

# **Automatische Auswertung im terrestrischen Laserscanning**

Norbert Pfeifer, Alexander Haring\*, Christian Briese\*

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

\*Christian-Doppler Labor „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“

Gusshausstrasse 27-29, 1040 Wien

Technische Universität Wien

np@ipf.tuwien.ac.at

## **1. Einleitung**

Das terrestrische Laserscanning (TLS) kann als eine eigenständige Datenerfassungsmethode angesehen werden, die sich – zumindest in den Anfängen – unabhängig von der geodätischen Messtechnik entwickelt hat. Beim Laserscanning wird monochromatisches, stark gebündeltes Licht verwendet, um mittels der Zwei-Weg-Laufzeit von ausgesandten Pulsen und deren an Objektoberflächen diffus reflektierten Echos Entfernungen zu messen (Laufzeitmessung). Ebenso kommt das Amplitudenmodulationsverfahren zum Einsatz, bei dem aus dem Phasenunterschied zwischen aktuell ausgesandtem und empfangenem Signal kontinuierlich auf die Entfernung geschlossen wird. Beim TLS wird von einem fixen Standpunkt aus der Strahl durch Ablenkungseinrichtungen in Form von Spiegeln oder Verdrehung des Messkopfs über einen flächenhaften Bereich „gescannt“ und dieser so abgetastet. Dabei entsteht eine sogenannte Punktwolke, also eine Menge von 3-dimensionalen Punkten im Koordinatensystem des Geräts. Laserentfernungsmessungen wurden in der Raumfahrt in den 1960ern eingesetzt [Bufton, 1989] und die ersten terrestrischen Laserscanner wurden kommerziell von Firmen wie Cyra (jetzt Leica/Hexagon), Riegler und Zoller und Fröhlich Ende der 1990er angeboten (Cyra 2400, Riegler LMS-Z210, Zoller+Fröhlich SceneModeler). Profilierende Systeme, also solche die nur eine univariate Ablenkungseinrichtung haben, standen bereits früher zur Verfügung.

In der Zwischenzeit sind Laserscanner Standardwerkzeuge der Geodäsie und Geomatik. Die polare Erfassung, einerseits, ordnet das Laserscanning den Methoden der Ingenieurgeodäsie, speziell der Tachymetrie, zu. Die systematische, flächendeckende Erfassung von Objekten, die nicht auf einzelne markante Punkte abzielt, andererseits, stellt einen starken Bezug zur Photogrammetrie im Sinne der Bildmessung her. Der Messprozess ist in der Photogrammetrie und auch beim TLS zweistufig: nach der Datenerfassung mit einer vorgegebenen Diskretisierung erfolgt die Ableitung von markanten Punkten, oder anderen Objektmerkmalen, über Identifikation derselben in der Punktwolke (bzw. im digitalen Bild).

Die Technik, speziell die Leistungsfähigkeit der Laserscanner mit Hinblick auf Messgenauigkeit und -geschwindigkeit, Zuverlässigkeit des Geräts, Strombedarf, etc. hat sich seit Ende der 1990er sehr schnell entwickelt. So hat sich innerhalb der letzten zehn Jahre die Messfrequenz bei Pulslaufzeit-Scannern mehr als verzehnfacht. Die Auswertung der Daten hinkt jedoch hinterher. Speziell die Dichte der Messungen hat sich

als Folge der gesteigerten Messfrequenz erhöht, und Punktwolken mit 10 Millionen Punkten aus einem Scan können innerhalb von wenigen Minuten erfasst werden. Angesichts dieser Datenmengen ist eine automatische, zumindest eine hochgradig automatisierte Auswertung nötig.

In diesem Artikel werden die einzelnen Schritte der Auswertung im terrestrischen Laserscanning bezüglich ihrer Automation analysiert und zusammengefasst. Dazu wird im nachfolgenden Kapitel der Arbeitsablauf dargestellt, um den Umfang dieser Arbeit abzugrenzen. In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Schritte, nach Meinung der Autoren relative Orientierung und Modellbildung, diskutiert. Die Arbeit beschränkt sich auf das statische terrestrische Laserscanning. Dynamische Datenerfassung, sei es terrestrisch oder luftgestützt, wird nicht diskutiert.

## **2. Arbeitsablauf im terrestrischen Laserscanning**

Bei einem typischen Laserscanning-Projekt können die folgenden Arbeitsschritte unterschieden werden, wobei nicht immer alle ausgeführt werden, bzw. sich dem Einfluss entziehen, speziell eine vorhergehende Kalibrierung im Labor.

1. Kalibrierung im Labor (unabhängig vom Scannen eines bestimmten Objekts)
2. Festlegung der erforderlichen Auflösung (am Objekt), der Genauigkeit (des Modells) und des Modelltyps
3. Wahl der Standpunkte
4. Scannen, also Datenerfassung vor Ort
5. Feldkontrolle und/oder Kontrolle der Datenerfassung im Nachhinein
6. Projektbegleitende Kalibrierung
7. Relative Orientierung
8. Absolute Orientierung
9. Modellerstellung
10. Qualitätskontrolle

Schritt 4 ist das Messen, also das Gewinnen von Beobachtungen, selbst. Alle anderen Punkte stellen dafür Vorverarbeitungsschritte bzw. Weiterverarbeitungsschritte dar. Eine gewisse Automatisierung ist in allen dieser Schritte möglich.

