Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

Vergleich der Objekterfassung mittels zweier terrestrischer Laserscanner sowie des zugehörigen CAD-Modells am Beispiel des "Hauses der Astronomie"(Heidelberg)

Diplomarbeit

cand. geod.
Claire Nussbaumer

Karlsruhe, den 16. Juni 2011

Aufgabenstellung
Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hinz

Betreuung
Dr.-Ing. Thomas Vögtle

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz

A U F G A B E N S T E L L U N G

für cand. geod.

Claire Nussbaumer

Vergleich der Objekterfassung mittels zweier unterschiedlicher terrestrischer Laserscanner sowie des zugehörigen CAD-Modells am Beispiel des „Hauses der Astronomie“ (Heidelberg)

Das Auftreten erheblicher Probleme während der Bauphase des „Hauses der Astronomie“ (Heidelberg), insbesondere Einpassungsschwierigkeiten durch von der Sollform abweichende Kuppelteile mit Differenzen bis zu 10cm, die z.T. vor Ort nachgearbeitet, z.T. neu angefertigt werden mussten, machte eine hochgenaue Prüfung der tatsächlichen Geometrie des betroffenen Hörsaals zwingend erforderlich. Ziel dieser Arbeit ist daher, ein Konzept zur Bestimmung der Ist-Geometrie zu entwickeln und im Rahmen einer Objekterfassung umzusetzen. Dazu soll eine geeignete Erfassungsmethode gewählt werden, die auf dem Einsatz zweier unterschiedlicher terrestrischer Laserscanner-Typen aufbaut. Zur anschließenden Datenanalyse gehört insbesondere eine detaillierte statistische Auswertung. Mit einem Vergleich der erzeugten Punktwolken untereinander sollen die erzielten Ergebnisse bestätigt und abgesichert werden. Mit dem Vergleich zum vorhandenen CAD-Modell sollen die Abweichungen von der Soll-Geometrie ermittelt, visualisiert und analysiert werden.

Nach einer Recherche einschlägiger Literatur soll die Konzeption der Erfassung und Datenanalyse der komplexen Geometrie des Hörsaals erstellt werden und entsprechend umgesetzt werden. In der schriftlichen Ausarbeitung sollen alle durchgeführten Arbeitsschritte ausführlich beschrieben sowie die Ergebnisse detailliert erläutert und kritisch diskutiert werden. Die Analysen sind durch geeignete Abbildungen, Grafiken und Tabellen zu verdeutlichen.

Ausgabe: 17.01.2011
Abgabe: 16.06.2011

Betreuer: Dr.-Ing. Thomas Vögtle
Aufgabensteller: Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hinz

ERKLÄRUNG

Ich versichere hiermit, die vorliegende Diplomarbeit bis auf die dem Aufgabensteller bekannten Hilfsmittel selbständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten Anderer unverändert oder mit Änderungen entnommen wurde.

Karlsruhe, den 16. Juni 2011

Die vorliegende Diplomarbeit wurde im Rahmen eines deutsch-französischen Doppeldiploms durchgeführt und angefertigt. Sie gilt somit auch als Abschluss des Studiums im Studiengang „Topographie" am Institut National des Sciences Appliquées (INSA) von Straßburg.

DANKSAGUNG

Zu Beginn möchte ich mich bei allen, die mich während dieser Arbeit in jeglicher Form unterstützt und mir geholfen haben, herzlich bedanken.

Einen besonderen Dank an meinen Betreuer Herrn Dr.-Ing. Thomas Vögtle, der mir zu jedem Zeitpunkt mit Rat und Tat zur Seite stand und der mit seinen anregenden und hilfreichen Kommentare zum Gelingen dieser Diplomarbeit beitrug. Meine Dankbarkeit gilt ebenso Herrn Dr.-Ing. Karl Zippelt und Frau Dipl. Ing. Eva Richter, die mir bei der Anwendung der Leica-Software durch zahlreiche Ratschläge geholfen haben.

Ein weiterer Dank geht an Herrn Manser und Herrn Gebauer, die mich in ihrem Vermessungsbüro empfangen haben und immer dafür sorgten, dass die Messungen in den besten Bedingungen (abgesehen von den nicht beeinflussbaren Wetterbedingungen...) stattfinden konnten und dass die benötigten Software-Systeme vorhanden waren. Dabei möchte ich ganz besonders Max, Harry und Timo für ihre Hilfsbereitschaft, Unterstützung und Geduld sowohl am „Haus der Astronomie" als auch im Büro danken. Und natürlich gilt mein Dank allen Kollegen, die hier nicht ausdrücklich genannt werden, aber für eine sehr angenehme Zeit gesorgt haben.

Dem Studiengang „Topographie" des INSA Straßburg in Person von Tania Landes möchte ich für die Bereitstellung des Trimble GX 3D-Laserscanners danken. Ein großes Dankeschön möchte ich zudem Samuel Guillemin für seinen Einsatz am Königstuhl sowie für die Beantwortung zahlreicher Fragen aussprechen.

Ein persönlicher Dank geht an Carla für die viele Übersetzungen, Christoph, ohne den ich wahrscheinlich noch am Programmieren wäre, und Franzi für die etwas komplizierte Besorgung des Scanner-Laptops... Ihr Beitrag zu dieser Arbeit ging eigentlich weit darüber hinaus und ist gar nich hoch genug einzuschätzen.

Danke an meine Eltern für ihren großartigen Rückhalt über die Jahre hinweg und für die Chancen, die sie mir eröffnet haben. Trotz der Entfernung durften sie meine Diplomarbeit miterleben und haben sich über lange, wahrscheinlich nicht sehr spannende Erklärungen nie beschwert. Vielen Dank für eure außergewöhnliche Geduld!

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation und Zielsetzung 1

1.2 Gliederung der Arbeit 3

2 Terrestrisches Laserscanning **5**

2.1 Prinzip des terrestrischen Laserscannings 5

2.1.1 Grundlagen der Lasertechnik 5

2.1.2 Grundlagen terrestrischer Laserscanner 6

2.1.3 Vergleich mit anderen Messverfahren 8

2.2 Unterscheidung nach Streckenmessmethode 9

2.2.1 Phasenvergleichsverfahren 9

2.2.2 Impulslaufzeitverfahren 10

2.3 Unterscheidung der TLS nach Sichtfeld und Strahlablenkung 11

2.3.1 Kamerascanner 11

2.3.2 Hybridscanner 11

2.3.3 Panoramascanner 12

2.4 Berührungslose Distanzmessung 12

2.4.1 Reflexion 12

2.4.2 Einfluss der Oberflächengeometrie 13

2.4.3 Einfluss des Oberflächenmaterials 14

2.4.4 Einfluss der Atmosphäre 15

3 Datenerfassung **17**

3.1 Beschreibung des Aufnahmeobjektes 17

3.2 Vorbereitungen auf der Baustelle 18

3.2.1 Verdichtung des lokalen Netzes 19

3.2.2 Anbringung der Zielmarken 19
3.2.3 Tachymetrisches Aufmaß der Zielmarken 21
3.3 TLS-Aufnahmen mit dem Leica HDS6000 23
3.3.1 Instrumentarium 23
3.3.2 Planung der Standpunkte 25
3.3.3 Ablauf der Messung 27
3.4 TLS-Aufnahmen mit dem Trimble GX 29
3.4.1 Instrumentarium 29
3.4.2 Auswahl der Standpunkte 30
3.4.3 Ablauf der Messung 31

4 Vorverarbeitung der Punktwolken 33
4.1 Leica Cyclone 33
4.1.1 Registrierung und Georeferenzierung 34
4.1.2 Bereinigung der Punktwolke 37
4.1.3 Modellierung der Punktwolke 38
4.2 Trimble RealWorks 40
4.2.1 Registrierung und Georeferenzierung 40
4.2.2 Bereinigung der Punktwolke 41
4.2.3 Modellierung der Punktwolke 41

5 Auswertung der Laserscanaufnahmen 45
5.1 Bestimmung des geometrischen Messrauschens 45
5.1.1 Methode zur Bestimmung einer ausgleichenden Ebene 45
5.1.2 Vorbereitung der Patches 46
5.1.3 Eingesetzte Methodik und Ergebnisse 48
5.2 Vergleich der Punktwolken mit dem CAD-Modell 55
5.2.1 Vergleich in RealWorks 56
5.2.2 Vergleich in CloudCompare 68
5.2.3 Vergleich in Rhinoceros 3D 75
5.2.4 Vergleich der Ergebnisse 80
5.3 Vergleich der beiden Laserscanaufnahmen 83
5.3.1 Punktwolkenvergleich in RealWorks 83
5.3.2 Punktwolkenvergleich in CloudCompare 87
5.3.3 Vergleich der Ergebnisse 91

6 Fazit und Ausblick 95

Literaturverzeichnis 103

Abbildungsverzeichnis **104**

Tabellenverzeichnis **108**

ANHANG **111**

A Ergebnisse der Registrierungen in Cyclone **113**

A.1 Georeferenzierung SW1 114

A.2 Registrierung und Georeferenzierung SW1-SW4 115

B Praktische Hinweise **117**

B.1 Handhabung der Software Cyclone 117

B.2 Handhabung der Software RealWorks 117

C Geometrisches Messrauschen **119**

D Vergleich mit dem CAD-Modell **123**

D.1 Ergebnisse aus CloudCompare 123

D.2 Ergebnisse aus Rhino 128

E Vergleich der beiden Laserscanaufnahmen **133**

E.1 Graphische Ergebnisse aus CloudCompare 133

E.2 Vergleich der Ergebnisse 136

F Pläne des „Hauses der Astronomie” **139**

KAPITEL 1

EINLEITUNG

1.1 Motivation und Zielsetzung

Auf dem Königstuhl bei Heidelberg entsteht seit Herbst 2009 ein einzigartiges Kommunikationszentrum für die astronomische Öffentlichkeitsarbeit, die Astronomie-Didaktik und den Wissenschaftsaustausch: das „Haus der Astronomie". Das außergewöhnliche Gebäude findet seinen Platz neben dem Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA), dessen Direktoren in Kollaboration mit dem Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH) die Idee entwickelt hatten. Die von den Darmstädter Architekten Berhardt und Partner entworfene Form des Bauwerks leitet sich aus dem Kern und Armen einer Spiralgalaxie ab: in den Armen werden sich Arbeits-, Labor- und Seminarräumen befinden und das Zentrum des Gebäudes bildet ein multifunktionaler Hörsaal, der mit modernster medialer Technik ausgestattet sein wird. Rund 100 Gäste werden aus geneigten Stuhlreihen in eine parallel geneigte Kuppel blicken (Abb. 1.1). Diese zeigt keineswegs den Sternenhimmel (schließlich handelt es sich nicht um ein Planetarium), sondern hier lassen sich etwa kosmische Hintergrundstrahlung projizieren oder ein Raumflug imitieren [RNZ, 2011].

Abbildung 1.1: Schnitt aus dem CAD-Modell des „Hauses der Astronomie" mit dem Hörsaal in seiner Mitte [@Bernhardt+Partner, 2011]

Aufgrund der komplexen Geometrie des „Hauses der Astronomie” bedurfte es täglich neuer Vermessungen, um das detaillierte Computermodell in die Örtlichkeit zu übertragen [RNZ, 2011]. Trozdem traten während der Bauphase des Hörsaals Probleme im Kuppelbereich auf: die Kuppel besteht nämlich aus Fertigteilen aus Beton (Abb. 1.2), die nicht genau zusammenpassten und noch nachbearbeitet werden mussten. Da im Betongehäuse eine Blechverkleidung, die auch außerhalb der Baustelle angefertigt wurde, angebracht werden sollte, hatten das Architekturbüro sowie die Baufirma Interesse an einer Beschreibung des Ist-Zustandes und einem Vergleich mit dem Soll-Modell des Hörsaals. Dies stellte eine günstige Gelegenheit dar, das terrestrische Laserscanning (kurz TLS) einzusetzen.

Das terrestrische Laserscanning ermöglicht nämlich, im Gegensatz zu herkömmlichen punktorientierten geodätischen Messverfahren wie Tachymetrie, GPS und Nivellement, eine schnelle, flächenhafte Erfassung eines dreidimensionalen Objektes und seiner Umgebung mit einer Genauigkeit im Millimeter-Bereich. Das Messprinzip basiert auf der berührungslosen Distanzmessung bei gleichzeitiger Bestimmung zweier Raumwinkel. Das Ergebnis besteht nicht mehr aus diskreten markanten Punkten sondern aus einer rasterförmigen Punktwolke, deren Punktdichte von der vom Anwender ausgewählten Inkrementierung abhängt. Der Datensatz enthält Millionen von Punkten, die jeweils anhand von 3D-Koordinaten und einem Intensitätswert gekennzeichnet werden. Für Laserscanner, die über eine Videokamera verfügen, kann eine zusätzliche Farbinformation auf die Messungen gelegt werden, so dass ein realitätsnahes Bild entsteht.

Beispielsweise wird das terrestrische Laserscanning in den Bereichen des Qualitätsmanagements im Tunnelbau, der Herstellung von 3D-Stadtmodellen, der Deformationsanalyse bei Bauwerken, der Medizin und Forensik sowie der Baudenkmalpflege und Archäologie eingesetzt.

Das Ziel dieser Diplomarbeit besteht erstens darin, einen Soll-Ist Vergleich zwischen dem von den Architekten gelieferten CAD-Modell und den Laserscanaufnahmen des Hörsaals durchzuführen, um die während der Bauphase aufgetretenen Abweichungen aufzudecken und zu quantifizieren. Aus praktischer Sicht wäre dafür der Einsatz eines einzelnen Gerätes ausreichend gewesen. Dieses Projekt wurde aber als Gelegenheit betrachtet, anhand eines praktischen Beispiels zwei verschiedene Laserscanner zu vergleichen. Messungen fanden einerseits mit dem HDS6000 der Fa. Leica Geosystems und andererseits mit dem Trimble GX 3D statt, so dass auch der Einfluss zweier unterschiedlicher Messprinzipien - Phasenmessverfahren und Laufzeitmessung der Laser-Impulse - in die Untersuchungen mit einbezogen werden konnte. Der Erste wurde vom Geodätischen Institut in Karlsruhe (GIK) zur Verfügung gestellt, der Zweite gehört zum Institut National des Sciences Appliquées (INSA) in Straßburg (Frankreich) und ist aufgrund eines eingeschränkten Sichtfeldes (s. Kap. 3.4) für die Aufnahme im Innenraum nicht besonders geeignet. Da der Hörsaal für die Datenerfassung nur zwei Wochen frei gehalten wurde, konnte allerdings in diesem Zeitraum kein weiteres Gerät ausgeliehen werden.

Bei der Analyse der erhobenen Datensätze wurden diese nach ihrer Messgenauigkeit mittels einer Matlab-Routine untersucht. Da zwei Laserscanner zum Einsatz kamen, wurde bei der Auswertung der Ergebnisse einerseits jede Punktwolke mit dem CAD-Modell verglichen und andererseits wurden die Laserscanaufnahmen selbst gegenübergestellt. Zur Vorbereitung sowie zur Analyse der Datensätze kamen verschiedene Software-Systeme zum Einsatz: Leica Cyclone, Trimble RealWorks, CloudCompare und Rhinoceros 3D. Die verfügbaren Funktionen sowie die

von den Software-Systemen gelieferten Ergebnisse werden in dieser Diplomarbeit ausführlich beschrieben.

Die vorliegende Diplomarbeit wurde vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF), KIT betreut, allerdings beim für das „Haus der Astronomie" zuständigen Vermessungsbüro Gebauer&Manser in Heidelberg durchgeführt.

Abbildung 1.2: Luftbild des „Hauses der Astronomie" während der Bauphase

1.2 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 werden zunächst allgemeine theoretische Grundlagen zur Erklärung der Funktionsweise der terrestrischen Laserscanner aufgearbeitet. Dabei werden auch die Unterscheidungsmerkmale der TLS sowie der Einfluss der berührungslosen Distanzmessung auf die Ergebnisse beschrieben.

Das Kapitel 3 befasst sich dann mit der Datenerfassung. Nach einer Beschreibung des „Hauses der Astronomie" am Königstuhl wird auf die notwendigen Vorbereitungen auf der Baustelle eingegangen, bevor die eingesetzten Instrumente und die entsprechende Durchführung der Laserscanaufnahmen vorgestellt werden.

Die Registrierung, Georeferenzierung, Bereinigung und Modellierung der Punktwolken stellen notwendige Vorverarbeitungsschritte für die anschließende Analyse der Datensätze dar. Deshalb

werden die Software-Systeme Cyclone (Leica) und RealWorks (Trimble) in Kapitel 4 dahingehend untersucht und die Punktwolken entsprechend bearbeitet.

In Kapitel 5 findet die eigentliche Auswertung der Laserscanaufnahmen und Analyse ihrer Ergebnisse statt. Zunächst wird die Messgenauigkeit durch die Bestimmung des geometrischen Messrauschens ermittelt. Anschließend werden die Punktwolken mit dem von den Architekten zur Verfügung gestellten CAD-Modell verglichen und schließlich werden die Datensätze selbst gegenübergestellt.

Zum Schluss werden in Kapitel 6 die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst, die Grenzen einer solchen Arbeit hervorgehoben und dafür eventuelle zukünftige Arbeitsschritte vorgeschlagen.

KAPITEL 2

TERRESTRISCHES LASERSCANNING

2.1 Prinzip des terrestrischen Laserscannings

„Unter Laserscanning wird die dreidimensionale Erfassung einer Objektoberfläche durch zeitlich und örtlich versetzte Abtastung mit einem Laserstrahl verstanden." [Deumlich und Staiger, 2002] Die Bezeichnung „terrestrisch" dient zur Unterscheidung gegenüber dem flugzeuggetragenen (airborne) Laserscanning, welches der Erfassung der Erdoberfläche aus der Luft dient. In den folgenden Abschnitten wird, nach einer kurzen Einleitung über die Lasertechnik, näher auf die Funktionsweise von Laserscannern sowie auf den Vergleich mit anderen Messverfahren eingegangen.

2.1.1 Grundlagen der Lasertechnik

Das Wort Laser ist ein Akronym für *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsausendung) und bezieht sich auf die Art der Strahlenerzeugung. Die sogenannte stimulierte Emission wurde bereits 1916 von Albert Einstein vorhergesagt, aber der erste Laser wurde erst im Jahr 1960 von Theodore Maiman mit einem Rubinkristall gebaut. Die physikalische Eigenschaften der Laserstrahlung sind die Folgende:

- **sehr hohe Einfarbigkeit:** das Laserlicht besitzt eine sehr schmale spektrale Bandbreite (weist eine Wellenlänge auf) und ist somit monochrom. Laser sind im sichtbaren und den angrenzenden Bereichen des elektromagnetischen Spektrums (Ferninfrarot, Infrarot, Ultraviolett und Röntgenstrahlung) verfügbar.
- **Kohärenz:** die Wellen sind sowohl zeitlich als auch räumlich fast phasengleich, d.h. sie schwingen parallel im gleichen Takt.
- **Parallelität:** die Laserstrahlung weist eine starke Strahlenbündelung auf. Die Strahldivergenz beschreibt die Beugung des Lichts beim Austritt aus dem Laser. An den Rändern der Austrittsöffnung wird das Laserlicht nach den Gesetzen der Wellentheorie nach außen abgelenkt und weicht so von einer idealen parallelen Wellenfront ab.

- **hohe Strahlungsdichte:** aufgrund der starken Bündelung und der großen Verstärkung der Strahlung trifft das Laserlicht mit hoher Intensität auf eine kleine Fläche.

Eine ausführliche Beschreibung der Funktionsweise und Charakteristika des Lasers gibt [Kern, 2003].

2.1.2 Grundlagen terrestrischer Laserscanner

Das Messprinzip von terrestrischen Laserscannern (im Folgdenden auch kürzer TLS oder Scanner bezeichnet) basiert auf reflektorloser Distanzmessung der Raumstrecke d bei gleichzeitiger Bestimmung des Zenitwinkels θ und des Richtungswinkels φ. Aus diesen sogenannten Kugel-. bzw. Polarkoordinaten werden dreidimensionale kartesische Koordinaten (x,y,z) in dem lokalen Koordinatensystem des Instruments umgerechnet.

Beim terrestrischen Laserscanning werden keine diskreten Punkte gezielt angemessen. Stattdessen erfolgt eine in definierten Schrittweiten rasterförmige und vollautomatische dreidimensionale Umgebungserfassung (Abb. 2.1) mit hoher Geschwindigkeit, hoher räumlicher Auflösung und Objektpunktgenauigkeiten von wenigen Millimetern. Die Abtastung findet in der Regel durch einen eingebauten Spiegel (s. Kap. 2.3) statt. Das Messergebnis mit einem Laserscanner wird als Punktwolke bezeichnet.

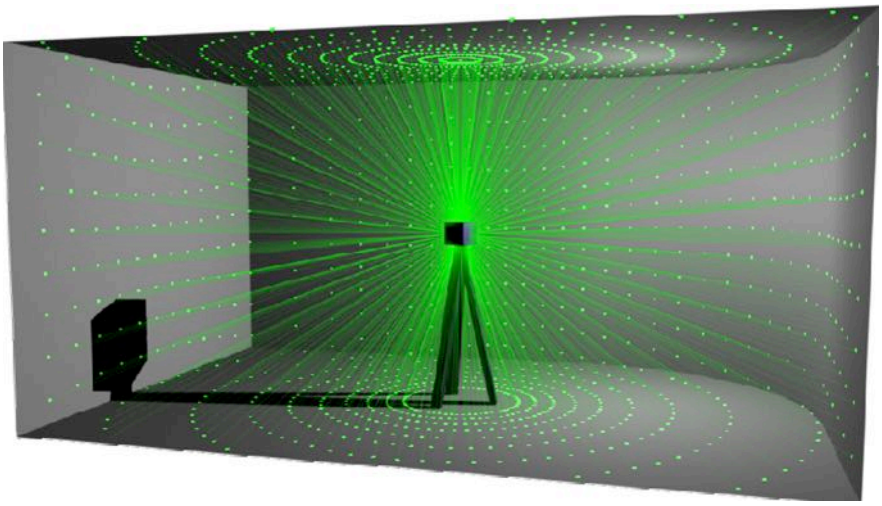


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Messvorgangs [@TUMünchen, 2011]

Zusätzlich zu den dreidimensionalen Koordinaten kann das Instrument auch die Intensität pro Punkt registrieren. Dieser Wert ist von der Reflektivität des gemessenen Objektes sowie von dem Auftreffwinkel des Laserstrahles und der Messentfernung abhängig. In diesem Zusammenhang spricht man auch von 4D-Laserscanning, deren Ergebnisse oftmals in Form von Abstands- und Intensitätsbildern gespeichert werden. Zusätzlich sind die heutigen Laserscanner häufig mit Digitalkameras ausgestattet, so dass jedem Messpunkt ein RGB-Wert zugeordnet wird, wodurch eine fotorealistische Einfärbung der Punktwolke möglich ist.

Entscheidende Eigenschaften eines Scanners sind die Reichweite, die Auflösung, die Strahldivergenz sowie die Messgenauigkeit und -geschwindigkeit (Abb. 2.2):

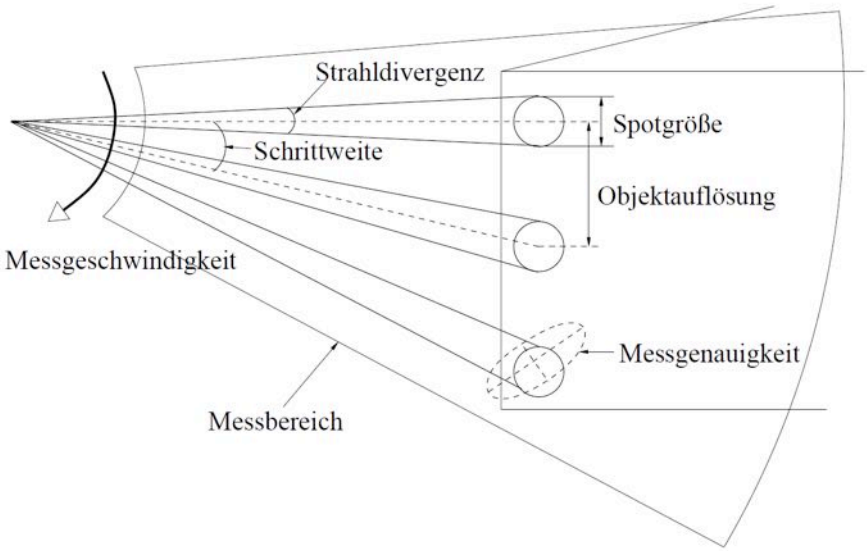


Abbildung 2.2: Systemkriterien eines Laserscanners [Kern, 2003]

- **Reichweite:** Sie hängt sowohl von gerätebedingten Kriterien (Laserleistung, Strahldivergenz, Güte der Empfangsoptik und verwendete Streckenmessmethode) als auch von äußeren Einflüssen (Reflektanz der Messobjekte und Auftreffwinkel) ab.

- **Auflösung:** Sie hängt von den zur rasterförmigen Abtastung der Umgebung gewählten Schrittweiten für die beiden Ablenkwinkel. Je kleiner die Schrittweite desto feiner die räumliche Auflösung (Diskretisierung) des Messobjektes. Berücksichtigt werden sollte aber, dass die Messzeit quadratisch mit der Erhöhung der Abtastrate ansteigt.

- **Strahldivergenz:** Die räumliche Auflösung (Abtastrate) sollte mit der Strahldivergenz abgestimmt sein. Es macht wenig Sinn, eine Abtastrate zu wählen, die sehr viel kleiner ist als die Spotgröße. Die Spotgröße ergibt sich aus der Strahldivergenz und nimmt im wesentlichen linear mit der Entfernung zu [Kern, 2003]. Eine kleine Strahldivergenz ermöglicht eine präzise Diskretisierung des Zielobjektes und führt deshalb zu besseren Ergebnissen.

- **Messgenauigkeit:** Richtungs- und Streckengenauigkeiten müssen separat betrachtet werden. Wird die Erstgenannte durch die Ablenkeinheiten bestimmt, so hängt die Zweite vom eingesetzten Distanzmessverfahren ab.

- **Messgeschwindigkeit:** Sie hängt von der Art der Strahlablenkung und dem angewandten Streckenmessverfahren ab. Die Messrate ist z.B. beim Impulslaufzeitverfahren wegen der benötigten „Messpause" zwischen den Impulsen begrenzt und deutlich geringer als beim Phasenvergleichsverfahren, beim dem theoretisch stetig gemessen werden kann.

Es wird in den Kap. 2.2 und 2.3 näher auf die unterschiedlichen Streckenmessmethoden und Arten der Strahlablenkung eingegangen.

2.1.3 Vergleich mit anderen Messverfahren

Gegenüber anderen konventionellen Messverfahren wie Tachymetrie und Photogrammetrie verfügt der Laserscanner über folgende Vorteile: die direkte Erzeugung von 3D-Koordinatenpunkten über das gesamte Zielobjekt, die Erfassung strukturarmer bzw. -loser Objekte (wie z.B. Betonbauten, Rohbauten usw.) sowie die Messung ohne Umgebungslicht oder zusätzliche Beleuchtung aufgrund aktiver Messeinrichtung. TLS ermöglichen eine schnelle, detaillierte und vollständige 3D-Aufnahme der Umgebung bzw. des Zielobjektes in Maßstab 1:1. Bei Geräten, die nicht über eine zusätzliche Digitalkamera verfügen, ist aber die Interpretation der Punktwolke für den menschlichen Betrachter schwierig, da keine Detail-Informationen über Farbgebung, Textur oder Material vorhanden sind. Eine Ergänzung der Scanner-Geometrieinformationen um die Farbinformation der Messbilder in Form von Texturen erlaubt die Ableitung dreidimensionaler virtueller fotorealistischer Modelle mit verhältnismäßig geringem Mess- und Bearbeitungsaufwand. [Kern, 2003]

Außerdem wird das Objekt durch den Laserstrahl beleuchtet (aktive Messung). Die Messergebnisse sind also vom Umgebungslicht unabhängig, was z.B. bei der Photogrammetrie nicht der Fall ist. Bezüglich Anwendungsbereichen und Genauigkeit ist in Abb. 2.3 zu erkennen, dass das Laserscanning zwar den gesamten Messbereich der Tachymetrie und Photogrammetrie abdeckt, die Genauigkeit jedoch schlechter als bei den anderen Verfahren bleibt.

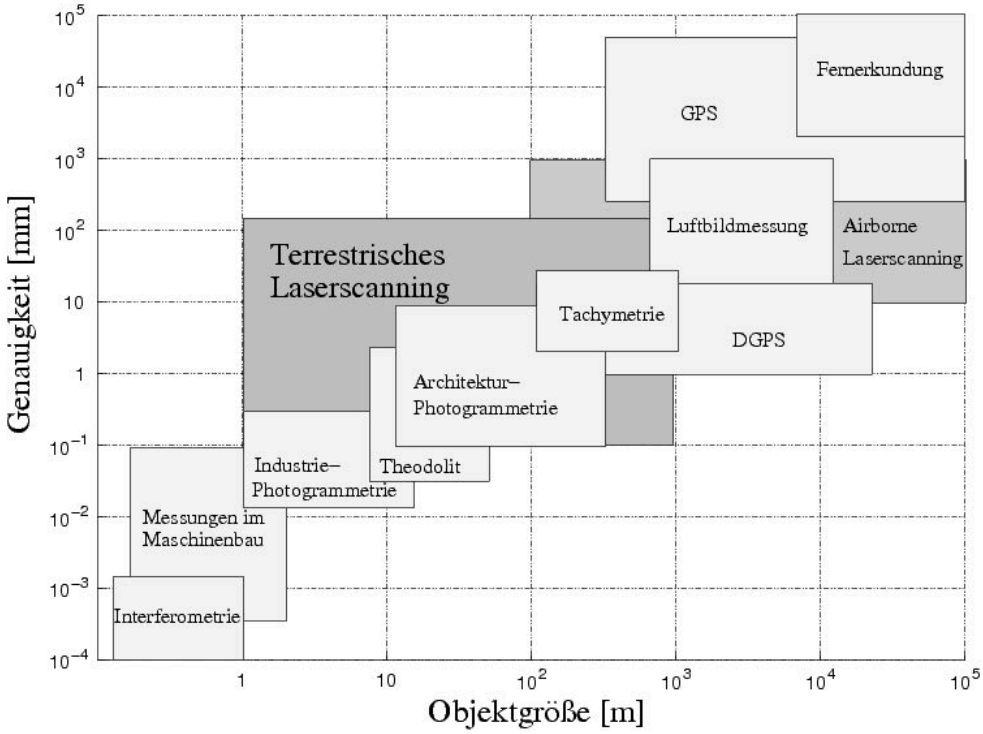


Abbildung 2.3: Anwendungsbereiche des TLS im Vergleich mit anderen Verfahren [Kern, 2007]

Als Schwäche des Systems kann man die ziemlich lange Postprocessing-Zeit erwähnen, die trotz einer (teil-)automatischen Auswertung wegen der enormen Datenmenge schwer zu reduzieren ist. Dazu kommen auch die hohen Anschaffungskosten von Hard- und Software für den Scanner.

2.2 Unterscheidung nach Streckenmessmethode

Bei terrestrischen Laserscannern kommen prinzipiell drei verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Strecke zum Einsatz: das Triangulationsverfahren, das Phasenvergleichsverfahren und das Impulslaufzeitverfahren, wobei das Erste aufgrund des eingeschränkten Entfernungsbereiches für diese Arbeit keine Rolle spielt und daher nicht weiter behandelt werden soll.

