

# 3D-Monoplotting

## Kombinierte Auswertung von Laserscannerdaten und photogrammetrischen Aufnahmen

Ralf Becker, Wilhelm Benning und Christoph Effkemann

### Zusammenfassung

Die Nachfrage nach digital erfassten und gespeicherten Objekten aller Art in digitalen Modellen nimmt zu. Hierzu zählt im Nahbereich z. B. die Bestandserfassung von Gebäuden und industriellen Anlagen für Planungs- oder Denkmalschutzzwecke. Für eine derartige Massendatenerfassung bietet sich inzwischen die gleichzeitige photogrammetrische Aufnahme und terrestrische Laserscannervermessung in einem kombinierten Aufnahmesystem an. Aus den Rohdaten werden geometrische Primitive wie Punkte, Linien und Flächen extrahiert und zu einem Modell des Objekts zusammengefügt. Vorgestellt wird die kombinierte Auswertung von Laserscanner- und photogrammetrischen Daten im Auswertesystem PHIDIAS.

### Summary

*The demand for digitally registered objects of any type in digital models is increasing. Buildings and plants are recorded for as-built-documentation, planning or protection of historical monuments. Photogrammetry and laser scanning simultaneously used in a combined system meanwhile offers the data capturing. The captured data are used for the extraction of geometric primitives namely points, lines and surfaces, which are combined, forming a model of the object. Presented is the combined modeling of laser scanning and photogrammetric data in PHIDIAS modeling system.*

## 1 Einleitung

Für die Planung von An- oder Einbauten an bzw. in bestehenden Gebäuden oder Industrieanlagen, für die Dokumentation baulicher Anlagen oder die Restaurierung von denkmalgeschützten Anlagen ist die Kenntnis der bestehenden Geometrie von großer Bedeutung. Die bauliche Anlage, das Realweltobjekt, muss in ein Planungs- bzw. Dokumentationssystem überführt werden. Dies sind heute die gängigen Geoinformationssysteme. Die Darstellung in Geoinformationssystemen basiert auf einer begrenzten Anzahl modellierter Grundformen von Linien, Flächen und Körpern wie Geraden, Ebenen und Quadern, um nur die einfachsten Typen zu nennen. Durch sie werden Kanten, Oberflächen bzw. Volumenelemente des Realweltobjekts repräsentiert. Das entstehende Modell des Realweltobjekts muss in einer für den Zweck ausreichenden Genauigkeit mit der realen Welt übereinstimmen.

Zur Erfassung der Objekte in der Örtlichkeit haben sich unterschiedliche Methoden vom Handaufmaß über die

tachymetrische Aufnahme von attribuierten Einzelpunkten bis zur Massenkpunktaufnahme mit Hilfe der Photogrammetrie und dem Laserscanner entwickelt. Während bei den punktuell messenden Verfahren viel Zeit benötigt wird, werden bei der Photogrammetrie wie auch beim Laserscanning vom Aufnahmestandpunkt aus sichtbare Objektpunkte flächenhaft bzw. im gewünschten Aufnahmeraster schnell, aber unattribuiert, erfasst. Die Aufnahmezeit kann auf ein Minimum reduziert werden.

## 2 Verbindung von Laserscanner- und photogrammetrischer Aufnahme

Der Laserscanner erfasst Punkte dreidimensional durch Messung von Horizontal- und Vertikalwinkel sowie der Raumstrecke. Die Streckenmessung erfolgt mittels elektrooptischer Entfernungsmessung im – je nach Gerätetyp – Impuls- oder Phasenvergleichsverfahren. Mit Hilfe einfacher trigonometrischer Operationen erhält man die gemessenen Objektpunkte in einem scannerbezogenen kartesischen Koordinatensystem. Horizontal- und Vertikalwinkel werden automatisch in einer zuvor festgelegten Schrittweite verändert. Damit ergibt sich unter Berücksichtigung der Entfernung des Objekts vom Aufnahmestandpunkt und der Verkipfung der Objektoberfläche zur Aufnahmerichtung die Punktauflösung am Objekt.

Bei der photogrammetrischen Aufnahme entsteht ein – heute regelmäßig digitales – Grauwert- oder Farbbild des Objekts. Die Auflösung hängt von der Kameraoptik und – im Fall der heute üblichen Digitalkameras – von Größe und Anzahl der lichtempfindlichen Sensoren sowie der Brennweite der Kamera ab. Sie kann, da die Aufnahme (Belichtung) für alle aufgenommenen Punkte parallel erfolgt, wesentlich höher als bei den seriell messenden Laserscannern sein. Gemessen werden zweidimensionale Bildkoordinaten. Die dritte Dimension ergibt sich aus einer zweiten photogrammetrischen Aufnahme desselben Objektpunktes durch Schnitt der Zielstrahlen. Mit wachsender Entfernung zu den beiden Aufnahmestandpunkten sinkt die Güte dieser Entfernungsbestimmung. Die Entfernungsmessung des Laserscanners ist hingegen weitestgehend entfernungsunabhängig.

Für die Auswertung der Aufnahmen ist eine möglichst anschauliche Visualisierung im Geoinformationssystem erforderlich. Eine Aufnahme, sei es die Punktwolke der Laserscanneraufnahme oder seien es die Bildpunkte der



Abb. 1: Riegl-Scanner LMS-Z420i mit aufgesetzter Kamera Nikon D100

photogrammetrischen Aufnahme, wird durch Schattierung und/oder Farbgebung der Punkte für den Betrachter anschaulich und interpretierbar. Die Grauwert- bzw. Farbwertstufen der photogrammetrischen Aufnahme sind wesentliche attributive Bestandteile. Laserscanner liefern dagegen Intensitätsmessungen des zurückkehrenden Impulssignals.