### *2.1 Automatisierung der Vorarbeiten*

Die Kalibrierung durch den Gerätehersteller wird in der Regel nicht ausführlich beschrieben, bei den meisten Herstellern erfolgt diese jedoch im Wesentlichen manuell. Eine kleine Anzahl von Messungen zu wohldefinierten Zielen wird genutzt um Parameter der Kalibrierung, bspw. Maßstabskonstante und Nullpunkt bei der Entfernungsmessung oder Fehler in den Winkelencodern, möglichst direkt zu bestimmen. Die Auswertung dieser Messung kann automatisch erfolgen, speziell da keine Objektrekonstruktion nötig ist und ausschließlich jene Messungen vorgenommen werden, die für das Lösen der Aufgabe nötig sind. Alternativ dazu, und ebenso manuell, kann die Bestimmung aller Parameter simultan erfolgen, wenn eine Anzahl von Passpunkten mit höherer

Genauigkeit eingemessen worden sind [Lichti et al., 2006]. Dieser Selbstkalibrierungs-Ansatz ist ebenso unabhängig von allen nachfolgenden Schritten.

Schritt 2 umfasst die Festlegung des Endprodukts und erfordert die Abstimmung zwischen Auftraggeber und Ausführenden. Die Schritte 1 und 2 werden in diesem Artikel nicht weiter behandelt.

Die Wahl der Standpunkte (Schritt 3) ist, zumindest was das Laserscanning betrifft, keine Sache die vorab entschieden wird, sondern oftmals auf Basis von Erfahrung während der Messkampagne selbst getroffen wird. Unter bestimmten Einschränkungen, bspw. hinsichtlich Aufnahmegeometrie [Sablatnig et al., 2003] oder den aufgenommenen Objekten [Tarabanis et al., 1995] und Vorwissen [Blaer et al., 2006] sind Lösungen vorgeschlagen worden („view planning“ bzw. „next view planning“). Oft spielen aber praktische Einschränkungen (Fahrbahnen, Gelände, Vegetation, etc.) eine entscheidende Rolle, und ohne genaue Objekt- und Umgebungskenntnis zum Zeitpunkt des Scannens ist ein Lösen der Aufgabe vorab nicht sinnvoll. Die Wahl von Scanparametern im Feld ermöglicht das Erreichen einer bestimmten Auflösung am Objekt über einen großen Entfernungsbereich durch entsprechende Wahl der Winkelschrittweite am Scanner. Von Bedeutung wäre Wissen über die Abnahme der Genauigkeit mit der Entfernung einerseits und die Auswirkung der mit Abstand zunehmenden Footprintgröße andererseits. Obschon verschiedene Publikationen dazu erschienen sind [Böhler et al., 2003, Mechelke et al., 2007], fehlen doch zusammenschauende Analysen und systematische, kontrollierte Experimente [Beraldin et al., 2007], die diese Effekte analysieren.

## *2.2 Automatisierung in der Verarbeitung der Punktwolken*

Nach dem Aufnehmen der Daten erfolgt die Kontrolle auf korrekte Erfassung und Vollständigkeit der Daten (Schritt 5). Das geschieht in der Regel manuell, und zwar durch visuelle Interpretation der Daten im polaren oder kartesischen Koordinatensystem mit Ursprung im Scanner. Eine grobe relative Orientierung der Scans ist hilfreich bei der Feststellung der Vollständigkeit, die bei der Verwendung von markierten Verknüpfungspunkten schnell berechnet werden kann. Eine Möglichkeit die Vollständigkeitskontrolle zu automatisieren könnte sich durch die Analyse der Punktdichte auf der erfassten Fläche ergeben.

Die Schritte 6 bis 8 umfassen die Kalibrierung aufgrund des Laserscanners auf Basis der aufgenommenen Daten, die relative Orientierung (auch engl. „registration“) der einzelnen Standpunkte zueinander und die Überführung in ein übergeordnetes Koordinatensystem (z.B. Georeferenzierung, bzw. direkte Georeferenzierung als automatisierte Variante). In der projektbegleitenden Kalibrierung [Bae et al., 2007] werden die Messungen zu den aufzunehmenden Objekten herangezogen um die Kalibrierung zu bestimmen. Das erfordert überlappende Scans oder Symmetrien in den Daten, bspw. Ebenen (Abbildung 1, Nothegger et al. [2007]). Die Schritte der Kalibrierung und Orientierung müssen nicht in der angegebenen Reihenfolge erfolgen. In Analogie zum photogrammetrischen Bündelblock mit zusätzlichen Parametern [Kraus, 1996] könnten diese Schritte auch simultan ausgeführt werden.