2.2.1 Phasenvergleichsverfahren

Diese Art der Streckenmessung ist Geodäten bestens bekannt, denn sie wird standardmäßig bei elektronischen Tachymetern verwendet. Das Phasenvergleichsverfahren beruht auf der Amplitudenmodulation einer kontinuierlich ausgestrahlten Trägerwelle durch ein sinusförmiges Signal unterschiedlicher Frequenz (Messwelle).

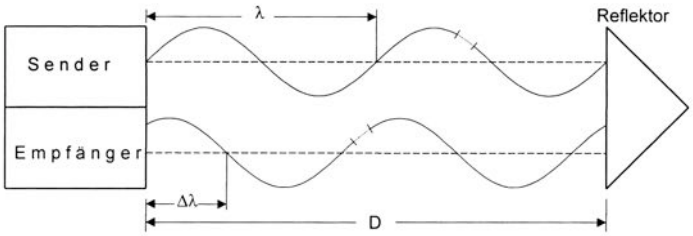


Abbildung 2.4: Messprinzip des Phasenvergleichsverfahrens[Joeckel und Stober, 1999]

Eine vorgegebene Modulationsfrequenz f legt nach der einfachen Beziehung (Gl. 2.1) die Wellenläge λ fest.

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2.1}$$

mit λ : Wellenlänge des Signals
c : Lichtgeschwindigkeit
f : Modulationsfrequenz

Der vom Sender ausgesandte Lichtstrahl wird von einem Objekt reflektiert und trifft mit einer Phasenverschiebung $\Delta\lambda$ gegenüber der ausgesandten Welle wieder im Empfänger ein (Abb. 2.4). Dabei setzt sich die durchlaufene Strecke $2D$ aus einem ganzzahligen Vielfachen N der Sinusschwingung der modulierten Welle und dem Wellenreststück $\Delta\lambda$ zusammen (Gl. 2.2).

$$2D = N \cdot \lambda + \Delta\lambda \tag{2.2}$$

Dieses Reststück $\Delta\lambda$ kann aus der Messung der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ zwischen ausgesandter und empfangener Welle berechnet werden (Abb. 2.5).

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \lambda \tag{2.3}$$

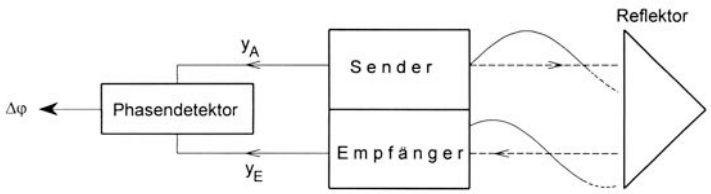


Abbildung 2.5: Phasenvergleich [Joeckel und Stober, 1999]

Aus den Gl. 2.2 und 2.3 folgt:

$$D = \frac{\lambda}{2}\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) \tag{2.4}$$

Das Problem liegt aber in der Zählung der ganzen Wellendurchgänge. Dieses sogenannte Mehrdeutigkeitsproblem wird durch die Überlagerung der Trägerwelle mit mehreren Modulationswellen unterschiedlicher Schwingungslängen behoben. Bei Laserscannern wird oft mit zwei bzw. drei Modulationswellenlängen gearbeitet.

Das Phasenvergleichsverfahren ist extrem schnell und liefert sehr genaue Ergebnisse. Das Messrauschen liegt bei ca. 3mm für eine Entfernung von 25m. Die Reichweite wird allerdings durch den Eindeutigkeitsbereich der längsten Modulationswelle auf maximal 80m begrenzt.

2.2.2 Impulslaufzeitverfahren

Beim Impulslaufzeitverfahren wird die Laufzeit eines Lichtimpulses mittels eines Oszillators über die doppelt durchlaufene Strecke gemessen. Der Lichtimpuls wird vom Sender des Gerätes ausgesandt, vom Objekt reflektiert und vom Empfänger des Gerätes wieder aufgenommen (Abb. 2.6). Aus der bekannten Lichtgeschwindigkeit c und der gemessenen Laufzeit t lässt sich die gesuchte Entfernung D folgendermaßen berechnen:

$$D = \frac{c \cdot t}{2} \tag{2.5}$$

Ein Vorteil dieses Verfahren ist, dass es die gleichzeitige Ermittlung von zwei verschiedenen Entfernungen ermöglicht. Werden die Laufzeiten der ansteigenden Flanke des Impulses (first pulse) und der absteigenden Flanke des Impulses (last pulse) bestimmt, können die Entfernungen zu einem Ziel im Vordergrund (first pulse) und zu einem Ziel im Hintergrund (last pulse) ermittelt werden [Kern, 2003].

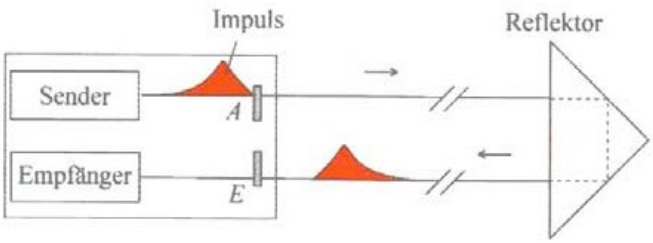
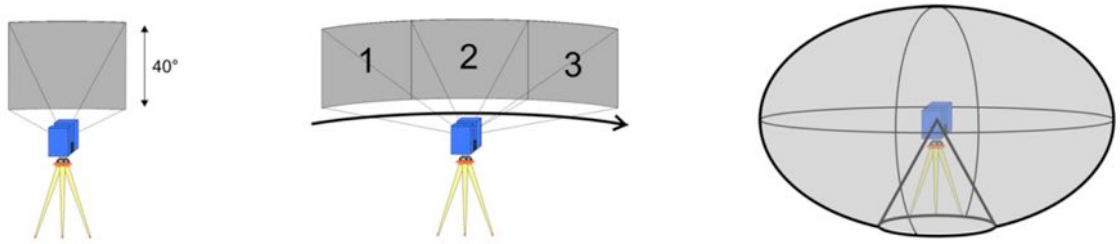


Abbildung 2.6: Prinzip des Impulslaufzeitverfahrens [Deumlich und Staiger, 2002]

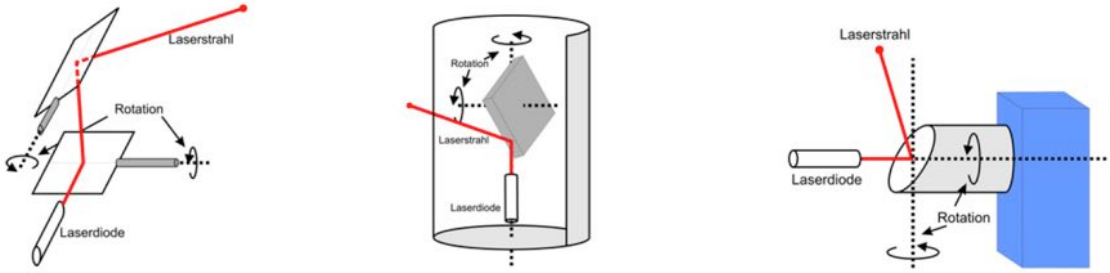
2.3 Unterscheidung der TLS nach Sichtfeld und Strahlablenkung

Da das terrestrische Laserscanning ein polares Aufnahmeverfahren ist, wird nicht nur die Raumstrecke bestimmt, sondern auch die Richtungs- und Zenitwinkel, um daraus dreidimensionale kartesische Koordinaten abzuleiten. Die verschiedenen Modelle der Laserscanner unterscheiden sich also auch nach ihrem Sichtfeld und der entsprechenden Art der Strahlablenkung.



(a) Kamerascanner (b) Hybridscanner (c) Panoramascanner

Abbildung 2.7: Unterscheidung nach Sichtfeld [Hesse, 2007]



(a) Oszillierende Spiegel (b) Rotierender/Oszillierender Polygonspiegel (c) Rotierender, angeschrägter Spiegel

Abbildung 2.8: Arten der Strahlablenkung [Hesse, 2007]

2.3.1 Kamerascanner

Kamerascanner (Camera-View-Scanner) besitzen i.A. ein sehr eingeschränktes Sichtfeld von weniger als 50° für beide Raumwinkel (Abb. 2.7a). Eine Drehung des Scankopfes um seine Stehachse ist standardmäßig nicht möglich. Die Strahlablenkung erfolgt über zwei oszillierende Spiegel (Abb. 2.8a), deren Arbeitsbereich das Sichtfeld des Scanners bestimmt. Deswegen werden diese Scannertypen hauptsächlich bei der Aufnahme einzelner Objekte mit begrenzter räumlicher Ausdehnung verwendet.

2.3.2 Hybridscanner

Hybridscanner stellen eine Weiterentwicklung der Kamerascanner dar, indem das Sichtfeld nur in der vertikalen Ausdehnung begrenzt ist, während der horizontale Arbeitsbereich bei 360° liegt (Abb. 2.7b). Dafür wird den Scankopf während der Aufnahme in festen Schrittweiten um seine Stehachse gedreht. Die vertikale Strahlablenkung in Richtung des Zenitwinkels erfolgt über

einen oszillierenden Spiegel oder ein rotierendes bzw. oszillierendes Spiegelpolygon (Abb. 2.8b) [Eling, 2009]. Kombiniert mit dem Impulslaufzeitverfahren für die Bestimmung der Raumstrecke, sind Hybridscanner für die Erfassung und Überwachung von räumlich ausgedehnten Bauwerken oder schlecht zugänglichen Objekten wie Rutschungshänge oder Gletscher besonders geeignet. Der im Rahmen der Diplomarbeit verwendete Scanner GX 3D von Trimble kann als Hybridscanner zugeordnet werden. Das Instrument wird in dem Kap. 3.4 genauer beschrieben.

2.3.3 Panoramascanner

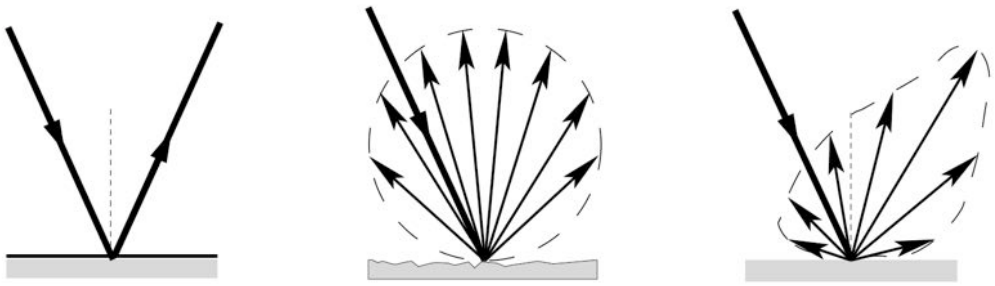
Wie bei Hybridscannern vollziehen Panoramascanner (Abb. 2.7c) eine vollständige horizontale Drehung des Gerätes in festen Schrittweiten um seine Stehachse. Sie besitzen jedoch ein vertikal maximal ausgedehntes Sichtfeld, das nur rund um den Standpunkt durch den Scanner selbst begrenzt ist. Für die HDS- und Photon-Baureihen (Leica bzw. Faro) erfolgt die Strahlablenkung in Richtung der Stehachse über einen rotierenden, angeschrägten Spiegel (Abb. 2.8c). Bei lotrechter Aufstellung des Scanners wird somit die Umgebung durch Einzelmessungen in vertikalen 360°-Profilen abgetastet, so dass eine 180°-Drehung um die Stehachse für eine komplette Abdeckung ausreicht [Eling, 2009]. Das Phasenvergleichsverfahren wird in der Regel für die Distanzmessung verwendet. Aufgrund der hohen Messfrequenz bei eingeschränkter Reichweite lassen sich Panoramascanner sehr komfortabel zur gesamten Aufnahme von Innenräumen und Höhlen einsetzen. Auch der Scanner Leica HDS6000 (s. Kap. 3.3), mit dem u.a. für diese Diplomarbeit Messungen durchgeführt worden sind, gehört zur Gruppe der Panoramascanner.

2.4 Berührungslose Distanzmessung

Die Streckenmessung beim Laserscanning erfolgt, ohne den Einsatz spezieller Reflektoren, direkt auf natürliche Oberflächen. Aufgrund der starken Bündelung des Laserstrahls wird fast immer genügend Licht reflektiert. Trotzdem kann die reflektorlose Entfernungsmessung aufgrund der Reflexionseigenschaften, der Geometrie und des Materials des Ziels sowie der Atmosphärenbedingungen fehlgeschlagen, verfälscht oder systematisch beeinflusst werden.

2.4.1 Reflexion

Grundsätzlich wird zwischen regulärer Reflexion (wie bei einem Spiegel), diffuser Reflexion und diffuser Reflexion mit Spiegelung in eine Hauptrichtung unterschieden (Abb. 2.9). Die Art der Reflexion hängt stark von der Oberflächenrauhigkeit des Objektes ab. Ist die Oberfläche im Vergleich zur Wellenlänge λ des Lichts eben, ist diese Oberfläche spiegelnd. In diesem Fall gilt das Reflexionsgesetz, bei dem der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel gleicht. Sind jedoch die Unebenheiten auf einer Oberfläche gegenüber λ groß, wird das Lichtbündel in allen möglichen Richtungen zurückgeworfen, was eine diffuse Reflexion bewirkt. Sie ist bei den meisten Oberflächen, die bei einer Bauaufnahme auftreten, anzunehmen. Ausnahme bilden Glas- und Metallflächen oder auch andere polierte Oberflächen wie Kunststoff- oder Lackoberflächen, die überwiegend spiegelnd reflektieren und dazu führen können, dass annähernd 0% der ausgesandten Laserstrahlenergie wieder beim Scanner zurückkommt.



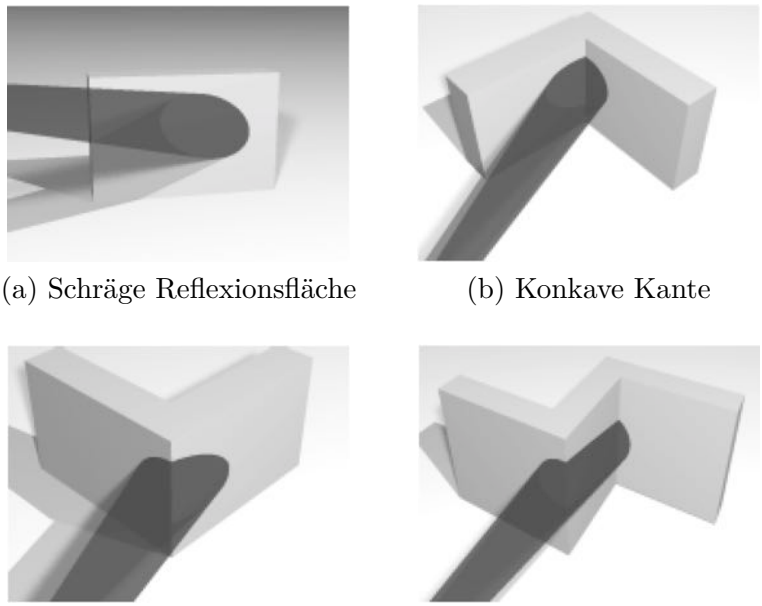
(a) Spiegelnde Reflexion (b) Diffuse Reflexion (c) Diffuse Reflexion mit Spiegelung

Abbildung 2.9: Reflexionsarten [Kern, 2003]

Falls die zurückgeworfene Energie nicht ausreichend ist, werden die entsprechenden Punkte nicht gemessen. Die Art der Reflexion hat aber in sich keinen Einfluss auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Streckenmessung.

2.4.2 Einfluss der Oberflächengeometrie

Aufgrund der Strahldivergenz trifft der Lichtstrahl flächenhaft auf das Objekt (footprint). Die Spotgröße weitet sich mit zunehmender Distanz immer mehr auf, was beim Leica HDS6000 zu einem Leuchtfleck von 8mm Durchmesser auf 25m Entfernung führt (3mm auf 50m beim Trimble GX).



(a) Schräge Reflexionsfläche (b) Konkave Kante

(c) Konvexe Kante (d) „Stufe" bzw. „Streiflicht"

Abbildung 2.10: Wirkung der Strahldivergenz bei unterschiedlichen Oberflächengeometrien [Kern, 2003]

Bei der Bauaufnahme treten vier typische Fälle auf. Die erste Situation ist die Einmessung einer einfachen ebenen Reflexionsfläche unter verschiedenen Einfallswinkeln des Laserstrahls (Abb. 2.10a). Zwei weitere Fälle stellen die konkaven und konvexen Kanten dar (Abb. 2.10b,c). Schließlich ist es auch interessant, Objekte, die eine tiefengestaffelte Geometrie oder spitze Winkel

aufweisen zu berücksichtigen (Abb. 2.10d). Davon wird hauptsächlich die Streckenbestimmung beeinträchtigt. So ist eine Distanzmessung auf eine konvexe Kante/Ecke immer zu kurz gemessen und umgekehrt bei einer konkaven Kante. Bei einer stufenartigen Objektgeometrie, trifft der Footprint sowohl den Vordergrund als auch den Hintergrund. Je nach Auswerteverfahren können daraus unterschiedliche Werte ermittelt werden. Daraus folgen grob falsche Ergebnisse.

2.4.3 Einfluss des Oberflächenmaterials

Nicht nur die Oberflächenrauhigkeit sondern auch die Materialfarbe und die Materialeigenschaften selbst beeinflussen die Messungen. Die Farbe eines Objektes entspricht dem Absorptionsspektrum des Objektmaterials. Sie ist davon abhängig, welche Wellenlängen stärker oder weniger stark absorbiert werden. Die Anteile des Spektrums, die reflektiert werden, bestimmen, welcher Farbeindruck wahrgenommen wird. Wird ein rotes Objekt mit einem roten Laser angestrahlt, wird sehr wenig rotes Licht absorbiert und die so genannte Reflektanz (auch Remission) für das Laserlicht ist besonders hoch.

Die Reflektanz beschreibt eigentlich das Reflexionsvermögen eines Materials unabhängig von den Umgebungsbedingungen. Die menschliche Wahrnehmung kann nur eingeschränkt die spektrale Remission einer Oberfläche für den eingesetzten Laser-Entfernungsmesser beurteilen. So sind hell erscheinende Flächen nicht unbedingt gute, und dunkel aussehende Flächen nicht zwangsläufig schlechte Reflektoren für z.B. rotes Licht. Der Einfluss der Farbe bzw. der Reflektanz auf die Messgenauigkeit liegt praktisch unterhalb der Messgenauigkeit, was der Vergleich zwischen Objektgeometrie und Reflektanzmessung einer Laserscanneraufnahme gezeigt hat [Kern, 2003].

Entfernung [m]	d [mm]	U_c [mm]	σ [mm]
5	0,9	0,6	0,6
10	0,4	0,6	0,7
15	10,1	2,7	0,9
20	7,5	3,0	1,4
25	4,7	1,9	1,2

Tabelle 2.1: Streckenkorrektion d, Messunsicherheit U_c und geometrisches Messrauschen σ für Beton in Abhängigkeit von der Entfernung [Wakaluk, 2009]

Beim „Haus der Astronomie" handelt es sich um einen Rohbau, der in dem gescannten Hörsaal nur aus Beton besteht. Abweichungen aufgrund einer Änderung des Materials oder der Farbe sind also nicht zu erwarten und nur die Eigenschaften des grauen Betons bezüglich des Laserscannings wird eine Rolle spielen. Mit dem Scanner Leica HDS6000 durchgeführte Tests [Wakaluk, 2009] zeigten für Beton starke Variationen bei der Berechnung der Streckenkorrektion d (Soll-Ist) in Abhängigkeit vom Abstand. So wurden Werten von 0,4mm bis 10,1mm auf 10m bzw. 15m Entfernung ermittelt. Auch die Messunsicherheit[1] U_c ist bei 15m und 20m sehr hoch. Problematisch ist aber, dass die Wiederholung der Messungen zu durchaus unterschiedlichen Ergebnissen führte. Eine Erklärung dafür könnte die Struktur des Materials sein: es wurde nämlich

[1] Messunsicherheit, Definition nach VIM (engl. für *Internationales Wörterbuch der Metrologie*): dem Messerbegnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte. Eine international anerkannte einheitliche Vorgehensweise zur Messunsicherheitsermittlung liefert der GUM-Leitfaden (Abkürzung für *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*).

bewiesen, dass Höhendifferenzen von einem Viertel der Wellenlänge des Lasersignals innerhalb des Laser-Spots beim Phasenvergleichsverfahren zu Problemen in der Entfernungsmessung führen [Thiel und Wehr, 2004]. Das geometrische Messrauschen[2] σ wurde von [Wakaluk, 2009] auch untersucht: es steigt mit zunehmendem Abstand und erreicht 1,4mm auf 20m.

Alle die für Beton von [Wakaluk, 2009] erhaltene Ergebnisse für die Streckenkorrektion d, die Messunsicherheit U_c und das geometrische Messrauschen σ sind in der Tabelle 2.1 zusammengefasst. Die am „Haus der Astronomie" mit dem HDS6000 durchgeführten Laserscanaufnahmen befinden sich in einem Entfernungsbereich von ca. 1 bis 14m. Ausreißer in den Punktwolken sind also nicht auszuschließen.

Außerdem spielt die Feuchtigkeit des Oberflächenmaterials eine entscheidende Rolle. Es wurde von [Wakaluk, 2009] veranschaulicht, dass sie für Betonoberflächen sowohl das geometrische Messrauchen als auch die Intensitätswerte beeinträchtigt. Im Vergleich zum trockenen Zustand wies die befeuchtete Probe höhere Werte für σ und deutlich niedrigere Ergebnisse für die zurückkehrende Intensität des Laserstrahls auf. Der Einfluss der Feuchtigkeit einer Betonwand wurde auch für den Scanner Trimble GX analysiert [Voegtle et al., 2008]. Im Gegensatz zum Gerät der Firma Leica tauchten aber keine relevanten Unterschiede der mittleren Intensitätswerte zwischen trockener und feuchter Oberfläche auf. Für beide Instrumente wurde eine Unabhängigkeit der Streckenkorrektion d gegenüber der Feuchtigkeit ermittelt.

2.4.4 Einfluss der Atmosphäre

Die lasergestützte Streckenmessung findet nicht im Vakuum statt, aber wird - wie bei allen Distanzmessungen - von der Atmosphäre beeinflusst. Temperatur, Luftdruck und Feuchte beeinträchtigen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserlichts c, die unter realen Bedingungen von der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit c_0 abweicht. Der so genannte Refraktionskoeffizient N setzt sich aus dem Verhältnis zwischen beiden Ausbreitungsgeschwindigkeiten (Gl. 2.6) und ist von der benutzten Wellenlänge λ abhängig.

$$N = \frac{c_0}{c} \tag{2.6}$$

Diese atmosphärischen Einflüsse können nur teilweise korrigiert oder ausgeschlossen werden. Entscheidend ist hierbei die Entfernung zum Objekt, da der Messfehler mit der Distanz zunimmt. Die Abb. 2.11 stellt die Korrektur in der Einheit ppm (parts per million) dar, die für zwei verschiedene Wellenlängen in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Luftdruck anzubringen ist. Im Rahmen der Diplomarbeit wurden die Messungen bei einer Temperatur von etwa 0°C durchgeführt. Es ist also mit Korrekturen von -10ppm bis -30ppm zu rechnen, was bei einer maximalen Entfernung von ungefähr 14m Messabweichungen von bis zu 0,4mm verursacht. Da dieser Fehlereinfluss im Sub-Millimeter-Bereich liegt, kann er bei Laserscannermessungen, die eine Streckenmessgenauigkeit von wenigen Millimetern haben, vernachlässigt werden.

[2] Geometrische Messrauschen: Maß der orthogonalen Abweichungen aller durch den Laserscanner registrierten Messwerte, zur idealen (ausgeglichenen) Ebene [Wakaluk, 2009]. Weitere Informationen im Kapitel 5.1.

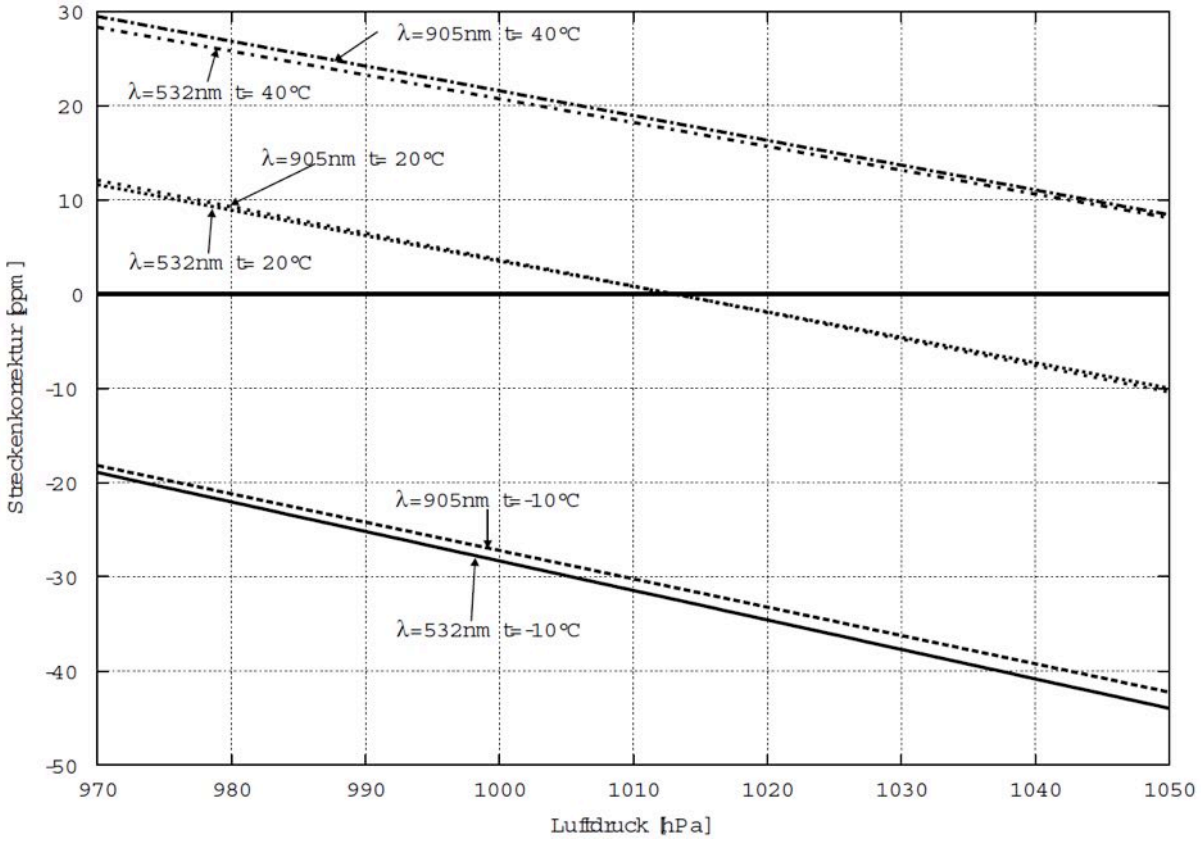


Abbildung 2.11: Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks auf die Streckenmessung mit einem grünen (λ=532nm) und einem roten (λ=905nm) Laser [Kern, 2003]

KAPITEL 3

DATENERFASSUNG

3.1 Beschreibung des Aufnahmeobjektes

Die Erkundung des Objektes vor Ort ermöglicht eine sinnvolle Wahl der Messmethode (Tachymetrie, Photogrammetrie, Laserscanning usw.) und eine sinnvolle Planung der Messungen. Die Architekten hatten im „Haus der Astronomie" Interesse an Aufnahmen des Hörsaals während der Bauphase, vor der Anbringung der Verkleidung in der Kuppel, um eventuelle Abweichungen zum CAD-Modell rechtzeitig kompensieren zu können. Es handelte sich also um die Erfassung einer Betonstruktur ohne relevante Details. Deswegen wären sowohl die Tachymetrie als auch die Photogrammetrie für diese Aufgabe ungeeignet gewesen. Im Gegensatz dazu stellte das Laserscanning die passende Lösung dar, um eine schnelle und flächendeckende Aufnahme zu gewährleisten.

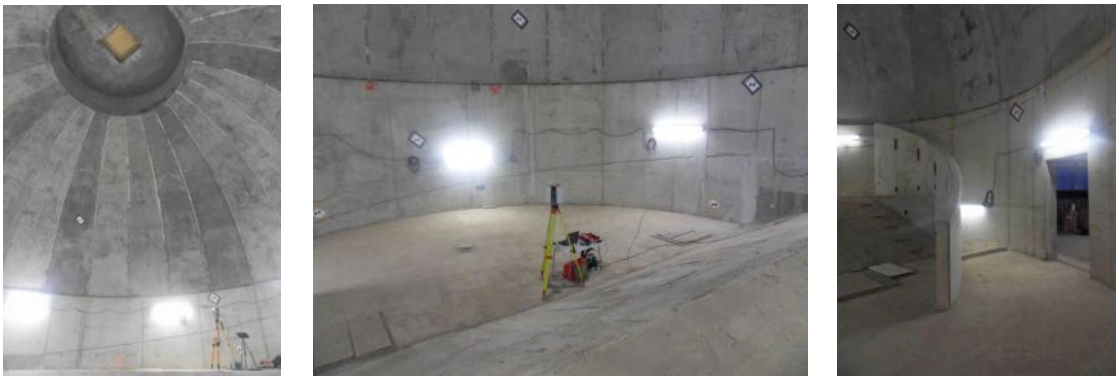
Abbildung 3.1: „Haus der Astronomie": CAD-Modelle der drei Stockwerksebenen [@Bernhardt+Partner, 2011]

Das „Haus der Astronomie" weist die komplexe Form einer Doppelspirale auf, die sich um den Hörsaal aufwickelt. Das gesamte Gebäude ist ca. 39m x 41m groß und 18m hoch, wobei der Hörsaal einen Durchmesser von 14,4m mit einer maximalen Höhe von 11,7m hat. Die Architekten beschreiben das Projekt folgendermaßen: „Bei dem auf den ersten Blick punktsymmetrischen Gebäude sind sowohl die Geschossebenen als auch die Fassade um das Zentrum gedreht. Dadurch wird die Galaxie nicht als zweidimensionales Bild umgesetzt, sondern als räumliches Gebilde von Umlaufbahnen. Die gewundenen Spiralarme mit den Nutzebenen sind um ein halbes Geschoss versetzt und unterstützen zusätzlich die Gebäuderotation um den Kern. Querbezüge zwischen

den Räumen der beiden Spiralarme lassen den Besuchern und Nutzern die außergewöhnliche Gebäudeform frei erleben. Zentrum des Hauses der Astronomie bildet ein multifunktionaler Hörsaal, der mit modernster multimedialer Technik ausgestattet ist. Hier können neben klassischer Vortragsnutzung auch Bilder und 3D-Visualisierungen astronomischer Beobachtungen eindrucksvoll gezeigt werden." [@Bernhardt+Partner, 2011]

Der Hörsaal am „Haus der Astronomie" weist eine relativ einfache Geometrie auf. Die Wände des unteren Bereiches bilden einen Zylinder, dessen Mittelpunkt auch der Mittelpunkt des ganzen Gebäudes sowie der Ursprung des lokalen Koordinatennetzes ist. Der Raum ist in zwei Niveaus unterteilt, die während der Bauphase bzw. der Datenerfassung zunächst durch eine Rampe verbunden sind, die dann die etwa hundert Sitze aufnehmen wird (Abb. 3.2b). Im Endzustand der Inneneinrichtung soll das Podest nicht mehr durch eine einfache Schräge sondern durch auf beide Seiten des Hörsaals angebrachte Treppen zugänglich sein. In dem Raum ist auch eine Brüstung für die nach unten führende Treppe zu finden (Abb. 3.2c). Diese Brüstung war sowohl für die Architekten als auch für die Baufirma von besonderer Bedeutung. Aufgrund ihrer Höhe und ihrer Geometrie war es aber vorhersehbar, dass ihre Erfassung durch Laserscanaufnahmen eher schlechte Ergebnisse liefern würde. Deswegen musste mindestens bei der Aufnahme mit dem Leica HDS6000 ein höherer Standpunkt geplant werden (mehr dazu im Kap. 3.3).

