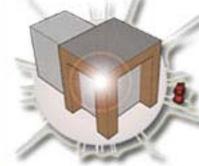
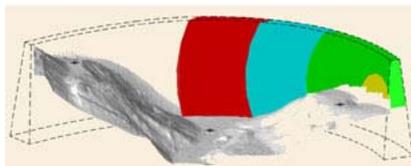


# 3D RiskMapping



## Theorie und Praxis des terrestrischen Laserscannings Kursunterlagen basierend auf praktischen Anwendungen

Erstellt im Rahmen des Projekts "Learning tools for advanced three-dimensional surveying in risk awareness project (3DRiskMapping)"

Übersetzt und Überarbeitet von Erwin Heine  
Version 5 June 2008

## Vorwort

Diese Veröffentlichung stellt eine Sammlung von Schulungsunterlagen dar, die im Rahmen des Projekts „Learning tools for advanced three-dimensional surveying in risk awareness (3DRiskMapping)“ von Oktober 2006 bis September 2008 erarbeitet wurden, und das von der flämischen Leonardo da Vinci Nationalagentur mitfinanziert wurde.

Dieser Unterrichtskurs ist das Ergebnis einer internationalen Kooperation von Experten aus Universität und Industrie; dazu gehören:

- *Mario Santana Quintero and Bjorn Van Genechten, University of Applied Sciences St. Lieven (Belgium)*
- *Marc De Bruyne, BnS (Belgium)*
- *Ronald Poelman, Delfttech (The Netherlands).*
- *Martin Hankar, GlobeZenit (Belgium).*
- *Simon Barnes and Huseyin Caner, Plowman Craven (United Kingdom)*
- *Luminita Budei, Technical University of Iasi (Romania).*
- *Erwin Heine and Hansjörg Reiner: University of Natural Resources and Applied Life Sciences (Austria).*
- *José Luís Lerma Garcia, Polytechnic University of Valencia (Spain).*

Der Inhalt basiert im Wesentlichen auf wissenschaftlicher Forschung und praktischer Erfahrung in der Anwendung des terrestrischen Laserscannings.

Der *theoretische Teil* des Unterrichtskurses ist von Bjorn Van Genechten mit den Beiträgen von Huseyin Caner, Erwin Heine, José Luis Lerma Garcia, Ronald Poelman und Mario Santana Quintero sowie der Unterstützung aller Teilnehmer zusammengestellt worden.

Die *Fallstudie „Kulturgut-Dokumentation“* wurde am Beispiel der vom Einsturz bedrohten „St. James Church“ von Bjorn Van Genechten mit den Beiträgen von Huseyin Caner, Erwin Heine, José Luis Lerma Garcia, Ronald Poelman und Mario Santana Quintero sowie der Unterstützung aller Teilnehmer zusammengestellt. Das Scannen der Kirche wurde durch die Erlaubnis der Stadt Leuven, der Universität Leuven und der Unterstützung durch Plowman Craven möglich gemacht. Die Feldarbeiten wurde von Huseyin Caner, Tomasz Skiba, Tim MacDonald, Leive Spincemaille, Stuart McLeod, Bjorn Van Genechten und Mario Santana Quintero durchgeführt.

Die *Fallstudie „Zivile Infrastruktur-Dokumentation“* behandelt die Anwendung von terrestrischem Laserscanning zur Überwachung der Verformung einer Staumauer und wurde von Hansjörg Reiner, Miguel Biosca Taronger, Erwin Heine, José Luis Garcia sowie der Unterstützung aller Teilnehmer aufbereitet. Die Datenerfassung im Feld ist von der Vorarlberger Illwerke AG und von Thomas Weinhold von der Universität Innsbruck möglich gemacht worden.

Die *Fallstudie „Industrieanlagen-Dokumentation“* am Beispiel des Scannens einer sich in gefährlicher Umgebung befindlichen Rohr- und Behälteranlage (petrochemische Plattform) ist von Marc de Bruyne vom BnS (Belgien) und von Martin Hankar von GlobeZenit (Belgien) mit den Beiträgen von Ronald Poelman und Bjorn Van Genechten sowie der Unterstützung aller Teilnehmer aufbereitet worden.

## ***Danksagung***

Die Autoren möchten der flämischen Leonardo da Vinci Nationalagentur für die Mitfinanzierung dieses Projekts danken und dafür, diese Publikation den Wissenschaftlern und den Fachleuten verfügbar zu machen.

Außerdem möchten wir folgenden Personen danken:

- Geert De Lepeleer, Barbara Wauman, Sarah De Seranno, and Guido Kips (University of Applied Sciences St. Lieven);
- Simon Barnes, Malcolm Donald, Duncan Lees, Lindy Fox (Plowman and Craven);
- Ion Giurma (Technical University "Gh. Asachi" Iasi);
- Hans Liebrand (Leica Geosystems);
- Marianne Couderé (b.v.b.a Couderé);
- Thomas Weinold (University of Innsbruck, Austria);
- Rupert Zischinsky, Peter Staubmann and Werner Maier (Illwerke AG, Austria);
- Wolfgang Neubauer and Matthias Kucera (VIAS, Vienna);
- Hans Cornelisse, M&H engineering.

Zuletzt wollen wir all jenen Personen und Institutionen danken, die in der einen oder anderen Weise bei der Fertigstellung dieser Publikation mitgeholfen haben.

# Inhaltsverzeichnis

VORWORT

DANKSAGUNG

INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. KAPITEL I: 3D DATEN ALS GRUNDLAGE SACHKUNDIGER ENTSCHEIDUNGSFINDUNG .....</b>	<b>10</b>
1.1. Was versteht man unter Risikobewertung? .....	10
1.2. Was versteht man unter Laserscanning? .....	12
1.3. Statisches und dynamisches Laserscanning .....	12
1.4. Anwendungsgebiete des Laserscannings .....	12
<b>2. KAPITEL II: DIE PRINZIPIEN DES LASER SCANNINGS .....</b>	<b>13</b>
2.1. Das elektromagnetische Spektrum des Lichts .....	13
2.2. Laser .....	14
2.3. Wichtige Eigenschaften des Laserlichts .....	15
2.4. Lasersicherheit .....	16
2.5. Messen mit Licht .....	17
2.5.1. Messungen basierend auf Triangulation .....	18
2.5.2. Zeitbasiertes Messen .....	21
2.5.3. Strahlablenkungsmethoden .....	27
2.6. Metrologische Aspekte: Fehleranalyse .....	28
2.6.1. Instrumentenfehler .....	29
2.6.2. Objektbasierte Fehler .....	33
2.6.3. Umweltbedingungen .....	34
2.6.4. Methodologische Fehler .....	36
2.7. Der Stand der Technik der Laserscanner Ausrüstung .....	36
<b>3. KAPITEL III: LASERSCANNING IN DER PRAXIS .....</b>	<b>37</b>
3.1. Vermessungsplanung .....	38
3.1.1. Bestimmung der Ziele und Zielvorgaben .....	38
3.1.2. Analyse des Gebiets, das vermessen werden soll .....	39
3.1.3. Bestimmung der optimalen Scanposition .....	40
3.1.4. Bestimmung der optimalen Positionierung der Zielmarken .....	42
3.1.5. Datenmanagement .....	43
3.2. Aussendiensttätigkeit .....	43
3.2.1. Arbeitsvorbereitung .....	43
3.2.2. Aufstellung des Scanners .....	44
3.2.3. Das Anschließen des Scanners .....	44
3.2.4. Scanner-Einstellungen .....	45
3.3. Datenerfassung .....	49
3.3.1. Scannen des Objekts / des Gebäudes .....	49
3.3.2. Scannen von Zielmarken .....	49
3.3.3. Messen der Zielmarken .....	51
3.3.4. Überprüfung der Vollständigkeit .....	51
3.4. Datenaufbereitung .....	51
3.5. Registrierung und Georeferenzierung .....	52
3.5.1. Indirekte Registrierung und Georeferenzierung .....	53
3.5.2. Direkte Registrierung und Georeferenzierung .....	55
3.5.3. Allgemeine Aspekte der Registrierung und Georeferenzierung .....	56
3.6. Die Verarbeitung dreidimensionaler Punktwolken .....	56
3.6.1. Darstellungsformen von Punkt_Wolken .....	57
3.6.2. Datenverbesserung .....	59
3.6.3. Direkte 2D Modellierung von Punktwolken .....	60
3.6.4. Direktes 3D modellieren von Punktwolken .....	61
3.6.5. Die dreidimensionale Modellierung komplexer Oberflächen .....	61
3.6.6. Indirektes zweidimensionales modellieren von Punktwolken .....	63
3.6.7. Musterabbildung (texture mapping) .....	63

3.7.	Qualitätskontrolle und Ablage .....	65
<b>4.</b>	<b>KAPITEL IV: DATENMANAGEMENT .....</b>	<b>67</b>
<b>5.</b>	<b>TUTORIAL ZUR DENKMALPFLEGEANWENDUNG: KIRCHE ST. JAMES (PRÄVENTIVE BESTANDSAUFNAHME) .....</b>	<b>70</b>
5.1.	Einführung und technische Information .....	70
5.2.	Problembeschreibung .....	70
5.3.	Aufnahmeplanung .....	71
5.3.1.	<i>Zweck und Zielsetzung .....</i>	<i>71</i>
5.3.2.	<i>Projektanforderungen .....</i>	<i>71</i>
5.3.3.	<i>Objektbeschreibung.....</i>	<i>72</i>
5.3.4.	<i>Auswahl der richtigen Messtechnik.....</i>	<i>74</i>
5.3.5.	<i>Laserscanner Hardware.....</i>	<i>76</i>
5.4.	Messdatenerfassung .....	77
5.5.	Datenaufbereitung .....	81
5.6.	Registrierung und Georeferenzierung .....	83
5.6.1.	<i>Registrierung des Innenraumes.....</i>	<i>83</i>
5.6.2.	<i>Registrierung der Außenaufnahmen.....</i>	<i>93</i>
5.6.3.	<i>Registrierung: Verknüpfung der Datensätze aus Innen- und Außenaufnahmen .....</i>	<i>96</i>
5.7.	Datenverarbeitung .....	100
5.7.1.	<i>Direkte 2D Modellierung aus Punktwolken .....</i>	<i>100</i>
5.7.2.	<i>3D Modellieren von komplexen Oberflächen.....</i>	<i>113</i>
5.7.3.	<i>Füllen von Löchern .....</i>	<i>128</i>
5.7.4.	<i>Säuberung der Ränder .....</i>	<i>139</i>
5.7.5.	<i>Zerschneiden der Vermaschung zur Querschnittserzeugung .....</i>	<i>139</i>
5.7.6.	<i>Erstellen von Animationen .....</i>	<i>142</i>
<b>6.</b>	<b>LÖSUNGEN.....</b>	<b>146</b>
6.1.	Lösungen für das Tutorial Denkmalpflege.....	146
<b>7.</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>147</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>151</b>

## Glossar

**3D:** Die Abkürzung für dreidimensional; wird u.a. durch die kartesischen Koordinaten x, y, z charakterisiert.

**Airborne laser scanning:** Der Einsatz eines Laserscanner aus einem Flugzeug oder Helikopters zur Erfassung der Geländetopografie.

**As-built Dokumentation/Erfassung:** Kennzeichnet eine Bestandsaufnahme-Technologie für die Dokumentation von Industrieanlagen und Bauwerken.

**As-is:** Beschreibt den Istzustand.

**CAD (Computer Aided Design):** Bedeutet rechnerunterstütztes Konstruieren.

**Clash detection (Kollisionsanalyse):** Mithilfe der sogenannten Clash-Detection können mögliche geometrische Konflikte (z. B. Bauraumüberschneidungen) frühzeitig erkannt und die Risiken für die weitere Planung und Bauausführung verringert werden.

**Data voids:** Bereiche innerhalb der Punktwolke einer geschlossenen Oberfläche, die größer als die doppelte Scanrasterweite sind und trotzdem keine Daten enthalten.

**Deformation Monitoring:** Die systematische Vermessung und Beobachtung von Lage-, Form- und Größenänderungen eines Objekts.

**DEM (Digital Elevation Model), Digitales Höhenmodell:** Digital gespeicherte xyz-Tripel, die ein Höhenmodell numerisch beschreiben. Es muss immer angegeben werden, welche Oberfläche gemeint ist, z. B. das DEM der Oberfläche des Grundwasserspiegels oder das DEM der Erdoberfläche.

**DSM (Digital Surface Model) Digitales Oberflächenmodell:** Digital gespeicherte xyz-Tripel, die die Geometrie eines jeden Gegenstandes im Raum vollständig in Form eines numerischen Modells wiedergeben. Wenn das Objekt die Erdoberfläche ist, dann sind natürliche (vor allem die Vegetation) und von Menschenhand geschaffene Objekte wie Gebäude und Brücken im Modell enthalten.

**DTM (Digital Terrain Model) Digitales Geländemodell:** digital gespeicherte xyz-Tripel, die die Erdoberfläche numerisch beschreiben, wobei Objekte wie Brücken und Gebäude nicht enthalten sind.

**Wahrer Fehler:** bezeichnet die Abweichung vom Sollwert. Diese wird üblicherweise durch das quadratische Mittel (engl. Root Mean Square (RMS)) wiedergegeben. Wo  $\varepsilon$  der Fehler (d. h. der Unterschied zwischen dem Messwert und dem Sollwert (dem wahren Wert)) und n die Anzahl der gemessenen Werte ist. Der Fehler des quadratischen Mittels (RMS) kann dann definiert werden als:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}$$

**Mittlerer Fehler:** Die Verteilung einer Messreihe um den Mittelwert, die durch die Standardabweichung allgemein beschrieben wird. Ist  $n$  die Anzahl der Messungen und  $v$  der Wert der Verbesserung (d. h. die Abweichung zwischen dem gemessenen Wert und dem Mittelwert, dann kann die Genauigkeit eines Datensatzes durch die Standardabweichung dargestellt werden:

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$

Die Standardabweichung sollte immer auch die Größe des Vertrauensbereichs beinhalten. Der einfache Vertrauensbereich sagt aus, dass für 68,3% aller Messungen der auftretende Fehler kleiner als die Standardabweichung ist. Der doppelte Vertrauensbereich umfasst 95,45% und der dreifache Vertrauensbereich 99,73%.

**GIS (Geografisches Information System) Geografisches Informationssystem:** Genau genommen versteht man darunter ein Informationssystem, das in der Lage ist, geografisch referenzierte Informationen zu verwalten, zu integrieren, zu speichern, zu redigieren und zu analysieren; weiters können die Daten gemeinsam genutzt und grafisch präsentiert werden.

**GPS (Globales Positioning System):** Ein globales satellitengestütztes Positionsbestimmungssystem – der Begriff wird allgemein für das **NAVSTAR-GPS (Navigation System using Timing and Ranging)** des US-Verteidigungsministeriums verwendet, das Ende der 1980er-Jahre zur weltweiten Positionsbestimmung und Zeitbestimmung entwickelt wurde. Die Russen verfügen über ein ähnliches System, das **GLONASS** genannt wird. Die Europäer und die Chinesen arbeiten an ähnlichen Systemen, die **GALILEO** und **COMPASS** genannt werden.

**INS (Inertial Navigation System) Inertiales Navigationssystem:** Eine Navigationshilfe, die mithilfe von Bewegungssensoren (Drehbewegung und Beschleunigung) kontinuierlich die Position, die Orientierung, und die Geschwindigkeit eines Objekts bestimmt, ohne dass ein Bezug zur äußeren Umgebung erforderlich wäre. Es liefert aber nur für kurze Messperioden verlässliche Ergebnisse und muss daher in regelmäßigen Abständen neu initialisiert werden.

**Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation):** Lichtquelle, in der das Licht durch induzierte Emission erzeugt wird und sich durch folgende besondere Eigenschaften auszeichnet. Die Laserstrahlung ist nahezu parallel, besitzt eine hohe Energiedichte, ist monochromatisch und kohärent.

**Laserscanning (Laserabtastung):** Bezeichnet das zeilen- oder rasterartige Überstreichen einer Oberflächen oder eines Objekts mit einem Laserstrahl, um diese/dieses zu vermessen bzw. ein Bild davon zu erzeugen.

**LIDAR (Light Detecting and Ranging):** Eine Methode zur Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung mittels Laserstrahlen. Wird häufig zur Bezeichnung des luftgestützten Laserscannings verwendet, kann aber auch bodengestützte Systeme kennzeichnen.

**Mesh (Gitter):** Die Darstellung einer Oberfläche durch Dreiecke bzw. Polygone, auch als Polygon- oder Dreiecksnetz bezeichnet.

**Metadaten:** Daten, die andere Daten beschreiben. Ist ein wichtiger Bestandteil des Datenmanagements.

**Modell:** Ist eine vereinfachte Darstellung eines realen Objekts, das alle relevanten Eigenschaften des Objekts reproduziert.

**Modellieren:** Bezeichnet die Herstellung eines Modells oder einer dreidimensionalen Form wie zum Beispiel Netze, Nurbs oder Volumenmodelle.

**Oversampling (Überabtastung):** Wenn die Rasterweite (Auflösung) höher als die Punktgenauigkeit des Laserscanners ist. Oversampling erzeugt eine geringere Genauigkeit und mehr Rauschen.

**Periphere Daten:** Sind überschüssige Scandaten, die während des Abtastprozesses anfallen und nicht zur Objektmodellierung gemäß der Aufgabenstellung benötigt werden.

**Punktwolke:** Eine Kollektion von Punkten (xyz-Koordinaten) in einem dreidimensionalen Koordinatensystem. Dies kann zusätzliche Informationen wie Farbe und den Betrag des Reflexionsvermögens mit einschließen. Wird auch als COP (Cloud of Points) bezeichnet.

**Punktdichte:** Die Anzahl der Punkte pro Einheit. Allgemein gilt, je höher die Punktdichte, desto besser die Darstellung der Merkmale.

**Natürlicher Verknüpfungspunkt:** Bezeichnet einen ausgezeichneten Punkt auf dem gescannten Gegenstand, der in der Punktwolke eindeutig unterscheidbar und wegen seiner Gestalt genau lokalisiert werden kann. Auch als Detailpunkt oder als natürlicher Verknüpfungspunkt bezeichnet.

**Scanrohdaten:** Alle Daten, die von einem Laserscanner gesammelt wurden. Das schließt verschiedene Fehlmessungen und überschüssige (periphere) Daten mit ein.

**Registrierung:** Bezeichnet den Prozess, Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren. Wird auch Anordnung oder Verknüpfung genannt.

**Rendern:** Bezeichnet den Prozess, eine Rastergrafik (Bild) aus einem 3D Computermodell zu erzeugen. Dieses Modell ist eine dreidimensionale Beschreibung von Gegenständen und enthält Informationen über die Geometrie, die Position und Blickrichtung (eines virtuellen Betrachters), die Textur, Licht und Schatten.

**Auflösung:** Die durchschnittliche Entfernung zwischen benachbarten Punkten in einer Punktwolke. Gemeinhin wird diese in zwei Formen angegeben: kartesisch und polar.

Kartesisch: Der durchschnittliche Abstand zwischen den Punkten in einer bestimmten Entfernung vom Scanner: z.B. 30 mm (horizontal) x 30 mm (vertikal) auf 50 m.

Polar: Der Winkelschritt um die horizontale und vertikale Achse: z.B.  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$

**Revamp:** Ist der Ausdruck für Modernisierung und Optimierung, in Hinblick auf die langfristige Nutzung von Industrieanlagen.

**Scan:** Bezieht sich auf eine einzelne Datenerfassung, die von einer einzelnen Scanposition aus mit einer Scanorientierung durchgeführt wird.

**Rauschen:** Der Grad der Abweichung der Punktwolke von der realen Oberfläche verursacht durch zufällige Fehlerquellen wie Schnittwinkel, Footprint-Größe, Reflexionsvermögen, atmosphärische Bedingungen, usw.

**Scanorientierung:** Die Ausrichtung des Scanners auf der Scanposition bei einem Einzelscan. Wenn das Messsystem keinen vollen 360° Scan durchführen kann, können mehrere Scans von derselben Scanposition, aber mit verschiedenen Scanorientierungen vorgenommen werden.

**Scannerkoordinatensystem (Scanursprung):** Das interne Koordinatensystem des Scanners, in dem die Daten eines statische Scans erfasst werden. Wenn der Scanursprung, also der Ursprung des Scannerkoordinatensystems, ins Orts-Koordinatensystem transformiert wird, wird er zur Scanposition.

**Scanposition:** Die Position, in einem bekannten Koordinatensystem, von dem aus ein einzelner Scan durchgeführt wird.

**Scanartefakte:** Unregelmäßigkeiten innerhalb einer Scan-Szene, die ein Ergebnis des Abtastprozesses, aber nicht Merkmale auf dem Objekt selbst sind.

**Footprint:** Der Durchmesser des Laserstrahls beim Auftreffen auf dem Objekt. Diese Entfernungsabhängige Größe wird bestimmt durch den Laserstrahldurchmesser beim Austritt und der Strahldivergenz.

**Passpunkte:** Punkte, deren Koordinaten bekannt sind. Sie definieren einen lokalen Bezugsrahmen, in dem alle Scans georeferenziert werden können.

**TIN (Triangulated Irregular Network) unregelmäßiges Dreiecksnetz:** Darstellung einer Oberfläche durch ein Netz sich nicht überlappender Dreiecke.

# **1. Kapitel I: 3D Daten als Grundlage sachkundiger Entscheidungsfindung**

## **1.1. Was versteht man unter Risikobewertung?**

Risikobewertung nennt man den Prozess, bei dem die Gefahren identifiziert, analysiert bzw. bewertet werden, um geeignete Wege zu finden, das Risiko, das mit solchen Gefahren verbunden ist, zu eliminieren bzw. zu kontrollieren. Praktisch gesprochen ist eine Risikobewertung ein umfassender Blick auf einen Arbeitsplatz, ein Bauwerk oder die Umwelt, um jene Elemente, Situationen, Prozesse usw. zu identifizieren, die besonders Menschen schädigen können. Nach der Feststellung des Gefährdungspotenzials wird eine Bewertung vorgenommen, wie wahrscheinlich und wie hoch das Risiko ist, die der Entscheidungshilfe dient welche Maßnahmen ergriffen werden sollten, um den Schaden wirksam vorzubeugen oder zu kontrollieren.

Der Prozess der Risikobewertung lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

Identifizierung und Bewertung des Risikos: Die Bestimmung und Analyse des Potenzials, des Ursprungs, der Charakteristika und des Verlaufs einer Gefährdung – d. h. die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß einer Gefährdung;

Mögliche Risikobehandlungen:

Rückführung: Die Planung und Ausführung von strukturbedingten Eingriffen (z. B. Dämme, Deiche) oder von nicht strukturbedingten Maßnahmen wie die Gesetzgebung zum Katastrophenschutz.

Frühzeitiges Erkennen und Warnen: Die Bereitstellung rascher und aktueller Informationen durch anerkannte Institutionen, die den Individuen, die einer Gefahr ausgesetzt sind, erlauben Maßnahmen zu ergreifen, um die Risiken zu vermeiden oder zu reduzieren und wirksame Gegenmaßnahmen setzen zu können.

Katastrophenbereitschaft und Notfallmanagement: um natürliche und anthropogene Risiken besser zu verstehen, früher zu erkennen und die Folgen von Katastrophen besser zu beherrschen.

Aktivitäten und Maßnahmen setzen, um im Voraus eine effektive Antwort auf die Auswirkung einer Gefährdung zu haben, einschließlich der Maßnahmen in Verbindung mit rascher und effektiver Warnungen sowie der Evakuierung und Notfallplanung.

Wiederherstellung/Wiederaufbau: Setzen von Entscheidungen und Aktionen/Maßnahmen, die in der Phase nach einer Katastrophe anfallen, mit dem Ziel, die Lebensbedingungen der betroffenen Bevölkerung wiederherzustellen.

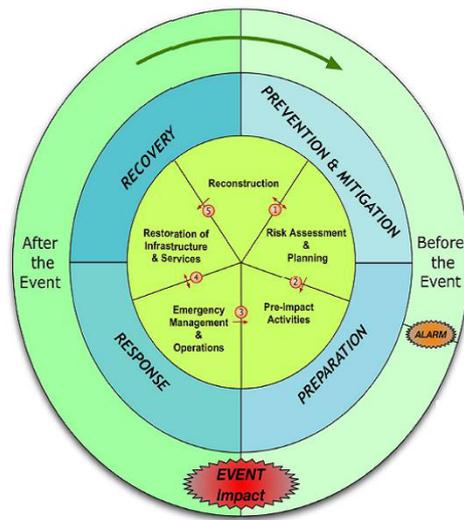


Abbildung 1: Zyklus des Riskomanagements (aus [1])

Eine zweckmäßige Risikobewertung bzw. ein Risikomanagement benötigt Informationen, die auf dem neuesten Stand sind, eine möglichst schnelle Antwort, genaue Daten und eine Möglichkeit Datenänderungen in einer bestimmten Zeitspanne zu überprüfen.

Laserscanner werden zur Risikobewertung in den verschiedensten Anwendungsgebieten genutzt:

Analyse der Statik eines einsturzgefährdeten Gebäudes

Abschätzung möglicher Strukturverformungen, die sich mit der Zeit aus externen und internen Kräften ergeben

Ermittlung möglicher Überschwemmungsgebiete durch Analyse des topographischen Geländes

Simulation von Hangrutschungen oder von Erdbeben

Feststellung des Zustandes und die Sicherheitsanalyse von Straßen und Brücken

Dokumentation von Katastrophengebieten. Dies umfasst unter anderem den Einsturz von Gebäuden, Fahrbahnschäden und bauliche Versäumnisse, beschädigte Fahrzeuge; Kollisionszonen, einschließlich Fahrbahnen, Hafenanlagen, Parkplätzen und Treppenaufgängen; die Überreste abgebrannter Gebäude; die Beurteilung neuer Konstruktionen anhand von Bestandsaufnahmen

Tatortfassung (Vergleich von Schadensprofilen, keine Beeinträchtigung des Beweismaterials, einbinden der Umgebung, schnelle Freigabe des Schauplatzes)

Vermessung von Zonen mit hoher Verkehrsdichte ohne Verkehrsanhaltungen und Risiko für das Vermessungsteam

Durchführung exakter Vermessungen von Felswänden (Gefahr des Steinschlags) aus der Distanz

Simulation von Tsunamis durch Bereitstellung topografischer Informationen

GIS Kartierung: Standort der betroffenen Bevölkerung und wichtiger Infrastrukturen wie Krankenhäuser und Feuerwehren erfassen

## **1.2. Was versteht man unter Laserscanning?**

Das Laserscanning bezeichnet eine Methode eine Oberfläche mithilfe der Lasertechnologie abzutasten bzw. einzuscannen. Dabei wird eine Umgebung oder ein Gegenstand aufgezeichnet, um Daten über die Oberfläche, die Form und wenn möglich über das Aussehen (z. B. die Farbe) zu erhalten. Anschließend können die gesammelten Daten dazu verwendet werden, digitale zweidimensionale Zeichnungen oder dreidimensionale Modelle zu erstellen, die für eine Vielzahl von Anwendungen von Nutzen sind.

Die Überlegenheit des Laserscannings liegt darin, dass eine sehr große Zahl von Punkten mit einer sehr hohen Genauigkeit in einer relativ kurzen Zeit aufgenommen werden können. Es ähnelt dem Vorgang, ein Foto mit Tiefeninformation aufzunehmen. Die Laserscanner sind Line-of-Sight (Sichtverbindung) Geräte, weshalb Mehrfachscans von unterschiedlichen Positionen aus benötigt werden, um die gesamte Struktur einer Oberfläche zu erfassen.

## **1.3. Statisches und dynamisches Laserscanning**

Die gegenwärtige Laserscannertechnologie kann in zwei Kategorien unterteilt werden: in eine statische und in eine dynamische.

Befindet sich der Scanner während der Datenerfassung in einer fixen Position, spricht man von einem statischen Laserscanning. Die Vorteile dieser Methode liegen in der hohen Präzision und in der relativ hohen Punktdichte. Das gesamte statische Laserscanning kann als terrestrisches Laserscanning angesehen werden, allerdings fällt nicht jedes terrestrische Laserscanning in die Kategorie des statischen Laserscannings.

Beim dynamischen Laserscanning wird der Scanner auf eine mobile Plattform montiert. Diese Systeme erfordern zusätzliche Positionsbestimmungssysteme wie INS und GPS, die das System sehr komplex und teuer machen. Beispiele für das dynamische Laserscanning sind das Airborne-Laser-Scanning (ALS), das scannen aus einem fahrenden Auto heraus oder mithilfe eines unbemannten Luftfahrzeugs (Drohne).

Dieses Tutorial konzentriert sich auf das statische Laserscanning.

## **1.4 Anwendungsgebiete des Laserscannings**

In der Anfangsphase wurden Laserscanner hauptsächlich im Automobil- und Industriedesign benutzt, um den Prozess des rechnerunterstützten Konstruierens (CAD: computer aided design) zu unterstützen. Dies half bei der Massenproduktion von Konsumartikeln.

In der Zwischenzeit hat sich die Technologie weiterentwickelt und sich andere potentielle Anwendungsgebiete erschlossen. Mittelbereichsscanner wurden für die petrochemische Industrie entwickelt. Aufgrund der Komplexität von Industrieanlagen, die nur als zweidimensionale Zeichnungen dokumentiert wurden, führte das Laserscanning zur vollständigen dreidimensionalen Standortverwaltung.

Die offensichtlichen Vorteile des Laserscannings sind: ein berührungsloses Messen, die hohe Genauigkeit, der große Abstand vom Messobjekt, die schnelle Datenerfassung, etc.; andere Disziplinen wie der Denkmalschutz, die Architektur, die Stadtentwicklung, die Forensik und die Unterhaltungsindustrie beginnen diese Technologie zu übernehmen (siehe Fig. 2).

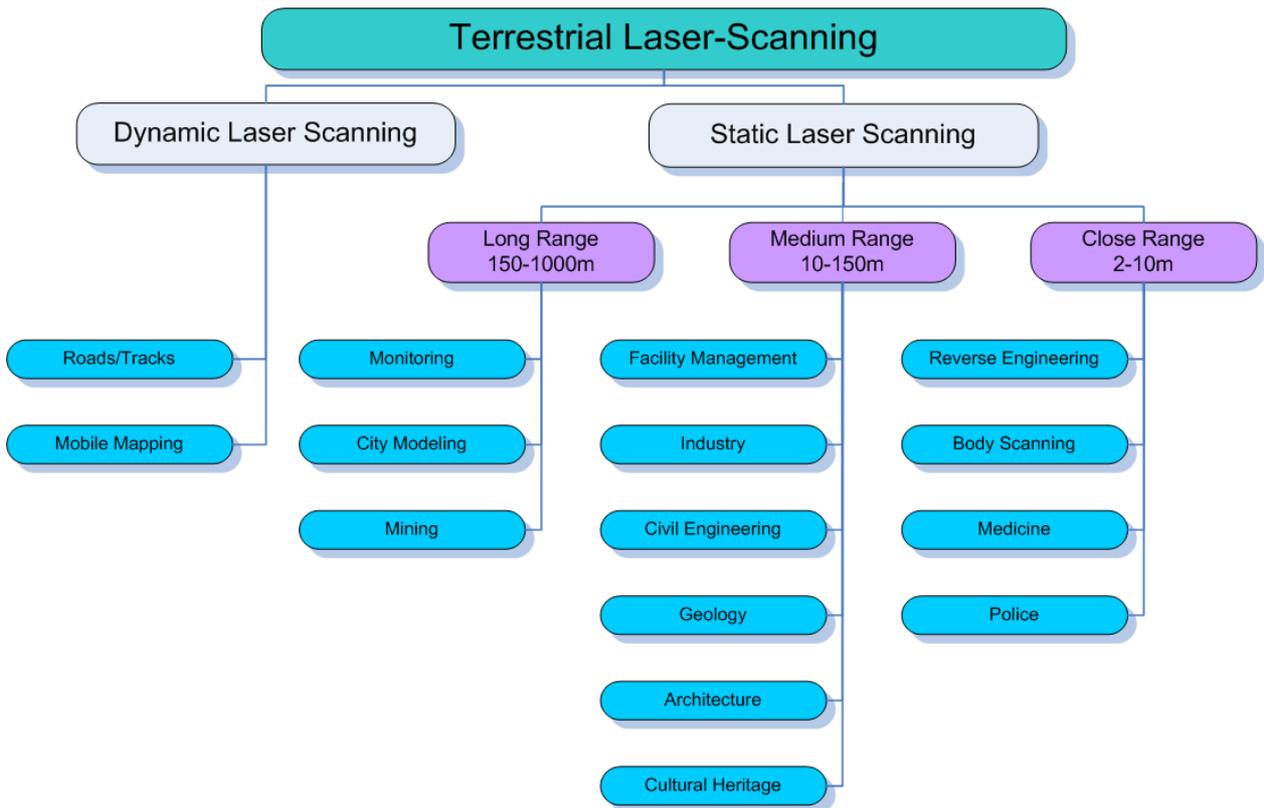


Fig. 2: Laserscanner-Anwendungen

## 2. Kapitel II: Die Prinzipien des Laser Scannings

### 2.1. Das elektromagnetische Spektrum des Lichts

Der Grund, warum wir Objekte sehen ist der, dass sie Teile des sichtbaren Spektrums, das wir Licht nennen, emittieren, reflektieren oder transmittieren. Dieser sichtbare Teil des elektromagnetischen Spektrums setzt sich aus den Farben von Rot und Orange bis hin zu Blau und Violett zusammen.

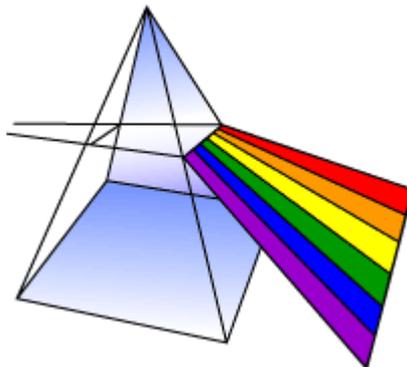


Abbildung 3: Ein Prisma, das weißes Licht in seine verschiedenen Farben aufspaltet

Jede Farbe entspricht einer bestimmten Wellenlänge des Lichts. Leitet man weißes Licht durch ein Glasprisma, dann wird violettes Licht mehr gebeugt („abgelenkt“) als rotes, weil es eine kürzere Wellenlänge besitzt.

Die Wellen im elektromagnetischen Spektrum variieren in der Größe: von den sehr langen Radiowellen (der Größe von Gebäuden) bis hin zu den sehr kurzen Gammastrahlen, die kleiner als der Atomkern sind.

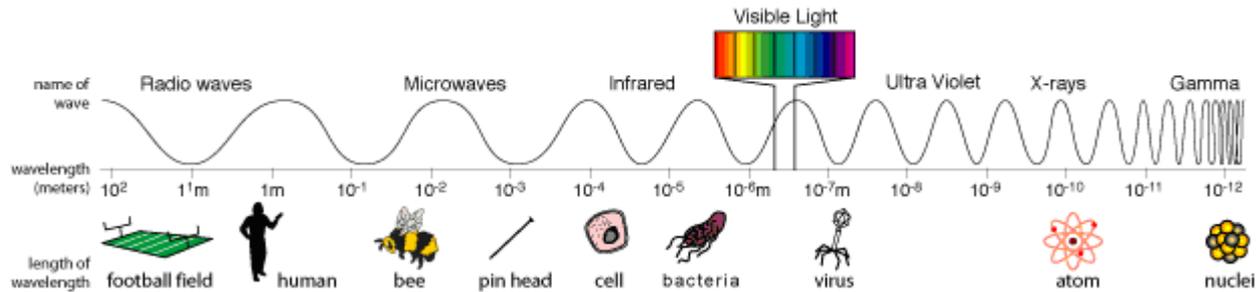


Abbildung 4: Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum kann in Bezug auf seine Energie, seine Wellenlänge oder seine Frequenz ausgedrückt werden. Diese Größen stehen entsprechend den folgenden Gleichungen in Beziehung:

$$\text{Lichtgeschwindigkeit } (c) = \text{Frequenz } (f) \times \text{Wellenlänge } (\lambda)$$

und

$$\text{Energie } (E) = h \times f = (h \times c) / \lambda$$

wo:

c = Lichtgeschwindigkeit 299,792,458 m/s

h = Planck'sche Konstante 6.626069. 10<sup>-34</sup> J.s

Also haben hochfrequente elektromagnetische Wellen kurze Wellenlängen und hohe Energie; und niederfrequente Wellen haben umgekehrt lange Wellenlängen und niedrige Energie.

## 2.2. Laser

Ein Gerät, das in der Lage ist eine Lichtwelle zu erzeugen, die nur ein sehr schmales Band des Spektrums nutzt, nennt man einen Laser. Ein typischer Laser emittiert Licht in einem schwach auseinanderlaufenden Strahl innerhalb einer klar definierten Wellenlänge (übereinstimmend mit einer bestimmten Farbe, falls der Laser im sichtbaren Spektrum arbeitet). Dies steht im Gegensatz zu einer Lichtquelle, wie z. B. der Glühlampe, die Licht in einem großen Raumwinkel und über ein breites Spektrum von Wellenlängen hinweg emittiert. Diese Eigenschaften des Laserlichts werden im Begriff Kohärenz zusammengefasst.

Laser ähneln genau genommen den Transistoren, denn sie erzeugen bzw. verstärken das Licht genauso wie Transistoren die elektrischen Signale bei Ton-, Funk- oder Mikrowellenfrequenzen verstärken. Der Begriff Laser ist ein Akronym aus **L**ight **A**mplification by **S**imulated **E**mission of **R**adiation. Der erste Laser wurde 1960 von Theodore Maimann von den Hughes Research Laboratories vorgeführt.

Im täglichen Leben werden Laser speziell in optischen Speichermedien wie CD und DVD Playern benutzt, in denen der Laser die Oberfläche der Disk für die Datenrückgewinnung abtastet. Andere Anwendungsgebiete des Lasers sind die Barcodelesegeräte und die Laserpointer. In der Industrie werden Laser zum Schneiden von Stahl und anderen Metallen und zum Gravieren von Mustern, z. B. den Zeichen auf Computer-Tastaturen, verwendet. Laser werden ebenfalls in militärischen und medizinischen Anwendungsgebieten benutzt

### **2.3. Wichtige Eigenschaften des Laserlichts**

Laserlicht ist Licht, das mit Hilfe eines Lasergeräts erzeugt wird. Ein solches Licht hat einige sehr spezielle Eigenschaften, die es von anderen Lichtquellen unterscheidet **Error! Reference source not found.**

Das Laserlicht wird in Form eines Laserstrahls erzeugt. So ein Laserstrahl hat einen hohen (manchmal einen extrem hohen) Grad an räumlicher Kohärenz, demzufolge er sich vorherrschend in einer klar bestimmten Richtung mit mäßiger Strahldivergenz ausbreitet. Der Begriff Kohärenz drückt aus, dass das elektrische Signal über den gesamten Strahlenverlauf mit fester Phasenlage schwingt. Diese Kohärenz bewirkt, dass sich ein Laserstrahl über weite Distanzen fortpflanzen kann und sich zu sehr kleinen Spots fokussieren lässt.

Das Laserlicht hat (in den meisten Fällen) auch einen hohen Grad an zeitlicher Kohärenz, die einer langen Kohärenzlänge äquivalent ist. Lange Kohärenzlängen implizieren eine feste Phasenlage über ein relativ langes Zeitintervall hinweg, das einer großen Ausbreitungsstrecke (bis zu mehreren Kilometern) entspricht.

Eine große zeitliche Kohärenz kombiniert mit einer großen Kohärenzzeit bzw. Kohärenzlänge ergibt eine schmale spektrale Bandbreite (oder Linienbreite). Das bedeutet, dass sichtbare Laserstrahlen eine reine Farbe haben; z. B. Rot, Grün oder Blau, nicht aber Weiß oder Magenta. Zum Beispiel haben die meisten Laser, die in Messgeräten für kurze und mittlere Entfernungen benutzt werden, eine Wellenlänge von 1064 nm (nahe dem Infrarot) oder 532 nm (grüner Laser). Es sollte noch erwähnt werden, dass eine große Kohärenzlänge eine Neigung zum Phänomen des Laser Speckles aufweist, d.h. es kann ein charakteristisches Granulatum beobachtet werden. Dieser Effekt tritt beispielsweise dann ein, wenn ein Laserstrahl eine metallische Oberfläche trifft.

In den meisten Fällen ist das Laserlicht linear polarisiert. Das heißt, dass das elektrische Feld in einer bestimmten Raumrichtung schwingt.

Abhängig von den Anwendungsgebieten, kann Laserlicht andere außergewöhnliche Eigenschaften aufweisen:

Laserlicht kann sichtbar sein, aber die meisten Laser emittieren in Wirklichkeit in anderen Spektralbereichen, nämlich nahe dem Infrarot, das für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar ist.

Laserlicht ist nicht immer kontinuierlich, kann aber in Form kurzer bzw. ultra kurzer Impulse abgegeben werden, weshalb die Leistung extrem hoch sein kann.

Wegen ihrer Kohärenzeigenschaften stehen Laserstrahlen im Mittelpunkt des Interesses, wenn Lichtstrahlen auf entfernte Schauplätze geworfen werden. Eine andere herausragende Eigenschaft der (Laser) Lichtwellen ist deren Ausbreitungsgeschwindigkeit. Lichtwellen breiten sich in einem bestimmten Medium in einer endlichen und konstanten Geschwindigkeit aus. Wegen dieser Eigenschaft eignet sich das Laserlicht in hohem Maße zur Vermessung von Objekten. Wie dies geschieht wird in den folgenden Paragraphen ausgeführt.

## **2.4. Lasersicherheit**

Laser werden in vielen Anwendungsgebieten genutzt: in wissenschaftlichen, militärischen, medizinischen und in kommerziellen Bereichen; das alles hat sich seit der Erfindung des Lasers 1958 entwickelt. Die Kohärenz, die Einfarbigkeit und die Fähigkeit extreme Energien zu erzeugen, sind die wesentlichen Eigenschaften, die es für diese speziellen Anwendungsgebiete geeignet macht. Deshalb sollte man mit dem Laserlicht extrem vorsichtig umgehen und dazu wird es notwendig sein, die verschiedenen Lasertypen zu verstehen.

Um Anwender in die Lage zu versetzen das Risiko einzuschätzen, sind alle Laser und Geräte die Laser nutzen mit einer Klassifizierung gekennzeichnet, abhängig von der Wellenlänge und der Energie, die der Laser produziert. Der europäische Standard [3] unterstützt Informationen zur Laserklasse und zu Schutzmaßnahmen. Es gibt sieben Laserklassen:

Laser der Klasse 1 sind unter angemessenen und vorhersehbaren Bedingungen ungefährlich. Das schließt auch den Gebrauch optischer Instrumente (z.B. Lupen oder Ferngläser) ein.

Laser der Klasse 1M sind unter angemessenen und vorhersehbaren Bedingungen ungefährlich, solange keine optischen Instrumente in den Laserstrahl gehalten werden.

Laser der Klasse 2 rufen normalerweise einen Lidschlussreflex hervor, der das Auge schützt. Diese Reaktion lässt einen adäquaten Schutz unter angemessenen und vorhersehbaren Bedingungen erwarten. Dies schließt den Gebrauch optischer Instrumente ein.

Für Laser der Klasse 2M gelten dieselben Bedingungen, solange keine optischen Instrumente in den Laserstrahl gehalten werden.

Laser der Klasse 3R sind potentiell gefährlich, sofern man direkt in den Laserstrahl blickt, wenngleich das Risiko geringer ist als bei Laser der Klasse 3B.

Laser der Klasse 3B sind in der Regel gefährlich, sofern man dem Laserstrahl direkt ausgesetzt ist, wenngleich diffuses Streulicht in der Regel als ungefährlich gilt. Diese Laserklasse ist generell nicht für Vermessungszwecke geeignet.

Laser der Klasse 4 schädigen Auge und Haut. Laser dieser Klasse sind auch in der Lage gefährliche Reflexionen zu erzeugen. Diese Laserklasse ist nicht für Vermessungszwecke geeignet.

Die Anwender von Laserscanning-Systemen sollten immer die Laserklasse ihres Instruments kennen. Im Besonderen sollte der Anwender sicher gehen, dass das korrekte Klassifikationssystem benutzt wird. (Für weitere Informationen über die Lasersicherheit siehe den IEC Standard [3])

Besondere Sicherheitsmaßnahmen und Vorgehensweisen sind im IEC Standard der Klassen 1M, 2M und 3R für Lasergeräte beschrieben, die für das Vermessen, die Justage und das Nivellieren verwendet werden. Die für das Laserscanning relevanten Maßnahmen sind:

Nur qualifizierten und ausgebildeten Personen sollte das Aufstellen, Justieren und Bedienen der Laserausrüstung übertragen werden;

Gebiete, wo diese Laser zur Anwendung kommen, sollten mit einer entsprechenden Laser-Warnhinweistafel gekennzeichnet werden.

Sicherheitsmaßnahmen sollten gewährleisten, dass Personen nicht in den Laserstrahl blicken. Der direkte Blick in den Laserstrahl mit optischen Instrumenten (Theodolite etc.) kann ebenso gefährlich sein.

Die Sicherheitsmaßnahmen sollten gewährleisten, dass der Laserstrahl nicht unabsichtlich auf spiegelnde Oberflächen gerichtet wird.

Wenn das Lasergerät nicht gebraucht wird, sollte es an einem Ort aufbewahrt werden, wo unbefugte Personen keinen Zutritt haben.

In Umgebungen, wo Explosionsgefahr herrscht (z. B. petrochemische Anlagen, Minen), sollten spezielle Lasergeräte verwendet werden. Die wesentlichen Eigenschaften solcher Geräte sind: Beschränkung der Laserenergie, keine Funkenbildung und die Begrenzung der maximalen Temperatur des Geräts.

## 2.5. Messen mit Licht

Aufgrund der neuesten Entwicklungen im maschinellen Sehen und in der Sensortechnologie wird Licht auf verschiedene Weise genutzt, um Objekte zu vermessen. Diese Messtechniken lassen sich in zwei Kategorien einteilen: in aktive und in passive Techniken.

Passivscanner emittieren selbst keine Strahlung, stattdessen verlassen sie sich darauf, die reflektierte Umgebungsstrahlung zu erfassen. Die meisten Scanner dieses Typs erfassen sichtbares Licht, weil dieses eine Umgebungsstrahlung liefert. Andere Arten von Strahlung, z. B. die Infrarotstrahlung, können ebenfalls genutzt werden. Passive Methoden können sehr kostengünstig sein, weil sie in den meisten Fällen keine spezielle Hardware erfordern, außer einer Digitalkamera. Das Problem dieser Methoden besteht darin, dass sie darauf bauen, Übereinstimmungen zwischen 2D Bildern zu finden, die jedoch nicht immer eine eindeutige Lösung liefern. Zum Beispiel tendieren sich wiederholende Muster dazu, die Messmethode zum 'Narren' (fool) zu halten. Die Genauigkeit dieser Methoden hängt größtenteils vom Auflösungsvermögen des Abbildungssystems und der Dichte von erkennbaren Merkmalen im Bild ab.

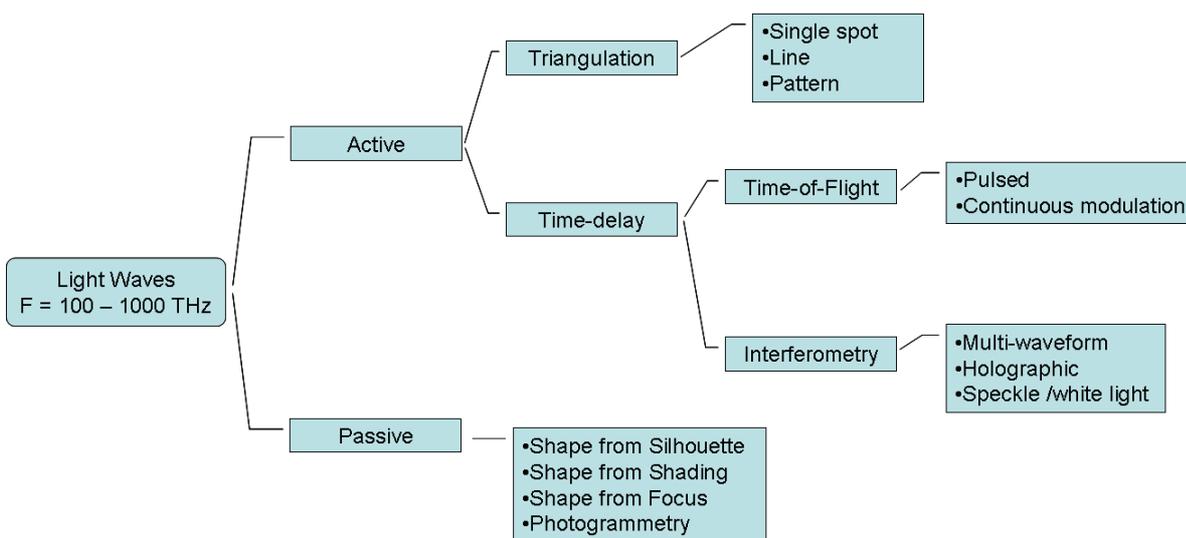


Abbildung 5: Kategorisierung der Messmethoden, die Licht benutzen (aus [4])

Dieses Handbuch konzentriert sich auf die aktiven Messtechniken. Aktivscanner emittieren eine Art von kontrollierter Strahlung und detektieren deren Reflexion zwecks Erfassung eines Objekts bzw. einer Umgebung. Mögliche Typen von Strahlung schließen Licht-, Ultraschall- und

Röntgenstrahlen ein. Weil diese aktiven Messtechniken einen Lasertransmitter und einen Receiver benötigen, sind sie mechanisch komplexer als die passiven Methoden. Die Hauptvorteile dieser Systeme sind:

Sie benötigen kein Umgebungslicht, weil sie ihre eigene Strahlung erzeugen;

Sie unterstützen eine automatische Erfassung einer Oberfläche mit einer hohen Punktdichte;

Sie sind auch bei Oberflächen ohne besondere Merkmale anwendbar;

Sie haben eine relativ hohe Erfassungsgeschwindigkeit (1000 -- 500.000 pts/sec);

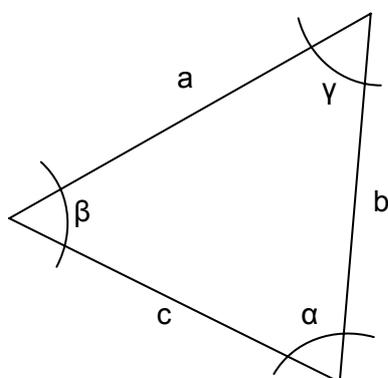
Allerdings werden einige aktive Systeme von äußeren Lichtquellen, vom Reflexionsvermögen, der Farbe und der Rauheit einer Oberfläche in ihrer Messgenauigkeit beeinflusst.

Es gibt eine Menge von Aktivscannern, die sich alle darin unterscheiden, wie der Scanner das reflektierte Lichtsignal empfängt und/oder analysiert. In den folgenden Kapiteln werden diese unterschiedlichen Typen von aktiven Scannern detaillierter beschrieben.

### 2.5.1. Messungen basierend auf Triangulation

Die aktiven Triangulationsverfahren wurden entwickelt, um das berüchtigte Korrespondenzproblem zu lösen, das den passiven Messverfahren eigen ist. Das Korrespondenzproblem kann folgendermaßen wiedergegeben werden: gegeben sind zwei Bilder |1 und |2 eines Ortes, die von zwei verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen wurden, weiters die relative Ausrichtung der Kameras und ein übereinstimmendes Punktepaar in den beiden Einzelbildern; mit Hilfe des Triangulationsverfahren lassen sich dann die entsprechenden 3D-Punkte errechnen. Demzufolge besteht das Korrespondenzproblem im Auffinden übereinstimmender Punkte in verschiedenen Bildern. Das aktive Triangulationsverfahren benutzt Laserlicht zur Lösung dieses Problems in der Weise, dass mit Hilfe der Farbe des Laserlichts ein 3D-Punkt am Objekt markiert wird, der sich im Bild leicht auffinden lässt.

Dreiecke bilden die Grundlage vieler Messverfahren. Sie wurden bereits in der Antike für elementare geodätische Messungen angewendet und finden sich auch heute in den modernen laserbasierten 3D-Kameras. Die mathematischen Grundlagen der Dreiecksberechnung (Trigonometrie), die den auf Triangulation basierenden Messverfahren zu Grunde liegen, werden dem griechischen Philosophen Thales (6. Jh. v. Chr.) zugeschrieben.



$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)}$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2.b.c.\cos(\alpha)$$

$$c = a.\cos(\beta) + b.\cos(\alpha)$$

Abbildung 6: Prinzipien der Triangulation

Ein Laserscanner, der die Dreiecksmethode nutzt, wendet dieselben Prinzipien an, um die Umgebung zu vermessen. Ein Laser beleuchtet ein Objekt mit einem Muster und eine Kamera registriert das vom Laser projizierte Muster. Der Laser-Emitter und die Kamera sind in einem konstanten Winkel angeordnet und bilden zusammen mit der Laserprojektion auf dem Objekt ein Dreieck; von daher leitet sich der Name Triangulation ab. Aufgrund dieser Anordnung, ändert sich die Laserprojektion im Sichtfeld der Kamera abhängig vom Abstand zur Kamera.

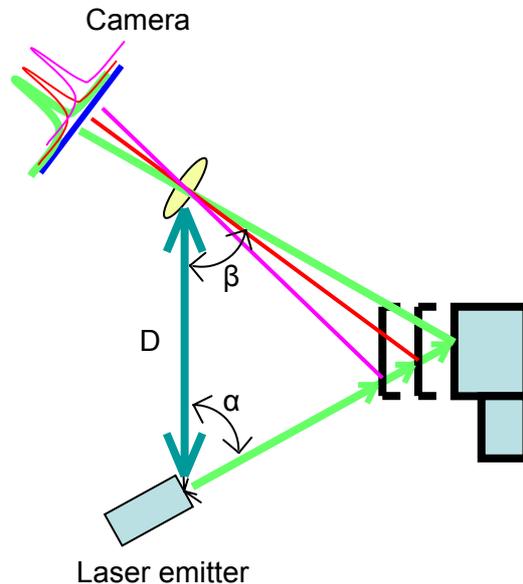


Abbildung 7: Prinzipien der Lasertriangulation

Die Analyse von Abbildung 7 zeigt, dass die Dreiecksseite ( $D$ ), der Abstand zwischen Kamera und Laseremitter, bekannt ist. Der Winkel ( $\alpha$ ) ist ebenfalls bekannt. Der Winkel ( $\beta$ ) kann durch den genauen Punkt des Laserstrahls im Sichtfeld der Kamera bestimmt werden. Diese drei Angaben bestimmen die Gestalt und die Größe des Dreiecks vollständig und liefern die exakte Tiefenposition des Messobjekts.

Es kann gezeigt werden, dass, je länger die Grundlinie ( $D$ ) ist, desto geringer ist der Fehlereinfluss der Pixel-Koordinaten auf die Beurteilung der Tiefenlage. Allerdings darf die Grundlinie nicht allzu groß sein, weil dann der Laserprojektor und die Kamera ein reduziertes überlappendes Sehfeld (FOV) haben würden und der Laserpunkt nicht mehr überall vom Kamerabild erfasst werden kann.

Die Möglichkeiten, die Ungenauigkeit in der Tiefenrichtung zu verringern, lassen sich so zusammenfassen:

Die Verkürzung der Distanz zwischen Objekt und Scanner → steigert jedoch die Abschattungen

Die Vergrößerung der Triangulationsbasis ( $D$ ) → steigert jedoch die Abschattungen

Vergrößerung der Brennweite der Linse → reduziert jedoch das Sehfeld

Die Verringerung der Messungenauigkeit → ergibt jedoch mehr Pixel in der Kamera

In den meisten Fällen wird eine Laserlinie, die das Objekt überstreicht, anstelle eines einzelnen Laserpunkts benutzt, um das gesamte Objekt dreidimensional zu erfassen. Das bedeutet, dass

sich der Winkel des Laseremitters, während der Laserstrahl das Objekt überstreicht, ebenfalls verändert.

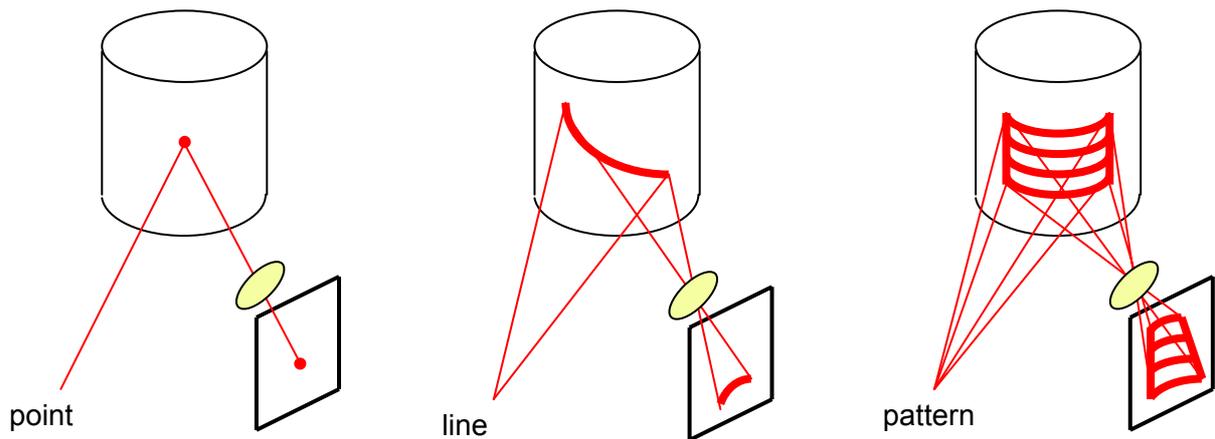


Abbildung 8: Verschiedene Projektionsmethoden der Triangulationsscanner

Um den Gebrauch von mechanischen Vorrichtungen zu vermeiden, sind einige innovative Modifikationen vorgenommen worden. Statt des Bewegens/Drehens des Laseremitters, um das ganze Objekt zu erfassen, können Punkt- bzw. Linienmuster projiziert werden, die das gesamte Objekt auf einmal erfassen. Verschiedene Muster, die sich von regelmäßigen Linienmustern bis zu räumlichen Streifenmuster erstrecken, die ihre Frequenz oder Phase mit der Zeit aufeinander abstimmen, werden dazu verwendet, um genauere Messergebnisse zu liefern. Beachte, dass diese räumlichen Streifenmuster ein statisches Objekt erfordern.

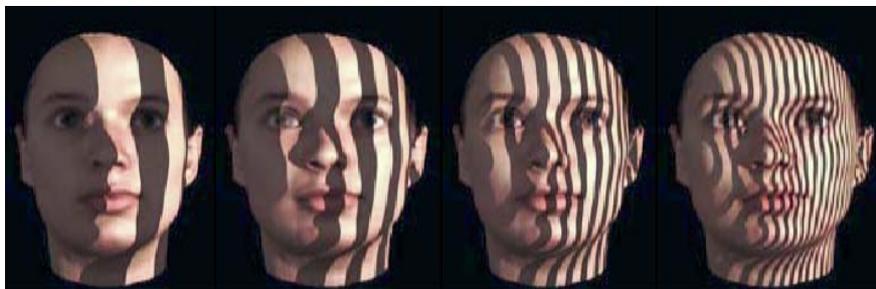


Abbildung 9: Regelmäßige Musterprojektion (übernommen aus [5])

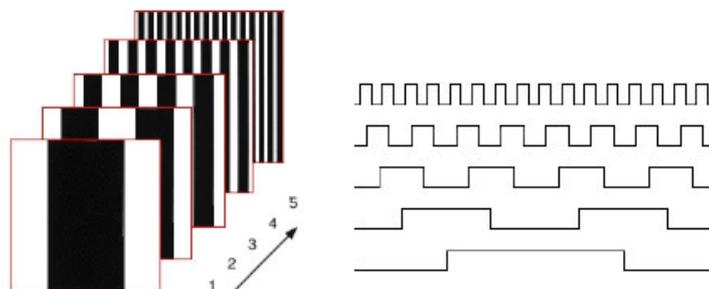


Abbildung 10 : binäres Streifenmuster, das zeitlich phasenmoduliert ist, auch Streifenprojektionsverfahren genannt.

Sogar komplexere Muster, die auf dem Moiré Effekt basieren, werden heutzutage genutzt, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser Systeme zu steigern. Der Moiré Effekt ist einfach das

Ergebnis zweier Amplituden, die räumliche Signale modulieren, die sich zusammen gegenseitig beeinflussen. Dieses Phänomen lässt sich am Fernsehbildschirm beobachten, wenn die Leute gestreifte Kleider tragen. Ein Moiré Scanner projiziert ein regelmäßiges Muster auf das zu scannende Objekt, während die Kamera, die das Objekt aufnimmt, ebenfalls über ein regelmäßiges Muster verfügt. Die Interferenz dieser zwei sich gegenseitig überlagernden Muster, erzeugt ein Moiré-Muster über das sich Tiefenwechsel genau feststellen lassen.

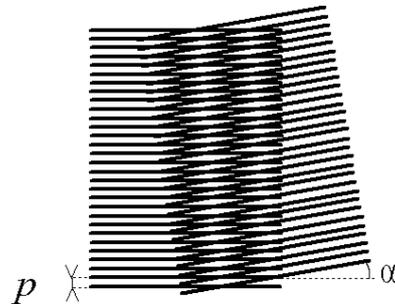


Abbildung 11: Moiré-Muster, das durch zwei überlagerte Liniengitter erzeugt wurde, wobei ein Liniengitter um 5° gegenüber dem anderen verdreht wurde (übernommen aus [6])

Als Schlussbemerkung kann über die Lasertriangulation gesagt werden, dass die Hauptherausforderung bei der Verwendung von Streifenprojektionssystemen in der eindeutigen Separation der unterschiedlichen Projektionsrichtungen auf den Objekten ist, die unerwartete Sprünge in der Tiefe und große Texturunterschiede über ihre Oberfläche haben.

Auf Grund der physikalischen Beschränkung eine längere Grundlinie zu benutzen und dem beschränkten Sehfeld der Kamera, werden Triangulationsscanner in Anwendungsgebieten benutzt, die üblicherweise einen Einsatzbereich von weniger als 10 m verlangen. Verglichen mit den Scannern für mittlere- und längere Entfernungen, die nach dem Laufzeitverfahren arbeiten (siehe Kap. 2.5.2.), haben Triangulationsscanner einen sehr hohen Genauigkeitsgrad in der Größenordnung eines Mikrons.

## 2.5.2. Zeitbasiertes Messen

Zeitbasierte Scanner sind Aktivscanner, die die Laufzeit zwischen zwei Ereignissen messen. Im Prinzip gibt es zwei zeitbasierte Scanmethoden: Impulsbasiert (Time-of-Flight) und phasenbasiert.

### 2.5.2.1. Impulsbasierte (Time-of-Flight) Scanner (inkohärente Erfassung)

Wie bereits in Paragraph 2.3 erwähnt wurde, breiten sich Lichtwellen in einem bestimmten Medium in einer endlichen und konstanten Geschwindigkeit aus. Wenn die Laufzeit, d. h. der Weg des Lichts von einer Quelle zu einer reflektierenden Fläche und zurück, gemessen werden kann, kann die Entfernung zu dieser Fläche mit folgender Formel errechnet werden.

$$D = \frac{(c \cdot t)}{2}$$

Wobei  $c$  = die Lichtgeschwindigkeit und  
 $t$  = die Laufzeit des Signals zwischen Sender und Empfänger ist.

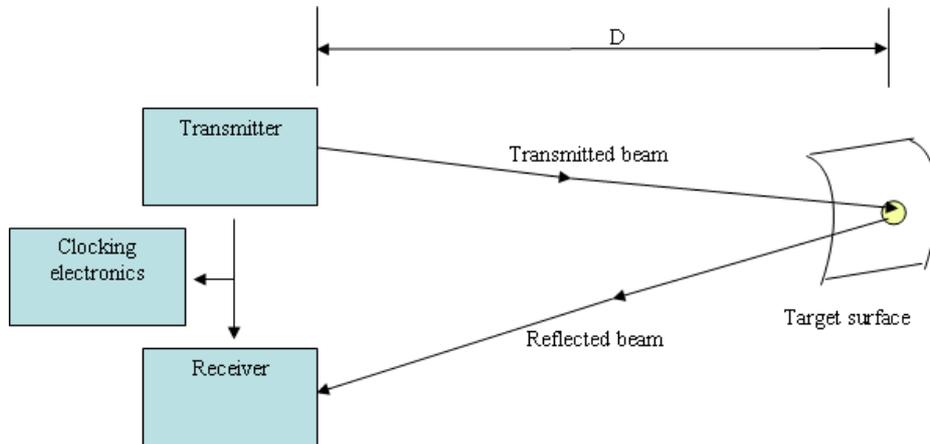


Abbildung 12: Prinzip eines Time-of-Flight Scanners

Der gegenwärtig in der Norm definierte Wert für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist exakt  $c = 299,792,458$  m/s. Wenn sich die Lichtwellen in der Luft ausbreiten, dann wird der Lichtgeschwindigkeit  $c$  ein Korrekturfaktor der sogenannte Refraktionsindex (abhängig von der Luftdichte) zu Grunde gelegt. Angenommen die Lichtgeschwindigkeit beträgt in der Luft annähernd  $3,000,000$  m/s, dann legt das Licht in  $3.33$  Nanosekunden  $1$  Meter zurück. Demzufolge müssen wir, um eine Punktgenauigkeit von  $1$  mm zu erreichen, in der Lage sein, eine Zeitverzögerung von etwa  $3,33$  Picosekunden zu messen.

Gepulste Time-of-Flight Scanner senden keinen kontinuierlichen Laserstrahl aus, sondern der Laserstrahl wird gepulst ausgestrahlt. Sie scannen ihr gesamtes Sichtfeld punktwise ein, indem sie die Richtung des Entfernungsmessers ändern. Die Blickrichtung des Laserentfernungsmessers wird von einer Ablenkeinheit geändert (siehe § 2.5.3). Typische gepulste Time-of-Flight 3D Laser können von  $2,000 \sim 500,000$  Punkte in der Sekunde messen.

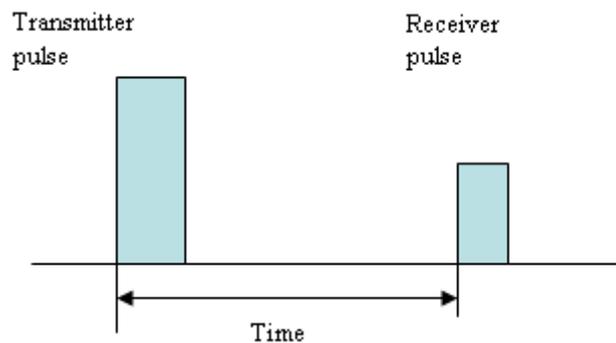


Abbildung 13: Laserimpulsmaß

Beachte, dass für eine eindeutige Messung die Zeit ( $t$ ) größer sein sollte als die Impulslänge  $T_{pulse}$ . Dementsprechend gilt

$$t > T_{pulse}$$

oder

$$d > \frac{1}{2} c \cdot T_{\text{pulse}}$$

Um diese Gleichungen besser zu verstehen, können Zahlen eingesetzt werden. Setzt man  $T_{\text{pulse}}$  auf 10ps, bedeutet das, dass die maximale Genauigkeit, die erreicht werden kann, 1,5 mm beträgt. Die meisten kommerziellen Mittel- und Langbereichssysteme unterstützen eine Genauigkeit von 6 bis 10 mm. Da die Genauigkeit vom taktgebenden Mechanismus abhängt, spielt für einen Time-of-Flight Scanner die Entfernung als Fehlerquelle keine Rolle (ausgenommen der Laser Footprint, siehe Kapitel 2.6.1).