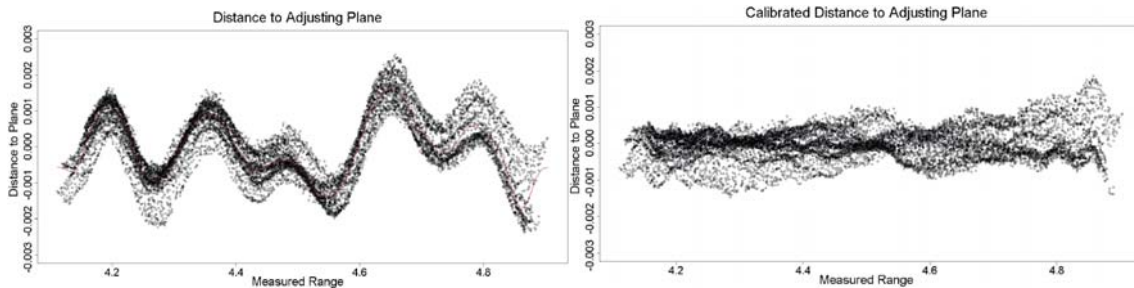


Abbildung 1: Systematische Fehler bei Messung zu einer Ebene. Jeder Punkt in der Abbildung entspricht einem gemessenen (3D-)Punkt. Die horizontale Achse (4.1m bis 4.9m) zeigt den Abstand vom Scanner zum jeweiligen Zielpunkt, die vertikale Achse (-3mm bis +3mm) die Abstände dieser Punkte zur ausgleichenden Ebene. Links: vor der Kalibrierung, rechts: danach.

Der größte Aufwand bei der Auswertung der Daten ist aber die Erstellung von Modellen (Schritt 9). In den zuvor genannten Schritten wurde die Punktwolke im Wesentlichen nicht geändert, sondern nur in verschiedene Koordinatensysteme transformiert bzw. Korrekturen an Punktkoordinaten angebracht. Die Erstellung von Modellen bedingt den Übergang von einem Datenformat in ein neues, bzw. von einer Menge von Punkten in eine Menge geometrischer Elemente (Punkte, Linien und Flächen), wobei jedes dieser Elemente markant ist. In Brenner [2007] wird die Möglichkeit zur Automatisierung in diesem Schritt grundsätzlich beleuchtet.

Der letzte Schritt ist die Qualitätskontrolle, die die Einhaltung der Anforderungen (Schritt 2) durch das Modell (Schritt 9) kontrolliert. Das Anwenden des Fehlerfortpflanzungsgesetzes bzw. der Vergleich der Punktwolke nach den Schritten 6-8 mit dem endgültigen Modell, erlaubt nur bedingt die Kontrolle der äußeren Genauigkeit bzw. der Detailtreue des Objekts. Dies gilt auch, wenn die Qualitätskontrolle projektbegleitend, also für jeden der obigen Arbeitsschritte getrennt, erfolgt. Eine Automatisierung in der Qualitätskontrolle ist möglich, wenn gescannte Objekte mit Sollmaßen verglichen werden.

Wie soeben erläutert, ist vor allem in den Schritten 6-9 eine Automatisierung nötig bzw. erreicht worden. Der Aufwand für die relative Orientierung steigt mit der Anzahl der Standpunkte, und der Aufwand für die Modellerstellung mit der Objektgröße bzw. Modellkomplexität. Der Aufwand für die Schritte Kalibrierung und absolute Orientierung hängt weniger mit der Projektgröße zusammen. Daher wird in den folgenden Kapiteln der Stand der Forschung zur Automatisierung in der relativen Orientierung und der Modellbildung beleuchtet.

### 3. Automatisierung der relativen Orientierung

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Methoden die relative Orientierung zwischen zwei Punktwolken aus dem Laserscanning herzustellen. Zum Ersten kann diese über homologe Objekte (markante Punkte, Linien oder Flächen) erfolgen, die zuerst aus der Punktwolke extrahiert werden müssen. Im zweiten Fall wird die Forderung nach exakter

Korrespondenz aufgegeben und nur näherungsweise in einem Iterationsverfahren bestimmt (ICP, iterative closest point, siehe Besl et al. [1992]).

### 3.1 Automatisierung bei exakter Korrespondenz

Das Zuordnen markanter Punkte oder Flächen kann automatisiert werden. Folgende Strategien können unterschieden werden.

1. Künstliche Punkte (Objekte) mit besonderen Eigenschaften hinsichtlich Geometrie oder Radiometrie in der Szene platzieren
2. Markante natürliche Punkte mittels Interestoperatoren in der Szene finden
3. Hypothesen für Korrespondenzen zwischen einfachen, natürlichen Objekten in großer Anzahl aufstellen und diese effizient evaluieren

Der erste Ansatz kann durch retroreflektive Zielmarken erreicht werden. Diese erscheinen in den Messungen der zurückgestreuten Energie (sog. „Intensität“) als besonders helle Objekte. Dies ermöglicht eine automatische Messung markanter Punkte in beiden (oder mehreren) Scans (Abbildung 2). Damit ist die Messung, nicht aber die Erzeugung korrespondierender Punktpaare, automatisiert. Dieser Schritt kann jedoch auch noch automatisiert werden. Da die Anzahl solcher Punkte in der Regel gering ist (bspw. 10), können die Abstände zwischen allen Punkten bestimmt werden, die, symmetrische Konfigurationen ausgenommen, im Allgemeinen von einander verschieden sind. Die Zuordnung homologer Strecken führt zum Auffinden homologer Punkte. Bei größerer Anzahl künstlicher Zielpunkte und teilweise symmetrischen oder fast symmetrischen Anordnungen kann diese Methode versagen. Eine Methode ähnlicher Art ist bspw. in der Auswertesoftware RiScanPro (Abbildung 2) der Fa. Rieggl implementiert. Für die Berechnung der Transformationsparameter bei vorgegebener Korrespondenz zwischen Punktpaaren ohne Näherungswerte wird auf [Horn, 1987] verwiesen.