Im oberen Bereich befindet sich die aus 24 Fertigteilen bestehende Kuppel, die eine Halbkugel bildet, deren Radius dem des Zylinders entspricht. Ganz oben ist sie für einen Aufsatz für die Decke geöffnet (Abb. 3.2a). Das Risiko bei der Verwendung von Fertigteilen liegt in einer möglichen aufwändigen und teuren Nachbearbeitung vor Ort. Dieser Fall trat bei dem Bau der Kuppel auf. Es waren also Abweichungen zwischen dem CAD-Modell und den Ergebnissen der Laserscanaufnahmen zu erwarten. Deshalb stellte die Kuppel das interessanteste Element für die Diplomarbeit dar.



(a) Kuppel (b) Unterer Bereich, im Vordergrund Podest und Schräge (c) Brüstung

Abbildung 3.2: Der Hörsaal

3.2 Vorbereitungen auf der Baustelle

Die reibungslose Durchführung der Laserscanaufnahmen hängt von einer soliden Planungsgrundlage für das gesamte Projekt ab. Deswegen sollten im Vorfeld, sowohl vor Ort als auch im Büro bzw. am Institut, einige Vorbereitungsarbeiten erfolgen.

3.2.1 Verdichtung des lokalen Netzes

Da die mit den Scannern aufgenommenen Punktwolken am Ende gegenüber gestellt aber auch mit dem Modell der Architekten verglichen werden sollen, müssen alle Daten in dem selben Koordinatensystem zur Verfügung stehen, was durch eine Georeferenzierung der Punktwolken mittels Passpunkten im übergeordneten Koordinatensystem erreicht werden kann. Die Koordinaten der Festpunkte am „Haus der Astronomie" liegen in einem lokalen Netz vor, welches das betreuende Vermessungsbüro, Gebauer und Manser, für zuvor durchgeführte Vermessungsarbeiten angelegt hatte. Es besteht aus Nägeln, Höhenbolzen und an den benachbarten Gebäuden sowie im Bauwerk angebrachten Klebemarken (inzwischen etwa 70 Hilfspunkte innen und 150 außen).

Im Hörsaal waren aber nur zwei Festpunkte (1006 und 4711) vorhanden, von denen jedoch einer schon vor Monaten befestigt worden war und dessen Position deswegen nicht mehr als zuverlässig betrachtet werden konnte. Um bei den zukünftigen Stationierungen eine Genauigkeit von wenigen Millimetern gewährleisten zu können, war also eine Verdichtung des Netzes in diesem Bereich notwendig. In diesem Zusammenhang wurden im Hörsaal vier weitere Hilfspunkte mittels Nägeln vermarkt und mindestens doppelt gemessen. Die Höhen der Punkte 1006, 1008 und 4711, die im unteren Bereich (nicht auf dem Podest) liegen, wurden auch zur Kontrolle durch Nivellement bestimmt. Die Ergebnisse passten im Millimeter-Bereich zu denen, die durch tachymetrische Aufnahme erhalten worden waren.

Abbildung 3.3: Tachymeter Trimble S6 und Ausrüstung

Alle die mit einem Tachymeter durchgeführten Messungen erfolgten mit einem Trimble S6 (Abb. 3.3), dessen wesentliche Leistungsspezifikationen in der folgenden Tab. 3.1 zusammengefasst sind.

Messmodus	Prismenmodus	Reflektorlos
Genauigkeit der Richtungsmessung	2" (0,6mgon)	
Genauigkeit der Distanzmessung	2mm + 2ppm	
Messzeit	1,2s	1 bis 5s
Reichweite	0,2 bis 2500m	1 bis 1000m

Tabelle 3.1: Wichtigste Leistungsspezifikationen des Trimble S6 [@TrimbleS6, 2011]

Zur Tachymeterausrüstung gehören auch ein Instrumentenstativ, ein auf einem höhenverstellbaren Reflektorstab fixiertes Zeiss-Rundprisma und ein Fluchstabstativ zum genauen Aufbau des Reflektors über dem Anschlusspunkt bei der Stationierung.

3.2.2 Anbringung der Zielmarken

Um die Punktwolken in das übergeordnete Koordinatensystem transformieren zu können, müssen mindestens drei Punkte pro Standpunkt mit 3D-Koordinaten vorhanden sein. Diese können entweder bekannte Festpunkte oder Passpunkte sein. Beim Scanner Trimble GX werden die Zielmarken über Festpunkten aufgebaut, so dass die Punktwolken direkt vor Ort georeferenziert

werden. Im Gegensatz dazu erfolgt die Georeferenzierung mit dem Leica HDS6000 im Nachhinein über Passpunkte, die z.B. mittels sogenannter „Black&White”-Targets. Sie existieren entweder auf einer Tilt&Turn Vorrichtung (Abb. 3.4a) oder als PDF-Datei zum Ausdruck (Abb. 3.4b).

(a) Leica-Target auf einer „Tilt&Turn”-Vorrichtung

(b) Target als Ausdruck

Abbildung 3.4: „Black&White”-Target der Firma Leica

Da das tachymetrische Aufmaß der Zielmarken und die Laserscanaufnahmen nicht am selben Tag stattfinden konnten, bestand das Risiko für die Targets auf einer „Tilt&Turn”-Vorrichtung, in der Zwischenzeit verschoben zu werden. Dies hätte die ganze Georeferenzierung beeinträchtigt und jeden Vergleich verhindert. Deshalb wurden die in DIN-A4-Format ausgedruckten Marken gewählt, die sowohl im unteren Bereich als auch in die Kuppel geklebt worden sind. Aufgrund der Geometrie des Hörsaals haben sie auch eine bessere dreidimensionale Verteilung der Targets im Raum ermöglicht. Um eine Verformung des Blattes zu vermeiden, wurde Papier mit einer Stärke von 300g/m² (gegenüber 80g/m² für das übliche Papier) verwendet, das mit doppelseitigem Klebeband an der Betonwand befestigt wurde. Trotz dieser Maßnahmen haben sich die Zielmarken zwischen den Zeitpunkten der Anbringung und der Messungen (2 Tage bis zum Laserscanning und 8 Tage bis zum tachymetrischen Aufmaß) wegen der umgebenden Feuchtigkeit leicht deformiert, was die Genauigkeit der Ergebnisse wahrscheinlich etwas verschlechtert hat.

Bevor die Zielmarken in dem Hörsaal überhaupt angebracht wurden, wurde ihre Reflektanz am Institut bei verschiedenen Entfernungen getestet. In diesem Zusammenhang wurde festgestellt, dass bei einem Punktabstand von 1,3cm auf 10m (Medium Scandichte Leica) und einer Messdistanz von etwa 12m, was ungefähr der Höhe der Kuppel entspricht, die Targets z.T. schwer zu erkennen waren und nur dank der umliegenden Objekte gefunden werden konnten. Zur Georeferenzierung müssen die Passpunkte aber während des Scanvorgangs fein aufgenommen werden (mehr dazu in Kap. 3.3). Da es sich beim „Haus der Astronomie” um Beton ohne besondere Strukturen handelt, hätte es problematisch sein können, die Zielmarke in der Punktwolke zu identifizieren. Zur Erhöhung des Kontrastes wurden daher noch schwarzen Rahmen gebastelt, die um die Targets angebracht wurden.

Die Zielmarken wurden auch zur Verknüpfung der einzelnen Scans untereinander (Registrierung) verwendet. Insgesamt wurden zwölf ausgedruckte „Black&White”-Targets angebracht (Abb. 3.5). Dazu sind am Tag der Laserscanaufnahme zur Registrierung der dritten Punktwolke noch eine Zielmarke auf einer „Tilt&Turn”-Vorrichtung und zusätzlich zwei Kugeln aufgebaut worden. Sowohl für die Georeferenzierung als auch für die Registrierung sind eigentlich nur drei räumlich gut verteilte Passpunkte notwendig, um die Koordinaten transformieren zu können, was aber dem geodätischen Prinzip widersprechen würde. Zur Detektierbarkeit von Fehlern und zur Stei-

gerung der Genauigkeit werden aber in der Praxis immer mehr Zielmarken bzw. Kugeln genutzt, wenn die Geometrie des zu erfassenden Objektes es erlaubt. Sollte eine Messung scheitern, bliebe eine erfolgreiche Verknüpfung trotzdem möglich. Außerdem liefert diese Überbestimmung nach der Ausgleichung Restklaffungen, die ein Maß für die Qualität der Zusammenführung darstellt.

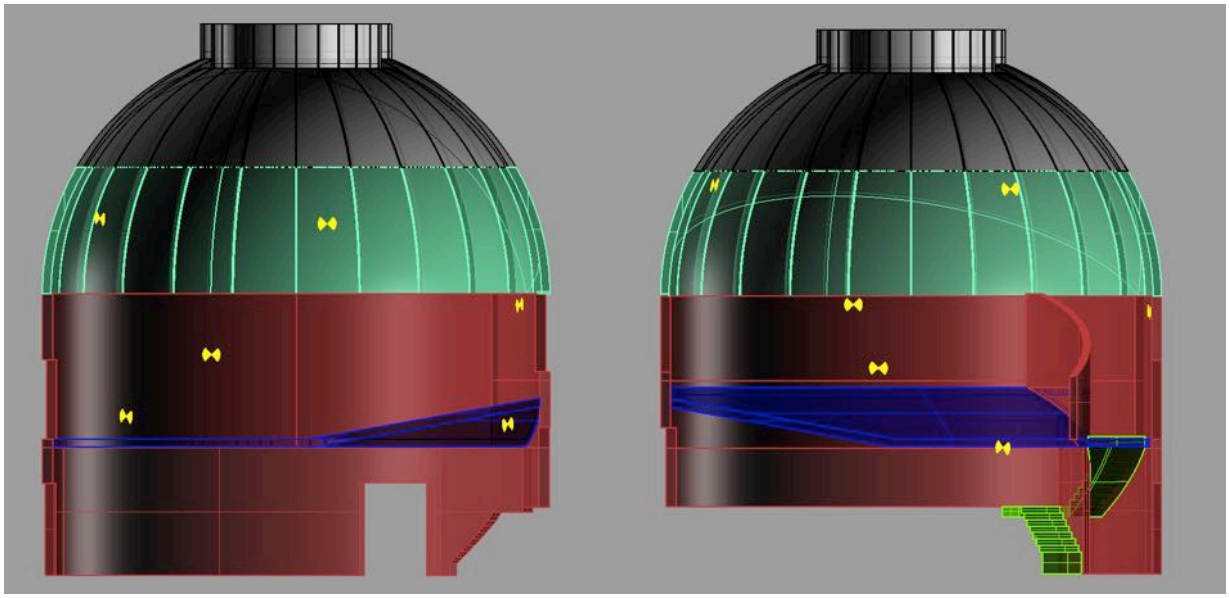


Abbildung 3.5: Verteilung der angebrachten „Black&White"-Targets (Leica)

3.2.3 Tachymetrisches Aufmaß der Zielmarken

Nachdem die Zielmarken angebracht wurden, mussten sie eingemessen werden, um Koordinaten im lokalen System zu bekommen. Dafür wurde mit dem Tachymeter im Hörsaal frei stationiert und die Targets reflektorlos aufgemessen. Bei dem Prinzip der „Freien Stationierung" werden von einem der örtlichen Situation entsprechend frei wählbaren Instrumentenstandpunkt aus, die Richtungen und Strecken zu mindestens drei bekannten und sichtbaren Anschlusspunkten gemessen. So werden die Standpunktkoordinaten in dem lokalen Koordinatensystem ermittelt. Zur Steigerung der Genauigkeit und der Redundanz werden in der Regel vier oder mehr Festpunkte verwendet. Durch diese Überbestimmung entstehen kleine, zufällige Abweichungen in den Koordinaten (Restklaffungen), die zur Kontrolle der Genauigkeit der Stationierung dienen. Beim „Haus der Astronomie" wurden mindestens fünf koordinatenmäßig bekannte Punkte pro Standpunkt verwendet und Standardabweichungen unter ±2mm für die Gesamtheit der Anschlusspunkte erreicht.

Aufgrund der Räumlichkeit und der Verteilung der Zielmarken sind vier Standpunkte erforderlich gewesen, um die in der Kuppel angebrachten Targets mindestens zweimal messen zu können. Die berechneten Koordinaten sind dann gemittelt worden. Während die Höhen Abweichungen bis maximal 3mm aufweisen, sind die Ergebnisse bei den Rechts- und Hochwerten nicht so zufriedenstellend, da es bis 6mm Unterschied in der einen Richtung und 5mm in der anderen gibt. Es ist aber nicht zu erkennen, dass die eine Station schlechter wäre als die Anderen. Es hängt vermutlich davon ab, dass die durch die Feuchtigkeit verformten Zielmarken reflektorlos gemessen wurden und dass die in Kap. 2.4 beschriebenen Fehlereinflüsse die Ergebnisse verfälschen.

Für jedes Target ist die Standardabweichung jeweils in x-, y- und z-Richtung anhand der Gl. 3.1 ermittelt worden. Die Zielmarken 301, 303 und 304 konnten nur zweimal aufgenommen werden und sind auch bei der Berechung separat betrachtet worden.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})}{n-1}} \tag{3.1}$$

mit $\bar{x}$ den Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{3.2}$$

Daraus folgt die Einzelpunktgenauigkeit:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \tag{3.3}$$

Die Ergebnisse der Berechnung der Standardabweichungen sind in den Tab. 3.2 (a) und (b) zusammengefasst. Die Punkte, die viermal gemessen wurden, weisen Abweichungen auf, die etwas größer sind als bei den Zielmarken 301, 303 und 304. Trotzdem, bei mittleren Punktgenauigkeiten von ±2 bis ±3mm, können die Koordinaten als gut genug betrachtet werden, um für den weiteren Verlauf der Diplomarbeit verwendet zu werden.

Pkt.-Nr.	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_z [mm]	σ_p [mm]
101	±2	±1	±1	**±3**
102	±3	±2	±1	**±3**
103	±3	±2	±1	**±4**
201	±3	±2	±1	**±3**
202	±2	±1	±2	**±3**
203	±2	±2	±2	**±4**
204	±3	±2	±1	**±4**
302	±2	±1	±1	**±2**
Mittelwert $\bar{\sigma}$	**±3**	**±2**	**±1**	**±3**

(a) Punktgenauigkeiten [mm] (Punkte viermal gemessen)

Pkt.-Nr.	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_z [mm]	σ_p [mm]
301	±1	±2	±0	**±3**
303	±0	±1	±1	**±2**
304	±1	±1	±0	**±2**
Mittelwert $\bar{\sigma}$	**±1**	**±2**	**±0**	**±2**

(b) Punktgenauigkeiten [mm] (Punkte zweimal gemessen)

Tabelle 3.2: Standardabweichungen [mm] bei der Ermittlung der Koordinaten der Zielmarken

Mittels freier Stationierung wurden eigentlich nur elf der zwölf geklebten Zielmarken aufgenommen. Die Koordinaten des letzten Targets, die am Treppenabsatz angebracht worden war, konnten nur durch Zwangszentrierung ermittelt werden. Das Prinzip basierte darauf sowohl den Tachymeter als auch den Reflektor mit einem Messuntersatz auf einem Stativ aufzubauen, um beide in einem zweiten Schritt austauschen zu können, ohne die Standpunkte zu ändern. Die

Messung erfolgte folgendermaßen: zunächst wurde ein Stativ (S3) unten an der Treppe aufgebaut und darauf ein Zeiss-Prisma befestigt. Dann wurde oben neben der Tür ein anderes Stativ (S1) aufgestellt, das als Instrumentenstandpunkt diente. Nach einer „Freien Stationierung" wurde der Spiegel S3 ein erstes Mal aufgenommen. Um den Punkt S3 doppelt einschneiden zu können, wurde danach ein zweites Mal neben S1 frei stationiert (S2). Da dieses Stativ schließlich für die Zwangszentrierung genutzt werden soll, darf keine beliebige sondern die richtige Stationshöhe eingegeben werden. Aus S2 wurde S3 ein zweites Mal gemessen, und die Koordinaten mit denen aus S1 bestimmten Werten gemittelt. Jetzt können der Tachymeter und das Prisma ausgetauscht werden. Das Instrument wurde mit der Methode der „Stationierung über einem bekannten Punkt" und mit S2 als Anschlusspunkt orientiert. Zuletzt konnte das Aufmaß der Zielmarke 001 durchgeführt werden. Zur Kontrolle wurde der Hilfspunkt 1006 abgesteckt, dessen Koordinaten auf einen Millimeter gepasst haben.

3.3 TLS-Aufnahmen mit dem Leica HDS6000

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde der Hörsaal zunächst mit dem Laserscanner HDS6000 der Firma Leica erfasst. Das verwendete Instrumentarium sowie der Ablauf der Messung werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.3.1 Instrumentarium

Das Modell HDS6000 der Firma Leica gehört zu der HDS (engl. für *High-Definition Surveying*) Baureihe und ersetzt das Vorgängermodell HDS4500. Der TLS wird von der Firma Zöller+Fröhlich GmbH als Z+F IMAGER 5006 hergestellt und von Leica als HDS6000 vertrieben, was die große Ähnlichkeit der technischen Daten der beiden Geräte erklärt. Die vom HDS6000 während des Scanvorgangs gespeicherten Daten werden im ZFS-Dateiformat gespeichert, das von Zöller+Fröhlich entwickelt wurde.

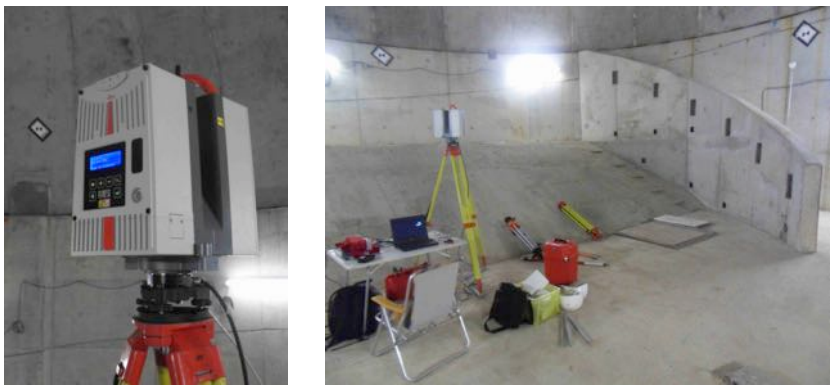


Abbildung 3.6: Scanner HDS6000 und entsprechendes Instrumentarium im Hörsaal

Das Instrument zeichnet sich durch seine Kompaktheit aus: Scanmodul, Bedieneinheit, Datenspeicher und Stromversorgung sind komplett in einem Gerät enthalten. Der Laserscanner kann dabei sowohl über das integrierte Bedienfeld (Display) als auch über PDA oder angeschlossenen Laptop mit der Leica Scan-Software Cyclone gesteuert werden (Abb. 3.6).

Der Scanner verfügt über einen integrierten Zwei-Achs-Neigungssensor mit einer Einspielgenauigkeit von 3,6", der Messungen nach den klassischen Vermessungsmethoden wie die „Freie Stationierung" oder die „Stationierung über Anschlusspunkte" ermöglicht. Ist der Sensor eingeschaltet, wird der Benutzer über Bewegungen des Scanners während dem Scannen informiert. Der HDS6000 muss aufrecht stehen und horizontiert sein (mit der Blasenlibelle) um diese Funktionalität nutzen zu können. [Leica Geosystems AG, 2007]

Der HDS6000 gehört zu der Kategorie der Panoramascanner und deckt ein Sichtfeld von 360° x 310° ab (Abb. 3.7). Nur eine kleine Zone um den Standpunkt steht im Scan-Schatten des Instrumentes selbst und bleibt somit ungemessen. Die vertikale Strahlablenkung findet mittels eines rotierenden Spiegels statt und die horizontale Abtastung erfolgt mit Hilfe eines Servomotors. Die reflektorlose Distanzmessung beruht auf dem Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens, wobei eine maximale Reichweite von 79m unter idealen Bedingungen erreicht werden kann. Der Laserstrahl der Laserklasse 3R hat den Vorteil, bei allen Lichtverhältnissen einsetzbar zu sein, ist aber für das menschliche Auge gefährlich.

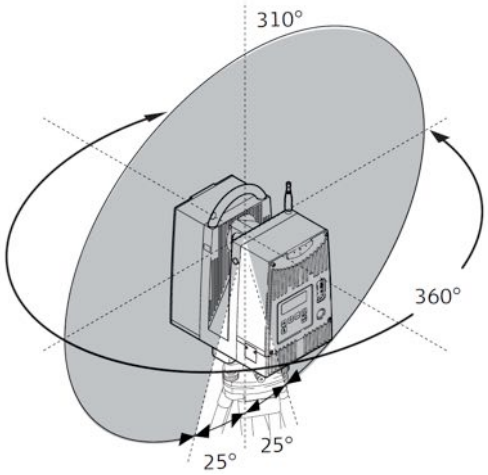


Abbildung 3.7: Sichtfeld des HDS6000

Eine weitere bedeutende Eigenschaft des Gerätes ist seine hohe Messrate (bis zu 500.000 Punkte pro Sekunde). Kombiniert mit dem vollen Sichtfeld ermöglicht die Scangeschwindigkeit durch die Verringerung der Anzahl an Standpunkten und benötigten Zielmarken eine erhebliche Reduzierung der Erfassungszeit. Sie ist aber von der gewählten Auflösungsstufe abhängig. Es existieren fünf voreingestellte Auflösungsstufen und je nach deren Wahl beträgt die Aufnahmezeit des kompletten Sichtfeldes zwischen 25 Sekunden und rund 27 Minuten (Tab.3.3).

Auflösungsstufe	Punktabstand (bei 10m)	Messdauer (gesamtes Sichtfeld)
Preview	50,6 x 50,6 mm	25 sek
Medium	12,6 x 12,6 mm	1 min 40 sek
High	6,3 x 6,3 mm	3 min 22 sek
Highest	3,1 x 3,1 mm	6 min 44 sek
Ultra High	1,6 x 1,6 mm	26 min 40 sek

Tabelle 3.3: Punktabstand und Messdauer in Abhängigkeit der fünf Auflösungsstufen
[Leica Geosystems AG, 2007]

Die vom Hersteller veröffentlichten Genauigkeitsangaben hängen sowohl von der Entfernung als auch von der Albedo (Rückstrahlungsvermögen) ab und sind mit den $\pm 1\sigma$-Werten (68% Probabilität) angegeben. Bei 25m Entfernung beträgt die Genauigkeit einer Einzelmessung ±6mm für die Position, weniger als ±4mm bei 90% Albedo für die Distanzmessung und $\pm 125\mu$rad für die horizontale sowie für die vertikale Winkelmessung. Die Tab. 3.4 und 3.5 geben eine Übersicht über die wesentlichen technischen Daten des Laserscanners HDS6000 von Leica.

Instrument (Typ)	Kompakter Phasen-Scanner mit sehr hoher Genauigkeit und Messrate, großes Sichtfeld
Schnittstelle	Touchpad-Tastatur mit 4-zeiligem Display und Anzeige, oder extern: Notebook, Tablet-PC oder PDA
Datenspeicher	Integrierte Festplatte
Scanrate	Bis zu 500.000 Punkte/Sek., Max. Momentanwert
Laserwellenlänge	650nm bis 690nm (sichtbares Rot)
Laserklasse	3R (IEC 60825-1)
Lichtverhältnisse	Bei allen Lichtverhältnissen einsetzbar, auch bei hellem Sonnenlicht oder Dunkelheit
Temperaturbereich	Betrieb: 0° C bis +40° C; Lagerung: -20° C bis +50° C
Zielerfassung („B&W"-Target)	±2mm Standardabweichung
Zwei-Achs-Neigungssensor	Wählbar Ein/Aus; Einspielgenauigkeit 3.6"
Reichweite	79m Phasenmessbereich 79m bei 90% Albedo; 50m bei 18% Albedo

Tabelle 3.4: Leistungsmerkmale des Leica HDS6000 [Leica Geosystems AG, 2007]

Entfernung	25m	50m
Genauigkeit Position	±6mm	±10mm
Genauigkeit Distanzmessung	≤±4mm bei 90% Albedo ≤±5mm bei 18% Albedo	≤±5mm bei 90% Albedo ≤±6mm bei 18% Albedo
Genauigkeit Winkelmessung	$\pm 125\mu$rad	
Laser-Spotgröße (Footprint)	8mm	14mm
	3mm beim Austritt (nach Gauss) + 0.22 mrad Divergenz	
Modellierte Oberflächen-genauigkeit/Rauschen	±2mm bei 90% Albedo ±3mm bei 18% Albedo	±4mm bei 90% Albedo ±7mm bei 18% Albedo

Tabelle 3.5: Eigenschaften des Leica HDS6000 in Abhängigkeit von der Entfernung und der Albedo [Leica Geosystems AG, 2007]

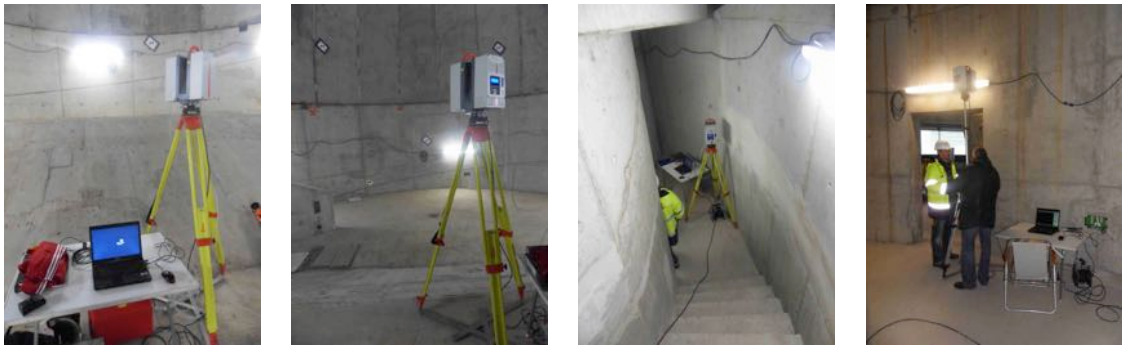
Die zur Durchführung der Messungen notwendige Ausrüstung beschränkt sich aber nicht allein auf den Scanner. Ein Stativ, eine interne Batterie, ein Gerät zur externen Stromversorgung sowie verschiedene Kabel (Ethernet, Stromversorgung usw.) gehören auch dazu. Wegen des relativ glatten Bodenbelags wurde im Hörsaal im „Haus der Astronomie" auch entschieden, eine schwere Stativspinne zu verwenden. Zur Steuerung des Instrumentes wurde einen Laptop mit dem Programm Cyclone angeschlossen (Abb. 3.6).

3.3.2 Planung der Standpunkte

Vor Ort musste man sich zuerst Gedanken über die Wahl geeigneter Standpunkte machen. Auch wenn dieses schon während der Planung besprochen wurde, mussten dann im Hörsaal die genauen

Standorte mit Rücksicht auf die Sichtverdeckungen und auf die Anzahl sowie die Positionen der vorhandenen Zielmarken für die Registrierung festgelegt werden. Für die Erfassung der Kuppel wäre eigentlich eine zentrale Stationierung ausreichend gewesen. Wie schon erwähnt, hatten aber die Architekten und Bauingenieure auch an der Brüstung und an der Treppe Interesse, weswegen weitere Standpunkte für eine umfassende Aufnahme nötig waren. Es wurde entschieden, den Scanner an vier verschiedenen Positionen aufzubauen (Abb. 3.8):

- Position 1: genährt über dem Mittelpunkt des Raumes (ScanWorld 1)
- Position 2: oben auf dem Podest, so nahe wie möglich an der Rampe (ScanWorld 2)
- Position 3: unterhalb der Treppe (zur Erfassung der Treppe) (ScanWorld 3)
- Position 4: neben der Eingangstür (auf einem Kurbelstativ) zur Erfassung der Brüstung (ScanWorld 4)



(a) Position 1 (b) Position 2 (c) Position 3 (d) Position 4

Abbildung 3.8: Die vier Standpunkte des HDS6000 zur Erfassung des Hörsaals

Zur Verknüpfung des dritten Standpunktes waren keine der bisher angebrachten Zielmarken sichtbar, die in den anderen Scans vorhanden waren. Deshalb wurden zwei Kugeln und ein „Black&White"-Target auf einer „Tilt&Turn"-Vorrichtung mittels Reflektorstäben und Stabstativen zusätzlich aufgestellt (Abb. 3.9). Ihre ungünstige Verteilung sowie ihre grenzwertige Anzahl (drei Passpunkte sind für die Registrierung ein Minimum) haben während der Auswertung zu Schwierigkeiten geführt.

Abbildung 3.9: Drei zusätzliche Passpunkte zur Registrierung der ScanWorld 3

3.3.3 Ablauf der Messung

Nach der Beschreibung des Instrumentariums und der Wahl der Standpunkte wird in diesem Kapitel näher auf die Durchführung der Laserscanaufnahmen eingegangen. Pro Standpunkt erfolgte die Messung immer folgendermaßen: das Stativ wurde zuerst aufgebaut, worauf der Laserscanner befestigt wurde. Die Grobhorizontierung des Gerätes fand über die äußere Dosenlibelle am Scannergehäuse statt. Die Feinhorizontierung wurde mittels des internen Zwei-Achs-Neigungssensors vorgenommen. Das Instrument wurde dann an Strom und Notebook angeschlossen. Danach konnte der Hauptscan durchgeführt werden und schließlich wurden die Targets im Feinscan-Modus erfasst (Abb. 3.10). Es wurde auf einen Preview-Scan (Voransicht) verzichtet, weil jeweils das volle Sichtfeld aufgenommen wurde.

