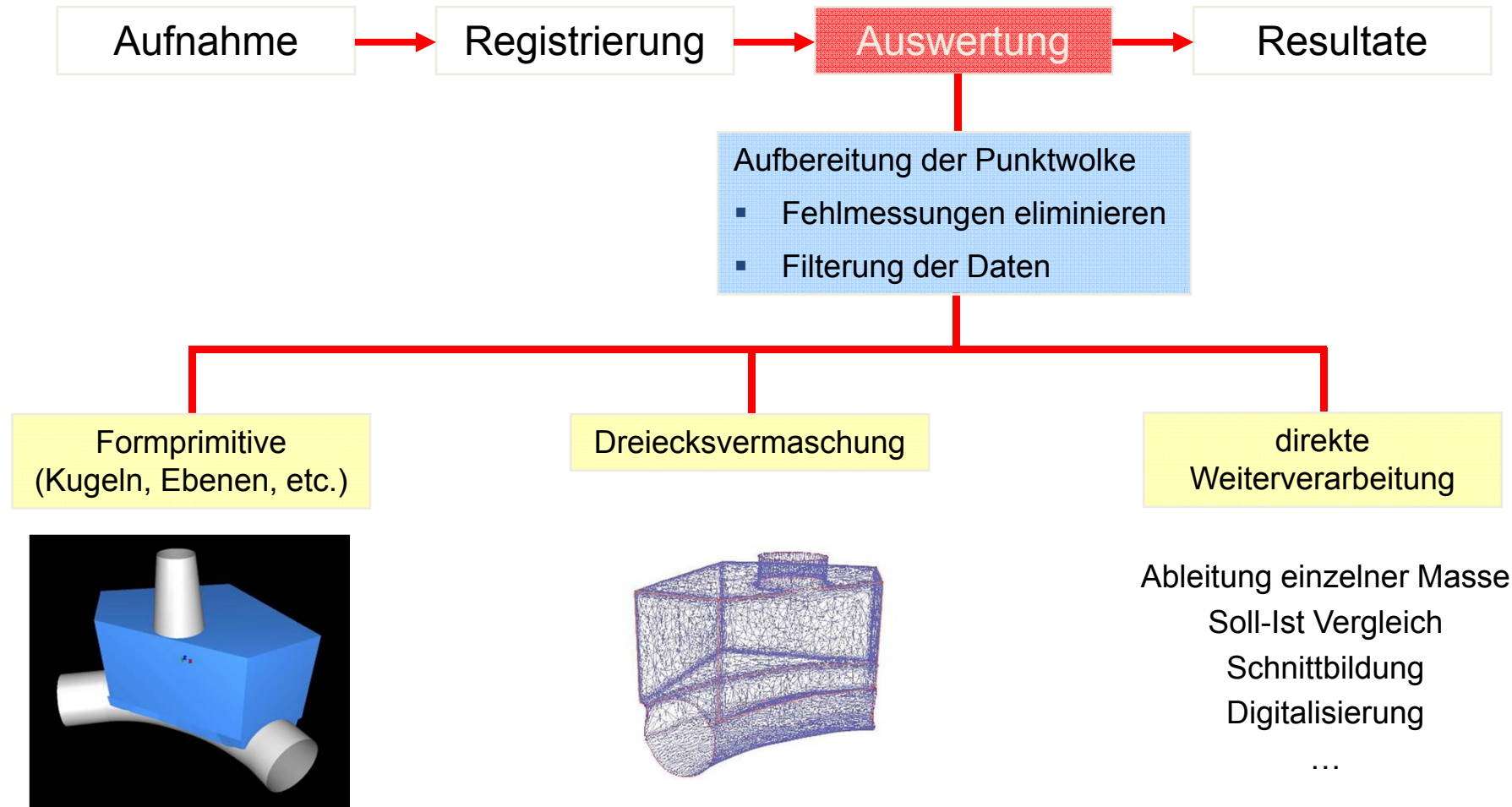
Registrierungsmöglichkeiten

- Mittels Referenzpunkten (Targets)
- Mittels Referenzobjekten (Kugeln, Zylinder, Kegeln, etc.)
- Überlappende Punktwolken (z.B. Iterative Closest Point, etc.)