Die aufnahme- und auswertespezifischen Vorteile von Laserscanning bzw. Photogrammetrie können durch die Kombination beider Systeme bei der Objektaufnahme und -auswertung optimal genutzt werden. Der Hersteller RIEGL hat seinen Laserscanner hierzu mit einer hochauflösenden photogrammetrischen Kamera bestückt (Abb. 1).



Abb. 2: Visualisierung von Laserscanner- und photogrammetrischen Daten in Superimposition

Im digitalen Auswertesystem PHIDIAS (Benning und Schwermann 1997) werden Scanner- und photogrammetrische Daten in Superimposition visualisiert (Abb. 2). Die gegenseitige Orientierung der Scanner- und Kamera-standpunkte erfolgt mit der Scannersoftware. Zusätzliche Bilder können mit PHIDIAS orientiert werden. Die Daten beider Aufnahmemethoden lassen sich simultan zur Objektmodellierung verarbeiten. Das digitale photogrammetrische Auswertesystem PHIDIAS, kombiniert mit dem CAD-System MicroStation, wurde um Funktionen zur Auswertung von Laserscannerdaten erweitert.

### 3 Auswertemethoden

#### 3.1 Einzelpunktmessung

Der Laserscanner misst die Objektpunkte in einem durch den Scanner vorgegebenen Winkelraster. Die photogrammetrische Auflösung ist in der Regel höher als die der Punktwolke. Die Identifikation eines Modellpunktes ist durch die photogrammetriegestützte Grauwert- bzw. Farbwertinformation einfacher als auf der Basis einer gescannten Punktwolke. Die Lage eines photogrammetrisch identifizierten Punktes in Relation zu den Scannerpunkten lässt sich durch Schnitt der photogrammetrischen Abbildungsrichtung mit der aus den benachbarten Scannerpunkten berechneten Ebene bestimmen. Zur Redundanzsteigerung können weitere, umgebende Scannerpunkte zur Ebenenbestimmung verwendet werden (Abb. 3). Der Abstand der Punkte zum Schnittpunkt kann durch entsprechende Gewichtungsansätze berücksichtigt werden. Dieses Verfahren wurde von Schwermann und Effkemann (2002) als Monoplotting-Verfahren vorgestellt.

Es eignet sich für Modellpunkte, die innerhalb einer ebenen Fläche liegen. Bei der Auswahl der Scannerpunkte muss mit Hilfe von Auswahlfunktionen sichergestellt sein, dass diese Punkte im Rahmen einer vorgegebenen Genauigkeit in derselben Ebene liegen.



Abb. 3: Einzelpunktbestimmung mit gescannter Punktumgebung



### 3.2 Automatische Extraktion von geometrischen Primitiven

Das Objekt der Realwelt (Abb. 4a) ist in ein Modell (Abb. 4b) zu überführen, bestehend aus Ecken, Kanten und Oberflächen. Man verbindet Ecken zu Kanten. Kanten begrenzen Oberflächen. Oberflächen begrenzen Volumenelemente.

Oberflächen von baulichen Anlagen enthalten vielfach ebene Flächen, welche sich in den Ecken und Kanten des Objekts schneiden. Industrielle Anlagen enthalten oftmals zylinderförmige Objekte wie Röhren, oder Säulen an Gebäuden.



Abb. 4a: Bild

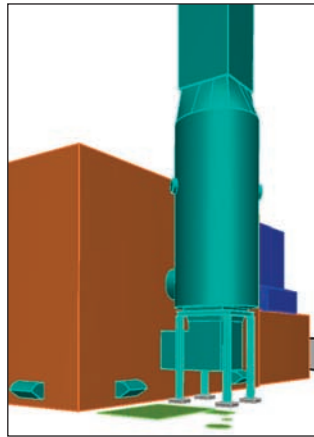


Abb. 4b: Modell

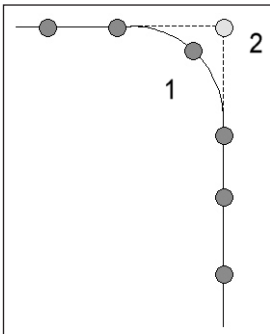


Abb. 5: Abrundung einer Kante

Die Modellierung z.B. der Ecken aus realen Scannerpunkten kann fehlschlagen, weil diese in der Realität wegen Rundungen nicht existent sind (Abb. 5, Punkt 1). Erst durch Schnitt der angrenzenden Kanten erhält man die gesuchten konstruktiven Ecken (Abb. 5, Punkt 2) bzw. die Kanten aus dem Schnitt von Flächen.

#### 3.2.1 Extraktion von Regelflächen

Zur Elimination gerätebedingter, zufälliger Fehleranteile der Scannerpunkte und zufällig verteilter, nicht zu modellierender Objektstrukturen (Abb. 6) erfolgt die Flächenmodellierung durch Ausgleichsrechnung.

Mit dem Fadenkreuz im photogrammetrischen Bild trifft der Auswerter eine Scannerpunktauswahl, in der wahlweise nach ebenen Flächen und/oder Zylindern gesucht wird.