Da der Scanner über den Laptop gesteuert wurde, sollte in der Cyclone-Software als Erstes eine neue Datenbank für das gesamte Projekt angelegt werden. Dies wurde schon am Tag vor der Messung für einen Test am IPF in Karlsruhe durchgeführt, um sich schon im Voraus mit dem Programm vertraut zu machen und vor Ort Zeit sparen zu können. Außerdem muss unter der Rubrik „SCANNERS" im Cyclone Navigator der verwendete Scanner ausgewählt werden. Ist das Gerät an dem Notebook angeschlossen, führt ein Doppelklick auf den Scannernamen zum Scan-Control-Fenster (Abb. 3.11). Nach Erstellung eines neuen Projektes, in dem alle ScanWorlds und Scans verwaltet werden, können die Eigenschaften der Aufnahme eingegeben werden. Unter „Project Setup" können Veränderungen am aktuellen Projekt vorgenommen werden. Die derzeitige ScanWorld (bzw. Standpunkt) und die Anzahl der bisherigen Scans werden auch angezeigt. Im „Field-of-View" kann der Scanbereich durch die Eingabe von horizontalen und vertikalen Messwinkeln ausgewählt werden. Unter „Resolution" wird die gewünschte Auflösung für eine bestimmte Entfernung selektiert. Aufgrund der großen Überlappungsbereiche zwischen den verschiedenen Punktwolken und der relativ kleinen zu messenden Distanzen, war eine Rasterweite von 1,3cm auf 10m (Medium) ausreichend. Aus diesen Einstellungen wird eine approximative Messdauer berechnet und angezeigt. Vor Beginn des Scanvorgangs (Knopf „Scan") muss das Instrument noch mit dem Laptop verbunden werden, was über das äußerste linke Symbol im Menü erreicht wird.

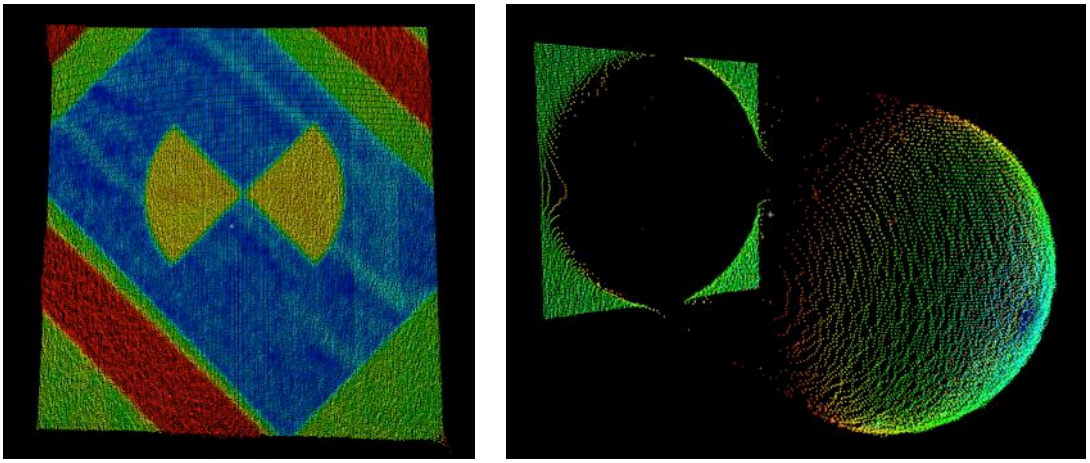


Abbildung 3.10: Feinscans eines „Black&White"-Targets und einer Kugel

Nach der Aufnahme werden die Daten vom Laserscanner auf den Laptop übertragen. Je nach Auflösung und Messbereich kann dieser Prozess auch länger dauern. Im Scan-Control-Fenster erscheint das Ergebnis in Form einer nach der Intensität gefärbten Punktwolke. Es wird in einer um den Standpunkt zentriert kugelförmigen Projektion dargestellt (Abb. 3.11).

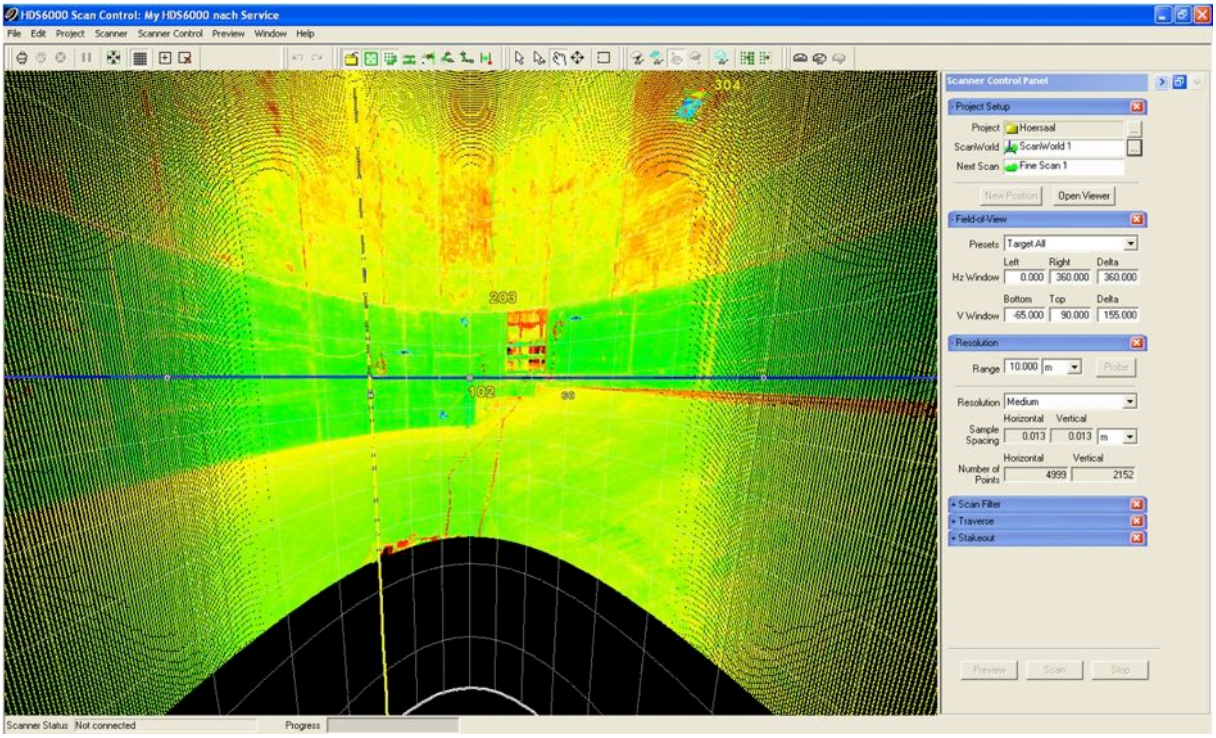


Abbildung 3.11: Darstellung der ScanWorld 1 im Scan-Control-Fenster

Beim letzten Schritt des Laserscannings werden Feinscans der Zielmarken durchgeführt, um die einzelnen Teil-Punktwolken bei der Auswertung miteinander verknüpfen zu können. Die Suche der Targets im Hauptscan wurde durch die im Vorfeld geklebten schwarzen Rahmen erheblich vereinfacht. Ein Punkt („Pick Point") wird dazu ungefähr in der Mitte der Zielmarke bzw. der Kugel gesetzt. Im Menü „Scanner Control" ist der Befehl „Acquire Targets" zu finden. Es besteht die Möglichkeit HDS-Targets, „Black&White"-Targets und Kugeln, entweder mittels eines zentrierten Punktes („from Picks") oder eines Fensters („from Fence"), zu erfassen. Es wird jeder Zielmarke ein eindeutiger Name zugewiesen, der zur Registrierung und Georeferenzierung verwendet wird. In der ersten ScanWorld müssen alle Punktnummer neu eingegeben werden. Ab dem zweiten Standpunkt können die bereits vorhandenen Targets bzw. Kugeln aus einer automatisch angelegten Liste ausgewählt werden. Das Muster einer „Black&White"-Zieltafel wird von der Software automatisch erkannt und ihr Mittelpunkt wird aus den hohen hell/dunkel-Kontrasten berechnet. Da das Objekt vertikal abgetastet wird ist die Verdrehung der Zielmarke zur genauen Bestimmung des Mittelpunktes notwendig. Bei Kugeln ist darauf zu achten, dass der eingegebene Durchmesser stimmt. Der Feinscanvorgang weicht von der Erfassung der flachen Targets ab, indem er aus zwei Etappen besteht: zuerst wird die Lage der Kugel und danach erst deren Mittelpunkt bestimmt. An dieser Position wird sowohl für Zieltafeln als auch für Kugeln ein Kreuz (Vertex) zur visuellen Kontrolle des ermittelten Target-Zentrums gesetzt.

3.4 TLS-Aufnahmen mit dem Trimble GX

Nach der Aufnahme mit dem Leica HDS6000 wurde der Hörsaal zehn Tage später mit dem Trimble GX 3D-Scanner erfasst. Das verwendete Instrumentarium sowie der Ablauf der Messung werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.4.1 Instrumentarium

Der Scanner gehört zur Kategorie der Hybridscanner und deckt ein Sichtfeld von 360° x 60° ab. Da mit diesem Gerät kein Scan im Zenit-Bereich möglich ist, war schon im Voraus klar, dass der Hörsaal nicht vollständig erfasst werden könnte. Aus praktischen Gründen war allerdings der Einsatz eines anderen Scanners nicht möglich.

Die Messung basiert auf dem Impulslaufzeitverfahren und dauerte deshalb länger als die Aufnahme mittels des HDS6000. Ein weiterer Unterschied gegenüber dem Laserscanner der Firma Leica stellt die integrierte Kamera dar. Wird vor der Messung ein Panoramabild erzeugt, kann der zu erfassende Bereich ausgewählt werden (keine 360°-Drehung), um - sowohl vor Ort als auch bei der Bearbeitung der Daten im Büro - Zeit zu sparen. Außerdem bekommt jeder einzelne Punkt bei der Aufnahme eine Farbkomponente (Rot, Grün, Blau), so dass neben einer Intensitätsdarstellung auch eine realistische Farbdarstellung der Punktwolke möglich ist.

Der Scanner Trimble GX verfügt über Routinen für die „Stationierung auf bekanntem Punkt" und für die „Freie Stationierung". Dank einer elektronischen Libelle und einem Zweiachskompensator kann das Gerät genau horizontiert und orientiert werden. So wurden die Punktwolken auf der Baustelle direkt georeferenziert und eine nachträgliche Registrierung ist nicht mehr notwendig.

Messmethode	Impulslaufzeitverfahren
Sichtfeld	Hybridscanner: 360° x 60° ununterbrochener Einzel-Scan
Schnittstelle	Netzwerkkabel und Trimble-Tablet ausgestattet mit der Anwendungssoftware PointScape
Scanrate	Bis zu 5.000 Punkte/Sek.
Laserwellenlänge	532nm (Grün)
Laserklasse	3R (IEC 60825-1)
Laser-Spotgröße (Footprint)	3mm bei 50m
Lichtverhältnisse	voll betriebsfähig unter allen Lichtverhältnissen
Temperaturbereich	Betriebstemperatur: 0 bis 40 °C Lagertemperatur: -20 bis 50 °C
Zielerfassung	$< \pm$1mm Standardabweichung (Trimble-Targets)
Zwei-Achs-Kompensator	abschaltbar
Reichweite	350m bei 90% Albedo 155m bei 18% Albedo
Einzelpunktgenauigkeit (bei 100m)	Position = $\pm$12mm Entfernung = $\pm$7mm Hz. Winkel = 60μrad; V. Winkel = 70μrad
Modellierte Oberflächengenauigkeit	$\pm$2mm (je nach verwendeter Methode)

Tabelle 3.6: Leistungsmerkmale des Trimble GX 3D-Scanners [Trimble, 2009]

Wie beim Leica HDS6000 wird ein Laser der Klasse 3R eingesetzt, so dass Messungen unter allen Lichtsverhältnissen möglich sind. Die Wellenlänge des Lasers liegt hier allerdings im grünen Bereich. Die Betriebstemperatur liegt zwischen 0° und +40°C. Durch die Eingabe der Temperatur und des Luftdruckes kann einen Wert in ppm für die atmosphärische Korrektur automatisch berechnet und angebracht werden.

Die von Trimble angegebenen Genauigkeiten hängen von der Entfernung ab. Bei 100m Entfernung beträgt die Genauigkeit einer Einzelmessung ±12mm für die Position, ±7mm für die Distanzmessung, ±60μrad für die horizontale Winkelmessung und ±70μrad für die vertikale Winkelmessung. Die Tab. 3.6 gibt eine Übersicht über die Leistungsmerkmale und Systemspezifikationen des Laserscanners Trimble GX 3D.

Die Steuerung des Instrumentes erfolgte über einen Tablet-PC, worauf die Software PointScape zur Durchführung der Stationierung und der Aufnahme installiert war.

3.4.2 Auswahl der Standpunkte

Wie bei der Aufnahme mit dem Leica HDS6000, mussten auch bei der Messung mit dem Trimble GX zunächst relevante Standpunkte ausgewählt werden. Da das Messgerät zur Kategorie der Hybridscanner gehört, wurde schon im Voraus die zu erreichende Höhe in Abhängigkeit von der Position des Scanners bestimmt. So konnte bereits im Büro festgestellt werden, dass sogar die Aufstellung des Instrumentes möglichst nahe an der Wand nicht ausreicht um die gegenüberliegende Wand bis zur Kuppelmitte zu messen und somit die komplette Erfassung des Hörsaals bzw. der Kuppel nicht möglich sein wird. Mit diesem System blieb also den obersten Teil des Objektes unerfasst. Da die Brüstung für den Vergleich der Leica- mit den Trimble-Punktwolken nur eine untergeordnete Rolle spielte, war der Einsatz eines Kurbelstatives nicht erforderlich.

Bei der Wahl der Standpunkte war auch die Sichtbarkeit der Festpunkte zu berücksichtigen, da der Scanner Trimble GX nach der Methode der „Freien Stationierung" aufgestellt wurde (s. Kap. 3.4.3). Das Messgerät wurde zum einen im unteren Bereich des Hörsaals (etwa in Verlängerung der Brüstung), 1m von der Wand entfernt, aufgebaut. Zum anderen wurden Messungen vom Podest aus durchgeführt (Abb. 3.12).

(a) Erster Standpunkt (b) Zweiter Standpunkt

Abbildung 3.12: Die zwei Standpunkte für den Trimble GX

3.4.3 Ablauf der Messung

Der größte Unterschied zur Aufnahme mit dem Leica HDS6000 stellt die Stationierung dar: der Trimble GX 3D-Scanner wurde nämlich an einer beliebigen Stelle aufgebaut und über drei im lokalen Koordinatensystem bekannte Festpunkte stationiert, so dass das Instrument und darüber hinaus die Punktwolke schon vor Ort georeferenziert waren. Die Messung hatte folgenden Ablauf:

- Horizontierung des Laserscanners mit Hilfe der elektronischen Libelle.
- Aufstellung der Trimble-Zielmarken über im Koordinatensystem bekannten Festpunkten und Durchführung eines Feinscans dieser Targets (Abb. 3.13). Diese wurden dann als Anschlusspunkte zur „Freien Stationierung" des Gerätes verwendet. Zur Kontrolle der Güte der Stationierung wurden Restklaffungen angezeigt. Sie lagen maximal bei 6mm für die Position der Festpunkte (σ_p).
- Erzeugung eines Panoramabildes zur Auswahl des zu messenden Bereiches (Abb. 3.14). Da die Standpunkte ziemlich nahe an der Wand ausgesucht wurden, wurde kein 360°-Scan vorgenommen.
- Laserscanning des Objektes. Ein mittlerer Punktabstand von 3cm auf 15m wurde ausgewählt und jeder Punkt wurde viermal gemessen (vier Shots). Es wurden keine atmosphärischen Eingaben eingetragen, so dass die atmosphärische Korrektur bei 0ppm lag. Die Aufnahmen des Hörsaals dauerten jeweils etwa eine halbe Stunde.

Sowohl die Stationierung als auch die Aufnahme erfolgten im Programm PointScape. Abb. 3.15 stellt die auf dem ersten Standpunkt erfasste Punktwolke dar. Die zur Stationierung angezielten Festpunkte 1006, 1008 und 1017 wurden auch angezeigt. Diese Punktwolke entspricht dem Panoramabild 3.14a.

Abbildung 3.13: Feinscan einer Trimble-Zielmarke

Da sich die Messpunkte für beide Standpunkte bereits im lokalen Koordinatensystem befanden, war eine nachträgliche Georeferenzierung und Registrierung nicht mehr notwendig. Zur Kontrolle der korrekten Raumlage der Punktwolken wurde während des zweiten Scanvorgangs visuell geprüft, ob die Zielmarken bzw. deren Lotstäbe übereinanderlagen.

(a) Standpunkt 1

(b) Standpunkt 2

Abbildung 3.14: Panoramabilder der zu messenden Bereiche

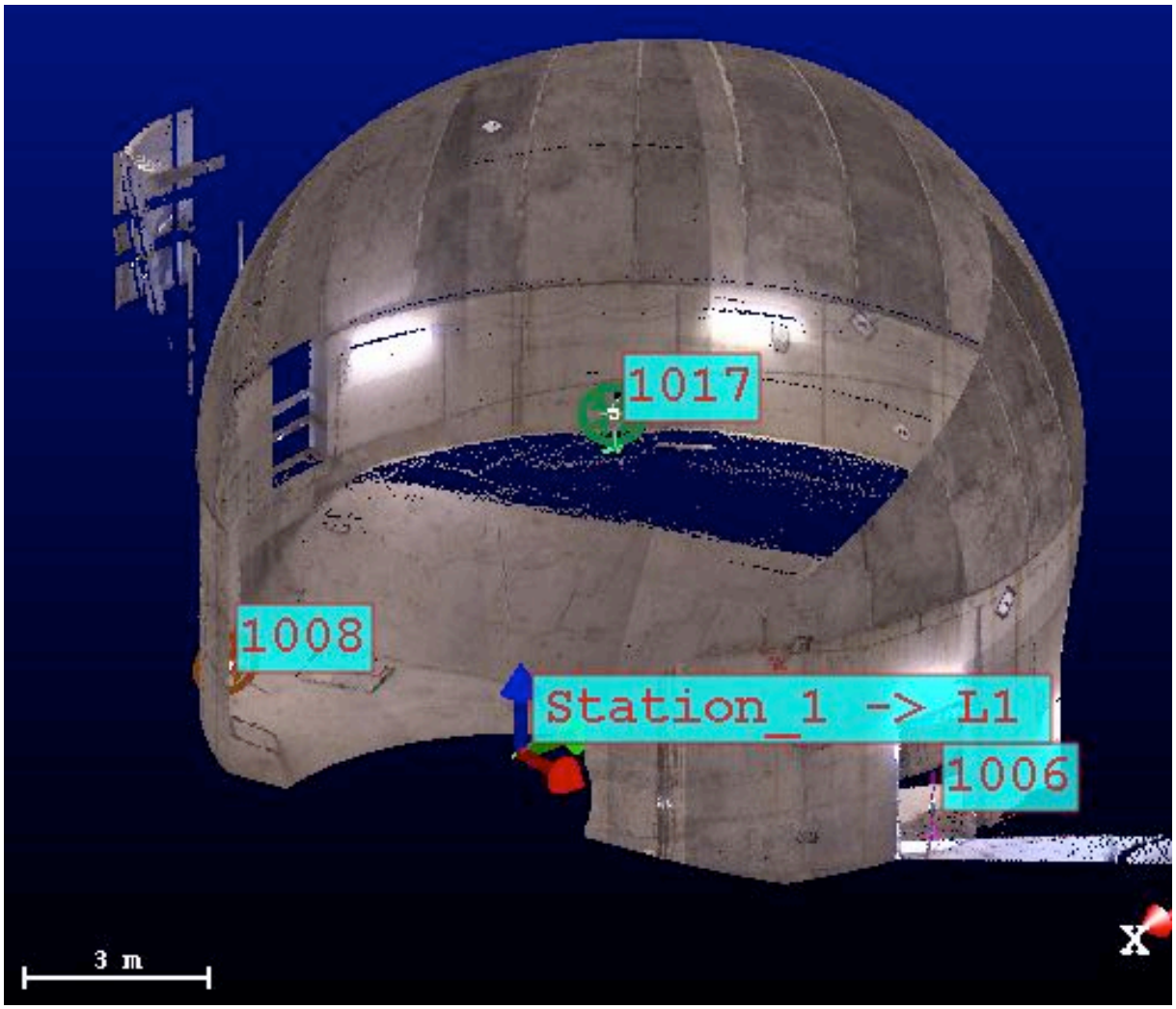


Abbildung 3.15: Erfasste Punktwolke vom ersten Standpunkt aus (PointScape)

KAPITEL 4

VORVERARBEITUNG DER PUNKTWOLKEN

4.1 Leica Cyclone

Die Auswertesoftware Cyclone der Firma Leica Geosystems wurde für die Steuerung des Laserscanners sowie die Verarbeitung der 3D-Punktwolken entwickelt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit kam die Version 5.8 zum Einsatz.

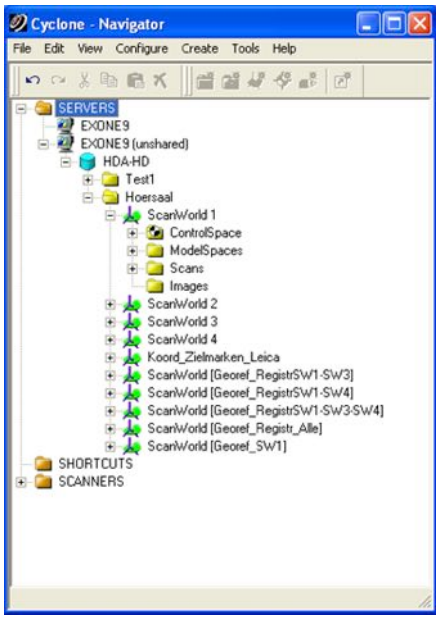


Abbildung 4.1: Cyclone Navigator

Im Cyclone Navigator sind die Rubriken SERVERS und SCANNERS zu finden. Wie schon in Abschnitt 3.3.3 erklärt, befindet sich unter SCANNERS das angeschlossene Messgerät und so kann das Scan-Control-Fenster geöffnet werden. Unter SERVERS sind alle ausgewählten Datenbanken mit ihrem kompletten Inhalt aufgelistet. Die für die Diplomarbeit angelegte Datenbank „HDA-HD" beinhaltet die Projektordner „Test1" (Probe-Messungen, die an der Universität durchgeführt wurden) und „Hoersaal" (Messungen im „Haus der Astronomie"), die dann wiederum die einzelnen ScanWorlds enthalten. Eine ScanWorld entspricht einen Standpunkt, wobei

für die Registrierung und Georeferenzierung der Punktwolken weitere ScanWorlds erzeugt wurden (s. Abschnitt 4.1.1). Jede ScanWorld ist in „ControlSpace", „ModelSpaces", „Scans" und „Images" unterteilt (Abb. 4.1). Wenn der ControlSpace ausschließlich aus den Passpunkten besteht, sind im ModelSpace alle Messpunkte und Informationen des Standpunktes zu finden. Die einzelne Aufnahmen (Ordner „Scans") können aber auch separat in dem Viewer geöffnet werden. Da mit dem Leica HDS6000 keine Bilder gemacht wurden, ist der Ordner „Images" leer.

In den folgenden Abschnitten werden die Registrierung, Georeferenzierung, Bereinigung und Modellierung in Cyclone ausführlicher beschrieben.

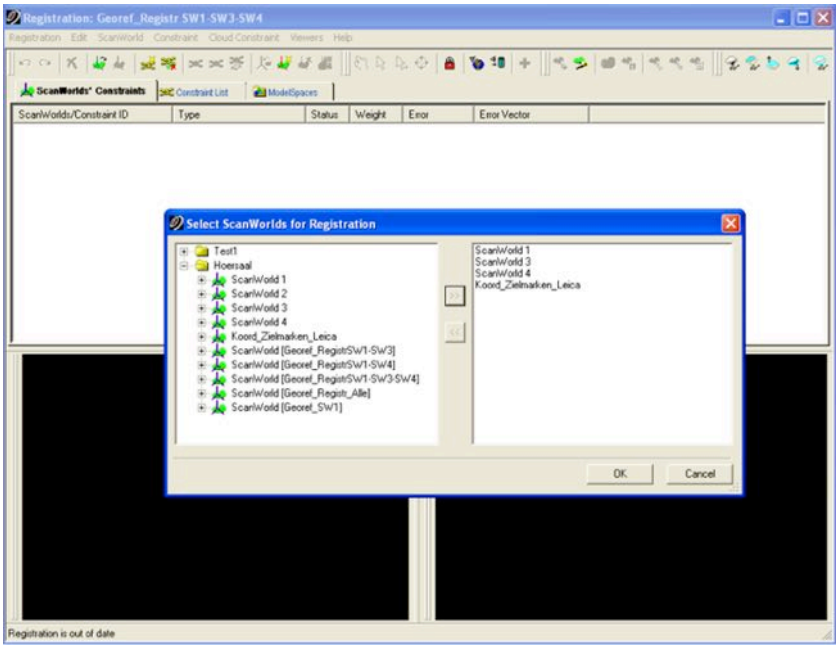
4.1.1 Registrierung und Georeferenzierung

Die Aufnahme des „Hauses der Astronomie" erfolgte von vier verschiedenen Standpunkten aus. Die entsprechenden Punktwolken wurden nicht direkt in einem einheitlichen Koordinatensystem bestimmt, sondern in einem lokalen Scanner-Koordinatensystem und mussten zur Auswertung zunächst miteinander verknüpft werden. Die Registrierung entspricht diese Überführung der individuellen Standpunkt-Koordinatensysteme in ein gemeinsames System. Um die Aufnahmen am Königstuhl auch mit dem CAD-Modell der Architekten vergleichen zu können, wurden die Daten in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert. Dieser Vorgang stellt die sogenannte Georeferenzierung dar.

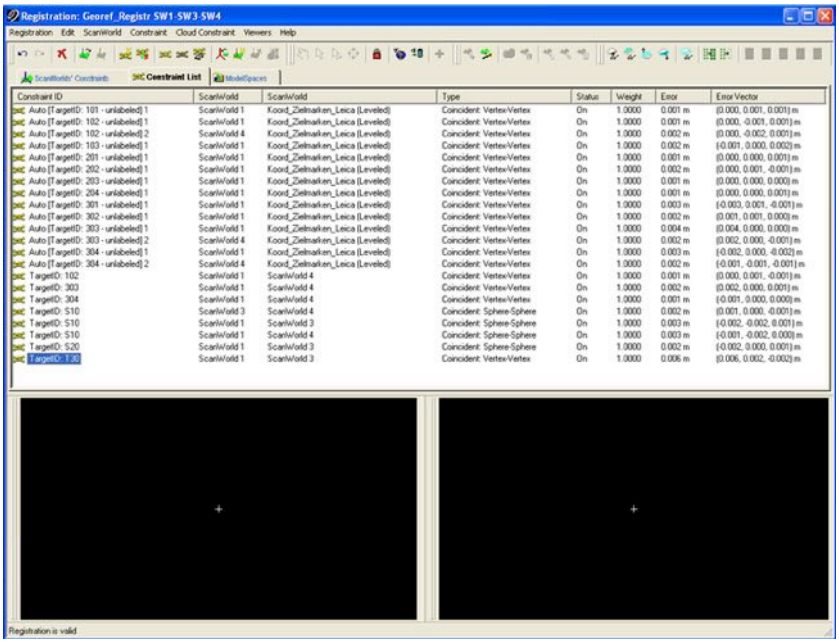
Grundsätzlich bietet das Programm Cyclone zwei Varianten zur Registrierung der Punktwolken: entweder über natürliche (markante) identische Punkte oder über Passpunkt-Targets (Zielmarken oder Kugeln). Aufgrund der Geometrie und der Struktur des Hörsaals wäre die Zusammenführung über markante Punkte deutlich zeitaufwändiger und ungenauer als die zweite Möglichkeit gewesen. Da pro Standpunkt mindestens drei „Black&White"-Targets halb-automatisch erfasst wurden, war es geeigneter, die einzelnen ScanWorlds über ihre Passpunkte zu verknüpfen. Mit der Beifügung der im Voraus tachymetrisch bestimmten Zielmarkenkoordinaten wurde das Gesamtobjekt in das auf der Baustelle vorhandene Koordinatensystem georeferenziert.

Praktisch muss zur Durchführung der Registrierung und Georeferenzierung zunächst im Cyclone Navigator eine zusätzliche leere ScanWorld angelegt werden, in die eine ASCII-Datei mit allen Passpunktkoordinaten importiert wird. Danach wird über den Befehl „Create Registration" eine neue Registrierung im Projekt erzeugt, die mit einem Doppelklick geöffnet werden kann. Im Registration- Fenster müssen nun die zu verbindenden ScanWorlds über „Add ScanWorld" ausgewählt werden. Die Abb. 4.2a stellt ein Beispiel für die Registrierung der ScanWorlds 1, 3 und 4 dar. Damit die Georeferenzierung stattfindet, muss die ScanWorld „Koord_Zielmarken_Leica", die die Passpunktkoordinaten enthält, auch selektiert und als HomeScanWorld deklariert werden, so dass bei der anschließenden 3D-Transformation alle Punktwolken in dieses Referenzsystem überführt werden.

Danach werden über den Befehl „Auto Add Constraints" alle identischen Punkte erkannt und verknüpft. In dieser Zuordnungsliste kann nachgeprüft werden, ob für jedes ScanWorld-Paar mindestens drei Verknüpfungspunkte zur Verfügung stehen, damit die Transformation überhaupt ermittelt werden kann. Diese Anzahl wurde am „Haus der Astronomie" in fast allen Fällen übertroffen.



(a) Wahl der ScanWorlds

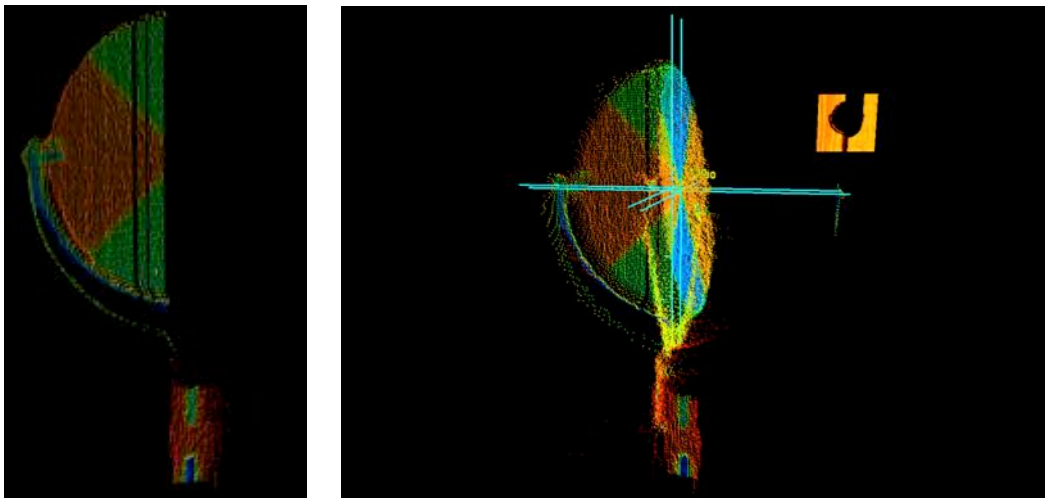


(b) Ergebnis der Registrierung

Abbildung 4.2: Registration-Fenster in Cyclone

Der dritte Standpunkt konnte nämlich nur über die am Tag der Messung aufgebauten Kugeln S10 und S20 sowie die Zielmarke T30 mit den anderen Punktwolken verbunden werden. Mittels dem Kommando „Register” wird die Registrierung gestartet, deren Ergebnisse unter dem Reiter „Constraint List” angezeigt werden. Die Spalte „Error” beinhaltet den mittleren Punktfehler und die Spalte „Error Vektor” die Abweichungen in den jeweiligen Koordinatenrichtungen (Abb. 4.2b). Die ungünstige Verteilung der drei Verknüpfungspunkte für den dritter Laserscannersstandpunkt und die fehlerhafte Target-Erkennung der Zieltafel T30 (Abb. 4.3a) führten an dieser Stelle zu Schwierigkeiten. Bei der ersten Berechnung der Registrierung der ScanWorlds

1, 3 und 4 traten große Restklaffungen (bis 5cm) auf. Eine Kontrolle der Feinscans zeigte, dass nur knapp die Hälfte des Targets T30 erfasst wurde, was leider vor Ort nicht aufgefallen war. Die daraus resultierende Mittelpunktzuweisung konnte nicht ohne Korrektur verwendet werden. Es wurde ein Vertex möglichst nahe am Mittelpunkt gesetzt und mit diesem neuen 3D-Kreuz erneut die Registrierung gerechnet. Die Zielmarke T30 wies immer noch einen mittleren Punktfehler von 6mm auf, der nicht mehr zu verbessern war. Die Abb. 4.3b zeigt die nicht aufeinander liegenden Vertices T30 in den Feinscans der ScanWorlds 1 und 3.