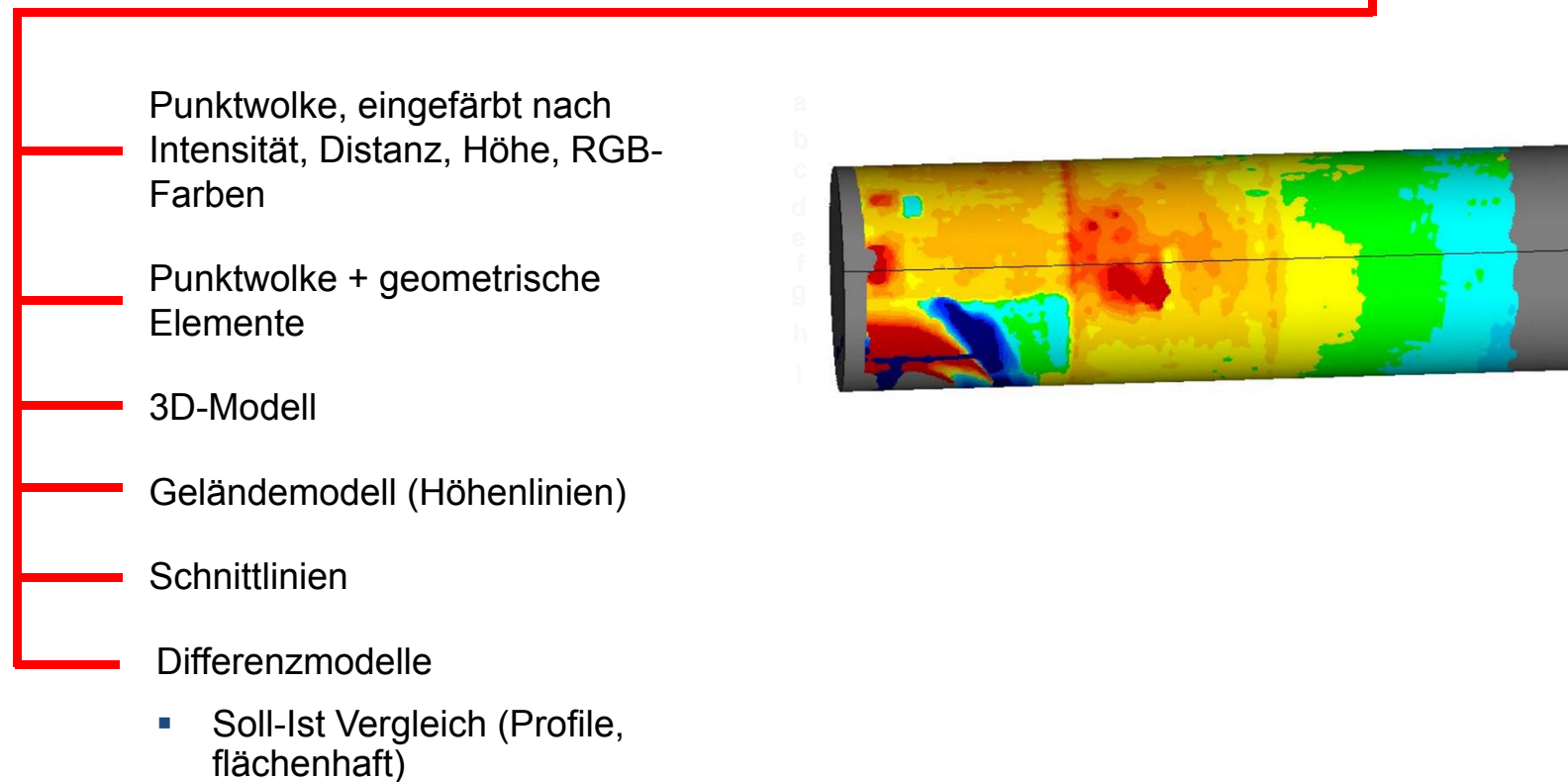
Georeferenzierung



Workflow



Workflow

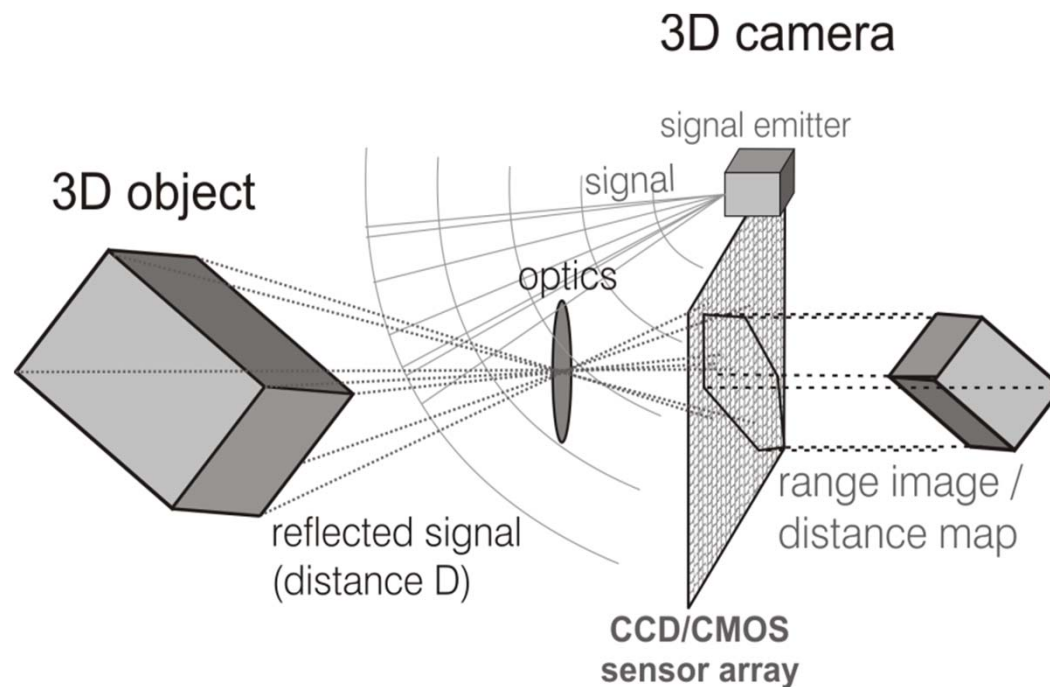


Inhalt

- Einleitung
- Messprinzip
- Messgenauigkeit / Messfehler
- Workflow
- **Range Imaging**
- Laserscanning
- Demonstration Imager 5006i und SR4000

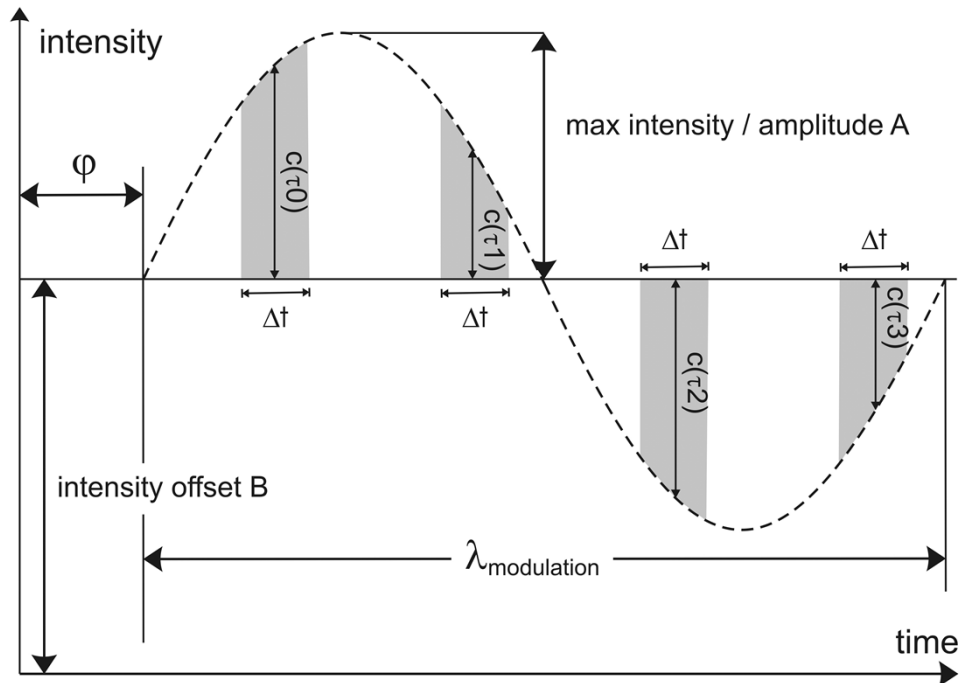
Range Imaging

- kombinierte CMOS/CCD-Technologie
- parallele Aufnahme der lokalen Helligkeit und eines Distanzbildes
- Distanzmessung erfolgt mittel time-of-flight (TOF) Verfahren für jedes Pixel



Range Imaging

- Tiefenbild durch detektierten Phasenversatz
- Signalabgriff an vier Punkten zum Bestimmen von Offset, Amplitude und Phase



$$D = D_{\text{max}} * \varphi / 2\pi$$

Range Imaging Sensoren



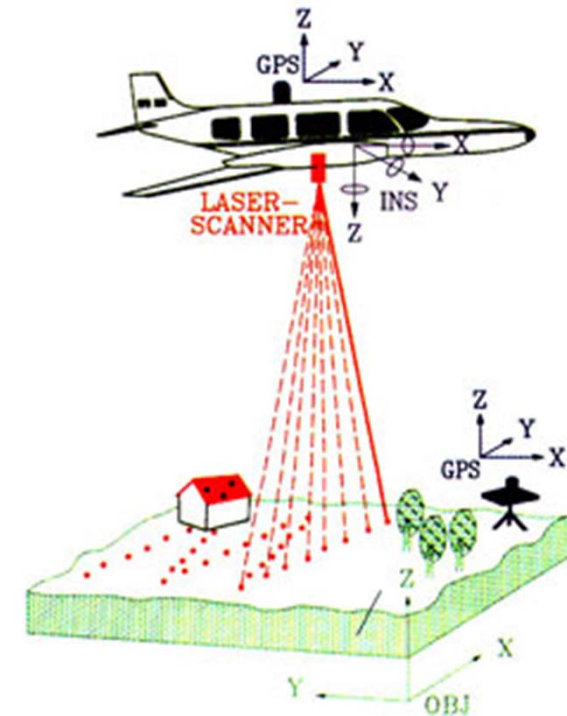
	MESA® Imaging SR4000	PMDTech CamCube 3.0
Pixelanzahl	176 (h) x 144 (v)	200 x 200
Messbereich	0.8 – 5 m / 0.8 – 10 m	0.3 – 7 m
Wiederholbarkeit	4 mm @ 2 m Distanz, 99% Reflektivität	< 3 mm @ 4m Distanz, 75% Reflektivität
Wellenlänge	850 nm	870 nm
Öffnungswinkel	43.6°(h) x 34.6°(v) 69° (h) x 56° (v)	40° x 40°
Frames/Sekunde	50 fps bei voller Auflösung	40 fps @ 200x200 Pixel 60 fps @ 176x144 Pixel 80 fps @ 160x120 Pixel