Die in die Ausgleichung einzuführende Punktmenge wird mittels eines automatischen Suchverfahrens rekursiv auf der Basis von räumlichen Punktnachbarschaften aus der Gesamtpunktmenge oder einem Teil davon aggregiert (Abb. 7). Die Nachbarschaftsbeziehungen werden einer

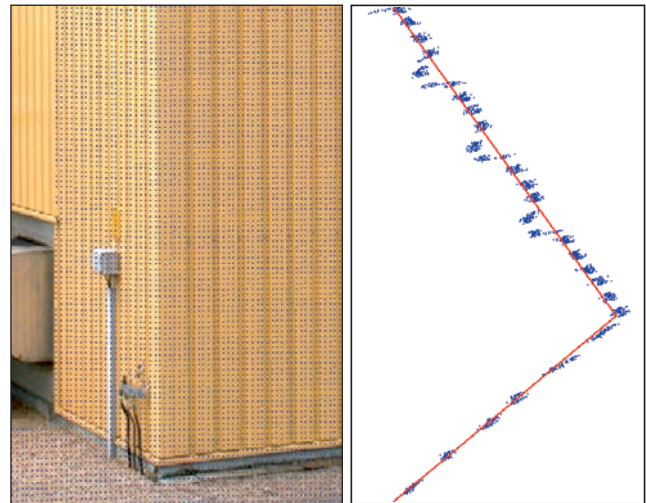


Abb. 6: Objektstruktur am Beispiel eines Trapezbleches  
a) Ansicht von vorne      b) Ansicht von oben

dreidimensionalen Delaunay-Triangulation entnommen. Zur Beurteilung der Flächenzugehörigkeit werden lokale Krümmungswerte in den Scannerpunkten in zwei zueinander orthogonalen Richtungen berechnet. Die Krümmungsparameter der zu modellierenden Regelfläche werden somit sukzessive verbessert.

Die Ausgleichung liefert die Parameter der Regelfläche und zur Genauigkeitsbeurteilung die Standardabweichung der Punktabstände zu dieser Fläche.

Ebene Flächen werden durch Polygone formalisiert, Zylinderflächen durch Ellipsenbogenstücke. Die Geraden- und Ellipsenbogenstücke entstehen durch Generalisierung von Randpunktpolygonen, die einem zweidimensionalen Alpha-Shape entnommen werden. Im Fall der Zylinderfläche erfolgt die Randberechnung durch Abwicklung der Zylinderfläche in die Ebene.

Aus der maximalen Ausdehnung der aggregierten Scannerpunktmenge werden für die Zylinderfläche die Achsenendpunkte des Kreiszylinders bestimmt (Abb. 8).

Die Regelflächenextraktion basiert ausschließlich auf Scannerdaten. Die photogrammetrische Aufnahme dient zur visuellen Unterstützung und Kontrolle.

In das System PHIDIAS wurde eine Ausrichtungsfunktionalität implementiert, um ebene Flächen bei Unterschreitung eines vorgegebenen Winkelgrenzwertes für die Winkelabweichung parallel bzw. orthogonal zum



Abb. 7: Automatisch aggregierte Zylinderflächenpunkte



Abb. 8: Extrahierter Zylinder

aktiven Koordinatensystem auszurichten. Bei Zylindern wird die Zylinderachse entsprechend ausgerichtet.

Die extrahierten Regelflächen können anhand der Punktwolke und/oder der photogrammetrischen Aufnahme z. B. in Schnitt-, Differenz- und Extrusionsfunktionen weiterverarbeitet werden.

Für diverse Auswertungen sind lokal definierte kartesische Koordinatensysteme von großem Nutzen, in denen z. B. die Ebenennormale bzw. die Richtung der Zylinderachse einer extrahierten Regelfläche die Richtung der z-Achse bilden (Abb. 9).

Ebenenbasierte lokale Koordinatensysteme können z. B. zur exakten Modellierung von Rändern ebener Flächen unter Nutzung der hohen photogrammetrischen Auflösung benutzt werden. Die Randpunkte entstehen durch Schnitt von vorgegebenen photogrammetrischen Abbildungsrichtungen mit der xy-Ebene des lokalen Koordinatensystems.

Auf extrahierten Zylindern basierende lokale Koordinatensysteme sind z. B. bei der Modellierung von Röhrensystemen von Nutzen.



Abb. 9: Lokale Koordinatensysteme

a) ebenenbasiert

b) zylinderbasiert

### 3.2.2 Extraktion von Ecken, Kanten und Profilen

Das Beispiel in Abb. 10 zeigt das Ergebnis einer Kantenextraktion an einer Gebäudefassade. Die rechnerisch verschnittenen Ebenen (von oben betrachtet Linien) sind als Mittel der Punktwolke zu erkennen, derweil die extrahierte Kante – von oben betrachtet – als quadratischer Punkt erscheint (Abb. 11).

Das Bilden von Profilen ist wichtiger Bestandteil der Modellierung. Im einfachsten Fall wird die Scanner-



Abb. 10: Bestimmen einer Kante: Ansicht von vorne

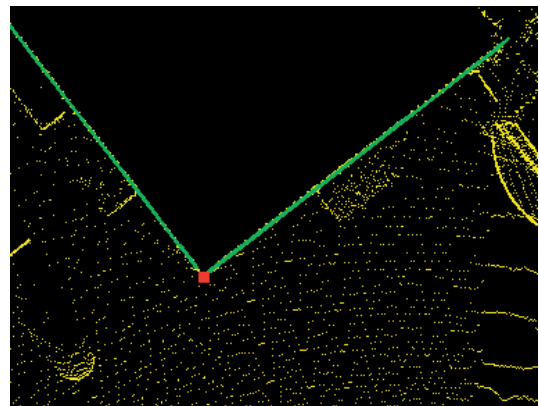


Abb. 11: Bestimmen einer Kante: Ansicht von oben

punktwolke mit Auswahlfunktionen derart reduziert und rotiert, dass vom Auswerter einzelne profilbildende Linienstücke modelliert werden können. Die für ein Profilstück repräsentativen Punkte werden per Augenschein gemittelt.

