

# Das Messverhalten Terrestrischer Laserscanner an Steinoberflächen

PETER DORNINGER<sup>1</sup> & CLEMENS NOTHEGGER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Die Punktbestimmung bei Terrestrischen Laser Scannern (TLS) erfolgt polar durch das Messen zweier Winkel (vertikal und horizontal) und einer Entfernung. Diese Messungen sind mit zufälligen und systematischen Fehlern behaftet. Erstere können durch entsprechende Mittelung minimiert werden. Um systematische Fehler zu korrigieren sind entsprechende Fehlermodelle notwendig, die entweder in experimenteller Umgebung (z.B. durch den Hersteller) oder aus Projektdaten bestimmt werden können. Theoretisch geht man davon aus, dass der ausgesandte Laserstrahl an der Objektoberfläche reflektiert wird. Dabei wird im Allgemeinen die Interaktion des Laserstrahles mit der Oberfläche vernachlässigt. Je nach Reflexionseigenschaften kann es im Extremfall zu Absorption oder Totalreflexion des Signales kommen, wodurch eine Punktbestimmung nicht möglich ist. Weitaus schwieriger zu behandeln ist der Fall, dass der Laserstrahl in das Objekt eindringt, dort gebrochen oder mehrfach reflektiert und anschließend wieder zum Scanner zurückgestreut wird. TLS verwenden Laser im sichtbaren oder nahen Infrarotspektrum. Lichtundurchlässige (opake) Materialien (z.B. Sandstein) können daher meist problemlos gemessen werden während lichtdurchlässige Materialien (z.B. Marmor) meist zu systematischen Fehlmessungen auf Grund der beschriebenen Problematik führen. Im Rahmen dieses Beitrages soll das Messverhalten von TLS an unterschiedlichen Steinoberflächen demonstriert werden. Außerdem werden Korrelationen zwischen den systematischen Entfernungsmessfehlern und dem Intensitätsbild des Laserscanners sowie Kamerabildern dargestellt.*

## 1 Einleitung

Zur Erfassung kontinuierlicher Objektoberflächen werden meist Bilddaten oder Laserscanner verwendet. Stereoauswertung von Bilddaten basiert auf der Zuordnung erkennbarer Texturmerkmale an der Oberfläche. Im Gegensatz dazu senden Laserscanner aktiv ein Signal aus um die Entfernung zum Objekt zu bestimmen, wodurch eine von der Oberflächentextur unabhängige Punktbestimmung möglich ist. So genannte Lichtschnittscanner (auch als Triangulationsscanner bezeichnet) projizieren Laserprofile auf die Objektoberfläche und fotografieren diese mit Hilfe einer CCD-Kamera. Sie erzielen höchste Genauigkeiten (Submillimeter), sind allerdings nur für geringe Aufnahmeentfernungen (wenige Meter) und somit für relativ kleine Objekte einsetzbar. Typische Anwendungen sind hochgenaue Detailvermessung einzelner Teilobjekte wie beispielsweise Skulpturen (BERNARDINI et al., 2002). Für große Objekte werden sogenannte Puls-Laufzeit-Scanner oder Phasenvergleichsscanner, im Folgenden als Terrestrische Laserscanner (TLS) bezeichnet, eingesetzt. Durch kontinuierliche Weiterentwicklung ermöglichen aktuelle TLS extrem hohe Messraten (> 1 Mio. Punkte / Sek.) und hohe Messgenauigkeiten (< 3 mm). In der Kulturgutvermessung werden sie typischerweise in den Bereichen Dokumentation, Monitoring

---

<sup>1</sup> Technische Universität Wien, Christian Doppler Labor „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“, Gußhausstraße 27, 1040 Wien, Österreich; [pdo@ipf.tuwien.ac.at](mailto:pdo@ipf.tuwien.ac.at)

(Zeitreihenanalyse) oder zur Datenerfassung für Visualisierungsaufgaben (Public Relations) eingesetzt.

Die Punktbestimmung bei TLS erfolgt polar durch das Messen zweier Winkel (vertikal und horizontal) und einer Entfernung. Im Allgemeinen sind diese Messungen mit zufälligen und systematischen Fehlern behaftet. Erstere können durch entsprechende Mittelung (z.B. NOTHEGGER & DORNINGER, 2009) minimiert werden. Um systematische Fehler zu korrigieren sind entsprechende Fehlermodelle notwendig, die entweder in experimenteller Umgebung (z.B. ABMAYER et al. 2005, LICHTI 2007) oder auch aus Projektdaten (z.B. DORNINGER et al. 2008, GIELSDORF et al. 2004) bestimmt werden können.