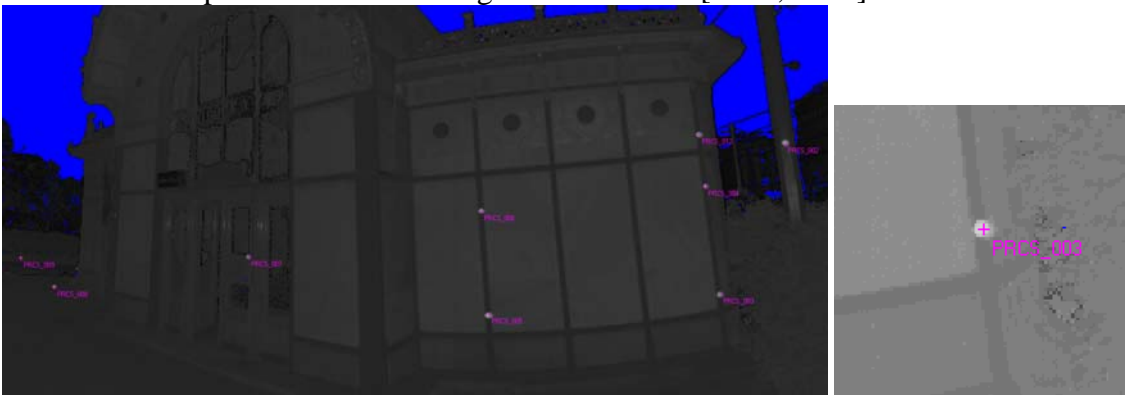


Abbildung 2: Intensitätsbild mit automatisch extrahierten retroreflektiven Zielmarken. Links: Ausschnitt aus einem Panorama-Scan (360°x80°) beim Otto-Wagner-Pavillon, Karlsplatz (Wien), rechts: Detailansicht der Zielmarke rechts unten.

Eine andere Methode zur automatischen Erstellung von Korrespondenzen mittels künstlicher „Punkte“ haben Al-Manasir et al. [2006] vorgeschlagen. Die in der Nahbereichsphotogrammetrie gebräuchlichen „coded targets“ werden in der Szene verteilt und automatisch in Bildern einer digitalen Kamera gefunden. Der Code stellt die

Korrespondenz zwischen zwei (oder mehreren) Bildern her. Diese Kamera muss eine konstante und bekannte relative Orientierung zum Laserscanner besitzen (entweder eine eingebaute oder eine aufgesetzte Kamera). Über die relative Orientierung der Kameras kann die relative Orientierung der Laserscanner-Punktwolken bestimmt werden<sup>1</sup>. Der Vorteil der digitalen Kamera gegenüber dem Laserscanner liegt in der höheren räumlichen (genauer: Winkel-)Auflösung und der damit gesteigerten Genauigkeit bei der Orientierung.

Die zweite Gruppe von Methoden zur relativen Orientierung kommt ohne künstlich in der Szene angebrachte Punkte aus. Identifizierbare Punkte werden zuerst in den zwei Scans gesucht und Merkmale an diesen Punkten berechnet. Die Listen der Merkmale beider Scans werden verglichen und Punkte mit ähnlichen Merkmalen werden einander zugeordnet. Barnea et al. [2007] extrahieren markante Objekte in der Punktwolke, beschrieben als Entfernungsbild. In jedem Punkt (Pixel) wird die Ausgeprägtheit einer Ecke bestimmt, und die markanten Ecken behalten. Dieser Ansatz ist somit rein geometrisch, basiert aber auf Methoden, die für Bearbeitung digitaler Grauwertbilder entwickelt worden sind. Zuordnung zwischen Ecken der beiden Scans kann nach „Eck-Stärke“ erfolgen. Diese Zuordnung ist nicht fehlerfrei und mehrere Hypothesen müssen evaluiert werden. Kang et al. [2007] nutzen die Intensitätsinformation um mit einem Interestoperator (Moravec-Operator) markante Punkte zu finden. Der Prozess wird robuster indem die Zuordnung durch mehrere Auflösungsstufen in (Intensitäts)-Bild-Pyramiden verfeinert wird. Dieses Verfahren beruht auf Textur in der Szene und nützt die direkt erfasste Geometrie „nur“ um falsche Zuordnungen auszuschließen. Böhm et al. [2007] nutzen den SIFT-Operator [Lowe, 2004] um homologe Punkte in Intensitätsbildern zu finden. Die merkmalsbasierten Zuordnungen der in beiden Bildern extrahierten Punkte darf einen großen Anteil von Fehlzuordnungen enthalten, da die relative Orientierung selbst mittels RANSAC (bis zu 50%-Duldung von groben Fehlern) ermittelt wird (bzw. werden kann).

Die dritte Gruppe von Algorithmen extrahiert Objekte in beiden Punktwolken. Durch Segmentierung [Vosselman et al., 2004] werden Ebenen und andere Flächen (Zylinder, etc.) automatisch gefunden. Brenner et al. [2007] extrahieren Ebenen und verwenden davon jene mit großer Punktzahl (z.B. die hundert größten). Ein (willkürliches) Tripel von Ebenen des ersten Scans kann einem (willkürlichen) Tripel von Ebenen des zweiten Scans zugeordnet werden. Unter dieser Zuordnungshypothese lassen sich die Transformationsparameter berechnen. Ein Maß, das den Abstand der zwei Scans nach der Transformation beschreibt, wird zur Bestimmung der Güte der Transformation herangezogen. Es kann bspw. berechnet werden, wie viele transformierte Ebenenpunkte in einer Ebene des anderen Datensatzes liegen. Da die Anzahl möglicher Hypothesen sehr groß ist, ist es erforderlich möglichst effizient nicht zielführende Hypothesen in einem frühen Stadium auszuschließen. Dies kann bspw. über die Kontrolle der Winkel zwischen den Ebenen erfolgen. Die Methode von Brenner et al. ist für Szenen mit vielen Ebenen, bspw. den Straßenraum, gedacht. Rabbani et al. [2007] beschreiben eine

---

<sup>1</sup> Der Maßstab für die relative Orientierung zwischen den Laserscannerstandpunkten kann nicht mit den rein photogrammetrischen Methoden bestimmt werden. Dieser Defekt kann durch die vorwärts Einschneiden der Richtung im Bild mit der Punktwolke behoben werden.