Nach interaktiver Vorgabe der Profilausrichtung durch eine bereits modellierte Gerade und der Profilausdehnung durch Vorgabe von zwei Punkten in der Ansicht erfolgt die Punktauswahl automatisch. Diese Interaktionen werden durch die photogrammetrische Aufnahme visuell unterstützt.

Das Gesamtprofil setzt sich aus einzelnen Profilstücken (Raumlinien) zusammen. Sie ergeben sich als Schnitte der extrahierten Regelflächen mit der Profilebene. Die Objektflächen werden im vorgegebenen Suchraum formalisiert, extrahiert und unter Berücksichtigung von Löchern mit der Profilebene zu Geraden- bzw. Ellipsenbogenstücken verschnitten. Die gefundenen benachbarten Profilstücke werden durch Schnittbildung verkettet (Abb. 12).

Das extrahierte Profil kann auf Basis der höher aufgelösten photogrammetrischen Aufnahme um fehlende Details ergänzt werden. Durch Extrusion entlang der Profilnormalen können anhand der photogrammetrischen Aufnahme z. B. Gebäudefassaden modelliert werden.



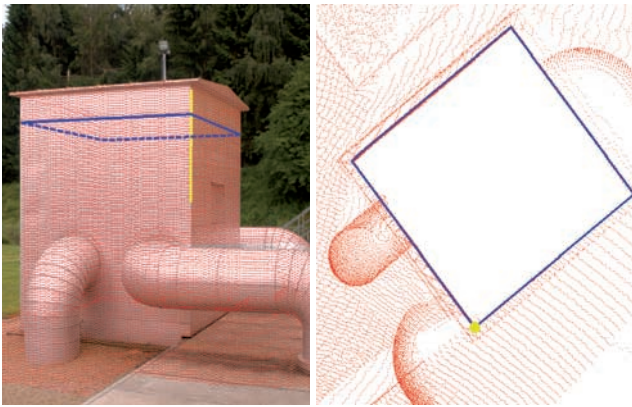


Abb. 12: Extrahiertes Profil:

a) Ansicht von der Seite      b) Ansicht von oben

#### 4 Ein Anwendungsbeispiel aus dem Anlagenbau

Die beschriebenen Auswertemethoden wurden bei der Bestandserfassung einer Gas-Verdichterstation intensiv angewendet und mit tachymetrischen und rein photogrammetrischen Verfahren verglichen.

Die Bestandspläne der Station lagen bisher in Form zweidimensionaler digitaler Pläne vor. Mit der Neuerfassung soll der Übergang zur dreidimensionalen Dokumentation in einem Geoinformationssystem vollzogen werden. Die Aufnahme konzentrierte sich auf den oberirdischen Teil der Anlage. Nur ein kleiner Teil der unterirdisch verlaufenden Rohrleitungen lag aufgrund einer Umbaumaßnahme frei und wurde mit einbezogen.

##### 4.1 Objektaufnahme

Ein wesentliches Merkmal der Laserscanneraufnahme ist, dass die Anlage vor Ort in kurzer Zeit nahezu vollständig erfasst werden kann. Der Aufenthalt in explosionsgefährdeten Bereichen, durch den zusätzliche Sicherungsmaßnahmen und Personal erforderlich sind, wird auf ein Minimum reduziert. Die Auswahl und Modellierung der repräsentativen Anlagenteile wird in den kostengünstigeren Innendienst verlagert.

Die Erfassung des ca. 18000 m<sup>2</sup> umfassenden Geländes erfolgte von 40 gleichmäßig verteilten Scannerstandpunkten aus. Für die Auswahl der Standpunkte spielt die Auflösung und Reichweite des Scanners nur eine kleine Rolle. Entscheidend ist die Bebauungsdichte. Je dichter eine Anlage bebaut ist, desto mehr Scanstandpunkte werden benötigt, um Scanschatten zu minimieren.

Zum Einsatz kam der Laserscanner RIEGL LMS Z420i mit aufgesetzter kalibrierter Digitalkamera Nikon D100 (Abb. 1, Tab. 1 und Tab. 2). Die Kopplung der Kamera mit dem Scanner hat den Vorteil, dass sich die Orientierungsdaten der photogrammetrischen Aufnahmen automatisch mit der Orientierung der Punktwolken ergeben. Die bei freihändigen Aufnahmen notwendigen Bildpunktmesungen und Orientierungsberechnungen können entfal-

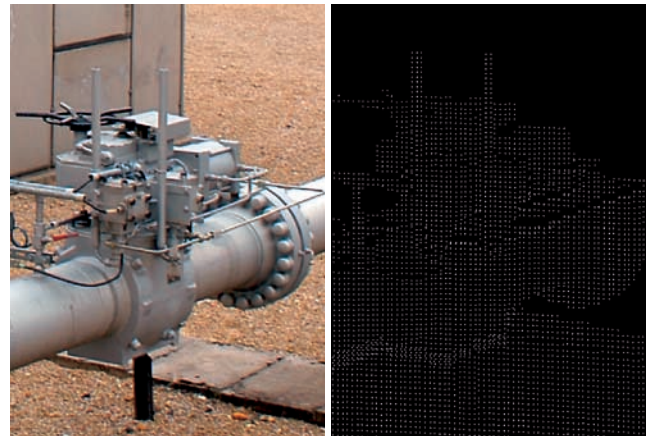


Abb. 13: Vergleich der Detailauflösung von Foto und Punktwolke in 10 m Entfernung

len. Bei einer Gesamtanzahl von mehr als 400 Bildern entspricht das einer Zeitersparnis von ca. 40 Stunden.