Inhalt

- Einleitung
- Messprinzip
- Messgenauigkeit / Messfehler
- Workflow
- Range Imaging
- **Laserscanning**
- Demonstration Imager 5006i und SR4000

Laserscanning

- Definition
 - Eine Methode der Geodäsie, bei der Objekte mit Hilfe von punktwisen Entfernungsmessungen erfasst werden.
- flugzeug-basiertes (airborne) Laserscanning
 - seit den 80er Jahren
 - für Geländemodelle / Oberflächenmodelle (Genauigkeiten > 1cm)
 - LiDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) bzw. LaDAR (**L**aser **D**etection **A**nd **R**anging)



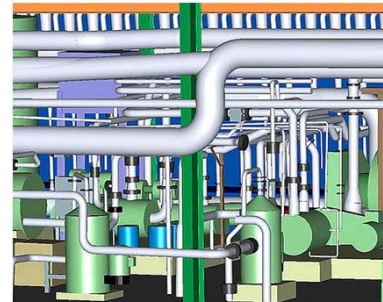
Laserscanning

- Terrestrisches Laserscanning
 - seit den späten 90er Jahren
 - operative Einsätze seit Beginn 21. Jh.
 - Entwicklungen in den letzten Jahren
 - Scan-Geschwindigkeit, Genauigkeit, Auflösung
 - Rechnerleistung
 - Instrumentenaufbau (Grösse, Gewicht, ...)
 - Integration in die Welt der Vermessung (bspw. Aufstellen über bekannten Punkten, GNSS-Schnittstelle, Freie Stationierung)



Laserscanning

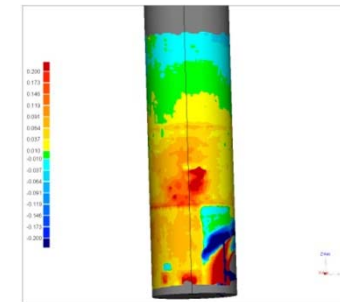
- Einsatzmöglichkeiten
 - klassisch
 - Denkmal- und Kulturgüterschutz
 - Fassaden
 - Fabrikanlagen
 - Facility Management
 - Forensik
 - Unfallforschung/Tatortaufnahme
 - Industrielle Messtechnik
 - Geomatik
 - Deformationsmessungen (z.B. Belastungsversuche)
 - Tunnelbau (Über-/Unterprofil, Setzungsmessungen)
 - Aufnahme von Sonderbauwerken



Quelle: Zoller+Fröhlich

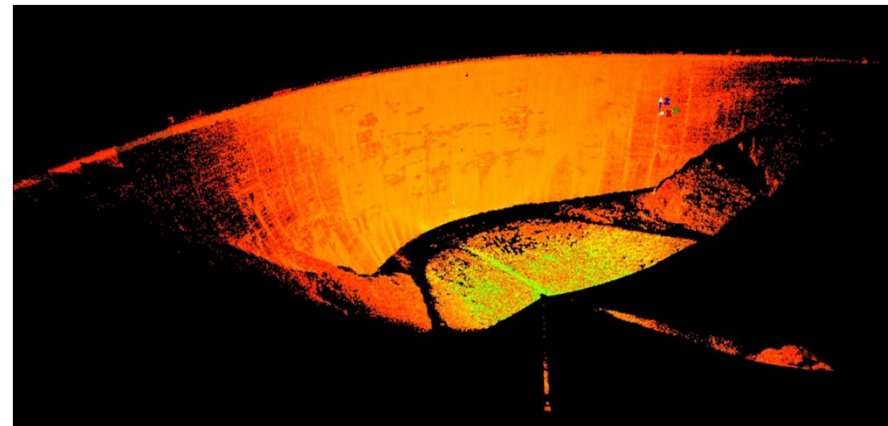
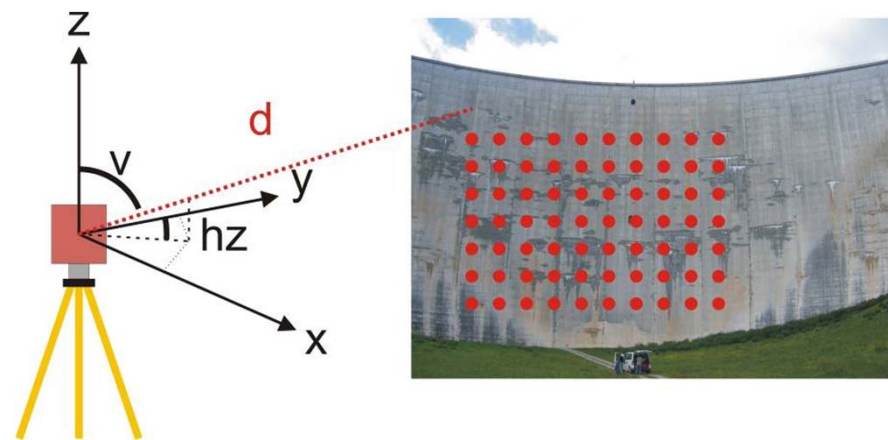


Quelle: Zoller+Fröhlich



Messprinzip

- Laserstrahl als Trägerwelle
 - von Laserdiode emittiert
 - an Objekten reflektiert
 - in Empfangseinheit ausgewertet
- Messelemente
 - Schrägdistanz (berührungslose Distanzmessung)
 - Horizontalrichtungen
 - Vertikalrichtungen
 - Intensität
- Ergebnis: 3D-Punktwolke



