

# Zustandsbeurteilung von Ingenieurbauwerken mittels statischem und kinematischem Laserscanning

Werner LIENHART<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Inst. f. Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz,  
Graz, Österreich

E-Mail: werner.lienhart@tugraz.at

**Kurzfassung.** Laserscanning hat sich in den letzten Jahren zu einem Standardverfahren zur schnellen und berührungslosen Geometrieerfassung von Objekten entwickelt. In diesem Beitrag wird die Einsatzfähigkeit von Laserscanning für die Zustandsbeurteilung von Ingenieurbauten diskutiert. Anhand von Fallbeispielen wird gezeigt, dass die große Punktdichte von Laserscannern gewinnbringend eingesetzt werden kann, um einerseits lokale Defekte zu erkennen und um andererseits durch die hohe Überbestimmung abgeleitete Parameter mit hoher Präzision zu bestimmen. Neben den Vorteilen werden aber auch typische Fehlerquellen aufgezeigt. Scanschatten, schwarze Löcher und Geisterbilder können die Brauchbarkeit von Punktwolken einschränken und ein Eindringen des Messstrahls in das Messobjekt die Daten sogar unbrauchbar machen.

## Einführung

Im letzten Jahrzehnt hat sich Laserscanning zu einem Standardverfahren in der geodätischen Aufnahme entwickelt. Moderne Instrumente ermöglichen eine rasche Erfassung von 3D Punktwolken und die Verknüpfung von einzelnen 3D Punktwolken zu einer georeferenzierten Punktwolke ist mit heutigen Softwarepaketen durch wenige Mausklicke möglich. Die Modellierung der Punktwolke benötigt jedoch noch viele manuelle Schritte und ist besonders bei unregelmäßigen Objekten aufwändig. Wenn zusätzlich noch ein Vergleich zu einem Referenzmodell oder ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Messepochen durchgeführt werden soll, dann ist das Ergebnis von der eingesetzten Sensorik, von der Aufnahmegeometrie, von der Auswertestrategie und vom Bediener der Softwarepakete abhängig. In diesem Beitrag wird anhand von Fallbeispielen der Einsatz von Laserscanning zur Zustandsbeurteilung von Ingenieurbauten diskutiert und mögliche Fehlerquellen werden aufgezeigt.



# 1. Heutiger Stand von geodätischem Laserscanning

## 1.1 Instrumentarium

Im Gegensatz zu den ersten Laserscannern ermöglichen heutige Instrumente sehr hohe Messraten, lange Reichweiten und dies bei einem niedrigen Messrauschen. Grundsätzlich gibt es spezielle Scanner für die Industriemessung, d.h. für kurze Reichweiten und mit einem Messrauschen im Bereich von 1/10 mm und Laserscanner mit langen Reichweiten von teilweise mehreren km und einem Messrauschen von mehreren mm bis cm. Tabelle 1 zeigt typische Spezifikationen anhand einer Auswahl von terrestrischen Laserscannern. Neben Laserscannern für Stative und Messpfeiler sind heute auch Laserscanner für die Montage auf Fahrzeugen, Flugzeugen und sogar Drohnen verfügbar. Für den Einsatz auf Drohnen ist vor allem ein geringes Gewicht des Laserscanners entscheidend, siehe z.B. [1]. Wenn sich die Laserscanner auf einer bewegten Plattform befinden, wird auch von mobilem oder kinematischen Laserscanning gesprochen.

**Tabelle 1.** Übersicht über die Spezifikationen einer Auswahl heutiger terrestrischer Laserscanner (Angaben laut den Datenblättern [2], [3] und [4])

Hersteller	Scanner	Maximale Messrate	Maximale Reichweite	Präzision der Distanzmessung
Leica Geosystems AG	P50	1 Million Punkte/Sekunde	> 1 km	3 mm + 10ppm im Long Range Modus
Riegl	VZ2000i	500 000 Punkte/Sekunde	2.5 km	3 mm
Surphaser	IR_100HQ	1 Million Punkte/Sekunde	35 m	0.07 mm @ 10 m

## 1.2 Auswertung

In der Auswertung müssen zuerst die Punktwolken einzelner Aufnahmeorte durch eine Registrierung zusammengefügt und in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert werden. Für hohe Genauigkeitsansprüche werden diese Punktwolken meist durch eingescannte Referenzpunkte mit bekannten Koordinaten miteinander verknüpft.

Für die Zustandsbeurteilung von Ingenieurbauten ist vor allem ein Vergleich der tatsächlichen Ist-Geometrie eines Objektes mit einer Designgeometrie oder der Geometrie zu einem früheren Zeitpunkt von Interesse. Die Ableitung von Differenzen kann dabei in 2D durch einen Vergleich von einzelnen Profilen oder in 3D erfolgen. Für die 3D Auswertung sind verschiedene Ansätze möglich. Einerseits kann ein direkter Vergleich der Punktwolken (C2C, cloud to cloud) durchgeführt werden oder ein Vergleich mit einem vermaschten Modell. Hier ist eine weitere Unterteilung möglich. Es können Deformationen durch einen Vergleich einer Punktwolke mit einem vermaschten Modell (C2M, cloud to mesh), durch einen Vergleich zweier vermaschter Modelle (M2M, mesh to mesh) oder durch einen Vergleich einer geglätteten Punktwolke mit einem vermaschten Modell (M3C2) abgeleitet werden [5]. Grundsätzliches Problem dabei ist, dass unterschiedliche Ansätze unterschiedliche Ergebnisse liefern, sowie dass die einzelnen Ansätze in verschiedenen Softwarepaketen unterschiedlich implementiert sind. Dies ist insbesondere dann ein Problem, wenn bei Langzeitüberwachungen einzelne Epochen von unterschiedlichen Personen gemessen und ausgewertet werden.