Die maximale Auflösung des Scanners wurde nicht ausgeschöpft, um die Scanzeiten zu verringern und die Datenmengen überschaubar zu halten. Eine extrem hohe Auflösung der Punktwolke ist auch nicht nötig, weil Details im hochauflösenden Digitalbild in der Regel besser erkennbar sind (Abb. 13).

Aus Tab. 3 wird ersichtlich, dass die Bildauflösung mit 3,9 mm um den Faktor 5,4 besser ist als die Auflösung der Punktwolke mit 21 mm. Die Detailerkennbarkeit im Digi-

Tab. 1: Eigenschaften des 3D Laserscanners

Modellbezeichnung	RIEGL LMS-Z420i
Scanbereich horizontal	360°
Schrittweite horizontal	min. 0.008°
Scanbereich vertikal	80°
Schrittweite vertikal	min. 0.010°
Streckenmessgenauigkeit	±10 mm (Einzelmessung)
Datenrate	8000 Punkte / Sekunde

Tab. 2: Eigenschaften der Digitalkamera

Modellbezeichnung	Nikon D100
Anzahl Pixel	3008 × 2000
Sensorgröße	23,46 mm × 15,6 mm
Pixelgröße des Bildsensors	7,8 µm
Objektiv	20 mm Festbrennweite

Tab. 3: Auflösung der Einzelscans und Bilder

Winkelauflösung horiz. und vertikal	0,12°
Anzahl Punkte horizontal	3000
Anzahl Punkte vertikal	666
Punktzahl pro Scanstandpunkt	max. ca. 2 Mio.
Reine Scanzeit	4 Minuten
mittlere Aufnahmeentfernung	ca. 10 – 20 m
Abstand der Scanpunkte in	
10 m Entfernung	21 mm
Anzahl Fotos pro Scanstandpunkt	10
Pixelgröße in 10 m Entfernung	3,9 mm



Abb. 14: Umsetzen des Scanners mit einem fahrbaren Gestell

talbild kann durch Verwendung von Objektiven mit längeren Brennweiten noch gesteigert werden. Die Anzahl der Aufnahmen steigt dadurch aber ebenfalls an und der vertikale Öffnungswinkel verkleinert sich entsprechend. Der Öffnungswinkel des 20 mm-Objektivs beträgt bei Hochkantaufnahmen 60° und deckt damit  $\frac{3}{4}$  des vertikalen Scanbereichs ab. Mit einem 14 mm-Objektiv könnte man zwar den gesamten Scanbereich abdecken, in diesem konkreten Fall war aber ein größerer Bildmaßstab wichtiger. Mittlerweile sind Kameras mit Bildsensoren in Kleinbildgröße verfügbar. Zum Beispiel deckt die Canon 1Ds bei annähernd gleicher Pixelgröße fast die doppelte Fläche ab.

Der Scanner ist auf einem fahrbaren Gestell montiert (Abb. 14). Es erleichtert und beschleunigt das Umsetzen des Scanners, sorgt für einen sicheren Stand und erhöht die Aufnahmeposition, so dass flache Objekte in Bodenhöhe wie z. B. Schachtdeckel auch in größerer Entfernung noch gut sichtbar sind. Das Gestell kann in acht Teile zerlegt werden, so dass die gesamte Ausrüstung in einem Kombi-PKW Platz findet. Am fahrbaren Gestell sind neben dem Scanner mit aufgesetzter Kamera ein kleiner Notebook-Computer für die drahtlose Kommunikation per WLAN mit dem Auswertecomputer und eine 12V-Batterie für die Stromversorgung befestigt.

Der Aufwand für die örtlichen Arbeiten betrug zwei volle Tage mit zwei Personen. Die Passpunkte wurden während des Scannens mit dem reflektorlos messenden Tachymeter Zeiss RL bestimmt.

Die so genannte Registrierung der Scanstandpunkte, das heißt, die Berechnung der Transformationsparameter zwischen Scannerkoordinatensystem und Projektkoordinatensystem wurde unmittelbar nach jedem Scan durchgeführt, um eine sofortige Kontrolle der Registrierengenauigkeit zu haben. Die Transformation der Punktwolken in das gemeinsame Projektkoordinatensystem wurde zudem zur Erkennung abgeschatteter Bereiche benutzt. Die Verweildauer pro Standpunkt betrug ca. 20 Minuten.

Als Zielmarken dienten entweder Reflexmarken, die an gut sichtbaren Positionen auf Gebäude oder Anlagenteile geklebt wurden, oder zylindrische Reflexmarken, die den

Vorteil haben, aus allen Richtungen erkennbar zu sein. Der Scanner erkennt diese Marken automatisch anhand der stärkeren Reflexion. Die Zuordnung der erkannten Marken zu den tachymetrisch bestimmten Koordinaten aus der Passpunktliste erfolgt automatisch, wenn genügend Punkte gefunden werden und aufgrund der unterschiedlichen Abstände zwischen den Punkten eine eindeutige Zuordnung möglich ist. Die Verteilung der Reflektormarken muss deshalb unregelmäßig sein. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass die Marken über den gesamten Horizont verteilt sind, um eine stabile Transformation der verschiedenen Punktwolken ins Projektkoordinatensystem zu gewährleisten.