Es ist wichtig zu bemerken, dass die Zeitableitungsmethode, um den Rückkehrimpuls zu messen, von der gewünschten Auflösungszeit (time resolution), der Zählrate und dem erforderlichen Dynamikbereich des Impulses abhängt. Die gemeinsam genutzten Prinzipien im Design des Discriminators (Impulsunterscheider) umfasst die Impulsanstiegszeit, den Nulldurchgang, den Auslösezeitpunkt und die Constant-Fraction-Auslösung (constant fraction timing).

In einem gepulsten Time-of-Flight System wird die maximale Impulswiederholfrequenz von der Tatsache diktiert, dass der Transmitter keine weiteren Impulse ausenden kann, solange das Echo des vorherigen Impulses nicht empfangen worden ist [7]. Der Zweck dieser Einschränkung ist eine Verwechslung der Impulse zu vermeiden, die am Laufzeitzählwerk eintreffen und wird als die maximale eindeutige Entfernung bezeichnet. Die maximale eindeutige Entfernung hängt von der Laufzeitdauer des Impulses und dessen Frequenz ab.

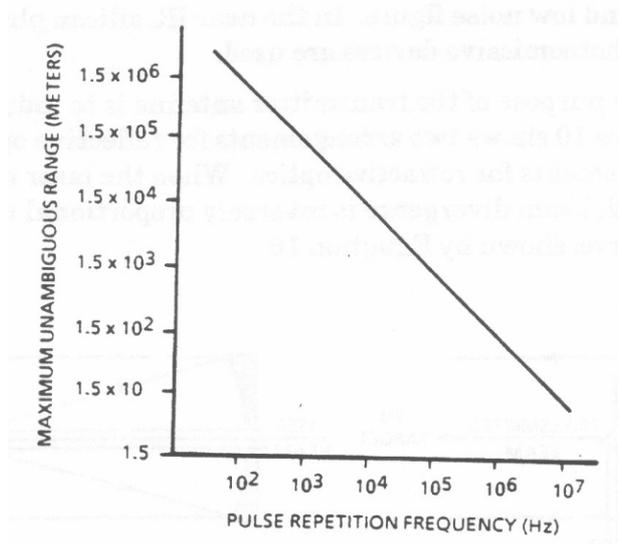


Abbildung 14: die maximale eindeutige Entfernung im Vergleich zur Impulswiederholfrequenz (aus [7])

Drei wesentliche Faktoren regeln die Genauigkeit impulsbasierter Systeme [7]:

Die Fähigkeit dieselbe relative Position des gesendeten und empfangenen Impulses zu selektieren und die Laufzeit zu messen. Begrenzt wird diese Fähigkeit durch das Rauschen, die Phasenunruhe, die Signalstärke, die Schwellenwertempfindlichkeit des Detektors, die Kürze und die Reproduzierbarkeit des Transmitterimpulses.

Die Genauigkeit mit der systembedingte Laufzeiten bekannt sind.

Die Genauigkeit der Laufzeitmessgeräte.

Die Überlegenheit der Impulslaser liegt in der hohen Konzentration transmittierter Laserenergie. Diese Energie macht es möglich ein erforderliches Signal-Rausch-Verhältnis [SNR (signal to noise ratio)] zu erhalten, das für hohe Messgenauigkeiten über weite Distanzen (über mehrere 100 m) benötigt wird. Der Nachteil liegt im Problem die exakte Ankunftszeit des zurückgestreuten Laserimpulses zu bestimmen, die sich aus der unbeständigen Natur der optischen Reizschwelle und der atmosphärischen Dämpfung ergibt.

In Abb. 15 sind einige kommerzielle Time-of-Flight Scanner abgebildet: 2008 sind die bekanntesten Firmen: OPTECH, LEICA, RIEGEL, TRIMBLE, CALLIDUS.



Abbildung 15: kommerzielle Time-of-Flight Scanner

### 2.5.2.2. Phasenbasierte Scanner

Ein anderes zeitbasiertes Messverfahren vermeidet den Gebrauch hoch präziser Taktgeber beim modulieren der Stärke des Laserstrahls. Das emittierte (inkohärente) Licht wird als Amplitude moduliert und auf eine Oberfläche gefeuert. Die gestreute Reflexion wird gesammelt und eine Messwelle misst die Phasendifferenz zwischen den ausgesandten und den ankommenden Wellenformen, d. h. eine Laufzeit.

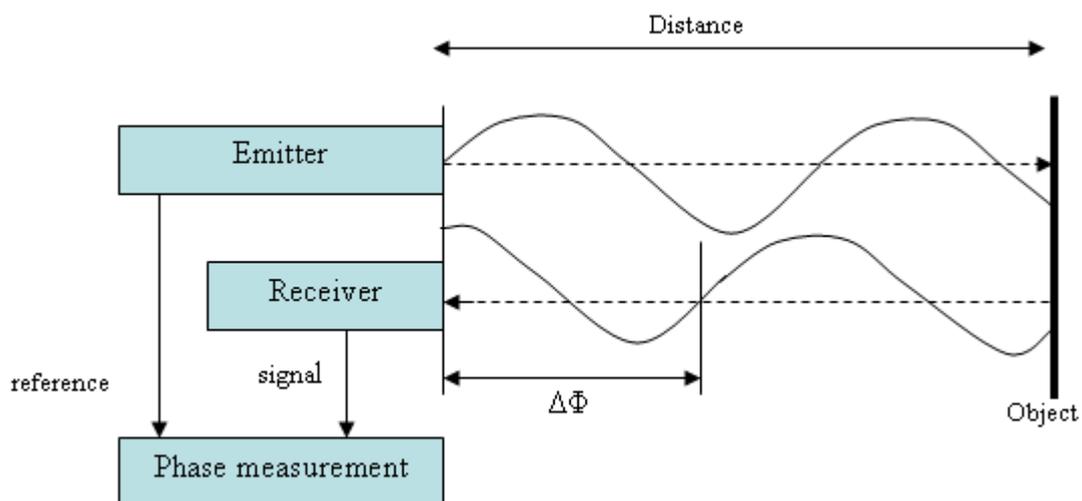


Abbildung 16: Prinzip der phasenbasierten Messung

Typische phasenbasierte Scanner modulieren ihr Signal sinusförmig, amplitudenbasiert (AM) oder frequenzbasiert (FM), als pseudo-rauschen oder polarisiert. Im Fall eines sinusförmig modulierten Signals wird das reflektierte Licht mit Hilfe von vier Auswahlpunkten demoduliert, die zur emittierten Welle getriggert sind. Außer den vier Messungen  $c(\tau_0)$ ,  $c(\tau_1)$ ,  $c(\tau_2)$  und  $c(\tau_3)$  der Phasenverschiebung  $\Delta\Phi$ , kann das Offset  $B$  und die Amplitude  $A$  berechnet werden:

$$B = \frac{c(\tau_0) + c(\tau_1) + c(\tau_2) + c(\tau_3)}{4}$$

$$A = \frac{\sqrt{(c(\tau_0) - c(\tau_2))^2 + (c(\tau_1) - c(\tau_3))^2}}{2}$$

$$\Delta\phi = \arctan\left(\frac{c(\tau_0) - c(\tau_2)}{c(\tau_1) - c(\tau_3)}\right)$$

Die Phasendifferenz kann mit einer Laufzeit in Beziehung gesetzt werden, die der ähnlich ist, die mit impulsbasierten Scannern gemessen wird. Die Beziehung zwischen Phasendifferenz ( $\Delta\Phi$ ), modulierter Frequenz ( $f_{modulated}$ ), und Laufzeit ( $t$ ) ist:

$$t = \frac{\Delta\phi}{2\pi \cdot f_{modulated}}$$

Entsprechend der Gleichung zur Messdistanz des Time-of-Flight Scanners ist die Distanz zum Messpunkt gegeben durch

$$D = \frac{(c \cdot t)}{2} = \frac{c}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{f_{modulated}}$$

Wieder geben Zahlen, die eingesetzt werden können, ein besseres Verständnis für diese Größen. Mit einer Frequenz von 10MHz und eine Phasenauflösung von 0.01 Grad (ist mit der Standardelektronik nicht allzu schwierig zu erreichen) bekommen wir eine Auflösung in  $z$  von über 0.5 mm.

Kontinuierliche Strahlmodulations-Scanner haben ebenfalls eine eindeutige maximale Reichweite ähnlich den impulsbasierten Time-of-Flight Systemen. Für diese Systeme ist die Reichweite darauf beschränkt, wenn die Phasenverzögerung bei der Sinuswelle einen vollständigen Zyklus erreicht hat. Die Gleichung für die eindeutige maximale Distanzmessung in einem kontinuierlichen Wellensystem ist gegeben durch

$$z_{amb} = \frac{c}{2 \cdot f_{modulated}}$$

Im obigen Beispiel ist das Intervall für einen vollen Zyklus 15 m (Frequenz 10MHz). Die Ungenauigkeit der Distanzmessung ist proportional zu  $Z_{amb}$  und umgekehrt proportional zum Signal-Rausch-Verhältnis (SNR).

Um eine hohe Genauigkeit (= kurze Wellenlänge; kurzes Intervall) auch über große Messreihen zu erhalten, kann man mehrere Frequenzwellenformen verwenden, in denen das Ziel an der niedrigen Frequenz lokalisiert wird (lange Wellenlänge) und die genaue Messung dann an der hohen Frequenz durchgeführt wird. Bei der letzten Generation phasenbasierter Scanner werden 2 oder auch 3 Wellen mit unterschiedlicher Wellenlänge überlagert. Die längste Wellenlänge bestimmt die eindeutige Entfernung und die kürzeste Wellenlänge bestimmt die Präzision die erreicht werden kann. Generell lässt sich sagen, dass phasenbasierte Scanner eine höhere Geschwindigkeit und eine bessere Auflösung haben dafür aber weniger genau sind als Time-of-Flight Scanner.

Allgemein ist die Genauigkeit phasenbasierter Scanner eingeschränkt durch:

Die Frequenz bzw. Modulation des Signals.

Die Genauigkeit der Phasenmessschleife → abhängig von der Signalstärke, dem Rauschen, ... .

Die Stetigkeit des Modulationsoszillators.

Die Luftturbulenzen während der Messung.

Die Schwankungen im Brechungsindex der Luft.

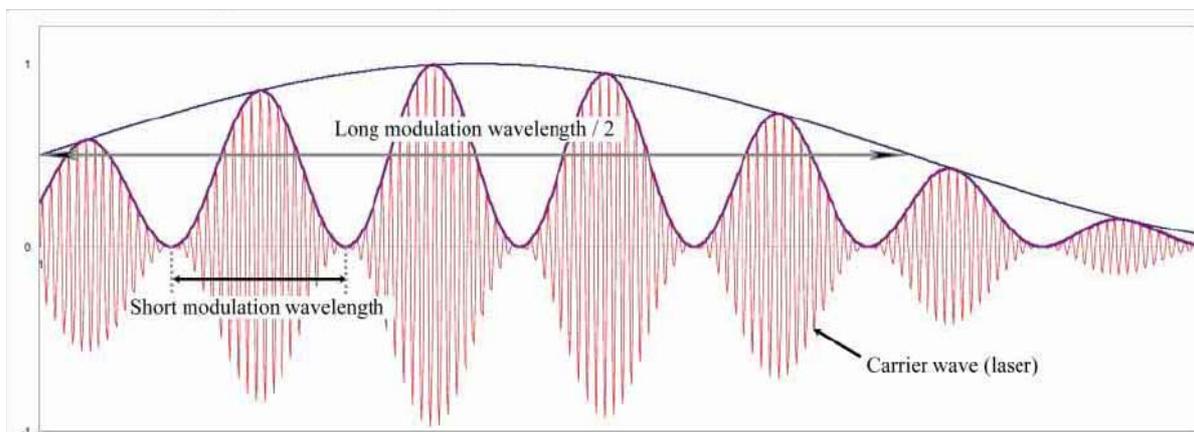


Abbildung 17: schematische Zeichnung von zwei modulierten Wellenlängen und einer Trägerwelle zur phasenbasierten Distanzmessung (aus [8])

Abb. 18 zeigt einige kommerzielle phasenbasierte Scanner: die wichtigsten Hersteller solcher Geräte sind: QSun, LEICA, Z+F und Faro.



### 2.5.2.3. Interferometrie (kohärent)

Interferometrie bedeutet, die Interferenz unterschiedlicher Lichtwellen zu verwenden, um dreidimensionale Positionen im Raum aufzuzeichnen. Die optische Interferometrie wird seit dem 19. Jahrhundert angewandt [7]. Aufgrund der geringen Intensität und Kohärenz konventioneller Lichtquellen blieben Distanzmessungen auf wenige Zentimeter beschränkt. Erst seit es die Laser gibt konnten diese Beschränkungen aufgehoben werden. Die Laser erlaubten, dass sich die Interferometrie zu einer schnellen, hochgenauen und vielseitigen Methode für weite Distanzmessungen entwickelte.

Distanzmessungen mit Hilfe der Interferometrie sind sehr genau. Sie erlaubt einen höheren Präzisionsgrad als die gepulsten Time-of-Flight Scanner oder die Methoden der Strahlmodulation in der Telemetrie. Allerdings ist die Interferometrie am besten für Messungen in einem kontrollierten Klima (z.B. Innenräume) und nur über Distanzen, die nicht größer als einige 10 Meter betragen, geeignet.

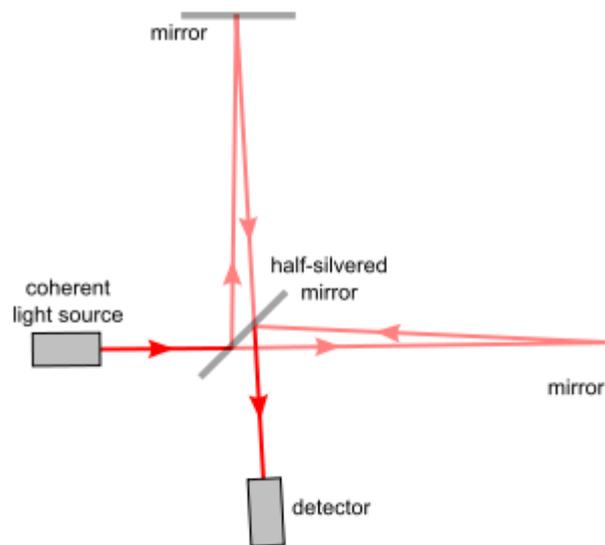


Abbildung 19: Ein Michelson Interferometer [9]

Beim Laserinterferometer teilt sich der Laserstrahl mit Hilfe eines Strahlteilers, der einen Teil des Strahls reflektiert (Referenzarm) und den anderen Teil durchlässt (Messarm). Beide Teile des Strahls breiten sich entlang unterschiedlicher Wege aus und wenn die Strahlen anschließend zusammengefügt werden, kommt es zur Interferenz. Sehr schmale Abstände (Bruchteile der Wellenlängen) können detektiert werden (kohärente Detektion), und auch längere Distanzen können mit geringer Messgenauigkeit gemessen werden (über die Zählrate der Wellenlängen). Viele Systeme arbeiten nach diesem Prinzip wie zum Beispiel die Holographie und das Speckle-Interferometer. Diese Systeme arbeiten mit einer sehr hohen Genauigkeit, sind aber auch sehr teuer.

### 2.5.3. Strahlableitungsmethoden

Um mehrere Punkte vom selben Standpunkt des Scanners aus zu messen muss der Laserstrahl abgelenkt werden. Um nicht den Laser selbst bewegen zu müssen wird an seiner Stelle ein Ablenkungsgerät benutzt. Die meisten Ablenkungsgeräte machen von einem Spiegel Gebrauch, weil diese sehr viel leichter sind und demzufolge sehr viel schneller und mit größerer Genauigkeit gedreht werden können. Es gibt eine Anzahl von Verfahren, die den Laserstrahl in

eine bestimmte Richtung ablenken, ohne den Scanner selbst bewegen zu müssen. Im Großen und Ganzen sind für diese Aufgabe drei Verfahren entwickelt worden.

Eine Option besteht in der Verwendung eines kippbaren Spiegels, der eine Bewegung des Lasers entlang einer Linie erlaubt. Eine Kombination aus zwei Spiegeln erlaubt die Ablenkung des Strahls in zwei Richtungen (Abb. 20a). Um die Geschwindigkeit des Ablenkungsgeräts zu steigern und die Komplexität des Bewegungsmechanismus eines solchen Spiegelsystems zu verringern, entwickelten die Forscher einen rotierendes Prisma (Abb. 20b). Dieses Verfahren benötigt nur mehr eine Drehrichtung und ist demzufolge schneller. Zuletzt wurden Faser-Schalter (fibre switches) eingeführt, um das System noch flexibler zu machen. Diese Verfahren lenken den Laserstrahl über einen Kreis von optischen Fasern mittels eines rotierenden Spiegels ab (Abb. 20c). Die optischen Fasern leiten dann den Strahl in jede erforderliche Richtung. Die Vorteile dieses Systems sind:

Die Laserimpulsrate ist nicht an den Bildbetrachtungswinkel gekoppelt

es ist ein sehr dichtes und regelmäßiges Scanmuster möglich

es erfordert keine Kalibrierung nach der Werkseinstellung

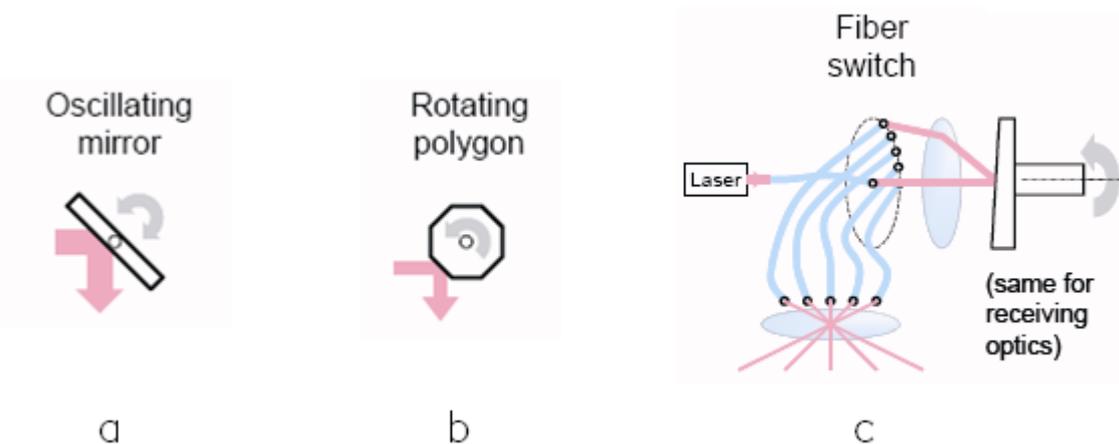


Abbildung 20: Strahlableitungsmethoden (aus [10])

## 2.6. Metrologische Aspekte: Fehleranalyse

Firmen, die Laser Scanner herstellen, preisen gern die hohe Qualität und geringe Fehleranfälligkeit ihrer Laser Scanner an, um die Vorzüge ihrer speziellen Produkte zu illustrieren. Allerdings zeigt die Erfahrung, dass dies nicht immer für bare Münze genommen werden sollte. Die Genauigkeit der Instrumente, die in limitierter Serie hergestellt werden, variiert von Instrument zu Instrument und hängt von der einzelnen Kalibrierung und der Sorgfalt ab, die bei der Verwendung des Instruments verwandt worden ist.

Jede von einem Laser Scanner erzeugte Punktwolke beinhaltet eine beachtliche Anzahl von Punkten die grobe Fehler aufweisen. Studien über Genauigkeitstests mit Laserscannern wurden unter anderen publiziert (z.B. [11] - [15]). i3mainz, Teil der University of Applied Sciences in Mainz und das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie am Swiss Federal Institute of Technology in Zürich [16] haben einige anspruchsvolle Arbeiten herausgebracht, wie man die Genauigkeit von Laserscannern testet. Um Fehlerquellen beim Laserscanning systematisch

beschreiben zu können, werden sie in vier Kategorien unterteilt: Instrumentenfehler, objektbezogene Fehler, Fehler die aus Umweltbedingungen resultieren und methodische Fehler.

## 2.6.1. Instrumentenfehler

Instrumentenfehler können sowohl systematischer als auch zufälliger Natur sein.

### 2.6.1.1. Laserstrahlgenauigkeit

Die Strahldivergenz ist die Aufweitung des Laserstrahls, die mit der Entfernung zunimmt. Die Strahldivergenz hat einen großen Einfluß sowohl auf das Auflösungsvermögen der Punktwolke als auch auf die Unbestimmtheit der Lage des Messpunkts. Die Strahldivergenz wird mit folgender Formel ausgedrückt [17]:

$$w(\rho_w) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda \cdot \rho_w}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2}$$

Mit

$\rho_w$  = Entfernung relativ zur Lage der Strahltaile (=Startpunkt)

$w$  = Strahlradius

$w_0$  = Minimum des Strahlradius (am Startpunkt) = Strahltaile

Es wird vermutet, dass die Laserreflexion eine Gauß'sche Form hat. Bei weiten Entfernungen ist die Divergenz annähernd linear. Der Strahldurchmesser wird ausgedrückt als der Ort, der 86% der gesamten Strahlstärke innerhalb einer Gauß'schen Streustrahlung beinhaltet [18].

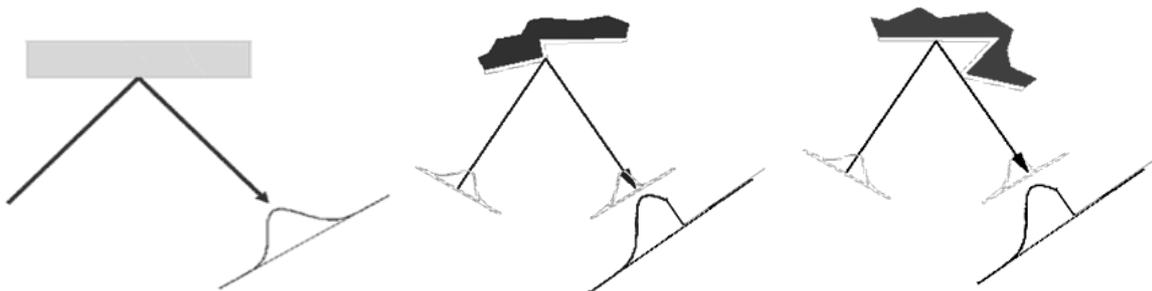


Abbildung 21: Ideale Reflexion, partielle Beleuchtung, partielle Verdeckung (aus [18])

Praktisch gesprochen wirkt sich die Strahldivergenz auf die Winkelposition des gemessenen Punktes aus. Der scheinbare Beobachtungsstandort ist entlang der Mittellinie des emittierten Strahls. Der eigentliche Punkt liegt allerdings irgendwo im prognostizierten Footprint. Laut Lichti und Gordon [19], ist die Strahlunbestimmtheit annähernd gleich einem Viertel des Strahldurchmessers.

### 2.6.1.2. Mixed edge problem

Eine wichtige Konsequenz der Strahldivergenz ist das "mixed edge" Problem. Trifft ein Laserstrahl die Kante eines Objekts, teilt sich der Strahl in zwei auf. Ein Teil des Strahls reflektiert an der Kante, während der andere Teil weiter läuft, um auf eine andere Oberfläche zu treffen. Das Ergebnis davon ist, dass die Information des einen Laserimpuls, der an den Receiver zurückgesendet wird von zwei verschiedenen Orten im Raum stammt. Die Koordinaten eines solchen Punktes relativ zur Scannerposition, errechnet sich als Durchschnitt beider Signale und wird demzufolge an einen falschen Platz gesetzt.

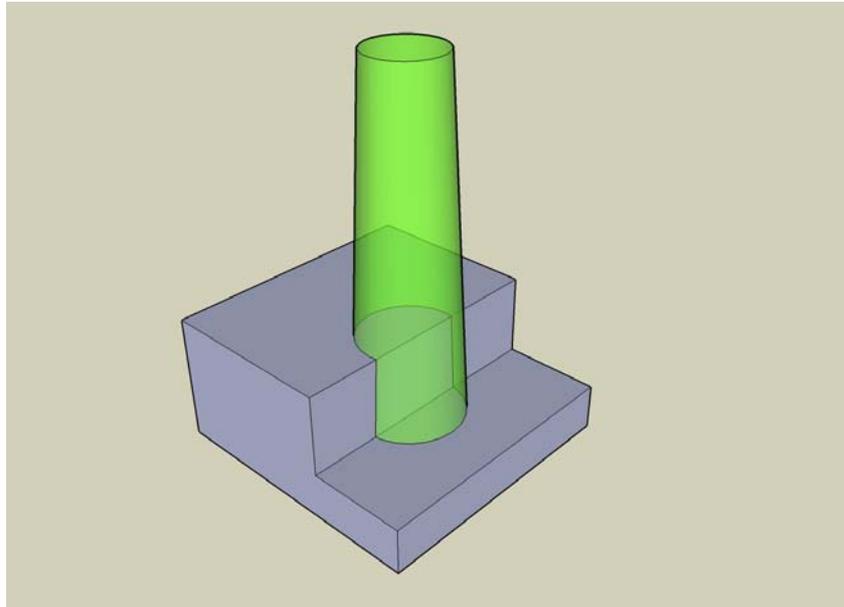


Abbildung 22: Der Mixed-Edge Effekt

Wird ein hochauflösender Scan an einem Objekt vorgenommen, erhöht sich das Risiko, dass der Strahl eine Kante trifft und die erhaltenen Daten werden hinter den Objektkanten ein Rauschen zeigen. Scanner mit einer schmalen Strahlbreite helfen dieses Problem zu minimieren.

### 2.6.1.3. Entfernungsmessungenauigkeit

Die Entfernungsmessungenauigkeit kann als Funktion einer Anzahl von Parametern ausgedrückt werden, die auf den jeweiligen Laserscanner-Typen und deren Arbeitsweise basieren. Das Folgende ist eine Zusammenfassung von Messungenauigkeiten, übernommen aus Beraldin u. a. [20].

Für einen Triangulationsscanner kann die Distanzmessungenauigkeit so ausgedrückt werden:

$$\delta_z \approx \frac{Z^2}{f \cdot D} \delta_p$$

Wobei:

$f$  = die tatsächliche Position des Laserspots (tatsächliche Brennweite);

$D$  = Dreiecksbasis;

$\delta_p$  = die Unsicherheit in der Laserposition – abhängig vom Typ des Laserspot-Sensors, der Leistungsfähigkeit des Algorithmus des Detektors, dem Signal-Rausch-Verhältnis und der Spotform des Laserabbildes

$Z$  = die Entfernung zur Oberfläche

Für einen Time-of-Flight Scanner wissen wir bereits, dass die Messgenauigkeit vom Taktmechanismus abhängt. Das bringt uns zu folgender Gleichung:

$$\delta_z \approx \frac{cT_t}{2\sqrt{SNR}}$$

Wo

$T_t$  = die Zeit des Impulsanstiegs;

$SNR$  = Signal-Rausch-Verhältnis

Die meisten terrestrischen Mittel- und Weitbereichsscanner liefern innerhalb einer Entfernung von 50 m eine Messunsicherheit von 5 mm bis 50 mm. In der Modellierungsphase werden diese Ungenauigkeiten durch Mittelung oder indem geeignete primitive Formen an die Punktwolke angepasst werden minimiert.

Wie bereits ausgeführt wurde, umgehen Scanner, die eine kontinuierliche Welle aussenden, den Gebrauch von Hochgeschwindigkeits Taktmechanismen, indem sie das Laser-Signal modulieren. Die Messunsicherheit eines Laserscanners, der eine Amplitude moduliert, hängt nur von der modulierten Wellenlänge ab. Das Signal-Rausch-Verhältnis lässt sich so wiedergeben:

$$\delta_z \approx \frac{\lambda_m}{4\pi\sqrt{SNR}}$$

Die Gegenüberstellung zwischen Messungenauigkeit und den verschiedenen Typen von Laserscannern kann in einem Graph illustriert werden, wie in Abb. 23 gezeigt.

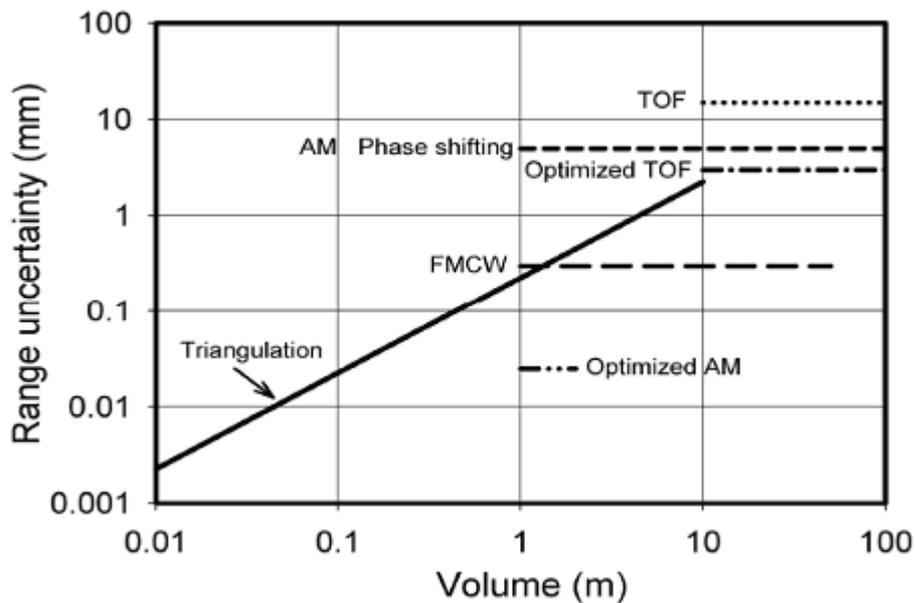


Abbildung 23: Die Messungenauigkeiten der verschiedenen Laserscanmethoden (aus [4])

#### 2.6.1.4. Winkelungenauigkeit

Die meisten Scanner benutzen rotierende Spiegel, um das Lasersignal in eine bestimmte Richtung zu lenken. Nimmt die Entfernung zur Position des Scanners zu, kann eine kleine Winkeldifferenz einen beträchtlichen Koordinatenfehler verursachen. Die Winkelgenauigkeit hängt von der präzisen Positionierung des Spiegels und der Genauigkeit des Winkelmessgeräts ab. Wie bei Boehler u. a. [21] beschrieben, können Fehler beim messen kurzer horizontaler und vertikaler Distanzen zwischen Objekten (z.B. Kugeln) festgestellt werden, wenn die, die vom Scanner an derselben Stelle lokalisiert wurden, mit jenen verglichen werden, die von Messungen mithilfe genauerer Messmethoden abgeleitet sind.

#### 2.6.1.5. Achsenfehler

Um Kalibrierungsmethoden zu entwickeln benötigt man ein geometrisches Modell des Scanners. Demzufolge definieren wir folgende Achsen:

Vertikale Achse: jene Achse, die dem Entfernungsmesser erlaubt den Laserstrahl horizontal auszurichten. Abhängig vom Scannertyp, Panorama oder Scanner-Kamera, ist das die Rotationsachse des Scannerkopfes bzw. die Achse senkrecht zu den Achsen der beiden gegenseitig senkrecht stehenden Kippspiegel.

Kollimations-Achse: die Achse, die durch das Zentrum des Spiegels und durch das Zentrum des Laserspots auf der Objektoberfläche läuft;

Horizontale Achse: die Rotationsachse des Spiegels;

Herstellungstoleranzen führen, da diese Achsen nicht perfekt justiert sind, zu Kollimations- wie zu Horizontalachsenfehler.

## 2.6.2. Objektbasierte Fehler

Da Scanner die Reflexion eines Laserstrahls von einer Oberfläche messen, haben wir die physikalischen Reflexionsgesetze und die optischen Eigenschaften des Materials zu berücksichtigen. Die Oberflächereflektion des monochromatischen Licht verursacht normalerweise Reflexionsstrahlen in viele Richtungen. Diese Art isotroper (diffuser) Reflexion (Abb. 24) wird im Lambertschen Kosinussatz dargestellt:

$$I_{\text{reflected}}(\lambda) = I_i(\lambda) \cdot k_d(\lambda) \cdot \cos(\theta)$$

Mit

$I_i(\lambda)$  = die Intensität des einfallenden Lichts als Funktion der Wellenlänge (Farbe);

$k_d(\lambda)$  = der diffuse Reflektionskoeffizient der ebenfalls eine Funktion der Wellenlänge ist;

$\theta$  = der Winkel zwischen dem einfallenden Licht und dem Normalvektor zur Oberfläche;

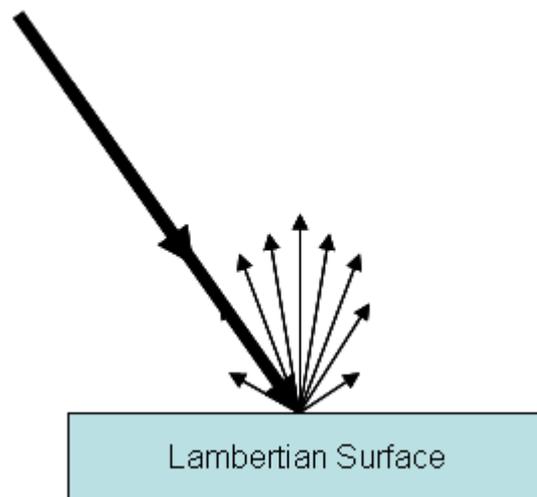


Abbildung 24: Die Lambertsche Oberflächenreflexion

Die Formel macht deutlich, dass der Laserstrahl durch die Absorption des Signals, durch die Reflexion des Materials und durch den Einfallswinkel beeinflusst wird. Das bedeutet, dass für sehr dunkle (schwarze) Oberflächen, die das meiste des sichtbaren Spektrums absorbieren, das reflektierte Signal sehr schwach sein wird; demzufolge wird die Punktgenauigkeit verrauscht sein. Oberflächen mit einem hohen Reflexionsgrad geben eine verlässlichere und präzisere Entfernungsmessung. Wenn allerdings die Oberflächenreflexion sehr hoch ist (Metalloberflächen, rückstrahlende Bänder ...), wird der auftreffende Strahl vollständig abgelenkt und auf eine andere Oberfläche treffen oder auch vollkommen gestreut. Diese Ablenkung läuft darauf hinaus, dass der Punkt, der gemessen wird, nicht der Punkt ist, den der Laser anpeilt, sondern ein anderer oder überhaupt kein realer Objektpunkt ist, sondern durch Streuung in der Luft zustande kam. Dieser Rauschtypus wird Speckle-Rauschen genannt.

Oberflächen mit unterschiedlichem Reflexionsgrad führen ebenfalls zu systematischen Messfehlern; manchmal zu größeren als die Standardabweichung einer Einzelmessung [21].

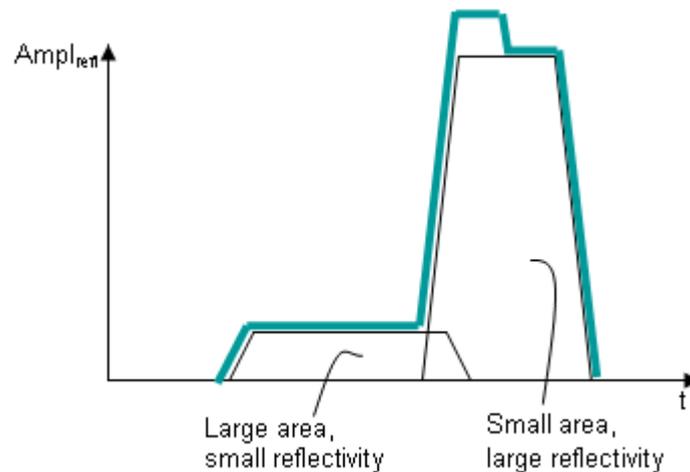


Abbildung 25: Das Signalverhalten beim scannen von Oberflächen mit unterschiedlichem Reflexionsvermögen (aus [4])

Die Farbeigenschaften einer Oberfläche beeinflussen die Messgenauigkeit genau so wie deren Reflexionseigenschaften. Clark u.a. [22] haben herausgefunden, dass signifikante Diskrepanzen im Messbereich existieren, die weitgehend der Oberflächenfarbe in Bezug auf die Wellenlänge des benutzten Lasers entsprechen.

Weiters haben eine Anzahl von Materialien einen halb-transparenten Belag, der dem Laserstrahl ermöglicht sich im Material selbst zu brechen und zu reflektieren (z. B. Holz, Marmor, Styropor). Diese Effekte führen zu einem konstanten Fehler in der Entfernungsmessung, die in der Berechnung zu berücksichtigen sind [23].

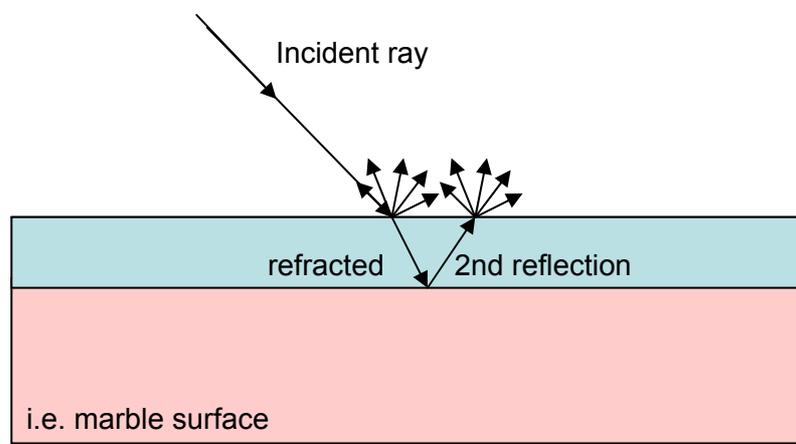


Abbildung 26: Brechungseffekte in inhomogenen halb-transparenten Materialien (Styropor, Holz, Marmor).

### 2.6.3. Umweltbedingungen

#### 2.6.3.1. Temperatur

Es sollte beachtet werden, dass die Temperatur im Scanner, wegen der inneren Wärmeproduktion oder der Wärme die sich aus externen Strahlungsquellen ergeben kann (z. B. der Sonne), weit höher als in der umgebenden Atmosphäre sein kann. Diese externe Strahlungsquelle kann auch dazu führen, dass nur eine Seite des Stativs oder des Scanners

erwärmt wird, sich ausdehnt und so langsam die Orientierung des Scanners verändert und dadurch die Scandaten verfälscht.

Nicht nur die Temperatur der Ausrüstung, sondern auch die Temperatur der zu scannenden Oberfläche ist von Bedeutung. Scannt man eine heisses Objekt, z. B. eine Industrieanlage, verringert die durch die heisse Oberfläche verursachte Hintergrundstrahlung das Signal-Rausch-Verhältnis und dementsprechend auch die Genauigkeit der Entfernungsmessung.

### **2.6.3.2. Die Atmosphäre**

Laserscanner funktionieren nur in einem bestimmten Temperaturbereich ordnungsgemäß. Sogar innerhalb dieses Bereichs können Messabweichungen beobachtet werden, besonders bei der Entfernungsmessung.

Wie bei allen Laser basierten Entfernungsmessungen rühren naturbedingte Fehler primär von Temperatur-, Druck- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen her, die den Brechungsindex beeinflussen und so die Wellenlänge der elektromagnetischen Energie verändern. Das bedeutet, dass die Laserlichtgeschwindigkeit stark von der Luftdichte abhängt.

Die meiste Laserscanning Erfassungssoftware unterstützt zur Korrektur dieser Refraktion das Setzen von Refraktions-Parametern. Generell sind die Scanner auf den ISO Standardatmosphären Parameter (15°, 1013,25 hPa) voreingestellt. Arbeitet man unter anderen atmosphärischen Bedingungen als der Standardatmosphäre, müssen diese Parameter angepasst werden. Eine Temperaturdifferenz von 10°C bzw. ein Luftdruck von 35 hPa führt zu einem Scan-Distanzfehler von 1mm/100m.

Auf kurze und mittlere Messdistanzen kann dieser Effekt das Resultat nicht ernstlich beeinflussen. Für große Entfernungsmessungen oder hochgenaue Scans ist es unumgänglich, die korrekten Atmosphären-Parameter einzusetzen.

Arbeitet man z. B. in einer Gebirgsregion, kann die höhenbedingte Temperaturabnahme auf 0.65°C/100m geschätzt werden und die Abnahme des Luftdrucks auf 10hPa/100m. Für eine Scan-Station, die in einer Höhe von 2000 m aufgestellt ist, würde der Messfehler demnach über 8mm pro 100m Messstrecke betragen.

### **2.6.3.3. Interferenzstrahlung**

Seitdem Laserscanner in einem sehr schmalen Frequenzband arbeiten, kann der Genauigkeitsgrad der Entfernungsmessung durch externe Strahlung beeinflusst sein, z. B. von starken externen Leuchtquellen. Spezielle optische Interferenzfilter können in Empfangsgeräten verwendet werden, die nur den korrekten Frequenzen erlauben den Empfänger zu erreichen.

### **2.6.3.4. Verfälschung durch Bewegung**

Die meisten Laserscanner scannen mit einer Rate von 2000 bis 500.000 Samples pro Sekunde. Obzwar das sehr schnell ist, kann ein Scan in einer hohen Auflösung mit einem Time-of-Flight Scanner 20-30 Minuten dauern und über 10 Minuten mit einem Impulsscanner. Während dieser Zeit ist der Scanner für Vibrationen in seiner Umgebung, die Verschiebungen verursachen, anfällig. Wir nennen das die Verfälschung durch Bewegung.

Weil jeder Punkt zu einer unterschiedlichen Zeit abgetastet wird werden die gesammelten Daten durch jede Bewegung im Gegenstand bzw. des Scanners verfälscht. Deshalb müssen Scanner

auf einer stabilen Plattform montiert sein, um die Vibrationen zu minimieren. Der Gegenstand sollte sich ebenfalls nicht bewegen.

Zu beachten ist, dass sich der Scanner aufgrund eines Temperaturwechsels verformen/verdrehen kann. Zum Beispiel wenn die Sonne auf einer Seite des Scanners scheint, können sich auf dieser Seite die Stativbeine ausdehnen und die Scan-Daten werden sich langsam verfälschen (siehe Paragraph 2.6.3.1). Die neuesten Scanner, auch Scan-Stationen genannt, haben einen doppelten Achsenkompensator integriert, der die meisten Bewegungen des Scanners während des Scan-Prozesses kompensiert.

#### **2.6.4. Methodologische Fehler**

Methodologische Fehler sind Fehler, die sich aus der gewählten Messmethode oder den Erfahrungen des Anwenders mit seiner Technologie ergeben. Zum Beispiel wenn der Anwender die Gitterdichte (Auflösung) höher als die Punkt-Genauigkeit des Laserscanners festsetzt, wird der Scan überabgetastet. Bei Überabtastung (engl. Oversampling) eines Scans, wird ein Rauschen erzeugt und die benötigte Bearbeitungsdauer steigt dramatisch an. Eine andere Fehlerquelle kann in der falschen Wahl des Scanners liegen. Verwendet man einen Scanner, dessen maximale Reichweite nahe bei der maximalen Distanz des Objekts, das gescannt wird, liegt, dann werden diese Scans wenig präzise Messungen beinhalten und möglicherweise verrauscht sein.

Mögliche Fehler, die während der Registrierung oder der Georeferenzierungsphase erzeugt werden, fallen ebenfalls hier hinein. Abhängig von der Technik, die verwendet wird, um mehrere Punktwolken zu registrieren, sind Fehler vorprogrammiert. Diese Fehler treten bei der indirekten Registrierung/Georeferenzierung genauso auf, wie bei der direkten Registrierung/Georeferenzierung (siehe Paragraph 3.5).

#### **2.7. Der Stand der Technik der Laserscanner Ausrüstung**

Der gegenwärtige Stand der Technik sind voll integrierte Laserscanner für schnelles Set-Up. Scanner, Bedienteil, interner Speicher und die Batterie sind zu einem Gerät zusammengefasst. Spezielle zweiachsen Kompensatoren sind ebenso integriert wie die automatische Scannernivellierung. Einige Scanner besitzen zusätzliche Vorrichtungen, um GPS-Empfänger und/oder INS-Kompensatoren anzubringen, um so den Scanner ohne zusätzliche Hilfsmittel im Raum zu positionieren und auszurichten. Um der gemessenen Punktwolke eine hohe Farbauflösungsinformation hinzuzufügen, besitzen einige Scanner qualitativ hochwertige Kameras oder unterstützen Zusatzgeräte.

Die Technologie des Laserscannings wird laufend weiterentwickelt:

Bei speziellen Geräte mit integrierten GPS-Empfängern müssen die Zielmarken nicht mehr mithilfe einer Totalstation gemessen werden.

Hardwarebasierte Filterung homogener Punktwolken

Die Kombination von Time-of-Flight und phasenbasierter Messmethode in einem Scanner

Tafel 1 liefert eine Übersicht über einige im Handel lieferbare Laserscanner-Systeme anno 2008.

Scanner/Criterion	Trimble GX	Leica Scanstation 2	Faro LS 880 HE	Z+F Images 5006
Scan Method	Time-of-Flight		Phase difference	

Field of view [°]	360 x 60	360 x 270	360 x 320	360 x 310
Scan distance [m]	200	300	< 76	< 79
Scanning speed	≤5000 pts/s	≤50000 pts/s	120 kHz	≤500000 pts/s
Vertic. Ang. Resolution [°]	0,0017	0,0034	0,009	0,018
Horizont. Ang. Resolution [°]	0,0017	0,0034	0,00076	0,018
3D scan precision	12mm/100m	6mm/50m	n.a.	n.a.
Camera	integrated	integrated	add-on option	add-on option
Inclination sensor	compensator	compensator	yes	yes

Tafel 1: Zusammenfassung der technischen Daten kommerzieller Laserscannersysteme (aus [24])

Eine Übersicht verschiedener Hersteller von Laserscannern und deren Spezifikationen können auf der Website von ISPRS gefunden werden:

[http://www.cage.curtin.edu.au/~gordonsj/isprs\\_wgv3/survey.html](http://www.cage.curtin.edu.au/~gordonsj/isprs_wgv3/survey.html)

### 3. Kapitel III: Laserscanning in der Praxis

Die Verwendung eines Laserscanners, um ein Gebäude zu registrieren, bedeutet nicht, dass man nur auf einen Knopf zu drücken und auf das Ergebnis zu warten braucht. Sie verlangt ein profundes Wissen, sowohl über das Equipment, als auch über den Scanprozess. Während einige Arbeitsschritte des Scanprozesses bereits vollständig automatisiert durchgeführt werden, sind andere immer noch recht arbeitsintensiv. In diesem Kapitel wird die Praxis des terrestrischen Laserscannings besprochen.

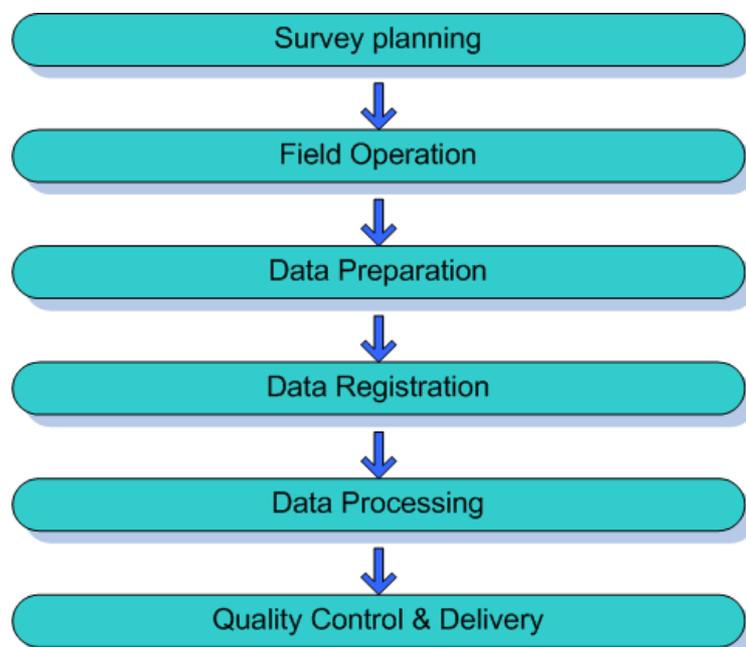


Abbildung 27: Verlauf des terrestrischen Laserscannings

### 3.1. Vermessungsplanung

Zur Zeit gibt es kein standardisiertes Procedere für die Vermessungsplanung eines terrestrischen Laserscannings. Allerdings sollte, gemäß der Laserscanning-Anwenderergemeinschaft, die Planung mindestens folgende Themen umfassen (siehe Abbildung 28):

- Die Bestimmung der Ziele und Zielvorgaben
- die Analyse des zu vermessenden Gebietes
- die Bestimmung der Messmethoden und der Ausrüstung
- das Datenmanagement

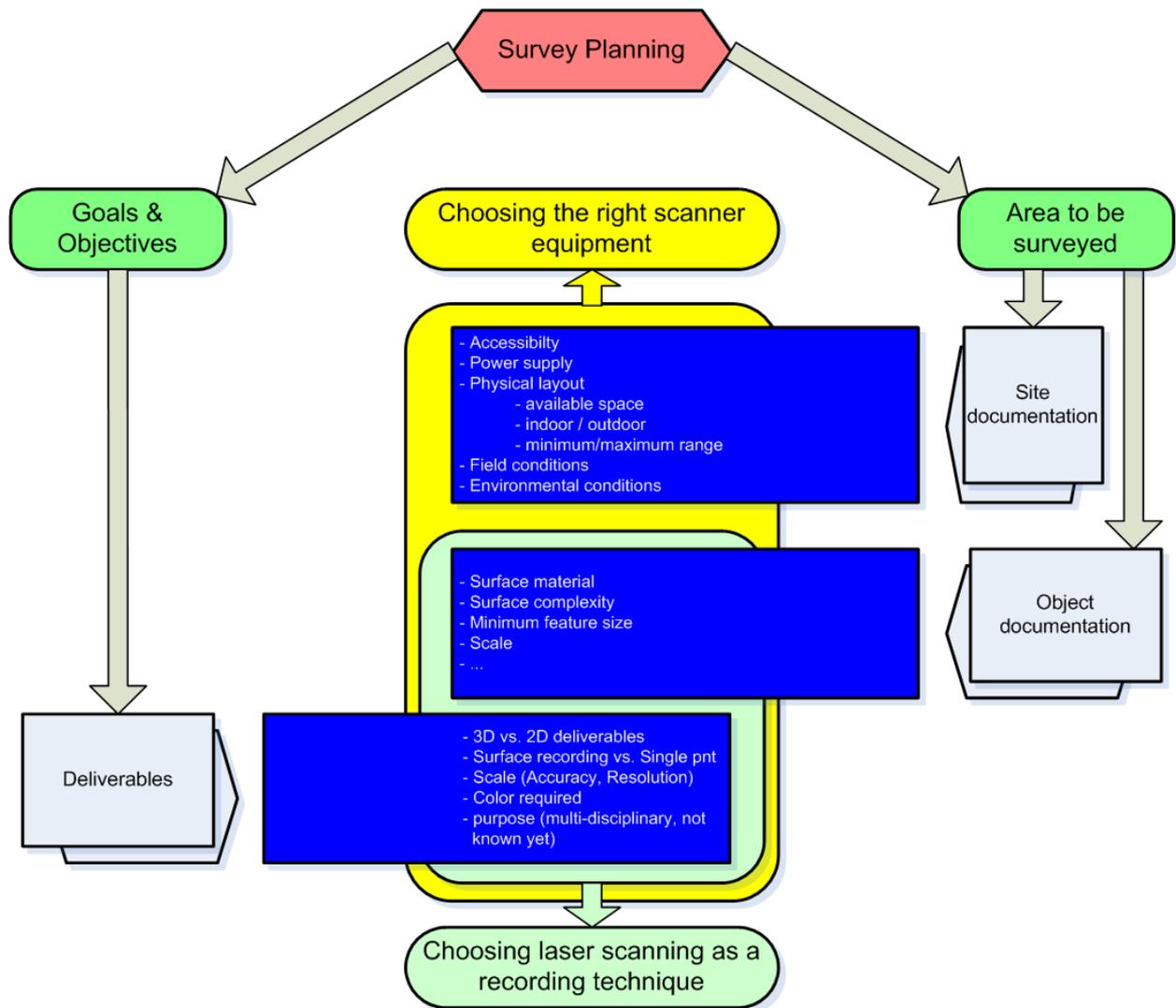


Abbildung 28: Diagramm einer Vermessungsplanung

#### 3.1.1. Bestimmung der Ziele und Zielvorgaben

Die Ziele und die Zielvorgaben des Auftraggebers zu verstehen gehört zu den Schlüsselfragen, wenn es darum geht, ein Objekt aufzunehmen. Um die Bedürfnisse des Kunden vollständig zu verstehen, müssen einige Fragen beantwortet werden.

Warum möchte der Auftraggeber dieses Objekt aufgenommen haben und was will er/sie mit den gesammelten Daten tun?

Der Grund, ein Objekt oder ein Gebäude aufzunehmen, kann einen Einblick auf die Voraussetzungen bezüglich der Leistungen und ihrer Treffgenauigkeit gewähren. Häufig meinen Auftraggeber, dass das Laserscanning das ideale Werkzeug für ihr Problem wäre, weil sie gehört haben, dass ein konkurrierendes Unternehmen einen Laserscanner verwendet hat. Andererseits könnte der Auftraggeber Angst davor haben, Laserscanning zu verwenden, um ihr Gebäude zu registrieren, weil sie skeptisch sind und sich lieber auf die Anwendung herkömmlicher Techniken verlassen. Den Kundenwünschen zuzuhören ist die Voraussetzung dafür, dass eine Beratung für die entsprechende Messtechnik angeboten werden kann;

Welche Leistungen werden angeboten?

In enger Beziehung zur Motivation für die Aufnahme, müssen die angebotenen Leistungen bestimmt werden. Diese Leistungen können sich von zweidimensionalen Aufrisszeichnungen zu dreidimensionalen Modellen oder sogar dreidimensionalen Animationen erstrecken. In einigen Fällen mag der Auftraggeber zwecks Archivierung nur die rohe Punktwolke wollen. Besonders wichtig ist der Detailgrad (minimale charakteristische Größe) der Ergebnisse, denn das hilft bei der Bestimmung der erforderlichen Auflösung (z. B. die Punktdichte) [25].

### **3.1.2. Analyse des Gebiets, das vermessen werden soll.**

Erst die Gesamtinformation über ein Objekt, das aufgenommen werden soll, gewährt einen Einblick in die Komplexität der Aufgabe und die dafür erforderliche Zeitaufwendung. Wie bereits im vorherigen Paragraphen erwähnt wurde, beruht die erforderliche Auflösung und die Genauigkeit der Aufnahme entweder auf dem Maßstab des Gebiets oder auf der minimalen charakteristischen Größe, die im Endergebnis noch erkennbar sein sollte. Vermessungsnotizen, Berichte, Karten, Fotografien oder Videofilme vom Ort können bei der Bestimmung möglicher Risiken helfen, wenn Sie das Objekt aufnehmen. Ebenso können frühere Vermessungen, die durch andere Mittel erstellt worden sein können (von Hand gemessen, GPS oder Tachymeterdaten), helfen, das Risiko einzuschätzen.

Nicht nur das Gebäude selbst, sondern auch seine Umgebung können nützliche Informationen liefern. Der Ort kann mit Hindernissen versehen sein, die die mögliche Aufstellungspositionen des Laserscanners beschränken, oder es könnte auch Zeitbeschränkungen geben, in die Orte hineinzugehen (z. B. die Aufnahme von U-Bahntunnels). Indirekt bestimmen die möglichen Einstellungspositionen die minimale und die maximale Entfernung, die der Scanner zu registrieren im Stande sein sollte.

Mithilfe all dieser Daten kann eine Entscheidung für die entsprechende Aufnahmetechnik getroffen werden und falls das Laserscanning gewählt wird, kann der Scannertyp bestimmt werden. Das Laserscanning ist zwar eine hoch entwickelte Technik, muss aber nicht immer die effizienteste Lösung sein. Manchmal ist es einfacher und zielführender, ein anderes Registrierungsverfahren zu verwenden. Mögliche Gründe, die für das Laserscanning sprechen, sind:

wenn es sich um eine sehr komplexe Oberflächenstruktur (z.B. organische Formen) handelt

wenn 3D Ergebnisse gefordert sind

wenn Oberflächenmessungen anstelle einzelner Punktmessungen gefordert sind

sollen die Daten von einem multidisziplinär arbeitenden Team für verschiedene Zwecke verwendet werden können

wenn die Daten ohne vorherige Kenntnis ihres Gebrauchs in der Zukunft gesammelt werden sollen

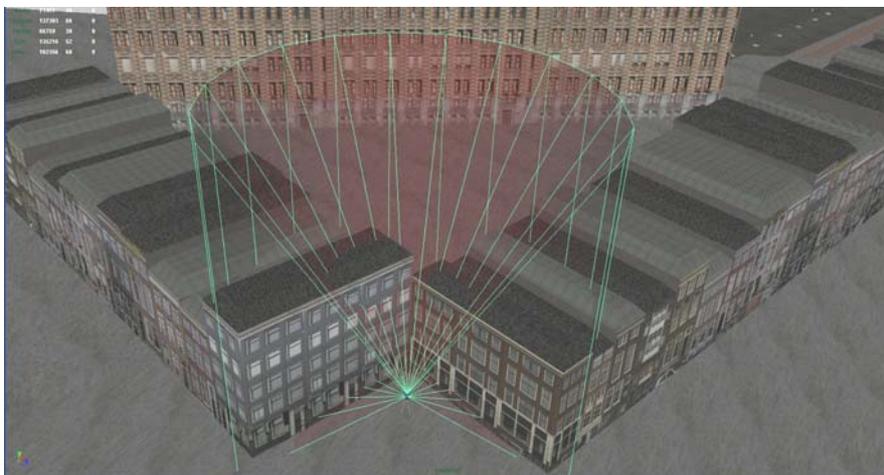
Zutrittsbeschränkungen zum Messobjekt

etc.

### **3.1.3. Bestimmung der optimalen Scanposition**

Sobald die Dokumentation vom Ort vollständig und das Laserscanning als die effektivste Aufnahmetechnik gewählt worden ist, sind die Scan- und Messpunktpositionen zu planen.

Die optimalen Positionen für die Scan-Station sollten so gewählt werden, dass eine Maximalbedeckung und Genauigkeit bei minimalen Aufstellungspositionen garantiert ist. Wie bereits im § 2.6 erwähnt wurde, hängt die Messgenauigkeit vom Durchmesser des Footprints einer gegebenen Scanneraufstellung ab. Deshalb sind der Einfallswinkel (siehe Abbildung 30) und die Entfernung zum Gegenstand für die Positionsbestimmung des Scanners von großer Bedeutung. Eine umfassende Darstellung, wie die optimale Konfiguration des Scanners zu bestimmen ist, um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen, wird in [26] beschrieben. Die folgende Liste gibt eine Reihe von Regeln wieder, an die bei der Positionierung des Scanners gedacht werden sollte.



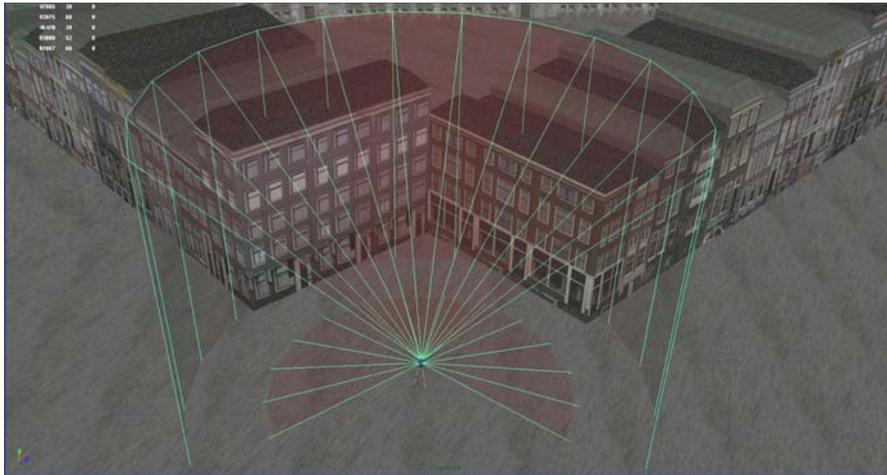


Abbildung 29: (oben) schlechte Scannerposition, beinhaltet einen sehr ungünstigen Neigungswinkel, (unten) eine günstige Scannerposition

Kontrolliere die Positionen, die einen großen Abdeckungsbereich zur Verfügung stellen, die keine Hindernisse in der Blickrichtung haben, und die die geringsten Schatten erzeugen.

Überprüfe, ob die minimalen/maximalen Entfernungsbeschränkungen des Scanners erfüllt sind, um eine bestimmte Genauigkeit zu erreichen, denn je größer die Distanz zum Objekt, desto geringer ist die Genauigkeit und die Auflösung.

Vermeide einen kleinen Schnittwinkel, denn unter einem spitzen Winkel wird der Laserstrahl nicht so gut zum Scanner reflektiert, was zu einer geringeren Genauigkeit führt.

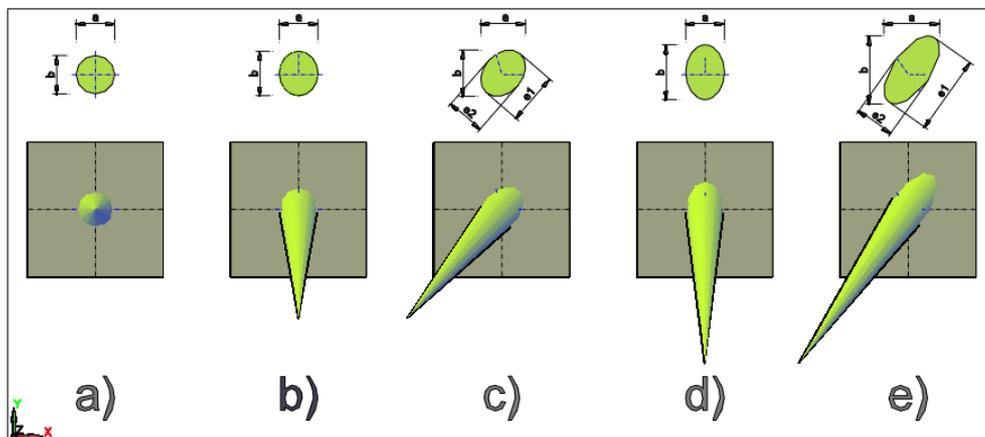


Abbildung 30: Laser Footprint unter verschiedenen Schnittwinkeln

Versuche die Zahl der Scanpositionen zu verringern.

Andere wichtige Tatsachen, die in Betracht gezogen werden sollten, sind:

Gesundheitsgefährdung und Sicherheit des Messtrupps

Umgebung (Vibrationen, Wind ... )

Abstand des Scanners zum Boden

### 3.1.4. Bestimmung der optimalen Positionierung der Zielmarken

Neben den optimalen Scannerpositionen sind auch die Typen der Zielmarken und ihre Positionen und/oder geometrische Form wichtig. Zielmarken werden hauptsächlich dazu verwendet, um Scans zu verknüpfen, die von verschiedenen Scanpositionen aufgezeichnet wurden. Zurzeit gibt es ein großes Angebot an verfügbaren Typen von Zielmarken: retro-reflektierende Zielmarken, Zielkugeln, Papiermarken, Prismen usw. In naher Zukunft werden wir auch über Zielmarken mit integrierten GPS-Empfängern verfügen.

Eine wichtige Bemerkung beim Gebrauch von Zielmarken ist, dass diese nicht nur in der Ebene sondern auch im Raum verteilt angebracht werden müssen. Darauf wird häufig vergessen, und manchmal werden alle Zielmarken einfach am Boden plaziert.

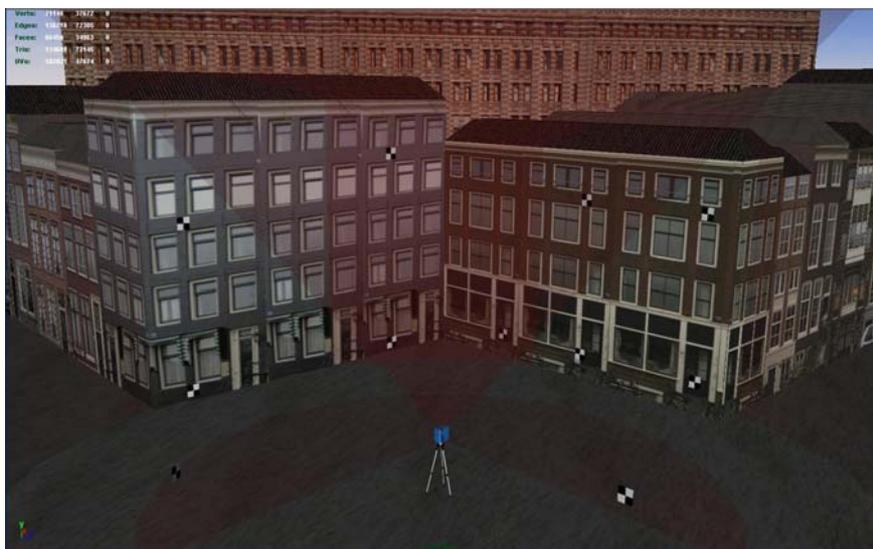
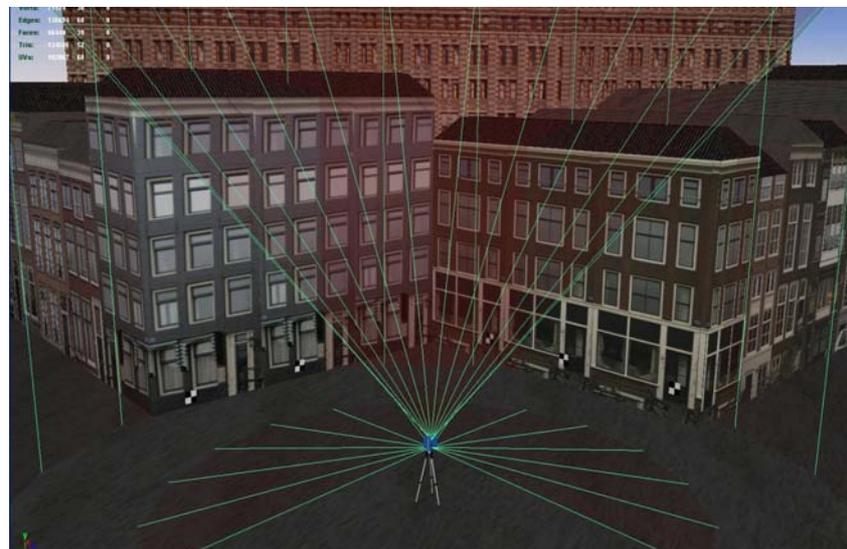


Abbildung 31: (oben) schlechte Verteilung der Zielmarken, (unten) günstige Verteilung der Zielmarken

Einige Zielmarkenanordnungen implizieren keine eindeutige Lösung für den Registrierungsprozess. Liegen zum Beispiel alle Zielmarken in einer Linie, bleibt noch ein Freiheitsgrad, nämlich die Drehung um diese Linie offen; ist also unbestimmt..

Häufig werden von den Herstellerfirmen spezielle retro-reflektierende Zielmarken und Zielkugeln mitgeliefert. Diese Zielmarken sind so konstruiert, dass sie den größten Teil des Laserstrahls zum Scanner reflektieren. Der Scanner kann deshalb diese Zielmarken automatisch detektieren und nach dessen Feinscan eine primitive Form an die gemessene Punktwolke anpassen und daraus das exakte Zentrum bestimmen.

Manchmal werden Papiermarken verwendet, weil diese viel preiswerter als die retro-reflektierenden oder kugelförmigen Zielmarken sind. Wenn nötig wird ein retro-reflektierendes Prisma am Scannerkopf befestigt. Kennt man den Abstand zwischen dem Ablenkungsspiegel des Scanners und dem Prisma, kann die Scannerposition durch Messung des Prismas mit einem Tachymeter (Totalstation) bestimmt werden.