(a) T30 im ScanWorld 1 (b) Feinscans und Vertices in ScanWorlds 1 und 3

Abbildung 4.3: Fehlerhafte Targeterkennung der Zielmarke T30

Zur Vermeidung nachträglicher Veränderungen wird die Registrierung mit dem Befehl „Create ScanWorld/Freeze Registration" in einer neuen ScanWorld eingefroren (Abb. 4.4). Zum Schluss wird noch zur Visualisierung und Verarbeitung der zusammengeführten Punktwolken ein neuer ModelSpace geschafft.

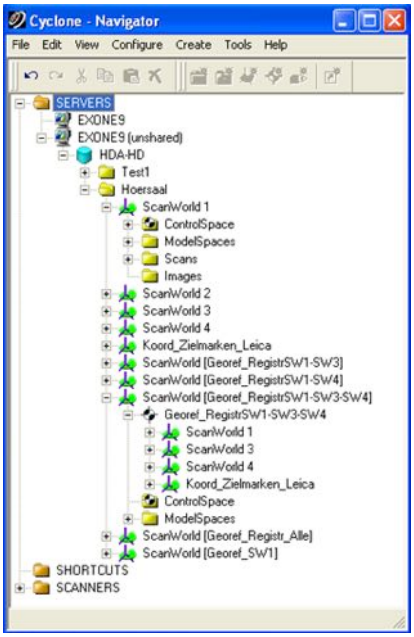


Abbildung 4.4: Cyclone Navigator: neu angelegte ScanWorld nach der Registrierung

Bei der vorliegenden Diplomarbeit wurden fünf Registrierungen durchgeführt. Prinzipiell wäre die georeferenzierte ScanWorld 1 ausreichend gewesen (absoluter Fehler: 2mm, größter Einzelfehler: 3mm). Der zweite Standpunkt liefert nämlich nur zusätzliche Daten für den Boden und eine große Menge an Punkten in der Kuppel. Diese Bereiche werden auch von der Laserscanaufnahme vom vierten Standpunkt aus abgedeckt. Da nur eine ungenauere Verknüpfung der dritten ScanWorld möglich war, wurden Registrierungen mit den entsprechenden Punktwolken zwar vorgenommen, aber mit dem Hintergedanken, dass die Ergebnisse eines eventuellen Vergleiches mit dem CAD-Modell von der Zusammenführung der ScanWorlds beeinträchtigt sein könnten. Die Ergebnisse der jeweiligen Registrierungen sind im Anhang A zu finden.

4.1.2 Bereinigung der Punktwolke

Im Gegensatz zur tachymetrischen Aufnahme, bei der Objekte gezielt aufgenommen werden, ist bei Scannermessungen keine gezielte Punktauswahl innerhalb eines Messfensters möglich, so dass das gesamte Umfeld auch miterfasst wird. Eine Bereinigung des Datenmaterials muss also stattfinden, um diese Fremdobjekte zu entfernen. In Cyclone wird die zu bearbeitende ScanWorld in dem ModelSpace-Viewer geöffnet. Am „Haus der Astronomie" waren hauptsächlich Messungen an Objekten außerhalb des Hörsaals zu finden, die von Scanaufnahmen durch die Türen resultierten (Abb. 4.5). Um den Vergleich mit dem Modell zu vereinfachen, sind auch alle „unstabilen" bzw. nicht „dauerhaften" Elemente wie Punkte auf der Verkabelung oder auf Baulampen herausgeschnitten worden.

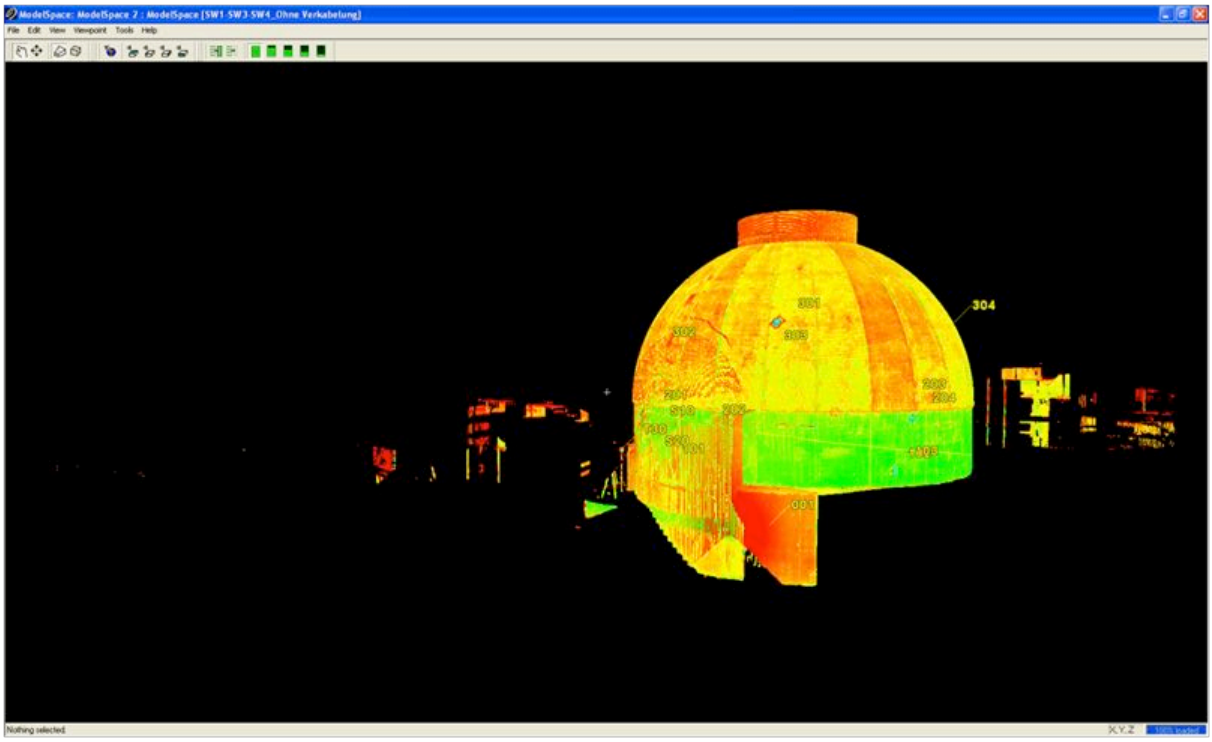


Abbildung 4.5: Unbereinigte Punktwolke aus der Registrierung SW1-SW3-SW4

Im Prinzip ist die Beseitigung dieser „Störungen" sehr einfach. Ein Rahmen (Polygon) wird um die zu eliminierenden Punkte gezogen und der Inhalt wird gelöscht. Der Rahmen kann entweder rechteckförmig, kreisförmig oder durch frei gesetzte Punkte definiert sein (Option „Fence").

Dieser Prozess ist sehr zeitaufwändig aber erleichtert die künftige Arbeit mit der Punktwolke und ist somit nicht zu vernachlässigen.

4.1.3 Modellierung der Punktwolke

Bei der Modellierung handelt es sich um die Umwandlung der Punktwolke über einen ausgleichenden Algorithmus in vordefinierte geometrische Elemente, wie Ebenen, Kugeln, Zylinder, Quader usw. Da es bei dieser Diplomarbeit nicht um die Erstellung eines dreidimensionalen Modells geht, diente die Modellierung eher der Ermittlung des Messrauschens (Entfernung eines Punktes zur ausgleichenden Fläche).

Da die in der Software vorhandenen geometrischen Figuren relativ einfach sind, musste die Punktwolke zuerst dementsprechend unterteilt werden. Der Boden im unterem Bereich, die Schräge, das Podest (jeweils Ebenen), die Außenwände (Zylinder) und die Kuppel (Halbkugel) wurden jeweils in einen neuen ModelSpace kopiert, um einzeln mit der jeweils passenden Oberfläche („Patch", „Cylinder" oder „Sphere") bearbeitet zu werden. In diesem Region-Growing-Algorithmus kann unter „Region Thickness" die Dicke des Bereiches eingegeben werden, in dem Punkte um die ausgleichende Fläche akzeptiert werden, um kleine, zufällige Abweichungen (z.B. Messrauschen) bei der Bestimmung zuzulassen. Auch die größte Lücke in der Datenabdeckung kann eingestellt werden, um das Flächenwachst sinnvoll begrenzen zu können. Nach der Durchführung der Modellierung werden die Anzahl der verwendeten Punkte und die Standardabweichung ermittelt und angezeigt. Abb. 4.6 veranschaulicht das Modellierungsverfahren sowie das Modellierungsergebnis für das Beispiel der Wände.

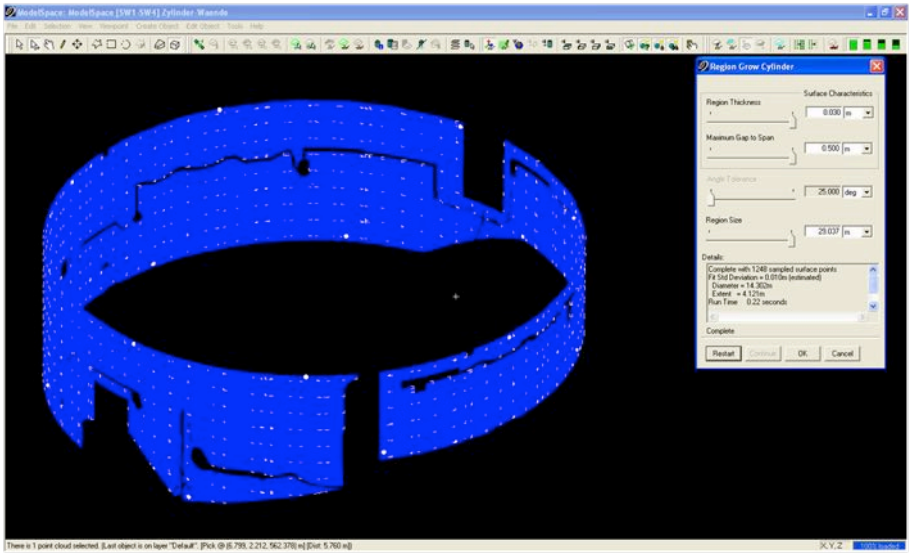
Ein weiterer Ansatz zur Modellierung einer Punktwolke stellt die Triangulation (bzw. Dreiecksvermaschung) dar. Es handelt sich dabei um das Verbinden der Messpunkte durch ein Netz von Dreiecken. Das Progamm Cyclone bietet dem Anwender drei Vermaschungsmethoden an:

- **Basic Meshing:** Basisform der Vermaschung ohne Einschränkungen (kann nur für mehr als eine Punktwolke verwendet werden)

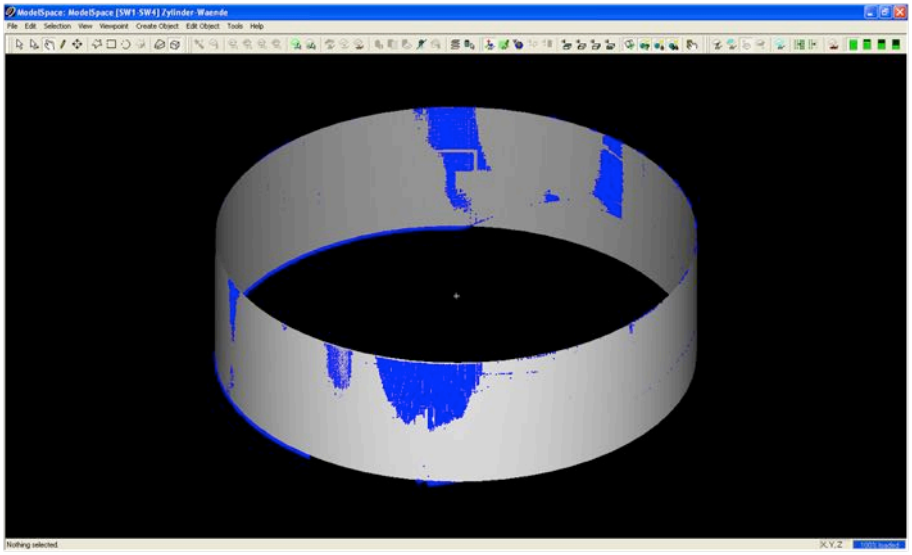
- **Complex Meshing:** die Flächen der Dreiecke werden so ausgerichtet, dass die wahrscheinlichste Form des Objektes ermittelt wird (kann nur für mehr als eine Punktwolke verwendet werden)

- **TIN Meshing:** erzeugt Dreiecke, so dass zwei Dreiecke sich in die vertikale Richtung nicht überlappen

Bei der Bearbeitung des Hörsaals war leider nur die TIN-Vermaschung auswählbar, obwohl durch den Befehl „Merge" sichergestellt wurde, dass alle Punkte zu einer einzigen Punktwolke gehören. Diese Methode liefert aber schlechte Ergebnisse für vertikale Flächen (Abb. 4.7). Deswegen wurde an dieser Stelle entschieden, den Prozess der Vermaschung in Cyclone abzubrechen.



(a) Anzeigefenster des Programm-Moduls „Region Grow Cylinder"



(b) Darstellung des ausgleichenden Zylinders

Abbildung 4.6: Modellierung der Wände in Cyclone

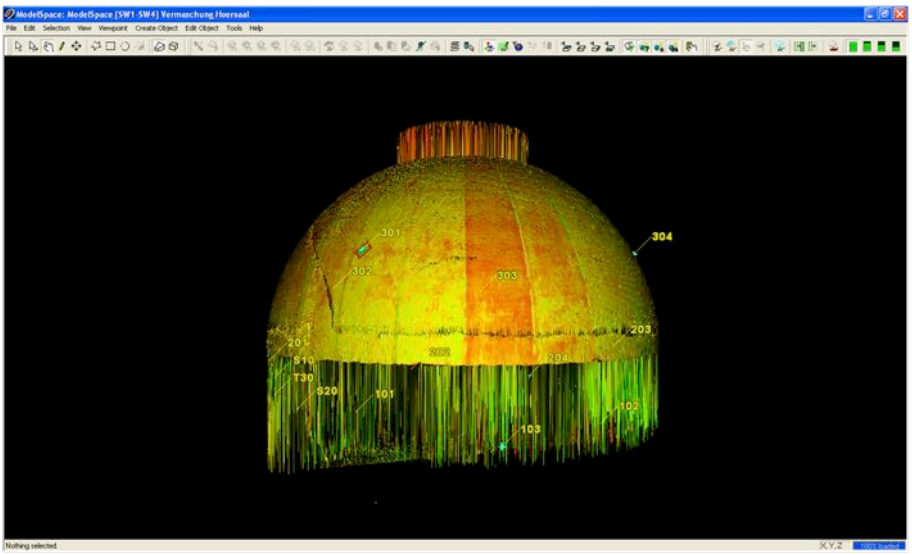


Abbildung 4.7: TIN-Vermaschung des Hörsaals in Cyclone

4.2 Trimble RealWorks

Die Auswertesoftware Trimble RealWorks wurde zur Visualisierung, Bearbeitung und Überprüfung von Punktwolken entwickelt. Für die Diplomarbeit wurde RealWorks Advanced-Modeler (zusätzliche Modellierungstools) Version 6.5 verwendet.

Im Gegensatz zu dem Programm Cyclone sind bei der Trimble-Software der Dateinavigationsbereich (Cyclone Navigator) und der Arbeitsbereich (ModelSpace) nicht getrennt. Die Funktionen zur Verarbeitung der Daten sind in drei Module aufgeteilt: Registrierung, Bearbeitung und Modellierung. Allgemeine Tools wie die Segmentierung und die Filterung sind in jedem Modul verfügbar.

Da die Daten anhand der Software PointScape aufgenommen wurden, war am Anfang der Auswertung noch keine Datenbank in RealWorks vorhanden. Die Daten müssen zuerst in Form einer ASCII-Datei, die für jeden Punkt die (X,Y,Z)-Koordinaten, den Intensitätswert, die RGB-Komponenten (Farben) und die Normalen (Nx, Ny, Nz) beinhaltet, importiert werden. Im Echtfarben-Bild der Trimble-Daten (Abb. 4.8) sind Elemente wie Lampen, eine Leiter oder die geklebten Zielmarken durch die farbige Darstellung deutlich zu erkennen.

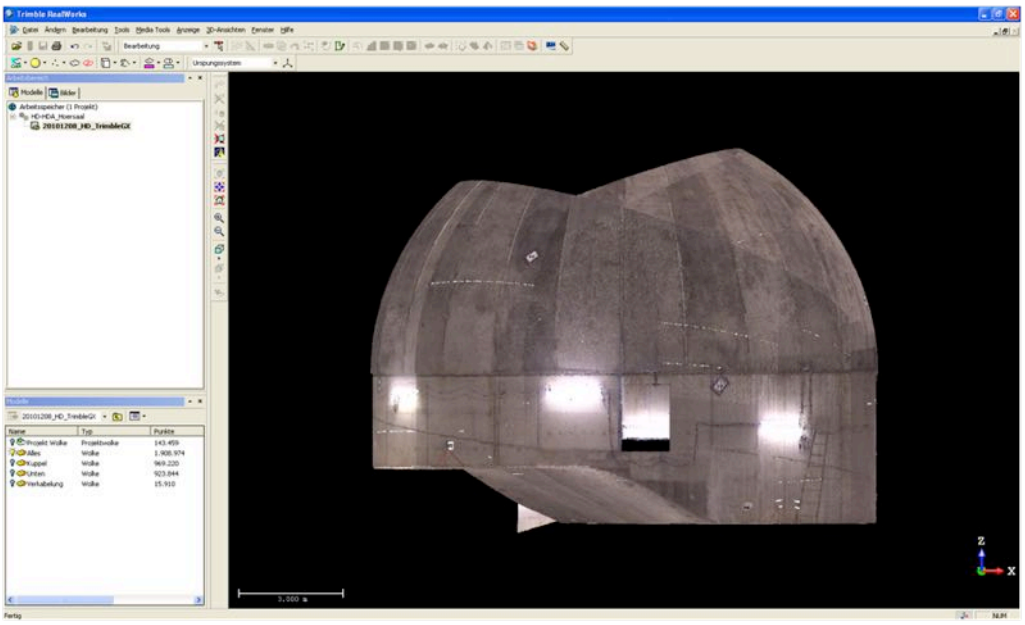


Abbildung 4.8: Echtfarben-Bild der Trimble-Punktwolke

4.2.1 Registrierung und Georeferenzierung

Wie schon im Abschnitt 3.4.3 beschrieben, fanden die Registrierung und Georeferenzierung der mit dem Trimble GX aufgenommenen Punktwolken bereits vor Ort statt, so dass sie im Büro nicht mehr durchzuführen waren. Die Software RealWorks bietet allerdings doch ein „Wolken-basierendes Berechnungs-Tool", ein „Target-basierendes Berechnungs-Tool" und ein „Georeferenzierungs-Tool" für die Verknüpfung der Messdaten an, die im Rahmen der Diplomarbeit nicht verwendet wurden.

4.2.2 Bereinigung der Punktwolke

Genauso wie für die aus der Messung mit dem Leica HDS6000 resultierenden Punktwolken wurden bei den Trimble-Daten die Störungen entfernt. Ein erheblicher Vorteil dieses Datensatzes war die Farbinformation, die das Erkennen von störenden Elementen erleichtert hat.

In RealWorks erfolgt die Bereinigung über das „Segmentierungs-Tool" nachdem eine oder mehrere Punktwolken ausgewählt worden sind. Dieses Tool ist ganz besonders für die Unterteilung einer Szene in mehreren logischen Komponenten geeignet: z.B. um die Kuppel vom unteren Bereich zu trennen, ohne die Punktwolken hin und her kopieren zu müssen (was in Cyclone nötig war).

4.2.3 Modellierung der Punktwolke

RealWorks Advanced-Modeler 6.5 bietet ein Modul „Modellierung" an, das aus viel mehr Optionen als die Modellierung in Cyclone besteht. Es wäre z.B. möglich gewesen, eine freie (nicht an eine Punktwolke gebunden) Geometrie durch die Eingabe von Parametern wie Zentrum, Radius usw. zu erzeugen. Allerdings waren im Rahmen der Diplomarbeit diese Eigenschaften zu ermitteln und nicht vorgegeben. Deswegen war die Anwendung des „Geometrieerzeugungstools" nicht geeignet und es wurde das „Punktwolkenbasierende Modellierungstool" verwendet.

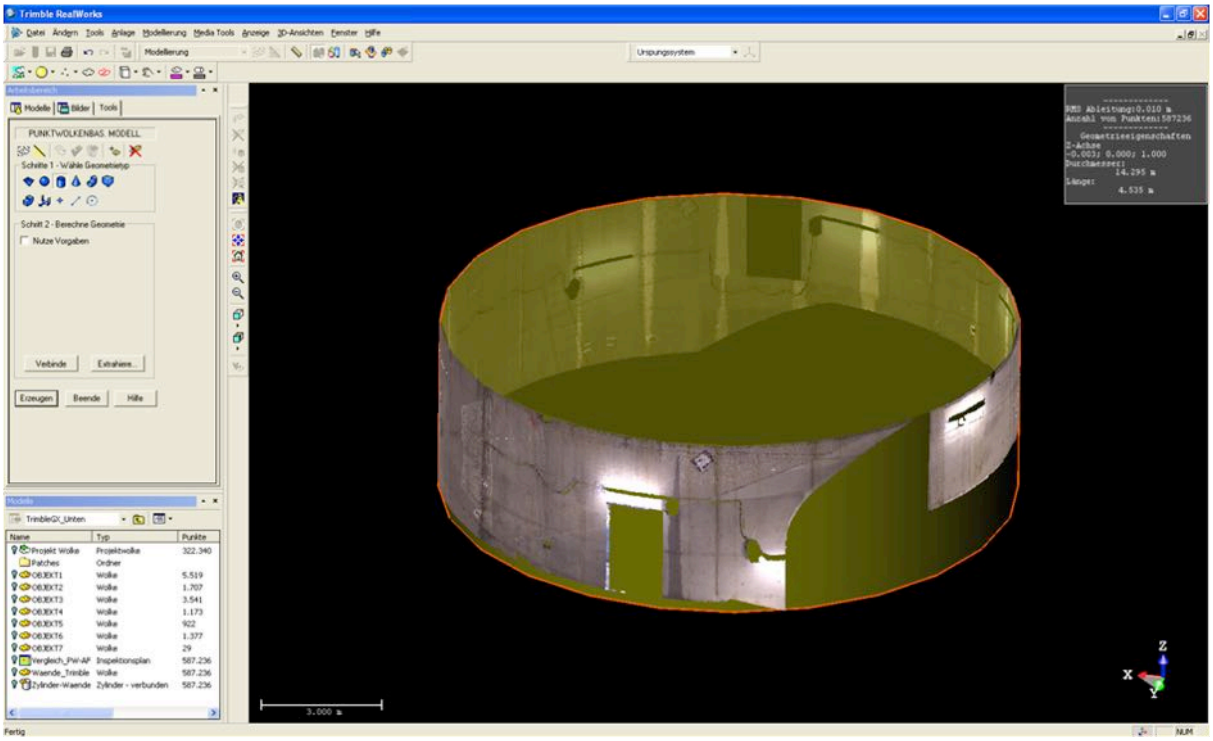


Abbildung 4.9: „Punktbasierendes Modellierungstool" in RealWorks

Es stehen verschiedene Körper (Ebene, Kugel, Zylinder, regulärer Konus, kreisförmiger Torus, rechteckiger Torus, Box, Durchdringung, 3D-Punkt, Segment und Kreis) zur Verfügung. Die passende Geometrie wird in einem ersten Schritt in der Liste ausgewählt und in einem zweiten Schritt berechnet. Vorgaben können auch eingegeben werden, aber wie schon im vorherigen Abschnitt erklärt, wäre es in unserem Fall unrelevant gewesen. Ist die Geometrie erzeugt, werden

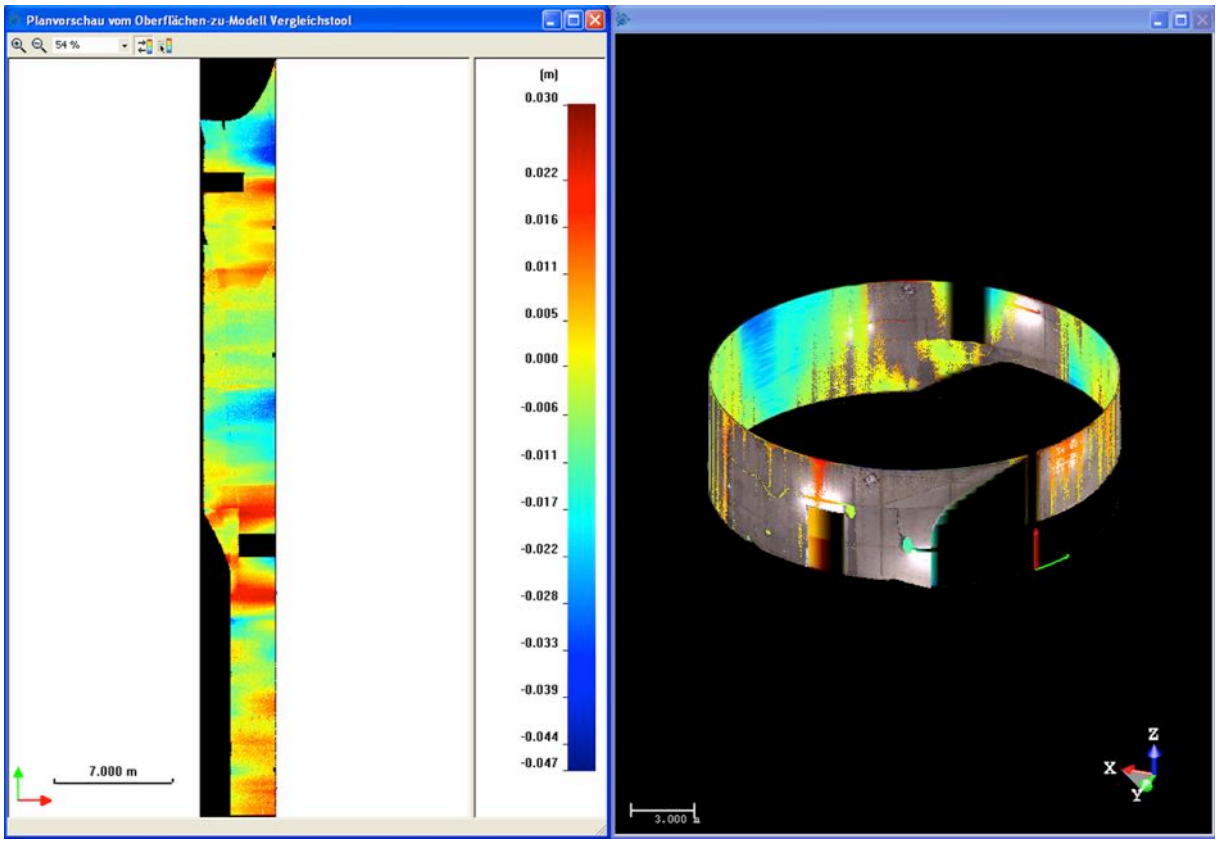
ihre Eigenschaften sowie die RMS (Root Mean Square, engl. für Standardabweichung) und die Anzahl der verwendeten Punkte im Ansichtsfenster angezeigt (Abb. 4.9). Nachdem die Geometrie erzeugt worden ist, kann sie mittels des „Geometrie Modifizierungstools" nachbearbeitet werden.

Es ist noch anzumerken, dass in RealWorks eine Segmentierung sowie eine Filterung der Punktwolke in jedem Tool möglich ist. Sollten einige Ausreißer noch nachträglich entdeckt werden, können sie also direkt im Modellierungstool ausgeschnitten werden. Dies spielt eine wichtige Rolle, um überhaupt Ausreißer zu eliminieren, weil im Gegensatz zu Cyclone keine Dicke für den Bereich um die Fläche eingegeben werden kann. Das bedeutet, dass alle Punkte in die Berechnung der Geometrie einfließen und das Ergebnis beeinflussen.

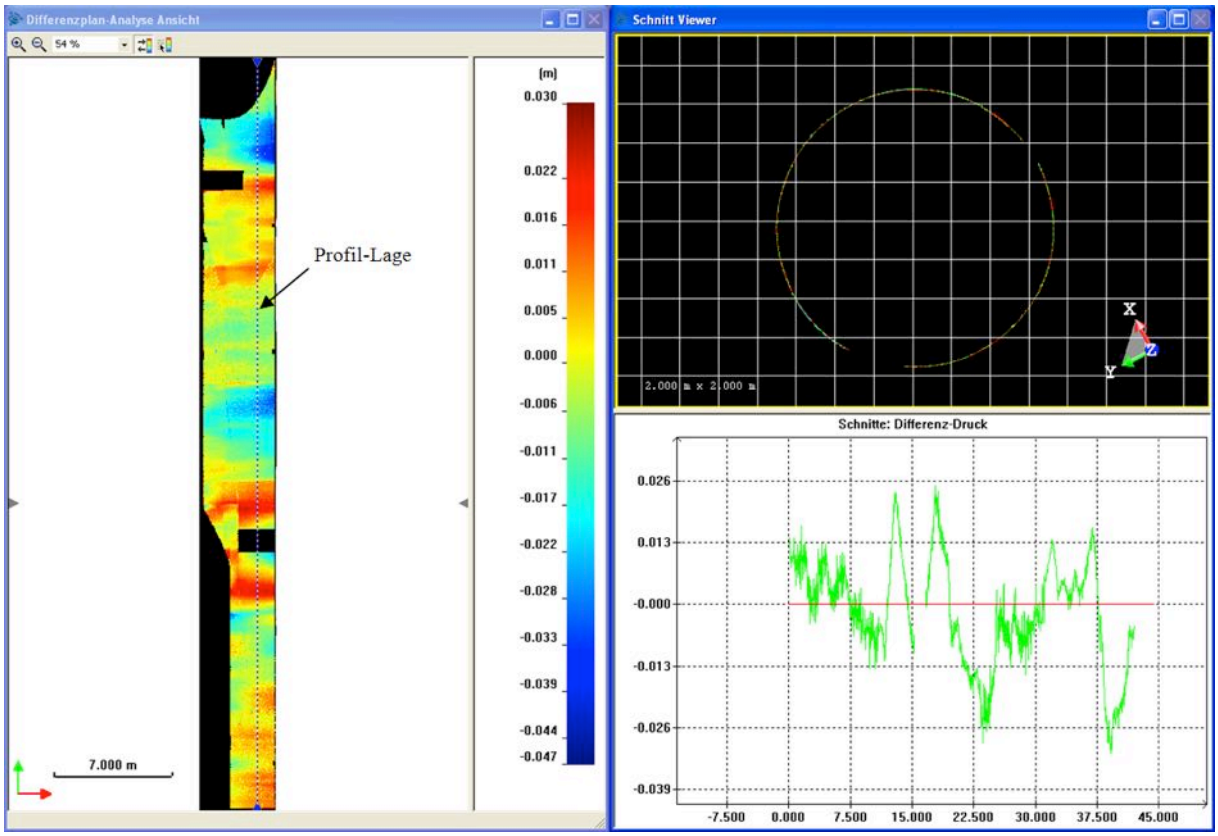
Die Modellierung ist in RealWorks besonders interessant, weil das Programm im Modul „Bearbeitung" ein „Modell-Oberflächen-Vergleichs-Tool" anbietet. Durch die Anpassung einer ausgleichenden Fläche an die Punktwolke sollte es nämlich möglich sein, das geometrische Messrauschen zu bestimmen. Im Tool muss zuerst die Auflösung eingegeben werden. Sie entspricht der Seitenlänge des Rasters, in dem die Abstände gerechnet werden. Nach einigen Versuchen wurde eine Rasterweite von 3cm gewählt, weil sie die besten Ergebnisse lieferte. Es wurden also Quadrate mit einer Fläche von 9cm^2, die durchschnittlich zwei Punkte beinhalten, gebildet. In jedem Quadrat wird für jeden Punkt die Entfernung zur Referenz bzw. zum Modell gerechnet und diese Werten werden gemittelt. Der Mittelwert wird dann dem entsprechenden Quadrat zugewiesen. Über den Befehl „Voransicht" wird die Planvorschau der Inspektion erzeugt (Abb. 4.10a). Es handelt sich um die farbige Darstellung der gemittelten Abständen. Die Skala liefert auch den maximalen und minimalen Mittelwert. Bei dem vorliegenden Beispiel (Wände aus der Trimble-Punktwolke) liegen die Abweichungen zwischen -4,7cm (dunkelblau) und +3,0cm (rot). Es werden allerdings nicht nur das reine geometrische Messrauschen sondern auch systematische Abweichungen beschrieben, was durch eine „Differenzplan-Analyse" (Abb. 4.10b) bestätigt wurde.