Methode, die für industrielle Umgebungen optimiert ist und mit Zylindern und Ebenen in ähnlicher Weise arbeitet (siehe auch Abbildung 3).

### *3.2 Automatisierung bei relativer Orientierung durch ICP*

Beim ICP-Algorithmus [Besl et al., 1992, Rusinkiewicz et al., 2001] wird die exakte Korrespondenz zwischen Punktpaaren aufgegeben und eine iterativ ermittelte Näherungslösung verwendet. Beide Punktwolken, aufgenommen im sensoreigenen Koordinatensystem, werden in einem Koordinatensystem betrachtet. Korrespondenzen zwischen Punkten des ersten und zweiten Scans werden durch räumliche Nähe hergestellt. Der jeweils nächstgelegene Punkt aus dem zweiten Datensatz wird für jeden Punkt des ersten Datensatzes als der im jeweiligen Iterationsschritt korrespondierende angesehen. Basierend auf dieser Zuordnung werden die Transformationsparameter berechnet und die Punkte des ersten Scans der so berechneten Kongruenztransformation unterworfen.

Dieses Verfahren konvergiert, wenn die erste Punktwolke bereits näherungsweise in das Koordinatensystem der zweiten transformiert worden ist. Der ICP-Algorithmus automatisiert somit die relative Orientierung nach der Vorgabe von ausreichend guten Näherungswerten. Im Standardfall werden diese berechnet aus manuell vorgegeben näherungsweise korrespondierende Punkten, die ein Operateur/eine Operateurin in einem interaktiven Schritt markiert.

Eine Automatisierung dieses Schritts, also der Erstellung von Näherungswerten, ergibt sich durch die Methoden, die in Abschnitt 3.1 angegeben worden ist. Alternativ können Näherungswerte mittels Sensoren zur direkten Georeferenzierung erfasst werden, bspw. low-cost GPS und digitaler Kompass [Böhm et al., 2005].

## **4. Automation bei der Modellerstellung**

Die Modellierung kann als der erste Schritt verstanden werden, bei dem relevante Information aus der Punktwolke extrahiert wird. Im Gegensatz zum Schritt der Orientierung wird immer Kontextwissen eingebracht, da das Modell für einen bestimmten Zweck erstellt wird. Die Möglichkeiten zur Automatisierung sind daher von der jeweiligen Anwendung beeinflusst. Die Arten der Modellierung lassen sich wie folgt unterscheiden.

1. Analyse der Punktwolke mit statistischen Werkzeugen
2. Manuelles Messen von Abständen in der Punktwolke
3. Vermaschung, i.d.R. Triangulierung, der Punktwolke
4. Modellierung mit Primitiven (primitive instancing)
5. Grenzflächendarstellung (boundary representation, B-Rep) mit Punkten, Strecken und ebenen Polygonen
6. Freiformflächen, i.d.R. NURBS (non-uniform rational B-Splines)

Explizit soll hier auch auf den Beitrag von Brenner [2007] verwiesen werden. Methoden zur Automatisierung bei der Modellerstellung werden dort vorgestellt.

Die ersten beiden Methoden sind von Natur aus händisch und daher nicht automatisierbar. Die Analyse von Punktwolken mit statistischen Methoden wird bspw. für forstliche Fragestellungen angewandt [Cashmer et al., 2004]. Die Erstellung von Triangulierungen kann aufgrund der hohen Anzahl von Punkten und Dreiecken grundsätzlich nur automatisch erfolgen. Vorhandene Programme [Akca, 2007] triangulieren meistens nicht fehlerfrei, es entstehen bspw. Dreiecke mit falscher Orientierung und Löcher in der Triangulierung (also fehlende Dreiecke). Eine Steigerung der Automatisierung wird erreicht durch robustere Methoden, die den Aufwand in der Nachbearbeitung verringern.

Modellierung mit Primitiven wird von Rabbani et al. [2007] für industrielle Installationen beschrieben (Abbildung 3). In diesen Umgebungen lässt sich eine große Anzahl der vorhandenen Objekte mit Quadern, Zylindern und Tori beschreiben. Speziell teilverdeckte Bereiche und die Anschlüsse zwischen verschiedenen Objekten benötigen aber noch eine manuelle Nachbearbeitung [Wunderlich, 2001].