### 1.3 Genauigkeitsaspekte

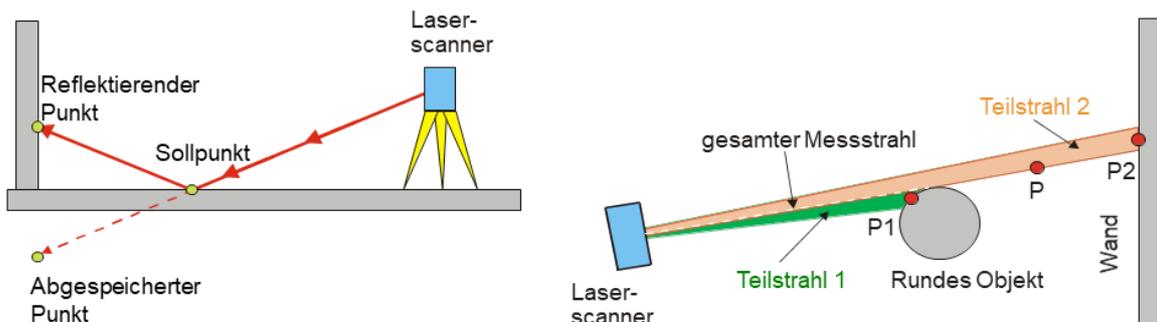
Ziel jedes Laserscans ist ein vollständiges digitales 3D Abbild eines Objektes. Die Vollständigkeit kann jedoch durch Scanschatten oder „schwarze Löcher“ reduziert werden. Scanschatten entstehen, wenn die direkte Sichtverbindung vom Laserscanner zum Objekt unterbrochen ist. Abbildung 1 zeigt Scanschatten bei einer Gebäudeaufnahme, verursacht durch Pflanzen und Gartenmöbel.

Weiters ist bei Laserscanning zu berücksichtigen, dass immer nur ein Teil des ausgestrahlten Signals zum Instrument zurückgestreut wird. Ein Großteil des Signals wird bei einer nichtorthogonalen Ausrichtung des Objektes in eine andere Richtung reflektiert. Im Extremfall reflektiert das Objekt so stark, dass kein Signal zum Instrument zurückgestreut wird. Abbildung 1 zeigt als Beispiel von schwarzen Löchern, dass bei den eingescannten Autos die Kennzeichen nicht in der Punktwolke enthalten sind.

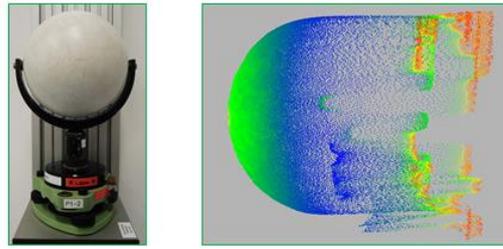


**Abb. 1.** Scanschatten (rot) bei der Aufnahme (links) und „schwarze Löcher“ an der Position der Fahrzeugkennzeichen, verursacht durch Totalreflexion (rechts)

Im Falle von Totalreflexion kann es auch vorkommen, dass der abgelenkte Messstrahl von einem anderen Objekt zurückreflektiert wird, siehe Abbildung 2-links. In diesem Fall wird eine Winkelmessung mit einer falschen Distanzmessung kombiniert und ein Geisterpunkt entsteht. Solche Probleme treten häufig bei Messungen in Industriehallen mit stark reflektierender Bodenoberfläche auf. Zu berücksichtigen ist weiters, dass der Laserstrahl einen Divergenzwinkel besitzt. Mit zunehmender Distanz nimmt die Größe des Fußabdrucks zu und wenn sich zwei Objekte nahe beieinander befinden, kann es zu einem gemischten Rücksignal kommen. Dadurch entstehen gemischte Distanzen (Abbildung 2-rechts) und in der 3D Punktwolke sind die typischen Kometenschweife sichtbar (Abbildung 3).



**Abb. 2.** Geisterpunkt verursacht durch Totalreflexion (links), und Kometenschweif, verursacht durch Rückstreuung an mehreren Objekten (rechts)



**Abb. 3.** Halbkugel vor einer Wand (links), Kometenschweif in der 3D Punktwolke (rechts)

Neben all den bereits diskutierten Fehlereinflüssen beeinflussen unter anderem das Material des Objektes, dessen Oberflächenrauigkeit und der Auftreffwinkel die erreichbare Präzision und Genauigkeit. Wie in [6] gezeigt, kann bei manchen Laserscannern aus den gemessenen Intensitäten des rückgestrahlten Signals auf die Messpräzision rückgeschlossen werden.