Generell wird angenommen, dass der ausgesandte Laserstrahl an der Objektoberfläche gemäß dem Lambertschen Gesetz reflektiert wird. Dabei wird im Allgemeinen die Interaktion des Laserstrahles mit der Oberfläche vernachlässigt. Je nach Reflexionseigenschaften kann es im Extremfall zu Absorption oder Totalreflexion des Signals kommen. In diesen Fällen kann keine Punktbestimmung durchgeführt werden, da keine Energie zum Detektor reflektiert wird. Weitaus schwieriger zu behandeln ist der Fall, dass der Laserstrahl in das Objekt eindringt, dort gebrochen oder mehrfach reflektiert und anschließend wieder zum Scanner zurückgestreut wird. TLS verwenden Laser im sichtbaren oder nahen Infrarotspektrum. Lichtundurchlässige (opake) Materialien (z.B. Sandstein) können daher meist problemlos gemessen werden während lichtdurchlässige Materialien (z.B. Marmor) im Allgemeinen zu systematischen Fehlmessungen auf Grund der genannten Problematik führen.

In der Literatur findet sich keine Untersuchungen, die dieses Messverhalten für praktische Anwendungen näher untersucht, wenngleich das Problem an sich bekannt ist (GODIN et al., 2001). In diesem Beitrag werden die Auswirkungen an Hand von praktischen Beispielen demonstriert. Weiters wird an Hand eines Experiments der Zusammenhang zwischen der sichtbaren Textur und dem Entfernungsmessverhalten an lichtdurchlässigen Materialien (Marmor) untersucht.

## 2 Problemstellung

Für die folgenden Beispiele und Untersuchungen wurden ausschließlich TLS verwendet, die das Phasenvergleichsprinzip zur Entfernungsmessung anwenden. Diese Geräte senden ein kontinuierliches, amplitudenmoduliertes Signal aus und bestimmen die Entfernung aus der Phasenverschiebung zwischen ausgesandtem und detektiertem Signal. Im Gegensatz zu Puls-Laufzeit-Scannern die im Allgemeinen mehrere Echos pro ausgesandtem Puls detektieren können (z.B. First / Last-Echo) kann mit Phasenvergleichsscannern pro Messung nur eine Entfernung bestimmt werden. Dies ist darin begründet, dass die Überlagerung mehrerer Sinusfunktionen gleicher Frequenz wieder in einer Sinusfunktion resultiert und aus der daraus resultierenden Phasenverschiebung wird die Entfernung bestimmt. Werden zum Beispiel zwei Objekten mit gleicher Reflexionseigenschaft von jeweils 50 % des Footprints (jener Fläche die vom ausgesandten Laserbündel getroffen wird und Energie zum Detektor reflektiert) getroffen, so ist die gemessene Entfernung exakt in der Mitte der beiden Objekte sein. Dieser Effekt führt bei Phasenvergleichs-TLS dazu, dass entlang von Umrisspunkten bis zu den dahinter befindlichen Objekten sogenannte "Koronapunkte" erfasst werden (SOTOODEH 2006). Diese

erscheinen – je nach Verhältnis zwischen Punktdichte und Footprintgröße – als "glatte" Flächen zwischen der Umrisslinie des vorderen Objektes und der polaren Projektion des Umrisses auf das hintere Objekt. Diese Punkte können im Allgemeinen durch im Polarraum angewandte Filter (z.B. große Entfernungsdifferenzen benachbarter Punkte) weitgehend eliminiert werden.

Dasselbe Prinzip führt zu systematisch verfälschten Entfernungsmessungen, wenn der Laserstrahl in das Objekt eindringt, im Material eine Strecke zurücklegt (z.B. Mehrfachreflexion, Doppelbrechung, etc.) und anschließend wieder zum Detektor reflektiert wird. Auch in diesem Fall entspricht die gemessene Entfernung nicht jener zwischen Sender und Objekt oberfläche sondern es werden zu lange Entfernungen gemessen.

Abb. 1 zeigt TLS Daten die mit einem *Faro Photon* Laserscanner an einer ebenen Wand erfasst wurden. Die Wand ist mit einer etwa 2 cm dicken Marmorplatte verkleidet. Die linke Abbildung zeigt die Abstände einer Referenzebene gegenüber den gemessenen Punkten. Rechts ist das Intensitätsbild im Polarraum dargestellt. Bei diesem Beispiel sind insbesondere im rechten, unteren Bereich die Abweichungen auf Grund der Interaktion mit dem Material erkennbar. Die großen Abweichungen im oberen sowie im linken Bereich der dargestellten Wand werden zusätzlich durch Total- bzw. Mehrfachreflexion verursacht. Auf diese Problematik wird im Folgenden nicht näher eingegangen.

