

3D-Laser-Entfernungsbildaufnahme

A. Ullrich¹, N. Studnicka

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH
A-3580 Horn

Nowadays our world becomes more and more a digitized world in almost every aspect (speech, sound, imaging, communications, etc.). At present one major effort is to achieve a more or less complete digital 3D representation of natural as well as man-made objects such as workpieces, art's work, buildings, complete scenes, or even whole landscapes.

Various methods for achieving 3D images have been developed, e.g., mechanical touch probes mounted on co-ordinate measuring machines (contouring), laser-based triangulation, 3D reconstruction from multiple images and projection of light fringes. 3D imaging laser sensors based on the time-of-flight principle deliver high productivity and accuracy. 3D data acquisition is accomplished by fast line scanning based on angular deflection with a number of rotating reflective surfaces for one dimension. Rotating the whole scanning device or moving the whole scanner platform (e.g. by airplane, airship, helicopter, or by car) provides the second dimension. This new tool provides a compelling alternative to traditional techniques by accurately measuring structures, even when they are inaccessible or in an unsafe area, due to the high measurement capability up to ranges of hundreds of meters to naturally reflecting objects.

3D laser imaging facilitates 3D data acquisition in a vast area of application: 3D-imaging of buildings for architecture and preservation of cultural heritage (castles, ruins, relics of the past), reverse engineering (plant as-built records), scene acquisition for virtual reality modeling, acquisition of digital terrain models of residential areas, whole districts or even towns, including vegetation and structures, topographic mapping of quarries or open pit mines, cliff faces, and dimensional measurements of all kind of vehicles.

Die Laser-Entfernungsbildaufnahme ermöglicht die Erstellung von räumlichen 3D-Modellen realer Objekte und damit die digitale Beschreibung von Objekten. Ein Entfernungsbild setzt sich aus einer Vielzahl von einzelnen Entfernungsmessergebnissen zusammen. Die einzelnen Meßergebnisse bestehen zumindest aus der Entfernung zwischen Sensor und Objekt und der Raumrichtung, in der die Entfernungsmessung durchgeführt wurde. Darüber hinaus dienen Meßgrößen wie zum Beispiel Reflektivität des Objektes, Farbinformation, etc. der weiteren Beschreibung und damit der Verfeinerung des Modells.

Zur Gewinnung von Entfernungsbildern stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung: die mechanische Abtastung der Oberfläche von Formen ist auf eher kleine Objekte beschränkt und stellt teils einschränkende Anforderungen an die Oberfläche (Festigkeit). Die laser-basierte Triangulation bzw. verschiedene Lichtschnittverfahren in Kombination mit Präzisionsdreh- und Verschiebetischen ergeben eine hohe Meßrate und eine hohe Genauigkeit, sind aber wieder auf kleine Meßvolumina beschränkt. Die Rekonstruktion von Entfernungsinformation aus zwei oder mehr 2D-Aufnahmen aus

¹ For further author information: RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Austria
Tel: +43 2982 4211, Fax: +43 2982 4210, Web: www.riegl.co.at, Email: AUllrich@riegl.co.at

unterschiedlichen, definierten Positionen erfordert zum einen eine gewisse Strukturierung der Objektoberfläche und spezielle Beleuchtungsverhältnisse, zum anderen einen beträchtlichen Rechenaufwand.

Die Laser-Entfernungsbildaufnahme nach dem Prinzip der Laserpuls-Laufzeitmessung ermöglicht die rasche und genaue 3D-Datenerfassung in einem großen Entfernungsbereich unabhängig von den Beleuchtungsverhältnissen. Nachfolgend wird ein kommerzieller 3D-Entfernungsbildsensor beschrieben, der in einer kompakten und robusten Bauweise für den Einsatz auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen geeignet ist.