Dieses zusätzliche Tool erlaubt u.a. vertikale und horinzontale Schnitte über das Ergebnis des Vergleiches zu legen. In der Abb. 4.10b sind drei verschiedenen Ansichtsfenster zu finden: die Planvorschau mit der Profil-Lage (links), die Darstellung des Profils in der (X,Y)-Ebene (rechts oben) und die Graphik der entsprechenden Differenzen zur ausgleichenden Fläche (rechts unten). Bei dieser bildet die rote horizontale Linie die Referenz ab und in grün werden die Abweichungen zum Modell repräsentiert. Bei diesem Beispiel liegen die maximalen Abweichungen etwa zwischen -3,0cm und +2,5cm. Es ist zu erkennen, dass die eigentliche Konstruktion nicht dem Verlauf der ausgleichenden Fläche folgt. Die Form der Wände entspricht offensichtlich nicht genau einem Zylinder, so dass die Annäherung der gesamten Punktwolke mit dieser einfachen geometrischen Figur (Regelfläche) nicht zur Ermittlung des geometrischen Messrauschens verwendet werden kann. Dazu musste eine andere Lösung gefunden werden (s. Kap. 5.1).

Alle von der Software angebotenen Funktionen zur Modellierung der Punktwolke sowie zum Vergleich und Analyse der Ergebnisse können hier nicht ausführlich beschrieben werden. Es ist aber anzumerken, dass RealWorks viele verschieden Möglichkeiten anbietet, deren Umsetzung dank einer intuitiv bedienbaren Benutzeroberfläche vereinfacht wird.



(a) Planvorschau



(b) Differenzplan-Analyse mit Visualisierung der Profil-Lage

Abbildung 4.10: „Modell-Oberflächen-Vergleichs-Tool" in RealWorks

Ein Vermaschungs-Tool steht in RealWorks auch zur Verfügung. Da das Verfahren bei zu großen Datenmengen scheitert, ist es sinnvoll, in einem ersten Schritt die Punktwolke durch Segmentierung und Filterung auszudünnen. Dann bietet die Software fünf verschiedene Vermaschungsmethoden (bzw. Projektionsmodi) zur Auswahl an:

- **Ebenen-basierende Projektion:** die Vermaschung wird auf eine vom Anwender ausgewählten Ebene projiziert
- **Zylinder-basierende Projektion:** die Vermaschung wird auf einen Zylinder projiziert, dessen Eigenschaften vom Benutzer definiert werden können
- **Bildschirmansicht-basierende Projektion:** die Vermaschung wird auf eine Ebene projiziert, welche vom aktuellen Bildschirmansicht abhängig ist
- **Stations-basierende Projektion:** die Vermaschung wird auf eine Ebene projiziert, welche nach der Scanrichtung definiert ist
- **Zunehmende Vermaschung:** die Vermaschung stammt aus der zunehmenden Verbindung vom einem Punkt zum Nächstliegenden

Ist die Vermaschung durchgeführt worden, kann das Ergebnis mittels des „Maschenbearbeitungs-Tools" weiterverarbeitet werden. Beispielsweise sind die Befehle „Verfeinern", „Glätten" und „Spitzen entfernen" vorhanden. Sowohl beim „Glätten" als auch beim „Spitzen entfernen" wird von RealWorks eine ausgleichende Fläche ermittelt. Die Dreieckspunkte die am weitesten davon entfernt liegen, werden entweder in Richtung der Fläche verschoben („Glätten") oder komplett gelöscht (einschließlich zugehörige Dreiecke). Diese Funktionen ermöglichen zwar die Beseitigung von Ausreißern, man sollte allerdings vorsichtig damit umgehen, um nicht an einem zu großen Informationsverlust zu leiden. Abb. 4.11 zeigt die zunehmende Vermaschung der gefilterten Trimble-Punktwolke (räumliches Filtern: 3cm).

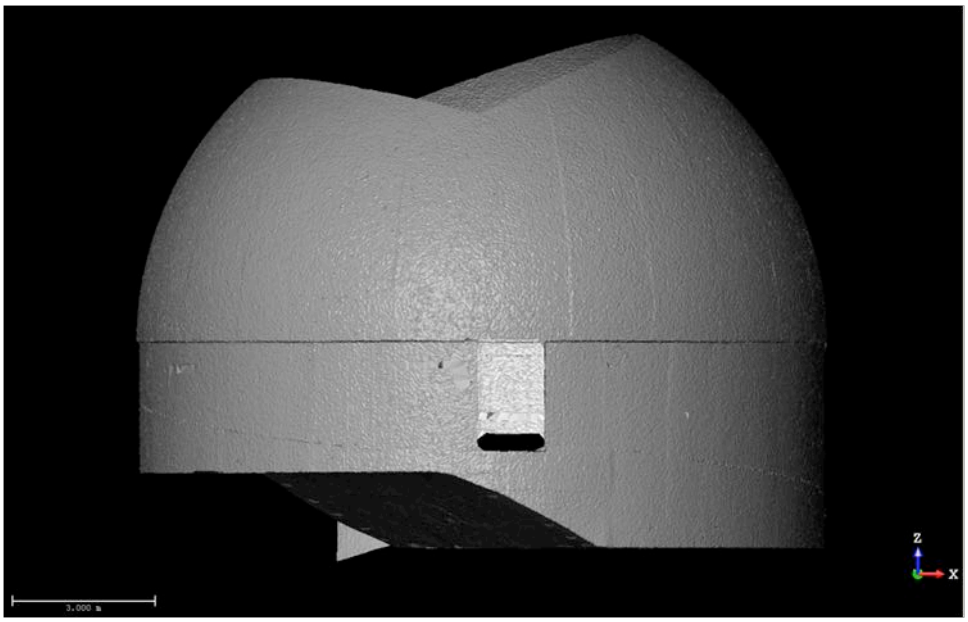


Abbildung 4.11: „ZunehmendeVermaschung" der Trimble-Punktwolke in RealWorks

KAPITEL 5

AUSWERTUNG DER LASERSCANAUFNAHMEN

5.1 Bestimmung des geometrischen Messrauschens

Es ist grundsätzlich nicht möglich, fehlerfrei zu messen. Zufällige Messabweichungen, die durch die Einwirkung einer Vielzahl von unkontrollierbaren Störeinflüssen entstehen, bezeichnen die nicht beherrschbaren und nicht einseitig gerichteten Streuungen der Messwerte um den wahren Wert [http://de.wikipedia.org/wiki/Messabweichung]. Deswegen sind sogar beim Scannen einer exakten Ebene nicht alle Messpunkte genau koplanar. Das geometrische Messrauschen wird durch die orthogonalen Abstände der Messpunkte zu einer durch die Punktwolke gelegten ausgleichenden Fläche beschrieben.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird die angewandte Methode zur Bestimmung einer ausgleichenden Ebene erläutert. Aufgrund der Geometrie des Hörsaals (die Wände und die Kuppel können nicht ohne Weiteres durch eine Ebene angenähert werden) und der systematischen Abweichungen, die in RealWorks dank dem „Modell-Oberfläche-Vergleichs-Tool" hervorgehoben wurden (s. Kap. 4.2.3), wurden zur Berechnung der Messungenauigkeiten kleine, lokale Bereiche aus den Punktwolken ausgeschnitten, deren echte Form ohne Verlust an Genauigkeit durch eine Ebene approximiert werden kann, was im zweiten Kapitel nachgewiesen wird. Schließlich wird der verwendete Rechenvorgang zur Bestimmung des geometrischen Messrauschens erklärt und die erhaltenen Ergebnisse dargestellt.

5.1.1 Methode zur Bestimmung einer ausgleichenden Ebene

Eine Ebene wird im euklidischen Raum $\mathbb{R}^3$ durch ihre Hesse'sche Normalform eindeutig festgelegt. In Matrizenschreibweise wird sie folgendermaßen definiert:

$$n_0 \cdot x_i - d = 0 \tag{5.1}$$

mit n_0 : normierter Normalvektor der Ebene
d : Abstand der Ebene zum Koordinatenursprung
x_i: Koordinatenvektor eines Punktes P_i auf der Ebene

Da die TLS-Punktwolke deutlich mehr als drei Punkte enthält, existiert i.A. keine eindeutige Lösung für die Gl. 5.1 und eine ausgleichende Ebene muss bestimmt werden. Die Ausgleichungsrechnung ist eine Optimierungsmethode, um für eine Reihe von Messdaten die unbekannten Parametern ihres mathematischen Modells zu bestimmen, so dass sich das endgültige Modell den Daten bestmöglich anpasst. Im Allgemeinen wird dafür die Methode der kleinsten Quadrate eingesetzt, die auf die Minimierung der Summe der Quadrate aller einzelnen Abweichungen v_i zwischen Mess- und Modelldaten beruht.

Zur Ermittlung einer ausgleichenden Ebene müssen die Parameter ($n_{0,x}$, $n_{0,y}$, $n_{0,z}$, d) bestimmt werden. Für jeden Messpunkt P_i wird eine Verbesserungsgleichung aufgestellt:

$$v_i = n_0 \cdot x_i - d \tag{5.2}$$

Wird die Ebene durch ihre Hesse'sche Normalform beschrieben, stehen die Verbesserungen v_i orthogonal zur Ausgleichsebene und entsprechen deshalb den Abständen der jeweiligen Punkten zur Ebene.

Zunächst werden, zur Eliminierung des Abstandsparameters d, schwerpunktreduzierten Koordinaten für die gegebenen Punkten eingeführt. Daraus ergeben sich die Designmatrix A und die Normalgleichungsmatrix N.

Durch eine Spektralzerlegung der Normalgleichungsmatrix können die Eigenwerte sowie die dazugehörigen, senkrecht zueinander liegenden normierten Eigenvektoren ermittelt werden. Der gesuchte normierte Normalenvektor n_0 entspricht dem Eigenvektor mit dem kleinsten Eigenwert λ_{min}, der selbst der Summe der zur Ebene orthogonalen Abstände v_i^2 entspricht [Eling, 2009]. Schließlich lässt sich der Abstandsparameter d der ausgleichenden Ebene wie folgt berechnen:

$$d = \frac{1}{n}(n_{0,x}\sum_{i=1}^{n} x_i + n_{0,y}\sum_{i=1}^{n} y_i + n_{0,z}\sum_{i=1}^{n} z_i) \tag{5.3}$$

Diese Methode wurde in Matlab (*Matrix Laboratory*) implementiert. Dieses Programmpaket ist hierfür besonders geeignet, weil viele vordefinierte Funktionen für Matrizen vorhanden sind. Das Programm ist im Anhang C zu finden.

5.1.2 Vorbereitung der Patches

Die Methode zur Bestimmung der ausgleichenden Ebene konnte aber nicht über die gesamte Punktwolke ohne eine sorgfältige Vorbereitung verwendet werden. Erstens können die Kuppel und die Wände differentiell nur für kleine Bereiche mit Hilfe einer Ebene approximiert werden. Zweitens wurde bei der Modellierung der Punktwolke in RealWorks festgestellt, dass systematische Abweichungen aufgrund der Abweichungen des Bauwerks von der idealen Form auftreten. Deswegen hätte sogar eine Annäherung der gesamten Bodenpunkte zu unberechtigt großen Verbesserungen, die nicht dem zufälligen geometrischen Messrauschen sondern den systematischen Abweichungen zur idealisierten Bodenfläche (Trend in den Daten) entsprechen, geführt.

Es wurde daher entschieden, aus den Punktwolken kleine rechteckige Patches auszuschneiden, die dann einzeln ausgewertet wurden. Zur Erzeugung der Patches, wurden drei Elemente des

Hörsaals betrachtet: der horizontale Boden, die zylindrischen Wände und die kugelförmige Kuppel. Die ca. 1m² großen Patches wurden anhand des Vergleiches mit der modellierten Fläche ausgewählt, so dass sie sich in einem Bereich mit geringen systematischen Abweichungen befinden (Abb. 5.1)., um deren Einfluss zu reduzieren. Trotzdem wäre die Anpassung einer ausgleichenden Ebene auf 1m² immer noch nicht genau genug gewesen. Deshalb wurden diese Patches selbst nochmals in kleinere Sub-Patches (20cm × 20cm) unterteilt. Dieser Rechenvorgang erfolgte anhand der aus RealWorks exportierten Daten in einem zusätzlichen, selbstgeschriebenen Sortierprogramm. Zur leichteren Unterteilung und zum Aufbau einer genügend großen Stichprobe wurden einerseits fünf Patches vom Boden in der (X,Y)-Ebene (Grundrissebene), andererseits jeweils zwei Patches im Zylinder- sowie im Kuppelbereich in der (X,Z)- und in der (Y,Z)-Ebene, gewählt. Da die aus RealWorks ausgeschnittenen Patches nur genähert 1m² groß waren, wurden aus einem Patch 12 bis 25 kleine Sub-Patches und entsprechend viele Dateien erzeugt.

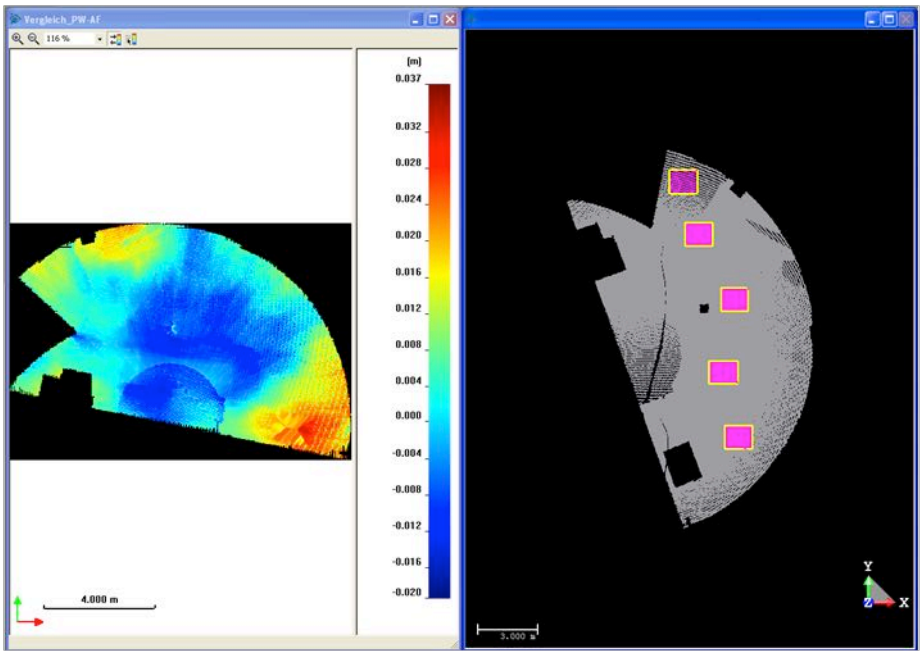


Abbildung 5.1: Auswahl der Patches für den Boden

Insgesamt wurden 285 Patches für die Leica-Punktwolke und 225 für die Trimble-Punktwolke generiert, was eine ausreichende Redundanz für eine aussagekräftige Bestimmung des mittleren geometrischen Messrauschens sicherstellt.

Es sei noch anzumerken, dass die Rasterweite von 20cm × 20cm nicht zufällig sondern aufgrund folgender Überlegungen und Berechnungen ausgewählt wurde. Erstens wird auf diese Weise, sogar bei einer geringen Punktdichte, eine ausreichende Punktanzahl (zur Berechnung einer ausgleichenden Ebene) pro Patch gewährleistet. Zweitens kann bewiesen werden, dass der Krümmungspfeil in der Kuppel sowie für die Wände kleiner als die Messgenauigkeit ist, so dass diese kleinen gekrümmten Flächen ohne signifikanten (messbaren) Fehlereinfluss durch eine Ebene angenähert werden können (Abb. 5.2). Dies kann folgendermaßen veranschaulicht werden:

Aus Abb. 5.2 ergibt sich $\Delta = R - h$

Mit $h^2 = R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2$ folgt $h = \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2}$ und somit $\Delta = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2}$

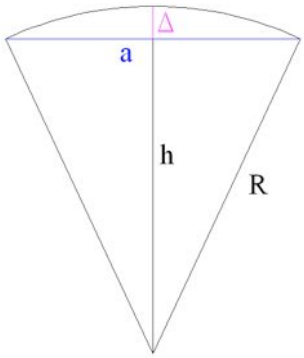


Abbildung 5.2: Einfluss der Krümmung in der Halbkugel und im Zylinder

Setzt man die konkreten Werten für das „Haus der Astronomie" ein

- Radius $R = 7,2m$
- Rasterweite $a = 0,2m$

so ergibt sich $h = 7,1993m$

und somit $\Delta = 0,7mm$

Für eine ausgleichende Ebene wird diese maximale Abweichung noch geringer, so dass deren Einfluss auf die Ergebnisse vernachlässigt werden kann, insbesondere unter Berücksichtigung der Oberflächenrauhigkeit der Betonflächen des Hörsaals.

5.1.3 Eingesetzte Methodik und Ergebnisse

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde für jedes Sub-Patch zuerst die Parameter der Ausgleichsebene gerechnet. Die dank dem Ausgleichungsverfahren erhaltenen Verbesserungen entsprechen den orthogonalen Abständen der Messpunkte zur Ebene. Daraus wurde der Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung (geometrisches Messrauschen) ermittelt. Dieser umfassende Rechenvorgang wurde in Matlab so implementiert, dass alle Dateien, die die Patches enthalten, systematisch bearbeitet werden. Das Programm gibt pro Patch eine Text-Datei aus, die für jeden kleinen Sub-Bereich die berechneten Ebenenparameter sowie den Mittelwert der absoluten Abstände und die Standardabweichung beinhaltet. Die einzige Bedingung ist, dass nur die Dateien mit mehr als 20 Punkte bearbeitet werden. Sie werden in einer weiteren Text-Datei aufgelistet und deren Anzahl ermittelt: 26 Patches, die alle aus der Leica-Punktwolke stammten, wurden deswegen ausgeschlossen.

Die Ergebnisse wurden dann in einer Excel-Tabelle ausgewertet. Sowohl für den Mittelwert als auch für die Standardabweichung wurde aus den Sub-Bereichen eines Patches das arithmetische Mittel gebildet. Daraus wurde jeweils für den Boden, die Kuppel und die Wände der mittlere Wert Berechnet. Tab. 5.1 bis 5.4 stellen die Ergebnisse für alle Patches bzw. Sub-Patches der Leica- und Trimble-Punktwolke sowohl in der Kuppel als auch für den Boden dar. Da die Werte für ein Gesamt-Patch minimal streuen, können die d_M und σ_i der einzelnen Sub-Patches ohne Weiteres zusammengefasst werden.

LEICA Sub-Patches	d_M [mm]				σ [mm]			
Kuppel	Patch1	Patch2	Patch3	Patch4	Patch1	Patch2	Patch3	Patch4
L_K-01	0,7	0,9	0,9	0,8	±1,0	±1,1	±1,1	±1,0
L_K-02	0,7	0,6	1,0	0,7	±0,9	±0,8	±1,2	±0,9
L_K-03	0,9	1,2	0,9	0,7	±1,1	±1,6	±1,1	±0,9
L_K-04	0,7	0,7	1,2	1,0	±0,9	±0,9	±1,5	±1,2
L_K-05	0,9	0,8	0,8	0,8	±1,0	±0,9	±1,0	±1,0
L_K-06	0,8	0,7	1,0	1,1	±1,0	±0,8	±1,2	±1,4
L_K-07	0,8	0,7	0,7	0,9	±1,0	±0,8	±0,9	±1,1
L_K-08	1,0	1,7	1,0	1,0	±1,2	±2,1	±1,2	±1,2
L_K-09	0,7	0,6	0,9	1,0	±0,9	±0,8	±1,2	±1,2
L_K-10	0,5	0,9	0,8	0,9	±0,7	±1,0	±1,1	±1,0
L_K-11	0,7	0,7	0,9	0,8	±0,8	±0,9	±1,1	±1,0
L_K-12	0,7	0,6	0,8	0,8	±0,9	±0,8	±1,0	±1,0
L_K-13	0,7	1,9	1,0	0,9	±0,9	±2,2	±1,2	±1,0
L_K-14	0,8	0,7	0,9	1,2	±1,0	±0,8	±1,2	±1,4
L_K-15	0,7	0,7	0,8	0,8	±0,9	±0,8	±1,0	±1,0
L_K-16	0,9	0,7	0,9	0,9	±1,2	±0,9	±1,1	±1,0
L_K-17	0,6	0,7	0,8	0,9	±0,8	±0,9	±1,0	±1,1
L_K-18	0,9	2,1	1,1	1,2	±1,2	±2,4	±1,4	±1,6
L_K-19	0,8	0,8	0,9	1,3	±1,0	±1,0	±1,1	±1,6
L_K-20	0,8	0,6	0,9	0,8	±1,0	±0,8	±1,1	±1,0
L_K-21	0,8	0,8	0,8	0,8	±1,0	±1,0	±1,0	±1,0
L_K-22	0,8	0,8	0,8	0,9	±0,9	±0,9	±1,0	±1,1
L_K-23	0,9	1,8	0,9	1,2	±1,1	±2,1	±1,1	±1,5
L_K-24	0,7	0,7	1,0	1,2	±1,0	±0,9	±1,2	±1,6
L_K-25	0,7	0,6	0,8	0,8	±0,9	±0,8	±1,0	±1,0
Mittelwert	0,8	0,9	0,9	0,9	±1,0	±1,1	±1,1	±1,2
Mittelwert	**0,9**				**±1,1**			

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Bestimmung der Mittelwerte der absoluten Abstände d_M und der Standardabweichungen σ (Messrauschen) für alle Sub-Patches aus der Leica-Punktwolke der Kuppel

LEICA Sub-Patches	d_M [mm]					σ [mm]				
Boden	Patch1	Patch2	Patch3	Patch4	Patch5	Patch1	Patch2	Patch3	Patch4	Patch5
L_B-01	-	1,3	1,2	1,1	2,2	-	±1,5	±1,4	±1,3	±2,7
L_B-02	-	1,4	1,4	1,1	2,8	-	±1,6	±1,6	±1,2	±3,4
L_B-03	-	1,3	1,2	1,0	2,8	-	±1,5	±1,5	±1,2	±3,4
L_B-04	-	1,3	1,3	1,1	2,7	-	±1,6	±1,5	±1,4	±3,3
L_B-05	-	1,4	1,3	1,1	-	-	±1,7	±1,5	±1,3	-
L_B-06	-	1,4	1,2	0,9	2,5	-	±1,6	±1,4	±1,1	±3,1
L_B-07	1,6	1,5	1,3	1,1	2,7	±2,0	±1,7	±1,5	±1,3	±3,2
L_B-08	1,8	1,4	1,4	1,1	2,4	±2,1	±1,7	±1,6	±1,3	±2,8
L_B-09	2,1	1,4	1,3	1,2	1,6	±2,4	±1,7	±1,5	±1,5	±1,8
L_B-10	-	1,4	1,5	1,2	1,8	-	±1,7	±1,8	±1,5	±2,1
L_B-11	-	1,5	1,3	1,1	2,5	-	±1,7	±1,6	±1,2	±3,0
L_B-12	-	1,6	1,2	1,1	2,0	-	±1,9	±1,5	±1,3	±2,4
L_B-13	2,2	1,5	1,3	1,1	1,6	±2,5	±1,8	±1,5	±1,3	±1,9
L_B-14	-	1,3	1,4	1,1	1,6	-	±1,6	±1,7	±1,3	±2,0
L_B-15	-	1,6	1,4	1,1	1,8	-	±1,9	±1,7	±1,3	±2,0
L_B-16	-	1,5	1,3	1,0	1,6	-	±1,8	±1,6	±1,2	±1,9
L_B-17	-	1,6	1,4	1,1	1,5	-	±1,9	±1,6	±1,3	±1,8
L_B-18	-	1,6	1,5	1,1	1,5	-	±1,9	±1,7	±1,4	±1,8
L_B-19	-	1,6	1,5	1,2	1,4	-	±1,8	±1,7	±1,5	±1,7
L_B-20	-	1,6	1,4	1,3	1,5	-	±1,9	±1,6	±1,5	±1,8
L_B-21	-	1,7	1,2	0,9	-	-	±2,0	±1,5	±1,1	-
L_B-22	-	1,8	1,4	1,0	1,5	-	±2,2	±1,7	±1,2	±1,8
L_B-23	-	1,6	1,5	1,1	-	-	±2,0	±1,7	±1,3	-
L_B-24	-	1,4	1,4	1,1	-	-	±1,7	±1,7	±1,3	-
L_B-25	-	1,7	1,2	1,2	-	-	±2,0	±1,5	±1,4	-
Mittelwert	1,9	1,5	1,3	1,1	2,0	±2,3	±1,8	±1,6	±1,3	±2,4
Mittelwert	**1,6**					**±1,9**				

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Bestimmung der Mittelwerte der absoluten Abstände d_M und der Standardabweichungen σ (Messrauschen) für alle Sub-Patches aus der Leica-Punktwolke des Bodens

TRIMBLE Sub-Patches	d_M [mm]				σ [mm]			
Kuppel	Patch1	Patch2	Patch3	Patch4	Patch1	Patch2	Patch3	Patch4
T_K-01	2,6	2,4	2,1	3,1	±3,1	±3,2	±2,5	±3,7
T_K-02	2,9	2,3	2,1	3,0	±3,6	±3,1	±2,7	±3,6
T_K-03	2,5	2,5	2,5	3,1	±3,2	±3,2	±3,2	±3,7
T_K-04	2,6	2,1	2,5	2,8	±3,3	±3,2	±3,2	±3,4
T_K-05	2,6	2,4	2,4	3,0	±3,3	±3,0	±3,1	±3,6
T_K-06	2,5	2,6	2,6	3,2	±3,1	±3,2	±3,3	±3,9
T_K-07	2,9	2,5	2,3	2,9	±3,8	±3,4	±3,1	±3,5
T_K-08	2,3	2,5	2,3	2,9	±3,2	±3,2	±2,9	±3,6
T_K-09	2,2	2,7	3,0	3,1	±2,8	±3,2	±3,9	±3,7
T_K-10	2,2	1,9	2,7	2,9	±3,0	±2,6	±3,5	±3,6
T_K-11	2,4	2,3	2,2	3,0	±3,0	±2,9	±2,9	±3,7
T_K-12	2,9	2,1	2,3	2,9	±3,8	±2,8	±2,9	±3,6
T_K-13	2,4	2,3	2,0	3,1	±2,9	±2,8	±2,6	±3,7
T_K-14	2,2	1,6	2,5	3,0	±2,7	±2,1	±3,2	±3,7
T_K-15	2,1	2,1	2,6	2,9	±2,8	±2,6	±3,3	±3,6
T_K-16	2,5	2,3	2,0	2,7	±3,0	±2,9	±2,5	±3,3
T_K-17	2,6	2,3	2,6	3,0	±3,2	±3,0	±3,3	±3,6
T_K-18	2,8	2,3	2,2	2,9	±3,6	±2,9	±3,0	±3,5
T_K-19	2,6	1,9	2,3	3,1	±3,2	±2,4	±3,0	±3,7
T_K-20	2,4	2,4	2,5	2,9	±3,0	±2,8	±3,2	±3,6
T_K-21		2,1		3,0		±2,7		±3,6
T_K-22		2,3		2,9		±3,0		±3,6
T_K-23		2,8		2,8		±3,4		±3,4
T_K-24		2,1		2,9		±2,5		±3,6
T_K-25		2,1		3,0		±2,5		±3,7
Mittelwert	2,5	2,3	2,4	3,0	±3,2	±2,9	±3,1	±3,6
Mittelwert	2,5				**±3,2**			

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Bestimmung der Mittelwerte d_M und der Standardabweichungen σ (Messrauschen) für alle Sub-Patches aus der Trimble-Punktwolke der Kuppel

TRIMBLE Sub-Patches	d_M **[mm]**					σ **[mm]**				
Boden	Patch1	Patch2	Patch3	Patch4	Patch5	Patch1	Patch2	Patch3	Patch4	Patch5
T_B-01	0,8	0,7	0,7	0,8	0,9	±1,1	±0,9	±0,9	±1,1	±1,1
T_B-02	0,9	0,5	0,8	1,0	1,1	±1,3	±0,8	±1,0	±1,3	±1,4
T_B-03	0,6	0,8	0,7	0,7	1,1	±0,8	±1,0	±0,9	±0,9	±1,3
T_B-04	1,0	0,4	0,7	1,0	1,0	±1,2	±0,6	±1,0	±1,3	±1,3
T_B-05	0,8	0,7	1,0	0,9	0,9	±1,1	±0,8	±1,2	±1,2	±1,1
T_B-06	0,9	0,9	0,6	0,9	1,1	±1,1	±1,1	±0,9	±1,2	±1,4
T_B-07	0,8	1,0	1,1	0,7	1,1	±1,0	±1,3	±1,3	±0,9	±1,3
T_B-08	0,9	0,9	0,9	0,9	1,2	±1,1	±1,3	±1,1	±1,2	±1,6
T_B-09	0,8	1,1	1,0	0,8	1,0	±1,0	±1,4	±1,1	±1,0	±1,3
T_B-10	1,0	1,1	1,1	0,8	1,2	±1,2	±1,4	±1,4	±1,0	±1,5
T_B-11	0,9	0,7	1,1	0,8	1,0	±1,2	±0,9	±1,4	±0,9	±1,3
T_B-12	1,0	0,7	0,8	0,7	0,8	±1,2	±0,9	±1,1	±0,9	±1,1
T_B-13	0,9			0,7	1,1	±1,1			±0,9	±1,3
T_B-14	0,8			0,8	0,9	±1,0			±1,2	±1,2
T_B-15	0,9			1,1	1,0	±1,1			±1,3	±1,3
T_B-16	1,0			0,8		±1,3			±1,1	
T_B-17				0,8					±1,1	
T_B-18				1,1					±1,3	
T_B-19				0,8					±1,0	
T_B-20				0,7					±1,0	
Mittelwert	0,9	0,8	0,9	0,8	1,0	±1,1	±1,0	±1,1	±1,1	±1,3
Mittelwert	**0,9**					**±1,1**				

Tabelle 5.4: Ergebnisse der Bestimmung der Mittelwerte d_M und der Standardabweichungen σ (Messrauschen) für alle Sub-Patches aus der Trimble-Punktwolke des Bodens

Letztendlich wurde für die Leica- und Trimble-Punktwolke jeweils ein Mittelwert der absoluten Abstände und der Standardabweichungen über alle verwendeten Daten ermittelt. Was in der zusammenfassenden Tab. 5.5 auffällt ist einerseits, dass die Trimble-Punktwolke schlechtere Ergebnisse als die Leica-Punktwolke liefert. Dies könnte daran liegen, dass die Trimble-Patches aus den vor Ort registrierten und georeferenzierten Punktwolken ausgeschnitten wurden, während nur die georeferenzierte Einzelscan SW1 als Grundlage für die Bestimmung des Messrauschens der Leica-Punktwolke verwendet wurde. Obwohl es beim Trimble ebenfalls Bereiche gibt, die nur von einem Scan erfasst wurden, hätten sie bei der Unterteilung in Sub-Patches nicht verwendet werden können, weil sie nicht in einer bestimmten Ebene liegen und deswegen vom Programm nicht bearbeitet werden konnten.