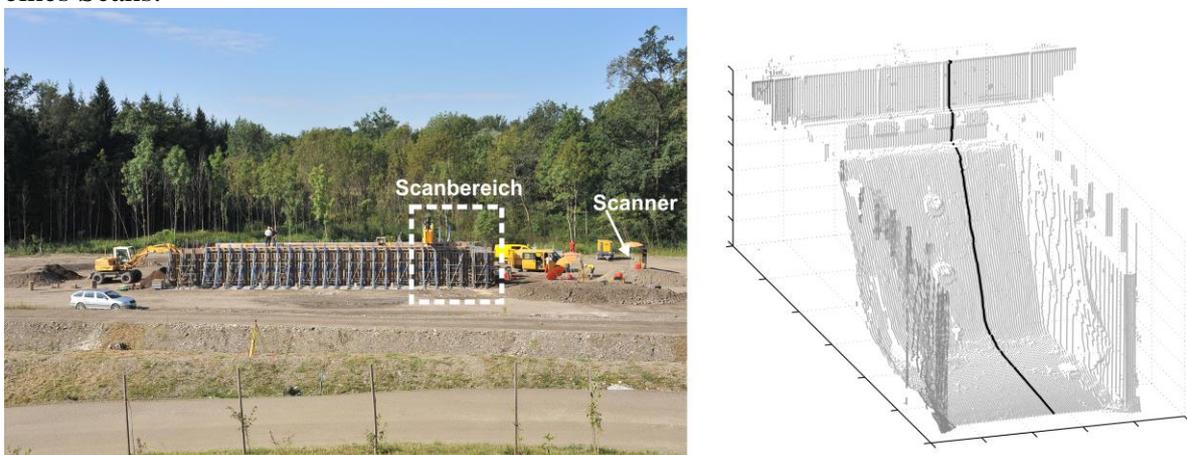
Schlussendlich darf auch bei Laserscannmessungen nicht vergessen werden, dass sich das Signal durch die Atmosphäre ausbreitet und daher sowohl die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserlichtes als auch die Beugung des Messstrahls von den lokalen atmosphärischen Bedingungen abhängen [7].

## 2. Anwendungsbeispiele

Im Folgenden werden vier Anwendungsbeispiele vorgestellt. Im ersten Beispiel wird gezeigt, dass aus statischen Laserscandaten zuverlässig Deformationen und Neigungen abgeleitet werden können. Das zweite Beispiel Ziel konzentriert sich auf die hochauflösende Erfassung einer Druckrohrleitung. Im dritten Beispiel wird die Eindringtiefe des Laserstrahls diskutiert und im vierten Beispiel die Einsatzmöglichkeit von dynamischen Laserscanning gezeigt.

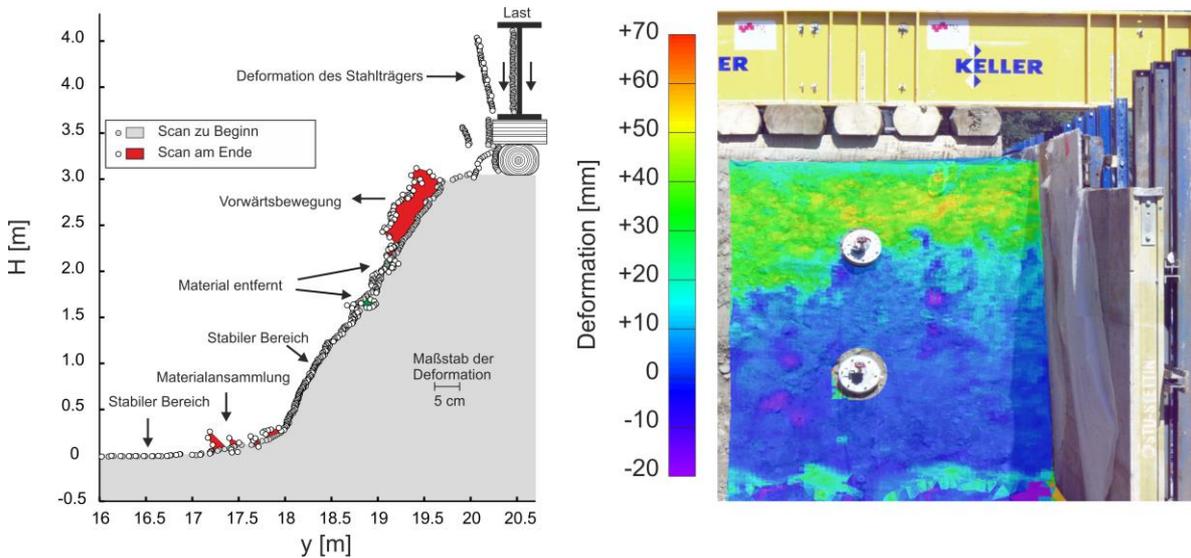
### 2.1 Dambruchexperiment

Im Rahmen eines Dambruchversuchs wurde vertikale Last auf einen Erddamm aufgebracht und diese stufenweise erhöht. Mittels verschiedener geodätischer und faseroptischer Messverfahren sollte die Deformation der Oberfläche bestimmt werden [8]. Die Dammoberfläche wurde in jeder Laststufe mittels einer scannenden Totalstation eingescannt. Abbildung 4 zeigt den generellen Aufbau des Versuches und die Punktwolke eines Scans.