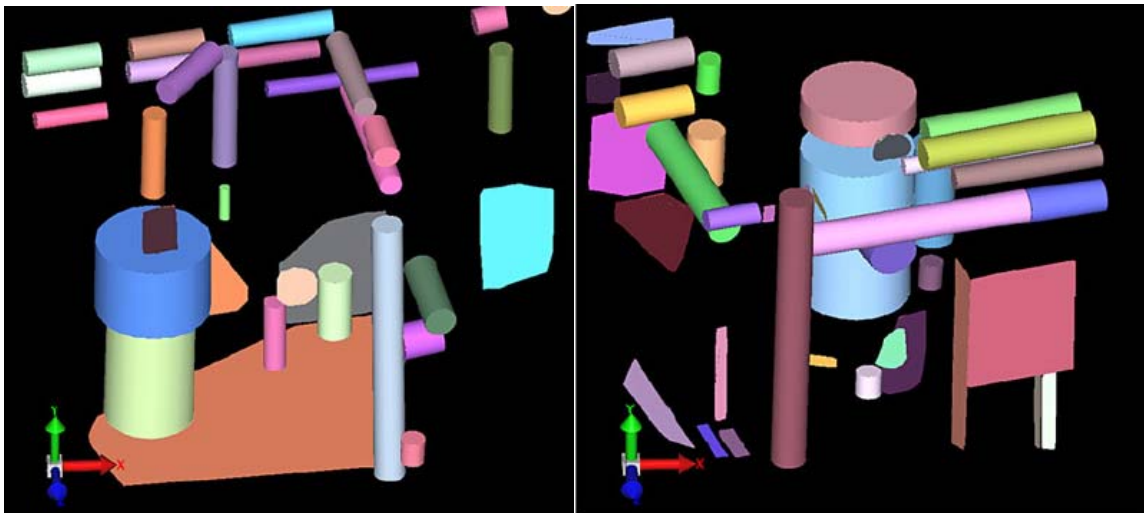


Abbildung 3: Aus der Punktwolke extrahierte Primitive (aus [Rabbani et al., 2007])

Bei der B-Rep-Modellierung müssen markante Punkte gefunden werden. Dies erfolgt in der Regel manuell durch geeignete Editierwerkzeuge. Eine gewisse Automatisierung haben Briese et al. [2006] für die B-Rep-Erstellung auf Kantenbasis erreicht. Auch hier ist das Problem der Anschluss verschiedener Kanten an einander. Außerdem müssen in diesem Ansatz die Kanten, die modelliert werden sollen, manuell selektiert werden (setzen eines Startpunktes). Der Prozess ist in Abbildung 4 dargestellt. Die von Briese et al. vorgestellte Methode bildet nicht automatisch Flächen zwischen den Kanten.



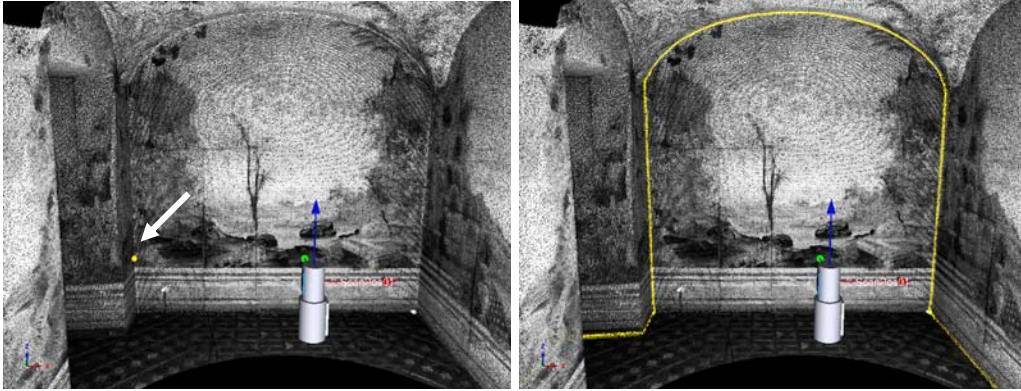


Abbildung 4: Automatisierte Modellierung auf Kantenbasis. Nach Vorgabe eines Startpunktes (links, weißer Pfeil) wird die Kante automatisch verfolgt (rechts).

Die Modellierung mit Freiformflächen kann auch als B-Rep-Modellierung betrachtet werden. Da keine bzw. weniger Kanten und Punkte vorhanden sind, ist die Erstellung der Flächen aus den Punkten zu einem größeren Maß automatisiert. Das Layout der Patches, also die Abgrenzung der Parameterbereiche der einzelnen Flächenstücke ist jedoch noch nicht vollständig automatisiert. Auch hier muss i.d.R. ein automatisch erstelltes Patch-Layout händisch korrigiert werden. In Abbildung 5 ist links das bereits händisch nachbearbeitete Patchlayout (mehrere Stunden Arbeit) gezeigt. Rechts ist die NURBS-Fläche dargestellt.