Andererseits sind die Einzelwerten für den Boden, die Kuppel und die Wände auch interessant. Dass die Patches der Wände die besten Ergebnisse liefern und die vom Boden die Schlechtesten ist beim Leica-Datensatz nachvollziehbar. Sowohl der Zylinder als auch die Halbkugel bestehen aus Fertigteilen, die aus einem feineren Beton angefertigt wurden als der vor Ort abgegossenen Bodenbelag. Die für die Leica-Punktwolke erhaltenen Werte haben sich aus früheren Untersuchungen mit ebenen Testtafeln bestätigt [Voegtle und Wakaluk, 2009]. Diese Interpretation passt jedoch für die Trimble-Patches nicht. Auffallend ist, dass das deutlich kleinste Messrauschen für den Boden erhalten wurde. Es hätte daran liegen können, dass drei der fünf Boden-Patches aus einer einzelnen Punktwolke stammen und deshalb eine deutlich geringere Punktdichte aufweisen. Die Ergebnisse sind aber für die fünf Patches kaum unterschiedlich (Tab. 5.4).

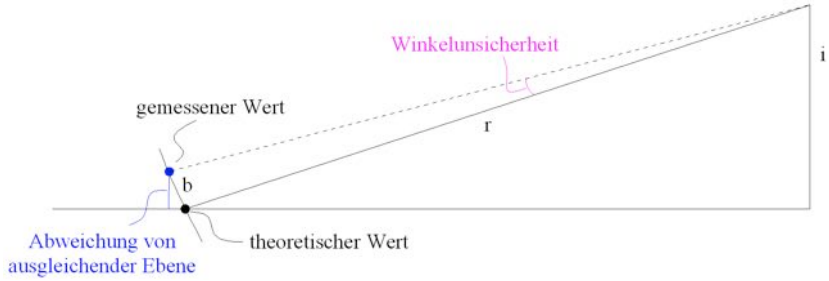
Eine weitere Erklärung könnte sein, dass die für die zwei Laserscanner unterschiedlichen Strecken- und Winkelmessgenauigkeiten sich bei den verschiedenen Einfallswinkeln auf die Ergebnisse auswirken. Der Boden wurde nämlich eher flach gemessen, während die Kuppel und die Wände nahezu senkrecht aufgenommen wurden. Die Ungenauigkeit der Entfernungsmessung hat einen geringeren Einfluss bei flachen als bei steilen Aufnahmen und umgekehrt hat die Winkelmessgenauigkeit eine stärkere Einwirkung bei flachen Messungen. Der Einfluss der Winkelunsicherheit bzw. eines Entfernungsfehlers auf die ermittelte Abweichung zur ausgleichenden Ebene beim flachen Einfallswinkel wird in Abb. 5.3 veranschaulicht. Die Bogenlänge b (Abb. 5.3a) entspricht etwa der Abweichung des gemessenen Punktes zur ausgleichenden Ebene und wird folgendermaßen berechnet:

$$b = r \cdot \alpha \tag{5.4}$$

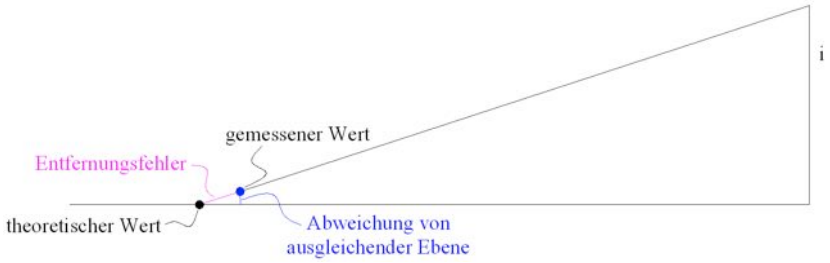
mit b : Bogenlänge [m]
r : Entfernung [m]
α: Winkelunsicherheit [rad]

Beispielsweise für eine Entfernung von 10m ergibt sich aus der Gl. 5.4 eine Bogenlänge von 0,7mm für den Trimble GX und rund 1,3mm für den Leica-Laserscanner. Somit sind bereits wegen den Eigenschaften der Messeinrichtungen deutliche Unterschiede in den Ergebnissen zu erwarten. Dies bedeutet, dass die für den Boden erhaltene Standardabweichung σ sich in erster Linie aus der Winkelunsicherheit und der Rauhigkeit des Bodenbelags zusammensetzt. Da

die Winkelmesseinrichtung des Trimble GX fast doppelt so gut wie die des Leica HDS6000 ist ($\pm 70\mu$rad gegenüber $\pm 125\mu$rad), könnte es erklären, wieso das geometrische Messrauschen des Bodens bei ±1,1mm für Trimble und ±1,9mm für Leica liegt. Unter Berücksichtigung der Bodenrauhigkeit scheinen jedoch die erhaltenen Werte für das geometrische Messrauschen des Bodens zu optimistisch zu sein.



(a) Einfluss der Winkelunsicherheit



(b) Einfluss des Entfernungsfehlers

Abbildung 5.3: Einfluss der Winkel- bzw. Streckenmessgenauigkeit auf die Abweichung zur ausgleichenden Ebene bei flachem Einfallswinkel

		Mittelwert	
LEICA	**Anzahl der Sub-Patches**	d_M [mm]	σ [mm]
Boden	99	1,6	±1,9
Kuppel	100	0,9	±1,1
Wände	60	0,7	±0,8
	Mittelwert	**1,1**	**±1,3**

		Mittelwert	
TRIMBLE	**Anzahl der Sub-Patches**	d_M [mm]	σ [mm]
Boden	75	0,9	±1,1
Kuppel	90	2,5	±3,2
Wände	60	2,3	±2,9
	Mittelwert	**1,9**	**±2,4**

Tabelle 5.5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Bestimmung des geometrischen Messrauschens (d_M : Mittelwert der absoluten Abstände, σ : Standardabweichung = Messrauschen)

Insgesamt bleiben diese Ergebnisse allerdings sehr zufriedenstellend, da beide Instrumentenhersteller auf diese Entfernung Genauigkeiten für eine Einzelmessung von etwa 3 bis 5mm ankündigen. Da beim Vergleich der Punktwolken mit dem Modell die höchsten Abweichungen im Zentimeterbereich zu erwarten sind, sollten Messgenauigkeiten von ±1,3mm bzw. ±2,4mm keine entscheidende Rolle spielen, so dass die erhaltenen Diskrepanzen eindeutig eingeordnet werden können.

5.2 Vergleich der Punktwolken mit dem CAD-Modell

Ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit war ein Vergleich der Punktwolken mit dem von den Architekten hergestellten CAD-Modell. Dies wurde mit verschiedenen Software-Systemen durchgeführt: RealWorks, CloudCompare und Rhinoceros 3D. Die erste wurde bereits präsentiert. Die zweite ist eine von einem französischen Ingenieur entwickelte Software, die frei im Internet verfügbar ist und kostenlos heruntergeladen werden kann. Rhinoceros 3D (kurz: Rhino) ist ein CAD-Programm zur dreidimensionalen Modellierung, dessen Funktionen sich besonders für das industrielle Design eignen. Das zum Vergleich verwendete CAD-Modell des „Hauses der Astronomie" stand in Rhino zur Verfügung und musste zuerst in andere Formate exportiert werden, um in RealWorks und CloudCompare eingelesen werden zu können. Die Software bietet eine umfangreiche Auswahl an Export-Formaten. Problematisch war eher eine Datei zu erstellen, die in die anderen Programme überhaupt importiert werden konnte, ohne dass die Hälfte der Information verloren ging. Das CAD-Modell wurde in Rhino so weiterverarbeitet, dass nur die inneren Flächen des Hörsaals übrig blieben, d.h. die Flächen, die für den Vergleich mit den Laserscanaufnahmen relevant waren. Für RealWorks wurde das Modell als AutoCAD-Zeichnung (*.dwg) exportiert und für CloudCompare wurde ein Objekt-Format (*.obj) verwendet.

Sowohl zum Vergleich mit dem CAD-Modell als auch zum Vergleich der Punktwolken untereinander wurden drei Datensätze verwendet: die Trimble-Punktwolke, die Leica-Punktwolke der ScanWorld 1 (abgekürzt SW1) und die Registrierung ScanWorld 1 - ScanWorld 4 (SW1-SW4). Es wurde nämlich festgestellt, dass die beiden ScanWorlds im Kuppelbereich an manchen Stellen um mehr als 5mm verschoben waren, was auf Restfehler der Registrierung zurückzuführen ist. Dies wird in Abb. 5.4 für eine aus der Kuppel (Punktwolke SW1-SW4) ausgeschnittene rechteckige Zone veranschaulicht. In den beiden Ansichten gehören die in lila dargestellten Punkte zur ScanWorld 1, die anderen zur ScanWorld 4. Der Hörsaal im „Haus der Astronomie" ist ein Sonderfall, da bereits von der ersten Station aus fast das komplette Objekt erfasst wurde und die weiteren ScanWorlds keine entscheidende Rolle mehr spielten. Dennoch ist im Regelfall eine Registrierung unvermeidbar. Deswegen wurde entschieden, die Vergleiche sowohl mit der unregistrierten SW1 als auch mit den verknüpften Punktwolken SW1-SW4 durchzuführen.

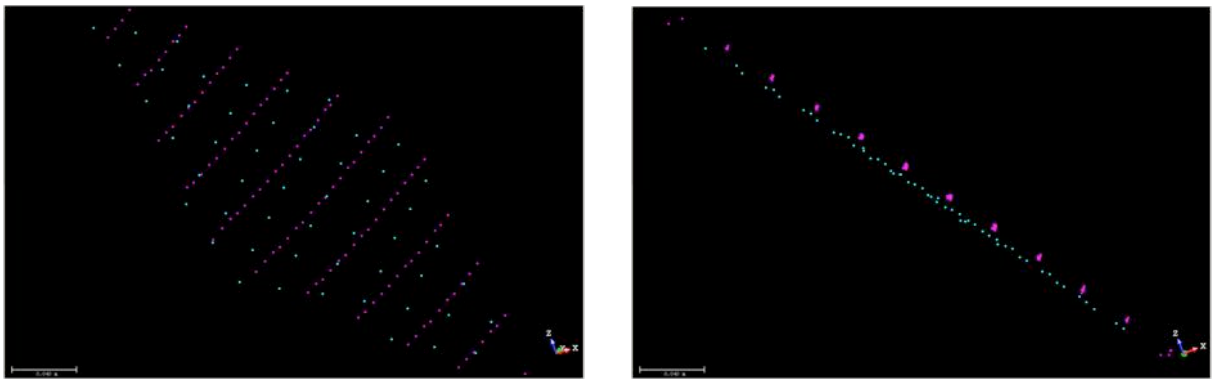


Abbildung 5.4: Abweichungen zwischen SW1 und SW4 nach der Registrierung

In den kommenden Abschnitten werden die Auswertungen anhand der verschiedenen Software-Systeme beschrieben und ihre Ergebnisse miteinander verglichen. Es wird sowohl auf visuelle als auch statistische Aspekte geachtet.

5.2.1 Vergleich in RealWorks

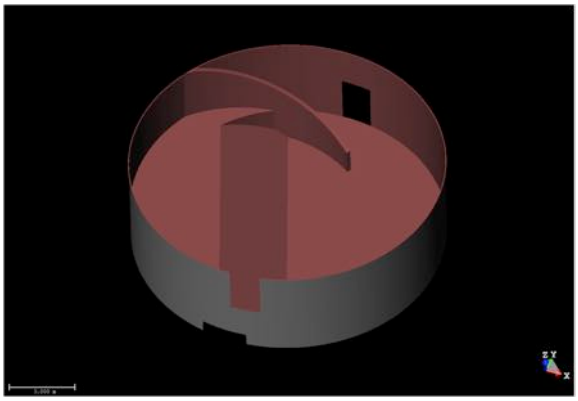
Obwohl das CAD-Modell in Rhinoceros 3D vorlag, wurden die Vergleiche zuerst in RealWorks durchgeführt. Zur Generierung geeigneter Ergebnisse bzw. Abstände muss die Punktwolken nochmals bearbeitet werden, um alle Ausreißer auszufiltern, wozu die Trimble-Software die geeignetste ist. Zunächst wurden drei neue Projekte („Hörsaal", „Kuppel" und „Unten") erstellt und das entsprechende CAD-Modell importiert (Abb. 5.5). In einem weiteren Projekt wurden die Punktwolken in zwei Teile geteilt, so dass der untere und obere Bereich separat bearbeitet werden konnten. Dann begann ein iterativer Vorgang, um die Störmessungen zu eliminieren:

1. Die Punktwolke und das CAD-Modell wurden anhand des Tools „3D Kontrollwerkzeug" verglichen. Unter dem Button „Vorschau" werden die minimale und maximale Entfernungen geliefert. Dank der farbigen Darstellung könnten die Ausreißer leicht aufgefunden und in der Punktwolke gelöscht werden (z.B. im unteren Bereich: Punkte der Verkabelung).

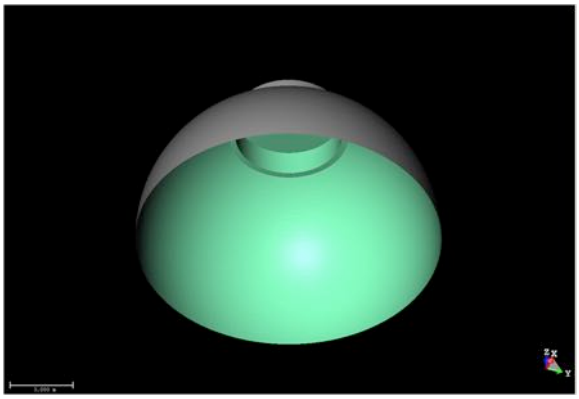
2. Der Schritt 1 wurde solange wiederholt, bis zur kompletten Beseitigung der Ausreißer.

3. Die bereinigten Punktwolken wurden als ASCII-Dateien exportiert, um auch in CloudCompare und Rhino verwendet werden zu können.

Obwohl dieser Prozess sehr zeitaufwändig ist, kann darauf nicht verzichtet werden, wenn man ein gutes Ergebnis beim endgültigen Vergleich erhalten will. Das Resultat ist auch sehr benutzerabhängig, weil der Anwender zu entscheiden hat, ob Punkte Ausreißer sind oder nicht, und weil die Teilung der Punktwolken manuell erfolgt.



(a) Datenbereich „Unterbau"



(b) Datenbereich „Kuppel"

Abbildung 5.5: CAD-Modell in RealWorks (Ansicht: Perspektive)

Sind die Punktwolken bereinigt, kann der endgültige Vergleich mittels des „3D Kontrollwerkzeuges" erfolgen und somit eine neue Kontroll-Punktwolke erzeugt werden. Die Software liefert weder eine Liste mit den Abständen noch statistische Angaben, wie den Mittelwert oder die Standardabweichung. Um eine etwas vollständigere Auswertung überhaupt durchführen zu können, wurde das Ergebnis der 3D-Kontrolle mit dem Tool „3D Kontrolle Analyser" weiterverarbeitet. Dieses Tool erlaubte - durch die Angabe von Grenzwerten für den Abstan dzum Modell - die Kontroll-Punktwolke in kleine Intervalle (1mm) zu unterteilen. So wurde für jedes Intervall (0 bis 1mm, 1 bis 2mm usw.) eine weitere Punktwolke erzeugt, deren Hauptinformation die Anzahl der enthaltenen Punkte darstellte. Diese Werte wurden in eine Excel-Tabelle übernommen,

um daraus Mittelwert und Standardabweichung zu berechnen. Leider wird in dieser Software nicht zwischen den Punkten unterschieden, die oberhalb oder unterhalb des CAD-Modells liegen, sondern es wird lediglich der Betrag des Abstandes berücksichtigt.

Diese Arbeitsschritte wurden sowohl für die Trimble-Daten als auch für die Leica-Punktwolken SW1 und SW1-SW4 jeweils für den gesamten Hörsaal, für die Kuppel und für den unteren Bereich vorgenommen.

Graphische Ergebnisse (RealWorks)

Hier wird die von der Trimble-Software gelieferte Darstellung der Kontroll-Punktwolken anhand einiger Screenshots präsentiert und kommentiert.

Abb. 5.6 und 5.7 zeigen die Ergebnisse des Vergleichs der Leica-Punktwolke SW1 mit dem Rhino-Modell. Im Kuppelbereich ist jeweils etwa im mittleren Bereich der Fertigteile ein Trend (ellipsenförmiger Fleck) zu erkennen, wobei vier der Fertigteile größere Abweichungen zeigen (etwa zwischen 2 und 2,5cm). Darüber hinaus treten zwei verschiedene Fälle auf: die ellipsenförmigen Flecken sind entweder dunkel auf einem hellen Grund oder hell auf einem dunklen Grund. Dies bedeutet, dass die Fertigteile verschiedene Krümmungen bzw. Deformationen aufweisen. Im Unterbau ist zu bemerken, dass der Boden vermutlich nicht eben gebaut wurde, was bei der Modellierung der Punktwolke schon aufgefallen war (s. Kap. 4.2.3). Dazu treten an beiden Enden sowie in der Mitte der Rampe größere Differenzen zum CAD-Modell auf.

Abb. 5.8 stellt die drei Kontroll-Punktwolken aus dem Vergleich des CAD-Modells mit SW1, SW1-SW4 und Trimble im Kuppelbereich dar. Obwohl drei verschiedene Werte für die maximale Abweichung erhalten wurden, ist diese Angabe nicht unbedingt relevant, da sie von der vorher durchgeführten Bereinigung der Punktwolken abhängt (verbliebene Restfehler). Um einen Vergleich zu vereinfachen, wurde eine einheitliche Farbpalette ausgewählt. Standardmäßig passt sie sich nämlich an den Wertenbereich (Maximal-/Minimalwert) an, was in diesem Fall wegen der verschiedenen Maxima eine visuelle Interpretation erschwert hätte. Auf den ersten Blick sehen die Ergebnisse sehr ähnlich aus, wobei im unteren Bereich der Kuppel die Ergebnisse des Trimble-Datensatzes etwas schlechter (die gelbe Farbe ist dominanter) als die der beiden Leica-Punktwolken sind.

Anhand der Abb. 5.9 kann ein ähnlicher Vergleich für den Unterbau des Hörsaals realisiert werden. Wie bei der Kuppel hängen die Unterschiede der Darstellungen eher von den verschiedenen Punktdichten als von deutlichen Abweichungen der Ergebnisse ab. Die Ansicht in Perspektive liefert noch zusätzliche Informationen (Abb. 5.10), nämlich, dass für alle Punktwolken die extremen Werten an der Stelle, wo Brüstung und Wand zusammenstoßen, zu finden sind. In dem Fall der Leica-Punktwolken erscheint auch eine Beule in der Brüstung, die beim Vergleich des Rhino-Modells mit dem Trimble-Datensatz nicht auftritt. Dies liegt daran, dass das Bauwerk an dieser Stelle zwischen der beiden Laserscanaufnahmen nachbearbeitet bzw. geändert wurde.

Die Ergebnisse der Vergleiche der gesamten Punktwolken (kompletter Hörsaal) mit dem CAD-Modell bringen für die Auswertung nicht viel mehr Erkenntnisse als die, die für die Kuppel und den unteren Bereich soeben getrennt vorgestellt wurden. Darüber hinaus sind sie anhand von Screenshots wegen der enormen Datenmengen schwer interpretierbar.

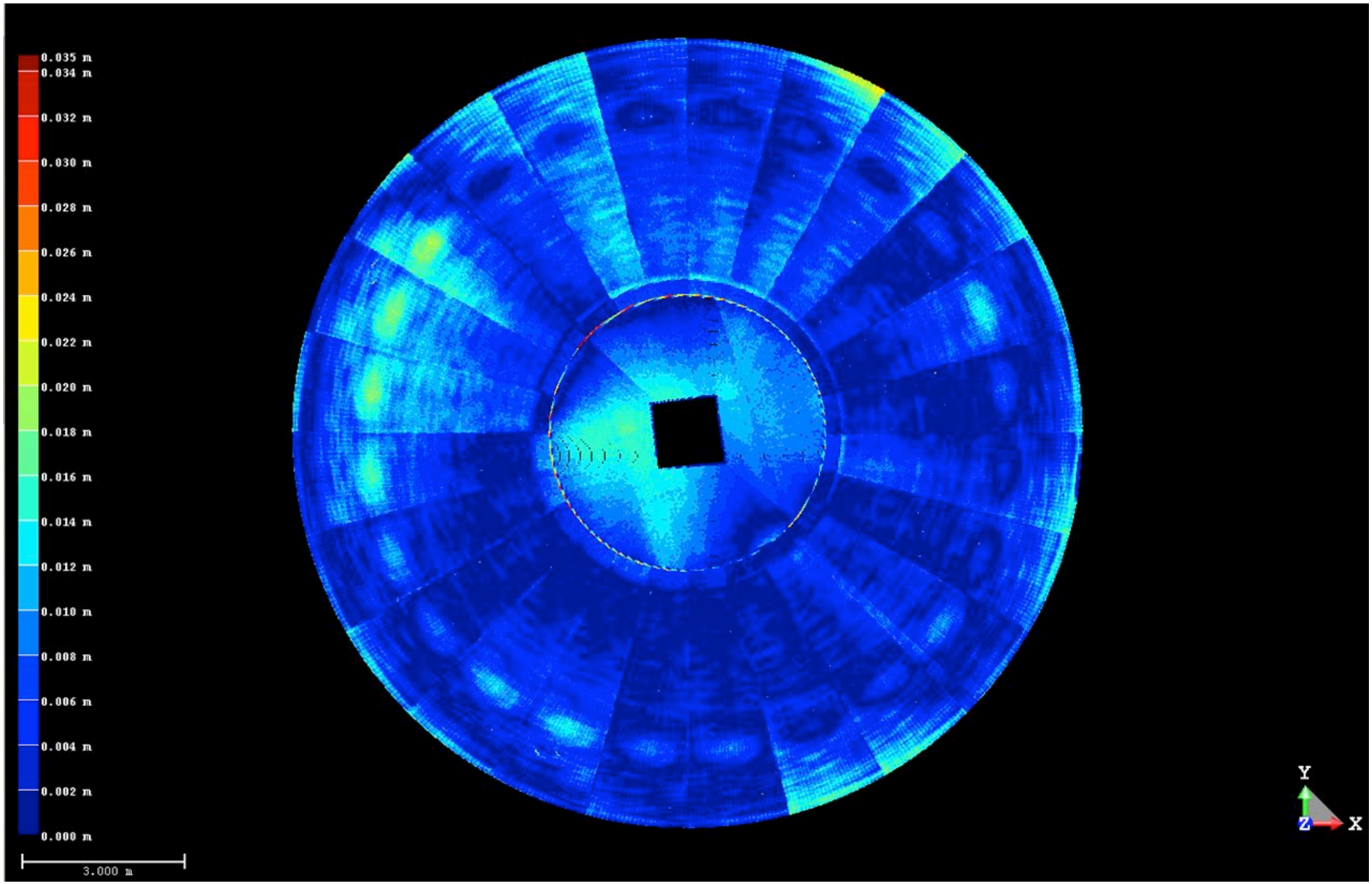


Abbildung 5.6: Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke der Kuppel

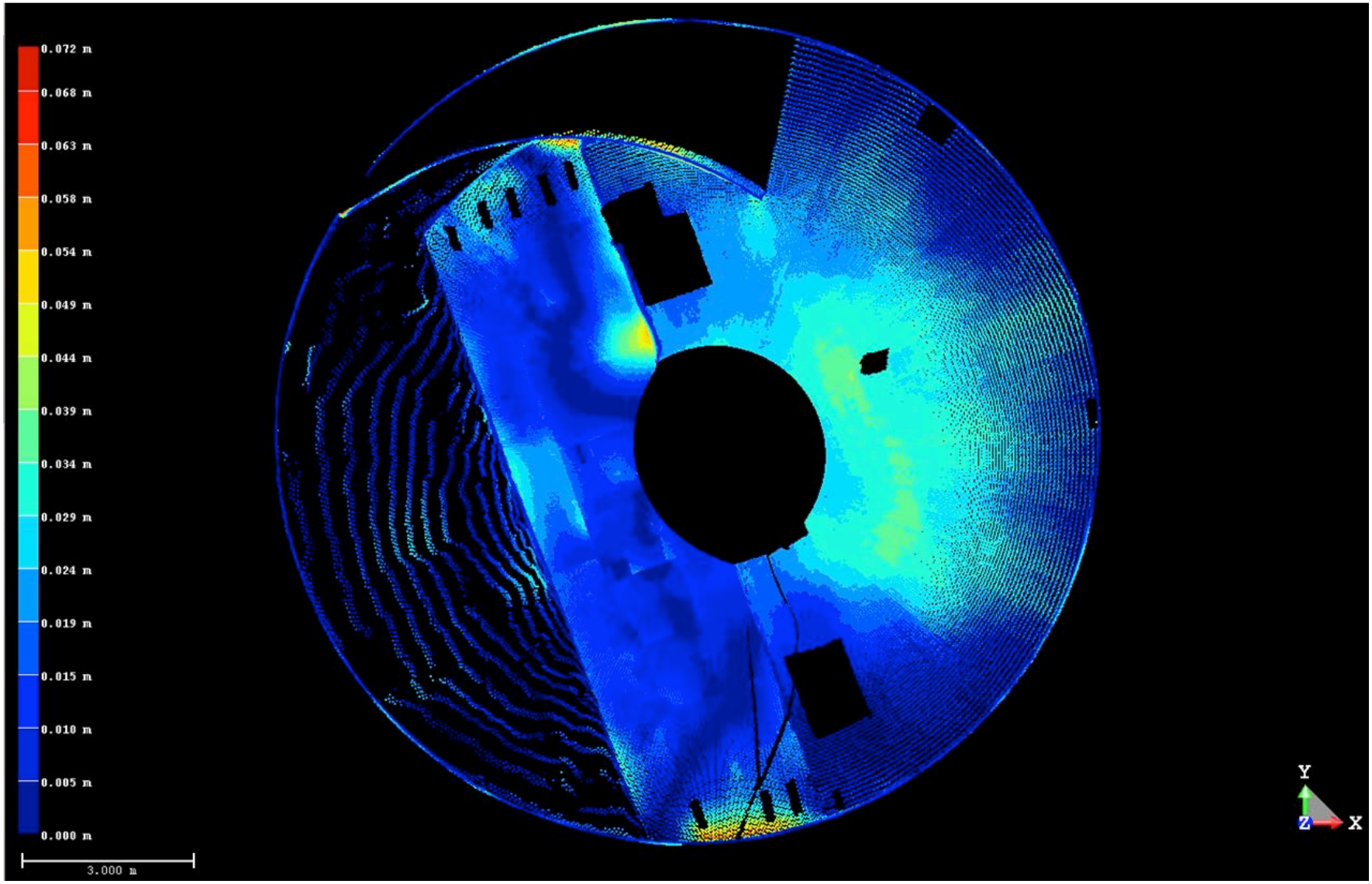
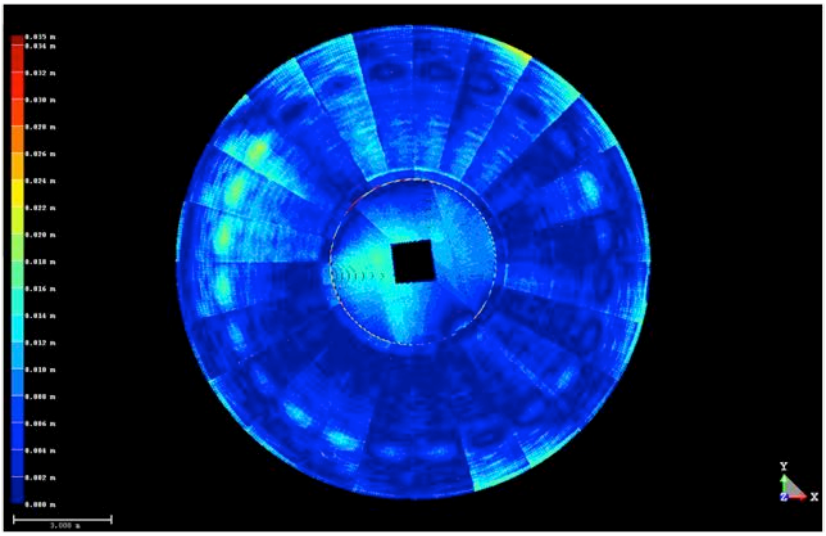
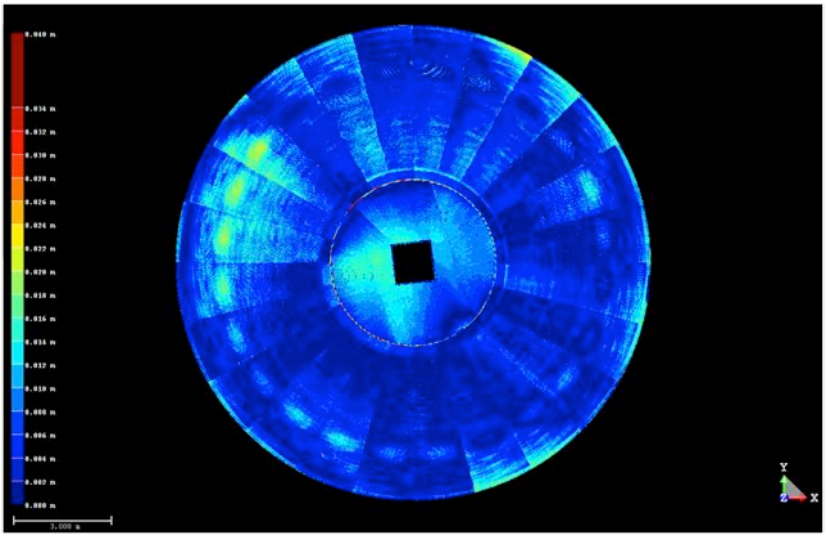