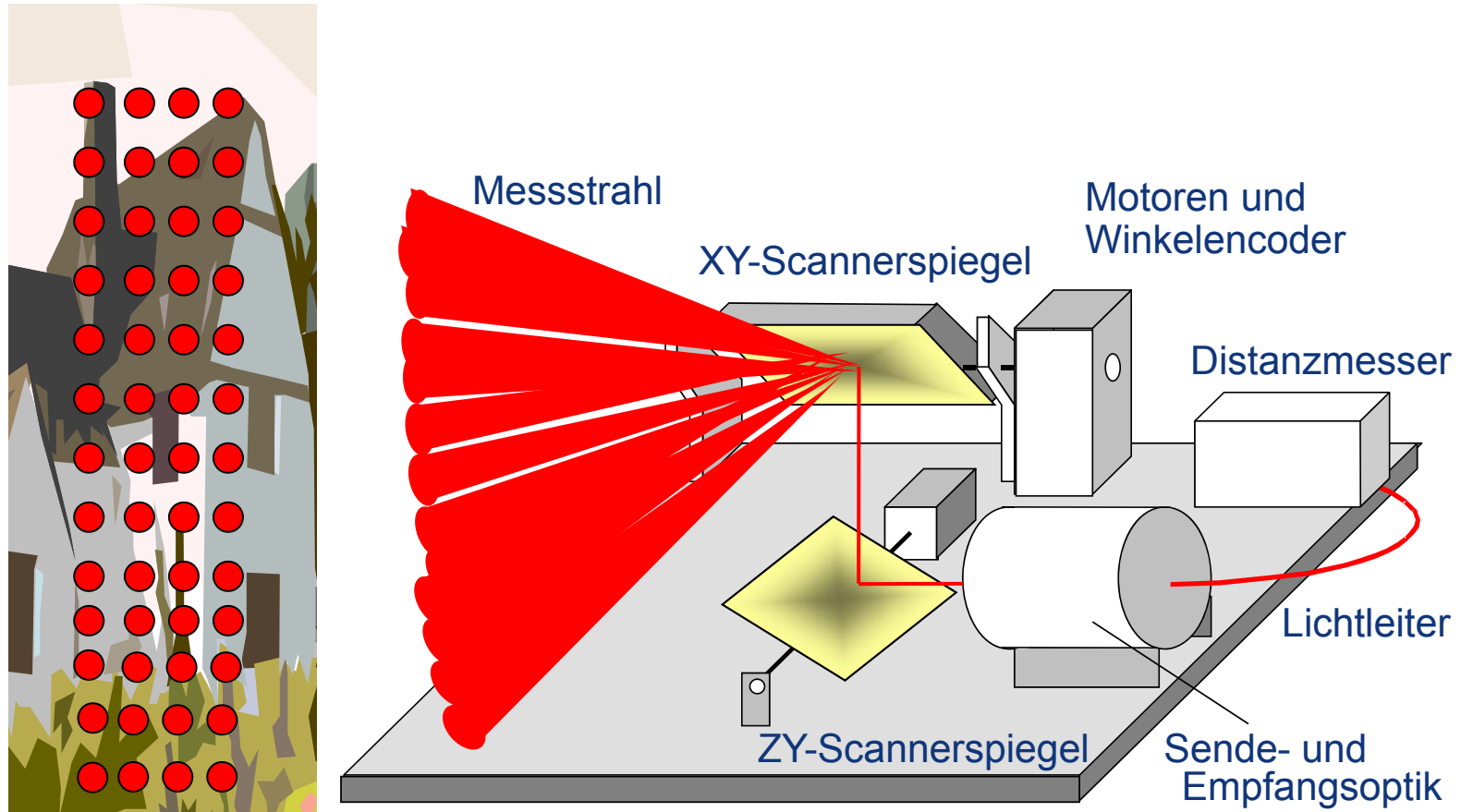
Klassifizierung von Laserscannern



Distanzmessverfahren	Pulslaufzeit	Phasenvergleichsverfahren
Messrate	bis zu 50'000 Punkte/s	bis zu 500'000 Punkte/s
max. Messdistanz	bis ca. 6'000 m	bis ca. 150 m
Genauigkeit	1 bis 60 mm (stark abhängig von Umgebungs-/Objekteigenschaften)	
Laserstrahldivergenz	individuell, teilweise nicht in den Spezifikationen angegeben	
Winkelauflösung	sehr individuell (verschiedene Scanmodi)	
Scanbereich	abhängig von der Strahlableitung	
Grösse/Gewicht/Preis	sehr individuell, hohe Investitionskosten	

Klassifizierung - Strahlableitung

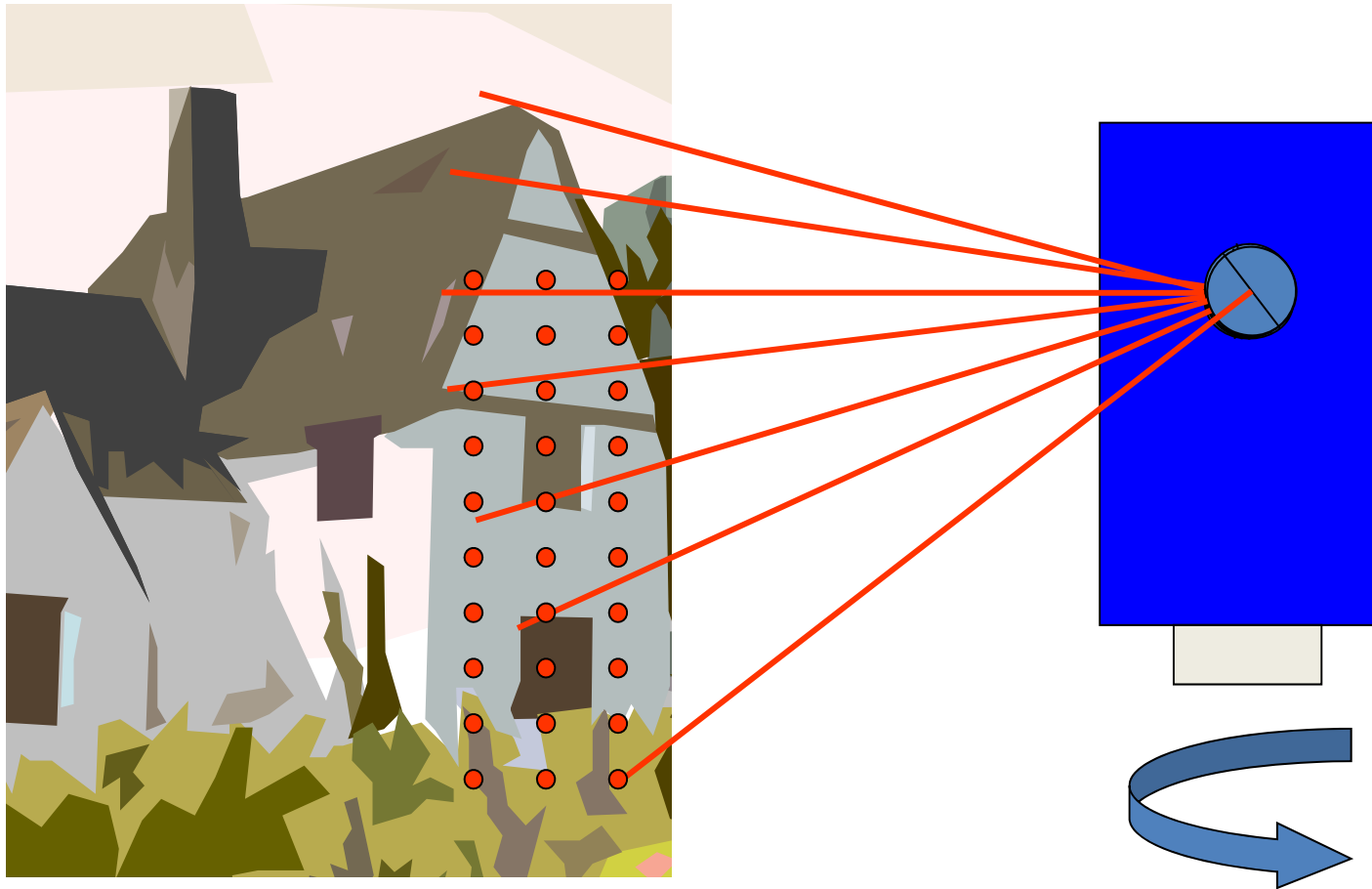
- Oszillierendes Spiegelsystem



Quelle: Schlemmer, Tutorial Laserscanning, XIV. Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich, 2004