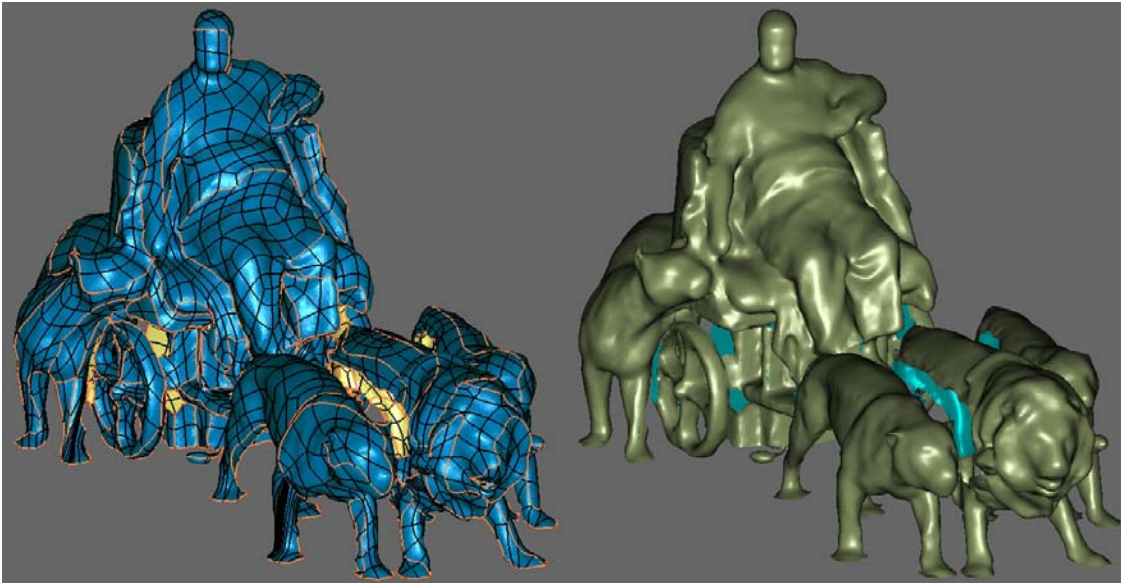
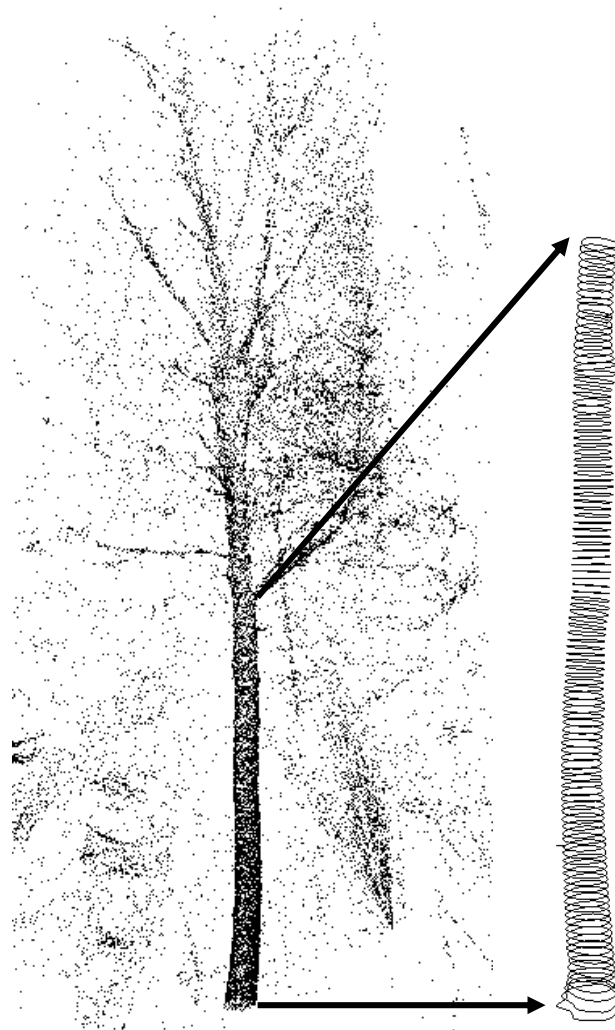


Abbildung 5: Patch-Layout (links, orange Linien) und NURBS-Modellierung (rechts) [Haring, 2003, Briese et al., 2003]

Zusätzlich lassen sich noch Mischformen feststellen. Die Modellierung von Schnitten durch die Punktwolke [Pfeifer et al., 2004] ist so ein Beispiel (Abbildung 6).



*Abbildung 6: Modellierung mit Spline-Kurven. Links: Punktwolke eines Baumes, rechts: Querschnitte in Form von Splines vom Stammansatz bis zur Kronenbasis.*

Eine weitere, sehr spezielle Form von Modellen, soll abschließend auch noch erwähnt werden. Wenn die Objekte des Interesses flach sind, oder zumindest nicht sehr von einer Ebene abweichen, dann lässt sich eine Modellierung in Form einer interpolierten Fläche, also in Form eines Höhenmodells, realisieren. Das wird z.B. bei der Deformationsanalyse von Staumauern mittels Laserscanning realisiert [Kopacik et al., 2004], aber auch die terrestrische Erfassung von topographischen Objekten (bspw. Deponien) ist so ein Beispiel.

## **5. Schlussbemerkungen**

In diesem Artikel wurde der Automationsgrad in der Datenverarbeitung von terrestrischen Laserscanning-Messungen diskutiert. Besonders die relativen Orientierung bzw. „registration“ von mehreren Scans und die Erstellung von Modellen sind sehr arbeitsaufwändige Schritte. Bei der relativen Orientierung können allgemeine Methoden,

die typisch für den Szeneninhalte (regelmäßige bzw. unregelmäßige Objekte, ...) sind, entwickelt werden. Kostengünstige Bauteile zur näherungsweise direkten Georeferenzierung ergänzen diese Methoden.