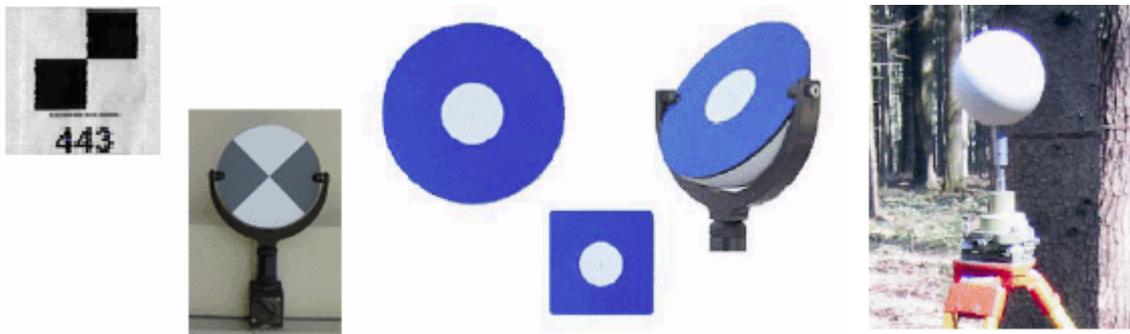


Abbildung 32: Typen von Zielmarken

Mills und Barber [25] führen aus, dass, abhängig von der verwendeten Aufnahmetechnik, es in jedem Scan mindestens 4 zweckmäßig verteilte Festpunkte/Zielmarken geben sollte. Eine ausführlichere Erklärung der Aufnahmemethoden und ihrer jeweiligen optimalen Anordnung der Zielmarken wird in § 3.5 gegeben.

### **3.1.5. Datenmanagement**

Es ist wichtig, bereits vor dem Scan an die Datenspeicherung zu denken. Verwendet man zum Beispiel den HDS4500 von Leica, beträgt ein Scan etwa 140 MB. Im Durchschnitt können am Tag 20-30 Scans gemacht werden, was eine Datengröße von ungefähr 7 GB erzeugt. Das verlangt eine sorgfältige Planung.

## **3.2. Aussendiensttätigkeit**

### **3.2.1. Arbeitsvorbereitung**

Zur Vorbereitungsphase gehört auch die Entscheidung, welche Registrierungstechnik zur Anwendung kommen soll. Diese Techniken können in drei Kategorien unterteilt werden: die Registrierung mithilfe gescannter Zielmarken (räumlicher Rückwertsschnitt), die Registrierung

mithilfe der Aufstellung des Laserscanners über bekannte Festpunkte und die Registrierung mithilfe von Cloud-to-Cloud Constraints (für mehr Details siehe Kap. 3.5).

### 3.2.2. Aufstellung des Scanners

Im Allgemeinen verläuft die Aufstellung eines Laserscanners ähnlich dem Aufstellen einer Totalstation (Tachymeter). Die folgenden Schritte sind auszuführen (Abbildung 33):

**Stativaufstellung:** Öffnen sie das Stativ und fahren sie die Beine aus. Stellen sie sicher, dass das Stativ auf einem stabilen Untergrund steht. Normalerweise wird der Scanner in Augenhöhe angebracht. Wenn aber die Bodenfläche gescannt werden muss, ist wegen des besseren Neigungswinkels eine höhere Position von Vorteil.

Befestigen sie den Scanner am Stativ.

Abhängig von der Registrierungstechnik, kann der Scanner über einem bekannten Festpunkt (signalisierten Bodenpunkt) aufgestellt werden.

**Scannerhorizontierung:** Bei der Nutzung von Scannern mit integrierten Kompensatoren oder der Aufstellung über einem definierten Festpunkt muss das Instrument mithilfe der Dosenlibelle nivelliert werden. Die Gasblase sollte innerhalb des inneren Kreises sein. Dabei sollte man so genau wie möglich vorgehen. Wird der Scanner über einem Festpunkt eingestellt, sollte diese Tätigkeit die Zentrierung über dem Punkt nicht ändern.

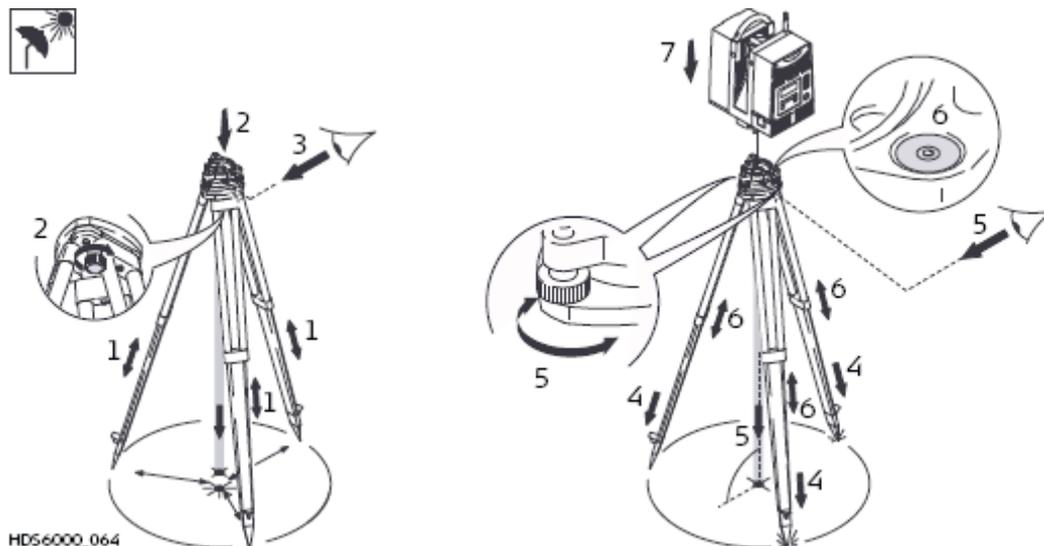


Abbildung 33: Aufstellung des Laserscanners (aus [27])

### 3.2.3. Das Anschließen des Scanners

Bevor der Scanprozess gestartet wird, muss der Scanner selbst noch an einen Laptop angeschlossen werden, sodass die Punkte gemessen und gespeichert werden können, die vom Scanner kommen und der den Scanner steuert.

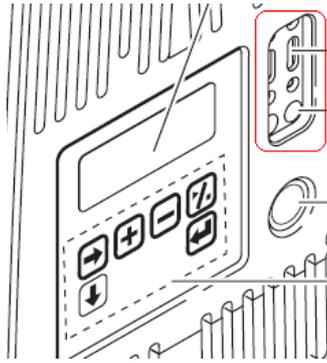


Abbildung 34: Vollintegrierte Scan-Kontrolle beim *Leica* HDS6000 (aus [27])

Die Schritte, um einen Scanner an einen Computer anzuschließen, sind:

Stellen sie zwischen dem Scanner und dem Laptop mit Hilfe eines passenden Kabels eine Verbindung her (ein Standard-Netzwerkkabel für ältere Computer oder ein FireWire Kabel für neuere Scanner).

Verbinden sie die Batterie mit dem Scanner.

Entfernen sie den Objektivdeckel vom Scanner und entriegeln sie den Scanner (die meisten Panoramascanner haben eine Feststelltaste, um Drehungen während des Transports zu verhindern).

Schalten sie den Scanner ein und warten sie bis er auf Betriebstemperatur ist.

Starten sie die Scannersoftware.

Stellen sie die Verbindung zwischen Computer und Scanner her (mit Hilfe der IP Adresse, USB Kabel, Wireless Lan ...).

Starten sie die Kontrollsoftware und initialisieren sie eine Verbindung.

Die Letzte Generation von Scannern (z. B. der HDS6000 von Leica) ist vollintegriert, d.h. sie kombinieren Controller, Datenspeicher und Batterie in einem Gerät.

### **3.2.4. Scanner-Einstellungen**

Sobald die Kontrollsoftware die Verbindung mit dem Scanner hergestellt hat, müssen die Parameter festgelegt werden, die beim Scanprozess verwendet werden.

#### **3.2.4.1. Messbereichsdefinition**

Obwohl die meisten modernen Scanner in der Lage sind volle 360° (Abbildung 35) zu scannen, ist das nicht immer erforderlich. Aus diesem Grund müssen wir das zu scannende Gebiet genau festlegen. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten.

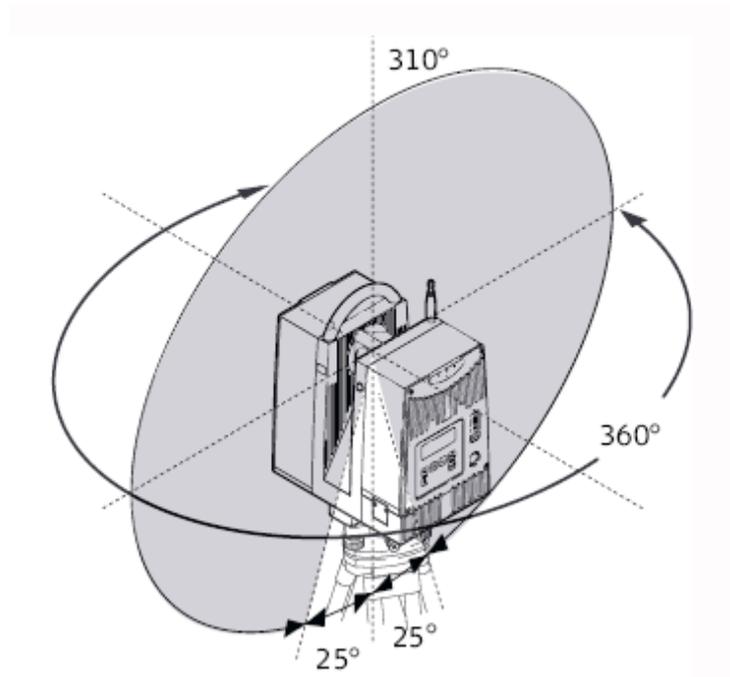


Abbildung 35: Das Sichtfeld des *Leica* HDS6000 (aus [27])

Einige Scanner verfügen nur über ein minimales Bedienfeld, um das Zielgebiet genau bestimmen zu können.

Heutzutage haben Scanner fest eingebaute Kameras oder auch Videokameras, um dem Anwender anzuzeigen, was der Scanner sieht. Über die Kontrollsoftware kann der Anwender das Zielgebiet auswählen, indem er einen Auswahlrahmen aufzieht, ähnlich wie bei der Auswahl eines Bildteils in einer Bildbearbeitungssoftware (Abbildung 36).

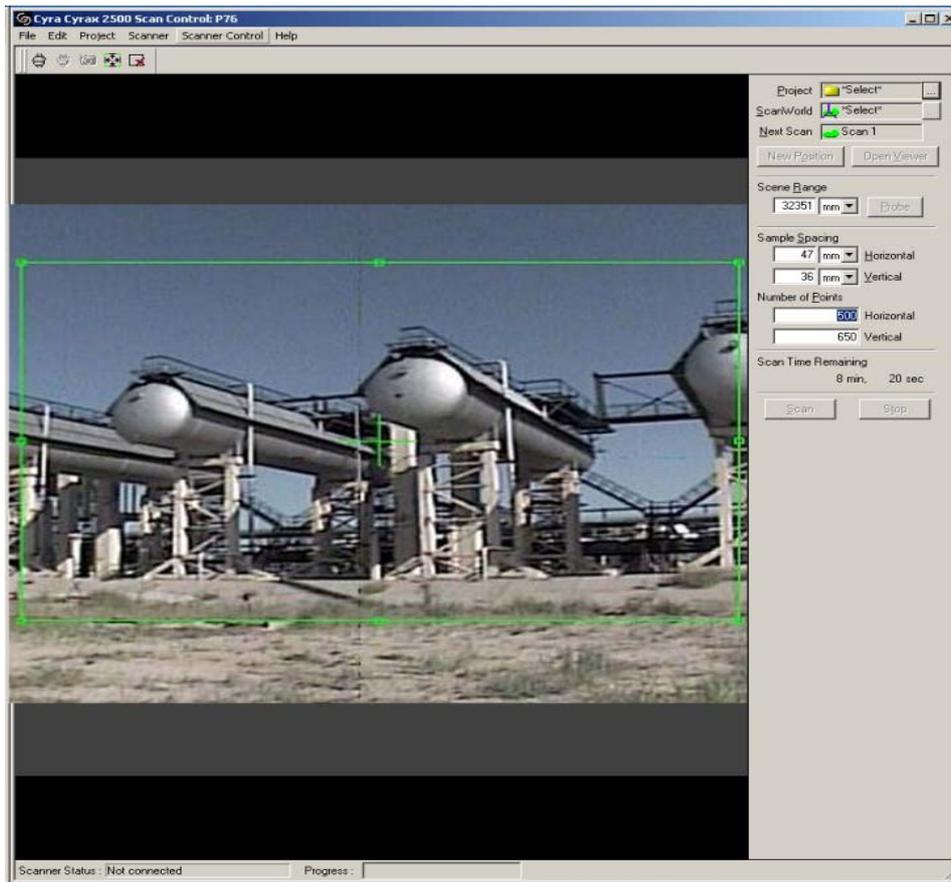


Abbildung 36: Auswahl des Zielgebiets

Die meisten phasenbasierten Scanner besitzen aufgrund ihrer technischen Bauweise keine Kamera. Jedoch können diese Scanner so viele Punkte pro Sekunde aufnehmen, dass in sehr kurzer Zeit ein Scan in einer niedrigen Auflösung erstellt werden kann, der dann dazu benutzt werden kann, einen Zielbereich auszuwählen.

### 3.2.4.2. Die Auflösung

Die Schlüsselfrage bei der Durchführung eines Scanprojekts ist die Wahl der richtigen Auflösung. Die Auflösung wird als der Abstand zwischen zwei benachbarten Punkten definiert, und bestimmt so die Punktdichte in der Punktwolke. Häufig verwechseln die Leute die Genauigkeit mit der Auflösung. Obwohl zwischen beiden ein gewisser Zusammenhang besteht, bezeichnen sie dennoch einen jeweils anderen Aspekt des Scanprozesses.

Die Auflösung wird in der Hauptsache vom kleinsten Detail der Oberflächenstruktur bestimmt, das im Endergebnis noch erkennbar sein muss. Deshalb steht sie auch in direktem Zusammenhang mit dem Maßstab des Endergebnisses.

Es sollte angemerkt werden, dass je höher die gewählte Auflösung ist, desto mehr Punkte müssen gescannt werden und umso länger dauert der Scanvorgang. Wobei die Zeit noch nicht eingerechnet ist, die die Speicherung der höheren Datenmenge benötigt. Der Anwender sollte auch im Auge behalten, dass der Scan, der mit einer höheren Auflösung als der Punkt-Genauigkeit des Scanners durchgeführt wird, in der Entfernungsmessung Überlagerungen verursachen kann, was wiederum zu einem vermehrten Rauschen im Datensatz führt.

Die meisten Laserscanner arbeiten mit konstanten Winkelschnittweiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen. Die Scannerauflösung wird dabei über eine vorgegebene Entfernung zum Scanner bestimmt. Diese Entfernung kann manuell über die Software eingegeben werden, oder eine Testmessung liefert die Entfernung zum Scanner. Messungen, jenseits dieser (festgelegten) Distanz werden eine geringere Auflösung haben, als jene innerhalb dieser Distanz. Im Allgemeinen wird empfohlen, den entferntesten Punkt als Auswahlpunkt zu wählen.

Einige Kontrollsoftwareprodukte unterstützen Schnelleinstellungen (quick settings) für die Auflösung, z. B. niedrig, mittel oder hoch. Diese Quick-Settings legen für eine Entfernung einen bestimmten Auflösungswert fest. Im Handbuch werden Tabellen zur Verfügung gestellt, die für verschiedene Entfernungen die effektivsten Auflösungen angeben.

Das English Heritage, ein Staatsorgan des Vereinigten Königreichs mit beträchtlichen Fachkenntnissen im Umgang mit Kulturdenkmälern, hat ein Verzeichnis erstellt, das Anwendern hilft, die passende Auflösung zu bestimmen [28] [29].

<i>feature size</i>	<i>example feature</i>	<i>point density required to give 66% probability that the feature will be visible</i>	<i>point density required to give a 95% probability that the feature will be visible</i>
10000mm	large earth work	3500mm	500mm
1000mm	small earth work/ditch	350mm	50mm
100mm	large stone masonry	35mm	5mm
10mm	flint galleting/large tool marks	3.5mm	0.5mm
1mm	Weathered masonry	0.35mm	0.05mm

Abbildung 37: Geeignete Punktdichten (Abtastauflösungen) für verschiedene Größen von Kulturdenkmälern [28].

Diese Tabelle wird mithilfe folgender Formel [29] erzeugt:

$$Q = 1 - \left( \frac{m}{\lambda} \right)$$

Wo Q die Qualität der Daten, m die Punktdichte (Auflösung) auf dem Objekt und  $\lambda$  die kleinste Objektdetailgröße (feature size) ist. Der Wert Q zeigt deshalb den Level an, mit dem das Objekt gescannt worden ist.

### 3.2.4.3. Direkte Filterung

Während des Scannens können die Daten mit Hilfe von direkten Filtern, die manchmal auch Hardware-Filter genannt werden, gefiltert werden. Zur Auswahl stehen: Bereichsfilter, Reflexionsfilter oder eine Kombination aus beiden. Direktes Filtern wird verwendet, um sicherzustellen, dass die Daten innerhalb der Genauigkeitsgrenzen des Scanners liegen, oder um die Punkte mit niedrigen Reflexionswerten zu entfernen, weil diese wahrscheinlich ungenau sind.

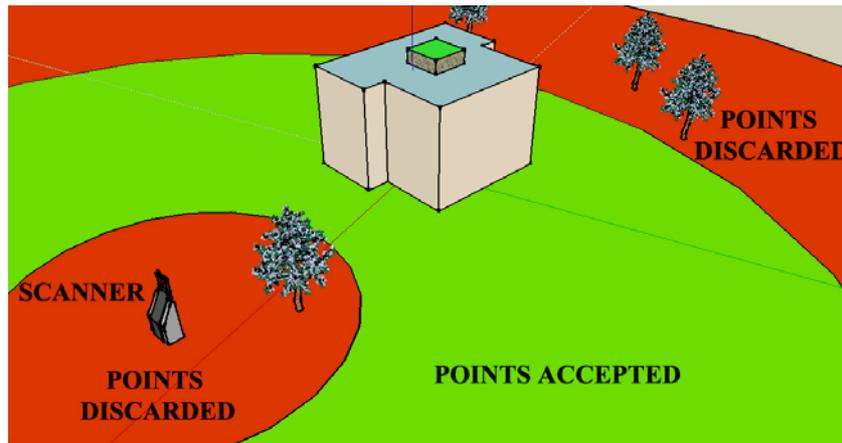


Abbildung 38: Bereichsbasierte primäre Punktfiltrierung

### 3.3. Datenerfassung

#### 3.3.1. Scannen des Objekts / des Gebäudes

Sobald das Sichtfeld und die passende Auflösung bestimmt sind, kann mit dem eigentlichen scannen begonnen werden. Der Scanprozess verläuft fast vollständig automatisiert ab. Nach dem Drücken der Starttaste in der Kontrollsoftware oder direkt auf dem Bedienfeld des Scanners, bewegt sich der Scanner zum Startpunkt und beginnt mit dem messen der Punkte. Die Punkte werden entweder im Laptop gespeichert oder auf den internen Speicher des Scanners geschrieben. Falls ein Laptop an den Scanner angeschlossen ist, werden die gemessenen Punkte unmittelbar auf dem Bildschirm dreidimensional visualisiert und geben einen Überblick über das Gebiet, das bereits gescannt worden ist. Nach dem Scannen gehört es zur guten Praxis, den Scan auf unvorhergesehene Abschattungen zu überprüfen.

Ziel und Parametereinstellungen lassen sich von den meisten Kontrollsoftwareprodukten mithilfe eines Skripts steuern; auf diese Weise können nachträglich mehrere Regionen mit verschiedenen Auflösungen gescannt werden. Es kann ein Script erstellt werden, das ermöglicht, bestimmte Gebiete in einer höheren Auflösung zu scannen, während die restliche Aufnahme mit der für den allgemeinen Scan definierten Auflösung erfolgt, sodass bestimmte Objektmerkmale als Registrierungselemente im Registrierungsprozess verwendet werden können.

Abhängig von der gewählten Auflösung und dem Zielgebiet kann der Scanprozess zwischen 5 und 120 Minuten oder länger dauern. Während dieser Zeit sollten Vermessungsnotizen gemacht werden, oder im Fall, dass die Skizze von der Umgebung während der Vorbereitungsplanung noch nicht gemacht worden ist, wäre jetzt der richtige Zeitpunkt dies nachzuholen. Die Skizzen und die Vermessungsnotizen sollten den Gegenstand, der gescannt wird, zeigen, d. h. die Positionen der Zielmarken, deren Kennzeichnungen und die Scanpositionen. Spezifische äußere Bedingungen, die den Scanprozess und die verwendeten Einstellungen beeinflussen, sollten ebenfalls vermerkt werden.

#### 3.3.2. Scannen von Zielmarken

Wenn Zielmarken und/oder natürliche Verknüpfungspunkte benutzt werden, um Scans in der Registrierungsphase zu erfassen (siehe § 3.5), dann sollten diese Zielmarken bezeichnet sein und sehr genau gemessen werden.

Wegen der begrenzten Geschwindigkeit eines Time-of-Flight Scanners erfolgt die Abtastung in zwei Phasen. Zuerst werden die Zielmarken (Abbildung 39) in einer sehr hohen Auflösung gescannt, um bei der Bestimmung des Mittelpunkts eine höhere Genauigkeit zu erreichen. In einer zweiten Phase wird das Objekt in einer Auflösung gescannt, die ausreicht, um das erforderliche Ergebnis zu erzielen. Nach Beendigung des Objektscans wird die erste Zielmarke noch einmal gescannt (Abschlussfehlerbestimmung), um eventuelle Verdrehungen des Scanners während des Messvorgangs bestimmen zu können.

Einige Scanner verfügen über die Möglichkeit einer automatischen Zielmarkenerkennung. Dabei wird als erstes ein Grobscan mit einer geringen Auflösung (overview scan) durchgeführt. Die bei solchen Scannertypen verwendeten Zielmarken sind aus einem hoch reflektierenden Material gemacht, deren Reflexionswert sehr viel höher als der der Umgebung ist. Dadurch ist der Scanner in der Lage die Zielmarken automatisch anzufahren. Sobald die ungefähren Positionen der Zielmarken bekannt sind, werden sie mit einer sehr hohen Auflösung gescannt. Die Kontrollsoftware kann dann eine spezifische Zielmarkenform automatisch an die Zielmarke anpassen und deren genauen Mittelpunkt bestimmen. Da diese automatisch arbeitenden Tools aber oft fehlerhafte Resultate liefern, sollten die Ergebnisse immer überprüft werden, um sicherzugehen, dass keine Zielmarke fehlt.



Abbildung 39: Scannen von Zielmarken [25]

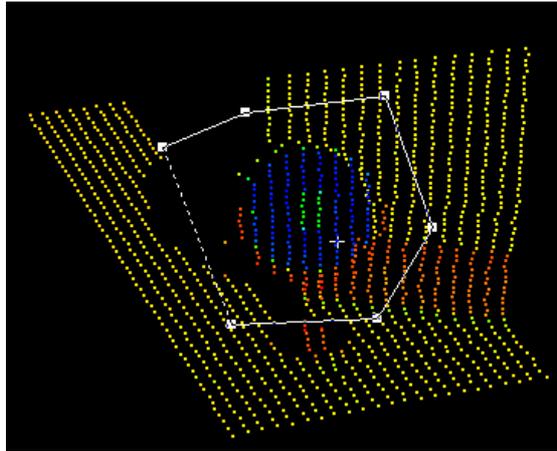


Abbildung 40: Zielmarke mit einer hohen Auflösung gescannt [25]

Manchmal werden natürliche Verknüpfungspunkte anstelle oder zusammen mit Zielmarken verwendet. Ein natürlicher Verknüpfungspunkt ist ein markanter Punkt, der wegen seiner Gestalt genau lokalisiert werden kann. Diese Punkte werden außerdem mit einer sehr hohen Auflösung gescannt.

Es ist wichtig anzumerken, dass die letzte Generation phasenbasierter Scanner mit hoher Geschwindigkeit scannen, sodass ein 360° Scan mit einer sehr hohen Auflösung nur 5 bis 10 Minuten in Anspruch nimmt. Die Zielmarken werden automatisch mit einer hohen Auflösung gescannt und müssen später nicht wieder gescannt werden. Diese Arbeitsweise ist natürlich viel schneller, da der Anwender diese Zielmarken nicht vor Ort identifizieren und in einer hohen Auflösung einzuscannen braucht. Die Kennzeichnung der Zielmarken muss jetzt aber im Büro erfolgen und verlangt sehr gute Vermessungsnotizen und Skizzen vom Ort.

### **3.3.3. Messen der Zielmarken**

Ein Teil des Scanprozesses ist die Aufnahme der Zielmarken mit einer Totalstation (Tachymeter). Sind mehrere Tachymeterstandpunkte erforderlich, sollte, um Fehler im Messprozess zu verringern, ein Polygonzug (Traverse) gemessen werden. Da angenommen wird, dass Studenten, die mit diesem Tutorenkurs arbeiten, über ein Hintergrundwissen im Vermessen verfügen, wird dieser Prozess nicht im Detail beschrieben.

### **3.3.4. Überprüfung der Vollständigkeit**

Wie schon erwähnt, ist es von großer Bedeutung, die Daten, nachdem der Scan beendet ist, auf ihre Vollständigkeit hin doppelt zu überprüfen. Erst im Büro zu bemerken, dass die Daten unvollständig sind, kann teuer werden. Der zweite Besuch könnte mehr Zeit in Anspruch nehmen, als die Vollständigkeitsprüfung der Daten vor Ort beim ersten Besuch gedauert haben würde. Arbeitet man mit einem Laptop, kann „point splatting“ dabei helfen (siehe § 3.6.1).

## **3.4. Datenaufbereitung**

Zurück im Büro werden die Daten analysiert und mit den Feldskizzen und Notizen verglichen. Zu Beginn ist es ratsam, mit einer Kopie des ursprünglichen Scans zu arbeiten und die Originale als Sicherungskopie zu bewahren. Verschiedene Typen von Scannern speichern die Punktwolkeninformation in verschiedenen Formaten ab. Mehr Information über

Punktwolkendateitypen und ihre Vor- oder Nachteile können im Kapitel 4 gefunden werden. Für Archivierungszwecke ist es wichtig, dass das Dateiformat leicht zugänglich (offen) und wiedererkennbar ist. Wenn darauf direkt ohne Decodierung zugegriffen werden kann, kann es später leicht durch eine entsprechende Software in jedes andere lesbare Format konvertiert werden. Das Dateiformat sollte die Daten in seinem elementarsten Format enthalten. Zurzeit (2008) ist das gebräuchlichste Format das \*.xyzrgb-Format.

Fügen Sie der Sicherungskopie immer eine Meta-Datendatei hinzu, die die Feldskizze, die Vermessungsnotizen und alle Daten, die bereits in der Vorbereitungsplanung des Scan-Auftrags erfasst wurden, enthält.

Vor der Bearbeitung der Wolken werden Scans, die durch extreme Umweltbedingungen oder durch fehlerhafte Scans beeinträchtigt sind, aus dem Datensatz entfernt. Bei den Scans, die nicht entfernt wurden, müssen Prioritäten entsprechend den 'besten Ansichten' gesetzt werden. Die Prioritätensetzung wird mithilfe der Vermessungsnotizen und Skizzen gemacht.

In einigen Fällen kann es auch nötig sein die Scans vor der Registrierung zu glätten. Sind die Zielmarken sehr weit weg vom Scanner angebracht oder herrschen ungünstige Umweltbedingungen, können die hochauflösenden Scans der Zielmarken verrauscht sein. Dieses Rauschen muss vor dem Registrieren der Scans entfernt werden, weil es die Genauigkeit der Registrierung beeinträchtigen wird.

### 3.5. *Registrierung und Georeferenzierung*

In den meisten Fällen ist das Objekt, das gescannt wird, zu groß, um nur aus einer Position gescannt zu werden. Deshalb sind mehrere Scanpositionen notwendig. Die Messungen an jeder Scanposition sind jeweils im Koordinatensystem des Scanners definiert. Um die verschiedenen Scanpositionen miteinander zu verknüpfen, muss man die exakte Position und Orientierung der jeweiligen Scannerkoordinatensysteme zueinander kennen.

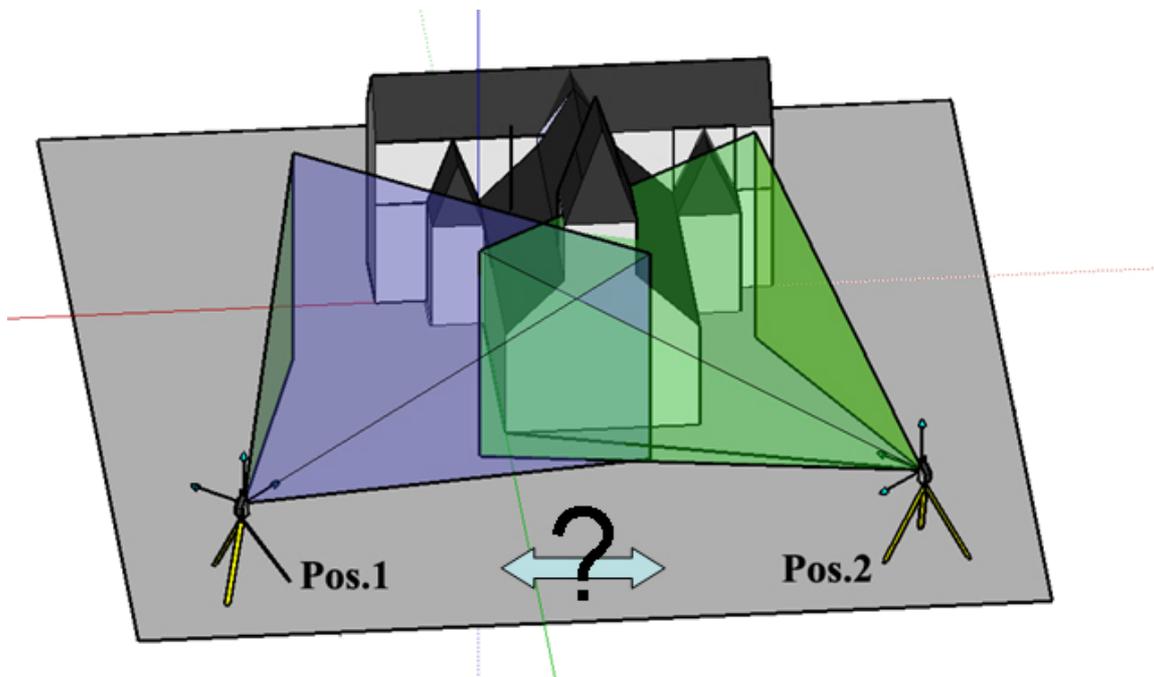


Abbildung 41: Registrierung zwischen zwei Scanpositionen

Direkt an die Messung oder Registrierung ist die Georeferenzierung der gesamten Datenmenge gekoppelt. Georeferenzierung heißt, die in einem gemeinsamen Koordinatensystem vorliegenden (registrierten) Scans in ein übergeordnetes lokales/globales Koordinatensystem (z.B. Landeskoordinatensystem) zu transformieren. In den folgenden Paragraphen werden die Möglichkeiten der Registrierung und der Georeferenzierung dargestellt.

Dieses Handbuch gliedert die Registrierungsverfahren in direkte, indirekte und in Techniken der Georeferenzierung auf.

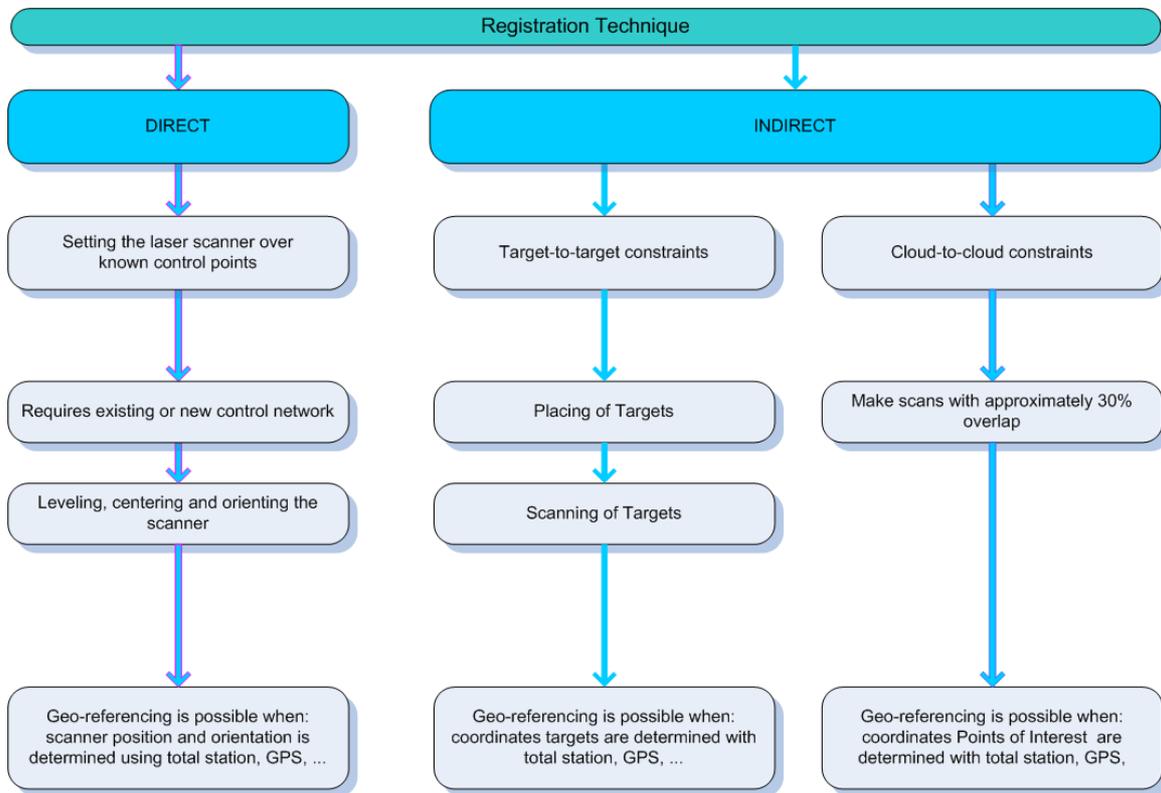


Abbildung 42: Registrierungstechniken

### 3.5.1. Indirekte Registrierung und Georeferenzierung

Indirekt bedeutet in diesem Zusammenhang, Gebrauch von Zielmarken (künstliche oder natürliche) zu machen, um Datensätze aufeinander abzustimmen. Wenn eine Georeferenzierung erforderlich ist, sollten die Koordinaten der Zielmarken mithilfe anerkannter Messmethoden bestimmt werden.

Um eine indirekte Registrierung durchzuführen, sind mindestens drei Übereinstimmungen zwischen zwei Scans erforderlich. Es ist aber bedeutend besser, mehr als drei zu haben, so dass sich Fehler, mithilfe einer Optimierung der kleinsten Quadrate, minimieren lassen.

#### 3.5.1.1. Target-to-Target Registrierung

Orte, die leicht zugänglich sind, werfen kein Problem auf, um Zielmarken zu plazieren. Zielmarken gibt es in einer Vielfalt von Formen. Es gibt spezielle Zielmarken aus hoch reflektierendem Material, aber auch gedruckte Papiermarken können verwendet werden. Wenn kein Drucker oder spezielle Zielmarken verfügbar sind, können Zielmarken auch mithilfe von

Gegenständen improvisiert werden, die an eine ideale geometrische Oberfläche angepasst sind. Zum Beispiel eignen sich Teile einer zylindrischen Rohrleitung als Zielmarken. Mithilfe der Scansoftware, kann ein idealer Zylinder mit einem Feinscan zu einem solchen Gegenstand angepasst sein, um die Mittelachse mit sehr hoher Präzision zu bestimmen. Wenn die Zylinder dann in beide Richtungen, d. h. sowohl in eine vertikale, als auch eine horizontale Richtung plaziert werden, können sie dazu verwendet werden, die verschiedenen Scans zu verknüpfen.

In Gebieten, die schwer zugänglich sind, die z. B. zu hoch liegen, können keine künstlichen Verknüpfungspunkte angebracht werden. Natürliche Verknüpfungspunkte sind Punkte in der Struktur des Objekts selbst, die mit hoher Genauigkeit identifiziert werden können; zum Beispiel Kanten von Fenstern oder Mauervorsprüngen. Wie das English Heritage in ihrer Veröffentlichung [28] erklärt, sind die Registrierungsergebnisse, die mithilfe natürlicher Verknüpfungspunkte erhalten wurden, schlechter als die, die mithilfe von Zielmarken gewonnen wurden. Der Grund dafür ist zweifach:

Die gescannten Objektmerkmale (z.B. Mauerecke) werden in den verschiedenen Punktwolken, wegen der Divergenz des Laserstrahls, nicht durch exakt den gleichen wiedergegeben. Der auf die Ecke auftreffende Laserstrahl-Footprint ist ein Kreis von mehreren Millimetern Durchmesser und liefert somit von jedem Standpunkt aus eine etwas andere Eckpunktcoordinate.

Die Identifizierung solcher Objektelemente ist eher subjektiv, besonders bei sehr geneigten Scans;

### **3.5.1.2. Cloud-to-Cloud Registrierung**

Eine andere Art, zwei Punktwolken zu registrieren, ist die Überlappung von Punktwolken. Wenn zwei Punktwolken genug Überdeckung haben (allgemein 30 - 40 %), kann eine Technik angewandt werden, die Iterative Closest Point Prozess oder ICP genannt wird, um beide Datensätze zu verknüpfen. Diese Technik verlangt, dass der Benutzer mindestens 3 entsprechende Punkte in den Punktwolken manuell auswählt. Da diese 3 Punkte nie exakt dieselben Punkte sein werden (siehe die Erklärung im vorhergehenden Paragraphen), überprüft der ICP Algorithmus schrittweise, um die Fehlerquote zu minimieren, die Entfernungen zwischen allen Punkten der Punktwolken und berechnet die Transformation, um beide Datensätze miteinander zu verknüpfen.

Die Regeln, die über die Anordnung von Zielmarken im vorhergehenden Paragraphen erwähnt wurden, sind auch auf die Punktverknüpfung in der Cloud-to-Cloud Registrierung anwendbar.

Diese Registrierungstechnik sollte aber mit Vorsicht angewendet werden. Wenn nämlich lange geradlinige Strukturen gescannt werden, wo mehrere Einstellungen erforderlich sind, können sich kleine Fehler in jedem Registrierungs paar fortpflanzen und auf große globale Fehler hinauslaufen (siehe Abbildung 43).

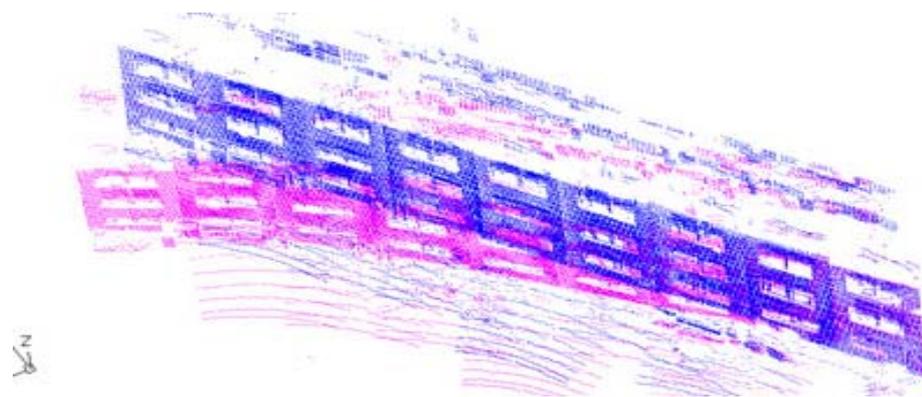


Abbildung 43: Fehlerfortpflanzung infolge einer Cloud-to-Cloud Registrierung mehrerer Scans einer Fassade

### **3.5.1.3. Surface-to-Surface Registrierung**

2006 veröffentlichte A. Gruen ein neues Verfahren, das darauf beruht, die Datensätze über den Vergleich der Oberflächengeometrie zweier Scans zu verknüpfen. Sein Algorithmus berechnet die Entfernungen zwischen den Oberflächenstücken durch kleinste Quadrate und versucht diesen Abstand schrittweise, wie beim ICP Algorithmus, zu minimieren. Diese Methode ermöglicht eine hohe Flexibilität in der Behandlung des Korrespondenzproblems dreidimensionaler Oberflächen und bietet statistische Werkzeuge für die Qualitätsanalyse des Endresultats an.

Surface-to-Surface Registrierung ist besonders nützlich, wenn einige der Scans ziemlich verrauscht sind. In diesem Fall ist es besser, zuerst die einzelnen Scans getrennt zu glätten und zu vermaschen, sodass jeder Scan mithilfe der entsprechenden Einstellungen bearbeitet werden kann. Sobald alle Scans in Oberflächen transformiert wurden, kann die Surface-to-Surface Registrierung verwendet werden, um die verschiedenen Scans zu verknüpfen.

### **3.5.2. Direkte Registrierung und Georeferenzierung**

Direkte Registrierung bedeutet, dass die Position und die Orientierung des Scanners direkt bestimmt werden. Das kann auf zwei Weisen geschehen. Eine Möglichkeit besteht darin, den Laserscanner mit einigen Fähigkeiten einer Totalstation auszustatten, wo der Scanner direkt über einem bekannten Punkt mithilfe eines Lots positioniert werden kann. Die Orientierung lässt sich durch das Scannen nur einer Zielmarke Laserscanners bestimmen. Diese Laserscanner haben auch einen Doppelachsenkompensator, sodass sie sich innerhalb bestimmter Grenzen selbst horizontieren.

Manchmal wird ein spezieller Reflektor oben auf der vertikalen Drehachse des Scanners befestigt. Die relative Lage dieses Reflektors zum Abstrahlpunkt des Laserstrahls kann durch ein Kalibrierungsverfahren bestimmt werden. Der Reflektor kann mithilfe einer Totalstation eingemessen werden. Eine andere Möglichkeit, die Scannerposition zu bestimmen, ist die Montage eines GPS-Empfängers.

Diese Technik reduziert die Anzahl von Zielmarken, die zu positionieren sind, und vermeidet deshalb die ziemlich anspruchsvollen Voraussetzungen an die Aufstellung der Zielmarken. Die Scans müssen sich auch nicht überlappen. Zieht man alle diese Erwägungen in Betracht, ist diese Technik häufig schneller als die indirekte Registrierung.

Wenn Georeferenzierung gefordert ist, kann die gemessene Reflektorposition in ein bestimmtes Koordinatensystem transformiert werden.

### **3.5.3. Allgemeine Aspekte der Registrierung und Georeferenzierung**

Dieser Abschnitt beschreibt einige Vorsichtsmaßnahmen, die angewendet werden sollten, wenn Daten registriert werden oder gleich die Registrierungsphase geplant wird. Die meisten dieser Erklärungen wurden aus einer Veröffentlichung des English Heritage [29] übernommen.

Wenn Sie eine Registrierung durchführen, vergewissern Sie sich, dass die Verbesserungen vom allgemeinen Registrierungsprozess gleich oder besser sind als die vom Endergebnis geforderte geometrische Genauigkeit;

Wenn die Registrierung allein mithilfe des Verfahrens des Rückwärtseinschnitts (indirekt) gemacht wird, sollte jeder Scan mindestens 4 entsprechend verteilte koordinativ bekannte Punkte/Zielmarken enthalten. Dadurch wird die geometrische Beziehung zwischen den zwei Datensätzen überbestimmt, weshalb eine Optimierung mithilfe der kleinsten-Quadrate vorgenommen werden kann, um Fehler in den Aufnahmen der Zielmarken zu minimieren.

Fügen Sie immer die Verbesserungen des Registrierungsprozesses und die geometrische Genauigkeit der geschätzten Parameter dem Messbericht hinzu.

Fügen Sie konkretisierende Fotografien/Screenshots von unregelmäßigen Merkmalen in den Daten hinzu, die durch Risse oder Besonderheiten auf dem Objekt verursacht sind, und die als Fehler im Registrierungsprozess fehlinterpretiert werden könnten, und vermerken sie diese im Messbericht

Stellen Sie die Zielmarken nicht an Positionen auf, wo sie wichtige Details des Objekts verdecken und machen Sie die Zielmarken nicht zu groß.

Wenn Sie Zielmarken auf der Oberfläche des Objekts anbringen, stellen Sie sicher, dass der Kleber nicht die Struktur beschädigt.

Vermeiden sie den Gebrauch von natürlichen Verknüpfungspunkten, weil diese weniger genau als die Zielmarken sind.

Die Kontrollsoftware muss an den Typ der verwendeten Zielmarken angepasst werden. Einige flache retro-reflektierende Zielmarken zeigen zum Beispiel einen Halo Effekt, der durch den mehrfachen „target return“ der Laserenergie im „vicinity“ des Zentrums der Zielmarke verursacht wird. Geeignete Software kann die reflektierten Strahlenbündel ins Zentrum der Zielmarke z.B. durch die Intensitätsgewichtung der reflektierten Einzelstrahlen rechnen [11].

Wenn die Zielmarken unter einem sehr spitzen Winkeln gescannt werden, sollten die Tools zur automatischen Identifizierung der Zielmarken nicht verwendet werden, weil diese schlechte Ergebnisse liefern [15].

### **3.6. Die Verarbeitung dreidimensionaler Punktwolken**

Die Verarbeitung von Punktwolken bezeichnet den Transformationsprozess von roh registrierten Punktwolken in ein Endergebnis. Diese Endergebnisse gibt es in einer beträchtlichen Anzahl von Formaten: als geglättete Punktwolkendaten, als zweidimensionale Standardzeichnungen (z. B. Grundrisse, Ansichten, Schnitte), als vollständig dreidimensional strukturierte Modelle für komplette Animationen.

Häufig zeigen die Scannerhersteller eindrucksvolle Videos von Punktwolken, die sich in weniger als einer Sekunde in voll strukturierte Modelle verwandeln. In Wirklichkeit verlangt dieser Prozess noch sehr viel Zeit und geschieht in der Hauptsache manuell. Die Abbildung unten zeigt eine Übersicht der verschiedenen Schritte und ihren Grad an Automation.

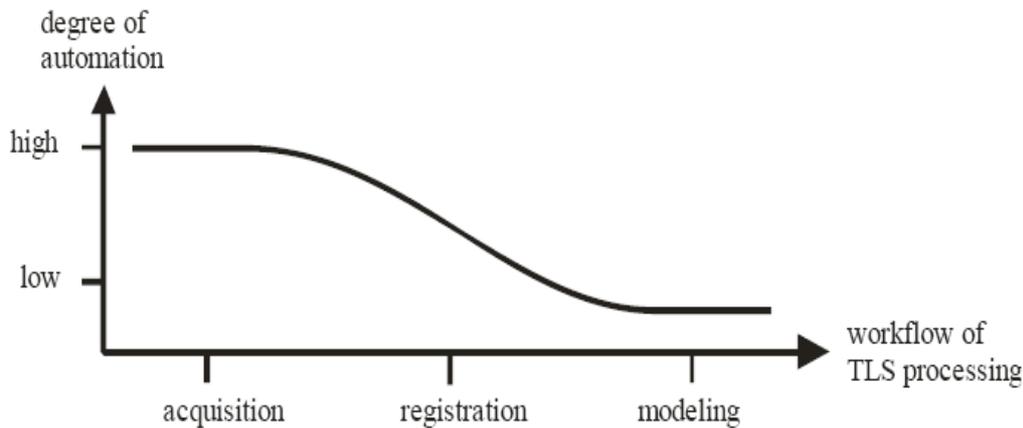


Abbildung 44: Der Automatisierungsgrad im Workflow des terrestrischen Laserscannings (aus A. Gruen)

Im Allgemeinen kann die Verarbeitung dreidimensionaler Punktwolken in zwei Kategorien unterteilt werden:

Gewinnung von fertigen Ergebnissen direkt aus der Punktwolke.

Überführen der Punktwolke in ein dreidimensionales Oberflächenmodell und anschließender Ableitung der Ergebnisse aus diesem Modell.

Welche Methode gewählt wird, hängt größtenteils vom geforderten Ergebnis ab. Wenn z. B. nur eine beschränkte Anzahl von Schnitten erforderlich ist, ist es besser, sie direkt aus der Punktwolke zu extrahieren. Wenn jedoch mehr Schnitte (+50) nötig sind, ist die zweite Methode effizienter, weil es automatisierte Werkzeuge gibt, um mehrere Schnitte aus einem vermaschten Modell zu erzeugen. Die Erzeugung des Oberflächenmodells ist, wie gesagt, ungleich aufwendiger, jedoch verfügt so ein Modell dann auch über mehr Informationsgehalt (Wissen), der durch die Modellierung eingebracht wurde.

### 3.6.1. Darstellungsformen von Punkt\_Wolken

Das Ergebnis einer Datenerfassung ist eine riesige Anzahl von Punkten, wo jeder Punkt eine x, y, z Koordinate und gewöhnlich einen Reflexionswert hat. Einige Scanner liefern zusätzlich Farbinformationen in Form von RGB-Werten.

Die Punktwolke kann zwar auf dem Bildschirm dargestellt werden, ergibt aber einen sehr chaotischen Eindruck. Ein Anwender wird Schwierigkeiten haben, die Strukturen in der Wolke zu erkennen. Wenn jeder Punkt seinen Reflexionswert oder einen Farbwert erhält, wird die allgemeine Struktur oftmals schon leichter erkenntlich.

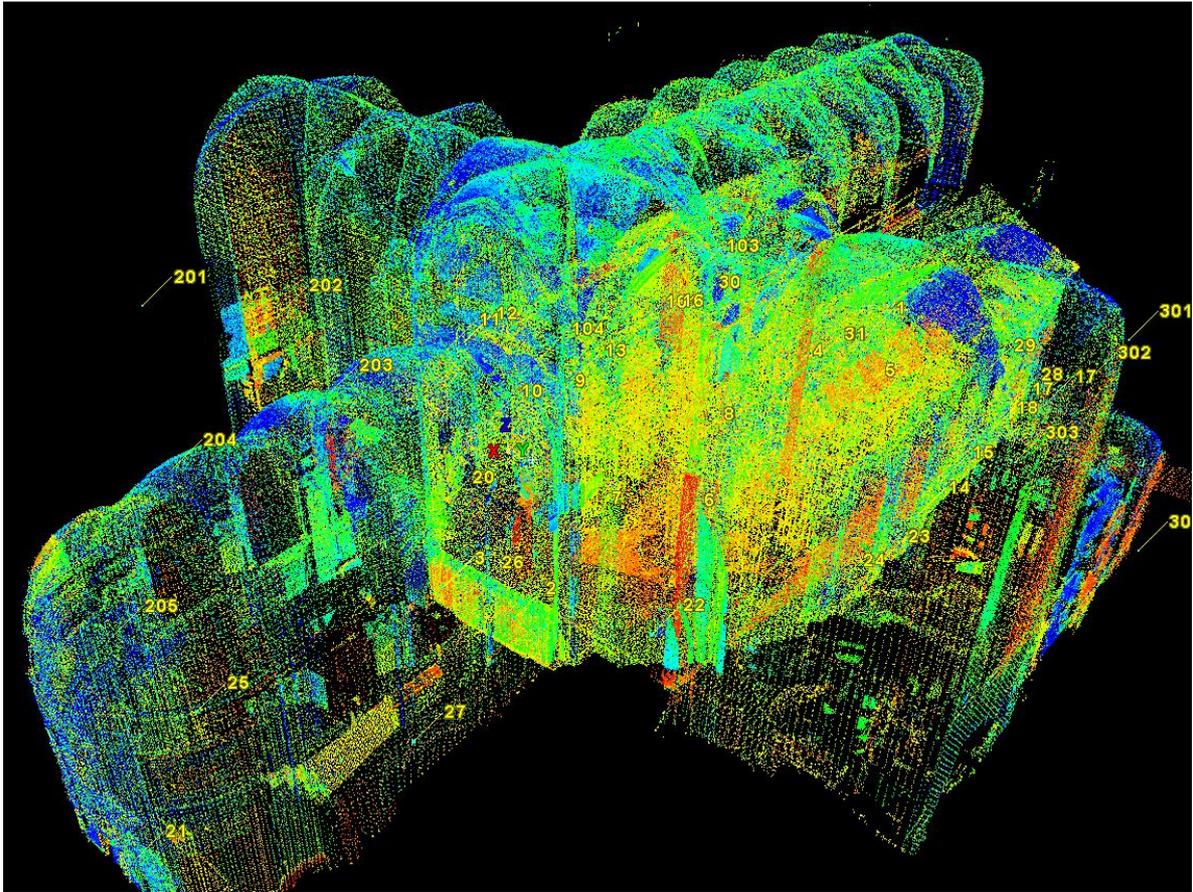


Abbildung 45: Bild einer unorganisierten Punkt-Wolke

Eine einfache Form der Darstellung der Punktwolke ist das Entfernungsbild (depth map). Ein Entfernungsbild hat eine matrix-ähnliche zweidimensionale Struktur, in der jedes Pixel die Entfernung des 3D Punkts zum Scanner in Form eines Grauwerts vertritt. Weil diese Art der Darstellung Nachbarschaftsinformationen einbezieht, ist sie für die Algorithmen, die Punktwolken bearbeiten, von großem Nutzen und wird als organisierte Punktwolke bezeichnet.



Abbildung 46: Entfernungsbild

Werden komplizierte Vermaschungsalgorithmen (z.B. Triangulation) verwendet, können benachbarte Punkte zu einer Oberflächenform verbunden werden. Dies liefert eine

wirklichkeitsgetreuere Darstellung, weil die Oberflächenstrukturen oder Maschen nicht transparent sind, folglich können die Punkte, die hinter anderen liegen, nicht gesehen werden. Um Oberflächendetails hervorzuheben, kann die künstliche Schattierung (artificial shading) verwendet werden.

Weil die Erstellung eines Netzes kompliziert ist und beträchtliche Zeit in Anspruch nehmen kann, hat es Versuche gegeben, Alternativen zu finden, wie sich eine grobe Darstellung der Oberfläche schnell erzeugen lässt, nur um sie sichtbar zu machen und zu analysieren. Infolgedessen wurde die Idee vom Laserpunkt Splatting geboren. Punkt Splatting erzeugt Surfels (kleine Oberflächenelemente) für jeden Punkt in der Wolke aus den Rohdaten. Jedes Surfel wird durch eine kleine primitive Oberflächengestalt (Kreis, Ellipse ...) in 3D dargestellt, das seine für die Visualisierung notwendige Flächennormalenrichtung von seinen benachbarten Punkten erbt. Dieses Verfahren führt zu einer sehr schnellen Darstellung der Oberfläche.

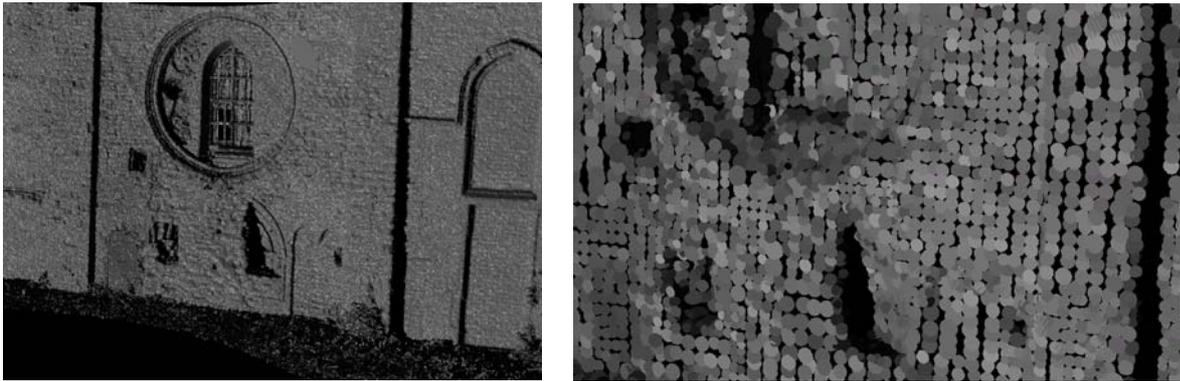


Abbildung 47: Das Ergebnis des Laser Splatting (links), Großaufnahme des Laser Splatting (rechts)

### **3.6.2. Datenverbesserung**

#### **3.6.2.1. Entauschen**

Häufig kann ein Anwender die Teile, die gescannt, aber für das Endergebnis unnötig sind, leicht identifizieren. Deshalb ist man gut beraten, dass dieser Anwender eine erste Analyse der Punktwolke durchführt und alle überflüssigen Punktwolkenbereiche und offensichtlichen Fehlpunkte aus dem Datensatz per Hand entfernt.

Ein erster Schritt im Vermaschungsprozess besteht darin, verrauschte Punkte aus der Punktwolke zu entfernen. Wenn Rauschen infolge von schlechter Oberflächenreflexion usw. (siehe Kapitel 2.6), eingebracht worden ist, wird das Netz Dreiecke enthalten, die diese verrauschten Punkte mit korrekten Punkten verbinden. Das ergibt ein Netz voller Zacken. Deshalb ist es wichtig, diese verrauschten Punkte zuerst zu entfernen.

Algorithmen, die verrauschte Punkte automatisch entfernen, basieren hauptsächlich auf zwei Prinzipien. Das erste Prinzip beruht darauf, Punkte, die wenig oder keine anderen Punkte in ihrer unmittelbaren Umgebung haben, als Ausreißer zu betrachten. Sie entstehen wahrscheinlich durch Menschen oder andere Hindernisse, die sich vor dem Scanner während des Scanvorgangs bewegten und sind kein Teil des gescannten Objekts. Diese Punkte können leicht mithilfe einer beschränkten Anzahl von Parametern identifiziert und anschließend aus der Punktwolke entfernt werden.

Ein anderes Prinzip der Rauschunterdrückung besteht darin, die Punkte leicht zu versetzen, um so eine optimale Oberflächenglättung zu erreichen. Diese Algorithmen versuchen

(Freiformflächen) Ebenen an die Punkte in der Punktwolke lokal anzupassen. Wenn der Punkt sehr weit von der angepassten Fläche liegt, wird er in der Richtung der Fläche bewegt, um seinen Nachbarn mehr Konsistenz zu geben.

Es existieren noch andere Rauschfilter, die entsprechend dem Scannertyp, andere systembedingte Fehler beseitigen. Beim Entfernen verrauschter Punkte muss natürlich mit Fingerspitzengefühl vorgegangen werden. Eigenschaften können verloren gehen, wenn der Datensatz zu sehr geglättet wird oder zu viele Punkte entfernt werden.

### **3.6.2.2. Resampling**

Wenn ein Netz erzeugt wird, ist die Anzahl der zu verwaltenden Dreiecke, um vieles größer, wie die Anzahl der Scanpunkte (z.B. 6 Scanpunkte  $\rightarrow$  4 Dreiecke  $\rightarrow$   $4 \times 3 = 12$  Dreieckspunkte). Die netzartige Darstellung einer phasenbasierten Punktwolke kann leicht an die 20 Millionen Dreiecke umfassen. Bei dieser Anzahl von Dreiecken wird es schwierig, mit Standard-Hardware zu arbeiten. Im allgemeinen muß die Anzahl der Punkte vor der Vermaschung (Meshing) reduziert werden. Diese Punktreduktion kann auf zwei Weisen geschehen.

Die leichteste Art die Anzahl der Punkte zu reduzieren ist die, dass man einen Punkt innerhalb einiger anderer Punkte löscht. Mit dieser Technik entfernt man aber möglicherweise Punkte in Bereichen, die wesentliche Merkmale enthalten weshalb wertvolle Informationen verloren gehen können.

Eine andere Möglichkeit, Punkte zu entfernen, ist die, sich die Oberflächenkrümmung anzusehen, um zu bestimmen, ob ein Teil der Oberfläche glatt oder stark gekrümmt ist. Diese Technik des Resamplings arbeitet intelligent, indem es Punkte in Gebieten mit hoher Krümmung behält und Punkte in Gebieten entfernt, die leicht mit weniger Punkten dargestellt werden können. Mithilfe dieser Technik kann eine entsprechende Reduktion der ursprünglichen Punktwolke erreicht werden, ohne wesentliche Merkmale zu verlieren.

### **3.6.3. Direkte 2D Modellierung von Punktwolken**

Die direkte 2D Modellierung von Punktwolken ist eine Frage der Interpretation. Die meisten verfügbaren Softwarepakete in dem Bereich sind Plug-Ins für CAD-Software wie AutoCAD oder Microstation. Spezielle Schnittstellen erlauben dem Anwender riesige Punktwolken in diese Programme zu laden, um sie mit den Standard CAD Tools zu bearbeiten. Typische Software, um diese Aufgaben zu erfüllen sind: *Leica CloudWorxs*, *Kubit Pointcloud*, *LFM CAD Link*, ... ;

Schnittbilder, Rissdarstellungen (Grundriss, Aufriss ...) und Höhenschichtenpläne lassen sich erzeugen, indem eine dünne Schicht von Punkten aus der Punktwolke genommen wird, und alle diese Punkte auf eine Fläche projiziert werden. Anschließend muss der Anwender die Punkte händisch nachzeichnen bzw. miteinander verknüpfen, um Linien, Bögen, etc. zu erzeugen. Über Ecken und Details, die kleiner als die Scanauflösung sind, macht der Anwender seine eigene Interpretation. Das ist eine schwierige Aufgabe und kann eine beträchtliche Zeit in Anspruch nehmen, nur um ein Schnittbild oder eine Fläche zu vollenden. Die Person, die diese Aufgabe durchführt, muss eine genaue Kenntnis vom Gebäude oder der Struktur haben oder er muss photographisches Material zur Verfügung haben, um sachgerechte Interpretationen zu machen.

In einigen Forschungszentren arbeitet man an der Entwicklung von Algorithmen, die die Aufgabe automatisch erledigen. Viele dieser Algorithmen haben ihre Nützlichkeit bewiesen. Allerdings erfordern sie bestimmte Restriktionen, um befriedigende Ergebnisse zu liefern. Das bedeutet, dass sie noch nicht auf eine allgemeine Weise benutzt werden können und sie deshalb auch noch nicht in kommerzieller Software implementiert sind.

Aufrissdarstellungen von Architekturobjekten können auf zwei Weisen erzeugt werden. Wenn die Scanpunkte über Farbinformation verfügen (z.B. aus Farbfotografien oder auch nur Grauwerten aus dem Intensitätsbild des Laserstrahls), können die Farbpunkte orthogonal auf eine Ebene projiziert werden, um ein wahres Orthofoto zu erzeugen. Beim Tracing (verfolgend vektorisieren) dieses Orthofotos kann eine Aufrissdarstellung erzeugt werden. Ein wichtiger Punkt ist, dass die Genauigkeit von der Höhe der Scanauflösung abhängt.

Ein anderer Weg eine Höhe zu erzeugen geschieht über das Tracing (im Verfolgen) wichtiger Kanten (z. B. Fensteröffnungen, Türöffnungen, etc.) in der 3D Punktwolke. Anschließend werden alle 3D Punkte auf eine Ebene projiziert. Diese Technik erfordert ein gutes geometrisches Verständnis und die Fähigkeit Strukturen in Punktwolken schnell zu erfassen.

Einige Softwarepakete erlauben externe Bilder zur Punktwolke zu laden und diese für das Monoplotting zu nutzen. Das heißt, dass die Interpretation im Bild vorgenommen wird und auf diese Weise der Punktwolke die Tiefeninformation entnommen wird. Das Problem dabei ist, dass das Ergebnis immer doppelt überprüft werden sollte, weil das Kanten-Tracing im Bild von der Software infolge fehlender Daten oft missinterpretiert wird und der Punkt deshalb nicht an seine korrekte Position gesetzt wird.

#### **3.6.4. Direktes 3D modellieren von Punktwolken**

Wenn die Gestalt eines dreidimensionalen Objekts bekannt ist und es durch geometrische Primitive beschrieben werden kann, kann es automatisch von einer Punktwolke extrahiert werden. Der Algorithmus passt diese geometrischen Formen an die Punktwolke in der Weise an, dass er eine ideale Form annimmt. Zum Beispiel kann der Scan einer petrochemischen Anlage leicht in ein dreidimensionales Modell überführt werden, weil angenommen werden kann, dass alle Rohrleitungen einen kreisförmigen Querschnitt und die Verbindungsstücke ebenfalls eine spezifische Form haben. Die meisten dieser Anwendungen werden im Industriebau angewandt.

#### **3.6.5. Die dreidimensionale Modellierung komplexer Oberflächen**

Im Allgemeinen ist das Ergebnis eines 3D Modellierungsprozesses ein netzartiges Oberflächenmodell. Das Oberflächen- bzw. Drahtgittermodell entsteht dadurch, dass alle Punkte in der Punktwolke mit kleinen Dreiecken verbunden werden. Dieses Drahtgittermodell ist eine Interpolation der Punkte in drei Dimensionen, die eine vollständige Darstellung der Oberfläche erzeugt. Um ein qualitativ hochwertiges Drahtgittermodell zu erstellen, müssen eine Anzahl von Schritten ausgeführt werden:

Datenbereinigung (Rauschunterdrückung, Entfernung von Ausreißern ...)

Resampling (siehe 3.6.2.2)

Meshing/Triangulation

Füllen der Leerstellen (Überbrückung, Fusionierung ...)

Maschenoptimierung (Dezimierung ...)

##### **3.6.5.1. Vermaschung/Triangulation**

Es gibt verschiedene Algorithmen, um Vermaschungen von Punktwolken zu erzeugen. Die Verbindungen zwischen den Punkten werden gewöhnlich aus Dreiecken oder Vierecken hergestellt. Die bei weitem populärsten Meshingtechniken, die das Dreieck oder den Tetraeder nutzen, sind jene, die Gebrauch vom Delaunay Kriterium [30] machen. Das Delaunay Kriterium gibt an, dass innerhalb der Umkugel um vier Punkte, die ein Viereck bilden, kein weiterer Punkt liegt. In Abbildung 48 wird dieser Sachverhalt zweidimensional illustriert.

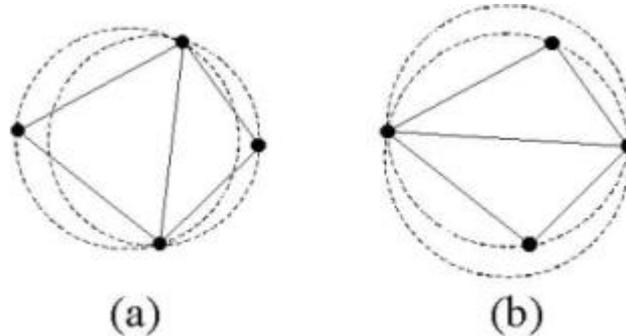


Abbildung 48: Beispiel des Delaunay Kriteriums. (a) erfüllt das Kriterium, (b) erfüllt es nicht (aus [30])

In den letzten Jahren sind sehr komplexe Vermaschungsalgorithmen entwickelt worden, wie der Ball-Pivoting Algorithmus oder der Marching Cubes Algorithmus, die imstande sind große Datensätze bei geringem Speicherverbrauch zu triangulieren.

### 3.6.5.2. *Lückenfüllung*

Wenn aufgrund zu weniger Daten, z.B. in Bereichen mit Abschattungen, vermascht wird, bleiben kleine Lücken im vermaschten Modell. Um diese Lücken zu füllen, sind im Laufe der letzten Jahre mehrere Algorithmen entwickelt worden. Diese Algorithmen verwenden die Interpolation, um den Informationsmangel wettzumachen. Die Lücke kann durch Einebnung gefüllt werden, d. h. durch die Verbindung der Umgebungspunkte zu einfachen Dreiecken, oder mithilfe der krümmungsbasierten Interpolation, bei der umliegende Punkte und Oberflächendreiecke dazu verwendet werden, neue Punkte zu schaffen, um auf diese Weise eine glatte Oberfläche zu erzeugen.