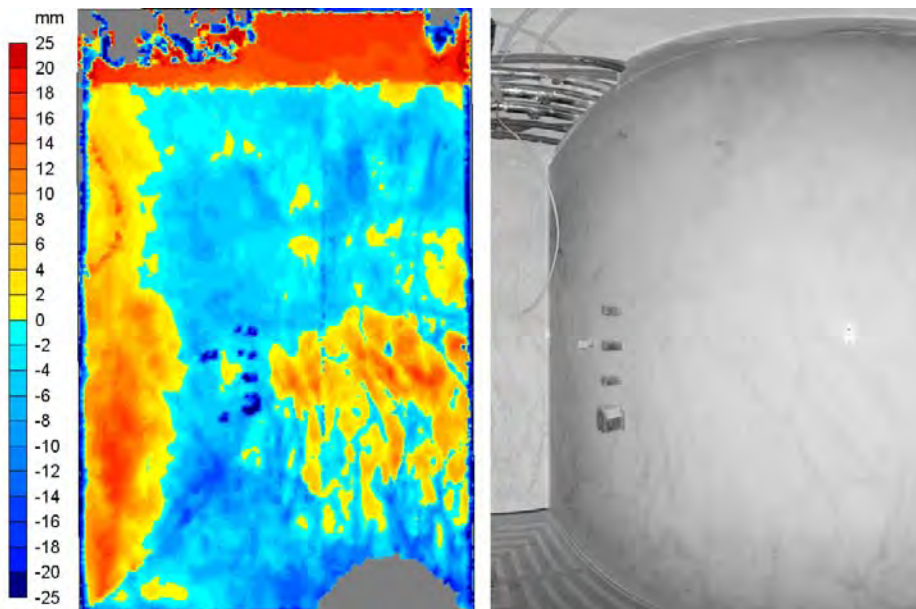


Abb. 1: Wand mit 2 cm dicker ebener Marmorverkleidung. links: Farbkodierte Abstände der TLS Punkte gegenüber vermittelnder Ebene; rechts: Intensitätsbild des TLS im Polarraum.

In Abb. 2 sind Daten die mit einem *Zoller+Fröhlich Imager 5006i* erfasst wurden dargestellt. Das Objekt ist der Hadrianstempel in Ephesos. Die aus Kalkstein errichteten Bruchsteinmauern sind zum Teil mit Marmorplatten verkleidet. Das Modell (linke Abbildung) wurde aus Daten die von verschiedenen Standpunkten aus erfasst wurden ermittelt. Die marmorverkleidete Vorderseite wurde mit drei Scans von unterschiedlichen Standpunkten aus erfasst. Insbesondere in der untersten Plattenreihe können größere systematische Abweichungen festgestellt werden. Die mittleren Einfallswinkel der untersuchten Platten betragen etwa  $10^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $70^\circ$ . Rechts ist die

Analyse der drei einzelnen Scans dargestellt. Die Farbkodierung zeigt jeweils die Abstände der einzelnen Scans gegenüber einer vermittelnden Ebene. Die maximalen Abweichungen betragen bis zu 15 mm bei nahezu orthogonaler Aufnahme­richtung. Mit abnehmendem Einfallswinkel werden auch die systematischen Messfehler geringer.