Reicht der vertikale Öffnungswinkel des Scanners nicht aus, um sehr hohe Gebäude oder Türme vollständig zu erfassen, kann das Gerät gekippt werden. Die gekippten Positionen, so genannte »Tiltmount Positions«, können vorab kalibriert werden. Es reicht aus, wenn in der normalen vertikalen Ausrichtung genügend Reflektormarken erfasst werden.

Die Aufnahme mit der Digitalkamera wird mit eingeschaltetem Blitz ausgelöst, um die Reflexmarken im Bild einfacher identifizieren zu können. Das kleine eingebaute

Blitzlicht hellt die Marken sehr deutlich auf, ohne die Belichtung der übrigen Objekte zu beeinflussen (Abb. 15).



Abb. 15: Mit Reflektormarke signalisierter Passpunkt

Zur Kalibrierung der Kamera gehört die Bestimmung der inneren Orientierung einschließlich Verzeichnungsparametern sowie die der äußeren Orientierung, also der Position und Aufnahme- richtung bezogen auf das Koordinatensystem des Scanners. Die

Kamerakalibrierung läuft weitgehend automatisch ab und wurde während der zwei Tage einmal durchgeführt. Dazu wurden auf zwei Laternenmasten in vertikalen Reihen verteilte Marken mit hoher Auflösung gescannt und mehrfach in kleinen Winkelschritten mit der Kamera aufgenommen. Durch die hohe Anzahl verschwenkter Aufnahmen wird ein großes zusammenhängendes Passpunktfeld simuliert und eine hohe Kalibrierengenauigkeit erreicht.

## 4.2 Objektauswertung

Die Modellierung der Anlage erfolgte zum großen Teil mit den in Kapitel 3 beschriebenen Methoden. Ebene Flächen, zylindrische Rohrleitungsabschnitte und Gebäudekanten wurden automatisch aus der Punktwolke extrahiert. Vervollständigt wurden die Objekte anschließend durch Monobildmessung.

Sehr dünne Rohrleitungen und andere Details, die aufgrund des Rauschens der Laserscannerdaten nicht automatisch extrahiert werden konnten, wurden entweder in





Abb. 16: Überlagerung von Bild und Zeichnungselementen

Einzelbildern gemessen oder mit Hilfe der klassischen Mehrbildmessung bestimmt. Eine Einbildmessung war immer dann möglich, wenn die Ebene bzw. die Achse des Elementes bekannt war. Für die Anpassung und Konstruktion der Zeichnungselemente können alle Funktionen des CAD-Systems MicroStation direkt im Bild angewendet werden. Die Bilder, die Punktwolke und die konstruierten Elemente werden in Superimposition dargestellt (Abb. 16).

Gekrümmte Rohrachsen wurden indirekt bestimmt, indem nur ein schmaler Bereich der Punktwolke dargestellt wurde (Abb. 17). Über die Mittelachse konnte anschlie-

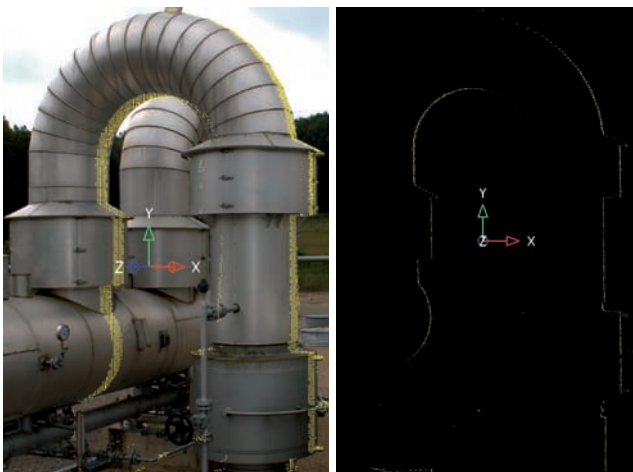


Abb. 17: Schnittdarstellung der Punktwolke

ßend die Rohrfläche mit konstantem Radius extrudiert werden.

Der gesamte Zeitaufwand für die Modellierung der Anlage betrug ca. 60 Stunden. Die Auswertezeit liegt damit deutlich unter der Zeit, die eine rein photogrammetrische Auswertung benötigt hätte. Der größte Zeitvorteil ergab sich durch den Wegfall der Orientierungsberechnung, da PHIDIAS die Orientierungsparameter der Bilder und Punktwolken automatisch aus der Software RiSCAN Pro von RIEGL übernimmt. Der Unterschied zum tachymetrischen Aufmaß fällt noch deutlicher aus, da in PHIDIAS Vermessung und Modellierung in einem Arbeitsschritt ausgeführt werden. Eine tachymetrische Vermessung mit anschließender 3D-Modellierung hätte nicht nur ein Vielfaches an Zeit gekostet, sondern wäre auch nicht so einfach auf Vollständigkeit und Richtigkeit überprüfbar und hätte einen geringeren Informationsgehalt.

Die Genauigkeiten der beiden kombinierten Systeme sind unterschiedlich. Der Laserscanner misst die Laufzeit des reflektierten Lichtimpulses. Die Entfernungsmessgenauigkeit ist prinzipbedingt nur geringfügig entfernungsabhängig. Bei der photogrammetrischen Messung dagegen hängt die Genauigkeit der Entfernung stark vom Schnittwinkel der Bildstrahlen ab. Die Standardabweichung der Bildmessung ist auf kurzen Entfernungen besser als beim Laserscanner, steigt aber mit zunehmender Entfernung schneller an (Abb. 18).