### 3.6.5.3. *Maschenoptimierung*

Obwohl die Punktwolke bereits während des Resamplings reduziert worden ist, um weniger Dreiecke im Netz zu erzeugen, könnte es wegen zu geringer Hardwareressourcen notwendig sein, die Zahl der Dreiecke in einem zweiten Schritt weiter zu reduzieren. Dieses Verfahren wird Maschendezimierung genannt.

Eine andere Art, die Oberflächendarstellung zu optimieren, besteht in der Verwendung mathematischer Oberflächen. Eine der meist verwendeten Oberflächentypen für diese Aufgabe sind NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines, zu deutsch: Nicht-uniforme rationale B-Splines). Diese NURBS sind mathematisch genaue Repräsentationen von Freiformflächen wie jene in Fahrzeugkarosserien, Schiffsrümpfen oder sogar dem menschlichen Gesicht. Sie haben Kontrollpunkte, die die Oberfläche leiten; diese Kontrollpunkte sind nicht notwendigerweise Punkte der Punktwolke.

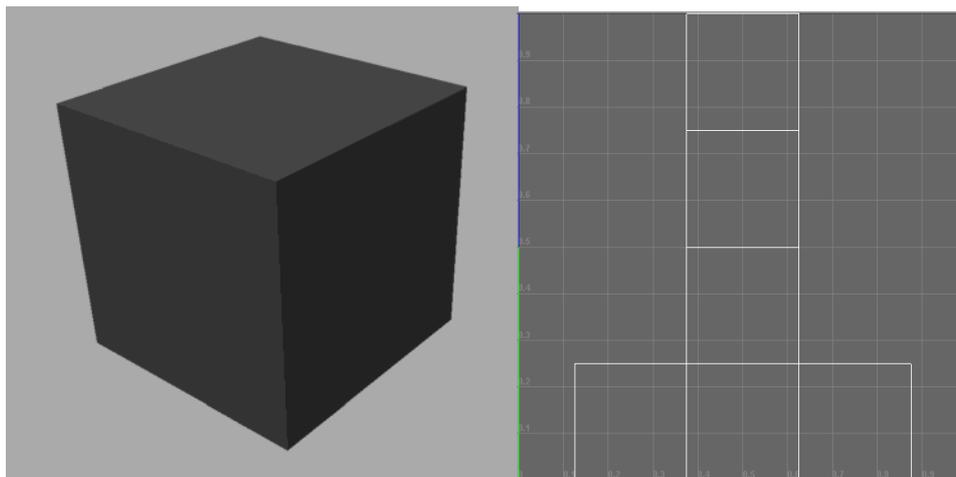
### 3.6.6. Indirektes zweidimensionales modellieren von Punktwolken

Als indirektes 2D Modelling bezeichnet man hier die Herstellung von 2D Zeichnungen aus 3D modellierten oder vermaschten Objekten. Diese Technik ist nützlich, wenn mehrere Schnitte, z.B. alle 1 cm, gemacht werden müssen, um z.B. Höhenschichtkarten herzustellen.

Der 2D Modellierung geht eine 3D modellierende Phase voran, wie in Kapitel 3.6.5 beschrieben wurde. Sobald ein Oberflächenmodell erzeugt worden ist kann es leicht von Ebenen geschnitten werden, um Formteilquerschnitte zu erhalten. Die Interpolation von Bereichen zwischen den gemessenen Punkte geschieht während der Vermaschung automatisch und muss nicht vom Anwender geleistet werden.

### 3.6.7. Musterabbildung (texture mapping)

Eine Texture Map (Musterabbild) (z. B. Farbinformationen oder Anderes) wird auf die Oberfläche einer Form bzw. eines Polygons projiziert. Um die Texturinformationen darauf richtig zu platzieren, werden uv-Maps benutzt (siehe Abbildung 49). Das Texture Mapping (Musterabbildung) dient dazu, die Oberflächen von 3D Objekten/Drahtgittermodellen mit zweidimensionalen Bildern, sogenannten Texturen, auszustatten. Im Gegensatz zu den xyz-Koordinaten des ursprünglichen 3D Objekts sind "u" und "v" die Texturkoordinaten. Mithilfe von Texturkoordinaten wird definiert, wie eine Textur auf einem 3D Objekt abgebildet wird.



a

b

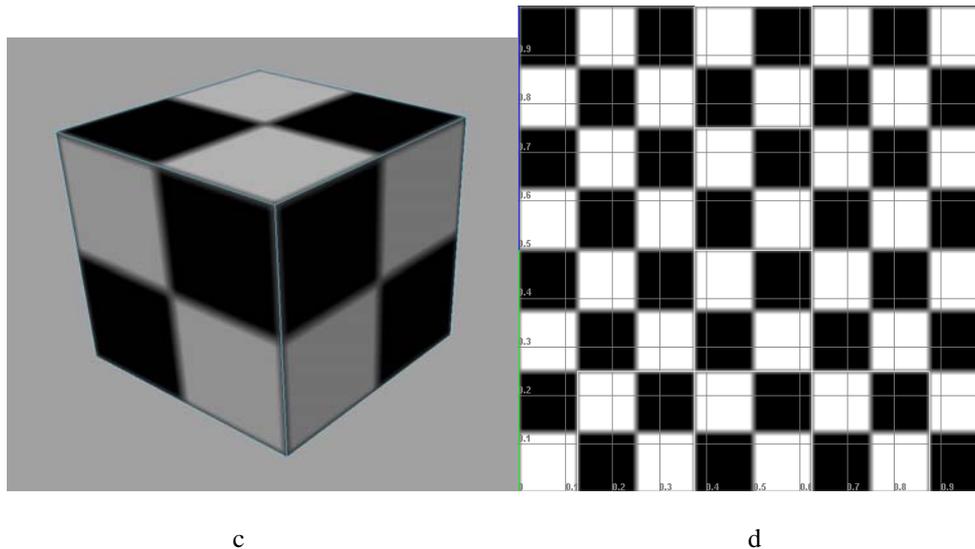


Abbildung 49: (a) Ein Würfel ohne Texturinformation, (b) uv Layout, (c) Würfel mit Textur, (d) Texturinformation

Wird ein Modell mithilfe eines 3D Modellers als Polygonnetz erzeugt, können uv-Koordinaten für jeden Vertex im Netz erzeugt werden. Ein Weg für den 3D Modeller ist das Dreiecksnetz an den Kanten aufzufalten, wobei die Dreiecke automatisch auf der flachen Seite zu liegen kommen. Eine UV Map (Textur) kann entweder automatisch von einer Software, oder manuell vom Künstler oder einer Kombination aus beiden erzeugt werden. Gegenwärtig verwendete Maps sind: Heightmap, Normalmap, Displacementmap, Lightmap, Specular und Bumpmap.

Sobald die UV Map erzeugt ist, kann der Anwender diese bemalen/einfärben und anschließend auf das 3D Modell projizieren. Das erleichtert ein 3D Modell korrekt einzufärben.

Statt UV Maps zu verwenden, um die Texturinformation auf eine Oberfläche zu projizieren, haben einige 3D Softwareprodukte eine Option implementiert, die orthographische Projektionen verwenden, um den Prozess des Texturierens zu vereinfachen (Abbildung 50).

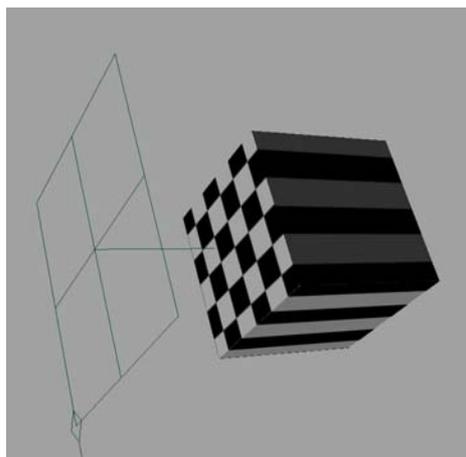


Abbildung 50: Orthographische Projektion

Wegen der minimalen Dehnung der Textur wird die Auffaltung den Projektionen vorgezogen. Beide Techniken können angewendet und in einem einzelnen 3D Modell kombiniert werden.

Beim Laserscanning sind häufig fotografische Informationen in einer hohen Auflösung für die Visualisierung von 3D Modellen erforderlich. Für ein genaues Mapping müssen die Kamerapositionen und die Kameraeinstellungen (Brennweite, Objektivverzeichnung ...) in Bezug auf das Modell bekannt sein. Kommerzielle Softwarepakete stellen Algorithmen zur Verfügung, die dem Anwender erlauben, entsprechende Punkte zwischen dem Bild und dem 3D Modell manuell auszuwählen, um die unbekannt Parameter zu bestimmen. Sind genügend Übereinstimmungen gegeben, können die Position und die Parameter der Kamera berechnet werden.

Im Wesentlichen gibt es zwei Algorithmen, um Fotografien auf das 3D Modell zu projizieren: Texture Mapping und Texture Draping. Texture Draping kann so beschrieben werden: man legt eine Fotografie auf ein Stück elastisches Segeltuch und zieht es dann über das 3D Modell. Das impliziert, dass Bereiche, die im Foto wenig oder überhaupt keine Informationen enthalten (z. B. projektiv stark verzerrte Objektteile), gedehnt werden und daher nicht korrekt texturiert sind. Das Texture Mapping umgeht das Problem dadurch, dass zuerst die sichtbaren Teile analysiert und nur diese Fotopixel auf das 3D Modell projiziert werden.

### **3.7. Qualitätskontrolle und Ablage**

Der Qualitätsaspekt bei der Vermessung mit Laserscannern erfordert sorgfältige Betrachtung des Mess- und Verarbeitungsprozesses. Immer wenn der Scanner aufgestellt wird, um Daten aufzunehmen (bevor, während und danach) sollten bestimmte Elemente der Daten geprüft und auf erwartete bzw. angenommene Ergebnisse kontrolliert werden. Die rein technischen Faktoren, die einen Einfluss auf die Qualität der Daten haben könnten, sind im Detail in § 2.6 erklärt worden. Zusätzlich sollten die Anwender von Laserscannern auch Faktoren überprüfen, wie ausreichende Bereichabdeckung, auch die Punktverteilung mit der erforderlichen Auflösung, Referenzfotos in einer hohen Auflösung, korrekte Erfassung von Zielmarken und der Erwerb zusätzlicher Kontrollmaße, die in weiteren Prozessschritten nützlich sein könnten.

Qualität beginnt mit dem vollen Verständnis der Projektspezifikation. Erst dieses Verständnis ermöglicht die richtige Wahl des Scanners, der passenden Scanauflösung, der entsprechenden Registrierungsmethode usw. Wenn zum Beispiel ein Scanner gewählt wird, der einen unzulänglichen Bereich abdeckt, oder wenn nicht genug Zielmarken und Scanpositionen verwendet werden, oder keine entsprechende Überlappung möglich ist (falls man sich für eine Registrierung mittels überlappender Scans entschieden hat) oder wenn die falsche Scanauflösung verwendet wird; alles das wird einen direkten Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses, das aus der Punktwolke gewonnen wurde, haben.

Eine optimale Qualität kann nur durch eine hinreichende Dokumentation vor Ort gewährleistet werden. Unterstützende Skizzen, Referenzfotos, Kontrollmaße können bei späteren Verarbeitungsschritten von unschätzbarem Wert sein.

Im Allgemeinen sollte das Ziel sein, eine Registrierungsgenauigkeit zu erreichen, die zehnmal höher ist als die geforderte Genauigkeit des erforderlichen/benötigten Ergebnisses. Man sollte immer daran denken, dass es viele Faktoren gibt, die eine ungünstige Auswirkung auf die Genauigkeit haben könnten; deshalb sollte man immer die besten Registrierungsergebnisse anstreben.

Das Flussdiagramm unten (Abbildung 51) gibt eine Übersicht über die Qualitätssicherung der Laserscannermessung.

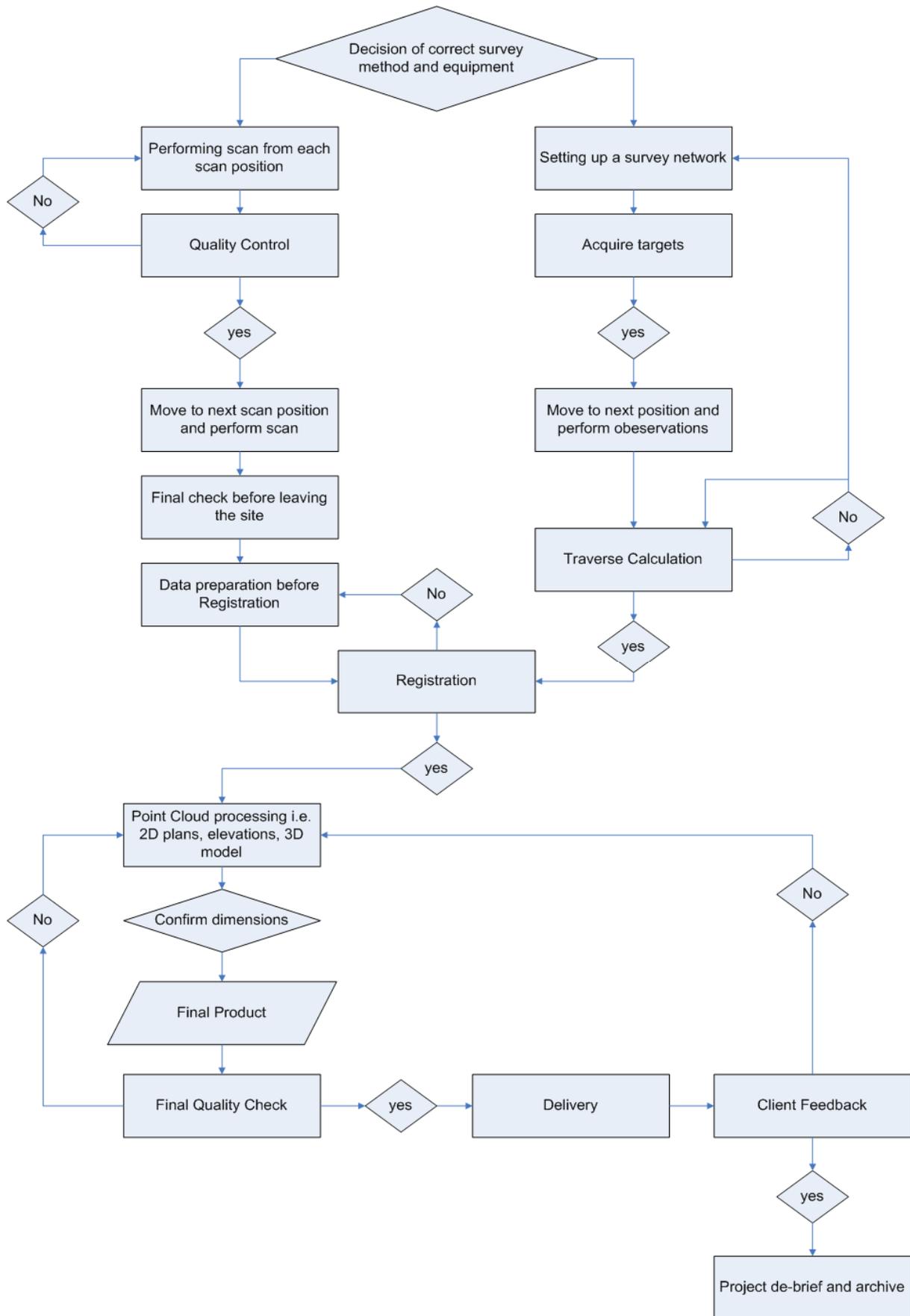


Figure 51: Quality Control Flowchart

## 4. Kapitel IV: Datenmanagement

Wie im Kapitel 3.1 erwähnt, steht am Beginn der Vermessungsplanung die Frage nach dem Datenmanagement. Ein Laserscanner nimmt Tausende von Punkten pro Sekunde auf, weshalb die Datensätze in kurzer Zeit sehr groß werden. Das erfordert eine Ausrüstung, die in der Lage ist die Scannerdaten zu speichern, zu verarbeiten und zu archivieren.

Um die Datenspeicherung zu verstehen, muss man über die allgemein verwendeten Dateiformate Bescheid wissen. Dateiformate regeln auch den Grad der Genauigkeit und den Umfang der in der Datei gespeicherten Information. Einige Dateiformate sichern Koordinaten mit der „einfachen Genauigkeit“ (32-Bit-Gleitkommazahl) andere mit der „doppelten Genauigkeit“ (64-Bit-Gleitkommazahl). Wenn die absoluten oder relativen euklidischen Punktkoordinaten gespeichert werden, dürfte das nicht so wichtig sein, aber einige Scanner speichern ihre Daten in Polarkoordinaten ab. In dem Fall bedeutet eine Winkelabweichung von 0.01 Grad eine Abweichung von 1 cm auf 50 m. In diesem Fall wird die Genauigkeit der Gleitkommazahl sehr wichtig. Bei der Konvertierung zwischen verschiedenen Dateiformaten müssen diese Unterschiede in Betracht gezogen werden.

Einige Dateiformate enthalten nur Punktinformationen (xyz-Koordinaten), während andere mehr Informationen hinzufügen wie Farbe und Reflexionsinformation, Flächennormalenvektoren, Scannerposition usw. Allgemein verwendete Formate, um Punktwolken zu speichern, sind:

DXF: *AutoCad* Format;

PTX: geordnetes Textformat von *Leica*, das xyz-Koordinaten, Reflexionsvermögen und Farbinformation, manchmal auch die Scanposition enthält;

PTS: nicht geordnetes Textformat von *Leica*, das xyz-Koordinaten, Reflexionsvermögen und Farbinformationen enthält;

XYZ: nicht geordnetes Textformat das xyz Koordinaten enthält;

XYZRGB: nicht geordnetes Textformat, das xyz Koordinaten und Farbwerte (RGB) für jeden Punkt enthält;

Laserscans enthalten viel mehr Daten als oft in einem Projekt tatsächlich nötig sind; davon kann häufig zu einem späteren Zeitpunkt in einem anderen Projekt Gebrauch gemacht werden. Deshalb ist es wichtig, die Daten zu archivieren und sie für einen längeren Zeitraum zugänglich zu halten. Das Archivieren als solches ist zu einer wichtigen Sache geworden, nicht nur beim Laserscanning.

Wichtig beim Archivieren ist das Hinzufügen von Meta-Daten, um zu wissen, was gescannt und wie es gespeichert oder bearbeitet worden ist. Gemäß dem English Heritage [29] sollten z. B. für Baudenkmäler die Metadaten in Scan-, Projekt-, Registrierungsmetadaten und in Kontrollinformationen unterteilt werden.

### **Scan-Metadaten:**

Dateiname der Rohdaten;

Aufnahmedatum;

Benutztes Scansystem (Seriennummer) Hersteller;

Name des Baudenkmals;

Nummer des Baudenkmals (falls bekannt);

Vermessungsnummer (falls bekannt);

Scannummer (eindeutige Scan-Nummer dieser Vermessung);

Gesamtanzahl der Punkte;

die Punktdichte auf dem Objekt (mit dem Referenzbereich). Wetter während des Scans (nur bei Außenscans);

der Dateiname eines Bildes – der Dateiname sollte derselbe sein wie der Dateiname der Rohdaten;

### **Projekt Metadaten:**

Dateiname(n) der Rohdaten;

Aufnahmedatum (Monat und Jahr);

Benutzte Scansystem(e) (mit Seriennummer(n) des Herstellers);

Name des Herstellers;

Baudenkmalname und Nummer (falls bekannt);

Vermessungsnummer (falls bekannt);

Nummer der einzelnen Scans;

Scannummer aller Scans;

Gesamtanzahl der Punkte;

Dateiname der Kontrolldaten;

Beschreibung der Registrierungsmethode (z. B. "Alle Scans registriert auf ein lokales Ortsraster mithilfe von Zielmarken.");

Ein Register (Index) zeigt die gesammelten Daten mit den bezeichneten einzelnen Scanpunkten;

Das Wetter während der Vermessung (nur Außenscans);

Jede Scanner spezifische Information;

### **Registrierungsinformationen (für jede Scanposition):**

Verschiebung (Translation) in der xyz-Achse; ist notwendig, um vom Scannerkoordinatensystem (Scanursprung) in die Scanposition zu transformieren;

Drehung um die xyz-Achse. Dies sollte in der Reihenfolge x, y und z ausgeführt werden;

### **Kontrollinformation:**

Punkt ID, X, Y, Z,  $\sigma_{DX}$ ,  $\sigma_{DY}$ ,  $\sigma_{DZ}$ , Kommentar (optional);

Die Datenträger und das Format, in dem die Daten für den späteren Gebrauch gespeichert werden, bestimmen darüber, ob die Daten noch in 10 oder sogar in 50 Jahren gelesen werden können. Heutige Datenträger wie externe Festplatten, CD-ROMs, DVDs oder sogar BlueRay bieten zwar die Möglichkeit, große Datenmengen zu speichern, aber ihre Lebenszeit ist ungewiss. Deshalb ist es notwendig, wenn deren Lebenszeit fast erreicht ist, Backups von den Backups zu machen. Das Format sollte so einfach wie möglich sein (z. B. Textdateien) und soviel Information wie möglich enthalten.

## **5. Tutorial zur Denkmalpflegeanwendung: Kirche St. James (präventive Bestandsaufnahme)**

### **5.1. Einführung und technische Information**

Dieses Tutorial erklärt das Vorgehen bei der Aufnahme von komplexen Gebäuden mittels terrestrischer Laserscanner. Zudem wird die Verknüpfung von Innen- mit Außenaufnahmen behandelt. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Registrierungsphase und auf der Modellierungsphase in 2D und 3D mit Hilfe zusätzlicher Software.

### **5.2. Problembeschreibung**

Die *Kirche St. James* befindet sich in Leuven, Belgien. Der Baubeginn des Westturms der Kirche geht auf das Jahr 1220 zurück. Während mehrerer, aufeinander folgender Bauphasen wurde die romanische Kirche durch Bauteile im frühgotischen Stil erweitert und ersetzt. Das hölzerne Dach der Mittel- und Seitenschiffe wich einem gemauerten Gewölbe. Zusätzliche Strebebögen verliehen der Kirche mehr Stabilität. Die Kirche misst in der Länge 62 Meter, in der Breite 38 Meter und die Höhe beträgt 28 Meter bis zum Dachfirst (ohne Turm).

Da sich das Bauwerk auf einem ehemaligen Moor befindet ist die Tragfähigkeit des Untergrundes begrenzt und in der Vergangenheit traten differentielle Setzungen auf. Deshalb mussten immer wieder Restaurierungsarbeiten durchgeführt werden. 1963 wurde jedoch beschlossen, die Kirche wegen auftretender starker Risse und der Gefahr eines möglichen Einsturzes endgültig zu schließen. Über die Jahre wurden zahlreiche Erhaltungsmaßnahmen ergriffen, um den Verfall der Kirche zu stoppen bzw. zu verlangsamen. So wurden z. B. Stützgerüste im Inneren aufgestellt. Im Jahre 1995 schließlich beschloss die Stadt Leuven die Kirche als Ganzes zu restaurieren und sie in ihren Originalzustand zurück zu versetzen. Die Kirche soll zukünftig als multikultureller Raum verwendet werden.

Bevor mit Restaurierungsarbeiten an der Kirche begonnen wird, sollten einige Punkte beachtet werden:

- Die Kirche wurde sehr oft und über viele Jahre hinweg durch Ergänzungen, Renovierungen und durch Ersetzen von Teilen des Gebäudes verändert. Es bedarf einer sorgfältigen Vermessung um genaue und aktuelle Bestandspläne und Querschnitte zu erhalten. Ihre Geometrie soll schlussendlich als 2D-Zeichnung vorliegen.
- Um den gegenwärtigen statischen Zustand des Gebäudes abschätzen zu können, insbesondere die Gewölbe und einige Teile der Wände, welche sich im Laufe der Jahre verformt haben können, ist es notwendig, diese Bauelemente zu vermessen. Anschließend können diese dann mit ihrer geometrischen Idealform verglichen werden. Weiters wird ein volles 3D-Modell dieser Bauelemente gefordert, das in einem späteren Arbeitsschritt auch für die Finiten-Elemente-Methode (FEM) verwendet werden kann. Durch den Gebrauch von solchen Datensätzen können angemessene strukturelle Unterstützung und/oder Verstärkungstechniken gewählt werden, die die Kirche vor weiterem Verfall schützen.
- Die Fundamente der Kirche sollen ebenfalls überprüft und verstärkt werden. Weitere Setzungen sollen somit vermieden werden und die Struktur des Gebäudes für die Zukunft gesichert werden. Diese schwierige Aufgabe wird von Bauingenieuren mit Hilfe von Hochpräzisionsgeräten bewältigt.

In der Vergangenheit traten mehrmals strukturelle Probleme der Kirche auf. Diese bedingten Um-, Zu- und Neubauten:

- 1484-1485: Errichtung des Glockenturms aus Mauerwerk und Holz über der Vierung (Kreuzung zwischen Hauptschiff und Querschiff); Abbruch 1735 wegen zunehmenden Verfalls;

- 1485-1488: Wiederaufbau des gemauerten Gewölbes im nördlichen und südlichen Seitenschiff;
- 1534-1535:
  - Errichtung einer zusätzlichen Ebene mit Fenstern im Hauptschiff;
  - Errichtung von Abstützungen und Widerlager mit Strebebögen;
  - Entfernung des hölzernen Tonnengewölbes;
  - Errichtung des gemauerten Gewölbes im Hauptschiff mit Bögen aus Gobertangestein;
- 1806: Verstärkung der Gewölbepfeiler mit Stahlringen;
- 1905: Ersuchen um Sicherung und Verstärkung des Bauwerks nach einer lokalen Inspektion und infolge größerer Rissbildung in der Westwand des nördlichen Querschiffs (nach Bemalung aus 1872);
- 1929 und 1936: die noch bestehenden Strebebögen sind in schlechtem Zustand;
- 1950-1953: Reparatur der Kriegsschäden (Dach, Fenster und Stuckdecke);
- 1956: Hauptschiff und zwei Seitenschiffe sind 30 cm aus dem Lot. Zwei Jahre später wurde eine weitere Zunahme um 10 cm gemessen;
- 1963: die Kirche wurde geschlossen;
- 1965-1971: Erste Restaurierungsphase 1961-1974 (Demontage des Gewölbes im Seitenschiff; Abstützen der Hauptpfeiler, Abstützen des Seitenschiffes);
- 2000: Demontage der Strebebögen;
- 2005: Konsolidierungsmessungen: Instandsetzung der Dachbedeckung (Wassereintritt), Renovierung des Kanalisationssystems;

### **5.3. Aufnahmeplanung**

#### **5.3.1. Zweck und Zielsetzung**

Vor der Restaurierung der Kirche und ihrer Umfunktionierung in einen multikulturellen Raum werden eine Vielzahl an ingenieurtechnischen Untersuchungen von verschiedenen Unternehmen und Personen aus den unterschiedlichsten Disziplinen durchgeführt, wobei alle Basisinformationen wie auch die Resultate räumlich mit der Geometrie des Gebäudes verbunden sind. Damit nicht für jede Studie ein eigener Vermesser beauftragt werden muss, um den gerade benötigten Teil der Kirche zu vermessen, wird durch Laserscannerdaten ein zentraler geometrischer Datensatz zur Verfügung gestellt. Ausgehend von diesem kann sich jede/r Ingenieur/in die benötigten Informationen extrahieren.

Das Ziel dieses Tutorials ist es, eine Anleitung für eine genaue Vermessung der ausgedehnten vorhandenen Strukturen zu geben.

#### **5.3.2. Projektanforderungen**

- Die vom Vermessungsteam zu erbringenden Leistungen bestehen aus:
- 2D Bestandspläne, Ansichten und Schnitte der Kirche:
  - Die Innen- und Außenaufnahmen des Gebäudes sollten darin, mit der bei Bauzeichnungen üblichen Präzision von +/- 1 cm, beinhaltet sein.
  - Um sicher zu gehen, dass die komplette Struktur der Kirche klar aus den Zeichnungen hervorgeht, wird vorgeschlagen, zumindest drei Grundrisse auf verschiedenen Höhen

(1.20m, 8.70m, 13.00m und wenn möglich 19.00m), 2 Schnitte (einen entlang der Hauptachse und einen durch das Querschiff) und 3 Ansichten jener Fassaden, die nicht von Bäumen verstellt sind, zu erstellen.

- Ein 3D Oberflächenmodell des gesamten gemauerten Gewölbes mit sehr hoher Genauigkeit (+/- 5mm);
- Ein 3D Oberflächenmodell der gesamten Seitenwand des süd-östlichen Flügels des Querschiffes, zur Kontrolle des Neigungswinkels;
- Eine “walk-through” Animation (virtuelle Besichtigung) des Bauwerks für touristische Zwecke

### **5.3.3. Objektbeschreibung**

Da sowohl der Innenraum als auch der Außenbereich der Kirche gescannt werden soll, erfolgt die Objektbeschreibung in zwei Teilen.



Abbildung 52: Photo der Kirche St. James in Leuven, Belgien

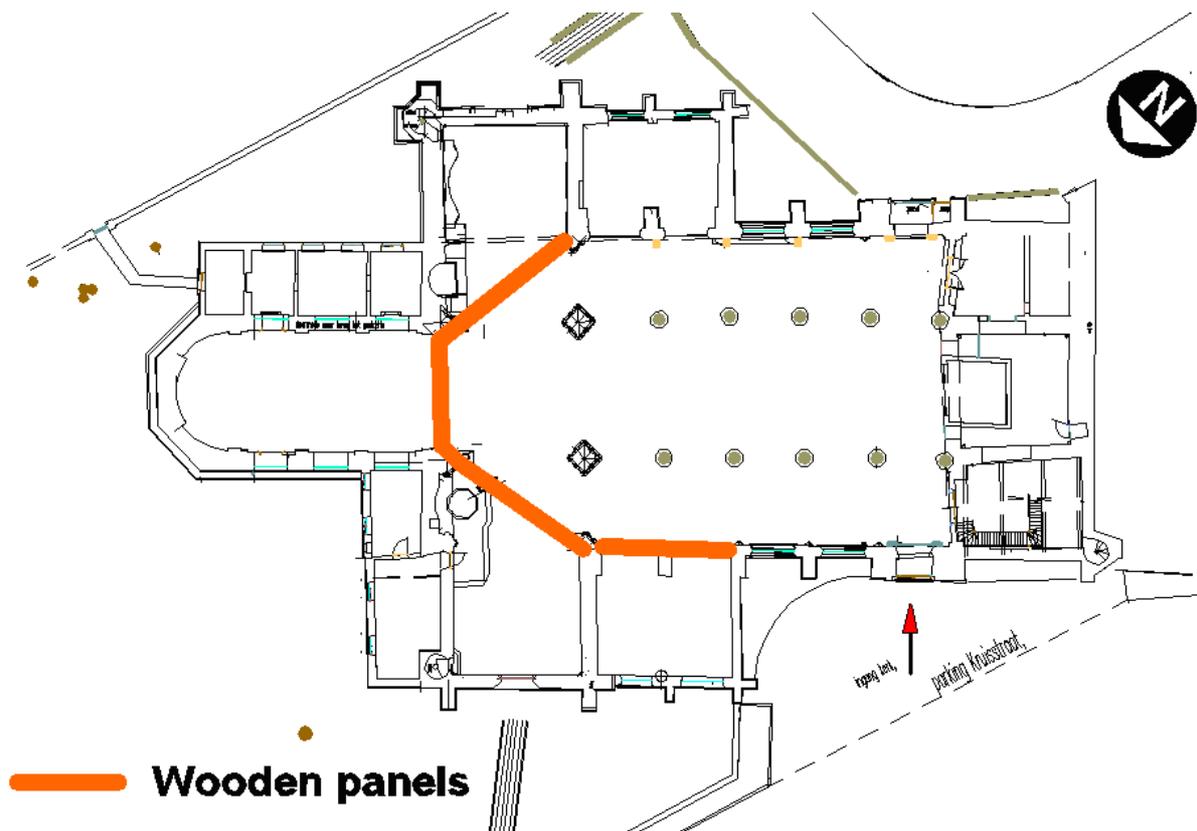


Abbildung 53: Grundriss mit Darstellung der Sichtbehinderung durch Holzwände

#### 5.3.3.1. *Innenraum*

- Der Innenraum der Kirche ist leer und es sieht ein bisschen aus, wie auf einer Baustelle. Der Boden ist in sehr schlechtem Zustand und Stützgerüste versperren die Sicht auf die dahinterliegenden Bauteile.
- Die Sicht vom Hauptschiff auf die niedrigeren Teile des Gewölbes (Hauptschiff-Querschiff, Hauptschiff-Chor) ist durch hölzerne Wände versperrt.
- In der Kirche befinden sich mehrere kleine Nebenräume (siehe Grundriss). Zu deren Vermessung ist ein Laserscanner nicht nötig.
- Beim Hintereingang der Kirche steht ein Stromanschluss zur Verfügung. Damit können Laptop und Laserscanner mit Strom versorgt werden.



Abbildung 54: Panoramaaufnahme des Innenraumes der Kirche St. James

### **5.3.3.2. Außenbereich**

- Die Kirche befindet sich im Zentrum der Stadt, in der Nähe eines öffentlichen Parkplatzes.
- Zahlreiche Autos werden vor den Eingängen (Hintereingang und Vordereingang) abgestellt; Diese stellen (Sicht-) Behinderungen dar.
- Vor dem Eingang der Kirche befindet sich eine stark benutzte Straße.
- Die Sicht auf die nordöstliche Fassade (Chor) wird von unzähligen Bäumen versperrt.
- Die südwestliche Fassade ist nur über einen schmalen Weg zugänglich. Dieser Weg ist nicht öffentlich zugänglich.
- Es gibt keine Stromversorgung.

### **5.3.4. Auswahl der richtigen Messtechnik**

#### **5.3.4.1. Anpassung an den Zweck**

Bei der Wahl der richtigen Messtechnik, sollten eine Anzahl von Bedingungen berücksichtigt werden.

Zunächst können durch die komplexe Geometrie der Kirche Annahmen über Kosten, Zeit und Präzision der verfügbaren Messtechniken getroffen werden. In diesem Fall, haben wir es mit einem Gebäude zu tun, das innen wie auch außen vermessen werden soll. Die Ergebnisse der Messungen sollten im gleichen Koordinatensystem vorliegen. Das bedeutet, dass ein Referenzsystem benötigt wird, das die Außenmessungen mit denen des Innenraumes verbindet. Wir schlagen vor, für diesen Zweck eine Totalstation zu verwenden, um an- und abgeschlossene Polygonzugmessungen durchzuführen. Dieses erlaubt uns, die Lagegenauigkeit der einzelnen Polygonpunkte durch Fehlerausgleichsrechnung zu erhöhen. Von jedem Polygonpunkt aus messen wir die Koordinaten mehrerer Passpunkte (markante Details auf dem Gebäude oder künstlich angebrachte Passpunkte), über die anschließend alle Scans verbunden werden können.

In den Anforderungen werden 2D Bestandspläne und Schnitte verlangt. Die Kirche als großer, komplexer Baukörper, soll mit ausreichend vielen Messungen von so vielen Positionen als nötig

vermessen werden. Bauwerke bestehen in der Regel aus verschiedenen regulären geometrischen Formen. Da die Kirche aber teilweise im romanischen und teilweise im gotischen Stil erbaut wurde, enthält sie viele irreguläre, organische Formen. Diese sind mit traditionellen Messtechniken (z. B. Handmessung, Totalstation) sehr schwierig zu vermessen. Eine weitere Schwierigkeit stellt die hohe Decke dar. Deshalb sind vorzugsweise berührungsfreie Messtechniken anzuwenden, da dabei die Errichtung eines Gerüsts entfällt. Zudem sind reflektorlose Distanzmesstechniken meist präziser und für große Bauwerke besser geeignet.

Zu guter Letzt wird ein detailgenaues und vollständiges 3D-Modell von bestimmten Teilen der Kirche gefordert. Es wird für bauwerkliche Berechnungen, z. B. die Finite-Elemente-Methode (FEM), benötigt. Das bedeutet, dass die anzuwendende Messtechnik optimal auf die Erfassung dreidimensionaler Objekte abgestimmt sein soll. Genauigkeit und Auflösung spielen hierbei eine wichtige Rolle, da eine detailgenaue Objektvermessung die Grundvoraussetzung ist, um ein genaues 3D-Modell der Gebäudeelemente erzeugen zu können.

Unter Berücksichtigung dieser Erwägungen, wählten wir zur Erfüllung der vorgestellten Aufgabe die Methode des Laserscannings als die passendste Messtechnik. Laserscanning ist eine reflektorlose Messtechnik, die über eine hohe Genauigkeit und Auflösung verfügt. Die produzierten Daten beinhalten ausreichende Informationen, um 2D-Bestandpläne, Schnitte und exakte 3D-Modelle, auch von irregulären, organischen Formen, herzustellen. Zur Vermessung des Innen- und des Außenbereichs werden künstliche Passpunktobjekte verwendet. Die Einmessung dieser Passpunkte erfolgt mittels Totalstation, wobei je nach räumlicher Anordnung diese ausgehend von einem an-/abgeschlossener Polygonzug eingemessen oder im Idealfall über eine geodätische Netzmessung bestimmt werden. Damit ist es möglich die Messungen der einzelnen Scannerstandpunkte in ein einheitliches Referenzsystem zu transformieren.

Anschließend können die Daten auch für touristische Zwecke oder zur Präsentation der durchgeführten Messungen genutzt werden. Weitere Möglichkeiten bestehen in der Überwachung der Deformationen von bestimmten Bauwerksteilen (z.B. der Gewölbebögen), um die Sicherheit des wieder benutzten Bauwerks in der Zukunft zu gewährleisten.

#### **5.3.4.2. Risikominimierung durch den Gebrauch von Laserscanning**

Wird Laserscanning zum Vermessen von Gebäuden dieser Art verwendet, können Risiken, die beim Vermessen mit anderen Messtechniken unweigerlich auftreten würden, vermieden werden.

Risiko für das Bauwerk selbst:

- Laserscanning ist eine reflektorlose und berührungsfreie Messtechnik. Beschädigungen am Bauwerk werden so vermieden.
- Aus dem gleichen Grund, benötigen wir keine Gerüste um die Decke zu vermessen. Dies ist von Vorteil, da die Gerüste erst errichtet werden müssten und sie eventuell die Bausubstanz beschädigen könnten.
- Laserscanning stellt exakte Daten mit hoher Auflösung zu Verfügung, die für die Erstellung eines 3D-Modelles von Bauwerksteilen benutzt werden können. Diese Daten minimieren Fehler bei zukünftigen Konstruktionen.

Risiko für den Vermesser:

- Da keine Gerüste benötigt werden, ist der Vermesser nicht den Risiken ausgesetzt, die sich beim Arbeiten in großer Höhe ergeben.

### 5.3.5. Laserscanner Hardware

Da das Scannen einer Kirche dieser Größe ein komplexer Prozess ist, wird die Aufgabe in zwei Teilaufgaben gegliedert: Innenraumvermessung und Außenraumvermessung der Kirche. Beide Teilaufgaben haben verschiedene Anforderungen, was das Ausstattungsmaterial des Scanners betrifft. Für die Vermessung wurde aufgrund der zeitlich begrenzten Verfügbarkeit des Scanners und eines begrenzten finanziellen Budgets ein Zeitraum von zwei Tagen veranschlagt.

#### 5.3.5.1. Innenraum

Um das Innere der Kirche zu vermessen, brauchen wir einen Scanner mit folgenden Spezifikationen:

- der Scanner soll ein volles Panorama scannen können (360 Grad);
- die maximale Messstrecke beträgt um die 20 bis 30 Meter;
- Wegen der zeitlichen Begrenzung ist ein sehr schneller Scanner von Vorteil, der viele Punkte in der Sekunde abtastet und trotzdem über eine adäquate Auflösung, zum Erfassen wichtiger Details des Bauwerks, verfügt.
- Die Genauigkeit sollte sehr hoch sein (5 mm), da die Daten für bauliche Sicherheitsberechnungen zur Analyse mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) herangezogen werden.
- Die Innenraummessungen werden durch die Witterung (Lufttemperatur, Regen, Wind) nicht beeinträchtigt und deswegen werden sie in der Projektdurchführungsplanung nicht miteinbezogen.
- Die elektronischen Geräte können mit dem vorhandenen Stromanschluss betrieben werden. Für Batterien muss also nicht gesorgt werden.

Betrachtet man die auftretenden maximalen Messstrecken, die Genauigkeit und den Zeitrahmen von zwei Tagen ist ein Phasenscanner (2007) die beste Wahl für die Erledigung dieser Arbeit. In unserem Fall, wählten wir das Modell *Leica HDS 4500*, einen Phasenscanner (Technische Spezifikationen siehe unterer Kasten). Zur schnellen Abwicklung der Messungen wurde an das Scannerstativ ein Board für den Laptop montiert. Das Stativ selbst wurde auf einer mobilen Plattform befestigt. Ein schneller und einfacher Wechsel zwischen den Scannerpositionen wurde so möglich.



LASER SCANNING SYSTEM	
<b>TYPE</b>	Phase-shift
<b>COLOR</b>	Red (visible)
<b>LASER CLASS</b>	Class 3R (IEC EN60825-1)
<b>RANGE</b> (optimal effective)	1m to 25m
<b>MINIMAL RANGE</b>	0.1m (low output power mode)
<b>MAXIMUM RANGE (25M MODEL)</b>	25.2m (default output power mode)
<b>MAXIMUM RANGE (53M MODEL)</b>	53.5m (default output power mode)
<b>SCAN RATE</b>	Up to 500,000 points/second*
<b>SCAN DENSITY (RESOLUTION)</b>	
Spot size	5mm at 10 meters, 8.5mm at 25 meters

SYSTEM PERFORMANCE (25M AMBIGUITY RANGE MODEL)		
<b>SINGLE POINT ACCURACY***</b>		
<b>POSITION</b>	<b>AT 10M</b>	<b>AT 25M</b>
20% reflectivity (dark grey)	≤ 6mm	≤ 13.5mm
100% reflectivity (white)	≤ 6mm	≤ 12.8mm
<b>DISTANCE</b>		
20% reflectivity (dark grey)	≤ 3mm	+180ppm*
100% reflectivity (white)	≤ 3mm	+64ppm*
<b>ANGLE</b>		
Horizontal	350 micro-radians	
Vertical	350 micro-radians	
<b>MODELED SURFACE PRECISION**</b>	<b>AT 10M</b>	<b>AT 25M</b>
20% reflectivity (dark grey)	≤ 1.6mm	≤ 4.4mm
100% reflectivity (white)	≤ 1.0mm	≤ 1.8mm
<b>TARGET ACQUISITION ACCURACY<math>\phi</math></b>	≤ 2mm	≤ 3.5mm
<small>* PPM value equals the range noise standard deviation</small>		
<small>** Data acquired in default mode, subject to modeling methodology</small>		
<small>*** at 125 KHz data rate</small>		
<small><math>\phi</math> Algorithmic fit to black and white HDS targets</small>		

Abbildung 55: Leica HDS 4500 Laserscanner mit Phasenvergleichsverfahren [27]

### 5.3.5.2. Außenraum

Für die Außenraummessungen wird ein anderer Scanner benötigt.

- Panoramaaufnahmen werden nicht gefordert (die Umgebung braucht nicht gescannt werden). Wegen der Größe des Gebäudes sollte es aber dennoch möglich sein, mit einem weiten Winkel scannen zu können (ca. 100 Grad horizontal und 60 bis 70 Grad vertikal).
- Der Scanner soll Messstrecken bis 100 Meter scannen können.
- Aufnahmen mit hoher Genauigkeit sollten möglich sein, da die Daten zur Berechnung der Neigung von bestimmten Wandpartien benutzt werden.
- Die Auflösung des Scanners ist weniger wichtig, da fast keine fein detaillierten Strukturen im Außenbereich aufgenommen werden. Dennoch wird eine entsprechende Auflösung angestrebt, um Diskontinuitäten der Oberfläche mit hoher Genauigkeit modellieren zu können.
- Messungen im Außenbereich werden durch die klimatischen Bedingungen Lufttemperatur, Wind und Regen beeinflusst (Temperaturspanne 0 – 20°C).
- Ein direkter Stromanschluss ist nicht vorhanden. Elektronische Geräte müssen mit Batterie betrieben werden.

Zur Zeitpunkt der Messung (2007) wurde das Gerät *Leica HDS3000* mit Impulslaufzeitmessung gewählt.

LASER SCANNING SYSTEM		SYSTEM PERFORMANCE	
<b>TYPE</b>	Pulsed; proprietary microchip	<b>SINGLE POINT ACCURACY*</b>	
<b>COLOR</b>	Green	Position	6mm
<b>LASER CLASS</b>	Class 3R (IEC 60825-1)	Distance	4mm
<b>RANGE</b>		Angle (horizontal)	60 micro-radians
Optimal effective range	1m-100m	Angle (vertical)	60 micro-radians
To 10% reflectivity targets	Up to 100m (typical)	<b>MODELED SURFACE PRECISION**</b>	2mm
<b>SCAN RATE</b>	Up to 1800 points/second*	<b>TARGET ACQUISITION ACCURACY†</b>	1.5mm
<small>* Maximum scan rate dependent on scan resolution and selected field-of-view</small>		<b>DATA INTEGRITY MONITORING</b>	Periodic accuracy self-checking during operation and at startup
<b>SCAN DENSITY (RESOLUTION)</b>		<small>* All specifications shown @ 1m - 50m range</small>	
Spot size	≤ 6mm from 0 - 50 meters	<small>** Subject to modeling methodology</small>	
Selectability	Independently selectable vertical and horizontal point-to-point measurement spacing †	<small>† Algorithmic fit to planar HDS targets</small>	
Point Spacing	Select by total number of points per unit area or minimum distance between points (at specified range) †		
Maximum Sample Density	1.2mm †		
Scan row (horizontal)	20,000 points/row, maximum †		
Scan column (vertical)	5,000 points/column, maximum †		



Abbildung 56: Leica HDS3000 Laserscanner mit Impulslaufzeitmessverfahren [27]

## 5.4. Messdatenerfassung

Bevor mit den Messungen begonnen wird, müssen die verschiedenen Positionen des Scanners sorgfältig geplant werden. Wie in einem vorherigen Kapitel bereits beschrieben, sollte mit so wenigen Scanneraufstellungen als möglich so viel wie möglich vermessen werden.

### 5.4.1.1. Innenraum

Zuerst wird das Gebäude in große Einheiten unterteilt. Dabei sollen die hauptsächlichen Sichtbehinderungen, wie die Holzwände und die Säulen zwischen dem Mittelschiff und den Seitenschiffen, die zudem von Gerüsten verstellt sind, berücksichtigt werden. Daraus erhalten

wir acht verschiedene Zonen, wobei die Deckenhöhe jeder Zone annähernd gleich hoch ist und eine freie Sicht innerhalb der Zone gewährleistet werden kann.

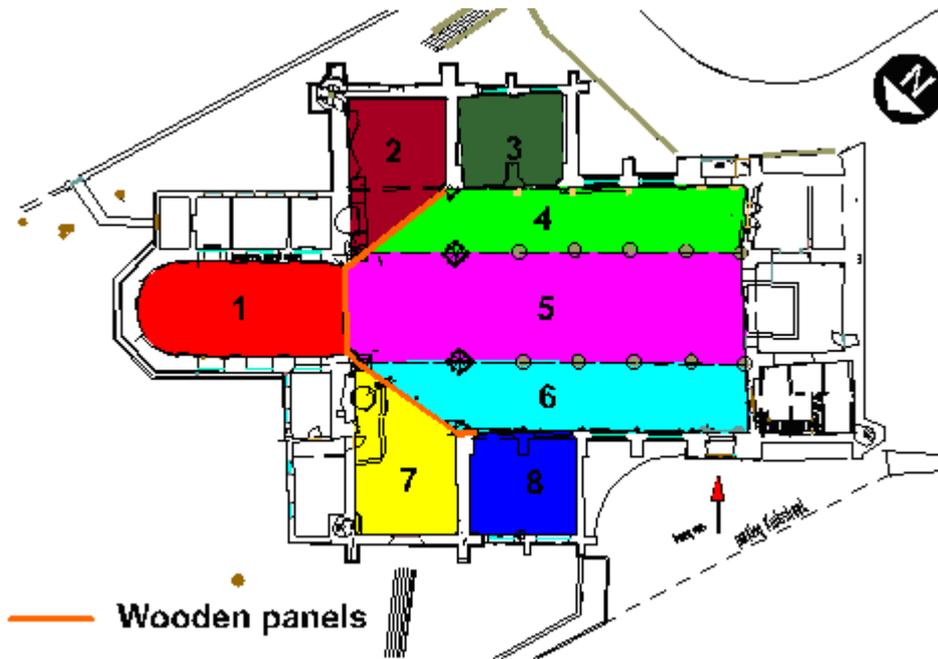


Abbildung 57: Zonen nach Sichtbehinderungen aufgeteilt

*Aufgabe: Kopieren Sie die Skizze und versuchen Sie die Scannerpositionen zu planen.*

Eine optimale Konfiguration hat mindestens eine Aufstellung in jeder dieser Zonen. Danach wird nach kleineren Objekten Ausschau gehalten, die eventuell die Sicht des Scanners auf das Bauwerk von der jeweiligen Position aus behindern könnten. Besteht solch eine Sichtbehinderung, sollten zusätzliche Aufstellungen hinzugefügt werden. Versuchen Sie Scanpositionen so hinzuzufügen, dass die Überlappung zwischen den Scans nicht mehr als 50% beträgt. Ausgenommen sind Scans, mit denen verdeckte Bauwerksteile aus anderen Scanaufnahmen erfasst werden sollen.

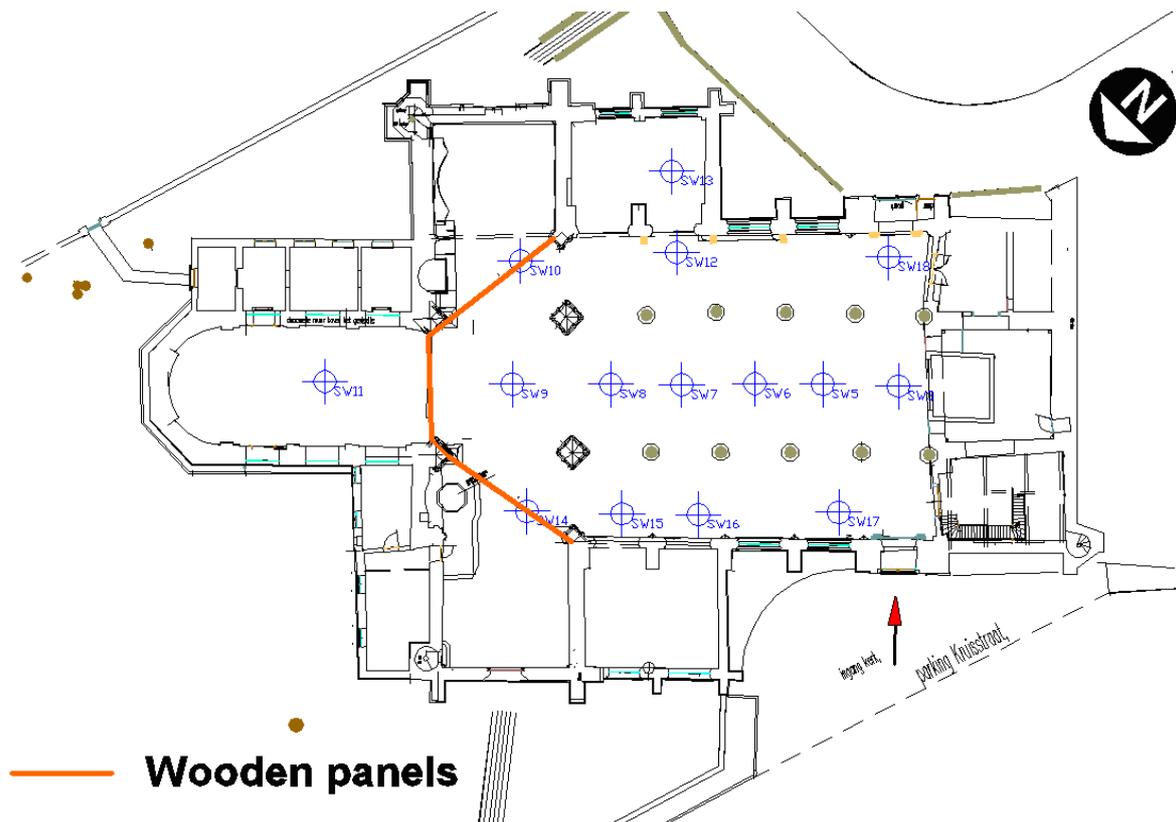


Abbildung 58: Übersicht über die Scanpositionen im Inneren der Kirche

Abbildung 58 zeigt, wie die Aufstellung von einem Vermesser geplant wurde. Von diesen Positionen wurde tatsächlich vor Ort gescannt. Natürlich ergeben mehr Aufstellungen eine bessere bzw. vollständigere Abdeckung; der begrenzte Zeitrahmen jedoch ließ dies nicht zu.

Die Software *Cyclone*, mit der wir uns in Kapitel 1.6 befassen, verwendet die Bezeichnung *ScanWorld* für jede Scanneraufstellung. Damit ist eine neue physische Position und Orientierung des Scanners gemeint.

Überblick über die Scanpositionen im vorliegenden Projekt:

- *ScanWorlds* 3, 5, 6, 7, 8 und 9 wurden von jedem Mittelpunkt eines Gewölbes aus aufgenommen, um eine volle Abdeckung mit hoher Überlappung der Gewölbe zu bekommen. Diese starken Überlappungen bedingen eine bessere Genauigkeit, da mehrere Punkte des gleichen Gebietes gescannt wurden.
- *ScanWorlds* 10 und 14 wurden von der Mitte einer Öffnung in den hölzernen Wänden aus aufgenommen, um eine möglichst hohe Abdeckung des Querschiffes zu bekommen, während zusätzlich auch noch ein Teil des Hauptschiffes im Scan enthalten ist. Das erleichtert die Registrierung, da mit Hilfe der Passpunkte eine Punktwolke-zu-Punktwolke Registrierung erfolgen kann.
- Vom Chor wurde nur ein Scan mit hoher Auflösung gemacht (*ScanWorld* 11). Dieser war ausreichend für die Abdeckung des gesamten Raumes. Die Position des Scanners wurde so gewählt, dass der Scanner auch Teile des Kreuzgewölbes aufnehmen konnte (gebildet durch das Haupt- und das Querschiff). Diese Überlappung kann in der später erfolgenden Registrierung von Hilfe sein (siehe Kapitel 1.6.1.7).
- *ScanWorlds* 12, 15, 16, 17 und 18 wurden zur vollständigen Erfassung der Seitenschiffe gemacht. Die exakten Positionen von *ScanWorld* 12, 15 und 16 wurden so gewählt,

dass das Seitenschiff abgedeckt wurde und dabei auch Teile des Querschiffes mit gescannt wurden.

#### 5.4.1.2. Außenaufnahmen

Da große Teile der nördlichen und nordöstlichen Seite der Kirche fast gänzlich von Büschen und Bäumen verdeckt sind und auf Grund des engen Zeitrahmens entschlossen wir uns, diese Fassaden der Kirche nicht zu scannen. Der öffentliche Zutritt zu dem Bauwerk erschwerte die Aufstellung künstlicher Passpunkte. Neugierige Passanten veränderten manchmal den Standort einiger Passpunkte oder stahlen diese sogar. Deswegen entschieden wir, an einem Tag zwei oder drei Scans von verschiedenen Positionen aus mit künstlichen Passpunkten zu erstellen. Am nächsten Tag wurden dann noch einige zusätzliche Scans zwischen jenen des Vortages gemacht und diese dann unter Verwendung der Punktwolke-zu-Punktwolke Registrierung registriert.

*Aufgabe: Nehmen Sie die Skizze und planen Sie die Positionen des Scanners für den Außenbereich der Kirche.*

Abbildung 59 zeigt uns die Scannerkonfiguration (*ScanWorld*), die von den Autoren beim vorliegenden Projekt verwendet wurde. *ScanWorlds* 30, 32 und 31, sind Scans, die am ersten Tag gemacht wurden und Passpunkte beinhalten. *ScanWorlds* 33, 34, 35, 36 und 37 werden am zweiten Tag erstellt, und werden zu den anderen Scans durch Punktwolke-zu-Punktwolke Registrierung erfasst.

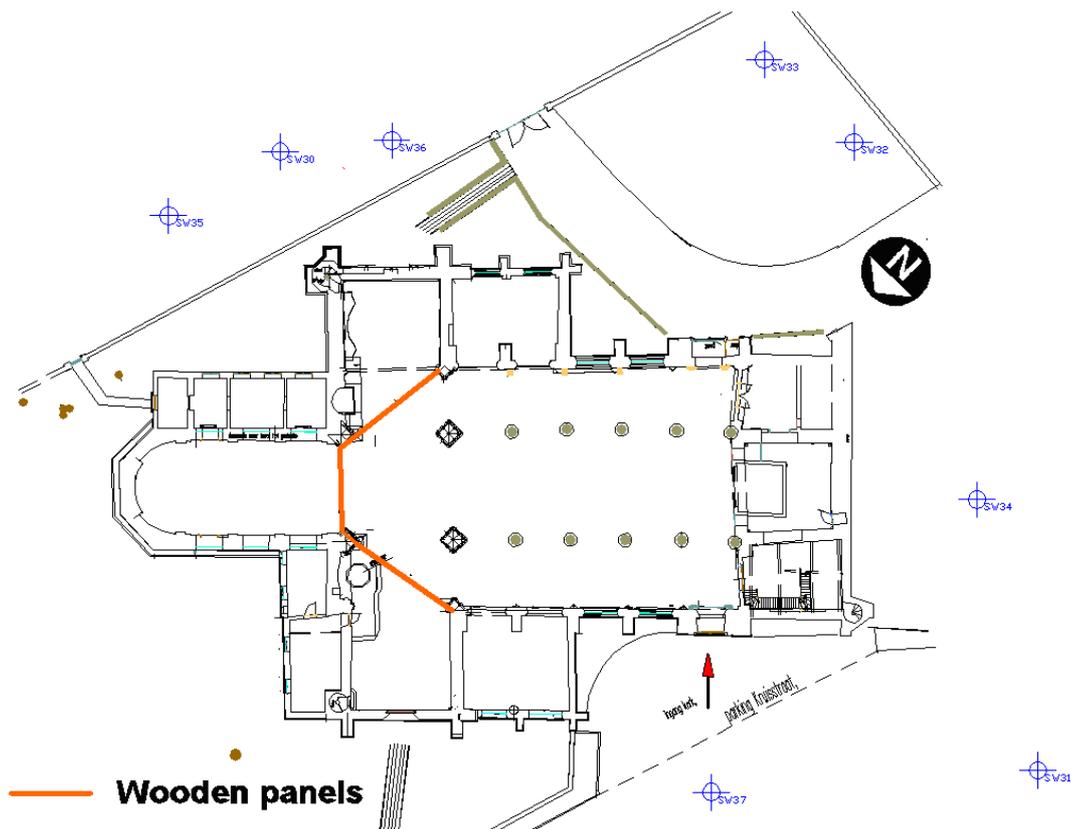


Abbildung 59: Überblick über die Scanpositionen zur Außenaufnahme der Kirche

#### 5.4.1.3. Passpunkte

Nicht nur die Position des Scanners ist wichtig, auch das Positionieren der Passpunkte. Wie bereits vorhin erwähnt, sollen folgende Hinweise berücksichtigt werden:

- Passpunkte sollten weit voneinander entfernt sein;

- Passpunkte haben unterschiedliche Höhen;
- Passpunkte sollten möglichst nicht in einer Linie angeordnet sein;
- Mindestens 3 Passpunkte sollten in jedem Scan vorhanden sein;

Um Innen- mit Außenscans zu verbinden und diese in das gleiche Koordinatensystem zu übertragen, müssen wir alle Passpunkte über eine Polygonzug- oder Netzmessung mit einer Totalstation einmessen und die Messfehler durch Fehlerausgleichsrechnung vermindern.

*Aufgabe: Versuchen Sie Ihre Skizze zu vervollständigen indem Sie Positionen für Passpunkte, unter Berücksichtigung der oben angeführten Hinweise, hinzufügen.*

Die untere Abbildung zeigt die endgültige Skizze, wie sie von einem Laserscanner-Anwender erstellt wurde. Sie beinhaltet alle Positionen des Scanners und der Passpunkte.

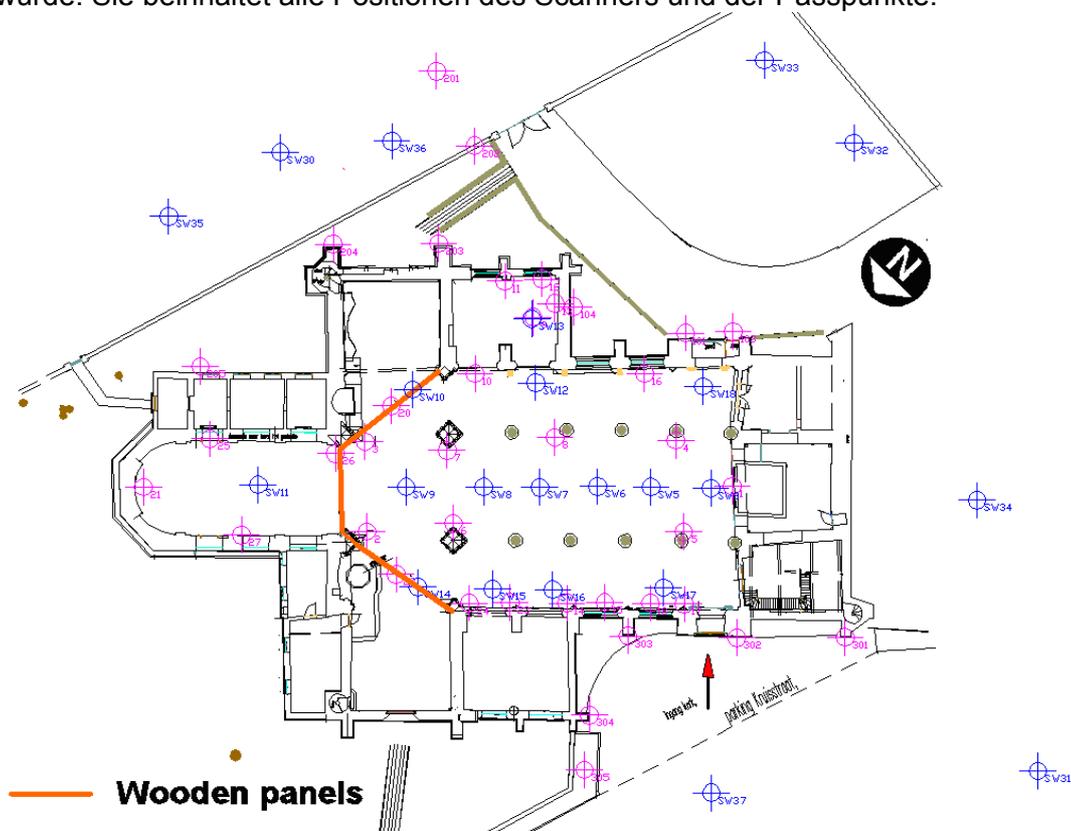


Abbildung 60: Überblick über alle Scanpositionen und der Passpunkte, wie sie von den Autoren vorgeschlagen werden

## 5.5. Datenaufbereitung

Während der Messdatenerfassung läuft manches nicht so wie geplant. Zum Beispiel wollten einige Besucher (Studenten und Professoren) eine Vorführung des Laserscanner Equipments während den Messungen. Einige Aufnahmen wurden zu Demonstrationszwecken gemacht. Bevor nun mit dem Aufnehmen der eigentlichen Daten fortgesetzt wurde, war es angebracht, die Scans, die eventuell mit Messrauschen behaftet sind (z. B. befanden sich Personen in der Sichtachse des Scanners oder sie erzeugten Vibrationen rund um den Scanner) zu löschen. Die davon betroffenen *ScanWorlds* (*ScanWorlds* 1, 2 und 3) wurden bereits aus dem Datensatz gelöscht.

Um die Scannerdaten in der Leica Software *Cyclone* bearbeiten zu können, müssen wir zuerst eine Verbindung zwischen der Scan-Datenbank, welche die Messungen enthält, und *Cyclone* herstellen.

- Starten von *Cyclone*
- Rechtsklick auf die Datenbank mit der Erweiterung (unshared) in der Serverliste *Servers* und den Befehl *Databases* auswählen

In der Dialogbox klicken Sie zuerst auf den Button *Add...* und dann auf den Button ... (rechts vom Feld *Database Filename*). Navigieren Sie zum Ordner mit der Datei *St.James Church – Tutorial Inside – start*. Wählen Sie die Datei \*.imp und drücken Sie den Button *Open*. Zurück im vorangegangenen Dialogfenster drücken Sie auf *OK* und auf den Button *Close*. Dies führt uns zurück zum *Cyclone Navigator*.

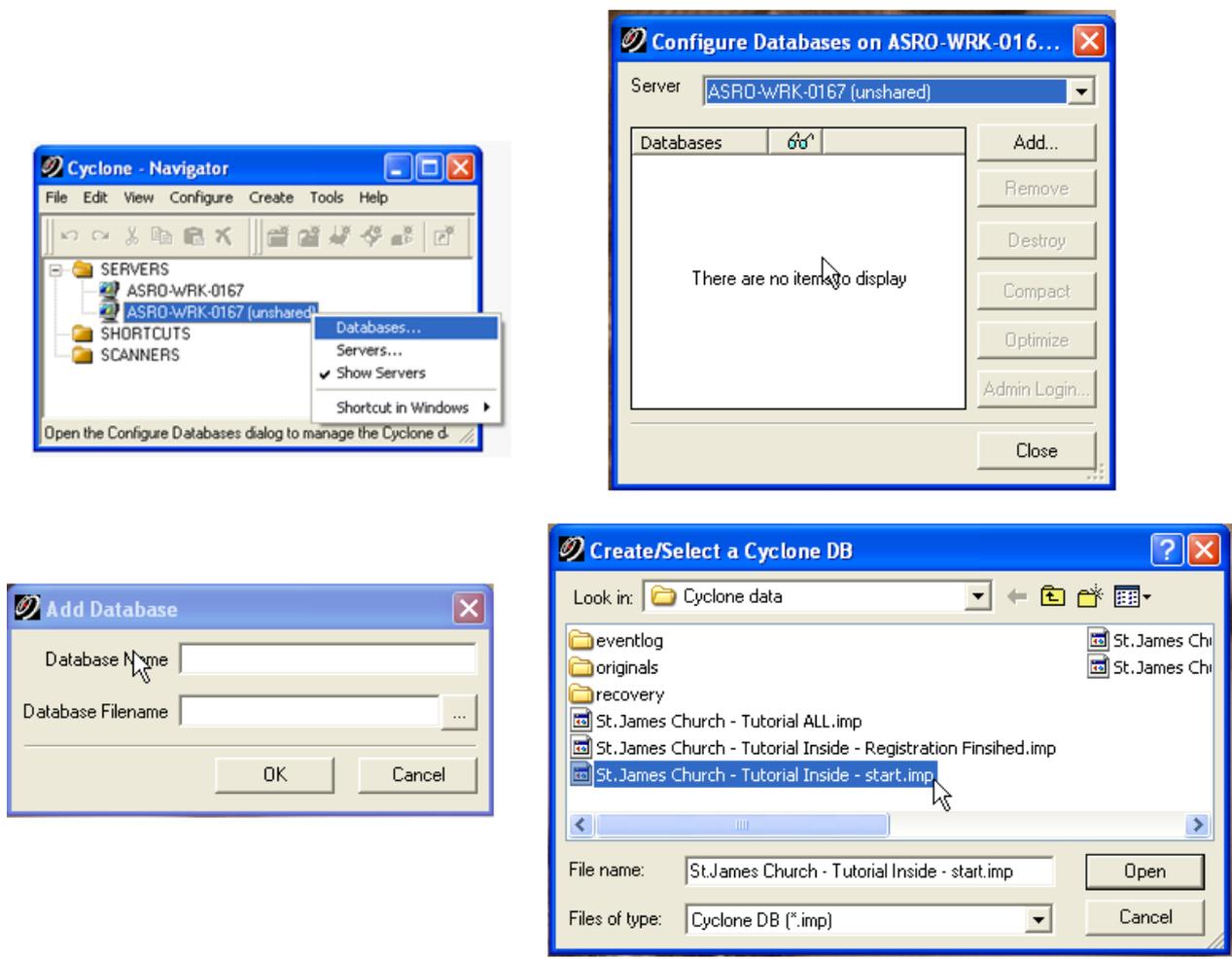


Abbildung 61: Laden einer Datenbank in Cyclone

*Cyclone* importiert die Datenbank und sie erscheint in der Datenbankliste im *Cyclone Navigator*. Um die Daten zu überprüfen, öffnen Sie die Datenbank indem Sie auf das + Symbol neben der jeweiligen Datenbank klicken. Dieser Befehl listet die Unterverzeichnisse auf. Jede einzelne Scanneraufnahme wird als *ScanWorld* angezeigt. Das sind Scans mit keiner bestimmten Orientierung oder koordinativen Beziehung zu anderen *ScanWorlds*. Jede *ScanWorld* besteht aus vier Teilen: *ControlSpace*, *ModelSpace*, *Scans* und *Images*. Das Verzeichnis *Images* enthält die mit der integrierten Kamera gemachten Bilder. Sie werden zur Auswahl des Messbereichs der Scanneraufnahme verwendet. Das Verzeichnis *Scan* beinhaltet jeden einzelnen Scan als RAW Daten. Hier werden auch Scans, die von derselben Position aber

mit unterschiedlichen Einstellungen gemacht wurden, getrennt abgespeichert. Die zwei wichtigsten Ordner sind *ControlSpace* und *ModelSpace*. Diese Ordner enthalten die Daten mit denen gearbeitet wird. Im *ControlSpace* befinden sich die RAW Scannerdaten. Der *ControlSpace* wird in allen Berechnungen verwendet, zum Beispiel in der Registrierung. Als Sicherheitsmaßnahme können die Daten im *ControlSpace* nicht verändert werden. Der Anwender muss zuerst die Änderung im *ModelSpace* anbringen und kann sie dann erst in den *ControlSpace* kopieren. Der *ModelSpace* stellt also eine Momentaufnahme des *ControlSpaces* dar. Man kann zahlreiche *ModelSpaces* von verschiedenen Zeitpunkten erzeugen.