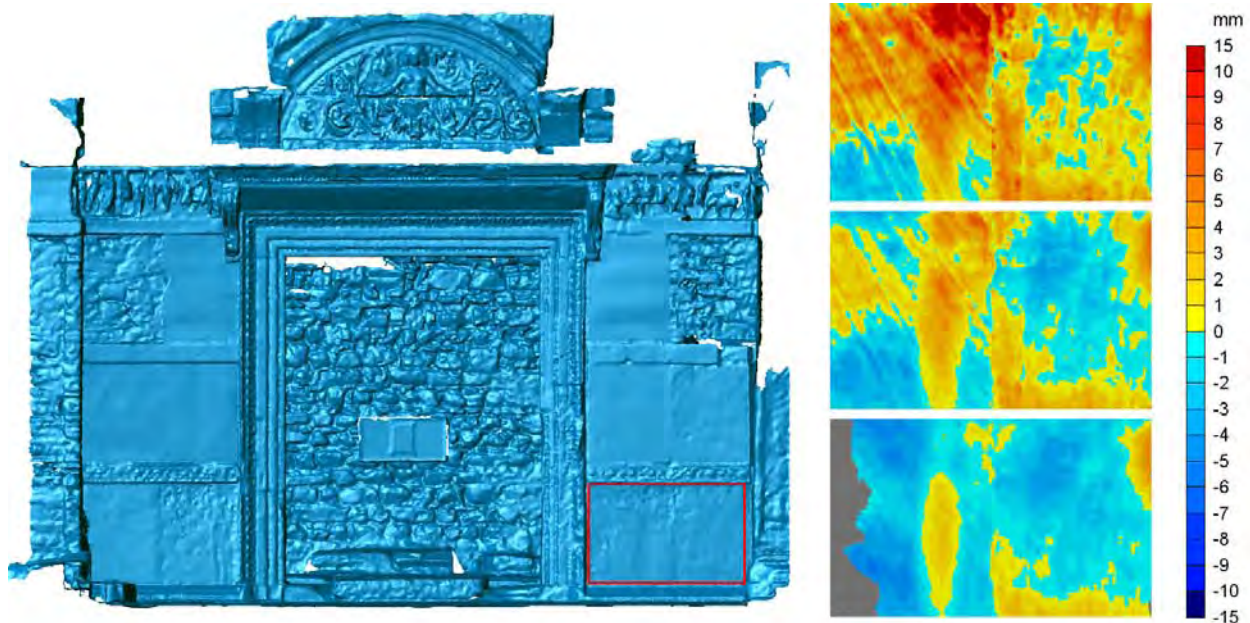


Abb. 2: Hadrian Tempel, Ephesos. links: Triangulierungsmodell erstellt aus mehreren Einzelscans und Testgebiet (rotes Rechteck); rechts: Farbkodierte Darstellung der Abstände von drei Einzelscans gegenüber einer Referenzebene. Mittlerer Einfallswinkel: oben:  $\sim 10^\circ$ , mitte:  $\sim 45^\circ$ , unten:  $\sim 70^\circ$ .

### 3 Experiment

Wie man an den in Abschnitt 2 gezeigten Beispielen erkennen kann, gibt es eine Vielzahl an Einflussgrößen (Entfernung, Einfallswinkel, etc.) die neben der Materialeigenschaft zu systematischen Fehlmessungen führen. Im folgenden Experiment wird versucht, unter möglichst gleichbleibenden, äußeren Bedingungen den Zusammenhang zwischen der sichtbaren Textur des Materials (RGB-Bilder), dem vom TLS erfassten Intensitätsbild und den systematischen Entfernungsmessfehlern zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden glatte Marmorplatten mit einem *Zoller+Fröhlich Imager 5006i* und mit einer *Canon EOS 350D* erfasst. Die Bilder wurden bei künstlicher Beleuchtung (zwei indirekte Blitze) und in orthogonaler Aufnahme­richtung erfasst. Die Auflösung am Objekt beträgt etwa 0.2 mm pro Pixel. Es wurden Belichtungsserien mit 5 verschiedenen Blendenöffnungen aufgenommen (5.6, 8, 11, 16, 22), um eine möglichst gleichmäßige Erfassung von hellen und dunklen Bereichen zu ermöglichen. Diese jeweils 5 Einzelbilder wurden zu High-Dynamic-Range (HDR)-Bildern mit einer Farbtiefe von 32-bit kombiniert. In Abb. 3 ist die Aufnahmeanordnung der Bilderfassung ersichtlich. Die Passmarken zur Referenzierung von Bild- und TLS-Daten mussten folgenden Anforderungen genügen: Die Fläche muss hinreichend groß und eben sein, um eine Referenzebene (für die Bestimmung der Distanzmessfehler) zu definieren; Das Material muss für den TLS vollständig opak sein, um eine

Interaktion mit dem darunter liegenden Material zu vermeiden; Es müssen entsprechende Markierungen vorhanden sein die in den Bilddaten mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden können.

Die gewählten Passmarken bestehen aus zwei schichten Karton (Untergrund: schwarz, Sichtseite: hellgrau, 300g) mit einer Ausdehnung von 4 x 4 cm (Abb. 3, rechts). Die Opazität wurde mit Hilfe eines hoch-reflektierenden Spektraltargets (Reflektivität: 99%) überprüft. Erst durch Anbringen des schwarzen Untergrundes konnten 100% Opazität sicher gestellt werden.