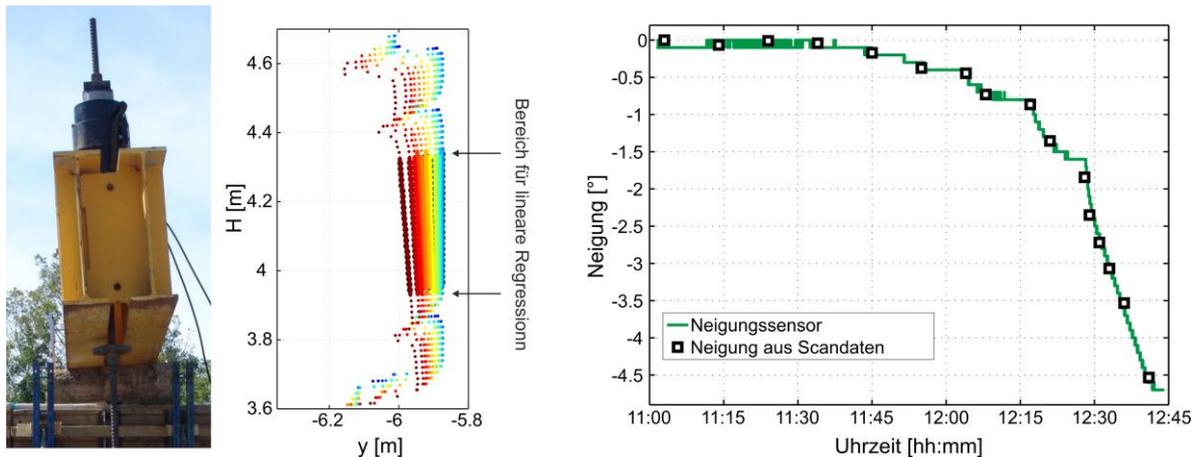
**Abb. 4.** Versuchsdam und Position des Laserscanners (rechts), Punktwolke eines Scans mit gekennzeichnetem Profil in schwarz (rechts)

Die einzelnen Scanepochen wurden in 2D und in 3D ausgewertet. Für die 2D Auswertung wurden einzelne vertikale Profile durch die Punktwolke gelegt. Abbildung 5-links zeigt dasselbe Profil durch die erste Punktwolke zu Beginn des Experimentes und durch die Punktwolke am Ende des Experimentes. Die Deformationen sind zur besseren Veranschaulichung überhöht dargestellt. Erkennbar ist, dass der untere und der mittlere Teil des Dammes stabil bleiben. Im oberen Teil wird Material nach vorne geschoben. Teilweise rutschen einzelne Erdbrocken ab und sammeln sich im unteren Bereich des Dammes an. Ebenso zu erkennen ist, dass der lasteinbringende Stahlträger auch eine Deformation erfährt. Die flächenhafte Auswertung (Abbildung 5-rechts) zeigt ein ähnliches Bild. Zusätzlich erkennbar ist, dass im linken Bereich des Dammes die bewegte Zone weiter nach unten reicht. Dies ist dadurch begründet, dass in diesem Bereich die Verankerung des oberen Spinnankers weniger weit in den Damm hineinreichte.



**Abb. 5.** Linienhafte (links) und flächenhafte (rechts) Deformationsauswertung zweier Punktwolken

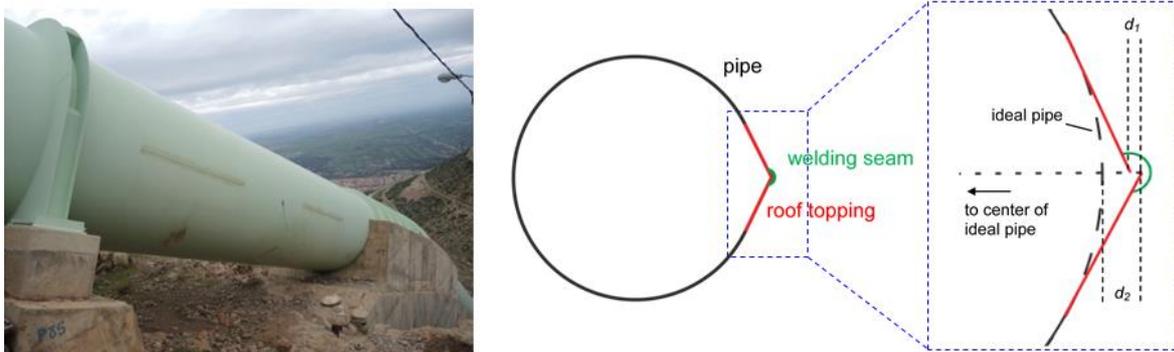
Wie bereits erwähnt, erfuhr der Stahlträger ebenfalls eine Deformation. Die Deformation bestand zum Großteil aus einer Verkippung des Trägers. Der große Vorteil von Laserscandaten ist, dass, obwohl die Einzelmessungen höheres Messrauschen besitzen, durch die hohe Überbestimmung abgeleitete Größen mit wesentlich besserer Präzision abgeleitet werden können. Dies ist in Abbildung 6 dargestellt. In Abbildung 6-links sieht man die Lage des ursprünglich vertikalen Trägers am Ende des Experimentes. Da dieser Träger ebenfalls mitgescannt wurde, kann unter der Annahme einer reinen Starrkörperbewegung eine Regressionsgerade im Bereich des Trägers durch die Scandaten jeder Laststufe berechnet werden. Wenn man die Steigung der Regressionsgeraden aller Messepochen miteinander vergleicht, kann die Entwicklung der Neigungsänderung des Trägers bestimmt werden. Um die erreichbare Genauigkeit beurteilen zu können, wurde auf dem Träger ein konventioneller Neigungssensor montiert. Wie Abbildung 6-rechts zeigt, passen die aus den Scandaten abgeleiteten Neigungen sehr gut zu den direkt gemessenen Neigungen des Neigungssensors. Die Abweichungen sind typischerweise weniger als  $0.1^\circ$ .