## 5.6. Registrierung und Georeferenzierung

### 5.6.1. Registrierung des Innenraumes

Aus der Messdatenerfassung ergeben sich insgesamt 23 *ScanWorlds*: 15 vom Innenraum und 8 aus den Außenaufnahmen der Kirche.

*Anmerkung: Bei Verwendung des reduzierten Datensatzes sind nur 8 ScanWorlds der Innenaufnahmen verfügbar. Trotzdem kann das Tutorial nachvollzogen werden. Das Tutorial verwendet Screenshots aus dem vollen Datensatz die teilweise vom reduzierten abweichen. Stellenweise sind Einstellungsvariablen/Werte für den reduzierten Datensatz extra angeführt.*

Wir beginnen mit der Registrierung der Scans von dem Innenraum. Für das Registrieren des Innenraumes der Kirche verwenden wir verschiedene Registrierungstechniken: (siehe Video „*registration\_interior\_part1.avi*“)

Zuallererst verwenden wir eine Technik die Passpunkt-zu-Passpunkt Registrierung genannt wird. Vor dem Scannen wurden mehrere künstliche Passpunkte im Raum verteilt. Um Scans gegenseitig registrieren zu können, müssen mindestens drei dieser Passpunkte in beiden *ScanWorlds* vorhanden sein. Allerdings können nicht alle *ScanWorlds* über die Passpunkt-zu-Passpunkt Registrierung zusammengeführt werden.

*Frage 1: Welche? Vgl. Abbildung 60*

*Frage 2: Betrachten Sie die Scans, die nicht über künstliche Passpunkte alleine registriert werden können. Versuchen Sie herauszufinden, ob eine ausreichende Überlappung gegeben ist um eine Punktwolke-zu-Punktwolke Registrierung durchführen zu können.*

Sollten Punktwolken über zu wenig Überlappung verfügen und zu wenige oder gar keine gemeinsamen Passpunkte aufweisen, gibt es eine weitere Möglichkeit die Punktwolken zu registrieren. Wir können die Koordinaten der Passpunkte mit einer Totalstation Einmessen und so die Punktwolken registrieren. Unter Verwendung dieser Technik ist es möglich, alle Passpunkte in einem Koordinatensystem zu vermessen. Dieses Koordinatensystem dient als Basis, in dem alle Punktwolken registriert werden können. Diese Technik heißt Punktwolke-zu-Totalstation Registrierung.

Im Fall der Kirche *St.James* verwenden wir Messungen mit der Totalstation, da diese einen großen Teil des Registrierungsprozesses automatisieren. Später können wir diese Messungen auch für die Verbindung von Innen- mit Außenaufnahmen verwenden.

In den folgenden Abschnitten werden diese verschiedenen Registrierungstechniken verwendet und detaillierter erklärt.

### 5.6.1.1. Erstellung eines Registrierungsprojektes

.Die Registrierung erfolgt im Cyclone Navigator. Wir haben bereits die Datei „St. James Church – Tutorial Inside – start“ in den Cyclone Navigator importiert. Diese Datei beinhaltet alle ScanWorlds des Innenraumes der Kirche. Klicken Sie mit der rechten Maustaste auf den Projektordner „Project St. James Church – Inside“ und wählen Sie **Create – Registration**. Am Ende der ScanWorlds Liste wurde ein Registrierungsprojekt hinzugefügt. Ändern Sie den Namen zu „Registration St. James Church - Inside“ (siehe Video „registration\_interior\_part2.avi“).

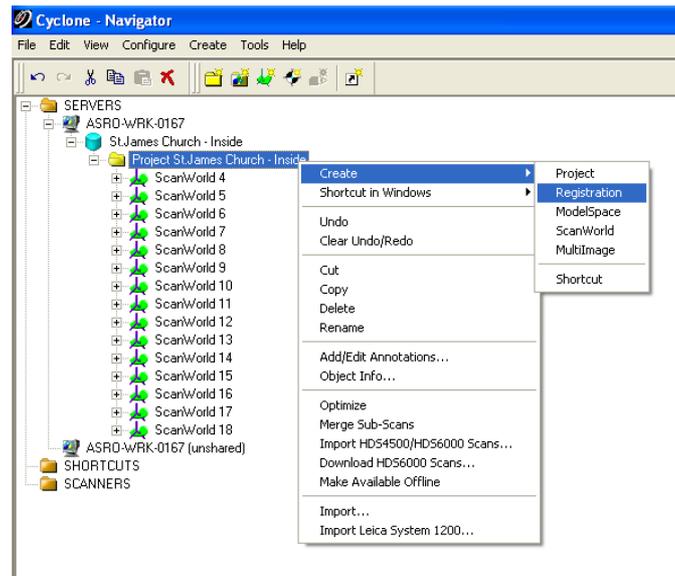


Abbildung 62: Cyclone Navigator – Erstellung eines Registrierungsprojektes

Ist die Registrierung erstellt, öffnen Sie mittels Doppelklick den Registrierungsdialog. Dort befinden sich drei, zunächst noch leere, Hauptkarteikarten: *ScanWorld's Constraints*, *Constraint List* und *ModelSpaces*.

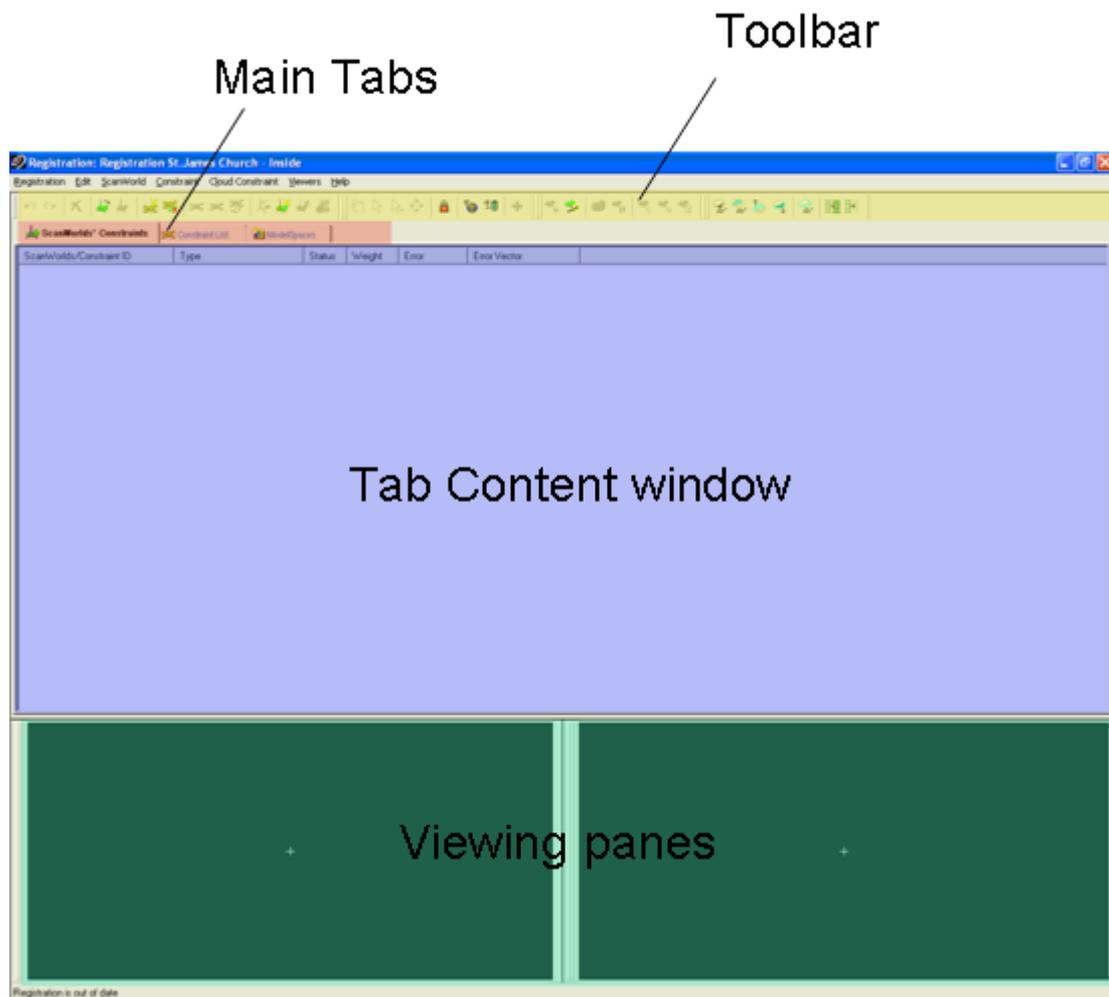


Abbildung 63: Dialogbox des Registrierungsprojekts

### 5.6.1.2. Importieren von Daten aus der Totalstation

Wie schon erwähnt, verwenden wir für das Messen aller Passpunktkoordinaten eine Totalstation. Diese Maßnahme hilft den Registrierungsprozess zu automatisieren. Bevor wir mit der Registrierung beginnen können, müssen wir diesen Messdatensatz importieren. Im *Cyclone Navigator* klicken Sie mit der rechten Maustaste auf 'Project St. James Church – Inside' und wählen Sie *Import*. Ein neues Dialogfenster öffnet sich, wo die Datei mit den Messdaten der Totalstation ausgewählt werden kann. Diese Datei kann in verschiedenen Formaten vorliegen und dessen Struktur kann durch den Cyclone Importdialog angepasst werden. In unserem Fall heißt die Datei 'TSSurvey-StJames.txt'. Wählen und öffnen Sie diese Datei.

.Jetzt müssen wir die Struktur der Datei definieren. Die Werte in unserer Datei sind *Space delimited* (Leerzeichen getrennt) und die Einheiten werden auf *Meter* festgelegt. Die erste Spalte enthält die *Target Id* (Passpunktidentifikationsnummer) während die zweite, dritte und vierte Spalte die *X*, *Y* und *Z* Koordinaten enthält. Das Zuordnen des Spaltentitels erfolgt durch klicken auf die Kopfzeile (siehe Video „*registration\_interior\_part3.avi*“).

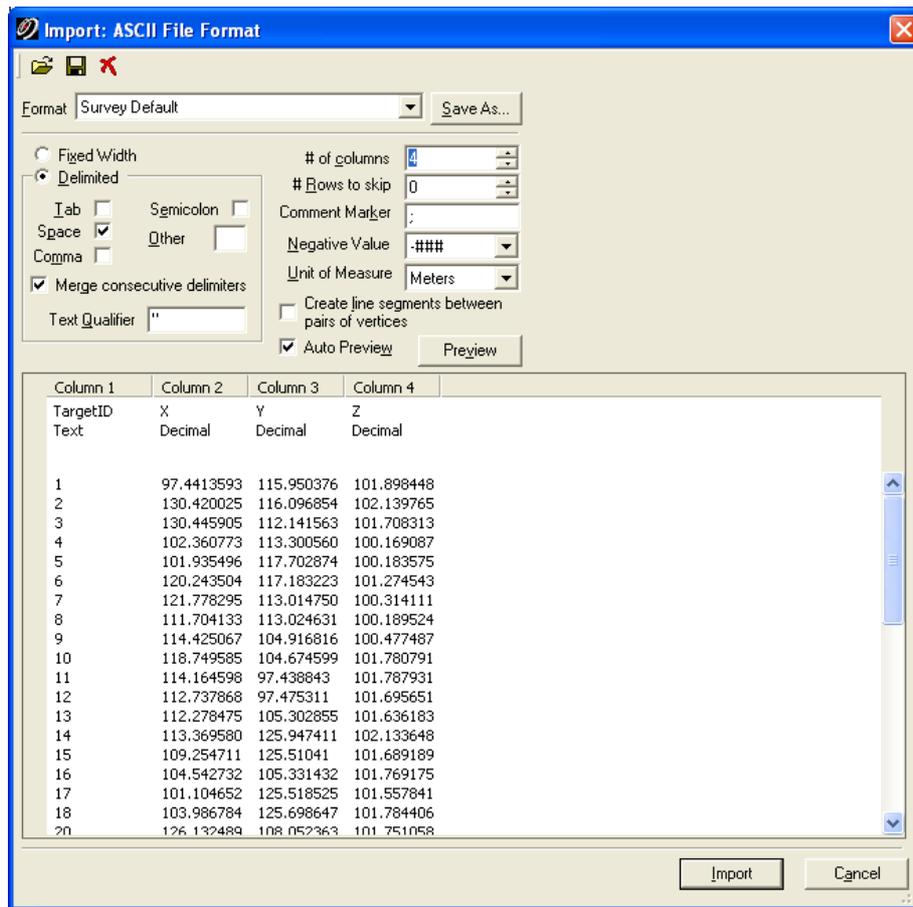


Abbildung 64: Importieren von Totalstationsdaten aus einer ASCII Datei

Sind alle Parameter festgesetzt, importieren Sie die Datei. Klicken Sie dazu auf die Schaltfläche *Import*. Wenn ein neuer Datensatz von einer ASCII/text Datei importiert wird, wird auch eine neue *ScanWorld* im Navigator erstellt. Diese *ScanWorld* hat dieselbe Struktur wie eine normale *ScanWorld*. Sie enthält einen *ControlSpace* und einen *ModelSpace*. Diese enthalten nun nur Passpunktkoordinaten einschließlich ihrer *TargetId*.

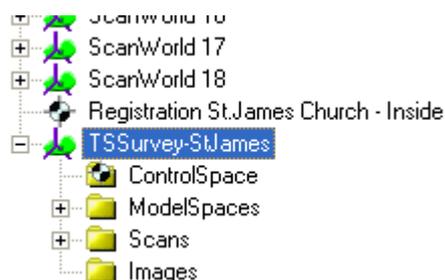


Abbildung 65: Struktur der importierten Totalstationsdaten in Cyclone

### 5.6.1.3. Hinzufügen von ScanWorlds

Um *ScanWorlds* zur Registrierung hinzuzufügen, öffnen Sie das Registrierungsprojekt durch Doppelklick und wählen Sie den Befehl *ScanWorld - Add ScanWorld...*. In der folgenden Dialogbox wählen Sie die zu registrierenden *ScanWorlds* aus. Vorerst versuchen wir alle *ScanWorlds* der Innenaufnahmen zu registrieren und die dabei auftretenden Probleme zu untersuchen. Alle *ScanWorlds* können durch das Drücken der *Shift* Taste und die Anwahl mit der Maus ausgewählt werden. Vergewissern Sie sich, dass auch das *ScanWorld TSSurvey-StJames* mit den Daten aus der Totalstation in der Auswahl enthalten ist. Jetzt drücken Sie das

Symbol mit dem Pfeil nach rechts und fügen diese *ScanWorlds* dem Registrierungsprojekt hinzu. Abschließend drücken Sie auf den Button *OK* (siehe Video „*registration\_interior\_part4.avi*“).

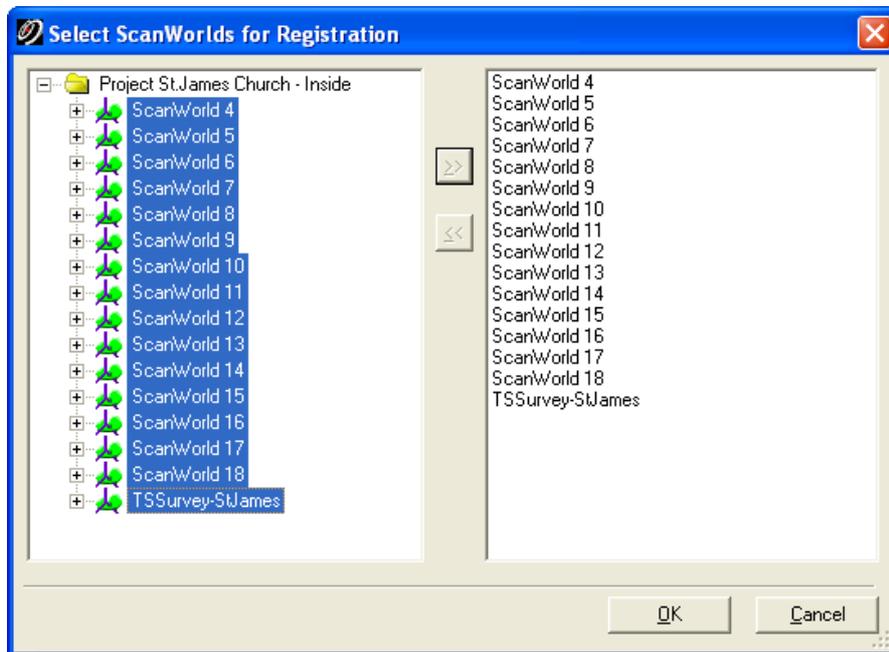


Abbildung 66: Einfügen aller ScanWorlds in das Registrierungsprojekt

#### 5.6.1.4. **Hinzufügen von Passpunktrandbedingungen (Constraint)**

Sind alle *ScanWorld* dem Registrierungsprojekt hinzugefügt, kann eine *ScanWorld* als die *Home ScanWorld* ausgewählt werden. Dadurch werden alle anderen *ScanWorlds* zum Koordinatensystem der Referenz-*ScanWorld* (*Home SW*) registriert. Um dies durchzuführen, wählen Sie die Registrierkarte *ModelSpace* und die *ScanWorld TSSurvey-StJames* mit den Daten aus der Totalstation aus. Durch Rechtsklick können Sie den Befehl *Set Home ScanWorld* anwählen. Da die *ScanWorld TSSurvey-StJames* als Referenz verwendet wird, wird automatisch eine Kombination aus den Registrierungstechniken *Passpunkt-zu-Passpunkt* und *Passpunkt-zu-Totalstation* durchgeführt (siehe Video „*registration\_interior\_part5.avi*“).

Mit dem Hinzufügen von Randbedingungen kann nun begonnen werden. Händisches Hinzufügen würde viel Zeit in Anspruch nehmen. Deswegen wenden wir zunächst automatisierte Techniken an und beobachten ihre Auswirkungen. Zuerst versuchen wir, Übereinstimmungen zwischen den künstlichen Passpunkten aus den unterschiedlichen *ScanWorlds* automatisch herauszufiltern um eine *Passpunkt-zu-Passpunkt* Registrierung durchführen zu können. Zur Durchführung dieser Aufgabe, öffnen Sie das Menü *Constraint* und klicken Sie auf den Befehl *Auto-Add Constraints*. *Cyclone* wird nun automatisch nach übereinstimmenden Passpunkten in den *ScanWorlds* suchen und dabei deren richtige Positionierung und Benennung überprüfen.



Nach Ausführen dieses Befehls kann eine Warnung auftreten, welche darauf hinweist, dass einige Randbedingungen falsch benannt oder fehlerhaft sind. Daraus können wir Informationen über die fehlerhaften Passpunkte beziehen. Bei genauerer Betrachtung dieser Auflistung sehen wir, dass die Passpunkte 6, 7, 13 und 17 wiederholt auftreten. Demnach ist eine händische Überprüfung dieser Passpunkte notwendig.

Vorerst drücken Sie den Button *Close* und öffnen Sie die Registerkarte *Constraint*. In der Registerkarte *Constraints* finden Sie alle Randbedingungen, die automatisch von Cyclone erfasst wurden. Die Spalte mit den Fehlmessungen ist noch im Modus *n/a*. Das bedeutet, dass die Software die Fehler noch nicht berechnet hat.

### 5.6.1.5. Fehlersuche

Um die Fehler berechnen zu können, müssen wir zuerst die Scans registrieren. Man öffnet das Menü *Registration* und startet den Befehl *register*. Nach Beendigung dieses Befehls füllt sich die Spalte mit den fehlerhaften Scans und eine Spalte mit fehlerhaften Vektoren wurde hinzugefügt. Diese Fehler können nach ihrem Betrag in absteigender Reihenfolge sortiert werden, indem man auf den Kopf der Spalte drückt. Auf diese Art können Randbedingungen mit hohen Fehlmessungen analysiert werden und deren Genauigkeit manuell überprüft werden (siehe Video „*registration\_interior\_part6.avi*“).

*Aufgabe: Sortieren Sie die Fehlerspalte und untersuchen Sie die Fehlerwerte.*

Aus der Fehlerspalte ersehen wir, dass die ersten vier Randbedingungen einen Fehlbetrag von mehr als vier Metern aufweisen. Zusätzlich können wir feststellen, dass Passpunkt 17 in all diesen Randbedingungen enthalten ist. Durch einen Doppelklick auf eine Randbedingung, öffnet *Cyclone* die zwei betroffenen *ScanWorlds*. Sie sind in Abbildung 68 angeführt.

*Frage 3: Mittels Doppelklick auf die zweite Randbedingung kann ScanWorld 5 und ScanWorld 6 zusammengeführt werden. Zoomen Sie auf Passpunkt 17. Was sind die Fehler bei Passpunkt 17?*

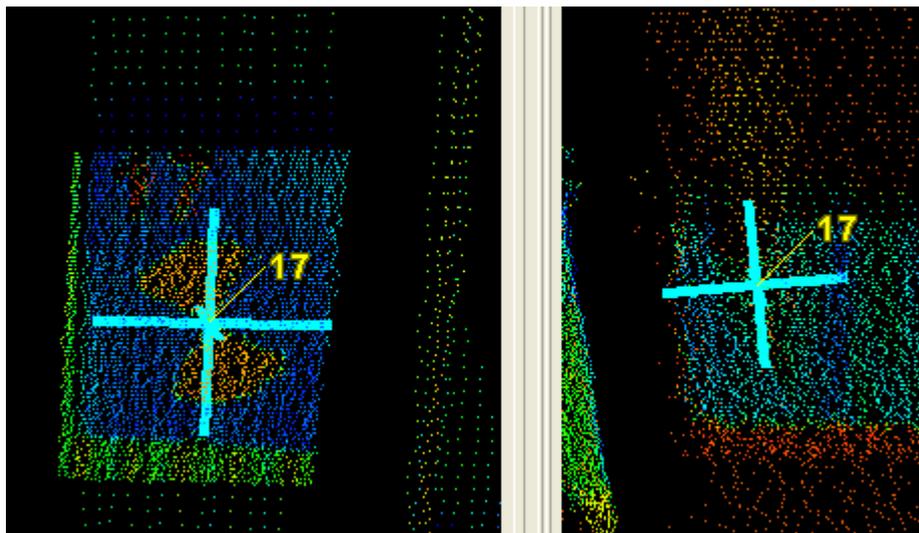


Abbildung 68: Passpunkt 17 in ScanWorlds 5 (gute Position – links) und 6 (schlechte Position – rechts)

Beim Überprüfen der Passpunkte, direkt über die Ansicht im Registrierungsprojekt, sollte vorsichtig vorgegangen werden. Es kann vorkommen, dass nicht alle Feinscans sichtbar sind. Deswegen sollten die *ScanWorlds* direkt vom Navigator aus überprüft werden. Hierbei wird auch überprüft werden, ob alle einzelnen Scans gut sichtbar sind. Dabei geht man wie folgt vor:

Öffnen Sie direkt vom Navigator aus den *ControlSpace* der jeweiligen *ScanWorld* und überprüfen Sie *Tools – Scanner – ScanWorld Explorer...* Sind alle Scans markiert, so werden sie auch angezeigt.

### 5.6.1.6. Fehlerbearbeitung

Um das Problem, das *Passpunkt 17* darstellt, beheben zu können, werden wir alle Randbedingungen, die diesen *Passpunkt* in *ScanWorld 6* beinhalten, deaktivieren.

*Frage 4: Sortieren Sie die Liste mit den Randbedingungen neu. Nehmen Sie dabei Bezug auf die ID der Randbedingungen. Suchen Sie alle *Passpunkt 17* beinhaltenden Randbedingungen. Wie viele sind es?*

Wir finden insgesamt zehn Randbedingungen, die diesen *Passpunkt* beinhalten. Überprüfen Sie jede Randbedingung der *ScanWorlds* und deaktivieren Sie die Randbedingungen die *ScanWorld 6* enthalten indem Sie es durch Rechtsklick anwählen und dann die Option *Disable* auswählen. Nach dem Deaktivieren einiger Randbedingungen registrieren Sie das Projekt erneut (*re-Register*). Durch starten der Funktion *auto-update* kann die Registrierung auch automatisch erneuert werden.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 17	ScanWorld 18	ScanWorld 6	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	2.777 m	(-1.782, 2.120, 0.200) m
TargetID: 17	ScanWorld 6	TSSurvey-StJames (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	2.776 m	(1.782, -2.119, -0.201) m
TargetID: 17	ScanWorld 17	ScanWorld 6	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	2.774 m	(-1.783, 2.115, 0.202) m
TargetID: 17	ScanWorld 5	ScanWorld 6	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	2.773 m	(-1.780, 2.118, 0.199) m
TargetID: 13	ScanWorld 16	TSSurvey-StJames (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.151 m	(-0.083, 0.044, -0.119) m
TargetID: 13	ScanWorld 16	ScanWorld 7	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.142 m	(-0.083, 0.043, -0.107) m
TargetID: 13	ScanWorld 16	ScanWorld 12	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.126 m	(-0.079, 0.040, -0.090) m
TargetID: 7	ScanWorld 7	TSSurvey-StJames (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.105 m	(-0.007, 0.013, 0.104) m
TargetID: 7	ScanWorld 7	ScanWorld 9	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.105 m	(-0.008, 0.014, 0.104) m
TargetID: 7	ScanWorld 7	ScanWorld 5	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.104 m	(-0.006, 0.013, 0.103) m
TargetID: 7	ScanWorld 7	ScanWorld 8	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.104 m	(-0.006, 0.012, 0.103) m

Abbildung 69: Liste der Randbedingungen nach der Registrierung

Nun überprüfen wir erneut die Liste mit den Randbedingungen (nach Fehlbetrag geordnet). Wir können feststellen, dass der größte, vorhandene Fehlbetrag auf 15,2 cm (reduzierter Datensatz: 14 cm) geschrumpft ist. Das ist natürlich immer noch zu hoch. Außerdem ist aus der Tabelle ersichtlich, dass die drei Randbedingungen (reduzierter Datensatz: 2) mit einer hohen Fehlermessung den *Passpunkt 13* beinhalten (siehe Video „*registration\_interior\_part7.avi*“).

*Anmerkung: Cyclone hat zwei verschiedene Bereiche für den Datensatz, den ModelSpace und den ControlSpace. Der ControlSpace beinhaltet die RAW Scandaten. Dieser ControlSpace wird in allen Berechnungen, z. B. bei der Registrierung verwendet. Der ModelSpace ist eine Momentaufnahme des ControlSpace. Es ist also ein Abbild des ControlSpace zu einem bestimmten Zeitpunkt. Man kann mehrere ModelSpaces, die zu verschiedenen Zeiten von einem ControlSpace gemacht wurden, erzeugen. Wichtig ist hierbei, dass eine Änderung im ModelSpace nicht immer den ControlSpace mit verändert. Es sollte immer der ControlSpace überprüft werden, nachdem Änderungen im ModelSpace vorgenommen wurden.*

*Frage 5: Überprüfen Sie alle Randbedingungen, die *Passpunkt 13* beinhalten. Was ist falsch mit diesem *Passpunkt*?*

*Aufgabe: Überprüfen Sie, welcher *Passpunkt* der richtige im ModelSpace ist (derjenige mit der sichtbaren *Passpunktform* im Feinscan) und löschen Sie den falsch gekennzeichneten Vektor. Wiederholen Sie den Vorgang im ControlSpace. Beim Entfernen des *Passpunktes* im ControlSpace wird Cyclone darauf hinweisen, dass dieser *Passpunkt* noch immer im Registrierungsprojekt verwendet wird. Bevor der *Passpunkt* aus dem ControlSpace gelöscht werden kann, muss zuerst die betroffene *ScanWorld* vom Registrierungsprojekt entfernt werden. Indem man zur Registerkarte ModelSpace geht und *ScanWorld 16* auswählt, kann diese mit der rechten Maustaste*

angeklickt und gelöscht werden. Anschließend fügt man die ScanWorld zum Registrierungsprojekt hinzu und registriert das Projekt erneut. Überprüfen Sie abschließend, ob das Problem gelöst werden konnte.

Nachdem Passpunkt 13 in ScanWorld 16 entfernt wurde und das Projekt erneut registriert wurde, gibt es noch immer einen Fehlbetrag von 10 cm. Man beachte, dass der hohe Fehlbetrag aus den Randbedingungen resultiert, die Passpunkt 7 beinhalten.

Frage 6: Überprüfen Sie diese Randbedingungen und finden Sie heraus, warum Passpunkt 7 fehlerhaft ist.

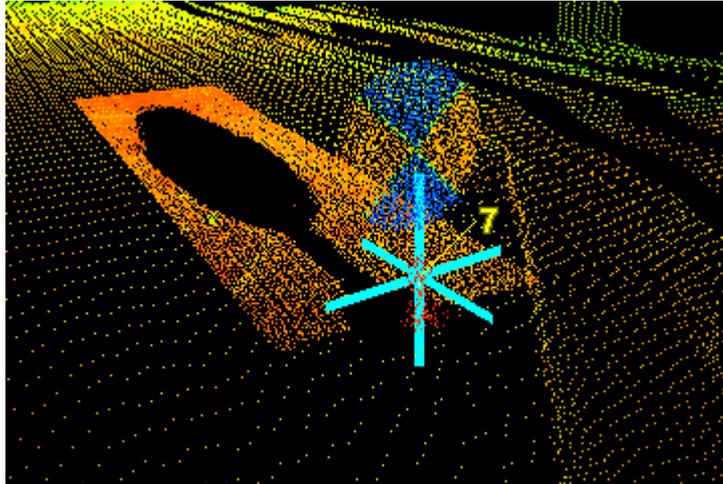


Abbildung 70: Passpunkt 7 in ScanWorld 7, schlechte Position

Um die Korrektur an diesem Passpunkte vornehmen zu können, müssen wir zuerst den Passpunkt vom *ControlSpace* und vom *ModelSpace* entfernen.

Aufgabe: Löschen Sie zuerst ScanWorld 7 vom Registrierungsprojekt. Entfernen Sie dann den Passpunkt vom *ControlSpace*. Danach wechseln Sie zum *ModelSpace* und löschen auch dort den Passpunkt.

Der Passpunkt muss erneut beschriftet werden. Beachten Sie beim Hinzufügen neuer Passpunkte, dass diese zuerst im *ModelSpace* erstellt werden, und dann in den *ControlSpace* kopiert werden müssen. Nur jene Passpunkte, die sich im *ControlSpace* befinden, werden für die Registrierung verwendet.

Zur Erstellung eines neuen Passpunktes wird ein Punkt nächst der Mitte des Passpunktes unter Verwendung des Hilfsprogramms *Selection* angewählt. Der Feinscan des Passpunktes sollte hervorgehoben sein. Dann wählt man *Create Object - Fit To Cloud - Black/White Target...* *Cyclone* wird dann automatisch versuchen den Passpunkt der Punktwolke anzupassen und dessen exakten Mittelpunkt zu ermitteln. Anschließend erscheint ein Dialogfeld und fragt nach der *TargetId*. Man gibt die Zahl 7 als *TargetId* ein und drückt den Button *OK*. Wird der Button *OK* gedrückt, erscheint erneut ein Dialogfenster, das darauf hinweist, dass dies zahlreiche Referenzen zu verschiedenen *ControlSpaces* hat und fragt welches aktualisiert werden soll. Man wählt beide, zur Verfügung stehenden *ControlSpaces* und drückt den Button *OK*. Bevor mit der Registrierung fortgefahren wird, überprüft man den *ControlSpace* und die korrekte Hinzufügung des Passpunktes.

Anmerkung: Kann *Cyclone* den Passpunkt nicht automatisch erfassen, besteht auch die Möglichkeit einer händischen Erfassung des Passpunktes. Hierfür ermitteln Sie den exakten Mittelpunkt des Passpunktes mit dem *Selection Tool* und geben Sie dann den Befehl *Create Object - Insert - Vertex*. Weiters wählen Sie den Vektor und benennen ihn mit dem Namen, der der PasspunktID entspricht. Dazu verwenden Sie die Befehle *Tools - Registration -*

**Add/Edit Registration Label...** Nach der Beendigung dieses Vorganges, kopieren Sie den Vektor in den ControlSpace mit den Befehlen **Tools – Registration – Copy To ControlSpace**.

Öffnen Sie wieder das Registrierungsprojekt und wählen Sie den Befehl **Constraint – Auto Add Constraints**. Registrieren Sie – durch den Befehl **Register** – das Projekt erneut und ordnen Sie die Fehlbeträge.

Frage 7: Kontrollieren Sie die erste "freigegebene" Randbedingung mit dem höchsten Fehlbetrag. Wie hoch ist der Fehlbetrag? Was ist der Fehlbetrag?

Der absolute mittlere Fehler (*Mean Absolute Error*) der kompletten Registrierung sollten immer überprüft werden. Dazu wird der Befehl **Registration – Show Diagnostics...** ausgeführt. Hier können wir ablesen, dass der absolute mittlere Fehler für die Registrierung bei 3 mm liegt. Dieser Wert liegt noch im Grenzbereich für ein Gebäude mit diesen Abmessungen.

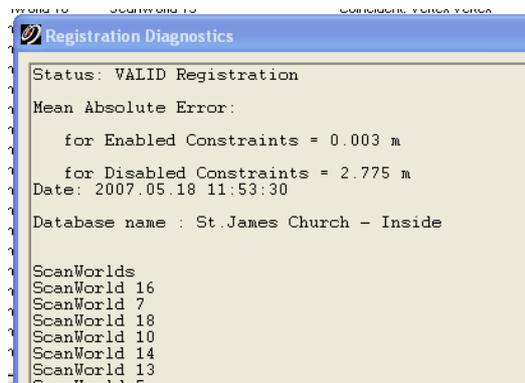


Abbildung 71: Registrierungsdiagnose

### 5.6.1.7. Hinzufügen von Punktwolkenrandbedingungen

Um die Registrierung zu optimieren, können wir Punktwolkenrandbedingungen hinzufügen. Punktwolkenrandbedingungen sind Randbedingungen zwischen überlappenden *ScanWorlds*. Diese Regionen werden als zusätzliche Randbedingungen verwendet. Da alle *ScanWorlds* bereits registriert sind, liefern Punktwolkenrandbedingungen nur zusätzliche Informationen. Das Hinzufügen von Punktwolkenrandbedingungen ist in diesem Fall sehr einfach. Wählen Sie den Befehl **Cloud Constraint – Auto-Add Cloud Constraints** (siehe Video „*registration\_interior\_part8.avi*“).

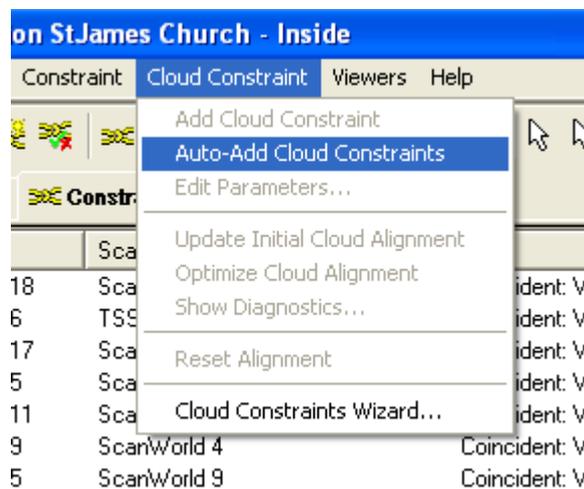


Abbildung 72: Der Befehl Auto-Add Cloud Constraints

*Cyclone* startet automatisch die Suche und analysiert alle Punktwolken nach ausreichender Überlappung und versucht für diese Punktwolken Punktwolkenrandbedingungen hinzuzufügen. Dieser Prozess kann, je nach Prozessorleistung des PC's, zwischen 10 bis 20 Minuten dauern. Während diesem Vorgang erscheint ein Berechnungshistogramm, das anzeigt ob die Punktwolkenrandbedingungen guten oder schlechten Einfluss auf die Registrierung haben.

Das Histogramm sollte eine steile stetig absteigende Funktion zeigen, deren Werte hauptsächlich um die X-Achse angeordnet sind (siehe Abbildung 73). Während des Prozesses wird die Kurve schrittweise und ständig aktualisiert. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass nach einigen Wiederholungen eine höhere Anzahl mit Punkten mit geringeren Fehlbeiträgen gefunden wurde. Falls sich eine der Punktwolkenrandbedingungen nicht in dieser Weise entwickeln sollte, kann es sein, dass sie fehlerhaft ist.

Das Histogramm sollte wie Abbildung 73B aussehen. Hieraus ist ersichtlich, dass *Cyclone* nach mehreren Wiederholungen die Punktwolkenrandbedingungen für *Nummer 11* optimieren konnte um mehr Punkte mit kleineren Fehlern zu erhalten.

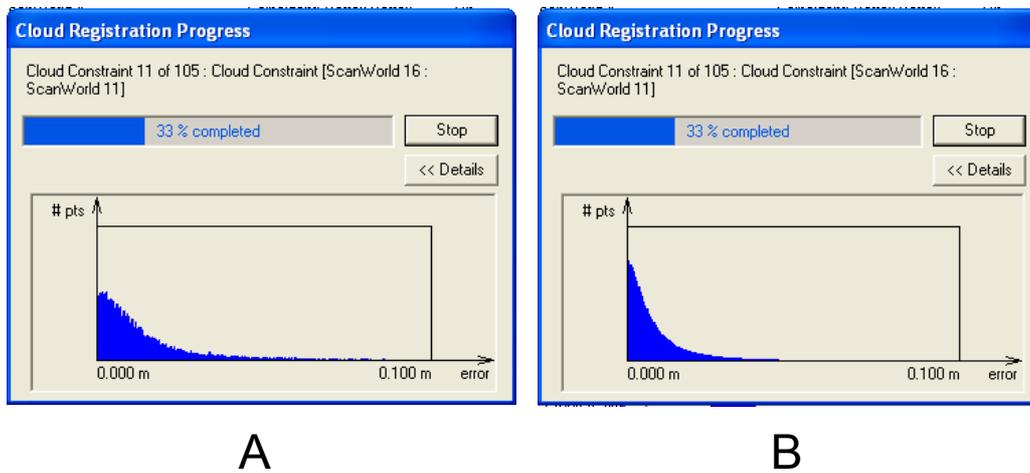


Abbildung 73: Dialogfenster Wolke-zu-Wolke Registrierungsprozess (a) nach 5 Wiederholungen, (b) nach 50 Wiederholungen

Ist der *Auto-Cloud-Constraint* Prozess abgeschlossen, zeigt *Cyclone* einen Bericht von allen hinzugefügten Punktwolkenrandbedingungen und deren Fehlbeiträgen.

Constraint	Scanworld	Scanworld	Function Value (sq m)	RMS (m)	Avg (m)	Min (m)	Max (m)	Point Count	Status
Cloud/Mesh 1	ScanWorld 16	ScanWorld 7	0.00012931	0.018	0.011	0.000	0.098	535833	Aligned
Cloud/Mesh 2	ScanWorld 16	ScanWorld 18	0.00015843	0.018	0.012	0.000	0.096	1661133	Aligned
Cloud/Mesh 3	ScanWorld 16	ScanWorld 14	0.00010788	0.015	0.010	0.000	0.098	635200	Aligned
Cloud/Mesh 4	ScanWorld 16	ScanWorld 13	0.00014483	0.017	0.011	0.000	0.094	145000	Aligned
Cloud/Mesh 5	ScanWorld 16	ScanWorld 5	0.00014273	0.020	0.012	0.000	0.098	359700	Aligned
Cloud/Mesh 6	ScanWorld 16	ScanWorld 12	0.00011448	0.016	0.010	0.000	0.098	313266	Aligned
Cloud/Mesh 7	ScanWorld 16	ScanWorld 8	0.00014149	0.018	0.012	0.000	0.099	445366	Aligned
Cloud/Mesh 8	ScanWorld 16	ScanWorld 17	0.00007160	0.014	0.008	0.000	0.099	867933	Aligned
Cloud/Mesh 9	ScanWorld 16	ScanWorld 15	0.00008888	0.014	0.009	0.000	0.098	1063000	Aligned
Cloud/Mesh 10	ScanWorld 16	ScanWorld 9	0.00012696	0.018	0.011	0.000	0.096	285933	Aligned
Cloud/Mesh 11	ScanWorld 16	ScanWorld 6	0.00011739	0.017	0.011	0.000	0.097	481766	Aligned
Cloud/Mesh 12	ScanWorld 16	ScanWorld 4	0.00015393	0.019	0.012	0.000	0.097	308900	Aligned
Cloud/Mesh 13	ScanWorld 7	ScanWorld 18	0.00015952	0.019	0.012	0.000	0.095	243600	Aligned

Abbildung 74: Ergebnisse der Punktwolkenanpassung

### **5.6.1.8. Überprüfen der Genauigkeit**

Nachdem alle verfügbaren Randbedingungen dem Projekt hinzugefügt wurden, empfiehlt es sich eine abschließende Registrierung durchzuführen und die gesamte Genauigkeit zu überprüfen. Wählen Sie im Registrierungs Menü *Registration – Show Diagnostics*. *Cyclone* zeigt einen Bericht, der den absoluten mittleren Fehler – in unserem Fall 4 mm – angibt. Dieser Wert ist brauchbar, da die Genauigkeit des Scanners auch bei 4 mm liegt.

Betrachten wir die Genauigkeit der einzelnen Randbedingungen näher, ist zu erkennen, dass der maximale Fehlbetrag nun 19 mm (reduzierter Datensatz: 17 mm) beträgt. Es scheint, als ob dieser höchste Fehlbetrag jener Randbedingung, die *Scan World 11* enthält, entspricht. *ScanWorld 11* hat keine hohe Überlappung mit anderen *ScanWorlds* und die Verbindung wurde hauptsächlich über die, mit der Totalstation gemessenen, Passpunkte hergestellt. Da diese Aufstellung der Totalstation nicht Teil eines abgeschlossenen Polygonzuges ist, kann auch die Aufteilung der Messfehler nicht optimal sein.

Bei weiterem Betrachten der Liste der Randbedingungen, ist festzustellen, dass die erste Randbedingung, die nicht *ScanWorld 11* beinhaltet, einen Fehlbetrag von 12 mm aufweist. Für das vorliegende Projekt ist dieser Fehlbetrag annehmbar (siehe Video „*registration\_interior\_part9.avi*“).

### **5.6.1.9. Frieren und Erstellen eines ModelSpace aus der registrierten Punktwolke**

Der letzte Schritt des Registrierungsprozesses besteht im Erstellen einer neuen, alle registrierten Punktwolken beinhaltenden, *ScanWorld*. Hierfür benutzt man den Befehl *Registration – Create ScanWorld/Freeze Registration*. Dieser Befehl fixiert die Registrierung, so dass nichts mehr geändert werden kann. Falls Änderungen der Registrierung oder Hinzufügungen bei den Randbedingungen vorgenommen werden müssen, muss man zuerst sicher gehen, dass alle von der Registrierung erzeugten *ModelSpaces* gelöscht worden sind und die Registrierung freigegeben wurde.

Nach Fixierung der Registrierung wählen Sie den Befehl *Registration – Create and Open ModelSpace* um einen neuen *ModelSpace* mit allen registrierten Punktwolken zu erstellen und öffnen Sie den *ModelSpace* in einem neuen Fenster (siehe Video „*registration\_interior\_part10.avi*“).

Der bisher registrierte Datensatz wurde in der Datei „*St.James Church – Tutorial Inside – Registration Finished.imp*“ gespeichert.

### **5.6.2. Registrierung der Außenaufnahmen**

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, stehen uns mehrere Registrierungstechniken zur Verfügung. Im vorhergehenden Abschnitt haben wir bereits die Passpunkt-zu-Passpunkt Registrierung und die Passpunkt-zu-Totalstation Registrierung verwendet. Auch die Punktwolke-zu-Punktwolke Registrierung wurde angewandt (jedoch nur vollautomatisch, um Redundanz in die Randbedingungen zu bringen). Bei der Registrierung der Außenaufnahmen werden wir ebenfalls die Punktwolke-zu-Punktwolke Registrierung gebrauchen. Diese wird aber nun teilweise die einzige Randbedingung zum Registrieren der Punktwolken sein.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Außenseite der Kirche zu unterschiedlichen Zeiten gescannt wurde. Zusätzlich war der Zeitrahmen für die Messungen sehr begrenzt und Büsche und Bäume verdeckten die nordöstliche Seite der Kirche. Deshalb entschlossen wir uns, diese Seite nicht zu scannen. Die Außenaufnahmen erfolgten an zwei aufeinander folgenden Tagen. Da es jedoch unmöglich war, die Passpunkte während der Nacht im Freien zu lassen, enthalten die *ScanWorlds* des zweiten Messtages keine Passpunkte.

*Aufgabe: Öffnen Sie alle ScanWorlds der Außenseite der Kirche und überprüfen Sie welche ScanWorlds Passpunkte beinhalten und welche nicht.*

Die Registrierung der Außenscans der Kirche beginnt mit den Scans, die über Passpunkte verfügen. Danach wird eine *ScanWorld* nach der anderen mit Hilfe der Punktwolke-zu-Punktwolke Registrierung hinzugefügt.

### **5.6.2.1. Wiederholung der Schritte 1.6.1.1 – 1.6.1.6**

Erstellen Sie ein neues Registrierungsprojekt genauso wie in der vorherigen Registrierung der Innenscans besprochen.

#### *Aufgabe*

- Erstellen Sie ein neues Registrierungsprojekt für die Registrierung der Außenseite und benennen Sie es 'Registration St.James Church – Outside'.
- Die Daten der Innenmessung werden von der Totalstation als eine volle Kopie in das neue Projekt kopiert (Rechtsklick – kopieren – einfügen).
- Öffnen Sie zunächst das Registrierungsprojekt und importieren Sie *ScanWorld* 30, 31, 32 und den Datensatz der Totalstation.
- Der Datensatz der Totalstation soll als Home *ScanWorld* vorliegen.
- Als nächstes klicken Sie auf **Auto-Add** um die Passpunktrandbedingungen hinzuzufügen.
- Registrieren Sie die Daten, finden und korrigieren Sie die Fehler.

*Frage 8: Was funktioniert nicht und warum nicht? (Tipp: Überprüfen Sie die Randbedingungen)*

Zwei Randbedingungen sind für eine ordentliche Registrierung nicht ausreichend (es werden zumindest drei benötigt). Wir schlagen vor, *ScanWorld* 32 vom Datensatz zu entfernen und das Projekt erneut zu registrieren. Anschließend wird *ScanWorld* 32 importiert und unter Zuhilfenahme von zusätzlichen Randbedingungen zu den restlichen Scans registriert. Bei der Analyse der Fehlbeiträge der Registrierung finden wir maximale Werte von 1,8 cm.

### **5.6.2.2. Hinzufügen von anderen ScanWorlds unter Verwendung von Punktwolke-zu-Punktwolke Registrierung**

Nun werden jene *ScanWorlds* hinzugefügt, die zu wenige Passpunkte haben. Man betrachte die Position dieser *ScanWorlds* genauer und wählt jene *ScanWorlds*, die zumindest eine 30 oder 40%ige Überlappung mit einer, schon im Registrierungsprojekt befindlichen, *ScanWorld* aufweisen.

*Frage 9: Welche ScanWorld hat eine ausreichende Überlappung mit ScanWorld 30 oder 31?*

Wir beginnen mit *ScanWorld* 37, da sie eine sehr große Überlappung mit *ScanWorld* 31 besitzt.

*Aufgabe: Fügen Sie ScanWorld 37 dem Registrierungsprojekt hinzu.*

Um eine Punktwolkenrandbedingung hinzuzufügen, drücken Sie auf die Registerkarte *ModelSpace* im Registrierungsfenster. Dann öffnen Sie den *ModelSpace* der *ScanWorld* 31 und *ScanWorld* 37 mittels Doppelklick. *Cyclone* öffnet beide *ScanWorlds* in den Fenstern am unteren Ende des Bildschirms. Unter Verwendung der Viewer Tools (*paning*, *rotating* und *zooming*) werden beide Datensätze einander angeglichen. Um eine Punktwolkenrandbedingung hinzuzufügen müssen wir zumindest drei übereinstimmende Punkte in beiden Datensätzen auswählen. *Cyclone* hat dann die Möglichkeit eine erste Vorschau der Punktwolkenabgleichung zu starten. Man verwendet das *Picker Tool*  oder , um mindestens drei übereinstimmende Punkte auszuwählen. Wird das Tool  verwendet, muss man auch die *CTRL* Taste drücken, um andere Punktpaare dem ersten gewählten Punktpaar hinzuzufügen. Wird das Tool  gewählt, ist das Drücken der *CTRL* Taste nicht notwendig.

Die unten angeführten Bilder zeigen die vom Autor ausgewählten Punkte. Wichtig ist hierbei, dass alle Punktpaare so weit als möglich voneinander entfernt liegen und dass sie nicht auf einer geraden Linie liegen.

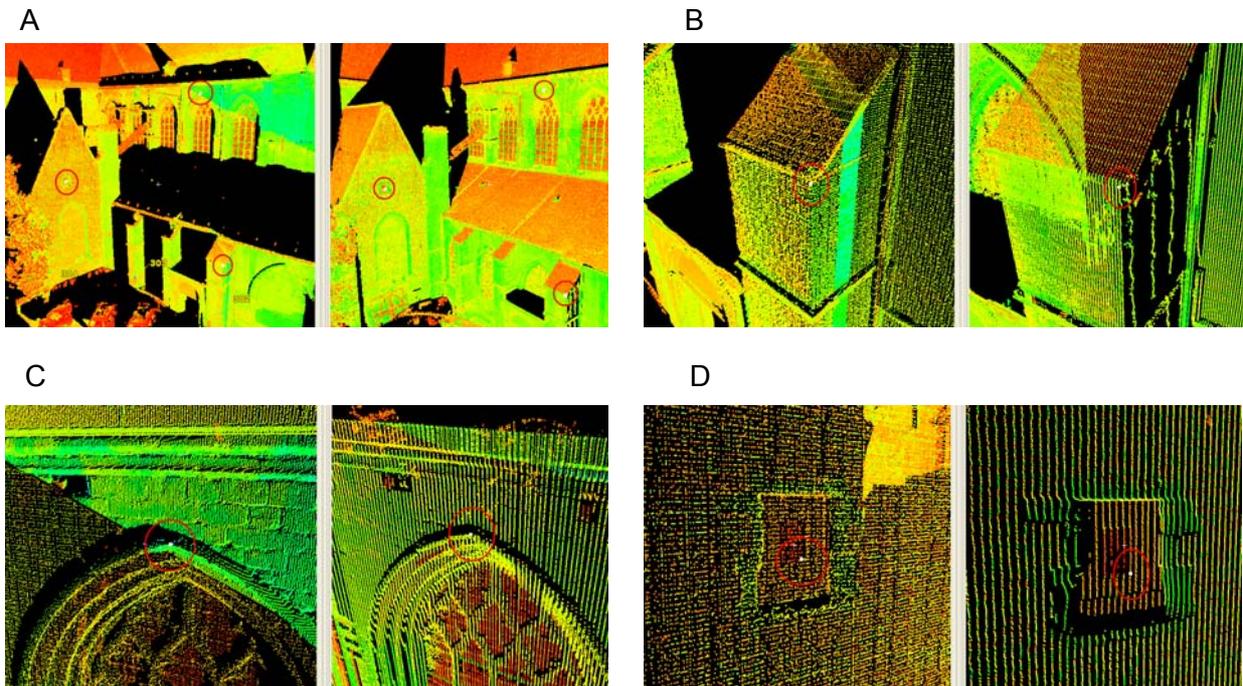


Abbildung 75: (A) Überblick über die übereinstimmenden Punkte; (B) Wanddeck mit der Dachstruktur in der Nähe des Einganges; (C) Oberkante des zweiten Bogens von rechts; (D) Ecke eines Rechtecks an der linken Wand;

Wenn alle übereinstimmenden Punktpaare ausgewählt sind, wählt man den Befehl *Cloud Constraint – Add Cloud Constraint*. Liegen die drei ausgewählten Punktpaare nicht eng genug zusammen, um eine erste Vorschau liefern zu können, zeigt das Programm eine Fehlermeldung die besagt dass weniger als drei Übereinstimmungen gefunden wurden. In diesem Fall, überprüft man die ausgewählten Punktpaare und versucht sie zu adaptieren oder mehrere übereinstimmende Punktpaare hinzuzufügen. *Cyclone* nimmt automatisch die drei besten Punktpaare um eine Vorschau zu erzeugen.

In der Liste der Randbedingungen sind hinzugefügte *cloud/mesh Constraints* angeführt. Man startet nun den Befehl *Registration*. Nach Beendigung der Registrierung ist ein Fehlbetrag bei den Punktwolkenbedingungen von 1,1 cm ersichtlich. Das ist ein sehr gutes Ergebnis für eine Punktwolke-zu-Punktwolke-Abgleichung.

**Aufgabe:**

- Hinzufügen von ScanWorld 35 und 36 und anschließende Verknüpfung mit ScanWorld 30 unter Verwendung von Punktwolkenrandbedingungen
- Hinzufügen von ScanWorld 34 und Verknüpfung zu ScanWorld 31
- Hinzufügen von ScanWorld 32 und Verknüpfung mit ScanWorld 34, auch die Passpunktrandbedingungen sollen verwendet werden
- Hinzufügen von ScanWorld 33 und Verknüpfung mit ScanWorld 32
- Hinzufügen einer Punktwolkenrandbedingung zwischen ScanWorld 31 und 32
- Schließlich verwenden Sie die Funktion *Auto-add cloud constraints* um zusätzliche Punktwolke-zu-Punktwolke Randbedingungen zu finden.
- Überprüfen Sie die RMS Fehler der Punktwolkenrandbedingungen.

Die letzte Registrierung ergibt einen mittleren absoluten Fehler von 9 mm, der mittels des Befehls *Registration – Show Diagnostics* angezeigt werden kann. Der maximale Fehler der Randbedingung beträgt 18 mm. Für unseren Zweck ist dieses Ergebnis zufrieden stellend.

Als nächstes frieren Sie die Registrierung mit dem Befehl *Freeze* ein und erstellen Sie ein neues Fenster *ModelSpace*. Bei Betrachtung der registrierten Punktwolke der Außenaufnahme sehen wir noch immer mehrere Lücken, die aufgrund des begrenzten Zeitfensters für das Scannen entstanden sind.

Der bisher registrierte Datensatz wurde in der Datei „*St.James Church – Tutorial Outside – Registration Finished.imp*“ gespeichert.

### 5.6.3. Registrierung: Verknüpfung der Datensätze aus Innen- und Außenaufnahmen

#### 5.6.3.1. Kopieren/Einfügen des Registrierungsprojektes in eine neue Datenbank

Schließlich werden wir beide registrierte Datensätze – Innenraum und Außenseite – registrieren, um ein vollständiges Modell der Kirche zu erhalten. Dazu müssen wir eine neue Datenbank erstellen. Im *Cyclone Navigator* wählen Sie *Configure – Databases...* und jenen Server, der alle importierten Datenbanken beinhaltet. Wählen Sie *Add...* und geben Sie den folgenden Namen für die neue Datenbank ein: '*St.James Church – ALL REGISTERED*'. Nun klicken Sie auf den Button *Ok* und schließen Sie den nächsten Dialog. In der Liste sollte nun die neue Datenbank angeführt sein.

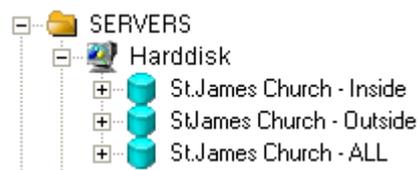


Abbildung 76: Datenbanken im Cyclone Navigator

Fügen Sie der Datenbank ein neues Projekt durch Rechtsklick und den Befehl *Create – Project* hinzu. Verwenden Sie den vom Programm vorgegebenen Namen für das Projekt.

Jetzt kopieren wir die registrierten *ScanWorlds* von den Innen- und Außenscans der Kirche in diese neue Datenbank. Dazu öffnen Sie die Datenbank *St.James Church – Inside* und wählen Sie das Registrierung *Registration St.James Church – Inside*. Durch Rechtsklick auf das Projekt wählen Sie den Befehl *Copy*. Die Registrierung wurde nun in eine Zwischenablage kopiert und kann andernorts eingefügt werden.

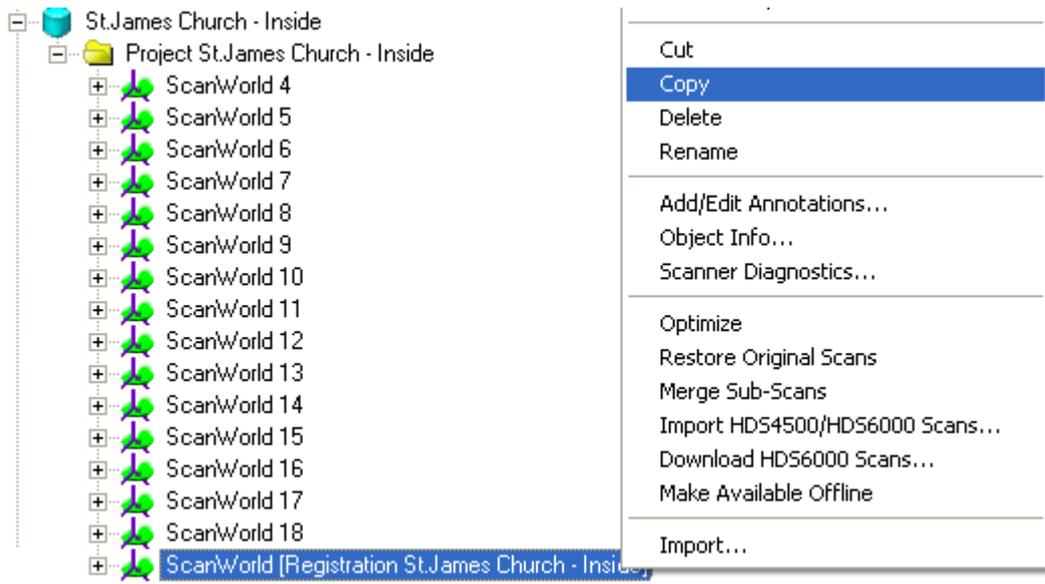


Abbildung 77: Kopieren des Registrierungsprojektes des Innenraumes in die Windows Zwischenablage

*Anmerkung: Stellen Sie sicher, nicht das gesamte Projekt in das neue Registrierungsprojekt zu kopieren sonder nur die registrierten ScanWorlds! Das braucht weniger Speicher und das Programm arbeitet schneller.*

Wechseln Sie nun zur Datenbank *St.James Church – ALL REGISTERED*, klicken Sie diese mit Rechtsklick an und wählen sie *Paste*. *Cyclone* fragt, ob das gesamte Projekt oder nur eine Referenzkopie kopiert werden soll (*as a whole* oder *as a reference*). Bei einer vollen Kopie werden alle Daten in das neue Projekt kopiert, was natürlich mehr Speicherplatz benötigt. Eine Vernetzung zwischen kopierter und originaler Version ist nicht gegeben. Die Referenzkopie bietet die Möglichkeit einer Verknüpfung zwischen dieser Datenbank und der Datenbank *St.James Church – Inside*. Die neue Datenbank verwendet hierbei die gleichen Daten wie die Datenbank *St.James Church – Inside*. In unserem Fall verwenden wir die Option *Reference*.

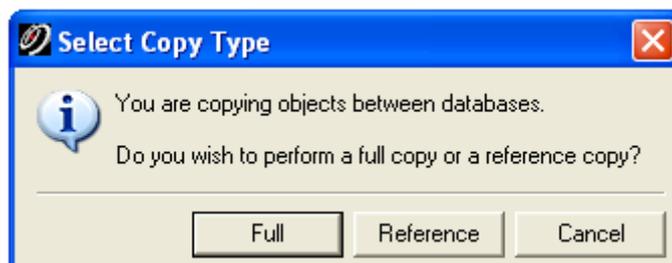


Abbildung 78: Erstellen einer vollständigen Kopie oder einer Referenzkopie

Nach Beendigung des Kopiervorganges sollte das Projekt *Registration St.James Church – Inside* in der neuen Datenbank aufscheinen. Wiederholen Sie den oben beschriebenen Vorgang mit dem Projekt *Registration St.James Church – Outside*. Beim Kopieren des Außenprojektes öffnet *Cyclone* ein Dialogfenster, das darauf hinweist, dass die Totalstationsdateien bereits im Projekt vorhanden sind. Drücken Sie hier auf den Button **OK** um die Standardeinstellungen zu bestätigen.



Abbildung 79: Einfügen des Registrierungsprojektes Inside in das Registrierungsprojekt ALL

### 5.6.3.2. Verknüpfen zweier Registrierungen

Im vorherigen Abschnitt wurde das Erstellen eines neuen Registrierungsprojektes beschrieben. Anstatt *ScanWorlds* hinzuzufügen, werden wir nun die bereits erstellten Registrierungsprojekte aus Innen- und Außenaufnahme importieren. Dafür öffnen Sie die neu erstellte Registrierung und wählen Sie den Befehl *Registration – Import Registration...* Dann wählen Sie die zwei Registrierungsprojekte, fügen sie dem neuen Registrierungsprojekt hinzu und drücken den Button *OK*.

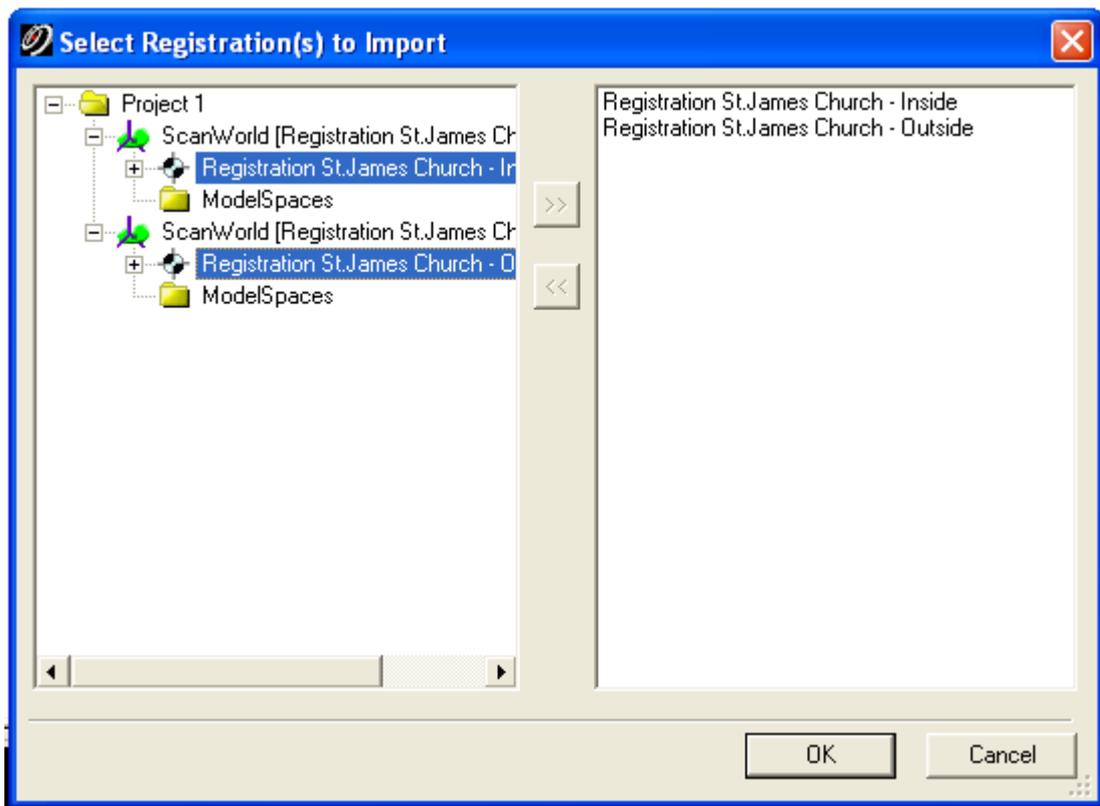


Abbildung 80: Einfügen des Innen- und Außenregistrierungsprojektes in das globale Registrierungsprojekt

*Anmerkung: In der Registerkarte Constraint in den ScanWorlds sollten die Totalstationsdateien nur einmal aufscheinen! Erscheinen die Dateien zweimal, bedeutet das, dass Sie die Totalstationsdatei nicht vom Innen- zum Außenprojekt kopiert haben, sondern für das Außenprojekt neu erzeugt haben (vgl. 1.6.2.1).*

Sobald beide Registrierungsprojekte in das generelle Registrierungsprojekt eingefügt wurden, überprüfen Sie die Liste mit den Randbedingungen. Alle individuellen Randbedingungen sollten eingefügt sein. Verwenden Sie den Befehl *Registration – Register* um alle Scans der Kirche in ein Koordinatensystem zu registrieren.

Ist die Registrierung abgeschlossen, überprüfen Sie den maximalen Betrag der Einzelfehler der aktivierten Randbedingungen. Dieser sollte bei 19 mm liegen. Der mittlere absolute Fehler der

gesamten Registrierung sollte ebenso überprüft werden (*Register – Show Diagnostics*). Dieser sollte bei 4 mm liegen.

Um mit der registrierten Punktmenge arbeiten zu können, verwenden Sie den Registrierungsbefehl *Registration – Create ScanWorld/Freeze*. Dann erstellen Sie ein neues *ModelSpace* Fenster mittels des Befehls *Registration – Create and open Modelspace*.