Mögliche Anwendungen und Einsatzgebiete der 3D-Entfernungsbildaufnahme nach dem Laserpuls-Laufzeitverfahren sind unter anderem:

- 3D-Bilderfassung von Gebäuden in der Architektur, Archäologie und im Denkmalschutz (Burgen, Schlösser, Ruinen, Ausgrabungsstätten etc.)
- Reverse Engineering: Erfassung von Industrieanlagen und anderer Objekte zur Planerstellung und zum Vergleich mit den ursprünglichen Erstellungsunterlagen (z.B. in Chemiewerken, Atomkraftwerken, Bohrseln, Zwischendecken und Verkabelungen in Wolkenkratzern, etc.)
- 3D Modellierung von realen Szenen für virtuelle Räume (Virtual Reality) für Telepresence, Virtual Filmstudios, 3D Animationen, etc.
- Erstellung von digitalen Höhenmodellen von Wohngebieten, Wohnbezirken bis hin zu kompletten Städten einschließlich der Vegetation und der Gebäude
- Geländevermessung im Bergbau, speziell im Tagbau, z.B. zur Volumbestimmung vor und nach einer Sprengung
- Vermessung von Lawinhängen zur Verbesserung der Vorhersage
- Vermessung von Fahrzeugen aller Art

Die primären Meßdaten eines Entfernungsbildes stellen zunächst eine sogenannte Punktwolke im lokalen Koordinatensystem des Sensors dar. Über die Definition der Eigenposition und der Orientierung des Sensors in einem „globalen“ Koordinatensystem kann die Punktwolke auch in diesem globalen Koordinatensystem dargestellt werden. Bei einer einzelnen Entfernungsbildaufnahme bleiben im allgemeinen durch Abschattung einzelne Teile des Objektes unerfaßt. Durch die Aufnahme mehrerer Entfernungsbilder aus unterschiedlichen Positionen können die Abschattungslücken gefüllt werden. Die Registrierung der einzelnen Bildaufnahmen im globalen Koordinatensystem ergibt dann eine umfassende Charakterisierung der Oberfläche des Objektes.

Bei der 3D-Repräsentierung eines Objektes ist im allgemeinen eine Darstellung durch Flächen gewünscht, die das Objekt hinreichend genau mit minimalem Speicheraufwand beschreiben. Der effiziente und automatisierte Übergang von der Repräsentation durch eine 3D-Punktwolke auf eine Modellierung durch Flächen bzw. 3D-Primitive ist ein aktuelles Gebiet der Forschung.

Der 3D-Entfernungsbildsensor der Type RIEGL LMS-Z210 (Abbildung 1) beruht auf der Laser-Entfernungsmessung nach dem Puls-Laufzeitverfahren und der optomechanischen Ablenkung der Meßstrahlen zur Abtastung des Aufnahmebereiches.



Abb. 1: 3D-Entfernungsbildsensor RIEGL LMS-Z210.

Beim Puls-Laufzeitverfahren wird die Zeit zwischen dem Aussenden eines kurzen Laserpulses und dem Empfangen des Pulses nach der Reflexion am Zielobjekt gemessen und daraus die Entfernung zum Zielobjekt errechnet. Durch den Einsatz modernster Mikroelektronik kann dabei eine Meßgenauigkeit für eine Einzelmessung im Zentimeterbereich erzielt werden bei einer gleichzeitigen Meßrate von bis zu etwa 20.000 Messungen pro Sekunde. Die zum Einsatz kommenden Laser emittieren im nahen Infrarot, die Strahlaufweitung beträgt einige wenige Millirad und die Pulsdauer liegt im Bereich einiger Nanosekunden.

Zur Bildaufnahme muß die Meßrichtung des „eindimensionalen“ Laser-Entfernungsmessers abgelenkt werden. Dies kann entweder in langsamer Weise durch mechanische Rotation des gesamten Laser-Entfernungsmessers um zwei oder mehrere Achsen erfolgen, oder aber durch Vorsetzen einer optomechanischen Ablenkeinrichtung. Im 3D-Sensor LMS-Z210 werden die Meßstrahlen durch ein kontinuierlich rotierendes Polygonrad linear abgelenkt, wodurch eine schnelle Zeilenablenkung mit einer Zeilenfrequenz bis zu 40 Zeilen pro Sekunde realisiert wird. Generell kann die zweite Ablenkung auf unterschiedliche Weise erfolgen: durch lineare Bewegung des zeilenabtastenden Sensors über das Meßobjekt z.B. auf einem Hubschrauber, durch Vorsetzen einer weiteren, langsamen optomechanischen Ablenkeinrichtung, oder durch Rotation des Sensors um eine zur Zeilenablenkung orthogonale Achse. Im 3D-Sensor LMS-Z210 wird durch Rotation der Zeilenablenkeinrichtung und Teile des Laser-Entfernungsmessers die zweite Ablenkung realisiert. Durch diese Kombination ergibt sich eine kompakte und robuste Bauform mit einem weiten, jedoch variablen Bilderfassungsbereich von bis zu 80 mal 340 Grad.