Die Modellierung ist eine komplexere Aufgabe. Sie erfolgt i.d.R. mit viel Expertenwissen über die Anwendung selbst. Die Automatisierung erfordert daher die Formalisierung von Wissen und hat noch keine sehr zuverlässigen Methoden hervorgebracht. Die meisten vorhandenen Methoden arbeiten überdies lokal, wodurch globale Eigenschaften, bspw. eine geschlossene Oberfläche, nicht berücksichtigt werden.

In vielen Anwendungen (Industrieanlagen, Denkmalschutz, ...) hat das Laserscanning durch die Vorteile der direkten polaren Datenerfassung erfolgreich Fuß gefasst. Die Frage nach der Automatisierung bleibt also aktuell.

## **Referenzen**

Akca, D., 2007. 3D modelling, texturing and applications in cultural heritage. Lecture notes for ISPRS WG VI/5 & SC summer school "Theory and application of laser scanning", Ljubljana, Slowenien.

Al-Manasir, K., Fraser, C., 2006. Registration of terrestrial laser scanner data using imagery. *Photogrammetric Record* 21(115).

Bae, K.H., Lichti, D., 2007. On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXVI, 3/W52, Espoo, Finnland.

Barnea, S., Filin, S., 2007. Keypoint based autonomous registration of terrestrial laser point-clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. To appear.

Beraldin, J-A., Blais, F., El-Hakim, S. F., Cournoyer, L., Picard, M., 2007. Traceable 3D imaging metrology: evaluation of 3D digitizing techniques in a dedicated metrology laboratory. 8<sup>th</sup> Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zürich, Schweiz.

Besl, P. and McKay, N., 1992. A method for registration of 3D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14(2).

Blaer, P.S., Allen, P.K., 2006. View Planning for Automated Site Modeling. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida.

Boehler, W., Bordas Vicent, M., Marbs, A., 2003: Investigating Laser Scanner Accuracy, *Proceedings of XIXth CIPA Symposium*, Antalya, Türkei.

Böhm, J., Haala, N., 2005. Efficient integration of aerial and terrestrial laser data for virtual city modeling using Lasermaps. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXVI, 3/W19, Enschede, Niederlande.

Böhm, J., Becker, S., 2006. Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans using reflectance features. In: 8th Conf. on Optical 3D measurement techniques, Zürich, Schweiz.

Brenner, C., 2007. Interpretation terrestrischer Scandaten. DVW-Seminar Terrestrisches Laser-Scanning, Fulda, Deutschland.

Briese C., Pfeifer, N. Haring, A., 2003: Laserscanning and Photogrammetry for the Modelling of the Statue Marc Anton. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing*, Vol. XXXIV-5/C15.

Buften, J.L., 1989. Laser Altimetry Measurements from Aircraft and Spacecraft. *Proceedings of the IEEE* 77 (3).

Chasmer, L., Hopkinson, C., Treitz, P., 2004. Assessing the 3D-Frequency Distribution of Airborne and Ground-Based LIDAR Data for Red Pine and Mixed Deciduous Forest Plots. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXVI, 8/W2, Freiburg, Deutschland.

Haring, A., 2003. Modellierung terrestrischer Laserscanner-Daten. Diplomarbeit, Technische Universität Wien.

Horn, B., 1987. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A* 4.

Kang, Z., Zlatanova, S., Gorte, B., 2007. Automatic Registration of Terrestrial Scanning Data Based on Registered Imagery. *Strategic Integration of Surveying Services. FIG Working Week 2007*, Hong Kong, China.

Kopacik, A., Wunderlich, Th., 2004. Usage of Laser Scanning Systems at Hydro-Technical Structures. *Proc. of FIG Working Week 2004*, Athen, Griechenland.

Kraus, K., 1996. *Photogrammetrie, Band 2, verfeinerte Methoden und Anwendungen*. De Gruyter, Berlin.

Lowe, D. G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60(2).

Lichti, D., Licht, M.G., 2006. Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXVI/5, Dresden, Deutschland.

Mechelke, K., Kersten, T.P., Lindstaedt, M., 2007. Comparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation terrestrial laser scanning systems. In: 8th Conf. on Optical 3D measurement techniques, Zürich, Schweiz.

Nothegger, C., Dorninger, P., 2007. Automated modeling of surface details from point clouds of historical objects. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVI-5/C53, Athen, Griechenland.

Pfeifer, N., Winterhalder, D., 2004. Modelling of tree cross sections from terrestrial laser scanning data with free-form curves. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVI, 8/W2, Freiburg, Deutschland.

Rabbani, T., Dijkman, S., van den Heuvel, F., and Vosselman, G., 2007. An integrated approach for modelling and global registration of point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 61.

Rusinkiewicz, S. and Levoy, M., 2001. Efficient variants of the ICP algorithm. In: Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM '01), Los Alamitos, CA, USA.

Sablatnig, R., Tosovic, S., Kampel, M., 2003. Next View Planning for Shape from Silhouette. Computer Vision – CVWW'03. Valtice, Tschechien.

Tarabanis, K.A., Allen, P.K., Tsai, R.Y., 1995. A survey of sensor planning in computer vision. IEEE Transactions on Robotics and Automation 11(1).

Vosselman, G., Gorte, B. G. H., Sithole, G., and Rabbani, T., 2004. Recognising structure in laser scanner point clouds. In: IAPRS, XXXVI, 8/W2, Freiburg, Deutschland.

Wunderlich, Th., 2001. Operational and economic aspects of terrestrial laser scanning. 5<sup>th</sup> Conference on Optical 3D measurement techniques, Wien, Österreich.