Klassifizierung - Strahlablenkung

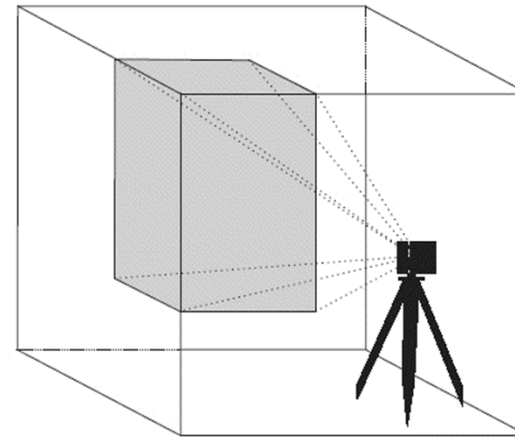
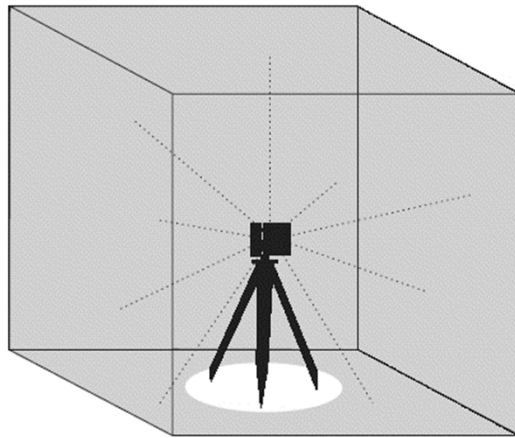
- Rotierendes System



Quelle: Ingensand, Intergeo 2004, Stuttgart

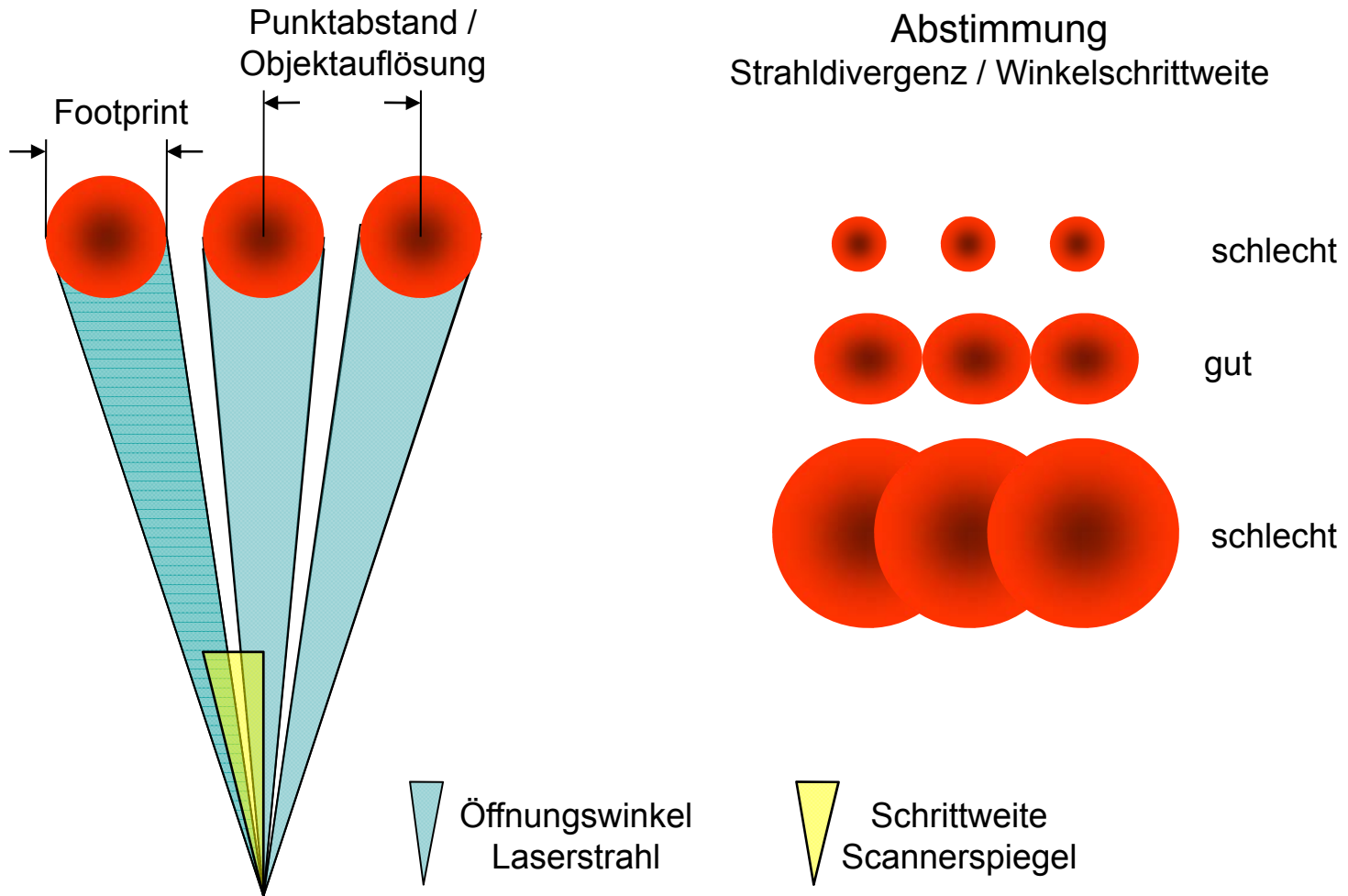
Field-of-View

- begrenzter Ausschnitt (z.B. $40^\circ \times 40^\circ$): Camera-Scanner
- gesamtes Panorama (z.B. $310^\circ \times 360^\circ$): Panorama-Scanner



Quelle: Runne et al., Optical 3-D Measurement Techniques, Wien, 2001

Laserstrahl



Quelle: Schlemmer, Tutorial Laserscanning, XIV. Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich, 2004

- Vorteile:
 - hohe Messgeschwindigkeit
 - hohe Punktdichte
 - flächenhafte Erfassung
 - 3D-Koordinaten (x,y,z) plus Intensitätswert
- Nachteile:
 - eher teure Technologie (Hardware + Software)
 - keine direkte Erfassung markanter Punkte
 - hoher Zeitaufwand beim Modellieren (Postprocessing)

- Herstellerfirmen terrestrischer Laserscanner
 - *High-Definition Surveying HDS*, Leica Geosystems (Schweiz)
 - *Riegl* (Österreich)
 - *Trimble* (USA) mit *Mensi* (Frankreich)
 - *Faro* (USA) mit *iQsun* (Deutschland)
 - *Zoller+Fröhlich* (Deutschland)
 - *Optech* (Kanada)
 - *Callidus* (Deutschland)
 - u.a.