Das Entfernungsbild setzt sich aus einer Vielzahl von einzelnen, unabhängigen Meßergebnissen zusammen, die zeilenweise organisiert sind. Jedes Einzelmeßergebnis besteht aus der Meßentfernung, zwei Meßwinkeln im sensoreigenen polaren Koordinatensystem, und der Intensität des empfangen Laser-Echopulses.

Die Spezifikationen des 3D-Sensors sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefaßt. Eine Zusammenstellung von Aufnahmezeiten für unterschiedliche Aufnahmebereiche und Auflösungen ist in Tabelle 3 enthalten.

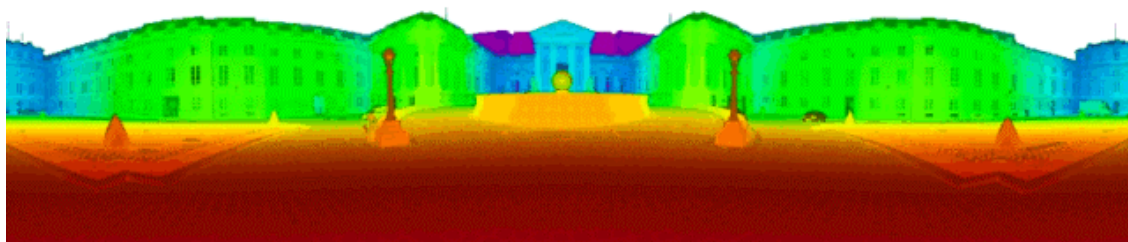


Abb. 2: Beispiel eines farbkodierten Entfernungsbildes, Bilderfassungsbereich $80^\circ \times 340^\circ$; das Bild zeigt das französische Parlament in Paris (Assemblée Nationale).

Measurement range ¹⁾	up to 350 m for natural targets, reflectivity $\geq 80\%$ up to 150 m for natural targets, reflectivity $\geq 20\%$
Minimum range	typ. 2 m
Measurement accuracy ²⁾	typ. ± 2.5 cm, in the worst case ± 10 cm
Measurement resolution	2.5 cm
Measurement rate	20 000 Hz (peak)
Laser wavelength	0.9 μm (near infrared)
Beam divergence ³⁾	approx. 3 mrad
Eye safety	Class 1 for the scanned beam
Interfaces	Parallel interface, Serial interface RS232

1) typical values for average conditions. In bright sunlight, the operational range is considerably shorter than under an overcast sky. At dawn or at night the range is even higher.
2) standard deviation, plus distance depending error $\leq 20\text{ppm}$
3) 1mrad corresponds to 10 cm beamwidth per 100 m of distance

Tab. 1: Spezifikationen – Entfernungsmesser.

Line scan (fast scan)	
Scanning range ¹⁾	$\pm 40^\circ = 80^\circ$ total
Scanning mechanism	rotating polygonal mirror
Scanning speed ²⁾⁵⁾	nominal 20 scan per second
Frame scan (slow scan)	
Scanning range ³⁾	up to $\pm 170^\circ = 340^\circ$ total
Scanning mechanism	motor-driven optical head
Scanning speed ⁴⁾⁶⁾	nom. 5 deg per second

1) scanning range can be reduced, if desired, without impact on scan speed
2) can be set by software commands between 10 scans/sec and 40 scans/sec
3) can be set between 0 deg and 340 deg
4) can be set to speeds up to 20 deg per seconds
5) scan speed and angular scan resolution has to be set not to exceed the maximum measurement rate of the rangefinder
6) defines together with scanning speed of polygonal mirror wheel the angular resolution of the vertical direction

Tab. 2: Spezifikationen – Optomechanische Abtasteinrichtung.