Das Endergebnis ist ein voll registrierter Datensatz, mit dem nun weiter gearbeitet werden kann.

## **5.7. Datenverarbeitung**

### **5.7.1. Direkte 2D Modellierung aus Punktwolken**

#### **5.7.1.1. Einführung**

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Erstellung von 2D Zeichnungen (Grundrisse, Querschnitte, Ansichten) durch direkte 2D Modellierung. Zahlreiche Möglichkeiten zum Extrahieren der Daten aus Punktwolken stehen zur Verfügung. Für die Erstellung von 2D Modellen, werden zuerst die nicht relevanten Daten aus der Punktwolke herausgefiltert, sodass nur die Daten übrig bleiben, die für das Erstellen von 2D Zeichnungen gebraucht werden. Diese können dann in eine CAD Umgebung übertragen werden und daraus 2D Zeichnungen erstellt werden.

*CloudWorx* ist eine externe Applikation für *MicroStation* (*MDL – MicroStation Development Language*). Es erlaubt uns, die Punktwolkendaten so darzustellen und zu manipulieren, dass wir 2D Zeichnungen, 3D Topographien oder volle 3D Modelle (Drahtmodell, Oberfläche oder Solid-Modelle) erzeugen können. Ein ähnliches Plug-In existiert für *AutoCAD* mit fast gleicher Menüstruktur und Befehlen. Dieses Tutorial erklärt in den weiteren Abschnitten wie *CloudWorx* in *MicroStation* verwendet wird.

#### **5.7.1.2. Laden der Datenbank**

Nachdem die Punktwolke registriert wurde, kann sie in *MicroStation CloudWorx* weiterverarbeitet werden. Da \*.imp Dateien sehr groß sind, ist es nicht ratsam über ein Netzwerk sondern auf einer lokale Festplatte zu arbeiten. Um die Datensätze in *MicroStation* öffnen zu können, müssen sie zuerst in *Cyclone* geladen werden. Ist das noch nicht geschehen, folgen Sie bitte den Schritten in Kapitel 1.5.

Die Daten an denen wir interessiert sind wurden als eine komplette Punktwolke mit jeder einzelnen *ScanWorld* in ihrer wahren Position registriert. Sie befinden sich (nahezu) immer am Ende der Liste von *ScanWorlds* und heißen '*ScanWorld (Registration St.James Church – ALL*)'. Erweitern Sie dieses Projekt, sodass seine Unterebenen aufscheinen. Um die Daten in einem Fenster zu öffnen, erweitern Sie das Verzeichnis *ModelSpaces* und machen sie einen Doppelklick auf '*Modelspace View 1*'.

#### **5.7.1.3. Erste Schritte**

Der erste Schritt in *MicroStation* ist die Erstellung eines neuen Ordners. Öffnen Sie *MicroStation* und führen Sie den Befehl *File>New* aus. Als Pfad wählen Sie den Arbeitsordner. Schließlich geben Sie einen Namen für die Zeichnung ein.

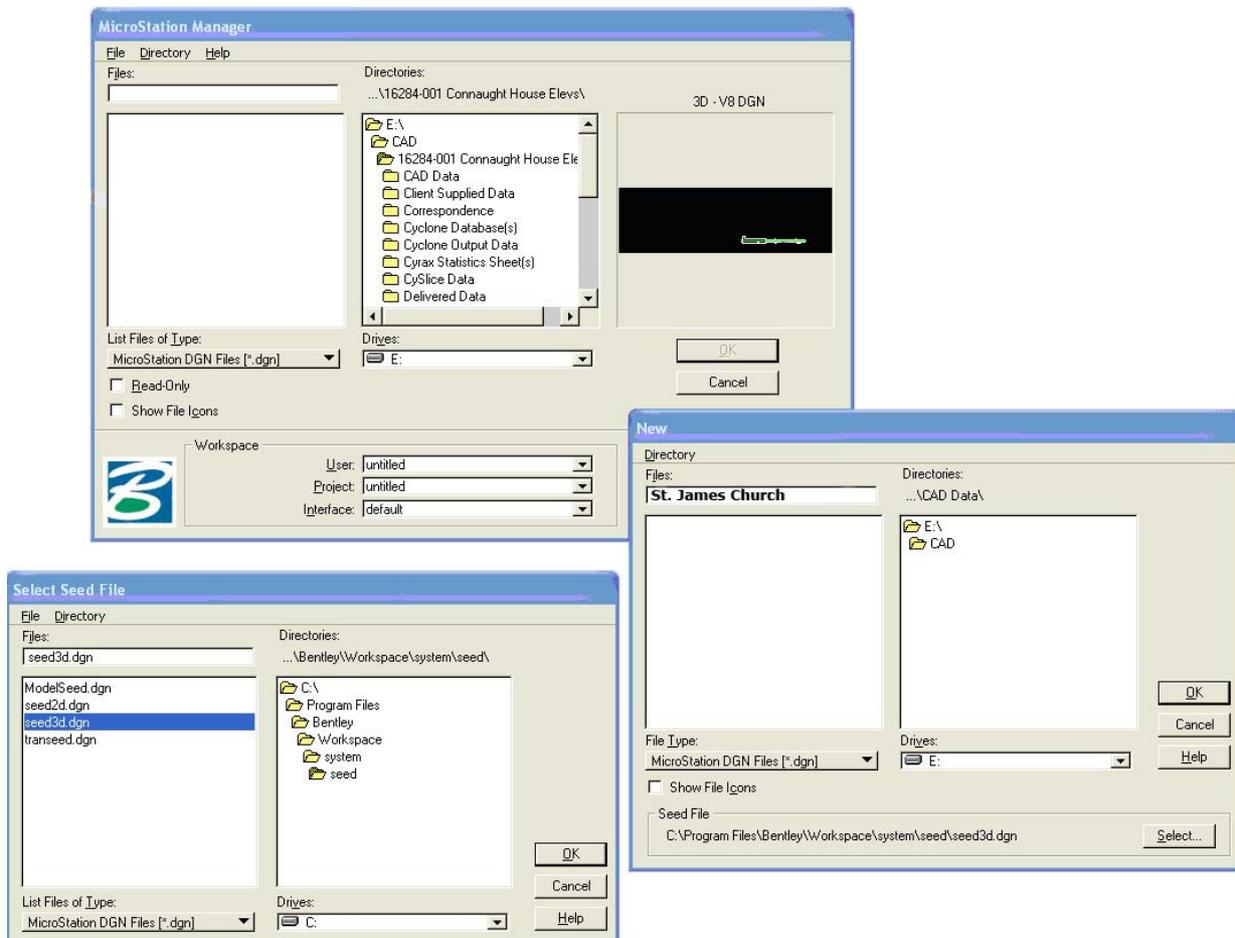


Abbildung 81: Erstellen einer neuen Datei zum Importieren der Punktwolke in *MicroStation*

Vergewissern Sie sich, dass Sie die richtige Dokumentvorlagendatei (seed-File) ausgewählt haben. Es sollte sich um *seed3D.dgn* (am unteren Ende des *New* Fensters) handeln. *MicroStation* unterstützt 2D und 3D Dateien. Wird mit *CloudWorx* gearbeitet, müssen es immer 3D Dateien sein. Als Einstellung für die Einheiten sollte Meter gewählt werden.

Nun müssen wir das Plug-in *CloudWorx* in *MicroStation* laden. Diese findet man unter *Utilities>MDL*. Wählen Sie im unteren Fenster (*Available Applications*) *CloudWorx* und drücken dann auf *Load*.

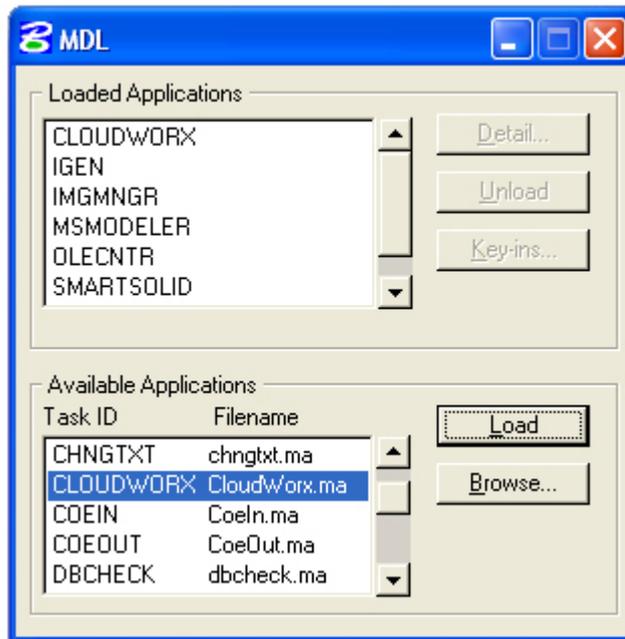


Abbildung 82: Laden der CloudWorx Plug-in in MicroStation

Alternativ dazu kann einfach folgender Befehl auf der Befehlsleiste *Key-In* (zu laden unter *Utilities>Key-In*) eingegeben werden: *mdl load cloudworx*. CloudWorx wurde nun in die MicroStation Umgebung geladen.

#### 5.7.1.4. CloudWorx Werkzeuge

Die Haupttoolbox von CloudWorx hat acht Unterboxen. Sie werden durch *click-and-hold* oder *click-and-drop* geöffnet (wie im unten angeführten Bild gezeigt wird).

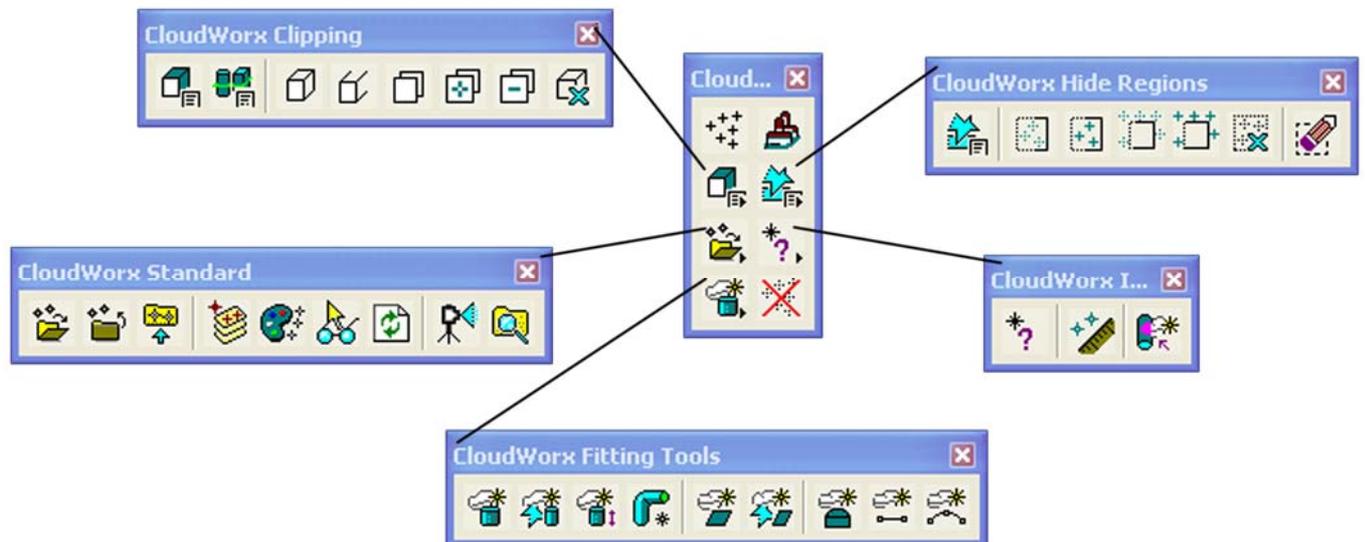


Abbildung 83: Toolboxes von CloudWorx

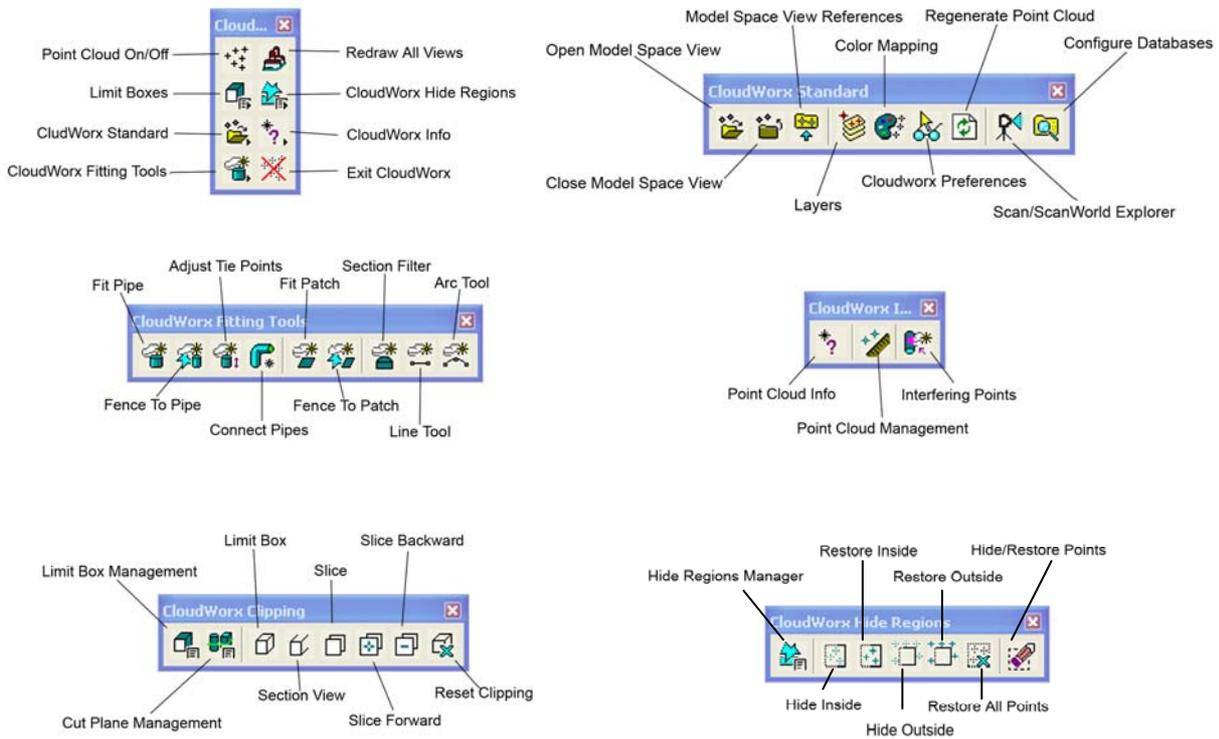


Abbildung 84: Toolboxes von CloudWorx

### 5.7.1.5. Importieren einer Punktwolke

Um die Punktwolke in *MicroStation* zu laden, verwenden wir das Tool *Open ModelSpace View* aus der *CloudWorx* Toolbar. Diese Anwendung öffnet das Fenster *Open ModelSpace View*. Dieses Fenster sollten Sie bereits aus der Verarbeitung der Daten in *Cyclone* kennen. Falls Datenbank und *ModelSpace* im Fenster des Servers nicht erscheinen sollten, müssen Sie im Fenster *Open ModelSpace View* zum *ModelSpace* navigieren.

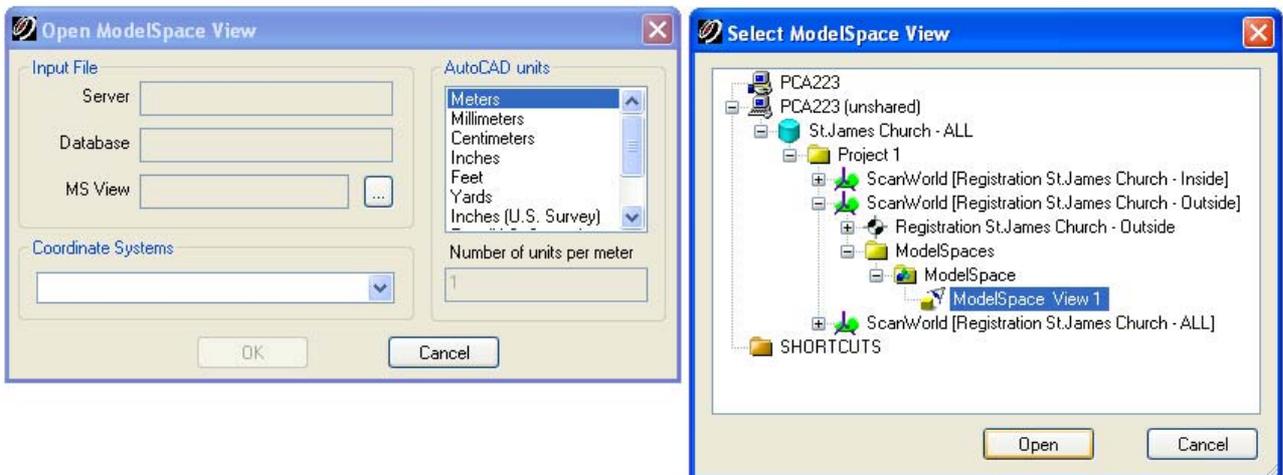


Abbildung 85: Öffnen des Punktwolkenfensters Open ModelSpace View in CloudWorx

Nach dem Drücken des Buttons *Open*, öffnet *CloudWorx* ein Dialogfenster, das die Parameter des Datensatzes enthält. Diese Parameter wurden automatisch aus der Datenbank extrahiert und werden vom Programm selbst ausgefüllt.

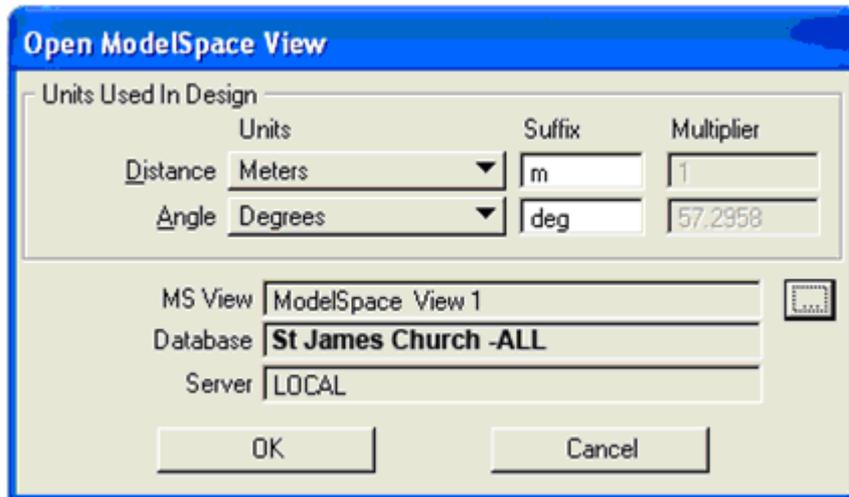


Abbildung 86: Parameter zum Öffnen des ModelSpace View

Klicken Sie auf *OK* und die Punktwolke erscheint in Ihrer aktuellen Zeichnung in *MicroStation*. Falls sie nicht angezeigt wird verwenden Sie den Befehl *Fit View* um Ihre Ansicht anzupassen.

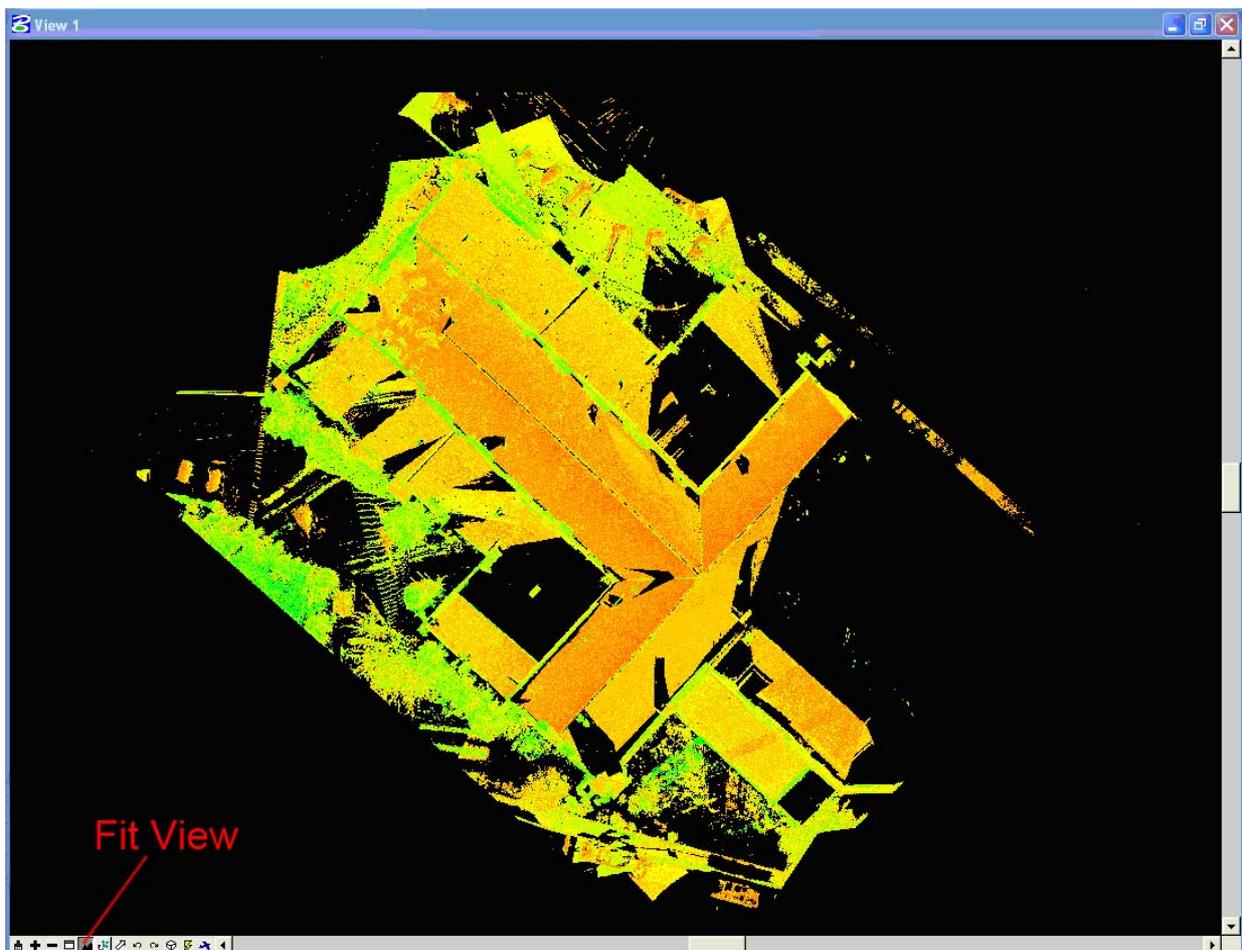


Abbildung 87: Geladene Punktwolke in MicroStation CloudWorx

Anmerkung: Standardmäßig schaltet MicroStation beim Importieren der Punktwolken die Einstellungen *Can Select Point Cloud* und *Snap To Point Cloud* ein. Diese müssen abgeschaltet werden. Diese Optionen befinden sich in *CloudWorx Preferences*.

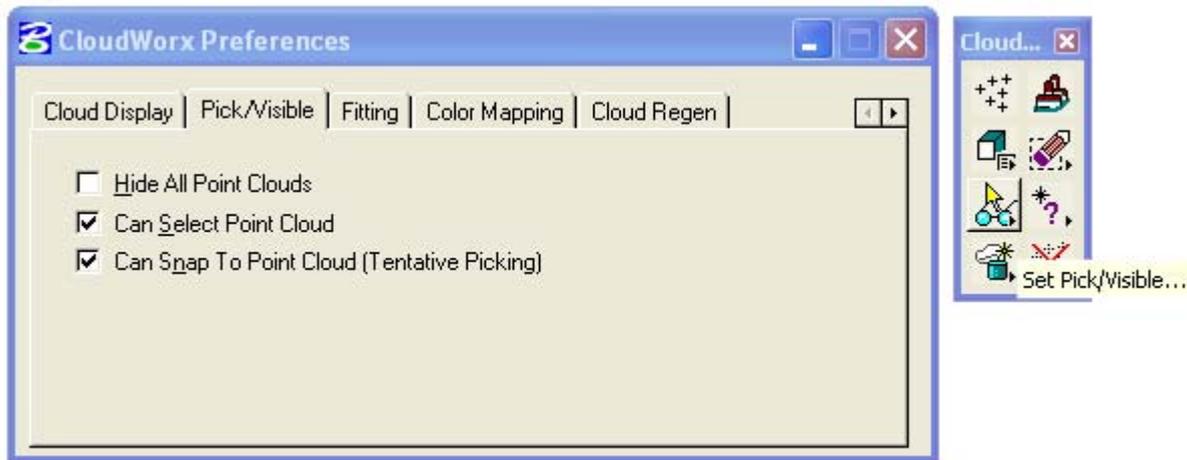


Abbildung 88: Grundeinstellungen von CloudWorx

#### 5.7.1.6. Regenerieren der Punktwolke

Werden Punktwolkendaten in *MicroStation* visualisiert, gibt es ein Problem mit der Regenerierung der Bildschirmdarstellung. Das bedeutet, dass ein üblicher *MicroStation Update View* nicht ausreichend ist, um die Punktwolke anzuzeigen. Die anfängliche Ansicht der Punktwolke kann spärlich erscheinen.

Um alle Punkte zu visualisieren, verwenden Sie das Symbol *Regenerate Point Clouds*. In der linken unteren Ecke des Bildschirms erscheint eine Fortschrittsleiste der eingelesenen Punktblöcke. Sind die 100 % erreicht (abhängig von der Punktzahl kann dies etwas länger dauern), sollte die Punktwolke regeneriert sein.

Beim Rein- und Rauszoomen, Rotieren oder Verschieben der Punktwolke kann die Anzeige der angezeigten Punkte abnehmen und das Regenerieren der Punktwolke muss erneut ausgeführt werden.

#### 5.7.1.7. Bearbeiten der Punktwolke

*CloudWorx* enthält Befehle zum partiellen Anzeigen der Punktwolke, welche als Unterstützung zum Drucken in *MicroStation* dienen. Wird zum Beispiel eine Straße gescannt, mit dem Ziel, Ansichtszeichnungen von Bauwerken herzustellen, dann ist es von Vorteil, wenn nur jener Teil der Punktwolke dargestellt wird, der für die gerade zu zeichnenden Ansichten benötigt wird.

Zum Eingrenzen der Punktwolkenanzeige stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Die Steuerung der Anzeige kann mittels der Befehle *limit box*, *slice*, *section view* oder *fence* durchgeführt werden.

In *CloudWorx* stehen die Dialogfenster *Limit Boxes Manager*, *Cutplane Manager* und *Hide Regions Manager* (in den Menüs *CloudWorx Clipping* und *CloudWorx Hide Regions*) zum Erstellen, Bearbeiten, Aktualisieren und Löschen aller Schnitte, Eingabefelder und Vollschnitte zur Verfügung. Der Vorteil dieser Dialogfenster ist, dass man verschiedene „Schnittstadien“ speichern und benennen kann, wie z. B. *Elevation 1*, *Elevation 2* usw.

In der Arbeitspraxis gibt es eher wenige Befehle die verwendet werden um die Punktwolke zu bearbeiten. Dies sind vor allem die Befehle *Hide/Show Regions* unter Verwendung einer

Umgrenzung und der Befehl *Slice*. Die Herausforderung besteht darin, zu wissen, welcher Befehl für das gewünschte Resultat anzuwenden ist.

*Anmerkung: Verborgene Punkte werden nicht aus dem ModelSpace View oder der Datenbank gelöscht. Die folgenden Befehle reduzieren lediglich die Größe und Komplexität für das Anzeigen und das Bearbeiten der Punktwolke.*

#### *Slice* (Schnitt)

Mit einem Schnitt kann man zwei parallele 3D Ebenen definieren und dann die außerhalb dieser zwei Ebenen liegenden Punkte verbergen. Das Resultat ist eine gesteuerte Ansicht eines Querschnittes der Punktwolke. Diese Methode ist zum Beschneiden einer Punktwolke gut zu verwenden, um zum Beispiel nur einen Aufriss einer Punktwolke darzustellen. Es kann jeweils nur ein Schnitt aktiviert werden. Der aktuelle Schnitt kann mit den Befehlen *Slice Forward* und *Slice Backward* oder mit dem *Cutplane Manager* (hier kann der Schnitt auch benannt werden) schrittweise (gleich der Breite des Schnittes) vor und zurück und entlang seiner Achse bewegt werden.

#### *Fence* (Umgrenzung, Zaun)

Der Umgrenzungsbefehl erlaubt das Anzeigen oder Verbergen von Punkten innerhalb einer vom Benutzer definierten Umgrenzung. Die Umgrenzungsoperationen sind unabhängig von anderen Funktionen zum Verbergen. Das bedeutet, dass eine Umgrenzung zum Anzeigen einer bestimmten Fläche verwendet werden kann und dann innerhalb dieser umgrenzten Daten ein Schnittbefehl angebracht werden kann. Eine Umgrenzung kann die Form eines Kreises, eines Rechteckes oder eines Polygons haben. Dieser Befehl bietet dem Anwender die präziseste Kontrolle über das Anzeigen und Verbergen von Punkten. Das Dialogfenster *Hide Regions Manager* (Menü *CloudWorx Hide Regions*) wird zum Managen aller durch eine Umgrenzung definierten Regionen verwendet. Jede Region wird einzeln angeführt. Leider ist es nicht möglich, diese Regionen zu benennen.

#### *Limit Box* (Begrenzungsbox)

Eine Begrenzungsbox ist eine dreidimensionale rechteckige Box außerhalb derer Punkte nicht angezeigt oder prozessiert werden. Die Begrenzungsbox kann mit den Befehlen aus dem Menü *CloudWorx Clipping* erstellt oder verändert werden. Diese kann im *Limit Box Manager* benannt und gespeichert werden.

#### *Section View* (Querschnittsansicht)

Eine Querschnittsansicht beruht auf der Definition einer dreidimensionalen Ebene. Alle Punkt außerhalb dieser Ebene werden verborgen. Die verbleibenden Punkte können als Querschnitt angezeigt werden.

### **5.7.1.8.      *Arbeitsbeispiel***

- Auswählen von Aufrissen

Die folgende Abbildung zeigt die Draufsicht der Kirche St. James. Daraus sollen Aufrisse erstellt werden. Zuerst werden nur die zu zeichnenden Ansichten isoliert. Wir beginnen mit dem rot umrandeten Teil.

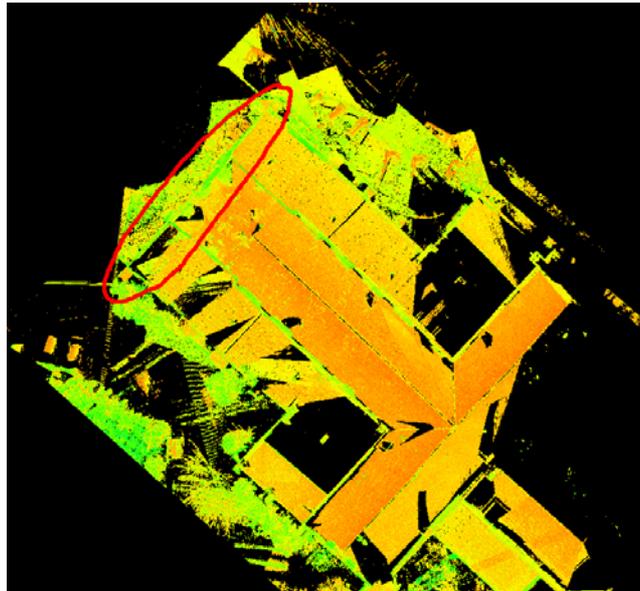


Abbildung 89: Auswahl eines Aufrisses

Zur Ausführung benötigen wir ein *Fence* (siehe Abbildung oben). Verwenden Sie *Fence Type: Shape*. Ist die Umgrenzung durchgeführt, klicken Sie auf den Befehl *Hide Outside* und alle Punkte außerhalb der Umgrenzung werden verborgen.

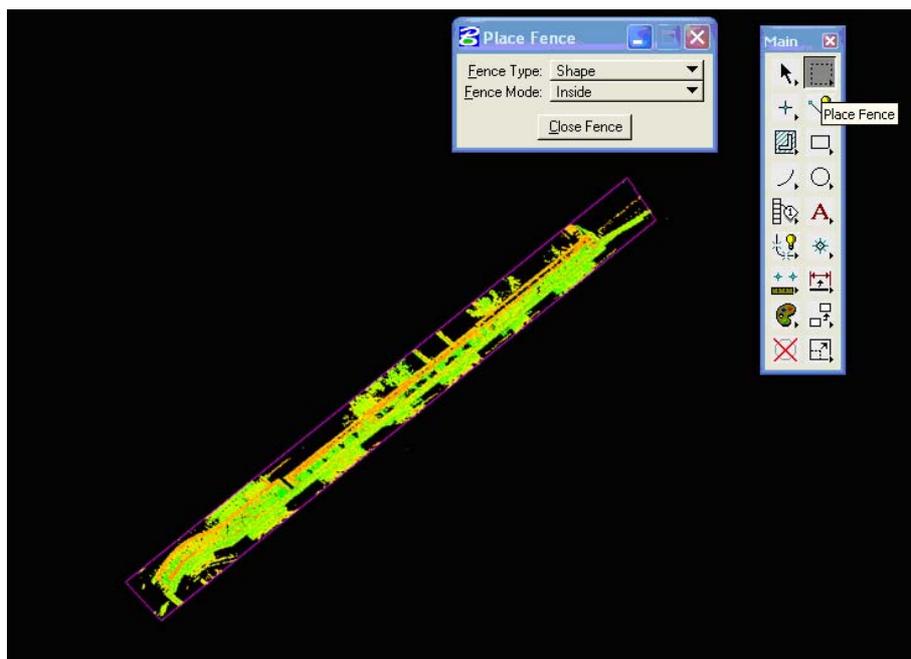


Abbildung 90: Verbergen aller Punkte außerhalb der Umgrenzung

- Ansichtseinstellungen

Standardmäßig öffnet *MicroStation* vier Ansichten. Diese sind: *Top* (Draufsicht), *Isometric* (Isometrisch), *Front* (Vorderansicht), *Right* (Seitenansicht). Diese Ansichten sind mit dem globalen Koordinatensystem verknüpft. Üblicherweise werden sie nicht mit dem Gebäude ausgerichtet, also müssen die Ansichten zunächst gedreht werden.

Zuerst muss eine Linie gezeichnet werden, die die Aufrissebene definiert. Zoomen Sie hinein und versuchen Sie eine Linie zu zeichnen, die entlang der Aufrissebene ausgerichtet ist.

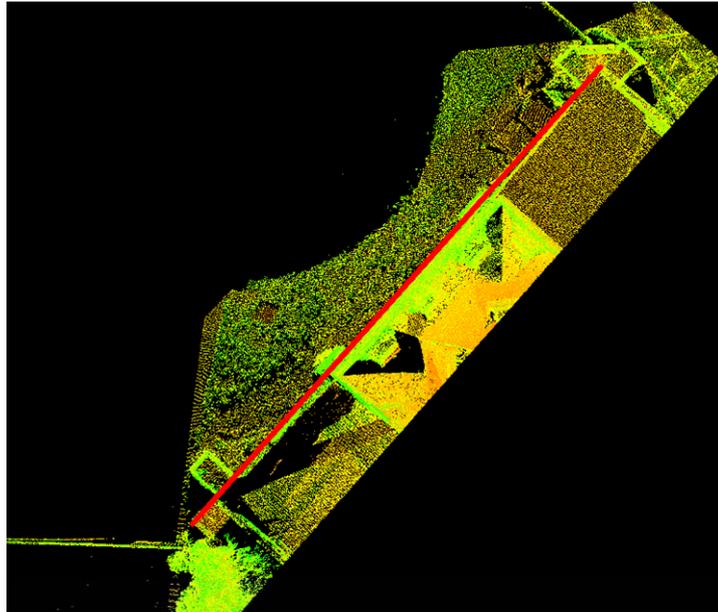


Abbildung 91: Erstellen einer Linie zum Definieren der Aufrissebene

Nun muss die Draufsicht mit dieser Linie ausgerichtet werden. In die Befehlszeile schreiben Sie *rotate view element* und drücken Sie *Enter*. Dann bestimmen Sie das Element, an dem ausgerichtet werden soll, also die so eben gezeichnete Linie und wählen Sie *view for rotation – Top view*.

Nun wollen wir auch die Vorder- und die Seitenansicht mit dem Aufriss ausrichten. Zunächst kopieren wir die Ansichten 1 bis 3 und drehen sie, so dass wir schließlich die Vorderansicht mit dem Aufriss ausrichten können. Der Befehl *Copy View* ist in der Werkzeugleiste *2D View Control* enthalten.



Abbildung 92: Werkzeugkasten 2D View Control

Drücken Sie das Symbol *Copy View* und wählen Sie den Quellaufriss (Ansicht 1 – Top), dann wählen Sie die Zielansicht (Ansicht 3 – Front). Dies kopiert die Ansicht 1 in das Fenster der Ansicht 3. Um die Vorderansicht in Ansicht 3 zu erhalten, müssen wir sie drehen.

In *MicroStation* haben Ansichten unabhängige Koordinatensysteme. Diese sind immer mit den Rändern des Fensters ausgerichtet. Die X-Achse verläuft horizontal von links nach rechts, die Y-Achse verläuft vertikal von unten nach oben und die Z-Achse steht aus der Ansicht heraus. Um die Ansicht um einen bestimmten Winkel zu drehen, geben Sie *rotate view* in die Befehlszeile ein und den durch Komma getrennten Betrag der Drehung um jede Achse. Die Drehrichtung entspricht dem Uhrzeigersinn.

Beispiel: Um die Frontansicht in Ansicht 3 zu erzeugen muss die Ansicht um die X-Achse um  $-90^\circ$  gedreht werden. Die Eingabe in die Befehlszeile lautet: *rotate view -90,0,0*. Dann drücken Sie *Enter* und wählen Sie die Ansicht. Jetzt müssen wir die rechte Seitenansicht des Aufrisses erstellen. Kopieren Sie Ansicht 3 zu Ansicht 4 und geben Sie *rotate view 0,-90,0* in die Befehlszeile ein (da die Drehung der Frontansicht um  $-90^\circ$  vertikal erfolgt), drücken Sie *Enter* und wählen Sie Ansicht 4.

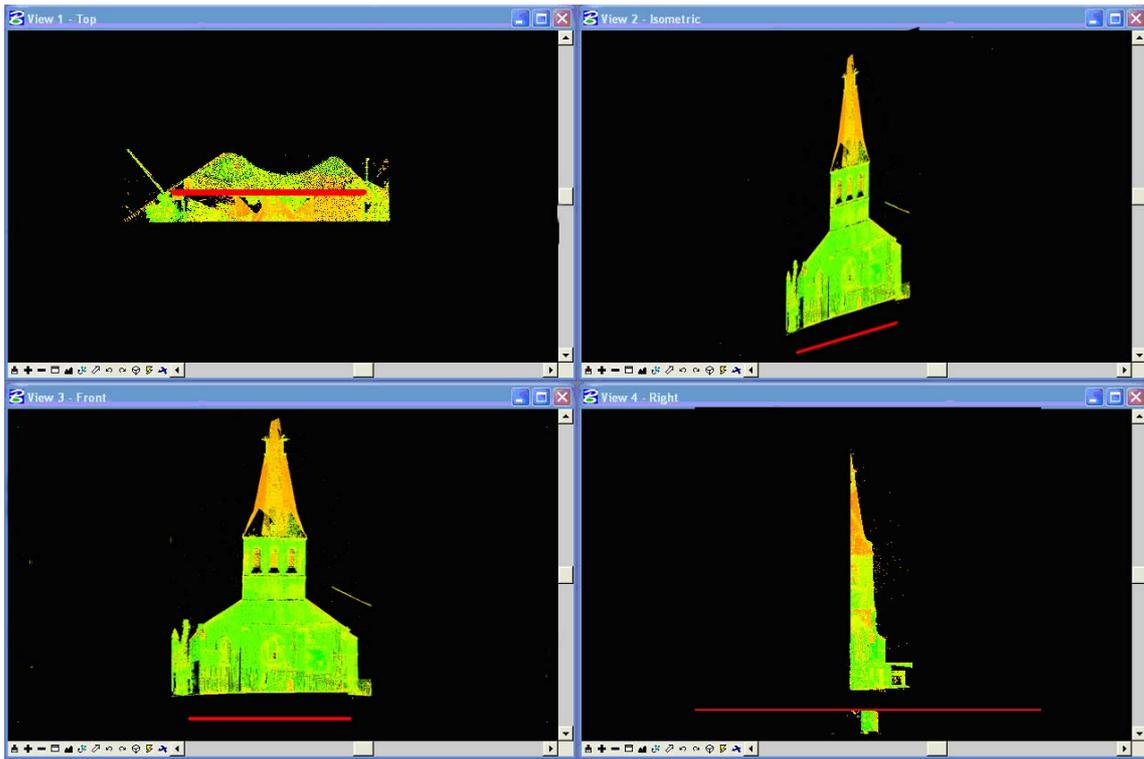


Abbildung 93: Ansichten mit der Aufrissebene ausgerichtet

Sie können diese Ansichten speichern so dass sie immer wieder aufgerufen und in jedem beliebigen Fenster angezeigt werden können. Dazu wählen Sie *Utilities>Saved Views*. Ein Dialogfenster, ähnlich dem unten dargestellten, erscheint.

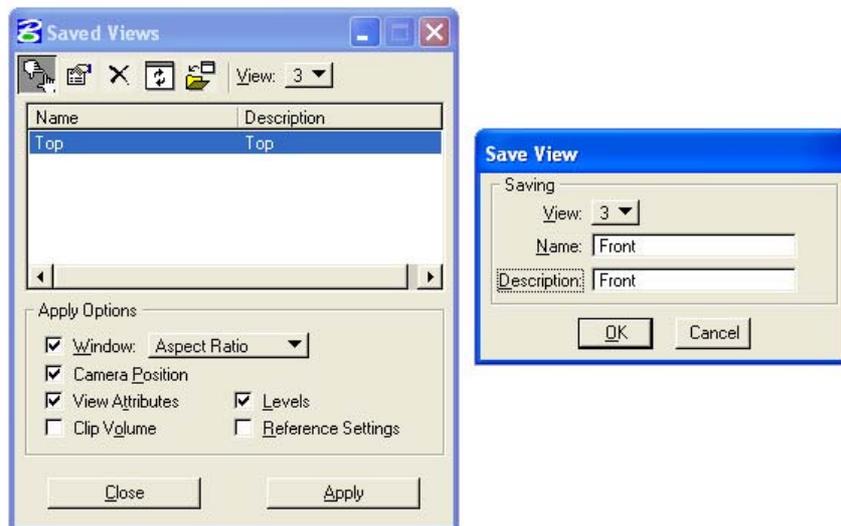


Abbildung 94: Speichern von Ansichten

Drücken Sie auf das Symbol *Capture* links oben im Dialogfenster und fügen Sie einen Namen und eine Beschreibung (zum Beispiel Ansicht 3, Name *Front*, Beschreibung *Front*) ein und klicken Sie *OK*. Dann speichern und benennen Sie die restlichen Ansichten. Um eine Ansicht als aktuell zu setzen, brauchen Sie nur den Namen markieren indem Sie auf ihn klicken und das zugehörige Darstellungsfeld durch das Symbol *View:* im oberen rechten Eck auswählen. *MicroStation* kann bis zu acht Ansichten anzeigen. Bestätigen Sie Ihre Auswahl durch klicken auf *Apply*.

Wenn Sie einen 2D Aufriss erstellen wollen, sollten sich alle Linien auf einer Ebene befinden. Um dies zu gewährleisten definieren Sie Ihr eigenes ACS (Active Coordinate System - aktives Koordinatensystem) und speichern Sie es, so dass alle Ihre Linien der Ebene XY ACS entsprechen.

Um das ACS zu definieren, verwenden Sie die, vorher zur Definition der Aufrissebene verwendete, Linie. Öffnen Sie die Werkzeugleiste **ACS** und verwenden Sie das Tool **Define ACS (Aligned with Element)**. Dann wählen Sie die Linie und die Ansicht. Jetzt sperren Sie die ACS-Ebene unter Verwendung des Befehls **Settings>Lock>ACS**.

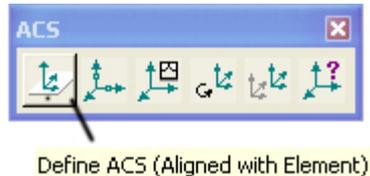


Abbildung 95: Definieren eines neuen aktiven Koordinatensystems

*Anmerkung: Bevor Sie mit dem Zeichnen beginnen, stellen Sie sicher, dass alle Einstellung gespeichert wurden (File> Save Settings oder CTRL+F). Andernfalls verlieren Sie alle Ihre Ansichten und Werkzeugeinstellungen beim Schließen ihrer Zeichnungen in MicroStation.*

*Anmerkung: Können Sie keine Werkzeugleiste auf Ihrem Desktop finden, ist sie möglicherweise nicht geöffnet. Das Öffnen der Werkzeugleiste geschieht über das Menü Settings>Toolboxes oder durch die Tastenkombination CTRL+T.*

Wenn das ACS erstellt und zum Aufriss ausgerichtet wurde, können wir mit dem Zeichnen beginnen. Folgen Sie den einzelnen Punkten und versuchen Sie die Punktwolke möglichst gut abzubilden. Einige Ergebnisse werden in Abbildung 96, Abbildung 97 und Abbildung 98 dargestellt.

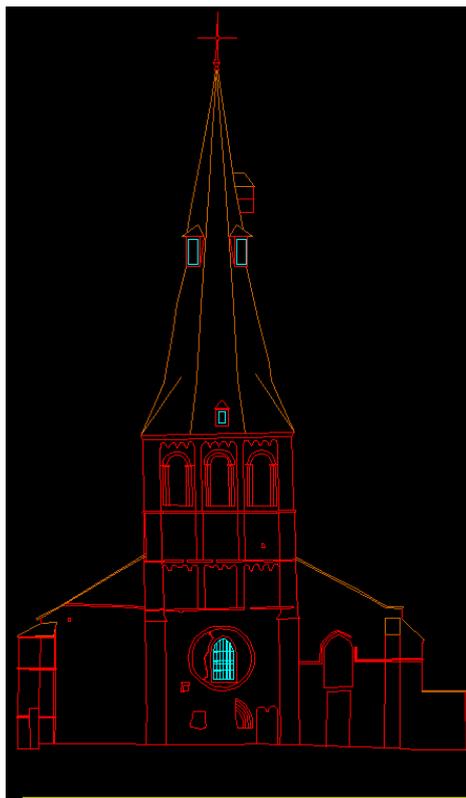
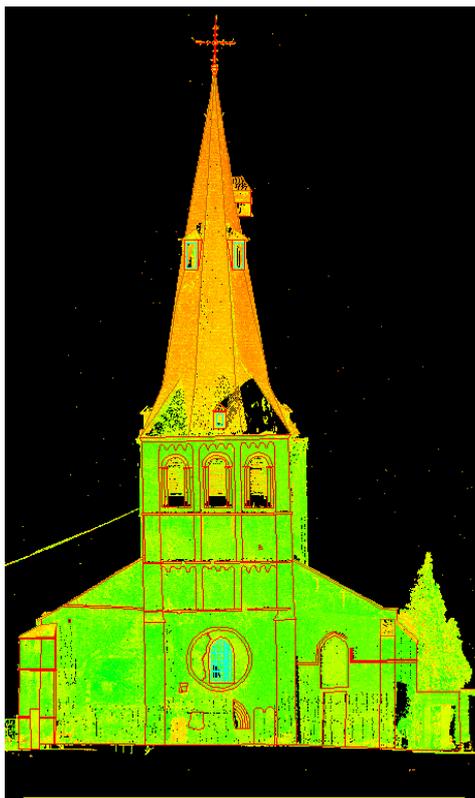


Abbildung 96: Vorderaufriß

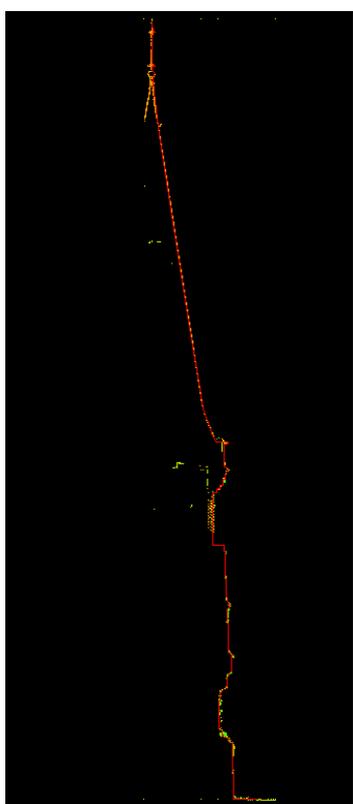


Abbildung 97: Querschnitt

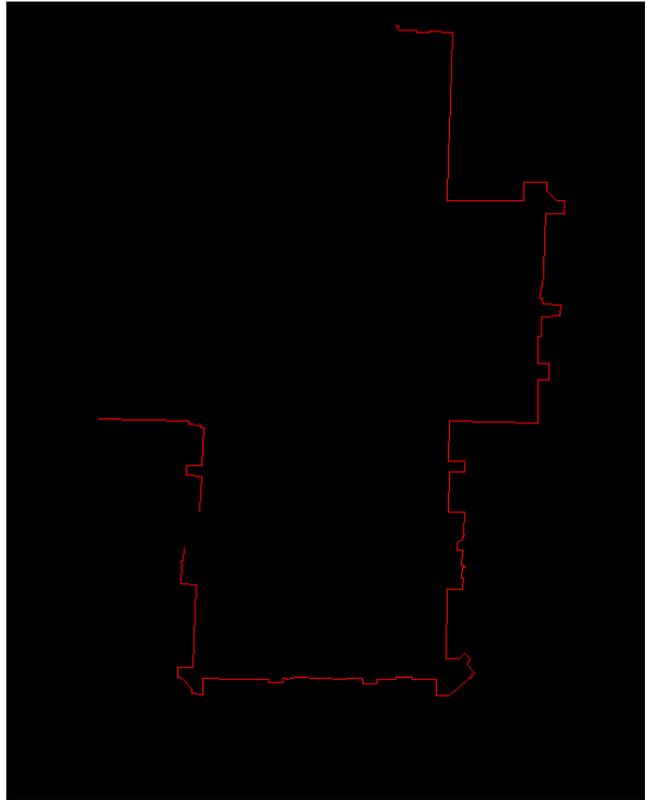


Abbildung 98: Grundriss

## **5.7.2. 3D Modellieren von komplexen Oberflächen**

### **5.7.2.1. Wahl der Software**

Eine der Projektanforderungen ist das Erstellen eines 3D-Modelles der gemauerten Gewölbe mit hoher Genauigkeit. Das 3D-Modell wird anschließend zur Deformationsanalyse mittels der Finiten-Elemente-Methode (FEM) benötigt. Üblicherweise werden solche komplexen Strukturen vermascht. Das heißt, dass alle Punkt zu kleinen Dreiecken verbunden werden und so Oberflächen erzeugt werden können.

Die von den Herstellern zur Verfügung gestellten Standard Softwarepakete (z.B. *Cyclone*, *Realworks Survey*, ...) enthalten einige Vermaschungs- und Modellierungswerkzeuge. Diese sind aber in ihrer Verwendung limitiert oder man kann sie nur für einfache Formen verwenden (Ebenen, Zylinder, ...) oder sie verfügen nicht über eine angemessene Kontrolle zur Rauschreduktion oder zum Löcherfüllen. Deswegen schlagen wir vor eine spezielle Software zur Punktwolkenbearbeitung zu benutzen. Wegen dem verstärkten Einsatz von Laserscannern in verschiedenen Einsatzgebieten, besteht eine große Konkurrenz auf dem Markt dieser Softwarepakete.

Für dieses Tutorial wählten wir die Software *Geomagic Studio (v9)*. Die Gründe warum wir uns für diese Software entschieden liegen in der sehr bedienungsfreundlichen Benutzeroberfläche, der Möglichkeit große Datensätze zu bearbeiten und in der Möglichkeit bei der Durchführung bestimmter Aufgaben eine Voransicht zu erstellen. Dies erleichtert das Finden der richtigen Parameter in den Einstellungen. Andere Softwarepakete, die teilweise ähnliche Funktionen bieten sind *Rhino3d*, *Innovmetric PolyWorks*, *Inus Rapidform*, *JRC Reconstructor*,...

### **5.7.2.2. Aufbereitung und Exportieren der Daten für das Modellieren**

Da die Modellierungs- und Vermaschungsschritte zu den rechenintensivsten und arbeitsaufwändigsten im gesamten Datenverarbeitungsprozess gehören, lohnt es sich, nur die für die Verarbeitung benötigten Daten zu importieren. Die voll registrierte Punktwolke kann in der *Cyclone* Software ebenso wie in der *Geomagic Studio (v9)* Software aufgeteilt werden. *Cyclone* kann riesige Datensätze besser handhaben als *Geomagic Studio (v9)*, deshalb verwenden wir für diese Aufgabe *Cyclone*.

Um die Daten in Stücke aufzuteilen, erstellen wir eine neue *ModelSpace* Ansicht des registrierten Datensatzes des Projektes *St.James Church – Inside*. Im *Cyclone Navigator* macht man einen Rechtsklick auf den Ordner *ModelSpace* und wählt den Befehl *Create and open ModelSpace view* aus dem Dropdown-Menü.

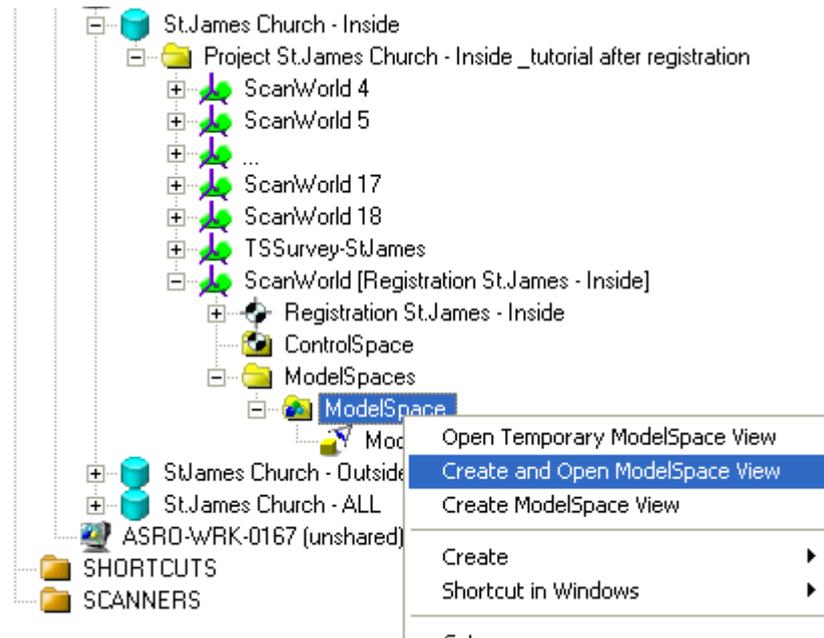


Abbildung 99: Erstellung und Öffnen des ModelSpace View des Registrierungsprojektes 'Inside'

Cyclone öffnet nun eine Ansicht des voll registrierten Punktwolkendatensatzes des Innenraumes der Kirche. Um jenen Teil der Punktwolke, der nur die Gewölbe darstellt, auswählen zu können, verändern Sie die Ansicht von parallel zu perspektivisch. Das wird mittels der zwei Symbole  in der oberen Werkzeugliste erledigt. Dann wählen Sie den Befehl *Viewpoint - Standard Viewpoints - Top* um eine Draufsicht zu erhalten. Im gleichen Menü (*Viewpoint*) entfernen Sie die Option *Keep Viewpoint Upright*. Dann manövrieren Sie die Punktwolke mit Hilfe der Hilfswerkzeuge *pan*, *rotate* und *zoom* um eine Ansicht zu erhalten, die dem unten angeführten Bild entspricht.

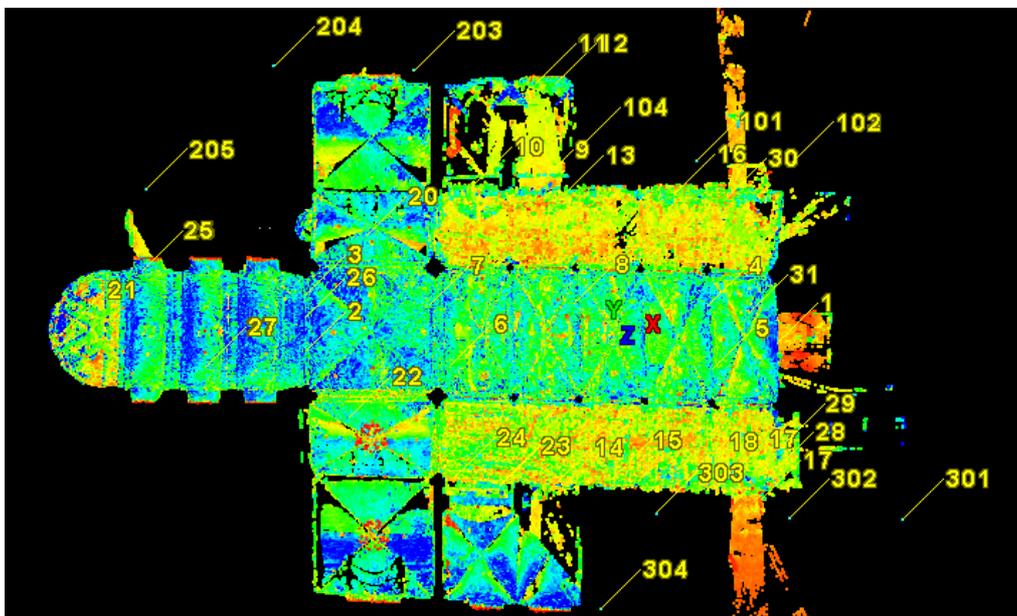


Abbildung 100: Draufsicht des registrierten Projektes 'Inside'

Verwenden Sie das Werkzeug *Rectangle Fence Mode*  um nur die Gewölbe des Hauptschiffes auszuwählen. Klicken Sie mit der rechten Maustaste auf die Umgrenzung und wählen Sie den Befehl *Fence - Delete Outside* vom Dropdown-Menü.

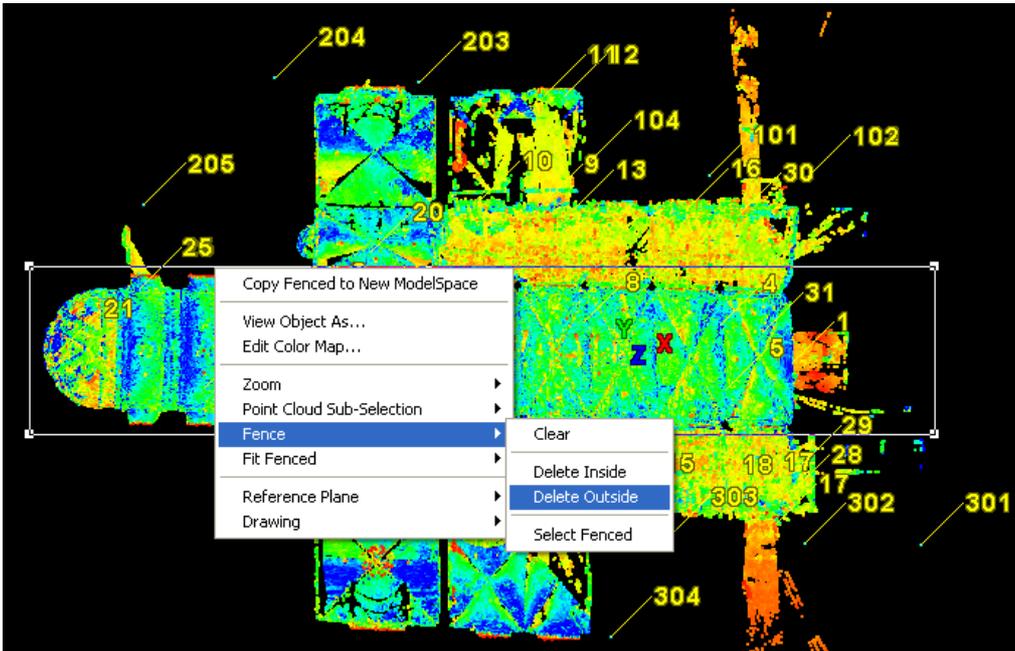


Abbildung 101: Auswählen von Teilen der Punktwolke unter Verwendung des Umgrenzungswerkzeuges

Dann drehen Sie die Punktwolke um eine Vorderansicht zu erhalten und entfernen sie die unerwünschten Teile. Das Resultat dieser Prozesse ist in Abbildung 102 angeführt.

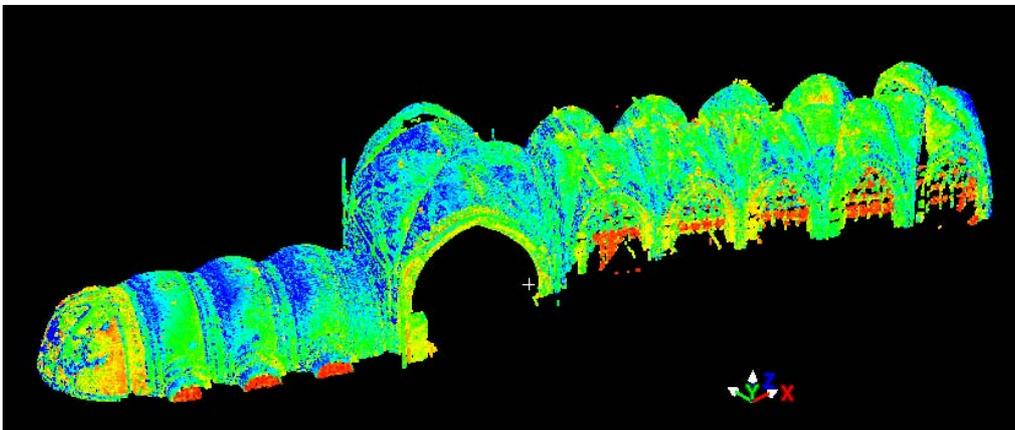


Abbildung 102: Gewählter Bereich der Punktwolke

Leider gibt es keinen einfacheren Weg um die Anzahl der Punkt, die in diesem Punktwolkensatz beinhaltet sind, abzufragen. Der einzige Weg ist alle einzelnen Punktwolken in eine einzige Punktwolke zu vereinen und dann die benötigte Information aus dieser Punktwolke herauszuarbeiten. Mit dem Befehl *Tools - Unify Clouds...* kann dies durchgeführt werden. Vergewissern Sie sich, dass die Option *Reduce option* nicht aktiviert ist. Es erscheint eine Warnung, die besagt, dass es zu einem Löschen von Objekten kommt wenn die Punktwolken zusammengeführt werden. Wählen Sie 'Yes' und warten Sie ein bisschen. Sind die Punktwolken zusammengeführt, können wir Informationen über diese Punktwolke erhalten indem wir auf den Befehl *Tools - Info - ModelSpace Info* drücken.

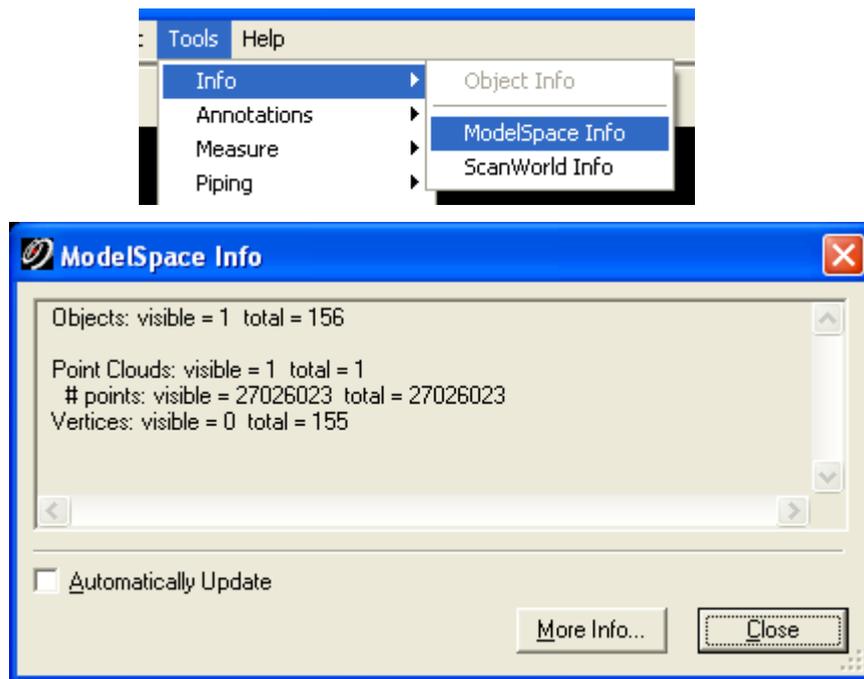


Abbildung 103: Das Dialogfenster ModelSpace Info gibt Aufschluss darüber, wie viele Punkte sich in der Punktwolke befinden.

Wir sehen, dass in der gefilterten Punktwolke noch immer 27 Millionen Punkte übrig bleiben. Diese Punktzahl ist normalerweise noch immer zu groß, um sie zur Verarbeitung laden zu können (ausgenommen sind 64-Bit Versionen, die eine volle Speicherkapazität erlauben). Deswegen müssen wir sie weiter in drei Punktwolken aufteilen: eine Punktwolke vom Chor, eine vom Gewölbe über der Vierung und eine weitere Punktwolke von den Gewölben über dem Hauptschiff.

In der Ansicht von *Cyclone* erstellen Sie um die Gewölbe über dem Chor eine neue Umgrenzung. Dann wählen Sie die Umgrenzung mittels Rechtsklick an und wählen Sie den Befehl *Copy Fenced to New ModelSpace* (siehe Abbildung 104). Dadurch wird ein neuer *ModelSpace* hergestellt und die ausgewählten Punkte in diesen neuen *ModelSpace* kopiert. Nun wiederholen Sie den Vorgang mit den anderen zwei Teilen. Vergewissern Sie sich, dass eine kleine Überlappung zwischen den Punktwolken vorhanden ist. Nach Beendigung dieses Vorganges und nach dem Schließen des neu erstellten *ModelSpace View* wählen sie den *Remove Link* des originalen *ModelSpace* um die Verbindung zwischen dieser Punktwolke und dem originalen *ModelSpace* zu trennen.

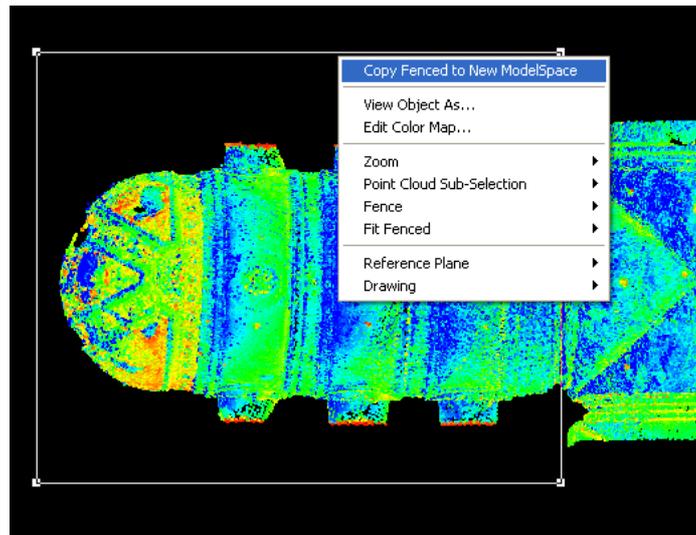


Abbildung 104: Kopieren des ausgewählten Bereiches in eine neue ModelSpace Umgebung

Nun werden wir jede dieser Punktwolken exportieren, so dass diese in anderer Software importiert werden können. Im *Cyclone Navigator* können wir drei neue *ModelSpaces* erkennen. Jeder von ihnen beinhaltet Punkte, die wir vorhin gewählt haben. Mittels Rechtsklick auf den jeweiligen *ModelSpace View* kann der Befehl *Export* gestartet werden. Die meisten Softwarepakete zur Punktverarbeitung können verschiedenste Dateiformate lesen. Eines von Experten häufig verwendetes Format ist das Format \*.xyz. Wählen Sie eben dieses Format und benennen sie die Dateien respektive 'vaults\_choir.xyz', 'vaults\_crossing.xyz' und 'vaults\_mainNave.xyz' (siehe Abbildung 105). Ist der Export beendet schließen Sie den *Cyclone Navigator*.