HDS Leica Geosystems (Schweiz)



ScanStation 2

Reichweite: ~ 300 m
Genauigkeit: 6 mm (Position bei Einzelmessung)
Geschwindigkeit: ~ 50'000 Pkt/Sek



HDS6100

Reichweite: ~ 79 m
Genauigkeit: 9 mm (Distanz bei Einzelmessung)
Geschwindigkeit: ~ 500'000 Pkt/Sek



HDS4400

Reichweite: ~ 700 m
Genauigkeit: 20 mm (Distanz bei Einzelmessung)
Geschwindigkeit: ~ 4400 Pkt/Sek



Scan Station C10

Reichweite: ~ 300 m
Genauigkeit: 6 mm (Position bei Einzelmessung)
Geschwindigkeit: ~ 50'000 Pkt/Sek

Riegl (Österreich)



LMS-Z420i

Reichweite: 2-1000 m
Genauigkeit: ~10 mm
Geschwindigkeit: 11000 Pkt/Sek



LPM-321

Reichweite: ~6000 m
Genauigkeit: ~25 mm
Geschwindigkeit: 1.000 Pkt/Sek
first pulse – last pulse



VZ-400

Reichweite: ~500 m
Genauigkeit: ~5 mm
Geschwindigkeit: bis 125'000 Pkt/Sek
first pulse – last pulse
Integrierter GPS-Empfänger

Zoller+Fröhlich (Deutschland)

Imager 5003

Reichweite: ~55 m
Genauigkeit: ~1 cm
Geschwindigkeit: 500.000 Pkt/Sek



Geschwindigkeit: 900 rps



Imager 5006i

Reichweite: ~ 80m
Genauigkeit: < 1cm
Geschwindigkeit: 500.000 Pkt/Sek

Applikationen: Denkmalschutz (Kapelle Neubrück)

- Ungünstige Situation: Fluss, Strasse, Eisenbahn
- 4 Standpunkte (vor jeder Seite der Kapelle)
- Verknüpfungspunkte: weisse Kugeln

Verknüpfungspunkte



Situation

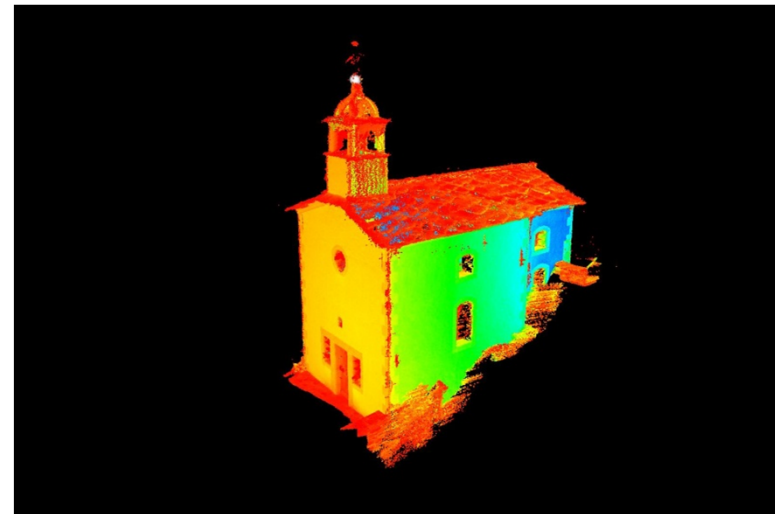
Applikationen: Denkmalschutz (Kapelle Neubrück)

Tachymeter-Messungen

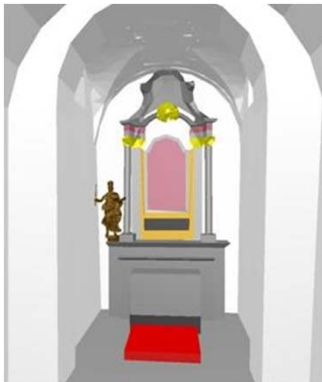


Laserscanner-Messungen

Applikationen: Denkmalschutz (Kapelle Neubrück)

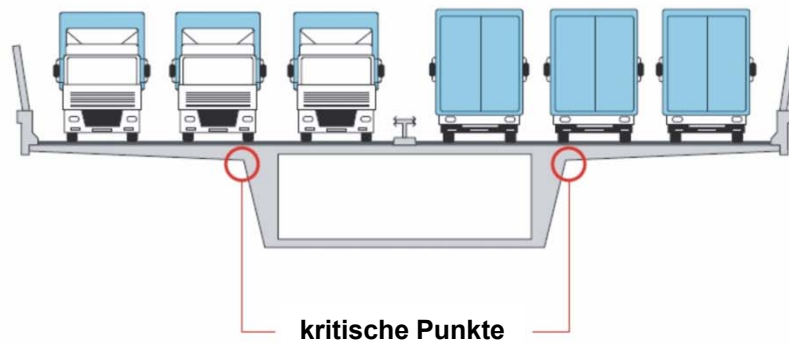


Applikationen: Denkmalschutz (Kapelle Neubrück)



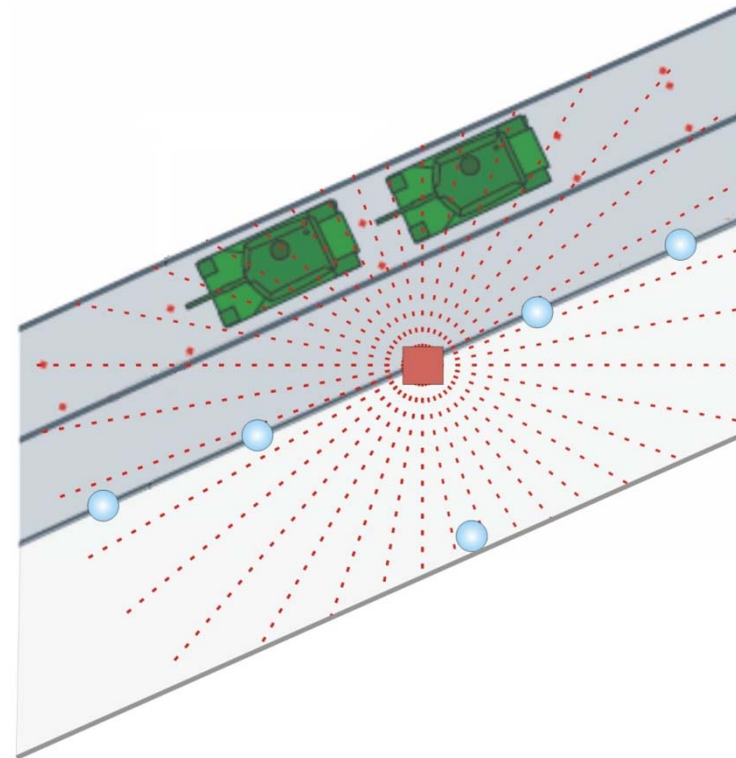
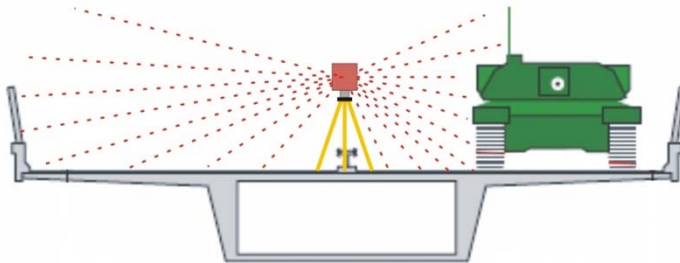
Applikationen: Deformationsmessungen

- Problemstellung
 - Verhalten des Viaduktes bei grosser Belastung
 - Laserscanning: Bestimmung der Deformationen ab Fahrbahnmitte bei kritischen Punkten