Abtastbereich	Anzahl der Messungen	Anzahl der Messungen	Winkelschrittweite	Datenmenge	Aufnahmezeit
80 x 80 deg	222 x 222	49.284	0.36 deg	385 kB	8 sec
80 x 80 deg	444 x 444	197.136	0.18 deg	1.5 MB	30 sec
80 x 80 deg	740 x 740	547.600	0.10 deg	4.2 MB	1 min 34 sec
80 x 40 deg	222 x 111	24.642	0.36 deg	193 kB	5 sec
80 x 40 deg	444 x 222	98.568	0.18 deg	771 kB	15 sec
80 x 340 deg	222 x 900	219.780	0.36 deg	1.5 MB	23 sec
80 x 340 deg	444 x 1800	799.200	0.18 deg	6.1 MB	2 min 00 sec

Tab. 3: Beispiele für die Aufnahmezeit und die Datenmenge bei unterschiedlichen Bilderfassungsbereichen und Auflösungen.

Die Entfernungsbilddaten werden an Standardschnittstellen zur Verfügung gestellt, so daß eine Datenübernahme auf einen Standard-PC oder Laptop in einfacher Weise möglich ist. Eine einfache Visualisierung der Entfernungsbilder erfolgt durch Farbkodierung, bzw. durch Verwendung der Intensitätsinformation. Einfache Meßaufgaben wie zum Beispiel der Abstand zweier Objektpunkte im Raum können direkt über die farbkodierten Bilder durchgeführt werden. Der Export der Daten in standardmäßigen 3D-Datenformaten ermöglicht die Weiterverarbeitung der Daten zur Modellerstellung.

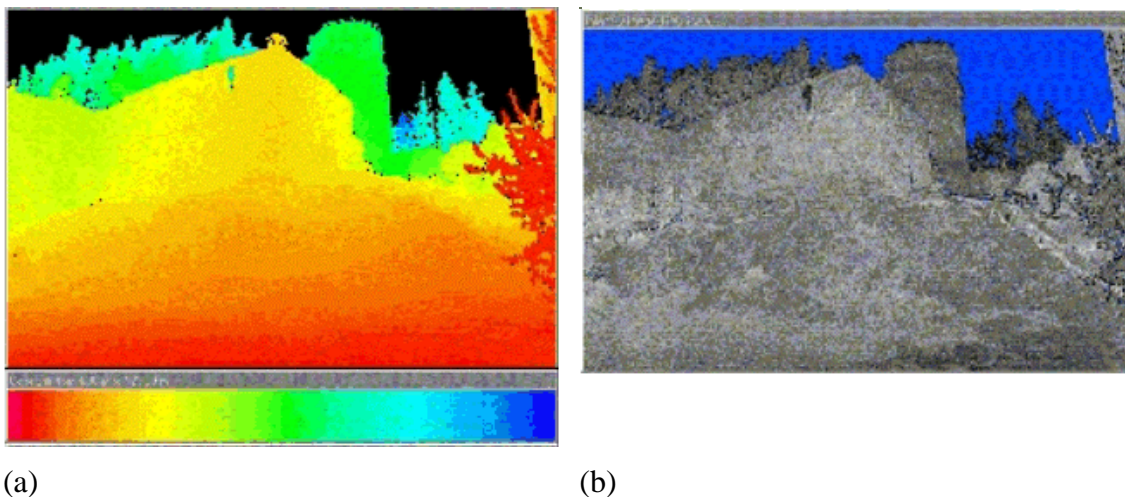


Abb. 3: Burg Kollmitz: (a) farbkodiertes Entfernungsbild, (b) Intensitätsbild.