**Abb. 6.** Lage des Trägers am Ende des Experimentes (links), Profile aus den Scandaten im Bereich des Trägers, wobei die unterschiedlichen Farben unterschiedliche Messepochen darstellen (Mitte), Neigungsverlauf berechnet aus den Scandaten, gemessen mit einem Neigungssensor

## 2.2 Druckrohrleitung

Laserscannmessungen können auch zum Vergleich einer realen Geometrie mit einer Sollgeometrie herangezogen werden. Bei Druckrohrleitungen ist der Sollquerschnitt kreisförmig. Aufgrund der Herstellmethode der Rohre kann im Bereich der Schweißnaht jedoch eine Dachbildung entstehen. Die unterschiedliche Tangentenrichtung auf beiden Seiten der Schweißnaht, sowie der Versatz des Treffpunktes sind kritische Parameter zur Zustandsbeurteilung von Druckrohrleitungen, siehe Abbildung 7.

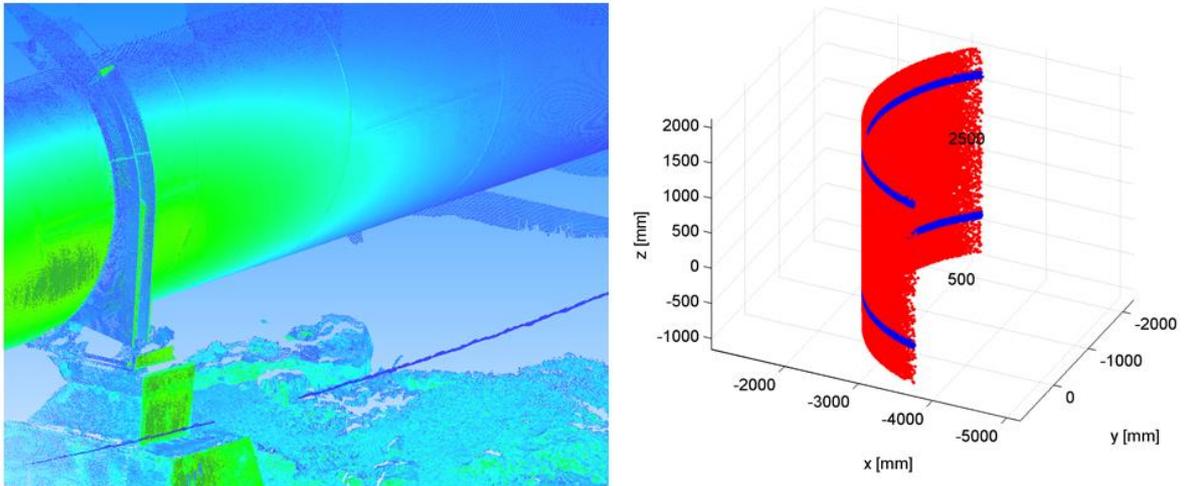


**Abb. 7.** Druckrohrleitung in steilem Gelände (links), Dachbildung (rechts)

Typischerweise werden diese Werte durch Kontaktmessungen durch punktuelle Abstandsmessungen mit Linearaufnehmern relativ zu vorgefertigten Profillehren bestimmt. Dies ist jedoch in steilem Gelände sehr aufwendig, da Zugangspodeste oder Leitern benötigt werden. Eine berührungslose Messung aus der Distanz mittels eines Laserscanners bietet hier signifikante Vorteile.

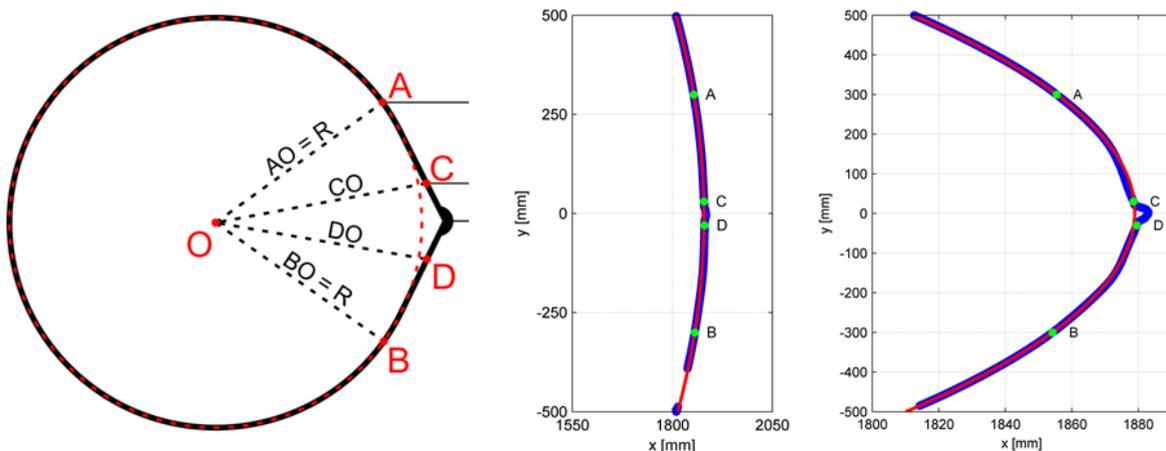
Zur Evaluierung der Methode wurden mehrere 100 Segmente einer Druckrohrleitung eingescannt. Jedes der Segmente ist 3 m lang und besitzt eine horizontale Schweißnaht, wobei die Schweißnähte aufeinanderfolgender Segmente auf unterschiedlichen Seiten angeordnet sind. Abbildung 8-links zeigt die Punktwolke einer Laserscanaufnahme. Für die Datenerfassung wurde in diesem Fall ein Industrielaserscanner mit hoher Auflösung und

geringem Messrauschen eingesetzt. Die einzelnen Segmente wurden extrahiert und anschließend ein Zylinderfit durchgeführt. Die Daten wurden in weiterer Folge in ein Koordinatensystem mit der z-Achse in Zylinderrichtung transformiert, Abbildung 8-rechts. In diesem Koordinatensystem wurden horizontale Schnitte gelegt und diese zur weiteren Auswertung herangezogen.