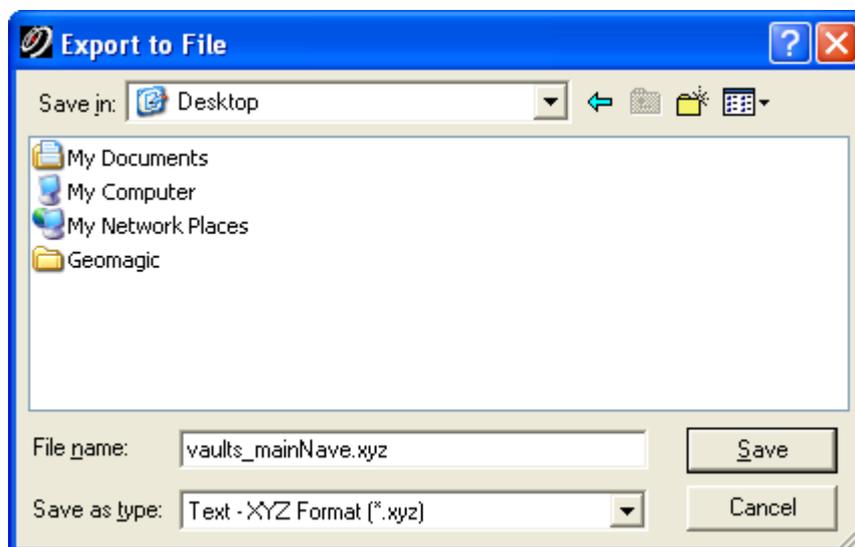


Abbildung 105: Exportieren der Punktwolke in eine Datei

### 5.7.2.3. Einführung in Geomagic Studio (v9)

Bei Verwendung von *Geomagic Studio (v9)* stehen verschiedene Methoden zur Herstellung eines Vermaschungsmodelles zur Verfügung. Es ist jedoch wichtig den richtigen Arbeitsablauf zu befolgen. In diesem Tutorial stellen wir einen bestimmten Arbeitsablauf vor, der eine Anleitung zu einem allgemeinen Prozess gibt und der im Arbeitsfeld Denkmalschutz üblich ist. Das Tutorial erklärt Ihnen die Basisschritte und Prinzipien und hilft Ihnen die Software *Geomagic Studio (v9)* zu benutzen. Das Tutorial *St. James* ist sehr komplex und

hauptsächlich werden Werkzeuge aus *Geomagic Studio (v9)* verwendet. Für weitere Information sei auf die Hilfsdateien von *Geomagic Studio (v9)* oder auf die Homepage von *Geomagic Studio (v9)* verwiesen ([www.geomagic.com](http://www.geomagic.com)).

Wie bereits erwähnt, werden wir nun mit der Punktwolkenbearbeitung fortfahren und dazu die Software *Geomagic Studio (v9)* verwenden. Wir öffnen die Software *Geomagic Studio (v9)* durch Doppelklick auf das Symbol am Desktop.

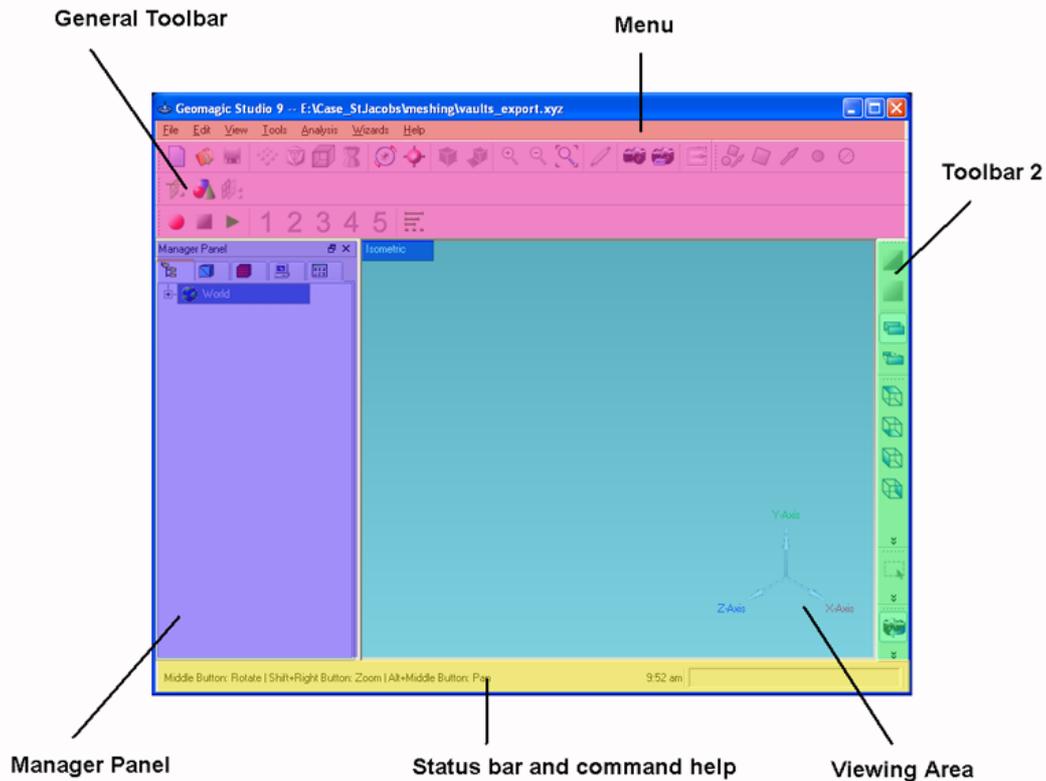


Abbildung 106: Geomagic Studio (v9) Grafische Benutzeroberfläche

*Geomagic Studio (v9)* hat 6 Hauptbereiche der Benutzeroberfläche. Sie sind in Abbildung 106 angezeigt. Zum Laden des Datensatzes wählen Sie den Befehl *File – Import* und die Datei 'vaults\_choir.xyz'. Ein Dialogfenster erscheint, mit der Möglichkeit die volle Punktzahl oder nur einen Teil davon zu laden (siehe Abbildung 107). Wir verwenden zunächst *100% sampling ratio* und laden alle Punkte.

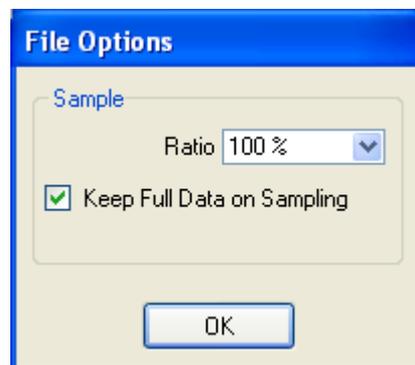


Abbildung 107: Laden des vollen Umfangs der Punktwolke

Nach dem Importieren fragt *Geomagic Studio (v9)* welche Einheiten für diesen Datensatz verwendet werden sollen. In unserem Fall registrierten wir alle Punktwolken zu unseren Totalstationsdaten in 'Meters'. Deshalb ist auch hier der richtige Einheitswert 'Meters'.

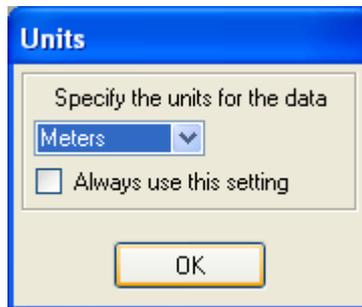


Abbildung 108: Festlegen der Einheiten für die geladene Punktwolke

*Geomagic Studio (v9)* öffnet die Punktwolke und zeigt sie in der *Viewing Area*. Außerdem werden auch die im Speicher geladenen Punkte angezeigt. In unserem Fall werden ca. 7,8 Millionen Punkte geladen.

Um die Punktwolke zu drehen drücken Sie auf die mittlere Maustaste und bewegen Sie die Maus. Zum Zoomen verwenden Sie das Scroll-Rad und zum Verschieben (Pan) halten Sie die *Alt* Taste gedrückt und bewegen die Maus. Da es sehr rechenaufwändig ist, die volle Anzahl an Punkten auf dem Bildschirm anzuzeigen, gibt es in *Geomagic Studio (v9)* die Möglichkeit, die Anzahl der dargestellten Punkte zu reduzieren. Gleichzeitig bleiben alle Punkte im Speicher für die Verarbeitung erhalten. Zum Verändern des Prozentsatzes der angezeigten Punkte werden die Display-Statistiken im *Manager Panel* verwendet (siehe Abbildung 109). Der linke Wert bestimmt den Prozentsatz der statischen Punkte (wenn die Punktwolke gerade nicht bewegt wird) und der rechte Wert den der dynamischen Punkte (während die Punktwolke bewegt wird). *Geomagic Studio (v9)* stimmt diesen Wert automatisch mit der zur Verfügung stehenden Speicherkapazität ab.

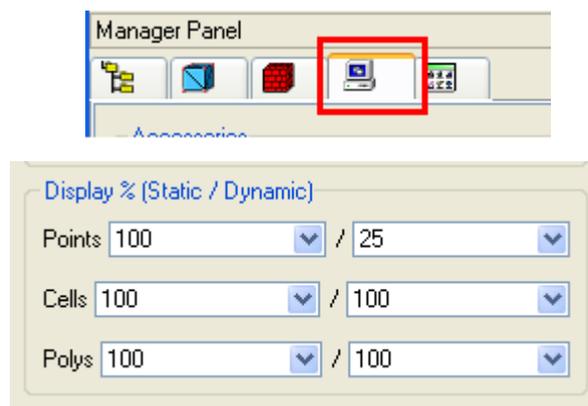


Abbildung 109: Dialogfenster Display-Statistiken

Wurde die Punktwolke geladen, ist eine schwarze Masse an Punkten sichtbar. Daraus eine Struktur abzuleiten ist schwierig. Deshalb verändern wir den Punktschatten. Dazu verwenden wir den Befehl *View - Shading - Shade Points* (Abbildung 110).

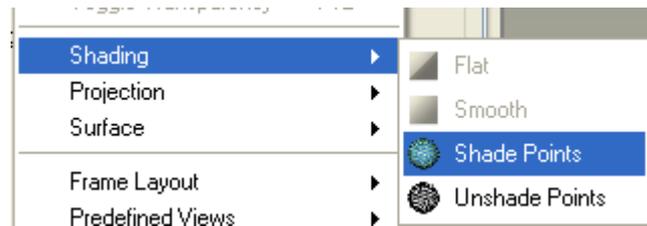


Abbildung 110: Schattieren der Punktwolkenansicht zum besseren Verständnis

Die Punktwolke wird aufgeteilt (siehe Kapitel 1.7.2.2). Somit ist sie sauberer und leichter verständlich (Abbildung 111).

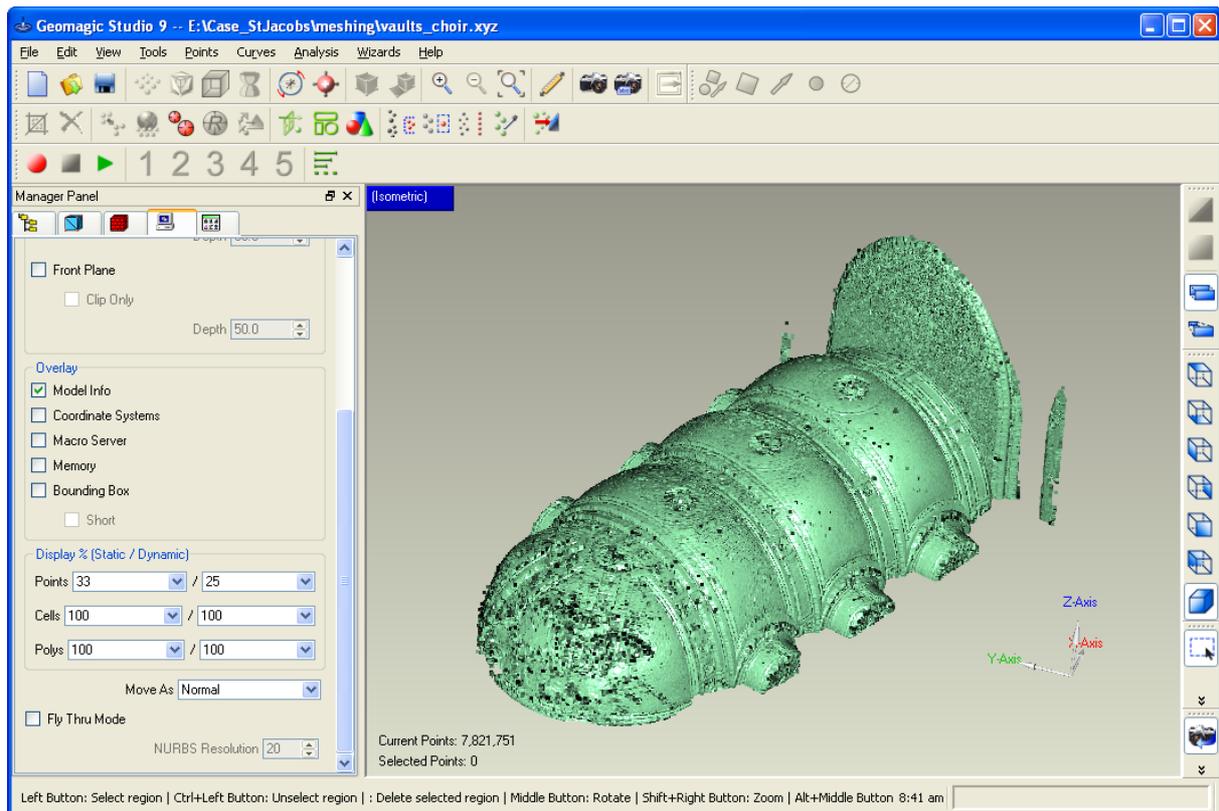


Abbildung 111: Ansicht der voll geladenen, aufgeteilten Punktwolke in Geomagic Studio (v9)

Die 32Bit Version von *Geomagic Studio (v9)* kann mit 20 bis 25 Millionen Punkte arbeiten. Es wird aber empfohlen, eine geringere Anzahl an Punkten zu bearbeiten (ca. 5 Millionen Punkte). Für diesen Teil der Gewölbe (8 Millionen Punkte), teilen wir den Datensatz in zwei Teile. Dazu wechseln Sie durch verschieben und drehen der Ansicht in die Draufsicht. Dann wählen Sie über eine Selection Box die ersten zwei Gewölbe aus. *Geomagic Studio (v9)* wählt diese Punkte aus und markiert sie rot (Abbildung 112). Um sie vom übrigen Punktwolkendatensatz zu trennen, wählen Sie *Edit – Selection To Object*. Benennen Sie das neue Projekt 'part 1' und lassen Sie die Option 'Cut and Paste' aktiviert.

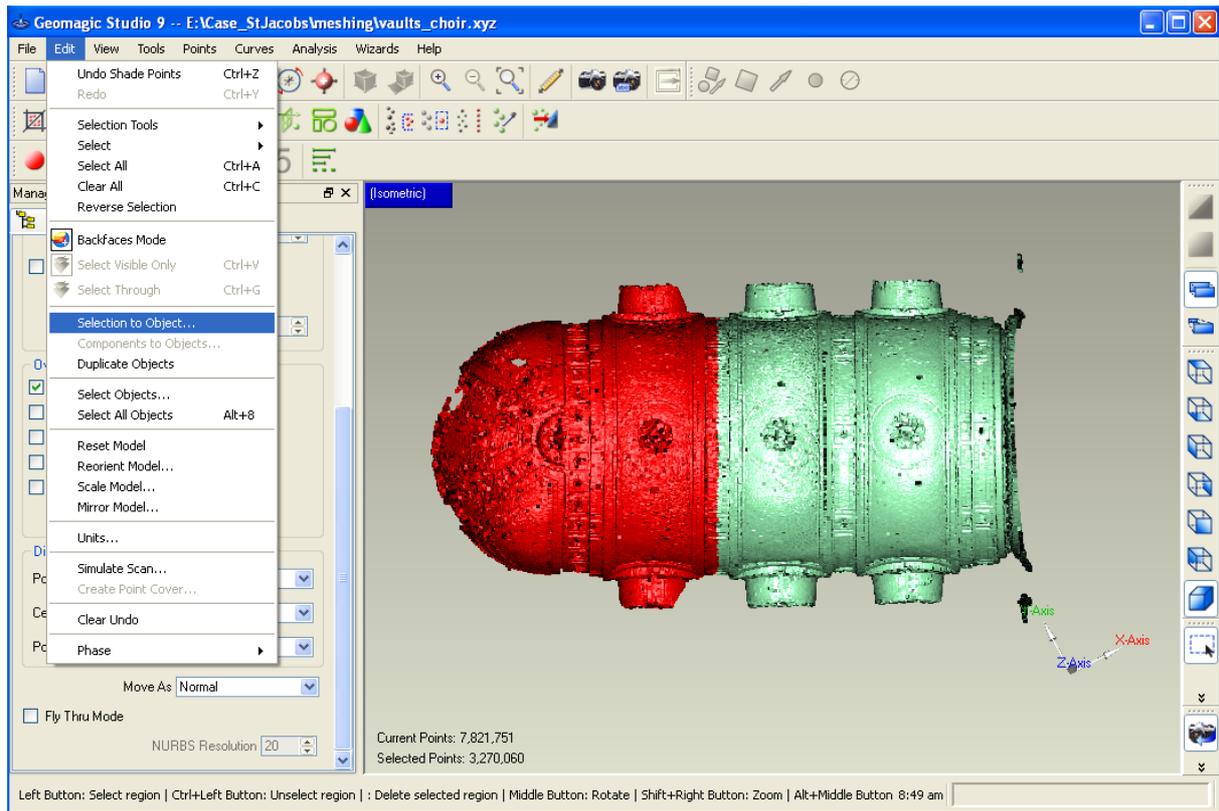


Abbildung 112: Teilen der Punktwolke in kleinere Stücke für einfacheres Arbeiten

Hat *Geomagic Studio* (v9) diese Operation beendet, finden wir die zwei Teile ('part1' & 'vaults\_choir') im Model Manager. Zuerst werden wir den zweiten Teil ('vaults\_choir') vollständig bearbeiten. Im Moment können wir den ersten Teil aus dem Speicher entfernen. Dafür drücken Sie mit der rechten Maustaste auf 'part 1' und wählen Sie *ignore* und anschließend *hide*.

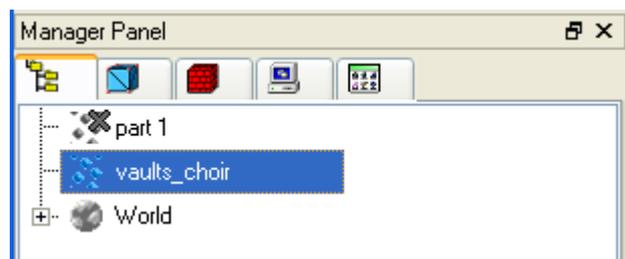


Abbildung 113: Entfernen eines Teiles der Punkte aus dem Speicher

#### 5.7.2.4. Vorbereiten der Punktwolke: Rauschreduktion

Wir können beim Analysieren der Punktwolke sehen, dass bestimmte Bereiche nicht mit dem Ganzen verbunden sind und dass die Daten ein Rauschen aufweisen (ausgedrückt durch die gesprenkelten Punkte). Bevor wir mit dieser Punktwolke ein vermaschtes Modell rechnen können, muss sie gesäubert und neu geordnet werden.

Einer der ersten Schritte für die Säuberung ist, die nicht verbundenen Komponenten händisch zu entfernen. Man verwendet hierfür eine Selection Box und drückt die Taste *delete* (Abbildung 114). In *Geomagic* sind verschiedene Werkzeuge zum Auswählen vorhanden: Die Symbole



befinden sich auf der rechten Seite des Bildschirms.

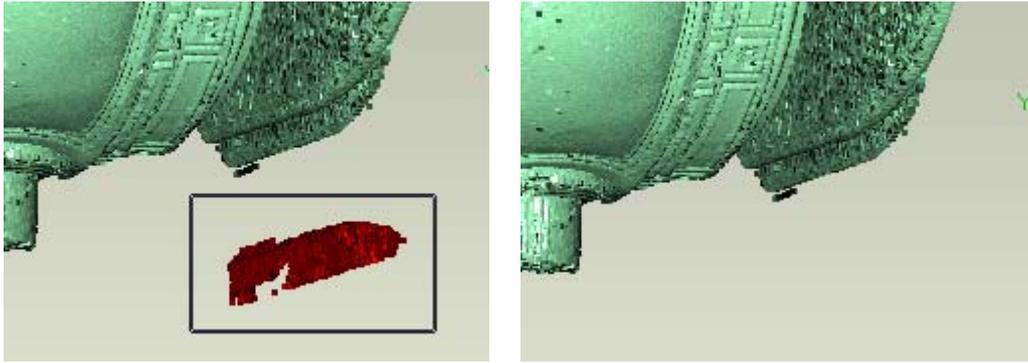


Abbildung 114: Händisches Entfernen der nicht verbundenen Teile

Wurden alle größeren, isolierten Komponenten händisch vom Datensatz entfernt, kann mit dem Werkzeug *Select Outliers* begonnen werden die Punktwolke für den Vermaschvorgang zu optimieren.

Wählen Sie den Befehl *Edit – Select – Outliers* oder drücken Sie das Symbol . *Geomagic Studio (v9)* öffnet nun die Box mit den Einstellungsparametern auf der linken Seite des Bildschirms. Adjustieren Sie den Wert, so dass keine großen, verbundenen Bereiche als Messausreißer gewählt werden. In unserem Fall verwenden wir einen Wert von 50 und wir können im unteren linken Eck erkennen, dass durch diesen Wert 57.000 Punkte von 4,5 Millionen ausgewählt werden (Abbildung 115). Das sind ca. 1,2 Prozent der gesamten Punkteanzahl. Wir können auch im vertikalen Bereich, der dieses Gewölbe mit dem Kreuzgewölbe verbindet, ein Rauschen erkennen. Dies kommt daher, dass der Schnittwinkel des Laserstrahles mit der Oberfläche sehr klein war, was einen breiten Footprint und eine niedriges Laserrückstrahlungsvermögen zur Folge hat (siehe Kapitel 3.1.3).

Nach dem Drücken von *OK* werden die verrauschten Punkte ausgewählt und durch die Taste *Entf* gelöscht.

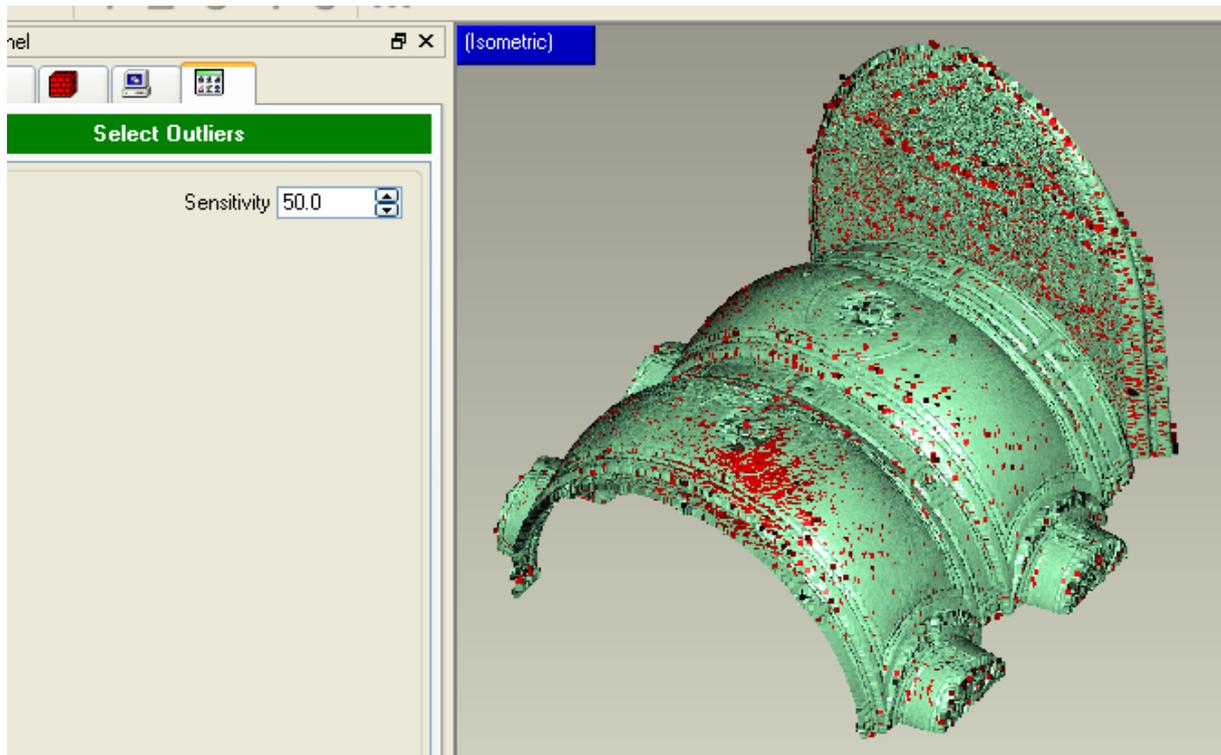


Abbildung 115: Entfernen der Messausreißer mit dem Befehl Select Outliers

Der nächste Schritt der Datenaufbereitung ist das Entfernen von anhaftendem Rauschen. *Geomagic Studio (v9)* stellt dafür den Befehl *Points – Reduce noise...* zur Verfügung. Dieser Befehl bietet eine große Anzahl an Möglichkeiten und Einstellungen für die Beseitigung von Rauschen ohne dabei die Genauigkeit zu beeinflussen. Drei verschiedene Rauschreduktionsalgorithmen sind implementiert. Jedes dieser drei ist für einen bestimmten Typ von Objekt optimiert: *Free-form shapes*, *Prismatic shapes (conservative)* und *Prismatic shapes (aggressive)*. Im Allgemeinen nähert man sich architektonischen Bauwerken mit prismatischen Formen an. Bei einer Vermessung aus dem Bereich des Denkmalschutzes brauchen wir jedoch präzise Messungen und keine Annäherungen. Deswegen benützen wir die Option *'free-form shapes'* zur Rauschreduktion (Abbildung 116).

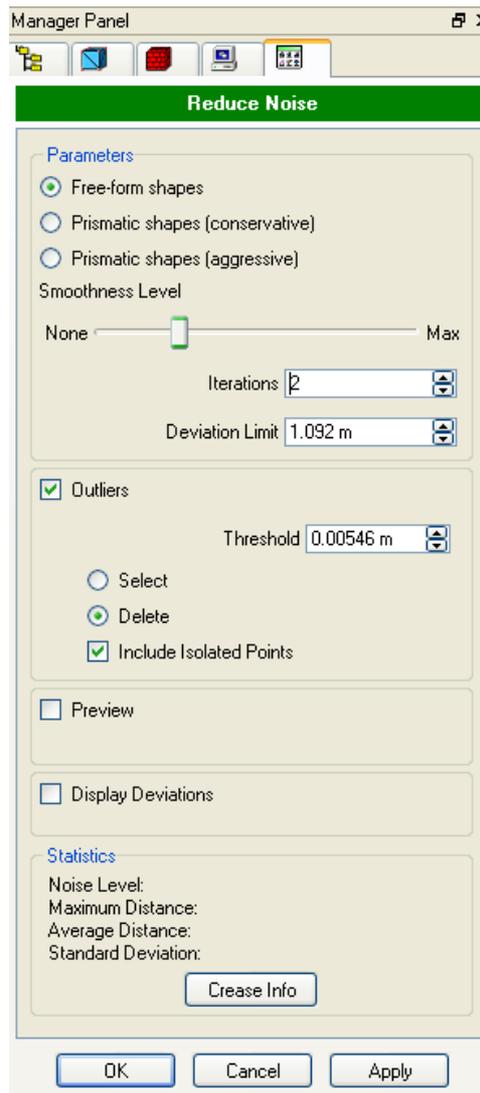


Abbildung 116: Rauschreduktion unter Verwendung der automatischen Werkzeuge zur Rauschreduktion

Um die Stärke der Rauschreduktion kontrollieren zu können, bietet *Geomagic Studio (v9)* drei Parameter: den *Smoothness Level*, die *Number of Iterations* und das *Deviation Limit*. Eine erste Schätzung für das *Deviation Limit* wird automatisch von *Geomagic Studio (v9)* berechnet. In den meisten Fällen ist dieser Wert adäquat, also behalten wir ihn auch. Der Parameter *Smoothness Level* bestimmt die Aggressivität des Filters. Generell versucht man eine möglichst niedrige Einstellung zu verwenden, die aber trotzdem noch akzeptable Ergebnisse liefert. Die Anzahl der Iterationen kann ebenso eingestellt werden. Dies erlaubt uns,

123

in aufeinander folgenden Schritten, eine graduelle Rauschreduktion. Die Anhebung dieser Einstellung wird gegenüber der Anhebung der Einstellung des Wertes für die Glättung bevorzugt, da dieses mehr Details über die Oberfläche liefert.

Um eine Vorstellung davon zu bekommen wie gut die ausgewählten Einstellungen funktionieren kann eine Voransicht einer kleinen Stelle des Modells gemacht werden. Dazu aktivieren Sie die *Preview option* im Dialogfenster (Abbildung 117). Im Voransichtsfenster kann die Menge der angezeigten Punkte bestimmt werden. Bei großen Datensätzen empfehlen wir, um die 10.000 Punkte zu verwenden. Wählen Sie einen Punkt in der Punktwolke und *Geomagic Studio* (v9) wird diesen Bereich unter Verwendung der Rauschreduktionseinstellungen isolieren und vermaschen. Während Sie sich in dieser Vorschau befinden, können Sie die Einstellungen verändern und deren Effekte besser erkennen. Wir empfehlen Ihnen, einen relativ glatten Bereich als Vorschau zu wählen und verschiedene Einstellungen der Glättung und der Iterationen anzuwenden. Wählen Sie dann den Button *Select Area* erneut und suchen Sie einen komplexeren Bereich mit mehr Kanten aus. Überprüfen Sie, ob die Einstellungen, die Sie für den glatten Bereich getroffen haben, auch für diesen Teil zufrieden stellend sind. Wenn nicht, adaptieren Sie diese und überprüfen Sie den glatten Bereich erneut.

Für den Datensatz 'vaults\_choir.xyz' verwenden wir die Option *Free-form shapes* mit dem Glättungsschieber auf Mittelstellung und drei Iterationen. Diese Einstellungen entfernen das meiste Rauschen und belassen doch genug Details für eine exakte Vermaschung.

*Aufgabe: Testen Sie die verschiedenen Rauschreduktionsalgorithmen und ihre Parameter an verschiedenen Bereichen der Punktwolke (z. B. flacher Bereich, glatter Bereich, Bereiche mit einer komplexen Kontur, Bereiche mit scharfen Ecken) und versuchen Sie deren Auswirkungen zu verstehen.*

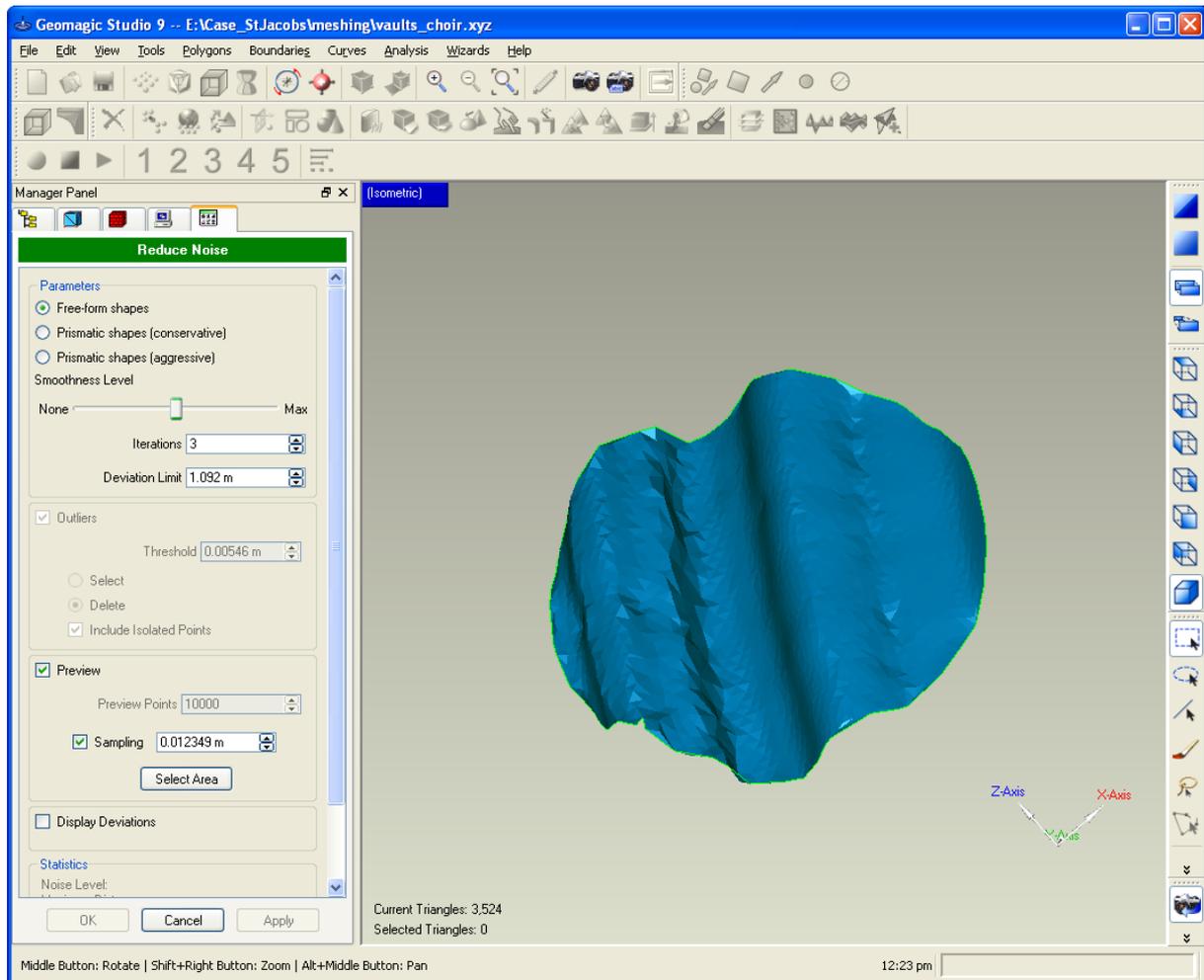


Abbildung 117: Vorschau eines kleinen Stückes der Punktwolke unter Einsatz der Rauschreduktionsparameter

Sind die Einstellungen zufrieden stellend, heben Sie die Markierung der Option *Preview* auf und drücken Sie den Button *Apply*. Wenn der Rauschreduktionsprozess abgeschlossen ist, sollte das Informationsfenster *Crease* überprüft werden. Der *Crease* Winkel beschreibt den Erfolg des Vermaschungsprozesses. Ein Wert größer als 10 besagt, dass eine erneute Rauschreduktion notwendig ist.

Der *Crease* Winkel des Datensatzes *St.James* nach der Rauschreduktion beträgt 3.33759. Dieser Wert ist akzeptabel. Schließen Sie ab indem Sie den Button *OK* drücken (Abbildung 118).

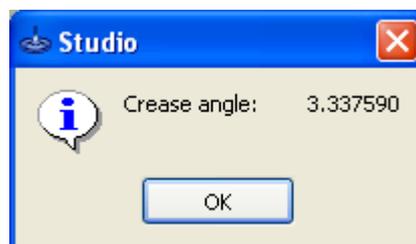


Abbildung 118: Crease Winkel

### 5.7.2.5. Vorbereiten der Punktwolke: Neuordnung (Uniform Sample)

Vor der Vermaschung müssen die Punkte neu geordnet und die Punktdichte reduziert werden. Dieser Prozess ist nötig, da für jeden Punkt der Punktwolke etwa zwei Dreiecke in dem vermaschten Modell erzeugt werden. Für 4,5 Millionen Punkte würde das bedeuten, dass ca. 9 Millionen Dreiecke entstehen. Das braucht nicht nur große Speicherkapazitäten, sondern auch lange Berechnungszeiten. Deswegen raten wir, die Punktwolke in einer intelligenten Art und Weise auf eine akzeptable Anzahl von Punkten zu reduzieren (ca. eins bis zwei Millionen).

Geomagic Studio (v9) verfügt über vier verschiedene Optionen der Neuordnung. Die von Experten am häufigsten angewandte ist die Methode des *Uniform Sampling* im Menü *Points – Uniform Sample*. Wenn Geomagic Studio (v9) diesen Befehl startet, öffnet das Programm eine Dialogbox auf der linken Seite des Bildschirmes, worin Parameter eingestellt werden können (Abbildung 119).

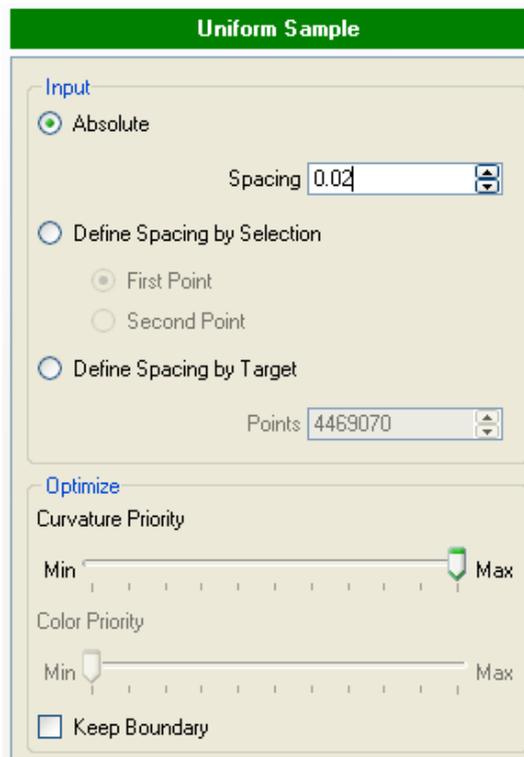


Abbildung 119: Dialogfenster Uniform Sample

Im Befehl *Uniform Sample* bietet Geomagic Studio (v9) drei Optionen zur Definition des neuen Punktabstandes an: *Absolute distance*, *Define Spacing by selection*, *Define Spacing by Target*. Da wir so viele Details als möglich behalten möchten, ist es wichtig die erste Option (*Absolute distance*) zu verwenden. Bei dieser Option werden zunächst die absoluten Distanzen zwischen Punkten in Bereichen geringer Krümmung festlegen. In Bereichen größerer Krümmung kann dann mit Hilfe des **Curvature Priority slider** ein bis zu elfmal kleinerer absoluter Punktabstand verwendet werden.

Der *Curvature priority slider* hat 11 Skalierungsschritte. Wird zum Beispiel ein Abstand von 2 cm für Bereiche mit niedriger Krümmung eingegeben und der *Curvature priority slider* auf das Maximum (11) geschoben, wird der Abstand zwischen den Punkten in Bereichen mit hoher Krümmen annähernd  $2 \text{ cm} / 11 = 0,18 \text{ cm}$  oder 1,8 mm werden.

Andererseits kann auch der Mindestabstand in Bereichen großer Krümmung festgelegt und daraus der Abstand bei geringer Krümmung berechnet werden.

Da wir dieses endgültige Vermaschungsmodell mit dem Vermaschungsmodell des Datensatzes 'vaults\_crossing.xyz' erneut verbinden möchten, schlagen wir vor, die Option *Keep Boundary* zu aktivieren. Starten Sie den Befehl *Uniform Resampling* mit den Parametern, die wir vorhin beschrieben haben. Nach Durchführung bleiben lediglich 446.000 Punkte in der Punktwolke. Das sind 10 % der ursprünglichen Punktwolke.

### 5.7.2.6. Vermaschung

Nachdem das Rauschen der Punktwolke entfernt wurde und die Punktdichte und Anzahl durch das Neuordnen (*Uniform Sample*) auf einen akzeptablen Wert gebracht wurde kann mit dem Vermaschen begonnen werden. In *Geomagic Studio (v9)* ist der Vermaschungsschritt sehr überschaubar. Wählen Sie den Befehl *Points – Wrap*, um das Vermaschungswerkzeug zu starten. Eine Dialogbox öffnet sich auf der linken Seite (Abbildung 120). Für die meisten architektonischen Rekonstruktionen ist eine ansprechende Oberfläche wünschenswert. Deshalb verwenden wir die Option *Surface*. In den erweiterten Optionen finden wir einen weiteren Rauschreduktionsalgorithmus, den wir aber nicht verwenden. Wir können dessen Auswirkungen nicht visuell kontrollieren und außerdem führten wir bereits, einige Schritte vorher, eine Rauschreduktion durch. Eine Neuordnung kann erneut ausgewählt werden, um die Komplexität der Vermaschung zu reduzieren.

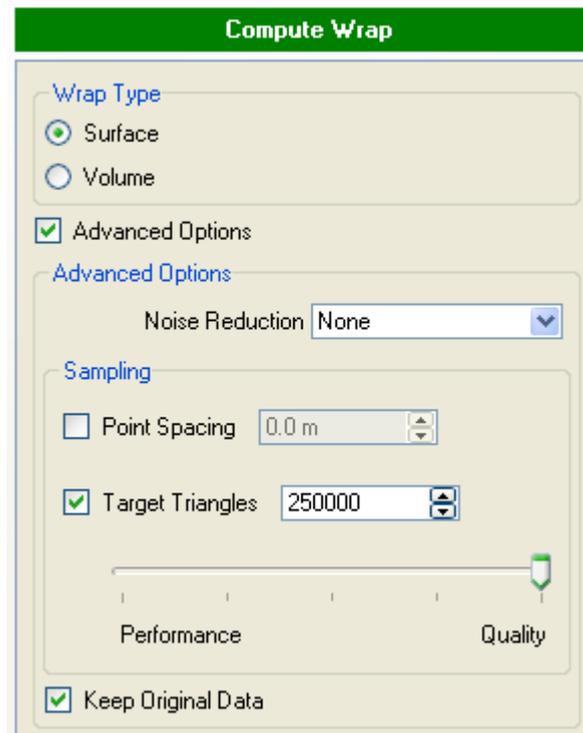


Abbildung 120: Dialogfenstereinstellungen von Compute Wrap

Verschiedene Untersuchungen zeigten, dass es fast keinen Unterschied macht, ob die Standardeinstellung von 250.000 Dreiecken oder der ganze Datensatz verwendet werden. Bei zahlreichen Tests lag die größte Differenz dieser zwei Optionen bei 2 mm. In unserem Fall verwenden wir die Standardeinstellungen (Sampling auf 250.000 Dreiecke) und fahren mit dem Vermaschungsprozess durch das Drücken auf den Button *OK* fort.

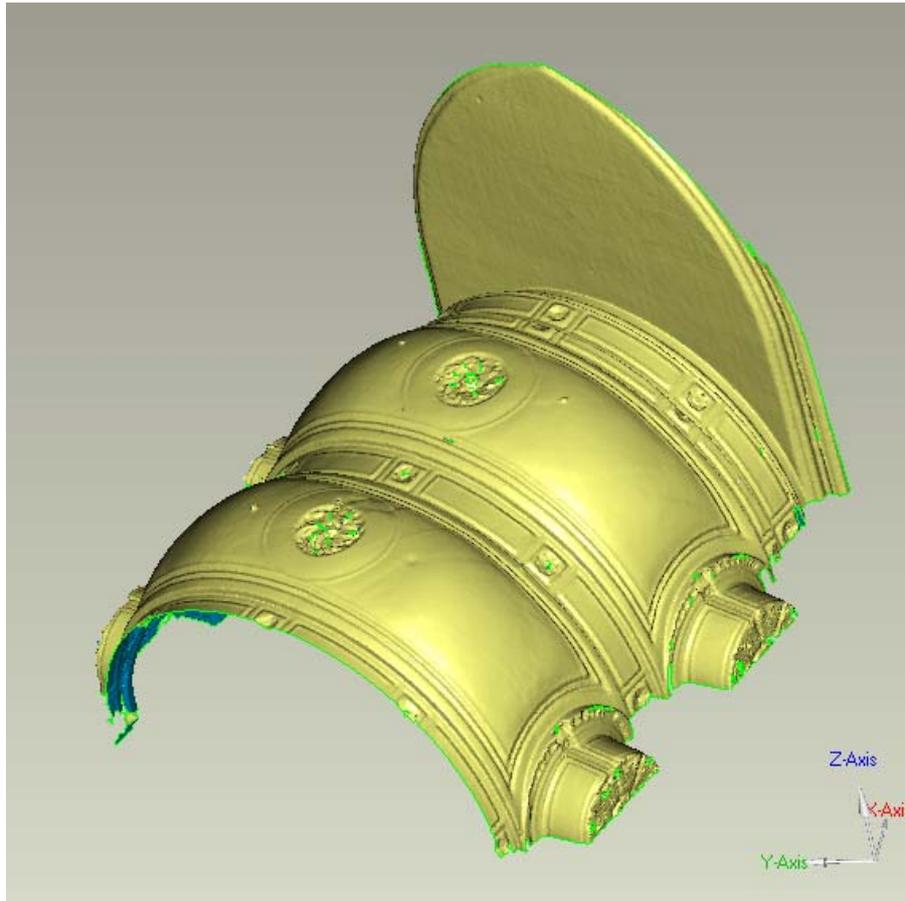


Abbildung 121: Vermaschungsmodell

Geomagic Studio (v9) findet den Normalenvektor jeder Oberfläche und färbt die Dreiecke entsprechend. Deshalb ist die Innenseite der Vermaschung blau und die Außenseite gelb gefärbt (Abbildung 121). Eine Konvention lautet, dass die blaue Seite die Außenseite ist. Tauschen Sie also falls notwendig die Normalenvektoren unter Verwendung des Befehles *Polygons – Flip normals*.

*Aufgabe: Zoomen Sie in das vermaschte Modell hinein und analysieren Sie dessen Genauigkeit, im speziellen, die Gebiete mit hoher Krümmung. Was sehen Sie?*

*Aufgabe: Versuchen Sie, die Punktwolke 'part 1' (im Schritt C geteilt) vorzubereiten und zu vermaschen.*

*Der Autor verwendete folgende Einstellungen:*

- Auswählen der Ausreißer (Outliers): 30,0
- Rauschreduktion: Freiformflächen, Glättungslevel ¼, Iterationen 3, Löschen der Ausreißer → Knitterwinkel 5,496
- Neuordnen: absoluter Abstand 0,02 m, Curvature Priority maximum, keep boundary
- Vermaschen: Oberfläche, keine Rauschreduktion, Zieldreiecke 250.000, maximale Qualität

Das bisherige Ergebnis befindet sich in der Datei „vaults\_choir\_meshed.wrp“.

### **5.7.3. Füllen von Löchern**

#### **5.7.3.1. Einführung**

Zu geringe Punktdichten und verrauschte Punktwolken lassen Löcher während der Vermaschungsphase im Modell entstehen. Bereiche ohne große Punktdichten oder mit fehlenden Daten können nicht interpoliert und eine vollständige Oberfläche kann nicht erstellt

werden. Zusätzliche Daten sind notwendig. Durch den Prozess des Lächerfüllens können zusätzliche Informationen eingefügt und so Löcher gefüllt werden. Kleine Löcher können mit Hilfe von benachbarten Oberflächenmaschen aufgefüllt werden. Größere Löcher hingegen benötigen spezielle Interaktionen des Bearbeiters.

Es hängt von der endgültigen Verwendung des 3D-Modelles ab, ob Löcher gefüllt werden müssen oder nicht. Für dieses Projekt forderten wir die Erstellung eines 3D-Modelles der Gewölbe für eine Analyse mit der Finiten-Elemente-Methode. Deshalb ist das Füllen der Löcher unumgänglich.

### 5.7.3.2. Verbinden zweier Vermaschungen

Bevor alle Löcher gefüllt werden, müssen die zwei getrennten Vermaschungen miteinander verbunden werden. Wählen Sie beide Vermaschungen im *Model Manager Panel* aus und starten Sie den Befehl, indem Sie auf den Menüpunkt *Polygons – Merge Polygon Objects* klicken (Abbildung 122). Die miteinander verbundenen Objekte benennen Sie in 'vaults\_choir\_merged'. Mit der zur Verfügung stehenden Option *Stitch* können die beiden Vermaschungen zusammengeheftet werden. Diese Option arbeitet allerdings manchmal nicht erwartungsgemäß. Deswegen ziehen wir es vor, das Zusammenheften händisch durchzuführen.

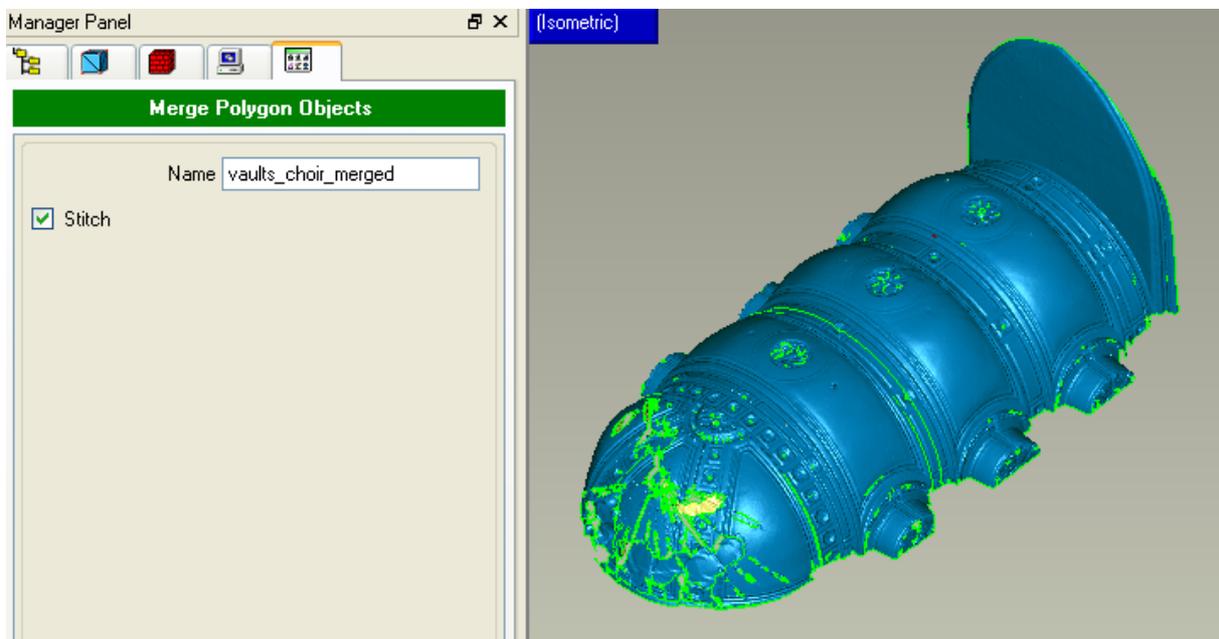


Abbildung 122: Zusammenheften zweier Vermaschungen

Verändern Sie die Ansicht so, dass eine Draufsicht der Gewölbe entsteht. Vergewissern Sie sich, dass diese horizontal sind. Wählen Sie eine Auswahlbox (das Symbol , auf der rechten Werkzeugsleiste) um den Bereich um die Aussparung zu markieren (Abbildung 123). Starten Sie die Funktion *Polygons – rewrap...*. Das beste Resultat wird mit der Option *Create New Vertices* erzielt. Diese Option entfernt zuerst die existierende Vermaschung und erstellt dann neue Eckpunkte. Die Dreiecke der neuen Vermaschung sind annähernd gleich groß wie die sie umgebenden Dreiecke. Zuletzt wird dieser Teil der Punktwolke erneut vermascht.

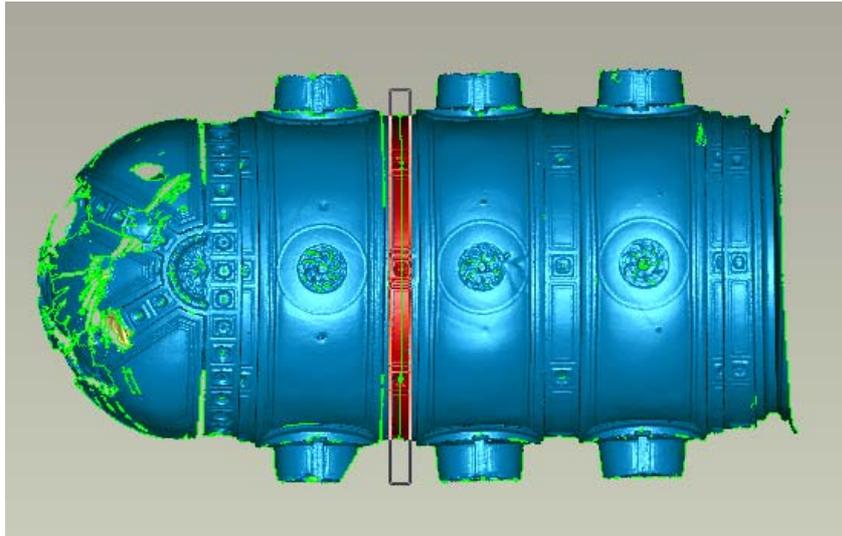


Abbildung 123: Neu erstellte Vermaschung, die zwei vermaschte Teile miteinander verbindet

### 5.7.3.3. Entfernen des Altargewölbes

Die Gewölbe über dem Altar wurden nur von einer Position aus gescannt und befanden sich außerdem in einem sehr schlechten Zustand. Teilweise waren Löcher im Gewölbe nur behelfsmäßig mit groben Ziegeln ausgefüllt und bildeten somit keine Rücksprünge in der Gewölbefläche. Zahlreiche größere Löcher aufgrund fehlender Daten kennzeichnen diesen Teil. Die Vermaschung dieses Bereiches ist deshalb auch schlecht. Obwohl es möglich wäre all diese Löcher zu füllen, werden wir die dazu notwendigen Schritte in diesem Tutorial nicht behandeln. Wir werden diesen Teil des Datensatzes deshalb löschen. Wählen Sie nachstehende Einstellungen, um die Auswahl einfacher zu gestalten: im Menü *Edit* sollten die Funktionen *BackFace Mode* und *Select Through* aktiviert sein und die Funktion *Select Visible Only* deaktiviert. Mit der Auswahlbox (Selection Box) wählen Sie den Teil über dem Altar und drücken Sie die Taste *Delete* (der so erzeugte Datensatz befindet sich in der Datei 'vaults\_choir\_meshed\_without\_altar.wrp').

### 5.7.3.4. Füllen von kleinen (einfachen) Löchern

Der nächste Schritt beim Erstellen eines vermaschten 3D-Modelles ist das Analysieren und das Füllen von Löchern, die von dem Vermaschungsalgorithmus übrig blieben. *Geomagic Studio* (v9) verfügt über automatische Werkzeuge um die Löcher zu füllen. Diese Befehle funktionieren allerdings oft nur bei kleinen Löchern. Größere, komplexere Löcher sollten immer händisch gefüllt werden, so dass der Anwender interaktiv am Modell arbeiten kann.

Ehe man den Befehl Löcher füllen startet, sollte man überprüfen, dass die Vermaschung keine Spitzen oder nicht zusammenhängende Dreiecke beinhaltet. Verwenden Sie für das Bereinigen der Vermaschung den Befehl *Polygons – Make Manifold – Open*.

Zuerst füllen wir kleine Löcher mit Hilfe der automatischen Werkzeuge. Wählen Sie die ganze Vermaschung mit einer Auswahlbox aus und starten Sie den Menübefehl *Polygons – Fill holes...*

*Geomagic Studio* (v9) hat 117 Löcher in unserer Vermaschung gefunden hat (Abbildung 124). Diese sind im Modell mit roter Umgrenzung dargestellt. Fünf verschiedene Methoden des Füllens von Löchern stehen uns zur Verfügung. Kleine Löcher füllen wir mit der ersten Füllmethode (*first fill method*). Danach beginnen wir mit dem Befehl *Deselect Largest* zu arbeiten und die größten Löcher zu entfernen. Während wir diesen Vorgang durchführen

überprüfen wir die Löcher, die entfernt werden. Der Vorgang wird beendet, sobald alle großen Löcher entfernt wurden.

In unserem Datensatz befanden sich sieben große Löcher. Die Anzahl der Löcher die automatisch gefüllt werden können beläuft sich nun auf 110. Drücken sie den Button *Fill All* um diese Löcher automatisch zu füllen. Alle anderen, standardmäßigen Einstellungen können beibehalten werden.

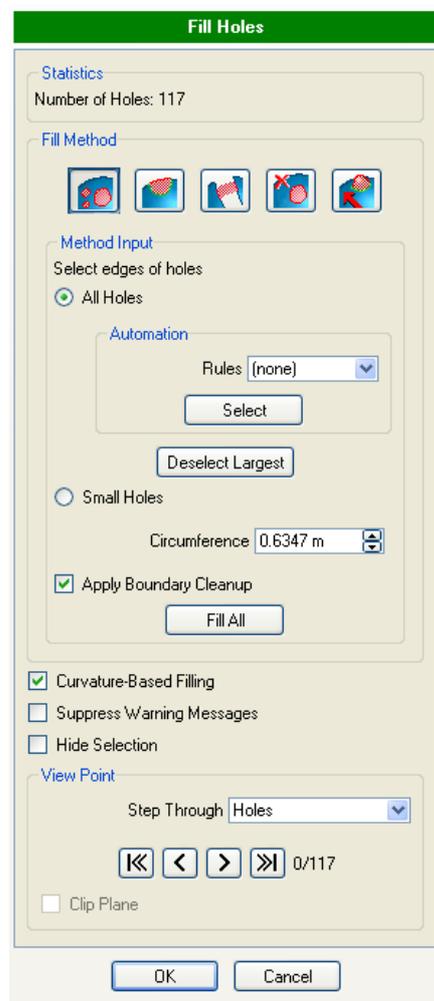


Abbildung 124: Dialogfenstereinstellungen der Lochfüllfunktion

*Geomagic Studio (v9)* gibt einen Hinweis, der besagt, dass es für 33 Löcher nicht empfehlenswert ist, das auf Krümmung basierende Füllen zu verwenden. Diese Löcher bedürfen einer händischen Überprüfung, damit festgestellt werden kann, wie diese Löcher am besten gefüllt werden können. Hierfür drücken Sie auf den Button *Cancel*.

Alle kleinen Löcher sind gefüllt und rot hervorgehoben. Drücken Sie den Button *OK* am unteren Ende des Dialogfensters um das korrekte Füllen dieser kleinen Löcher zu bestätigen.

### **5.7.3.5. Entfernen von Teilen mit unzureichender Information**

Jedes einzelne der 33 nicht gefüllten Löcher wird visuell analysiert und danach über die beste Art und Weise des Füllens entschieden. Bei genauerer Betrachtung der Vermaschung stellen wir fest, dass sich einige Löcher am unteren Ende, neben den Nischen, befinden. Da wir zu wenige Informationen besitzen um diese Löcher zu füllen, werden wir anstatt die Löcher zu

füllen, diesen unteren Bereich des Modells entfernen. Mit Hilfe der Auswahlwerkzeuge wählen Sie eben diesen Bereich und löschen (*Delete*) ihn (Abbildung 125).

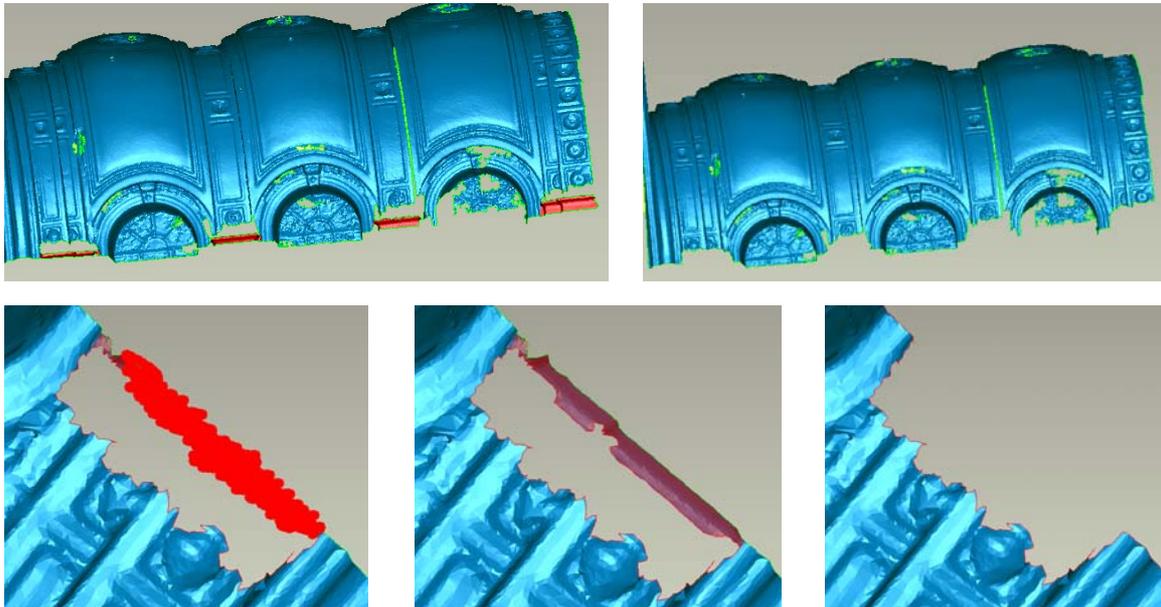


Abbildung 125: Entfernen von Teilen die zu geringe Informationen besitzen

### 5.7.3.6. Füllen von komplexen Löchern 1

Nun werden die Löcher des kreisförmigen Dekors am obersten Punkt der Gewölbe behandelt. Man wählt eines der Dekore aus und startet das Werkzeug *Automatic hole filling*. Die meisten Löcher haben sehr irreguläre Ränder und können deswegen nicht korrekt gefüllt werden. Zoomen Sie in eines der Löcher und starten Sie den Befehl *Clean Up Tool*  mit der aktivierten *Triangles Selection* Funktion. Verwenden Sie als nächstes den Befehl *Brush Selection*  um die visuell schlechten Dreiecke auszuwählen und zu löschen (*Delete*). Während diese Dreiecke ausgewählt werden, drehen Sie das Modell um sicher gehen zu können, dass alle schlechten Dreiecke ausgewählt wurden (Abbildung 126). In diesem Stadium könnten die automatischen Auswahlwerkzeuge wie *Rim Distortion* oder *Poor Boundary* verwendet werden. Meistens verschwinden diese aber zu viel Information.



Abbildung 126: Säubern der Lochränder vor dem Füllen

Wenn die Ränder gesäubert sind, aktivieren Sie das Werkzeug *Fill*  erneut und wählen Sie die Lochränder mit dem Mausfeil. *Geomagic Studio (v9)* füllt automatisch das Loch.

Aufgabe: Füllen Sie alle anderen Löcher der kreisförmigen Dekors unter Verwendung dieser Werkzeuge.

Beim Füllen der Löcher ist Ihnen vielleicht aufgefallen, dass manche dieser Bereiche noch Spitzen beinhalten (Dreiecke, die aus der Vermaschung herausragen). Wählen Sie diese Bereiche erneut und starten Sie den Befehl *Polygons – Remove Spikes...* Verwenden Sie den Schieber, um die Parameter einzustellen, wobei Sie gleichzeitig das Resultat überprüfen. Bewegen Sie den Schieber nur so weit, um die Spitzen zu entfernen ohne die restliche Struktur zu beeinträchtigen (Abbildung 127).

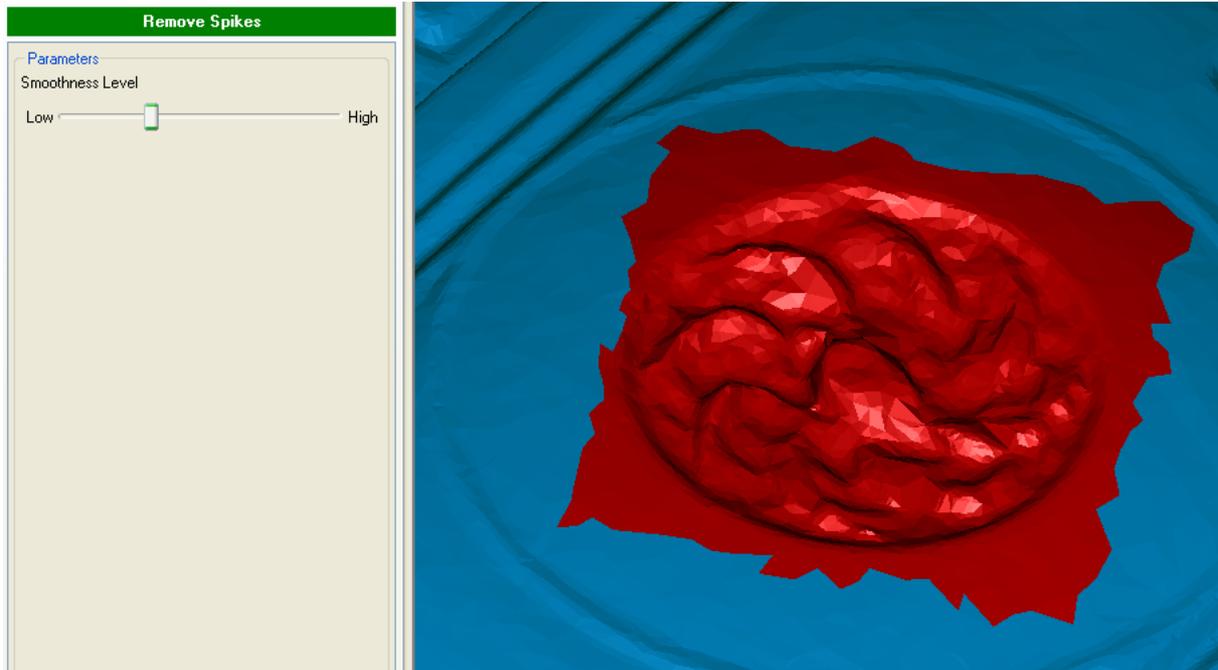


Abbildung 127: Entfernen der Spitzen in gefüllten Bereichen

### 5.7.3.7. Füllen von komplexen Löchern 2

Wir beginnen nun mit dem Füllen von langen, schmalen Löchern. Diese Löcher trennen große Teile der Gewölbe voneinander.

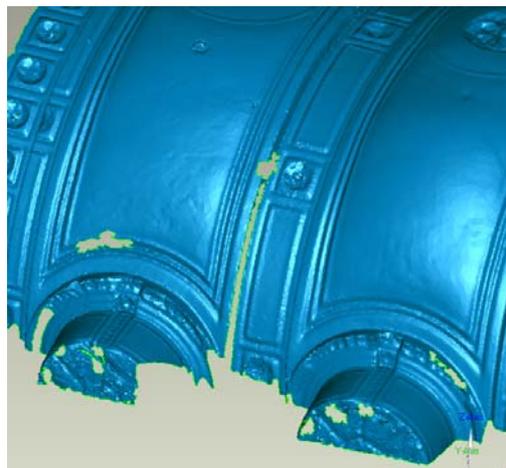


Abbildung 128: Beispiel für ein schmales Loch

Starten Sie das Werkzeug *Automatic Hole Filling*. Zuerst säubern Sie mit diesem automatischen Werkzeug die Ränder von kleinen Löchern im oberen Bereich und dann füllen Sie die Löcher wie in Kapitel 1.7.3.4 beschrieben.