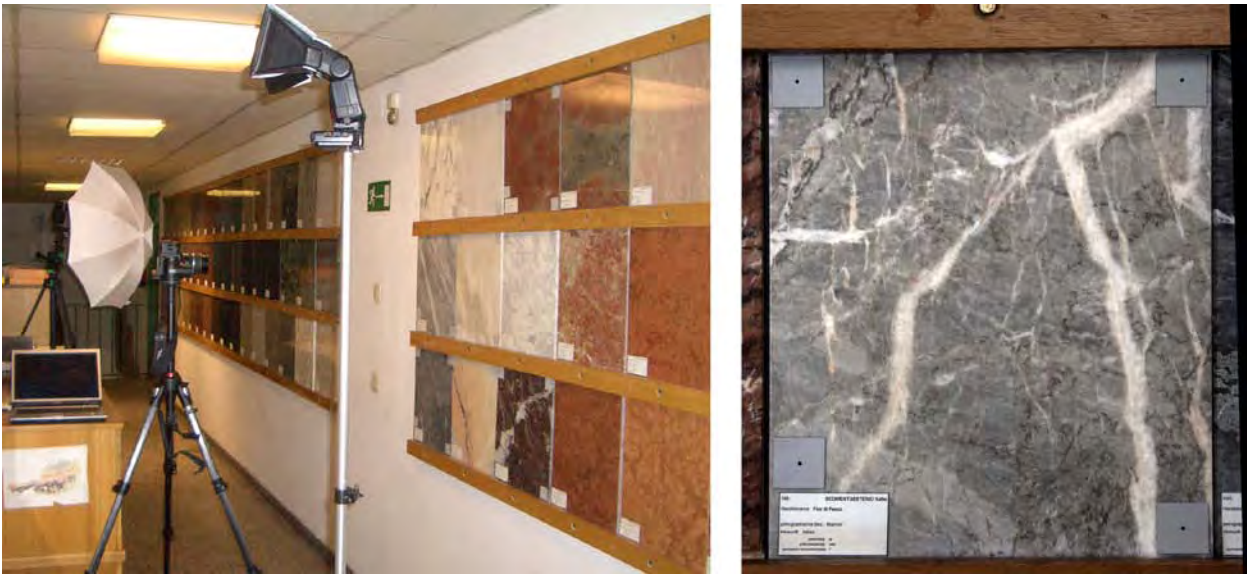


Abb. 3: Bildaufnahme (links) und Testobjekt mit Passmarken (rechts).

Die Scans wurden mit einem Punktabstand von etwa 0.5 mm am Objekt aufgenommen. Anschließend wurden die Passpunkte manuell in den einzelnen Scans bestimmt. Die Referenzebene ist definiert als vermittelnde Ebene durch diese jeweils vier Punkte. Auf Basis der Referenzebene wurde jeweils ein lokal horizontiertes (in Bezug die Referenzebene) Koordinatensystem definiert. Die Bilddaten wurden in Bezug auf dieses Koordinatensystem unter Verwendung der vier Passpunkte entzerrt. Zusätzlich wurden beleuchtungsbedingte Inhomogenitäten in der Bildhelligkeit rechnerisch entfernt. Um die Korrelation von Bild- und TLS-Daten zu ermöglichen, wurden alle vorhandenen Datensätze in Rasterbilder mit einer Auflösung von 1 mm pro Pixel umgerechnet.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Marmorplatten untersucht. Objekt 1 ist ein „Fior di Pesco“. Die Platte ist überwiegend dunkel mit linienhaft verlaufenden, hellen Einschlüssen. Die Orthogonalprojektion des Scannerstandpunktes ist etwa bei Pixel 200 / 350. Das heißt, der Laser trifft nahezu orthogonal auf das Objekt. Visuell betrachtet, kann eine hohe Korrelation zwischen den drei Eingangskanälen (monochromes Bild, Intensitätsbild, Entfernungsbild) festgestellt werden (Abb. 4). Scatterplots (Abb. 5) bestätigen dies auch beim Vergleich von Intensitäts- und

Entfernungsbild (Korrelation: 0.95). Die Korrelation zwischen Monochrom- und Intensitäts- bzw. Entfernungsbild ist geringer (Korrelation: 0.8). Der Grund dafür könnte sein, dass die Auflösung der beiden Aufnahmegeräte, insbesondere der pro „Pixel“ erfasste Bereich (d.h. der Footprint) stark variieren. Entspricht bei der Bilderfassung der erfasste Bereich pro Pixel in etwa der Auflösung (0.2 mm), so ist die Footprintgröße des verwendeten Scanners etwa 3 mm.

In Abb. 6 sind die Ergebnisse einer weiteren erfassten Marmorplatte (Carrara Arabescato) dargestellt. Diese besteht überwiegend aus hellen Bereichen mit dunklen, linienhaft verlaufenden Einschlüssen. Wie zu erwarten, sind auch bei diesem Objekt die Messungen in den hellen Bereichen systematisch länger als in den dunklen Bereichen. Die hohe Korrelation zwischen Intensitäts- und Entfernungsbild ist ebenfalls gegeben. Allerdings ist die Korrelation zwischen Monochrom- und Intensitäts- bzw. Entfernungsbild etwas schlechter als beim vorigen Beispiel. Grund dafür ist die Anordnung des TLS in Bezug auf die Marmorplatte. Während der Einfallswinkel bei Objekt 1 – wie erwähnt – nahezu horizontal ist, wurde Objekt 2 von unten mit einem Einfallswinkel von etwa 30° gescannt.