**Abb. 8.** Punktwolke eines Laserscans (links), Punktwolke eines Segments transformiert in ein Koordinatensystem, definiert durch einen Zylinderfit

Aus den Profildaten konnten die relevanten Parameter der Dachbildung abgeleitet werden. Abbildung 9 zeigt als Beispiel das Ergebnis einer Auswertung. In Abbildung 9-Mitte sind die Originaldaten des Profils dargestellt. Aufgrund der geringen Abweichungen von der Kreisform sind in dieser Abbildung die Abweichungen nur schwer zu erkennen. Daher wurde in Abbildung 9-rechts die x-Achse in einer anderen Skalierung dargestellt. Nun sind die Schweißnaht und eine leicht andere Krümmung in der Nähe der Schweißnaht gut zu erkennen. Ebenso erkennbar ist, dass das Messrauschen aufgrund der hohen Präzision des eingesetzten Industriescanners auch in dieser Abbildung nicht erkennbar ist.

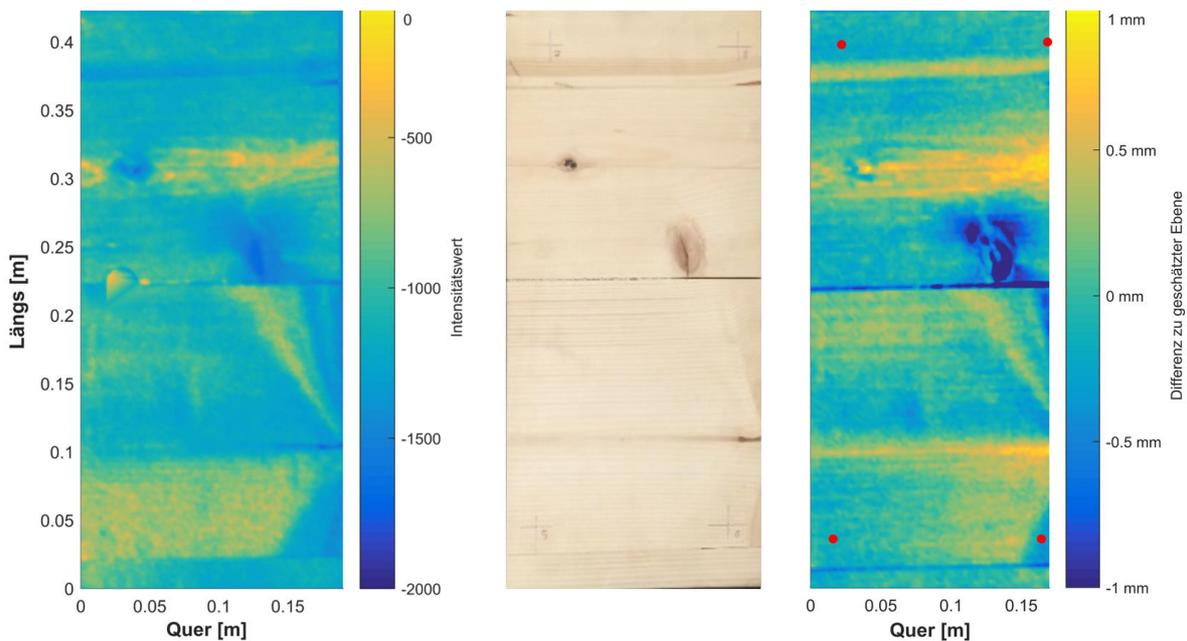


**Abb. 9.** Profil durch die Punktcloud; Skizze (links), Messdaten (Mitte), Messdaten dargestellt mit unterschiedlicher Skalierung von x- und y-Achse

### 2.3 Holzbalken

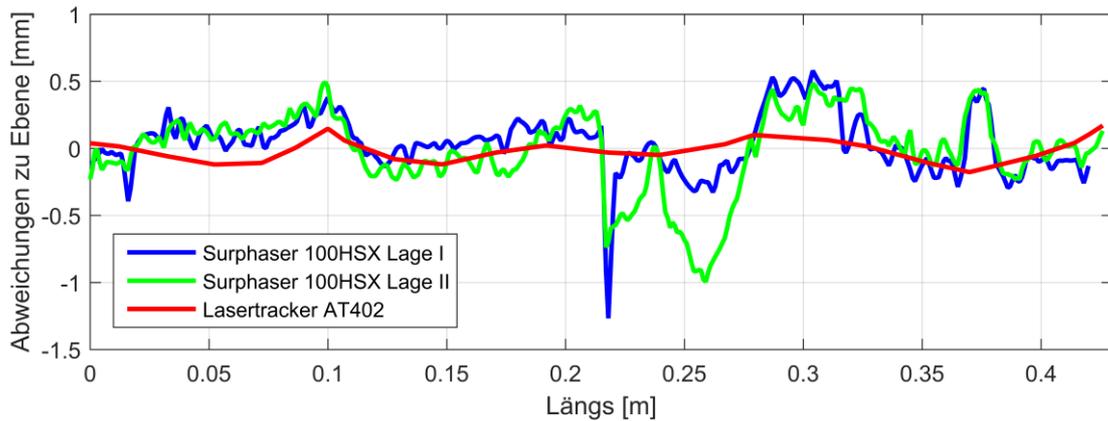
In den bisher gezeigten Anwendungen konnte Laserscanning erfolgreich zur Geometriebestimmung eingesetzt werden. Wie in Abschnitt 1 erwähnt ist die Qualität der Messdaten aber sehr stark vom Material des Objektes abhängig. Als Beispiel ist hier die Geometriebestimmung eines Holzbalkens dargestellt [9].