Mit Hilfe des Werkzeuges *Create Bridges*  werden lange, schmale Löcher in mehrere kleine Löcher unterteilt (Abbildung 129). Verwenden Sie die Standardoptionen und wählen Sie einen Punkt auf der einen und einen Punkt auf der anderen Seite des schmalen Loches. *Geomagic Studio (v9)* erstellt eine Brücke, die die beiden Seiten miteinander verbindet. Diese Brücke bleibt bestehen, während bei der umgebenden Oberfläche weiter gearbeitet wird.

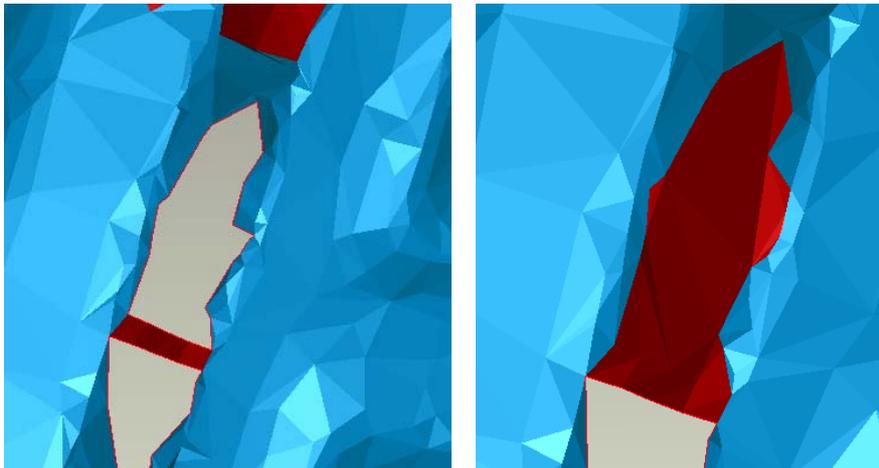


Abbildung 129: Erstellen von Brücken um ein schmales Loch in mehrere kleinere Löcher aufzuteilen

Verwenden Sie das Werkzeug *clean up* um scharfe Dreiecke, die die Glätte der Ränder verunreinigen, zu entfernen und füllen Sie die Löcher wie in den vorherigen Schritten beschrieben.

*Aufgabe: Sie können nun den Rest dieses Loches füllen. Führen Sie diese Prozedur, wie oben erklärt durch. Das schmale Loch auf der anderen Seite des Gewölbes kann ebenso gefüllt werden.*

Der bisherige Datensatz befindet sich in der Datei 'vaults\_choir\_meshed\_holeFilled-Part1.wrp'.

### **5.7.3.8. Befehl Kopieren/Einfügen zum Füllen von Löchern**

Sehr komplexe Löcher können bei sich wiederholenden Strukturen manchmal nur durch das Kopieren von Informationen aus anderen Bereichen gefüllt werden. Die Nischen am unteren Ende des Gewölbes zählen zu solchen sich wiederholenden Strukturen. Manche Teile der Nischen beinhalten Löcher, die bei anderen Nischen sehr gut vermascht sind. Wir versuchen, einen Teil dieser Nischen zu kopieren und damit das jeweilige Loch zu füllen.

Suchen Sie für das folgende Loch in einer der Nischen des Gewölbes in der Nähe des Altars nach einem möglichen Ersatz (Abbildung 130). Säubern Sie zuerst die Ränder von Hineinstehenden Dreiecken.

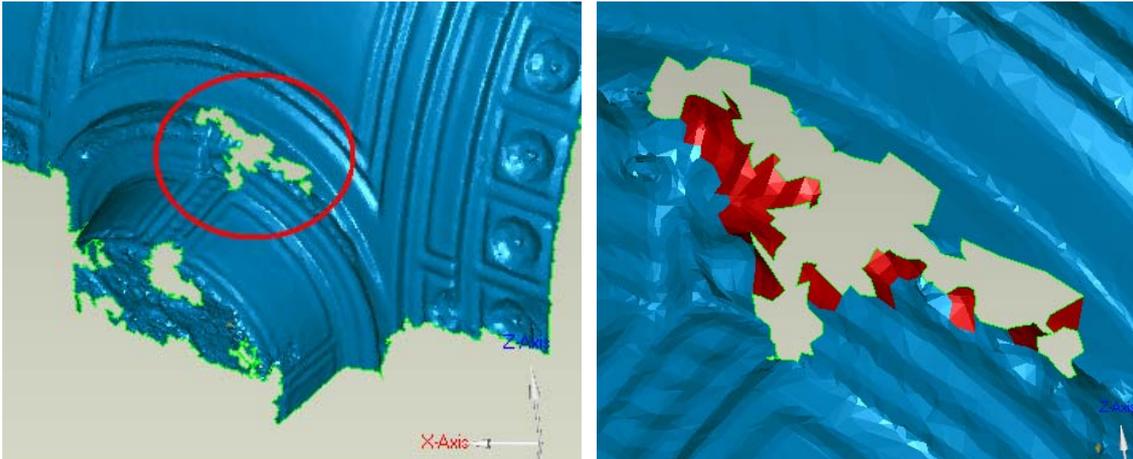


Abbildung 130: Beispiel für ein Loch, das über zu geringe Information verfügt um rekonstruiert zu werden

Mit dem Auswahlwerkzeug wählen Sie einen entsprechenden Bereich in der linken Nische (Abbildung 131).

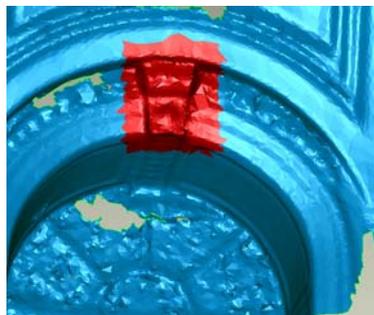


Abbildung 131: Auswählen und kopieren eines ähnlichen Teiles und füllen des Loches

Wir erstellen aus der Auswahl ein neues Objekt. Wählen Sie *Edit – Selection To Object* um den neuen Teil zu benennen ('*niche\_copy*') und verwenden Sie die Optionen *Copy and Paste*. Gehen Sie sicher, dass die Option *Edit – Select Through* aktiviert ist, wenn Objekte ausgewählt werden. Nun werden wir diesen Teil zu der korrekten Position in der Nische mit dem Loch registrieren.

Wählen Sie die beiden Datensätze '*niche\_copy*' und '*vaults\_choir\_meshed*' und starten Sie den Registrierungsprozess. Verwenden Sie dazu den Befehl *Tools – Registration – Manual registration*. Die Benutzeroberfläche verändert sich und eine Dialogbox wird auf der linken Seite geöffnet (Abbildung 132). In der Dialogbox wählen Sie den Datensatz '*vaults\_choir\_merged*' als *fixed* und den Datensatz '*niche\_copy*' als *floating*. Beide Datensätze werden in den oberen Boxen am Bildschirm dargestellt. Der registrierte Datensatz wird am unteren Teil des Bildschirms gezeigt.

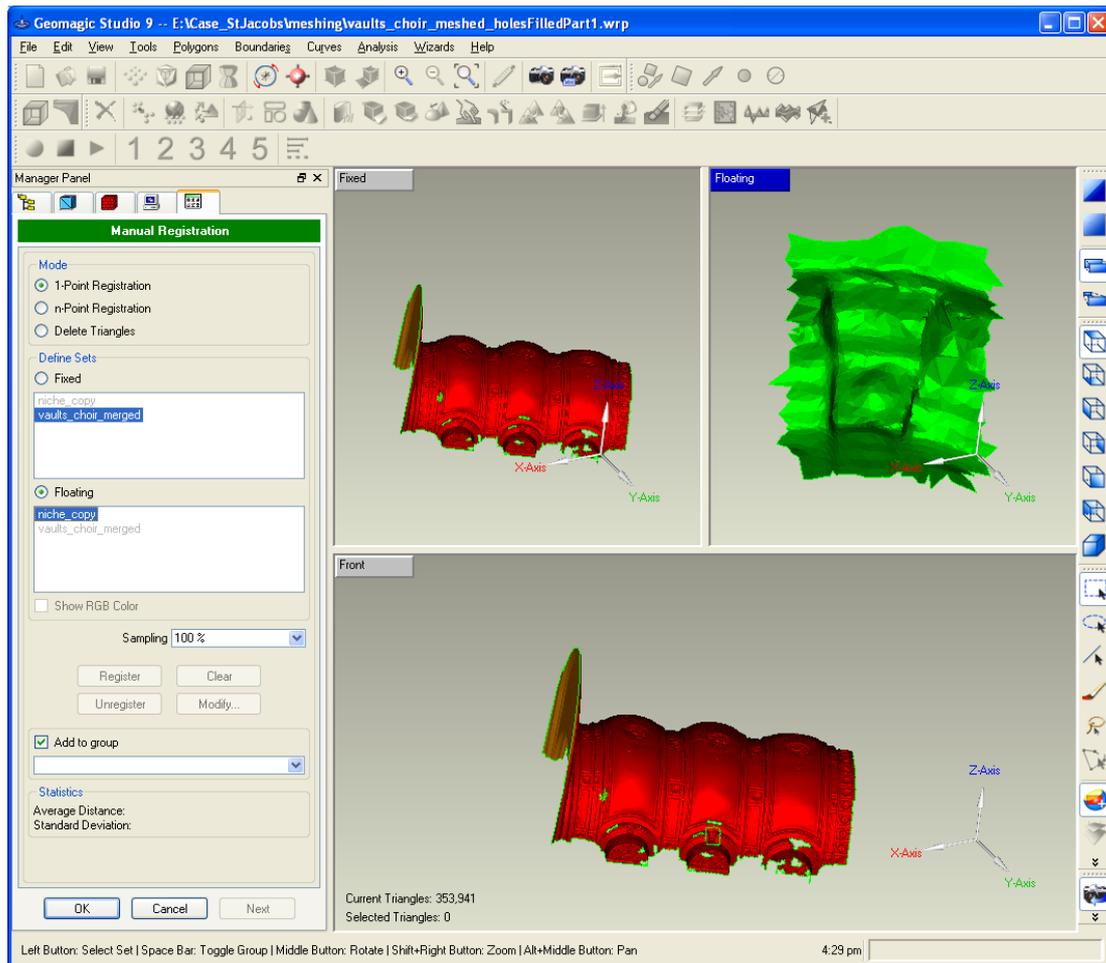


Abbildung 132: Dialogbox Manuelle Registrierung

Zuerst wird der Algorithmus *1-Point Registration* von *Geomagic Studio (v9)* verwendet. Wie der Titel schon sagt, braucht dieser Algorithmus nur einen korrespondierenden Punkt zwischen beiden Datensätzen um eine Registrierung durchführen zu können. Zusätzliche Informationen werden von der umliegenden Oberflächengeometrie erhalten.

Zoomen Sie im linken Datensatz in den Bereich, wo der rechte Datensatz platziert werden soll. Dann wählen Sie sorgfältig einen hochmarkanten Punkt, der auch im rechten Datensatz wieder gefunden werden kann. Wählen Sie den entsprechenden Punkt im rechten Datensatz (Abbildung 133). *Geomagic Studio (v9)* versucht nun automatisch beide Datensätze zu vereinen.

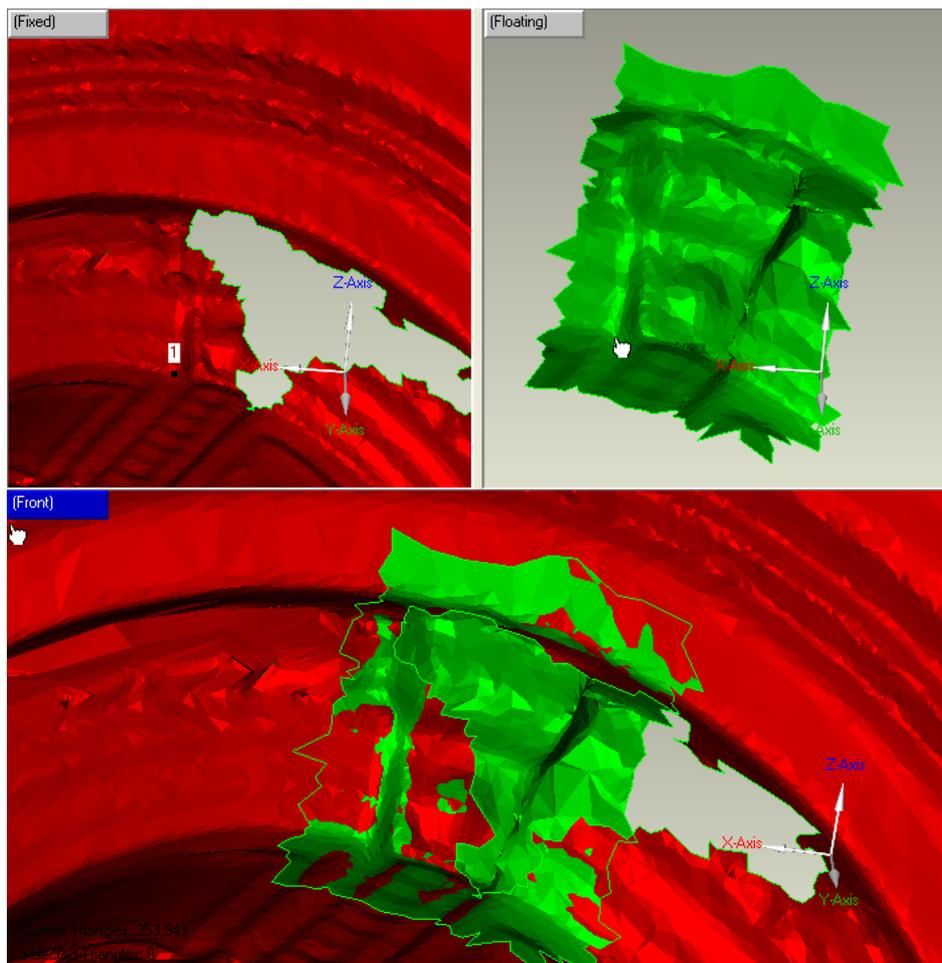


Abbildung 133: Registrierungsanleitung für das Füllen eines Loches mit einem ähnlich aussehenden Teil der Vermaschung

Hat *Geomagic Studio* (v9) die Registrierung beendet, überprüfen Sie die Angleichung im unteren Teil des Bildschirmes. Ist die Angleichung nicht perfekt, drücken Sie den Button *Modify* und adjustieren sie die Registrierung händisch. Zusätzlich können Sie die mittlere Abweichung und die Standardabweichung am unteren Teil des Dialogfenster *Manual Registration* überprüfen. Manchmal wird die Registrierung durch ein wiederholtes Drücken auf den Button *Registration* verbessert. Sind Sie mit der Registrierungsangleichung zufrieden deaktivieren Sie *Add to group* und drücken Sie den Button *OK*.

Beide Datensätze sind nun angeglichen und können zusammengefügt werden. Verwenden Sie hierfür den Befehl *Polygons - Merge*. Der Unterschied zwischen diesem Algorithmus und der Funktion *Polygon - Merge Polygon Objects* ist, dass ersterer vor dem Zusammenfügen automatisch eine Rauschreduktion und eine globale Registrierung ausführt, während letzterer nur die zwei Vermaschungen in ein Objekt zusammenführt, wobei mögliche Überlappungen beibehalten werden.

Verwenden Sie das Werkzeug *Merge* mit den Standardeinstellungen, deaktivieren Sie aber beide *Sampling* Optionen (Abbildung 134). Drücken Sie dann den Button *OK* um den Algorithmus zu starten.

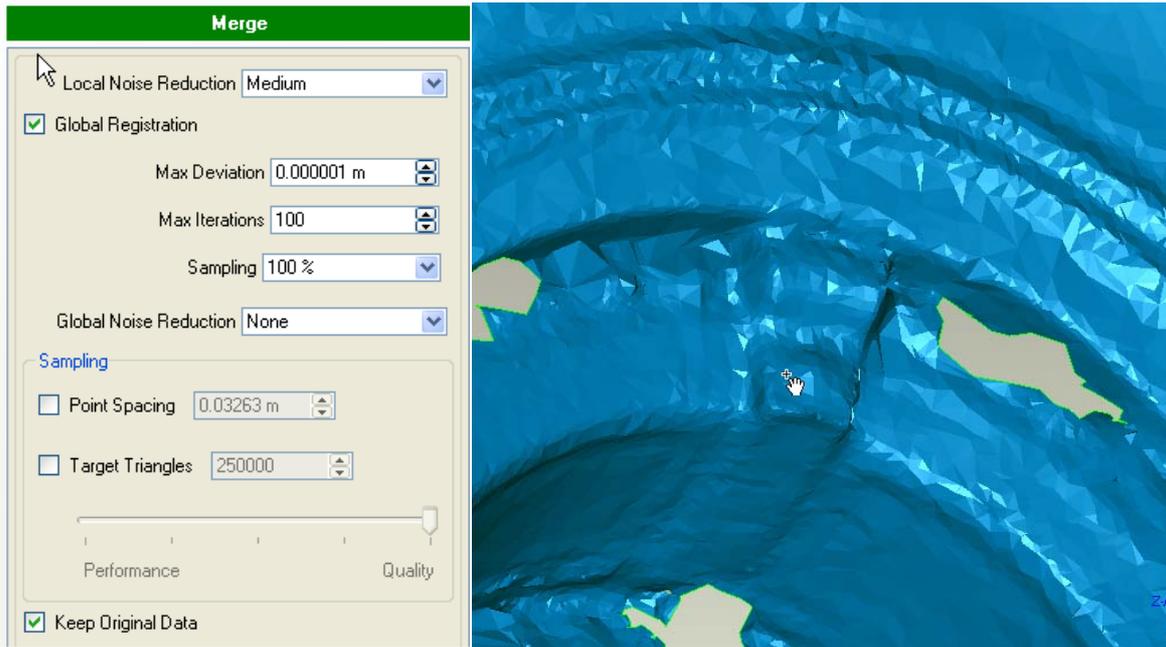
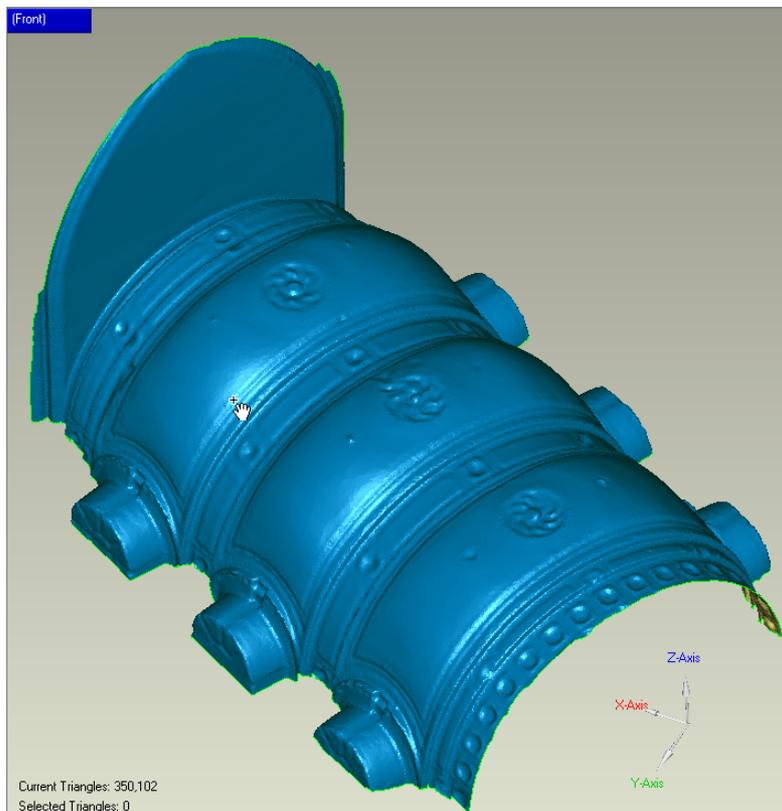


Abbildung 134: Dialogbox Polygon – Merge

Die Löcher an der Seite können nun gefüllt werden. Verwenden Sie hierfür die Werkzeuge, wie in den vorherigen Schritten beschrieben.

*Aufgabe: Füllen Sie die restlichen Löcher unter Verwendung der in diesen Schritten erklärten Befehle. Stellen Sie sicher, dass Sie zuerst das Loch analysieren und dann entscheiden, mit welcher Methode Sie es füllen werden.*

Das voll vermaschte Modell befindet sich in der Datei 'vaults\_choir\_fullyMeshed\_holesFilled.wrp' (Abbildung 135).



#### 5.7.4. Säuberung der Ränder

Der äußere Rand ist gezackt. Wir wollen aber einen glatten Rand. Starten Sie den Befehl *Boundaries – Relax* und markieren Sie die Ränder der Vermaschung mit dem Mauspfel. Belassen Sie die Einstellungen des *Entire Boundary Setting* aber erhöhen Sie die Anzahl der Wiederholungen auf 50. Dieser Wert wurde durch Probieren erhalten. Drücken Sie dann auf den Button *Execute* und *Geomagic Studio (v9)* glättet die Ränder.

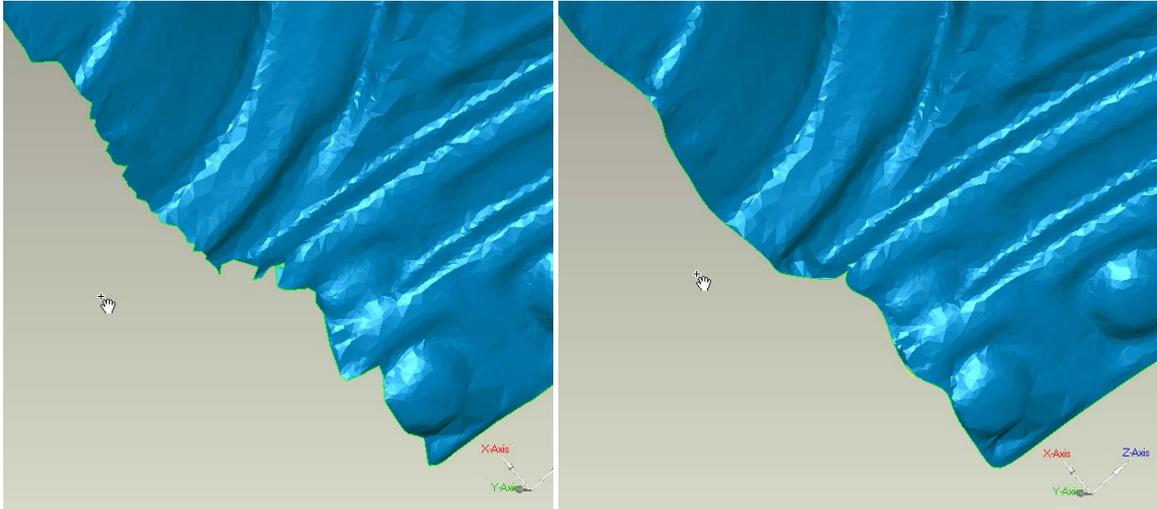


Abbildung 136: Vermaschung vor (links) und nach (rechts) der Glättung der Ränder

#### 5.7.5. Zerschneiden der Vermaschung zur Querschnittserzeugung

##### 5.7.5.1. Vorbereitung der Schnittebene (Projektionsebene)

Ein einfacher Weg um Querschnitte zu erstellen ist, die Vermaschung mit einer Ebene zu durchschneiden. *Geomagic Studio (v9)* stellt hierfür zahlreiche Werkzeuge zur Verfügung.

Vor dem Zerschneiden müssen wir die Ebene, mit der wir die Vermaschung durchschneiden wollen, definieren. In diesem Fall werden wir Schnitte senkrecht zur länglichen Achse des Hauptschiffes der Kirche generieren. Deswegen müssen wir die Symmetrieachse der Gewölbe finden und dann eine neue Ebene erzeugen, die senkrecht zu dieser Symmetrieachse und der xy-Ebene verläuft (diesem Gedankengang liegt die Tatsache zugrunde, dass die Daten der Totalstation, mit denen wir alle Scans registriert haben, so ausgerichtet sind, dass die xy-Ebene als horizontal angenommen werden kann).

Starten Sie den Befehl *Tools – Datums – Create Datums...* (Abbildung 137). Als „Datum“ ist hier die Definition von Projektions- oder Schnittebenen zu verstehen, auf die die Geometrie abgebildet wird. In unserem Fall wählen wir als Projektionsfläche eine Ebene. Wählen Sie das Symbol *Plane Datum Type* . Geben Sie der neuen Ebene den Namen 'Symmetric Plane'. *Geomagic Studio (v9)* kann automatisch die Symmetrieachse einer Vermaschung finden. Hierfür wählen Sie die Befehle *Best Fit Plane Method*  und *Symmetry Method Type Input* . Wenn Sie das Symbol *Symmetry Method Type* gewählt haben, wechselt das Dialogfenster und fragt nach einer angenäherten Ebene. Wir verwenden die Einstellungen, wie im unten angeführten Bild gezeigt. Drücken Sie auf den Button *Apply* und *Geomagic Studio (v9)* wird die Position der Ebene zu der Symmetrie des Bauwerkes optimieren.

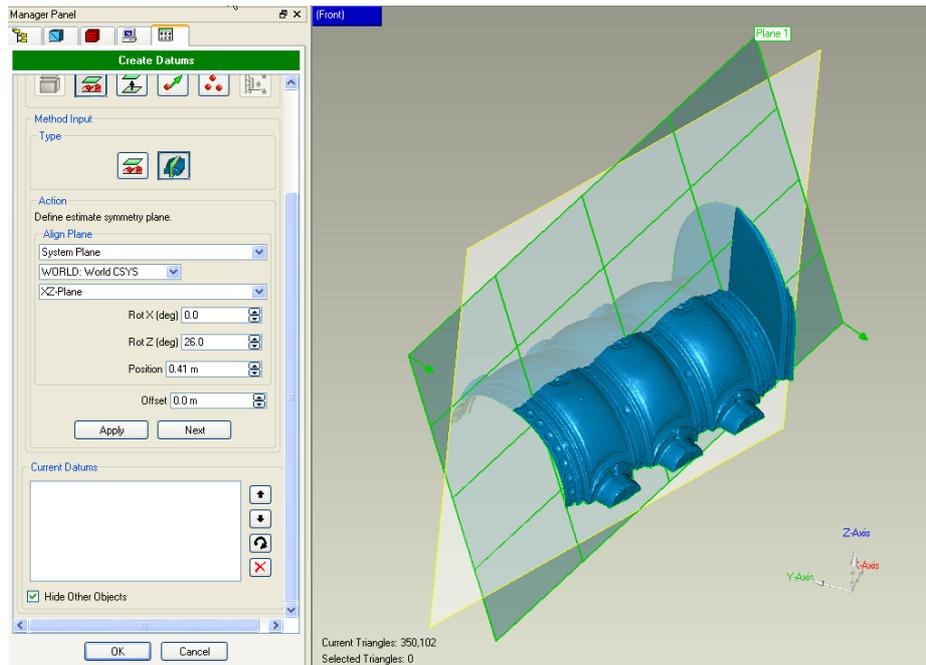


Abbildung 137: Erstellen einer Symmetrieebene

Ist die Ausrichtung zufrieden stellend, drücken Sie auf den Button *Next* um die Ebene der Datumsliste hinzuzufügen. Nun haben wir eine Ebene, die die Symmetrieachse des Bauwerkes definiert. Die aktuelle, mit der Vermaschung zu durchschneidende Ebene muss senkrecht zu der vorher erstellten Ebene und zu der xy-Ebene liegen. Für diesen Zweck werden wir ein neues Datum erstellen. Wir verwenden die *Plane Datum Type*  und nennen es 'Slicing plane'. Nun verwenden wir die *Offset Plane Method*  und die *Perpendicular through Point Method*  Input . Wird diese Option verwendet müssen wir zwei Ebenen definieren, zu denen sich die eine Ebene senkrecht verhält und zusätzlich noch einen Punkt auswählen, durch welchen sie durchgehen soll. Als erste Ebene wählen wir die vorher erstellte Ebene. Die zweite Ebene ist die xy-Ebene. Wir wählen einen Punkt der sich seitlich des Bauwerkes befindet (Abbildung 138).

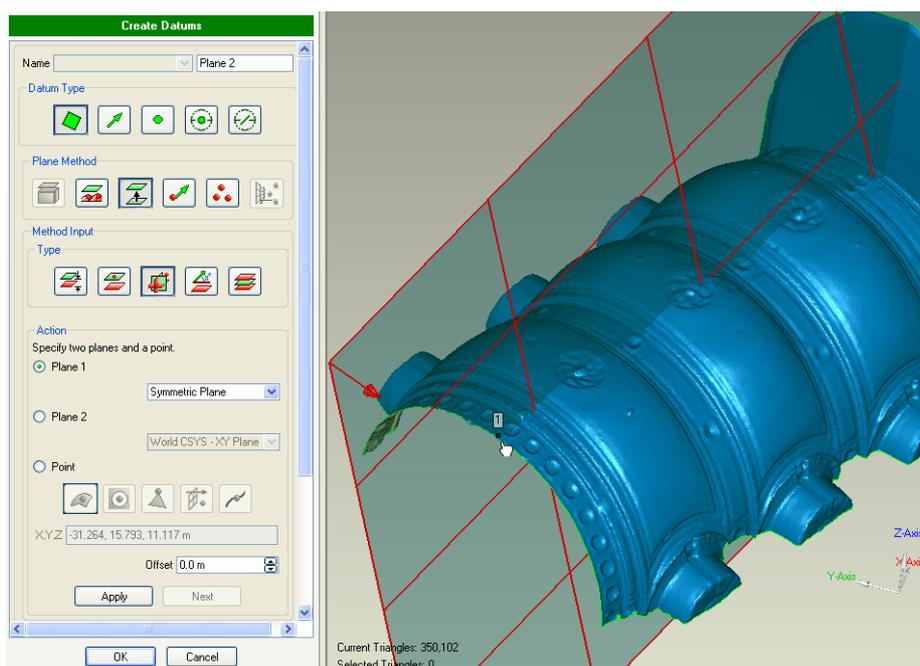


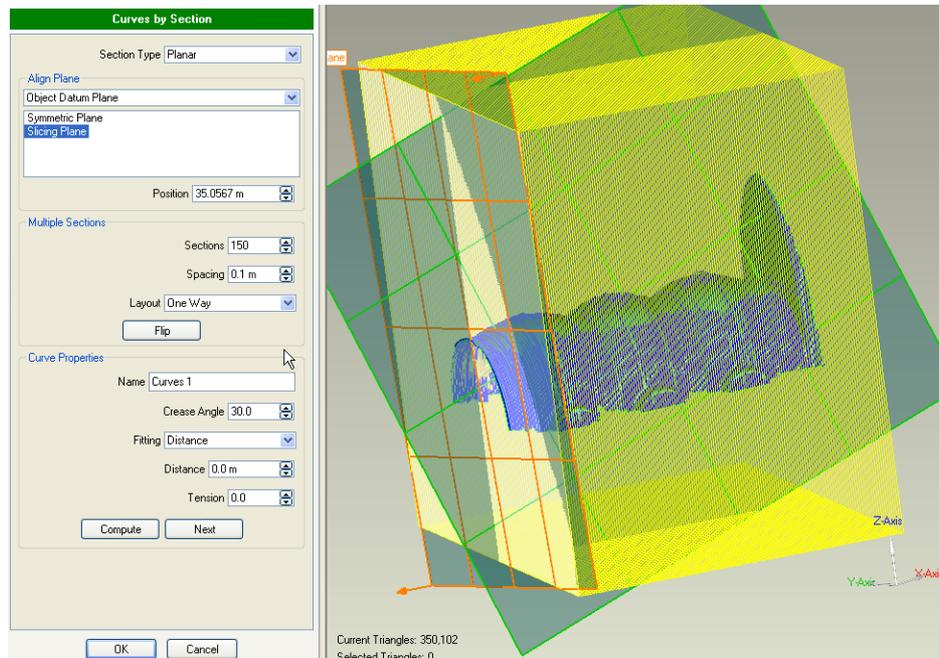
Abbildung 138: Definieren einer Durchschnittebene unter Verwendung der Perpendicular through Point Methode

Drücken Sie dann den Button *Apply* und nachher auf den Button *Next*, um die neu erstellte Ebene zu der Datumsliste hinzuzufügen. Ist der Vorgang beendet, drücken Sie auf den Button *OK* am unteren Ende des Dialogfensters.

### 5.7.5.2. Schneiden der Vermaschung

Für das Durchschneiden der Vermaschung verwenden wir den Befehl *Polygons – Curves by Section*. Verwenden Sie 'Slicing Plane' als Ausrichtungsebene und erhöhen Sie die Anzahl der Schnitte auf 150 Durchschnitte mit einem Zwischenraum von 10 cm. Belassen Sie die restlichen Einstellung auf Standart und klicken Sie auf den Button *Compute* (Abbildung 139). *Geomagic Studio* (v9) durchschneidet nun alle 150 Ebenen mit der Vermaschung und generiert Kurven. Drücken Sie auf den Button *OK* um die Generierung dieser Kurven zu bestätigen.

Der Model Manager führt nun die Kurven als separate Elemente an. Die Vermaschung kann versteckt werden um eine bessere Übersicht über die Kurven zu haben. Dafür klicken Sie mit der rechten Maustaste auf das Vermaschungsobjekt und wählen Sie den Befehl *Hide*.



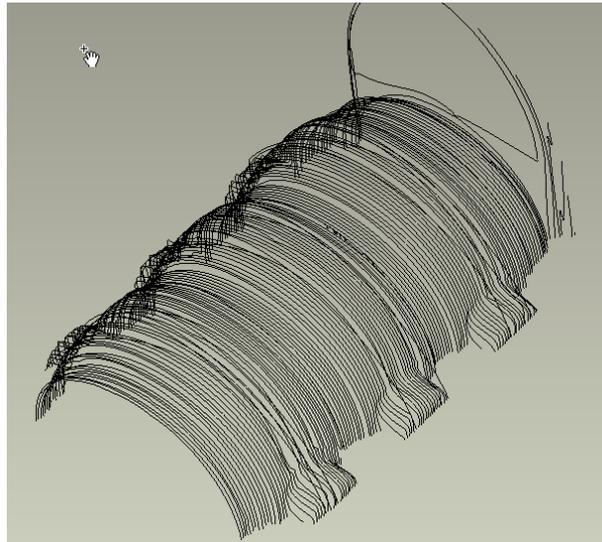


Abbildung 139: Schnittkurven

**Aufgabe:** Versuchen Sie alle 5 cm einen Schnitt unter Verwendung der *xy*-Ebene als Schnittebene zu erstellen.

Das bisherige Modell befindet sich unter 'vaults\_choir\_fullyMeshed\_holesFilled\_sliced.wrp'.

Diese Kurven können schließlich in die Dateiformate *OBJ* (Wavefront Technologies) oder *IGES* (Initial Graphics Exchange Specification) exportiert werden. Das Format *IGES* ist ein neutrales Format und erlaubt den Austausch von Informationen unter verschiedenen *CAD* Systemen (Computer-aided Design). *AutoCAD* hatte in einer früheren Version eine Importfunktion für *IGES*, die jetzt leider nicht mehr existiert. In zukünftigen Versionen von *Geomagic Studio* (v9) wird es möglich sein, diese Kurven in ein *DXF* Format exportieren zu können.

### 5.7.6. Erstellen von Animationen

Für diesen Teil des Tutorials werden wir zu *Cyclone* zurückkehren, da es über ein Animationswerkzeug verfügt. Mit diesem ist es auf sehr einfache Weise möglich, durch die Punktwolke zu „wandern“.

Öffnen Sie einen *ModelSpace View* des voll registrierten Datensatzes ‚St.James Church – ALL‘ in *Cyclone*. Warten Sie so lange, bis alle Punkte geladen sind.

Der erste Schritt beim Erstellen einer Animation ist es, Kameras einzurichten, die später für die Erstellung eines Animationsweges verwendet werden können. Verändern sie ihre Ansicht, so dass Sie einen Startpunkt für Ihre Animation erhalten. Wir empfehlen, mit einer allgemeinen Draufsicht auf das Gebäude zu beginnen. Hierfür verwenden wir die Vogelperspektive. Sind Sie mit dem Startpunkt zufrieden, verwenden sie den Befehl *Create Object – Insert – Camera* um ein Kameraobjekt an diesem Ort anzubringen. Wechseln Sie nun die Ansicht unter Verwendung der *View-Controls*. Sie können dazwischen große Abstände belassen, da *Cyclone* automatisch die händisch erzeugten Positionen der Kamera mit einer Splinelinie verbindet. Das gewährleistet einen sehr glatten Übergang zwischen den Standpunkten. Nachdem Sie zum zweiten Standpunkt gewechselt haben, wählen Sie erneut den Befehl *Create Object – Insert – Camera* um ein Kameraobjekt an diesem Standpunkt anzubringen. Fahren Sie mit dem Anbringen von Kameras an wichtigen Positionen solange fort, bis Sie den Animationsweg erzeugt haben.

Beachten Sie, dass Sie versuchen sollten den Abstand zwischen zwei Positionen der Kameras (Keyframe) annähernd konstant zu halten. So ist es einfacher eine konstante Anzahl von

Interpolationspositionen (frames) dazwischen zu setzen (siehe später). Es wird geraten mit einem allgemeinen Überblick zu beginnen. Zoomen Sie dann in die Struktur hinein und machen Sie – falls möglich – einen „walk-through“. Beenden Sie die Animation mit einem allgemeinen Überblick.

Wir demonstrieren eine Basisanwendung bei Verwendung von nur fünf fixierten Kamerapositionen (Keyframes). Die vom Autor gewählten Positionen sehen Sie in den unten angeführten Bildern (Abbildung 140).

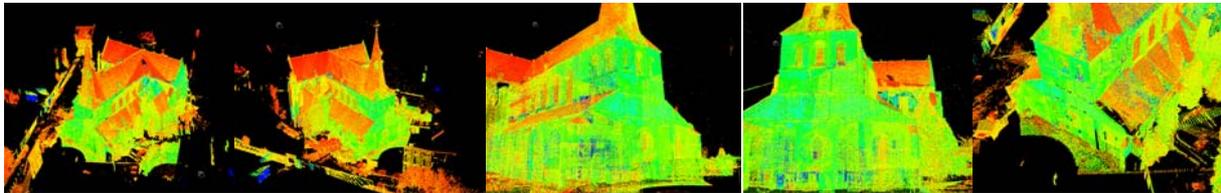


Abbildung 140: Kamerapositionen zur Erstellung einer Animation

Sind alle Kamerastandpunkte definiert, können Sie sie in der Reihenfolge auswählen, in der sie erstellt wurden. Verwenden Sie hierfür den Befehl *View – Set Object Visibility*. Ein neues Dialogfenster öffnet sich, wo wir bestimmen können, welche Punkte sichtbar und/oder wählbar sein sollen. In der Liste markieren Sie den Punkt *Camera* und drücken Sie dann den Button *Select*. Mit Hilfe dieses Befehls werden alle Kamerastandpunkte in der Reihenfolge wie sie platziert wurden, ausgewählt. Abschließend drücken Sie den Button *OK*.

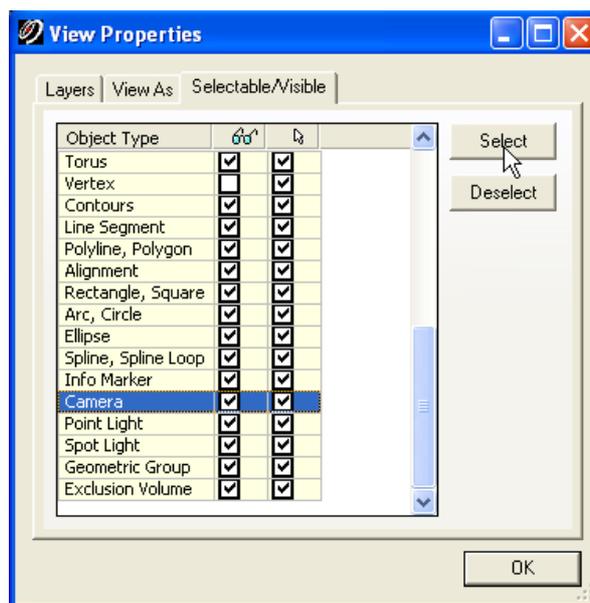


Abbildung 141: Verändern der Ansichtseigenschaften um die Kamerapositionen anzuzeigen

Gehen Sie nun zu *Tools – Animation – Create Path (loop)*. *Cyclone* wird den Weg der Kamera als Splinelinie hinzufügen. Gehen Sie dann erneut zum Menü *Animation* und wählen Sie *Set Path*.

Um mit der Erstellung der Animation beginnen zu können verwenden Sie die Befehle *Tools – Animation – Animation Editor* (Abbildung 142). Im neuen Dialogfenster können wir die Anzahl der dazwischen liegenden Frames zwischen allen Keyframes (Kamerapositionen) festlegen. Im Allgemeinen raten wir, zuerst die ganze Anzahl der Keyframes zu wählen, indem Sie die Felder *From* und *To* nach links schieben, entsprechend zur ersten und zur letzten Keyframe-Nummer, in unserem Fall 1 und 5. Erhöhen Sie dann den Wert *Number of Frames between Keyframes* 143

auf 20 ( $20 \times 5 = 100$ ). Dieser Wert wurde durch Probeläufe gefunden. Er richtet sich danach, wie schnell die Animation ablaufen soll und wie groß der Abstand zwischen den Kamerapositionen sein soll. Drücken Sie dann auf den Button *Set*. Sie können die Schrittgröße überprüfen indem Sie den rechten Pfeil unter *Frame Number Options* drücken. Sind Sie mit dem Ergebnis zufrieden, drücken Sie auf den Button *OK*.

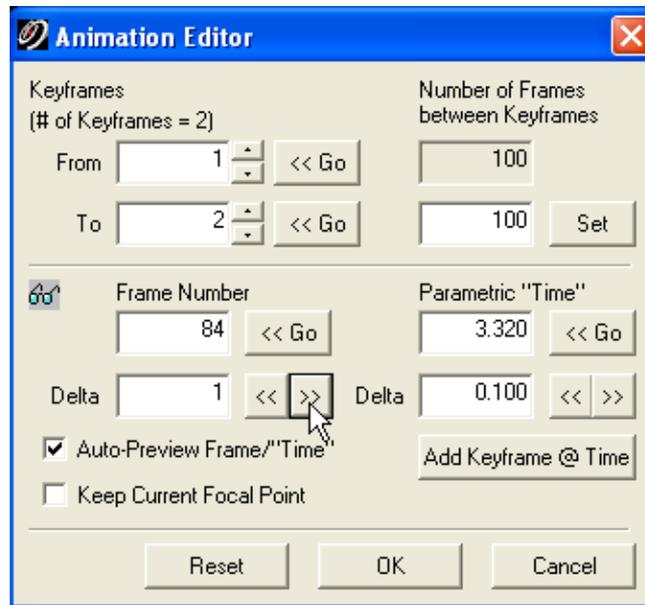


Abbildung 142: Dialogbox Animation Editor

Starten sie nun den Befehl *Tools – Animation – Animate* und wählen Sie die *Output to Video File*. Benennen Sie die Datei nach '*Animation.avi*' und belassen Sie den Rest der Einstellungen standardmäßig. Drücken Sie dann den Button *Animate*.

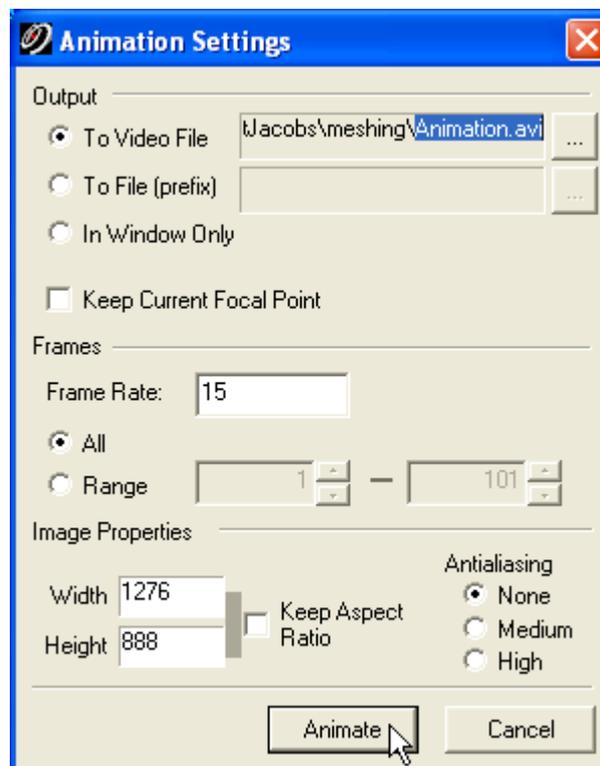


Abbildung 143: Dialogbox Animation Settings

*Cyclone* öffnet automatisch ein Dialogfenster, in dem Sie einen Codec zum Komprimieren der Datei festlegen können. Wählen Sie einen beliebigen Encoder oder wählen Sie *Full Frames (Uncompressed)*.

Beachten Sie, dass die meisten Encoder auf dem nicht verlustfreien *JPEG* Prinzip basieren. Ergebnisse dieser Encoder sind oft nicht zufrieden stellend für die Animation von Punktwolken. Für unsere Animationen verwenden wir für verlustfreies Komprimieren den Freeware Encoder *CamStudio*.

Die vom Autor erstellte Animation befindet sich in der Datei '*Animation.avi*'.

## 6. Lösungen

### 6.1. Lösungen für das Tutorial Denkmalpflege

#### Antwort zu Frage 1:

SW11 hat nur einen Passpunkt mit den anderen *ScanWorlds* gemeinsam, nämlich den Passpunkt 21. Dieser ist von den anderen *ScanWorld* Positionen aus durch eine schmale Tür in der Holzwand sichtbar. Ein Passpunkt alleine ist nicht genug um eine Passpunkt-zu-Passpunkt-Registrierung durchführen zu können.

Um Scanworld 11 zu den anderen *ScanWorlds* registrieren zu können wird einen Punktwolke-zu-Punktwolke Registrierung verwendet. Dazu wird eine Überlappung (mindestens 30%) zwischen den Punktwolken benötigt.

#### Antwort zu Frage 2:

SW9 und SW11 verfügen über ausreichende Überlappung im Bereich der Decke. Somit kann die Punktwolke-zu-Punktwolke Registrierung durchgeführt werden.

#### Antwort zu Frage 3:

Wir können erkennen, dass Passpunkt 17 in *ScanWorld* 6 (das rechte Bild) nicht gut definiert ist.

#### Antwort zu Frage 4

Das Ergebnis zeigt 10 Randbedingungen in diesem Passpunkt (reduzierter Datensatz: 3)

#### Antwort zu Frage 5:

*Passpunkt* 13 existiert zweimal in *ScanWorld* 16.

#### Antwort zu Frage 6:

*Passpunkt* 7 hat in *ScanWorld* 7 eine schlechte Position. Der Feinscan zeigt den Passpunkt in korrekter Position. Das bedeutet, dass bei der Beschriftung des Passpunktes Fehler aufgetreten sind. Viele dieser Fehler entstehen aufgrund von manuellen oder halbautomatischen Verfahren während der Erfassungsphase und sind nahezu unumgänglich. Zu geringe Konzentration oder ungenauer Gebrauch von halbautomatischen Techniken bei der Erfassung von Passpunkten in der Punktwolke führen zu fehlerhaften Datensätzen.

Bei der Überprüfung von Randbedingungen, die *Passpunkt* 7 beinhalten, stellten wir fest, dass die Markierung für *Passpunkt* 7 in *ScanWorld* 7 nicht in ihrer richtigen Position ist.

#### Antwort zu Frage 7:

Der höchste Fehlbetrag sollte nun bei ca. 1,2 cm liegen, was einem akzeptablen Fehlermesswert bei einem Gebäude dieser Größe entspricht.

#### Antwort zu Frage 8:

Die *ScanWorlds* 33, 34, 35, 36 und 37 enthalten keine eigenen Passpunkte. *Cyclone* antwortet auf den Registrierungsbeefehl mit einer Fehlermeldung, die besagt, dass die aktuellen Randbedingungen für den Registrierungsprozess unzureichend sind um eine Anfangsregistrierung durchzuführen (Bei der Analyse der Passpunkttrandbedingung erkennen wir, dass *ScanWorld* 32 nur zwei Randbedingungen besitzt).

#### Antwort zu Frage 9:

Antwort: *ScanWorld* 37 verfügt über eine ausreichende Überlappung mit *ScanWorld* 31; *ScanWorld* 35 und *ScanWorld* 36 besitzen eine ausreichende Überlappung mit *ScanWorld* 30.

## 7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zyklus des Riskomanagements (aus [1]).....	11
Fig. 2: Laserscanner-Anwendungen .....	13
Abbildung 3: Ein Prisma, das weißes Licht in seine verschiedenen Farben aufspaltet .....	13
Abbildung 4: Das elektromagnetische Spektrum .....	14
Abbildung 5: Kategorisierung der Messmethoden, die Licht benutzen (aus [4]).....	17
Abbildung 6: Prinzipien der Triangulation .....	18
Abbildung 7: Prinzipien der Lasertriangulation.....	19
Abbildung 8: Verschiedene Projektionsmethoden der Triangulationsscanner.....	20
Abbildung 9: Regelmäßige Musterprojektion (übernommen aus [5]).....	20
Abbildung 10 : binäres Streifenmuster, das zeitlich phasenmoduliert ist, auch Streifenprojektionsverfahren genannt. ....	20
Abbildung 11: Moiré-Muster, das durch zwei überlagerte Liniengitter erzeugt wurde, wobei ein Liniengitter um 5° gegenüber dem anderen verdreht wurde (übernommen aus [6]) .....	21
Abbildung 12: Prinzip eines Time-of-Flight Scanners .....	22
Abbildung 13: Laserimpulsmaß .....	22
Abbildung 14: die maximale eindeutige Entfernung im Vergleich zur Impulswiederholfrequenz (aus [7]).....	23
Abbildung 15: kommerzielle Time-of-Flight Scanner .....	24
Abbildung 16: Prinzip der phasenbasierten Messung.....	24
Abbildung 17: schematische Zeichnung von zwei modulierten Wellenlängen und einer Trägerwelle zur phasenbasierten Distanzmessung (aus [8]).....	26
Abbildung 18: kommerzielle phasenbasierte Laserscanner.....	27
Abbildung 19: Ein Michelson Interferometer [9] .....	27
Abbildung 20: Strahlablengungsmethoden (aus [10]) .....	28
Abbildung 21: Ideale Reflexion, partielle Beleuchtung, partielle Verdeckung (aus [18]).....	29
Abbildung 22: Der Mixed-Edge Effekt.....	30
Abbildung 23: Die Messungenauigkeiten der verschiedenen Laserscanmethoden (aus [4]) .....	32
Abbildung 24: Die Lambertsche Oberflächenreflexion.....	33
Abbildung 25: Das Signalverhalten beim scannen von Oberflächen mit unterschiedlichem Reflexionsvermögen (aus [4]) .....	34
Abbildung 26: Brechungseffekte in inhomogenen halb-transparenten Materialien (Styropor, Holz, Marmor). ....	34
Abbildung 27: Verlauf des terrestrischen Laserscannings.....	37
Abbildung 28: Diagramm einer Vermessungsplanung.....	38
Abbildung 29: (oben) schlechte Scannerposition, beinhaltet einen sehr ungünstigen Neigungswinkel, (unten) eine günstige Scannerposition .....	41
Abbildung 30: Laser Footprint unter verschiedenen Schnittwinkeln .....	41
Abbildung 31: (oben) schlechte Verteilung der Zielmarken, (unten) günstige Verteilung der Zielmarken .....	42
Abbildung 32: Typen von Zielmarken .....	43
Abbildung 33: Aufstellung des Laserscanners (aus [27]).....	44
Abbildung 34: Vollintegrierte Scan-Kontrolle beim <i>Leica</i> HDS6000 (aus [27]) .....	45
Abbildung 35: Das Sichtfeld des <i>Leica</i> HDS6000 (aus [27]).....	46
Abbildung 36: Auswahl des Zielgebiets .....	47
Abbildung 37: Geeignete Punktdichten (Abtastauflösungen) für verschiedene Größen von Kulturdenkmälern [28].....	48
Abbildung 38: Bereichsbasierte primäre Punktfilterung .....	49
Abbildung 39: Scannen von Zielmarken [25] .....	50
Abbildung 40: Zielmarke mit einer hohen Auflösung gescannt [25].....	51
Abbildung 41: Registrierung zwischen zwei Scanpositionen .....	52
Abbildung 42: Registrierungstechniken.....	53

Abbildung 43: Fehlerfortpflanzung infolge einer Cloud-to-Cloud Registrierung mehrerer Scans einer Fassade .....	55
Abbildung 44: Der Automatisierungsgrad im Workflow des terrestrischen Laserscannings (aus A. Gruen).....	57
Abbildung 45: Bild einer unorganisierten Punkt-Wolke.....	58
Abbildung 46: Entfernungsbild.....	58
Abbildung 47: Das Ergebnis des Laser Splatting (links), Großaufnahme des Laser Splatting (rechts).....	59
Abbildung 48: Beispiel des Delaunay Kriteriums. (a) erfüllt das Kriterium, (b) erfüllt es nicht (aus [30]).....	62
Abbildung 49: (a) Ein Würfel ohne Texturinformation, (b) uv Layout, (c) Würfel mit Textur, (d) Texturinformation .....	64
Abbildung 50: Orthographische Projektion.....	64
Figure 51: Quality Control Flowchart.....	66
Abbildung 52: Photo der Kirche St. James in Leuven, Belgien.....	72
Abbildung 53: Grundriss mit Darstellung der Sichtbehinderung durch Holzwände.....	73
Abbildung 54: Panoramaaufnahme des Innenraumes der Kirche St. James .....	74
Abbildung 55: Leica HDS 4500 Laserscanner mit Phasenvergleichsverfahren [27].....	76
Abbildung 56: Leica HDS3000 Laserscanner mit Impulslaufzeitmessverfahren [27].....	77
Abbildung 57: Zonen nach Sichtbehinderungen aufgeteilt.....	78
Abbildung 58: Übersicht über die Scanpositionen im Inneren der Kirche .....	79
Abbildung 59: Überblick über die Scanpositionen zur Außenaufnahme der Kirche.....	80
Abbildung 60: Überblick über alle Scanpositionen und der Passpunkte, wie sie von den Autoren vorgeschlagen werden .....	81
Abbildung 61: Laden einer Datenbank in Cyclone .....	82
Abbildung 62: Cyclone Navigator – Erstellung eines Registrierungsprojektes .....	84
Abbildung 63: Dialogbox des Registrierungsprojekts.....	85
Abbildung 64: Importieren von Totalstationsdaten aus einer ASCII Datei .....	86
Abbildung 65: Struktur der importierten Totalstationsdaten in Cyclone .....	86
Abbildung 66: Einfügen aller ScanWorlds in das Registrierungsprojekt .....	87
Abbildung 67: Befehl Auto-Add Constraint .....	88
Abbildung 68: Passpunkt 17 in ScanWorlds 5 (gute Position – links) und 6 (schlechte Position – rechts) .....	88
Abbildung 69: Liste der Randbedingungen nach der Registrierung.....	89
Abbildung 70: Passpunkt 7 in ScanWorld 7, schlechte Position .....	90
Abbildung 71: Registrierungsdiagnose .....	91
Abbildung 72: Der Befehl Auto-Add Cloud Constraints.....	91
Abbildung 73: Dialogfenster Wolke-zu-Wolke Registrierungsprozess (a) nach 5 Wiederholungen, (b) nach 50 Wiederholungen.....	92
Abbildung 74: Ergebnisse der Punktwolkenanpassung.....	92
Abbildung 75: (A) Überblick über die übereinstimmenden Punkte; (B) Wanddeck mit der Dachstruktur in der Nähe des Einganges; (C) Oberkante des zweiten Bogens von rechts; (D) Ecke eines Rechteckes an der linken Wand;.....	95
Abbildung 76: Datenbanken im Cyclone Navigator.....	96
Abbildung 77: Kopieren des Registrierungsprojektes des Innenraumes in die Windows Zwischenablage .....	97
Abbildung 78: Erstellen einer vollständigen Kopie oder einer Referenzkopie.....	97
Abbildung 79: Einfügen des Registrierungsprojektes Inside in das Registrierungsprojekt ALL..	98
Abbildung 80: Einfügen des Innen- und Außenregistrierungsprojektes in das globale Registrierungsprojekt .....	98
Abbildung 81: Erstellen einer neuen Datei zum Importieren der Punktwolke in <i>MicroStation</i> .	101
Abbildung 82: Laden der CloudWorx Plug-in in <i>MicroStation</i> .....	102
Abbildung 83: Toolboxen von CloudWorx.....	102
Abbildung 84: Toolboxen von CloudWorx.....	103
Abbildung 85: Öffnen des Punktwolkenfensters Open ModelSpace View in CloudWorx .....	103

Abbildung 86: Parameter zum Öffnen des ModelSpace View .....	104
Abbildung 87: Geladene Punktwolke in MicroStation CloudWorx.....	104
Abbildung 88: Grundeinstellungen von CloudWorx .....	105
Abbildung 89: Auswahl eines Aufrisses .....	107
Abbildung 90: Verbergen aller Punkte außerhalb der Umgrenzung .....	107
Abbildung 91: Erstellen einer Linie zum Definieren der Aufrissebene .....	108
Abbildung 92: Werkzeugkasten 2D View Control .....	108
Abbildung 93: Ansichten mit der Aufrissebene ausgerichtet.....	109
Abbildung 94: Speichern von Ansichten .....	109
Abbildung 95: Definieren eines neuen aktiven Koordinatensystems .....	110
Abbildung 96: Vorderaufriss.....	111
Abbildung 97: Querschnitt.....	111
Abbildung 98: Grundriss .....	112
Abbildung 99: Erstellung und Öffnen des ModelSpace View des Registrierungsprojektes 'Inside' .....	114
Abbildung 100: Draufsicht des registrierten Projektes 'Inside' .....	114
Abbildung 101: Auswählen von Teilen der Punktwolke unter Verwendung des Umgrenzungswerkzeuges .....	115
Abbildung 102: Gewählter Bereich der Punktwolke .....	115
Abbildung 103: Das Dialogfenster ModelSpace Info gibt Aufschluss darüber, wie viele Punkte sich in der Punktwolke befinden. ....	116
Abbildung 104: Kopieren des ausgewählten Bereiches in eine neue ModelSpace Umgebung	117
Abbildung 105: Exportieren der Punktwolke in eine Datei .....	117
Abbildung 106: Geomagic Studio (v9) Grafische Benutzeroberfläche.....	118
Abbildung 107: Laden des vollen Umfangs der Punktwolke .....	118
Abbildung 108: Festlegen der Einheiten für die geladene Punktwolke .....	119
Abbildung 109: Dialogfenster Display-Statistiken .....	119
Abbildung 110: Schattieren der Punktwolkenansicht zum besseren Verständnis .....	120
Abbildung 111: Ansicht der voll geladenen, aufgeteilten Punktwolke in Geomagic Studio (v9)	120
Abbildung 112: Teilen der Punktwolke in kleinere Stücke für einfacheres Arbeiten .....	121
Abbildung 113: Entfernen eines Teiles der Punkte aus dem Speicher .....	121
Abbildung 114: Händisches Entfernen der nicht verbundenen Teile .....	122
Abbildung 115: Entfernen der Messausreißer mit dem Befehl Select Outliers .....	123
Abbildung 116: Rauschreduktion unter Verwendung der automatischen Werkzeuge zur Rauschreduktion.....	123
Abbildung 117: Voransicht eines kleinen Stückes der Punktwolke unter Einsatz der Rauschreduktionsparameter.....	125
Abbildung 118: Crease Winkel.....	125
Abbildung 119: Dialogfenster Uniform Sample .....	126
Abbildung 120: Dialogfenstereinstellungen von Compute Wrap.....	127
Abbildung 121: Vermaschungsmodell.....	128
Abbildung 122: Zusammenheften zweier Vermaschungen.....	129
Abbildung 123: Neu erstellte Vermaschung, die zwei vermaschte Teile miteinander verbindet	130
Abbildung 124: Dialogfenstereinstellungen der Lochfüllfunktion.....	131
Abbildung 125: Entfernen von Teilen die zu geringe Informationen besitzen .....	132
Abbildung 126: Säubern der Lochränder vor dem Füllen .....	132
Abbildung 127: Entfernen der Spitzen in gefüllten Bereichen.....	133
Abbildung 128: Beispiel für ein schmales Loch.....	133
Abbildung 129: Erstellen von Brücken um ein schmales Loch in mehrere kleinere Löcher aufzuteilen.....	134
Abbildung 130: Beispiel für ein Loch, das über zu geringe Information verfügt um rekonstruiert zu werden .....	135
Abbildung 131: Auswählen und kopieren eines ähnlichen Teiles und füllen des Loches .....	135
Abbildung 132: Dialogbox Manuelle Registrierung .....	136

Abbildung 133: Registrierungsanleitung für das Füllen eines Loches mit einem ähnlich aussehenden Teil der Vermaschung .....	137
Abbildung 134: Dialogbox Polygon – Merge .....	138
Abbildung 135: Vollvermaschtes Modell .....	139
Abbildung 136: Vermaschung vor (links) und nach (rechts) der Glättung der Ränder.....	139
Abbildung 137: Erstellen einer Symmetrieebene .....	140
Abbildung 138: Definieren einer Durchschneidungsebene unter Verwendung der Perpendicular through Point Methode.....	141
Abbildung 139: Schnittkurven .....	142
Abbildung 140: Kamerapositionen zur Erstellung einer Animation .....	143
Abbildung 141: Verändern der Ansichtseigenschaften um die Kamerapositionen anzuzeigen	143
Abbildung 142: Dialogbox Animation Editor .....	144
Abbildung 143: Dialogbox Animation Settings .....	144

## 8. Bibliografie

- [1] Caballero, D., J. Esteban, and B. Izquierdo. ORCHESTRA: a unified and open architecture for risk management applications. in European Geosciences Union General Assembly. Vienna, Austria. 2007.
- [2] WWW, Paschotta, R. Encyclopedia of Laser Physics and Technology. [Cited 19/12/2007]; Available from: <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>.
- [3] IEC, 2001. Safety of laser products – Part 1: Equipment - classification, requirements and users guide. Edition 1.2. International Standard, IEC 60825-1. 2001.
- [4] Blais, F., Terrestrial Laser Scanning, in International Summer School “Digital Recording and 3D Modeling”. Aghios Nikolaos, Crete, Greece. 2006.
- [5] WWW, Magnor, M., H. Lensch, and H. Seidel. 3D Figure Analysis and Synthesis. [Powerpoint presentation] [Cited 01/07/2008]; Available from: <http://www.mpi-inf.mpg.de/departments/irg3/ss03/3diaas/digacqui-2804.pdf>.
- [6] WWW, <http://en.wikipedia.org/wiki/Moire>. [Cited 19/12/2007].
- [7] WWW, <http://utopia.cord.org/cm/leot/Module6/module6.htm>. [Cited 19/12/2007].
- [8] Pfeifer, N. and C. Briese. Laser scanning – principles and applications. In GeoSiberia 2007 – International Exhibition and Scientific Congress, April 2007.
- [9] WWW, <http://en.wikipedia.org/wiki/Interferometry>. [Cited 20/12/2007].
- [10] Brenner, C. Aerial laser scanning. in International Summer School “Digital Recording and 3D Modeling”. Aghios Nikolaos, Crete, Greece. 2006.
- [11] Lichti, D., M. P. Stewart, M. Tsakiri and A. J. Snow. Calibration and testing of a terrestrial laser scanner. In Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 33 (B5/2), pp. 485-492. 2000.
- [12] Lichti, D., Gordon, S. J., Stewart, M. P., Franke, J. and Tsakiri, M., Comparison of digital photogrammetry and laser scanning. In Proc. of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording, pp. 39 – 44. Corfu, Greece, 1-2 September, 2002.
- [13] Kern, F., Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscannerdaten. Technischen Universität Braunschweig. 2003
- [14] Johansson, M. Explorations into the behavior of three different high-resolution ground-based laser scanners in the built environment. In Proceedings of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording, Corfu, Greece. 1-2 September, 2003.
- [15] Balzani, M., et al. A terrestrial 3D laser scanner: Accuracy tests. In Proceedings of the 18th Int. Symp. CIPA 2001- Surveying and Documentation of Historic Buildings, Monuments, Sites - Traditional and Modern Methods, Potsdam, Germany. 18–21 September, 2001.
- [16] WWW, <http://scanning.fh-mainz.de>. [Cited 20/12/2007].
- [17] Weichel, H., Laser Beam Propagation in the Atmosphere. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press. 1990.
- [18] Hughes, A.J., Laser Beam Scanning: Opto-Mechanical Devices, Systems and Data Storage Optics. Journal of Modern Optics, 33(8): 950-951, 1986.
- [19] Lichti, D. and S.J. Gordon. Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. In Proc. of FIG Working Week - The Olympic Surveying Spirit. Athens, Greece. 22-27 May 2004.
- [20] Beraldin, J.-A., et al. Virtual Reconstruction of Heritage Sites: Opportunities and Challenges Created by 3D Technologies. In International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage. Ascona, Switzerland. 22-27 May 2005.
- [21] Boehler, W., M. Bordas, and A. Marbs. Investigating laser scanner accuracy. In Proc. CIPA XIXth Int. Symposium. Antalya, Turkey. 30 September-04 October 2003.
- [22] Clark, J. and S. Robson. Accuracy of measurements made with a Cyrax 2500 laser scanner against surfaces of known colour. In Proc. of XXth ISPR 2004 - Geo-Imagery Bridging Continents. Istanbul, Turkey. 12-23 July 2004.
- [23] Ingesand, H., A. Ryf, and T. Schulz. Performances and experiences in terrestrial scanning. In Proc. 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques. Zurich, Switzerland, pp. 236-244. 22-25 September 2003

- [24] Mechelke, K., T.P. Kersten, and M. Lindstaedt. Comparative investigations into accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems. In Proc. 8th Conference on Optical 3D Measurement techniques VIII. Zurich, Switzerland, 9-12 July 2007.
- [25] Barber, D., J. Mills, and P. Bryan. Towards a standard specification for terrestrial laser scanning of cultural heritage. In Proc. of the XXth ISPRS Congress on Geo-Imagery Bridging Continents, Vol XXXV, Part B5, 2003.
- [26] Kopacik, A. and M. Korbasova. Optimal Configuration of Standpoints by Application of Laser Terrestrial Scanners. In INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying. Bratislava, Slovakia. 2004.
- [27] Leica. Leica Manual HDS 6000.
- [28] WWW, English\_Heritage. 3D Laser Scanning for Heritage, Advice and Guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture. 2007 [Cited 01/07/2008]; Available from: <http://www.heritage3d.org/downloads/3dscanning.pdf>.
- [29] WWW, English\_Heritage. An addendum to the metric survey specifications for english heritage – the collection and archiving of point cloud data obtained by terrestrial laser scanning or other methods. 2006. [Cited 01/07/2008]; Available from: <http://www.ceg.ncl.ac.uk/heritage3d/downloads%5Caddendum2006.pdf>.
- [30] WWW, <http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/survey/tetsurv.html>. [Cited 05/01/2008].
- [31] Alba, M., Fregonese, L., Prandi, F., Scaioni, M., Valgoi, P., Structural Monitoring of a Large Dam by Terrestrial Laser Scanning. In The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XXXVI, Part 5. Dresden, Germany. 25-27 September 2006.
- [32] Eling, D., Terrestrisches Laserscanning für die Deformationsanalyse an Talsperren. Workshop Messtechnische Überwachung von Stauanlagen, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida. 1: p. 31-40, 2006.
- [33] Hesse, C. and H. Kutterer. Automated form recognition of laser scanned deformable objects. In IAG Symposia on Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles. Berlin, Germany: Springer. 2006.
- [34] Rudig, S., Analyse flächenhafter Deformationen aus Laserscannerdaten. Dissertation, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, pp. 108. 2005.