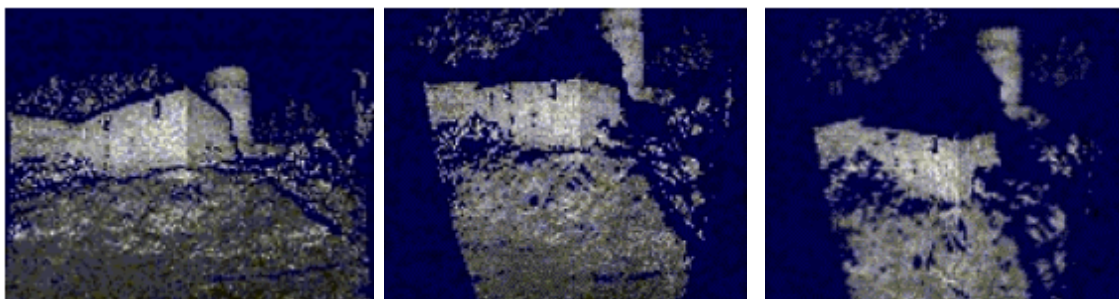


Abb. 4: Burg Kollmitz – verschiedene VRML Ansichten.

Ein Beispiel für die farbkodierte Visualisierung zeigt Abbildung 3. Das Objekt ist die Burgruine Kollmitz, NÖ. Der Entfernungsbereich für die Farbkodierung ist 4 m (rot) bis 123 m (blau). Eine einfache 3D-Repräsentation ist durch Exportieren der Daten im VRML-Format (virtual reality modeling language) und Betrachtung der Szene mit einem sogenannten VRML-Browser. Die Abbildung 4 zeigt diese Visualisierung mit unterschiedlichen Standpunkten der virtuellen Kamera. Deutlich zu erkennen ist die Abschattung mancher Teile des Objektes. Zur vollständigen Modellierung sind daher weitere Aufnahmen erforderlich.