Abbildung 10-Mitte zeigt den eingemessenen Holzbalken mit einer Länge von ca. 40 cm und einer Breite von 16 cm. Abbildung 10-links zeigt das Intensitätsbild eines Laserscans. In diesem Intensitätsbild ist die Struktur des Holzes gut zu erkennen. Helle Werte bedeuten eine hohe Intensität, d.h. eine hohe Rückstreuung des Signals zum Instruments. In Bereichen mit dunkler Farbe wurde ein größerer Teil der Intensität entweder in andere Richtungen reflektiert oder ist in das Objekt eingedrungen. In Abbildung 10-rechts ist das Ergebnis einer flächenhaften Deformationsanalyse dargestellt. Erkennbar ist wiederum die Struktur des Balkens. Die Deformationen, berechnet in Bezug zu einer Ausgleichsebene, betragen  $\pm 1$  mm. Auch wenn das Ergebnis im ersten Blick schlüssig erscheint, zeigen mechanische Vergleichsmessungen und Messungen mit einem Lasertracker und Corner Cube Reflektor, dass die tatsächlichen Deformationen des Balkens nur im Bereich von  $\pm 0.1$  mm liegen. Aufgrund des unterschiedlichen Eindringverhaltens des Laserstrahls liefert die berührungslose Messung in diesem Fall keine zuverlässigen Ergebnisse.



**Abb. 10.** Intensitätsbild (links), Foto des Holzbalkens (Mitte) und scheinbare Deformationen, abgeleitet aus den Scandaten (rechts)

Dies wird auch in Abbildung 11 gezeigt. Dargestellt sind die Abweichungen entlang eines Profils. Der Balken wurde dabei in zwei unterschiedlichen Orientierungen mit einem Scanner eingescannt und zusätzlich mit einem Lasertracker vermessen. Erkennbar ist, dass auch die Messungen des Scanners in beiden Lagen teilweise um mehr als 0.5 mm differieren. Generell werden bei den Laserscannmessungen die tatsächlichen Deformationen massiv überschätzt.



**Abb. 11.** Profil des Balkens abgeleitet aus den Laserscandaten in zwei unterschiedlichen Orientierungen des Balkens und bestimmt mittels Lasertracker und Corner Cube Reflektor

## 2.4 Stützmauern

Das abschließende Beispiel beschäftigt sich mit kinematischem Laserscanning. Durch Bewegung eines Scanners auf einer mobilen Plattform können in kurzer Zeit große Ingenieurbauten eingemessen werden. In der konkreten Anwendung werden im Rahmen eines Forschungsprojektes Stützmauern entlang der österreichischen Autobahnen in 3D erfasst. Beispiele von typischen Stützmauern im österreichischen Straßennetz zeigt Abbildung 12. Ziel ist die automatische Bestimmung von Neigungen bzw. Neigungsänderungen und die Detektion von Schäden wie Betonabplatzungen. Derzeit werden die Neigungen durch Messungen mit Totalstationen zu montierten Zielen auf den Stützmauern bestimmt. Dies ist zeitaufwendig und benötigt die Montage der Ziele und teilweise auch die Sperre von Autobahnspuren.