Tab. 1: Korrelationen nach Pearson (Linear) und Spearman (Rank) zwischen den Variablen Monochrom, Intensität und Distanzfehler in Prozent.

	<b>Monochrom/Intensität</b>		<b>Monochrom/Distanz</b>		<b>Intensität/Distanz</b>	
	<b>Linear</b>	<b>Rank</b>	<b>Linear</b>	<b>Rank</b>	<b>Linear</b>	<b>Rank</b>
<i>Objekt 1 Links</i>	62	74	61	62	95	82
<i>Objekt 1 Mitte</i>	89	88	82	69	96	83
<i>Objekt 1 Rechts</i>	56	70	59	60	94	81
<i>Objekt 2 Links</i>	63	46	63	53	95	94
<i>Objekt 2 Mitte</i>	78	65	78	73	95	94
<i>Objekt 2 Rechts</i>	64	47	59	51	93	92

Die Korrelationen zwischen Monochrom-, Intensitäts- und Entfernungsbild sind in Tab. 1 aufgelistet. Jedes Objekt wurde von 3 Standpunkten aus gescannt, einmal von jeder Seite (ca. 20°) und einmal von vorne. Dabei zeigt sich, dass der Standpunkt – und damit der Einfallswinkel – keine Auswirkung auf die Korrelation zwischen Intensität und Entfernungsbild hat. Die Korrelation zwischen den Bild- und Scannerdaten hingegen ist von der Seite deutlich schlechter als von vorne. Der Grund dafür ist, dass der Laserstrahl in das Material eindringt und durch Strukturen unter der Oberfläche teilweise „abgeschattet“ wird, während die Kamera – auch durch die homogene Beleuchtung – von diesem Phänomen nicht betroffen ist.

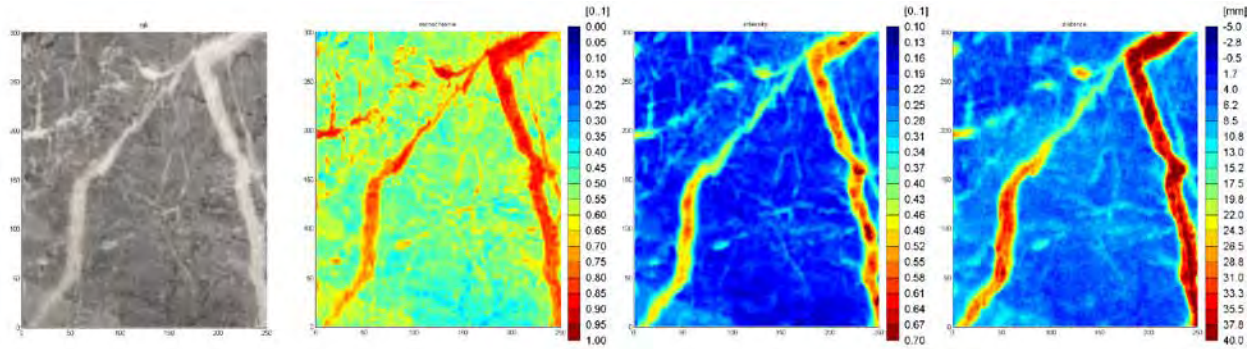


Abb. 4: Objekt 1 (Marmor: Fior di Pesco) – v.l.n.r: RGB-Bild, monochromes Bild, Intensitätsbild (TLS), Distanz-Bild gegenüber Referenzebene (TLS)

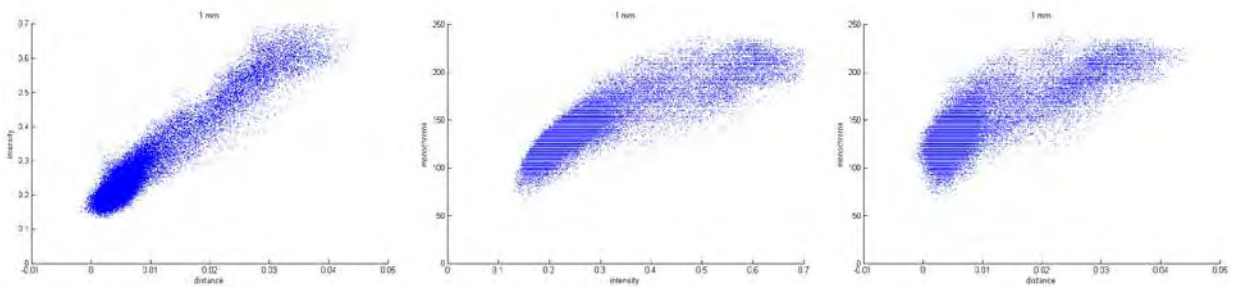


Abb. 5: Objekt 1 – Korrelation von Entfernung und Intensität (links), Intensität und monochromes Bild (mitte) sowie Entfernung und monochromes Bild (rechts)