Die Konsequenz daraus ist, dass die Entfernung bzw. die Lage einer Fläche aus der Punktwolke bestimmt wird und der Rand bzw. die Kante eines Objektes aus dem Bild. Zum Beispiel wird für die Messung der Lage eines Schachtdeckels eine ausgleichende Ebene aus der Punktwolke extrahiert und die Kante in einem einzelnen Bild gezeichnet (Abb. 3). Automatisch extrahierte zylindrische Rohrleitungsabschnitte werden im Bild bis zum Ende oder bis zu einem Knick verlängert (Abb. 19).

### 4.3 Ergebnisse

Das erste, schnelle Ergebnis der Aufnahme war eine mit Hilfe der Digitalbilder eingefärbte dreidimensionale

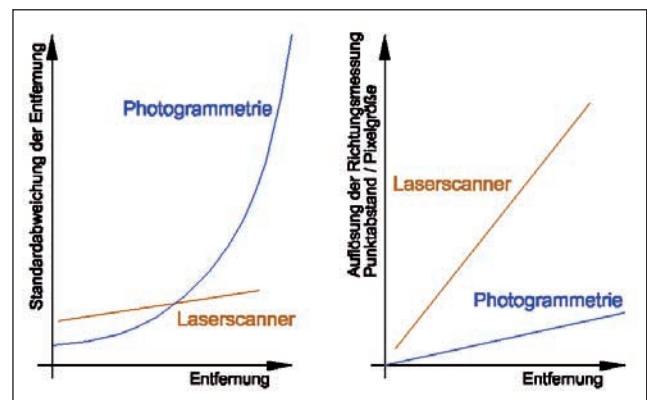


Abb. 18: Genauigkeit der Aufnahmeverfahren in Längsrichtung und Auflösung in Querrichtung

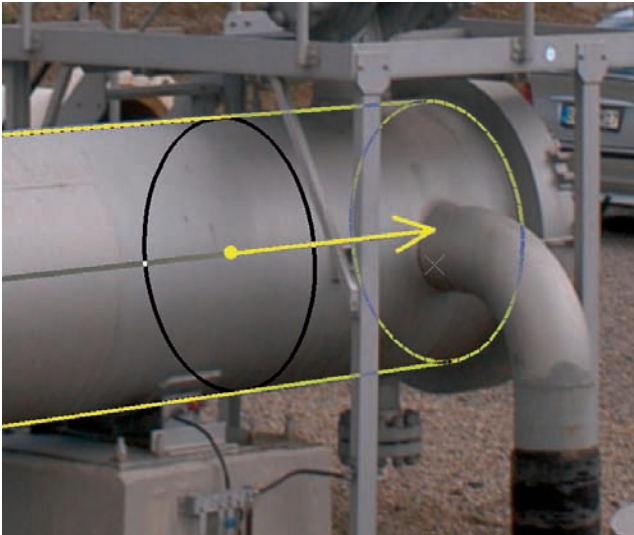


Abb. 19: Axiale Verlängerung eines automatisch extrahierten Zylinders durch Monobildmessung

Punktwolke, in der man frei navigieren kann. Sie stand schon unmittelbar nach Abschluss der örtlichen Arbeiten zur Verfügung. In ähnlicher Weise kann man die orientierten photogrammetrischen Aufnahmen als Bilddatenbank nutzen. Im Unterschied zur Punktwolke ist für die Bilder der Betrachtungsstandpunkt festgelegt. Man kann sich nicht vollkommen frei bewegen. Die Punktwolke eignet sich gut, um einen Überblick über den Bestand zu erhalten und sie kann mit existierenden 2D- oder 3D-Zeichnungen überlagert werden (Abb. 20). Es ist denkbar, dass in vielen Fällen eine sofortige 3D-Auswertung gar nicht erforderlich ist, sondern dass nur geprüft wird, ob alle relevanten Bauteile vollständig erfasst und auswertbar sind. Eine Modellierung von Anlagenteilen anhand der archivierten Daten kann bei Bedarf, z.B. vor geplanten Erweiterungs- oder Umbaumaßnahmen erfolgen.

Das 3D-Flächen- oder Volumenmodell kann universell verwendet werden. Es hat gegenüber der Punktwolke den Vorteil, dass es nur die wesentlichen Bauteile strukturiert und generalisiert darstellt. Die Datenmengen sind im Ver-



Abb. 20: Darstellung der eingefärbten 3D-Punktwolke mit Überlagerung der Zeichnungselemente