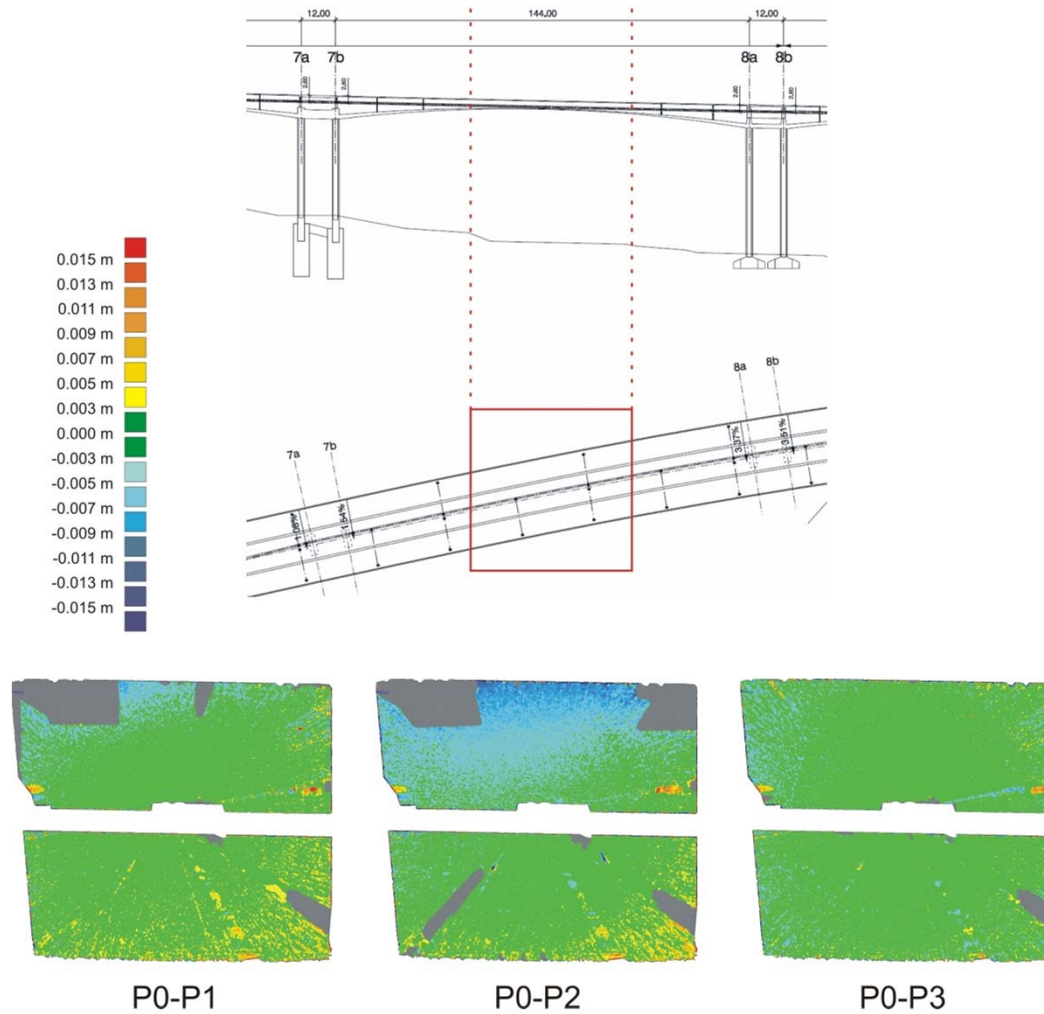
Applikationen: Deformationsmessungen

- Aufnahme
 - Laserscanner: Imager 5006 (Zoller+Fröhlich)
 - Kugeln als Referenzpunkte
 - Scandauer: ca. 4 Minuten



Applikationen: Deformationsmessungen

- Resultat



Applikation: Aufnahme Sonderbauwerke



Applikation – Aufnahme von Schachtkammern



TLS

Applikation: Aufnahme Sonderbauwerke

- Eigenschaften ZLS07
 - Distanzmessung nach dem direkten Time-of-Flight Verfahren
 - Max. Messdistanz
 - 32 m (mm-Auflösung)
 - 80 m (cm-Auflösung)
 - Winkelauflösung
 - max. 0.001° horizontal
 - max. 0.25° vertikal
 - Erfassung der Remission
 - Field-of-View
 - 360° horizontal / 165° vertikal
 - 3D-Einzelpunktgenauigkeit (1σ): < 15 mm @ 10 m
 - Messgeschwindigkeit: 13'500 Punkte/s
 - Durchschnittliche Messdauer eines 360° -Scans: ca. 100 s



Applikation: Aufnahme Sonderbauwerke

Terrestrischer Laserscanner

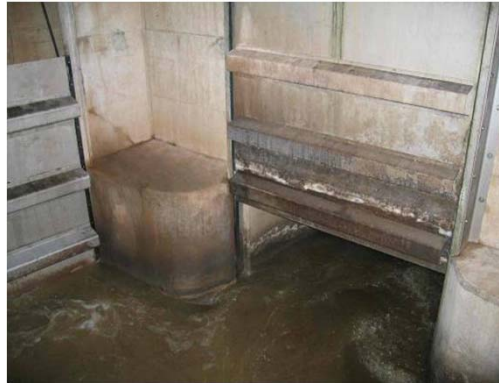


KMS-Konfiguration



Applikation: Aufnahme Sonderbauwerke

- Aufnahme von Schachtkammern aus Bereich Wasser/Abwasser



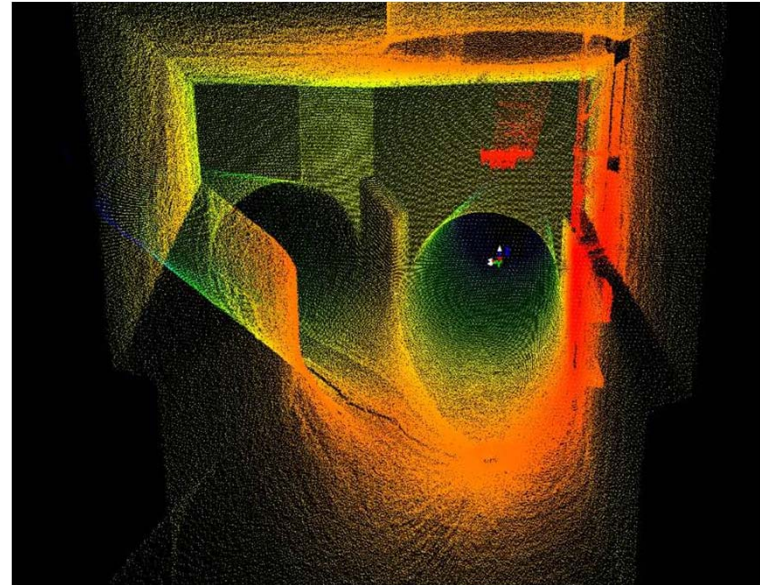
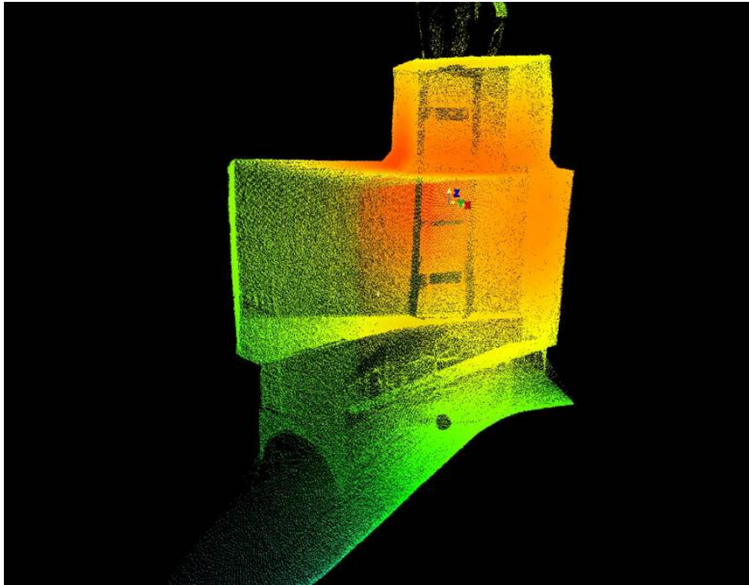
Applikation: Aufnahme Sonderbauwerke