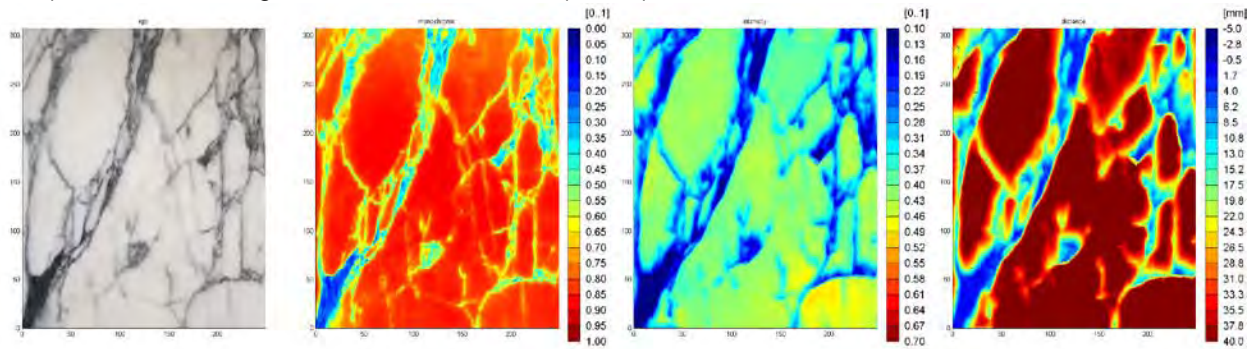


Abb. 6: Objekt 2 (Marmor: Carrara Arabescato) – v.l.n.r: RGB-Bild, monochromes Bild, Intensitätsbild (TLS), Distanz-Bild gegenüber Referenzebene (TLS)

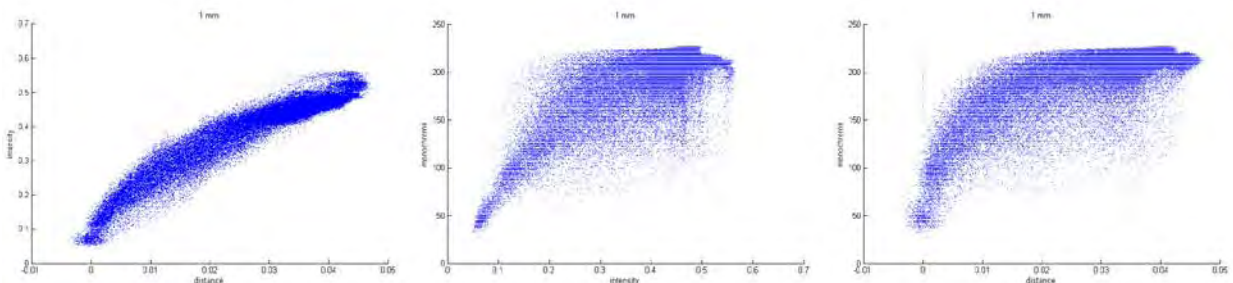


Abb. 7: Objekt 2 – Korrelation von Entfernung und Intensität (links), Intensität und monochromes Bild (mitte) sowie Entfernung und monochromes Bild (rechts)

Dieser Effekt ist auch in Abb. 6 (ganz rechts) zu sehen. Der Scannerstandpunkt ist vertikal unterhalb der Platte. Die Umrisse der dunklen Einschlüsse (blau) sind auf der scannerzugewandten Seite (untere Ränder) wesentlich schärfer als auf der abgewandten Seite (obere Ränder). Der systematische Entfernungsmessfehler ist somit abhängig vom Einfallswinkel.

Es bleibt zu untersuchen, ob es möglich ist, den materialbedingten Entfernungsmessfehler zu modellieren. Zu bestimmen ist unter anderem welche die wesentlichen Einflussgrößen sind (Oberflächenbeschaffenheit, chemische Zusammensetzung, Einfallswinkel, Wellenlänge), und wie zuverlässig sie sich bestimmen lassen, unabhängig von den Daten.

Da sich Licht in festen Materialien langsamer ausbreitet als in Luft, erscheint der Weg, den es in dem Material zurücklegt länger zu sein, als er tatsächlich ist. Bei Calcit (Brechungsindex 1,6) beispielsweise erscheint er etwa 60% länger. Das eindringende Licht wird in der kristallinen Struktur des Materials vielfach gebrochen und breitet sich über ein Volumen aus, dessen Projektion auf die Oberfläche auf ein Vielfaches des Footprints ausgedehnt ist. Dadurch ist es möglich, dass der systematische Entfernungsmessfehler ein Vielfaches der Stärke der Platte ausmachen kann. Wir konnten Fehler von 4 cm feststellen bei einer 0,7 cm starken Platte.