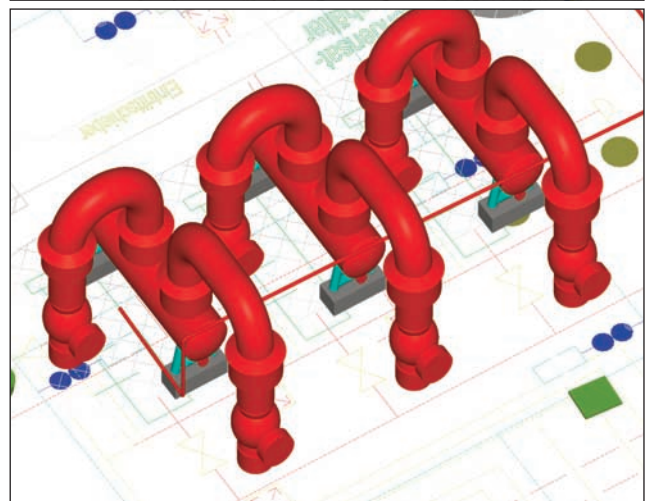
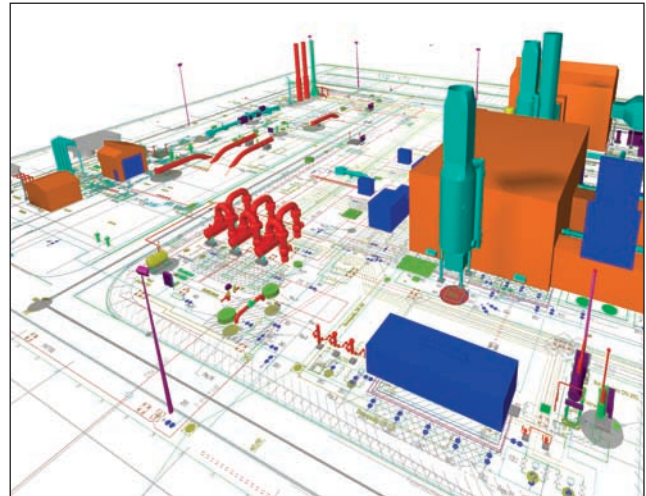


Abb. 21: Schattierte Flächenmodelle mit hinterlegtem 2D-Bestandsplan

gleich zur Punktwolke sehr gering und lassen sich mit unterschiedlichen Programmsystemen verarbeiten.

Grundriss- und Ansichtszeichnungen sowie schematische Pläne werden aus der 3D-Zeichnung abgeleitet und teilweise automatisch erzeugt. In Kombination mit Programmsystemen zur Anlagenplanung, wie z. B. PlantSpace für MicroStation, kann ein intelligentes Anlagenmodell entstehen, das weit mehr bietet als eine Bestandsdokumentation und für die Planung und den Betrieb komplexer Anlagen wertvolle Informationen liefert.

## 5 Fazit und Ausblick

Die Kombination von Photogrammetrie und Laserscanning in der Datenerfassung und Datenauswertung liefert die Basis für eine simultane Objektmodellierung aus beiden Datentypen.

Das Auswertesystem PHIDIAS wurde für die kombinierte Auswertung um Methoden zur automatischen Festlegung von lokalen Koordinatensystemen, zur Extraktion von ebenen Flächenstücken und Zylindern sowie zur Extraktion von Ecken, Kanten und Profilen ergänzt. Die



Methoden basieren auf der automatischen Ebenen- und Zylinderextraktion aus Scannerpunktwolken und werden gestützt durch photogrammetrische Aufnahmen. Die Verwendung möglichst vieler auf den Regelflächen gemessener Scannerpunkte erhöht die Genauigkeit der Flächenextraktion und Auswertung des Datenbestandes. Die automatische Punktsuche und Punktauswahl sowie die Kombination von Auswertemethoden für photogrammetrische und für Scannerdaten verringern den für die Auswertung benötigten Zeitaufwand.

Das Anwendungsbeispiel des Kapitels 4 verdeutlicht die Vorteile dieser kombinierten Datenauswertung für den Nutzer. Es ergibt sich nicht nur ein Zeitgewinn bei der Auswertung, sondern auch ein erheblicher Gewinn an Zuverlässigkeit und Richtigkeit der topologischen Auswertung der gescannten Punktwolken. Insofern gehört der kombinierten Nutzung unterschiedlicher Rohdatentypen die Zukunft. Die Ausweitung der Scannerdatenauswertung auf weitere Linien- und Flächenformen steht an. Die Information aus der photogrammetrischen Aufnahme soll stärker in die Scannerdatenauswertung einbezogen werden.

#### Literatur

Benning, W., Becker, R., Effkemann, C.: Extraktion von Ecken, Kanten und Profilen aus Laserscannerdaten, gestützt durch photogrammetrische Aufnahmen. In: Th. Luhmann: Photogrammetrie Laser-

scanning Optische 3D-Messtechnik S. 213–220, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2004.

Benning, W., Schwermann, R.: PHIDIAS-MS – Eine digitale Photogrammetrieapplikation unter MicroStation für Nahbereichsanwendungen. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 1/Januar 1997, S. 16–25, 1997.

Schwermann, R., Effkemann, C.: Kombiniertes Monoplotting in Laserscanner- und Bilddaten mit PHIDIAS. In: Th. Luhmann: Photogrammetrie und Laserscanning – Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management S. 57–70, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002.

Studnicka, N., Riegl, J., Ullrich, A.: Zusammenführung und Bearbeitung von Laserscandaten und hochauflösenden digitalen Bildern eines hybriden 3D-Laser-Sensorsystems. In: Th. Luhmann: Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik S. 183–190, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2004.

#### Links

[www.gia.rwth-aachen.de](http://www.gia.rwth-aachen.de) – Geodätisches Institut der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

[www.phocad.de](http://www.phocad.de) – PHOCAD Ingenieurgesellschaft mbH

[www.riegl.com](http://www.riegl.com) – RIEGL Laser Measurement Systems

#### Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Ralf Becker

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Benning

Dipl.-Ing. Christoph Effkemann

Geodätisches Institut der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Templergraben 55, 52062 Aachen

[ralf.becker@gia.rwth-aachen.de](mailto:ralf.becker@gia.rwth-aachen.de)

[benning@gia.rwth-aachen.de](mailto:benning@gia.rwth-aachen.de)

[effkemann@gia.rwth-aachen.de](mailto:effkemann@gia.rwth-aachen.de)