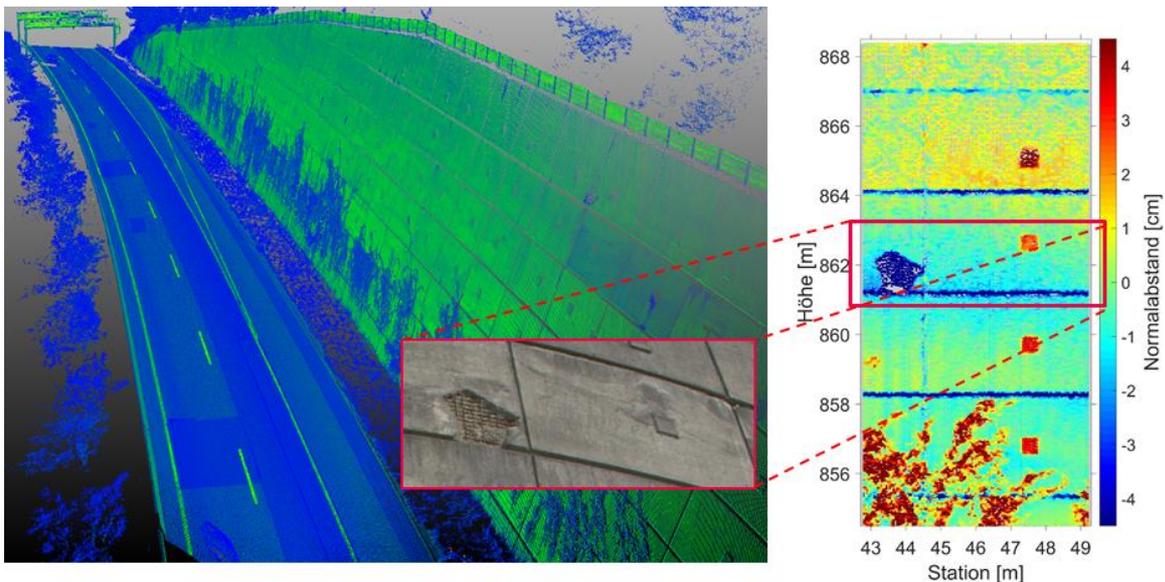


**Abb. 12.** Stützmauern im österreichischen Straßennetz und Aufnahme mit einer mobilen Messplattform

Um eine effizientere Aufnahme zu ermöglichen, setzen wir eine Messplattform, bestehend aus zwei Laserscannern, einer Inertialmesseinheit (IMU), einem geodätischen GNSS Empfänger mit Antenne, 6 Kameras und einem Odometer ein. Diese ist auf einem Standard-PKW montiert und die Messdaten werden bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 100 km/h erfasst.

In der Auswertung werden zuerst durch relative GNSS Positionierung und mittels der IMU und Odometerdaten die Position und die Orientierung des Fahrzeugs bestimmt. In Kombination mit den Laserscandaten entstehen georeferenzierte Punktwolken, Abbildung 13-links. Zur Deformationsanalyse werden vertikale Profile orthogonal zur Fahrtrajektorie generiert. In diesen wird durch robuste Schätzverfahren die Neigung zuverlässig bestimmt. Wiederholte Fahrten haben gezeigt, dass die Neigungen, je nach Mauertyp, mit Präzisionen von  $<0.1^\circ$  oder besser bestimmt werden können. Bei glatten Betonoberflächen ist sogar eine Präzision  $<0.01^\circ$  möglich [10].

Die in der Neigungsberechnung ausgeschlossenen Daten können z.B. Vegetation, Einbauten oder Schäden wie Abplatzungen bedeuten. Dies ist in Abbildung 13-rechts ersichtlich. Durch eine Gruppierung der Abweichungen und unter Zuhilfenahme der Bildinformation kann eine Klassifizierung und eine Bestimmung der Größe von Schäden durchgeführt werden. Detaillierte Information zum Auswerteprozess kann [11] entnommen werden.



**Abb. 13.** Georeferenzierte Punktwolke (links), abgeleitete Deformationen (rechts) und bildunterstützte Schadensklassifizierung

### 3. Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde gezeigt, dass mit Laserscannern auch große Objekte in kurzer Zeit effizient erfasst werden können. Für eine zuverlässige Zustandsbeurteilung sind jedoch die Fehlereinflüsse von Laserscannern zu berücksichtigen. Die Auswahl des richtigen Laserscanners für die jeweilige Anwendung ist entscheidend und eine sorgfältige Filterung, z.B. von Geisterpunkten, ist unbedingt erforderlich. Bei geeigneter Weiterverarbeitung kann die große Punktdichte von Laserscannern gewinnbringend eingesetzt werden, um einerseits lokale Defekte zu erkennen und um andererseits durch die hohe Überbestimmung abgeleitete Parameter mit hoher Präzision zu bestimmen. Auch wenn Laserscanning in vielen Fällen durch die rasche und berührungslose Erfassung Vorteile bringt, gibt es Anwendungen, in

welchen das Messverfahren versagt. Dies ist insbesondere der Fall, wenn der Laserstrahl in das Material des Objektes eindringt.

## **Danksagung**

Wir möchten unseren Projektpartnern Keller Grundbau GmbH, AIT, TVFA, VÖBU, ÖBB, ASFINAG und FFG (Projektnr. 853446) für die Zusammenarbeit und finanzielle Unterstützung bei den erwähnten Projekten danken.

## **Referenzen**

- [1] Riegl: RIEGL miniVUX-1UAV, Datenblatt, 2017, 4 S.
- [2] Leica Geosystems AG: Leica ScanStation P50, Datenblatt, 2017, 2 S.
- [3] Riegl: RIEGL VZ-2000i, Datenblatt, 2017, 10 S.
- [4] Surphaser: SURPHASER 100 HSX, Datenblatt, 2015, 2 S.
- [5] Holst H., Schmitz B., Kuhlmann H.: TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware, In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016), DVW Schriftenreihe, Band 85/2016, Wißner-Verlag, Augsburg, 2016, 39-58.
- [6] Wujanz D., Burger M., Mettenleiter M., Neitzel F.: An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 125 (2017), 146–155.
- [7] Lienhart W.: Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2017, 7(3), 315-324.
- [8] Lackner S., Lienhart W., Supp G., Marte R: Geodetic and fibre optic measurements of a full-scale bi-axial compressional test, Survey Review, Volume 48, 2016 - Issue 347, 86-93
- [9] Bauer P.: Formbestimmung von Holzelementen mittels Oberflächenmessung, Masterarbeit, TU Graz, 2017, 97 S.
- [10] Lienhart W., Kalenjuk S., Ehrhart C.: Efficient and Large Scale Monitoring of Retaining Walls along Highways using a Mobile Mapping System. Proc. 8th Int. Conf. on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure – SHMII-8, Brisbane, Australia, 2017: RS3-11, 8 S.
- [11] Lienhart W., Kalenjuk S.: Combined Laser Scanning and Image Based Monitoring of Large Infrastructure Objects. Proc. Int. Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), Stanford, USA, 2017, 3147-3154