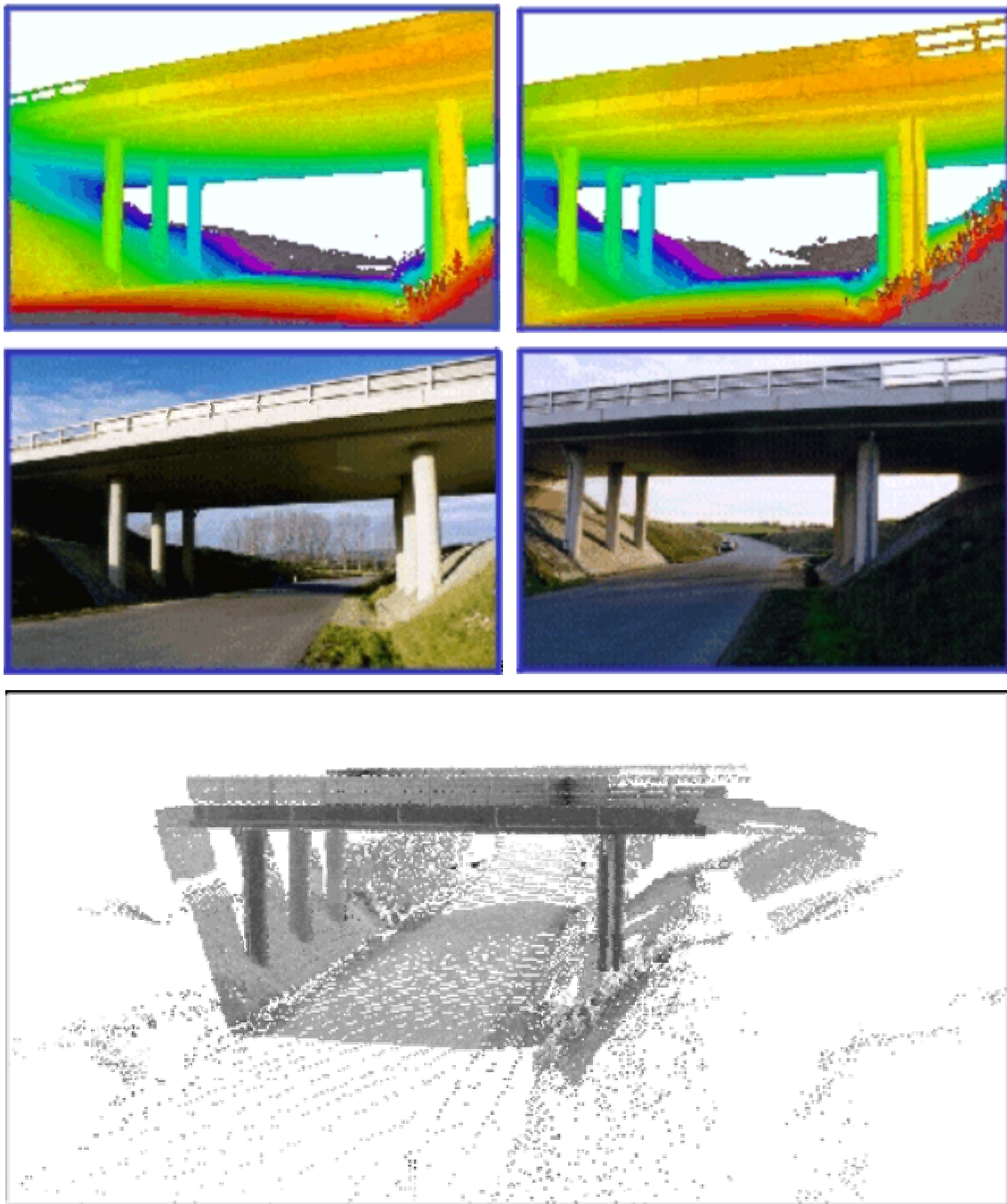


Abb 5: 3D Modell einer Brücke - zusammengesetzt aus zwei einzelnen Entfernungsbildern: (a) Entfernungsbilder, (b) Intensitätsbilder, (c) VRML 3D Modell.

Ein Beispiel für die Registrierung mehrerer Entfernungsbildaufnahmen in einem gemeinsamen Koordinatensystem zeigt die Abbildung 5. Eine Brücke wurde von zwei Seiten aufgenommen und die Daten mit der Kenntnis der Aufnahmepositionen und der Orientierung des Sensors in ein Koordinatensystem im VRML Format exportiert. Das entstehende 3D Modell kann nun von beiden Seiten betrachtet werden, und ein „virtueller Flug“ unter der Brücke hindurch ist möglich.

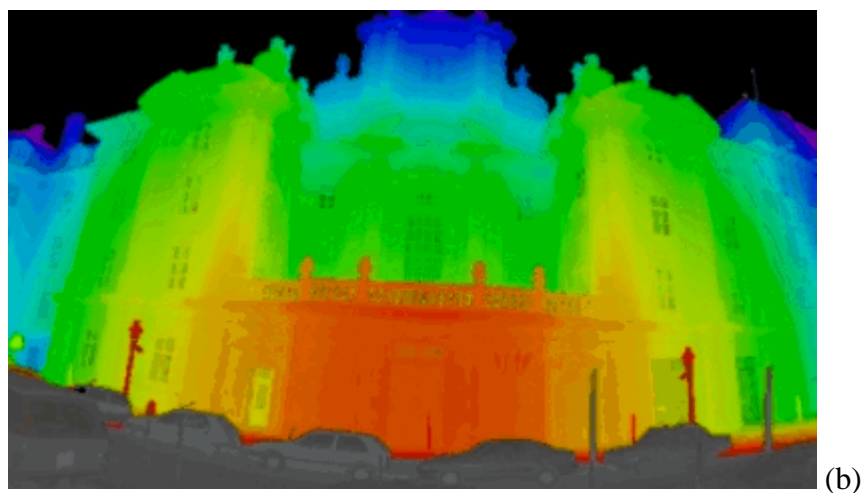


Abb. 6: Außenaufnahme der Kirche am Hof: (a) Konventionelles Farbbild, (b) Entfernungsbild, (c) Normalprojektion.

Ein Beispiel für die Erfassung von Kulturdenkmälern ist in der Abbildung 6 wiedergegeben. Sie zeigt die Außenansicht der Kirche am Hof, Wien, als Farbbild und als farbkodiertes Entfernungsbild. Aus diesem Entfernungsbild kann in effizienter Weise eine Normalprojektion der Fassade erstellt werden, wobei der Abstand zur Normalebene wiederum farbkodiert wiedergegeben ist.

Die Abbildung 7 zeigt einen Teil des Innenraums der Kirche wieder als farbkodiertes Entfernungsbild. Die Normalprojektion des Gewölbes (oben farbkodiert, unten Intensität des Laserechos) zeigt klar die Abweichung des Gewölbes von der Rechtwinkeligkeit.