Stadt Zürich
Geomatik + Vermessung

Applikation: Aufnahme Sonderbauwerke

- 3D-Punktwolke



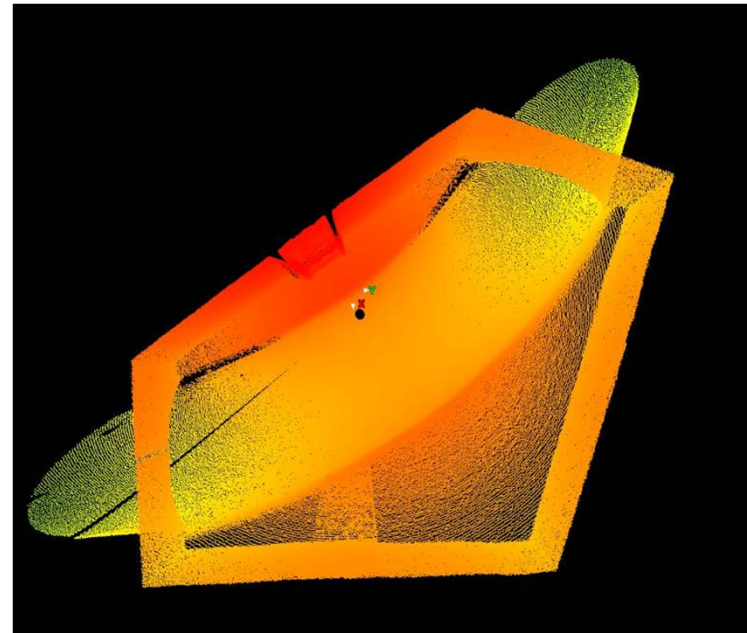
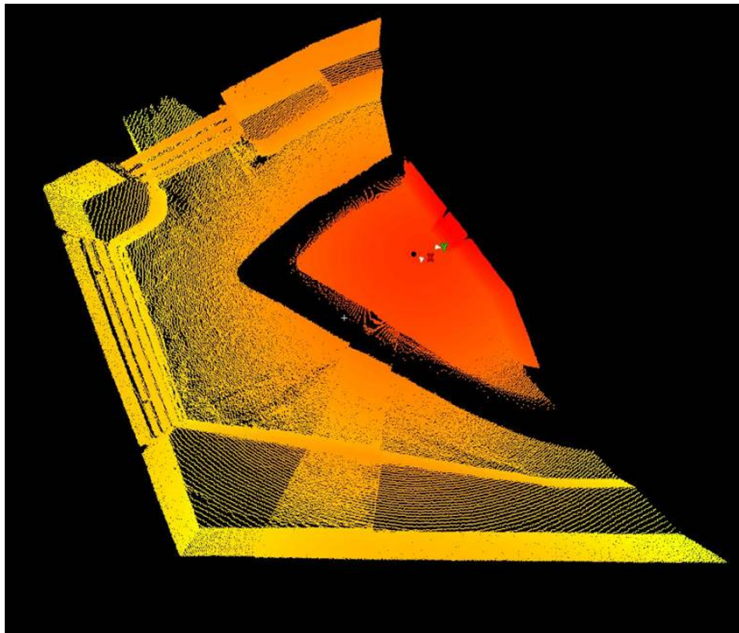
Applikation: Aufnahme Sonderbauwerke

- Technische Installationen

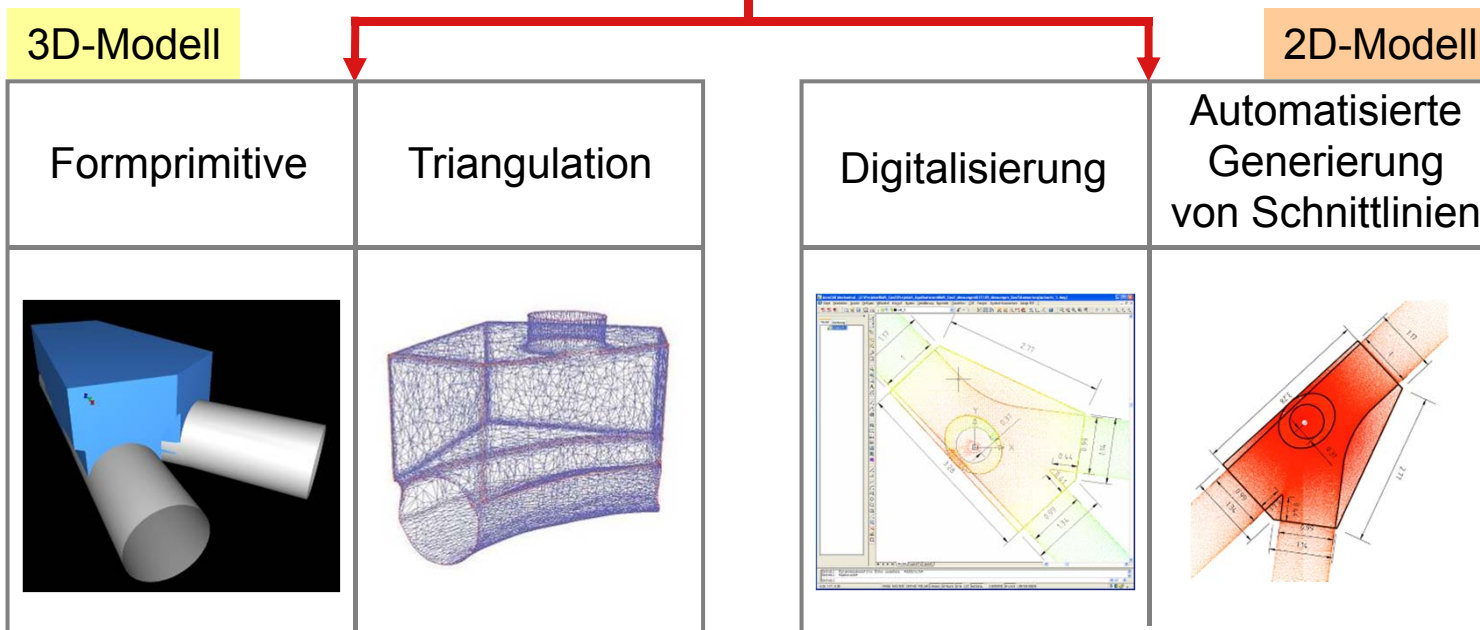
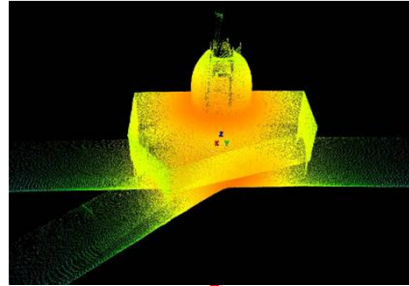


Applikation: Aufnahme Sonderbauwerke

- Innenansichten Schachtkammern



Applikation: Aufnahme Sonderbauwerke



Inhalt

- Einleitung
- Messprinzip
- Messgenauigkeit / Messfehler
- Workflow
- Range Imaging
- Laserscanning
- **Demonstration Imager 5006i und SR4000**