## 5 Schlussfolgerungen

Wie zahlreiche Praxisbeispiele belegen, sind Terrestrische Laser Scanner gut geeignet, um großflächige Objekte im Subzentimeter-Bereich zu erfassen und daraus Modelle abzuleiten. Was bislang jedoch meist vernachlässigt wird, ist die Interaktion mit dem Material. Jedem Benutzer von Laserscanning Technologie ist bewusst, dass Glasflächen oder Spiegel nicht unmittelbar erfasst werden können. Auch die Problematik von hochreflektierenden Materialien wie Gold oder Chrom sind bekannt. Bislang nicht hinlänglich untersucht sind jedoch lichtdurchlässige Materialien wie z.B. kristalline Gesteine.

An Hand von Anwendungsbeispielen haben wir die Auswirkung der Lichtdurchlässigkeit von Marmor auf die Entfernungsmessung von Laserscannern gezeigt. Im präsentierten Experiment wurde die Korrelation zwischen dem sichtbaren Erscheinungsbild von Marmoroberflächen und den systematischen Entfernungsmessfehlern näher untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass eine hohe Korrelation besteht, insbesondere bei visueller Inspektion des Materials. Die konnte auch durch statistische Analysen bewiesen, wenngleich zahlreiche bislang nicht untersuchte Effekte (z.B. Kamera- versus TLS-Footprint) das Ergebnis beeinflussen.

Für den Einsatz von TLS insbesondere im Bereich der Kulturgutvermessung ist es daher unbedingt notwendig, vorab eine Analyse der zu erfassenden Materialien durchzuführen. Sollte Marmor gescannt werden müssen, so kann es unter Umständen möglich sein, die Problematik zu minimieren, indem die Aufnahmekonfiguration (Entfernung, Einfallswinkel, Laserenergie, etc.) entsprechend adaptiert wird. Generell hat sich herausgestellt, dass die Distanzmessfehler mit Helligkeit und Glattheit der erfassten Oberflächen zunimmt. Künstlich aufgeraute, bzw. verwitterte Oberflächen mit homogener Textur verursachen kleinere Fehler.



## 6 Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Firma *Steinmetzbetriebe Bamberger* im Rahmen des Christian Doppler Labors *Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung* unterstützt. Die Daten des Hadriantempels in Ephesos wurden im Rahmen des Projektes *Der Hadrianstempel an der Kuretenstraße in Ephesos*, durchgeführt vom *Österreichischen Archäologischen Institut*, finanziert vom *Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung* erfasst (Projekt-Nr. P 20947-G02, Projektleitung: Ursula Quatember, ÖAI Wien, Datenerfassung: Robert Kalasek, TU Wien). Die Steinplattensammlung wurde vom *Institut für Geotechnik, TU Wien*, zur Verfügung gestellt (Andreas Rohatsch).

## 7 Literaturverzeichnis

- ABMAYR, T., DALTON, G., HÄRTL, F., HINES, D., LIU, R., HIRZINGER, G., AND FRÖHLICH, C.: Standardization and visualization of 2.5D scanning data and color information by inverse mapping; in: Grün, A. and Kahmen, H. (eds.), Proc. of Optical 3-D Measurement Techniques VII, **1**, Vienna, Austria, 2005, 164-173.
- BERNARDINI, F., RUSHMEIER, H., MARTIN, I. M., MITTLEMAN, J., TAUBIN, G.: Building a Digital Model of Michelangelo's Florentine Pieta; IEEE Computer Graphics and Applications, January/February, 2002, 59-67.
- DORNINGER, P., NOTHEGGER, C., PFEIFER, N., MOLNÁR, G.: On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners; Journal of Applied Geodesy, **2** (2008), 4; 191-204.
- GIELSDORF, F., RIETDORF, A., AND GRUENDING, L.: A concept for the calibration of terrestrial laser scanners; in: Proc. of FIG Working Week, Athens, Greece, 2004.
- GODIN, G., RIOUX, M., BERARDIN, J., LEVOY, M., COURNOYER, L., BLAIS, F.: An Assessment of Laser Range Measurement on Marble Surfaces, in Proc. of 5<sup>th</sup> Conference on Optical 3D Measurement Techniques; 2001, Vienna.
- LICHTI, D. D.: Error modeling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system; ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing **61**, **5** (2007), 307-324.
- NOTHEGGER, C., DORNINGER, P.: 3D Filtering of High-Resolution Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Documentation; PFG, **1** (2009), 53-63.
- SOTOODEH, S.: Outlier detection in laser scanner point cloud; in: Proc. of ISPRS Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology, Dresden, Germany, 2006.