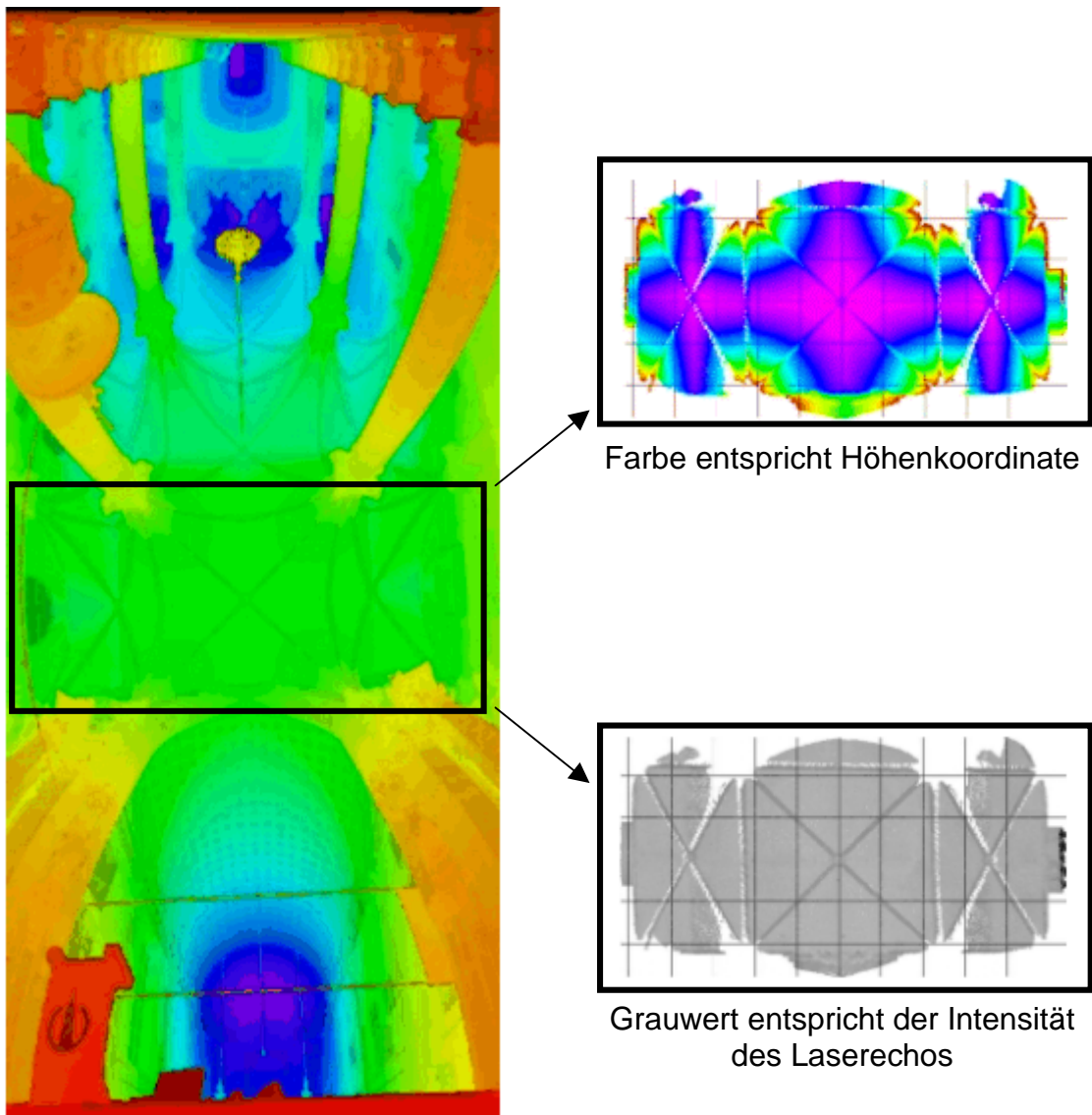


Abb. 7: Innenaufnahme der Kirche am Hof – Normalprojektion des Gewölbes.