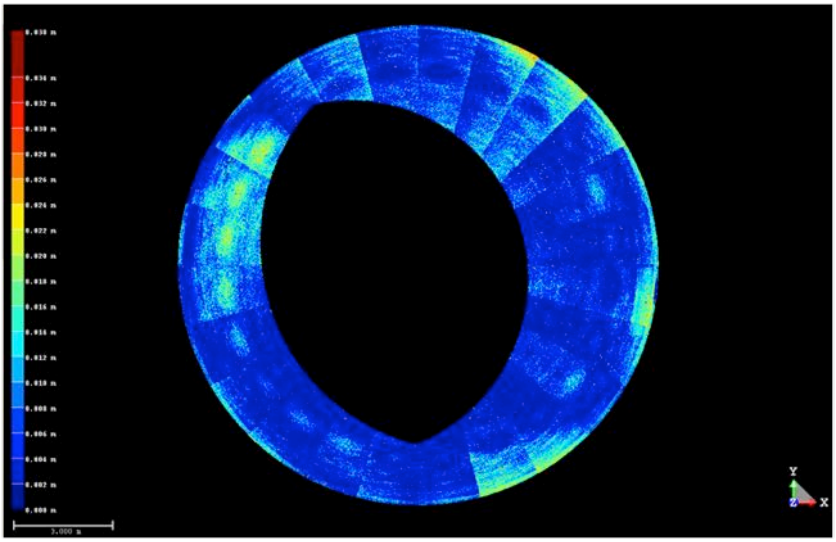
Abbildung 5.7: Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke des unteren Bereiches



(a) SW1

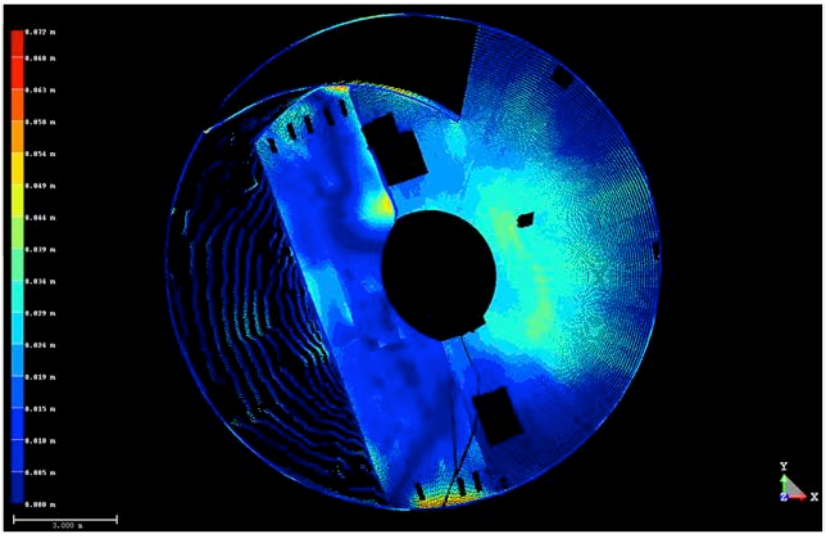


(b) SW1-SW4

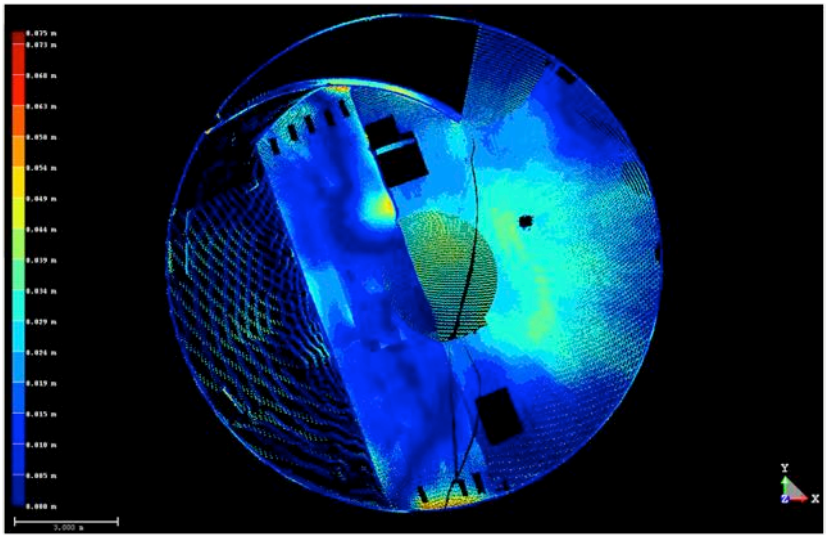


(c) Trimble

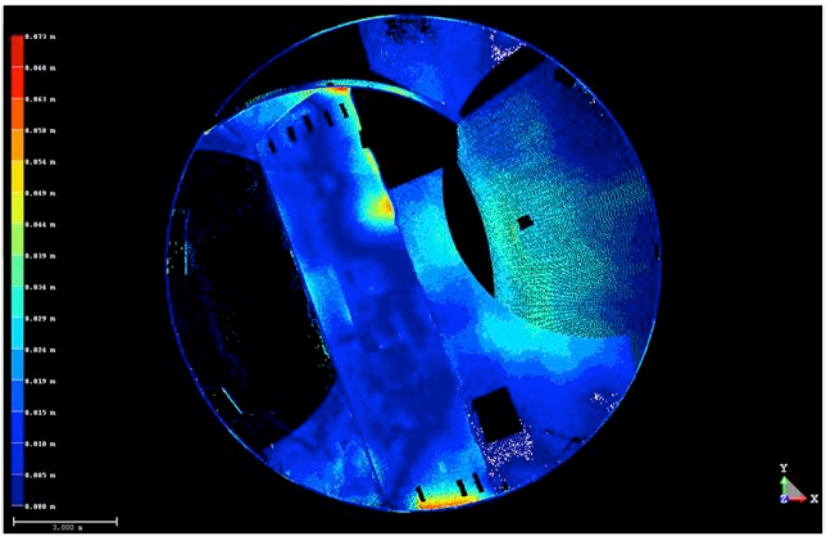
Abbildung 5.8: Vergleich der Leica- (SW1, SW1-SW4) und der Trimble-Punktwolke mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken der Kuppel (Ansicht: Oben)



(a) SW1



(b) SW1-SW4



(c) Trimble

Abbildung 5.9: Vergleich der Leica- (SW1, SW1-SW4) und der Trimble-Punktwolke mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken des unteren Bereiches (Ansicht: Oben)

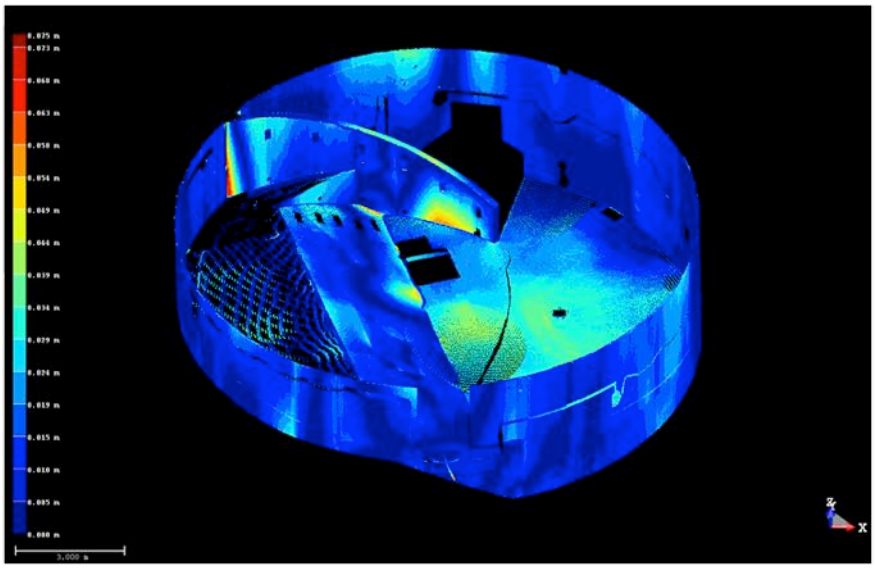


Abbildung 5.10: Vergleich der Leica-Punktwolke SW1-SW4 mit dem CAD-Modell: Unterbau (Ansicht: Perspektive)

Statistische Ergebnisse (Excel)

Die Punktanzahl aller Intervalle aller Punktwolken wurden in Excel-Tabellen eingegeben. Prozentanteile, sowie einen Mittelwert und Standardabweichungen wurden daraus jeweils geschätzt. Der Rechenvorgang wird jetzt anhand des Beispiels der Kuppel der Punktwolke SW1 erklärt. Die Tab. 5.6 enthält die aus dem Vergleich erhaltene Punktanzahl sowie die entsprechenden Prozentanteile der Punkte in Abhängigkeit von der Entfernung. In diesem Fall weisen etwas mehr als 78% der Punkte Abweichungen zum Rhino-Modell zwischen 0 und 1cm auf und 99,65% der Punkte liegen zwischen 0 und 2cm. Der Mittelwert d_M und die Standardabweichungen σ_d (Streuung der Abstandsbeträge um den Mittelwert d_M) und σ (Streuung der Beobachtungen um das CAD-Modell) wurden folgendermaßen ermittelt[1]:

- **Mittelwert d_M:** da nicht für jeden Messpunkt ein Abstandswert vorhanden war, sondern eine bestimmte Datenmenge pro Intervall, konnte der Mittelwert nicht ohne Weiteres mittels der üblichen Formel berechnet werden. Es wurde entschieden, als Abschätzung die mittlere Entfernung jedes Intervalls d_i mit der entsprechenden Punktanzahl n_i zu multiplizieren, davon die Summe zu bilden und das Ergebnis durch die gesamte Datenmenge N zu dividieren.

$$d_M = \frac{\sum_{i=1}^{k} d_i \cdot n_i}{N} \tag{5.5}$$

mit k : Anzahl der Intervalle
d_i : Mittlere Entfernung des i-ten Intervalls
n_i : Punktanzahl im i-ten Intervall
N : Gesamte Punktanzahl

[1]Diese Gleichungen werden in diesem Abschnitt ein einziges Mal erläutert. Sie wurden dennoch bei allen kommenden Vergleichen, die im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit durchgeführt wurden, verwendet.

Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die dass die d_i die Abstandsbeträge darstellen und nicht die vorzeichenbehafteten Abstände.

- **Standardabweichung σ_d:** die Formel musste auch angepasst werden und zwar wurde das Quadrat der Differenz $(d_i - d_M)$ mit der Anzahl der Punkten im i-ten Intervall multipliziert. Die Resultate wurden aufsummiert, durch $(N-1)$ dividiert und die Wurzel davon gebildet. Das Ergebnis entspricht der Streuung der Abstandsbeträge um den Mittelwert, was relativ wenig aussagt.

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k} n_i (d_i - d_M)^2}{N-1}} \tag{5.6}$$

mit k : Anzahl der Intervalle
n_i : Punktanzahl im i-ten Intervall
d_i : Mittlere Entfernung des i-ten Intervalls
d_M : Mittelwert der Abstände
N : Gesamte Punktanzahl

- **Standardabweichung σ:** Interessanter als die Streuung der Abstandsbeträge ist die Streuung der Abstände zum CAD-Modell, die im Prinzip den Verbesserungen v_i entsprechen. Bei dieser Berechnung von σ wird allerdings vorausgesetzt, dass die Abweichungen normalverteilt sind, d.h. dass sie zufällig um die Soll-Fläche streuen, was mindestens im Unterbau nicht grundsätzlich der Fall ist. Es wurde nämlich festgestellt, dass sowohl die Wände als auch der Boden systematische Abweichungen aufweisen (s. Kap. 4.2.3). Trotzdem bleibt dieser Wert aussagekräftiger als σ_d und wird zusätzlich anhand der folgenden Gleichung ermittelt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k} n_i \cdot d_i^2}{N}} \tag{5.7}$$

Bei dem Vergleich der Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell im Kuppelbereich wurden ein mittlerer Abstand von 6,3mm und Standardabweichungen von ±4,4mm (σ_d) bzw. ±7,7mm (σ) berechnet. Bei einer Normalverteilung befinden sich 68% der Punkte zwischen -σ und +σ. Da hier nur die Beträge betrachtet werden, sollte das Intervall [0;σ] 68% der Punkte beinhalten. Da die Prozentanteile ermittelt wurden, kann die Standardabweichung auch anhand der Tabellen geschätzt werden. Laut Tab. 5.6 weisen rund 66,5% der Punkte Abweichungen zum Rhino-Modell auf, die kleiner als 8mm sind, was die berechnete Standardabweichung $\sigma = \pm 7{,}7$mm bestätigt.

Außerdem wurden die Ergebnisse anhand von Histogrammen dargestellt (Abb. 5.11). Bei deren Interpretation sollte man sehr vorsichtig sein: es wurde z.B. bei der graphischen Auswertung in RealWorks festgestellt, dass die Punkte des Unterbaus mit Abständen zum Rhino-Modell gegen 7cm keinen Messfehlern entsprechen, sondern dass sie in jedem Vergleich bei der Kante zwischen der Wand und der Brüstung zu finden sind, also systematisch auftreten. Die insgesamt größeren Abweichungen zum CAD-Modell im unteren Bereich des Hörsaals entsprechen vermutlich der

Unebenheit des Bodens sowie der Beule in der Brüstung, die bereits bei der graphischen Analyse zu erkennen waren. Darüber hinaus könnte es an nicht beseitigten „Störungen" wie Kabel oder Baulampen liegen. Ähnliche Tabellen und Histogramme wurden für den Unterbau und den kompletten Hörsaal erstellt.

Entfernung [m]	Punktanzahl n_i	Prozentanteil	
Gesamt (Leica SW1)	539.102	100%	100%
0,000 - 0,001	55.017	10,21%	
0,001 - 0,002	52.230	9,69%	
0,002 - 0,003	48.216	8,94%	45,43%
0,003 - 0,004	45.841	8,50%	
0,004 - 0,005	43.588	8,09%	
0,005 - 0,006	40.547	7,52%	
0,006 - 0,007	37.570	6,97%	
0,007 - 0,008	34.668	6,43%	32,95%
0,008 - 0,009	33.040	6,13%	
0,009 - 0,010	31.826	5,90%	
0,010 - 0,011	29.500	5,47%	
0,011 - 0,012	24.439	4,53%	
0,012 - 0,013	18.754	3,48%	18,10%
0,013 - 0,014	14.038	2,60%	
0,014 - 0,015	10.852	2,01%	
0,015 - 0,016	7.824	1,45%	
0,016 - 0,017	4.653	0,86%	
0,017 - 0,018	2.491	0,46%	3,17%
0,018 - 0,019	1.343	0,25%	
0,019 - 0,020	766	0,14%	
0,020 - 0,021	550	0,10%	
0,021 - 0,022	442	0,08%	
0,022 - 0,023	300	0,06%	0,30%
0,023 - 0,024	201	0,04%	
0,024 - 0,025	122	0,02%	
0,025 - 0,026	86	0,02%	
0,026 - 0,027	61	0,01%	
0,027 - 0,028	54	0,01%	0,05%
0,028 - 0,029	23	0,00%	
0,029 - 0,030	23	0,00%	
0,030 - 0,031	14	0,00%	
0,031 - 0,032	12	0,00%	
0,032 - 0,033	5	0,00%	0,01%
0,033 - 0,034	2	0,00%	
0,034 - 0,035	3	0,00%	
Kontrolle (Summe)	539.101	100%	100%

Tabelle 5.6: Vergleich der Punktwolke SW1 mit dem Rhino-Modell (Kuppel) in RealWorks - Punktanzahl und Prozentanteil in Abhängigkeit von der Entfernung

Sowohl für die Leica-Punktwolke SW1-SW4 als auch für die Trimble-Daten wurde die Auswertung der von RealWorks gelieferten Ergebnisse auf die selbe Art und Weise durchgeführt. In der Tab. 5.7 wurden alle berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen zusammengefasst.

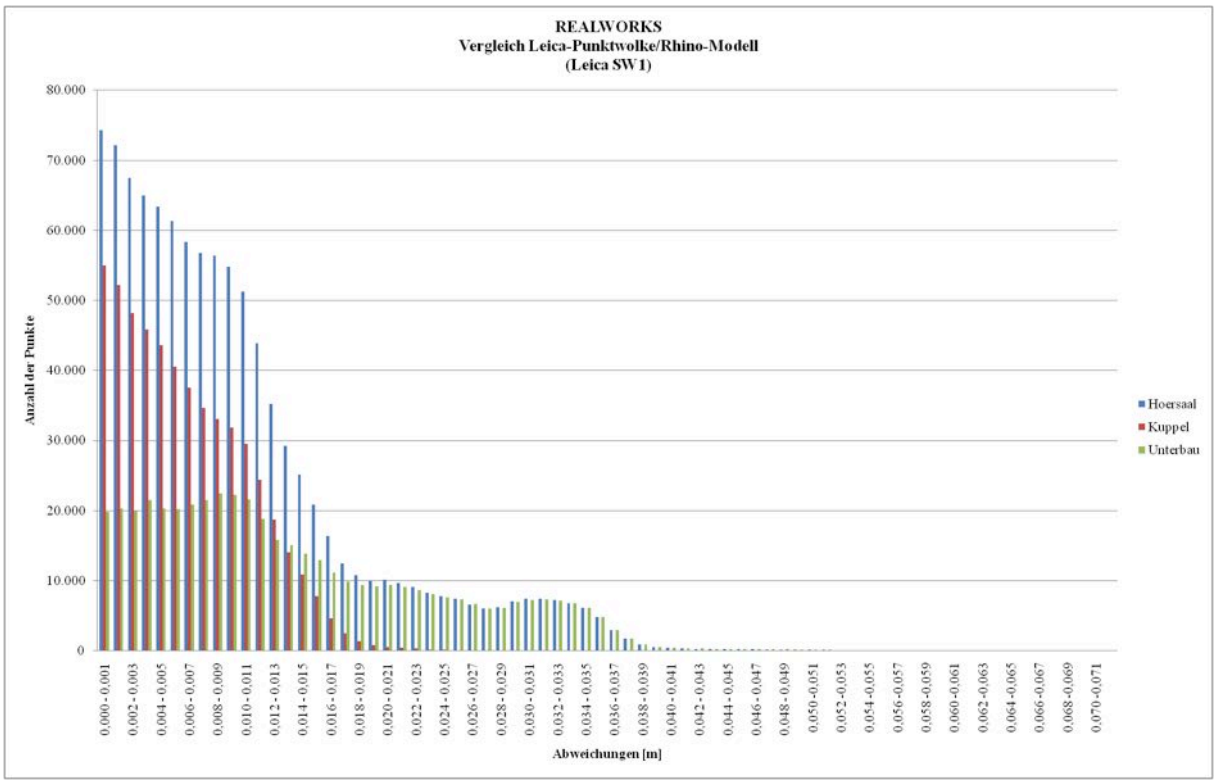


Abbildung 5.11: Vergleich der Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell in RealWorks - Punktanzahl in Abhängigkeit von den Abweichungsbeträgen [m]

	Kuppel			**Unterbau**		
	d_M **[mm]**	σ_d **[mm]**	σ **[mm]**	d_M **[mm]**	σ_d **[mm]**	σ **[mm]**
SW1	6,3	±4,4	±7,7	13,9	±10,3	±17,3
SW1-SW4	6,4	±4,7	±7,9	13,4	±9,0	±16,2
Trimble	7,2	±4,8	±8,6	12,0	±8,5	±14,7
Max.	7,2	±4,8	±8,6	13,9	±10,3	±17,3
Min.	6,3	±4,4	±7,7	12,0	±8,5	±14,7
Diff. (Max-Min)	0,9	0,4	0,9	1,9	1,8	2,6

Tabelle 5.7: Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in RealWorks

Bei einer Analyse der Mittelwerte werden die Resultate der graphischen Interpretation bestätigt. Einerseits treten im Allgemeinen größere Abweichungen im unteren Bereich als in der Kuppel auf. Andererseits sind die Ergebnisse der Kuppel bei der Trimble-Punktwolke etwas schlechter als bei den Leica-Datensätzen, im Gegensatz zu den Werten im unteren Bereich, die durch die Weiterverarbeitung der Brüstung zwischen den beiden Laserscanaufnahmen erklärt werden können. Trotzdem weisen beide Scanner die gleiche Tendenz auf, was bedeutet, dass echte Deformationen gegenüber dem CAD-Modell, die nicht auf das Messrauschen zurückgeführt werden können, vorhanden sind. Diese Ergebnisse konnten somit von den Architekten und der Bauunternehmung weiterverwendet werden. Zur besseren Anpassung der Verkleidung an den Ist-Zustand der Kuppel wurde diese Projektionsfläche nämlich anhand eines aus der Filterung und Vermaschung der Leica-Punktwolke SW1-SW4 erzeugten Polygonnetzes abgesteckt. Ein ähnliches Polygonnetz wurde auch für den Unterbau angefertigt. Es spielte allerdings eine untergeordnete Rolle, da die

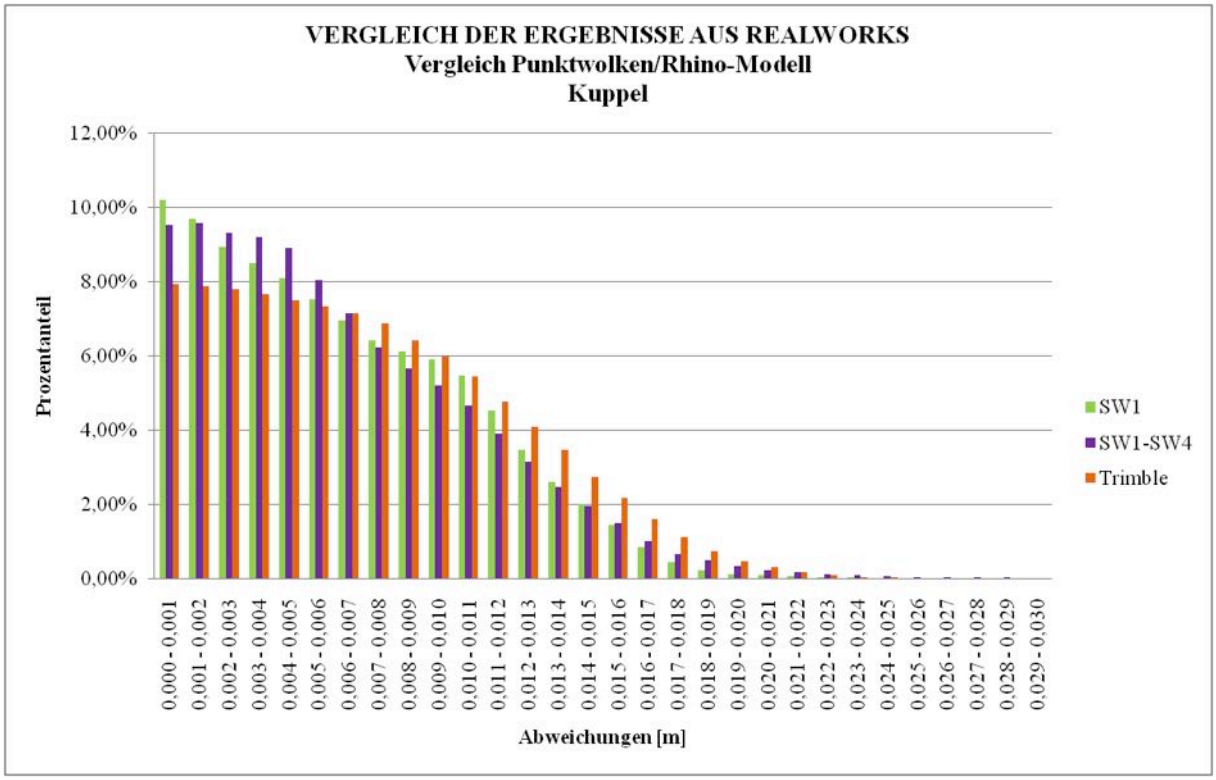
großen Abweichungen bei der Brüstung schon anhand eines selbst durchgeführten tachymetrischen Aufmaßes festgestellt und am Bauwerk korrigiert wurden. Außer bei den Öffnungen und der Brüstung, wo die Maße mit dem Soll-Modell genau zusammenpassen müssen, sind kleinere Deformationen im Unterbau sowieso nicht so kritisch zu bewerten wie die in der Kuppel, da der Belag nicht so genau angebracht wird. Dabei liegen alle berechneten Werte innerhalb der vorgegebenen Toleranzen.

Eine Anmerkung dazu wäre noch, dass ursprünglich größere Abweichungen für die Kuppel erwartet wurden. Da die Elemente beim Einbau der Fertigteile im Kuppelbereich nachbearbeitet wurden und vier Fertigteile sogar neu gegossen wurden, ist eine mittlere Differenz zum Soll-Zustand von rund 7mm erstaunlich niedrig und kann als befriedigend betrachtet werden. Anhand der graphischen Ergebnisse, wurde bereits erkannt, dass die maximale Abweichungen bei etwa 4cm liegen, wobei es sich eher um Einzelpunkte handelt, die bei der Vorbereitung der Punktwolken nicht beseitigt wurden: die tatsächlichen Deformationen zum CAD-Modell in der Kuppel liegen maximal bei 2,5cm. Dieser Wert ist aufgrund der Betonstruktur und Geometrie des Bauwerks sowie aufgrund der soeben beschriebenen Probleme, die beim Einbau auftraten, zufriedenstellend. An dieser Stelle wäre allerdings die Richtung der Abweichungen interessant gewesen, um eine detaillierte Aussage über die Deformationen treffen zu können.

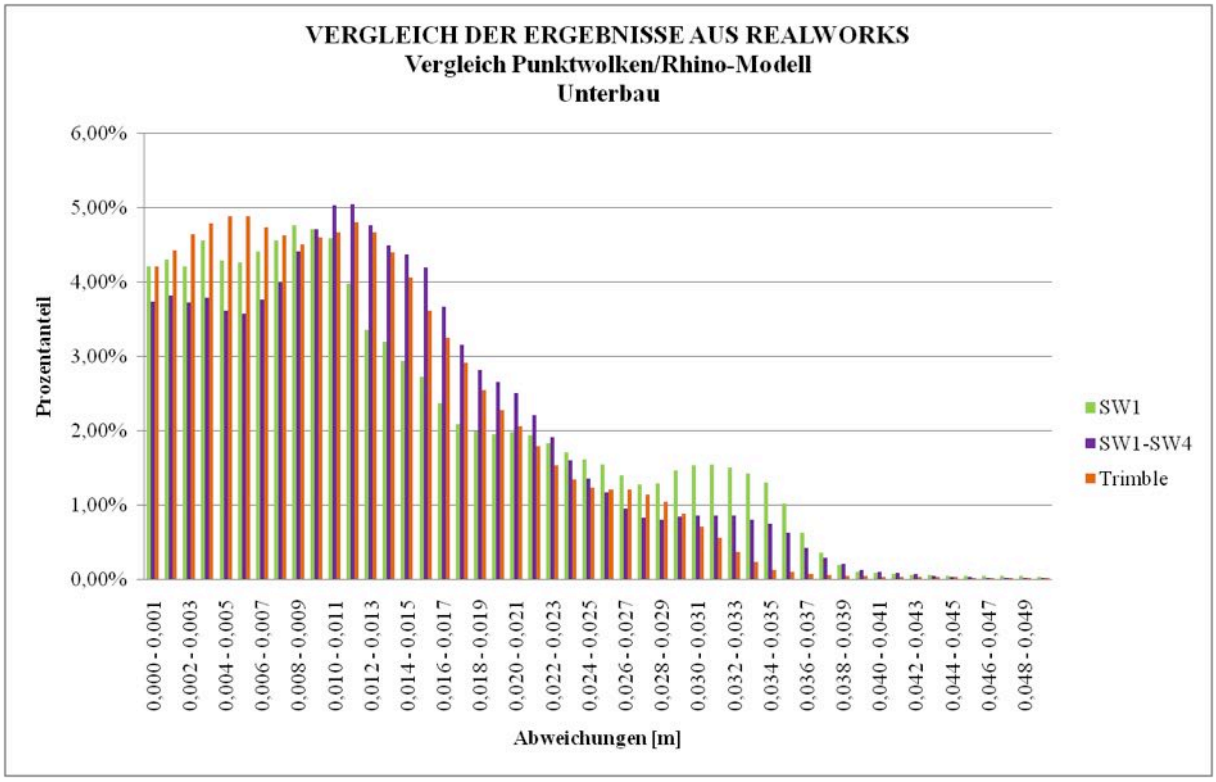
Außerdem können die Ergebnisse auch anhand der Histogramme verglichen werden, wofür nicht die reine Punktanzahl sondern der Prozentanteil in Abhängigkeit von der Entfernung dargestellt wurde. Ein Vergleich der Häufigkeitsverteilung nach der Anzahl der Messpunkte würde nicht sehr relevant sein, weil dieses Kriterium von der bei der Laserscanaufnahme gewählten Auflösung und von den Vorverarbeitungsschritten stark abhängig ist.

Bei der Abb. 5.12 wurden die Skalen auf den Bereich, in dem die Werte in Form von Balken überhaupt noch dargestellt wurden, beschränkt. Die Diagramme bestätigen nochmals die in der Tab. 5.7 zusammengefassten Ergebnisse und deren Interpretation. In der Kuppel (Abb. 5.12a) fällt es schwer, eine Systematik bei der Betrachtung der beiden Leica-Punktwolken aufzudecken. Werden aber die Trimble-Daten ins Spiel gebracht, sind gewisse Abweichungen zu erkennen. Vor dem Intervall 7-8mm sind die orange-farbenen Balken immer niedriger und danach immer höher als die grünen bzw. violetten. Dies bedeutet, dass die mit dem Trimble-Laserscanner in der Kuppel aufgenommenen Punkte insgesamt größere Abweichungen zum Rhino-Modell aufweisen. Im Gegensatz dazu sind, bis etwa 8mm-Abweichung, die Prozentanteile aus dem Vergleich des CAD-Modells mit der Trimble-Punkwolke im unteren Bereich höher als die aus dem Vergleich mit den Leica-Datensätzen. Daraus kann man schließen, dass in diesem Fall die Trimble-Aufnahme näher am Soll-Zustand liegt. Allerdings kann keine Aussage über die Differenzen zum Ist-Zustand getroffen werden, da keine Vergleiche zu Tachymeter-Messungen vorliegen.

Darüber hinaus sind auf der Abb. 5.12b die von der Beule in der Brüstung verursachten größeren Prozentanteile zwischen 2,8 und 3,6cm-Abweichung ganz klar in den Leica-Punktwolken zu erkennen. Der Fakt, dass die grünen Balken höher als die violetten sind, erklärt, wieso der aus der ScanWorld 1 berechnete Mittelwert größer ist als den von SW1-SW4 (13,9mm bzw. 13,4mm). Trotz der laut der Diagramme insgesamt kleineren Abweichungen zwischen SW1 und dem Rhino-Modell, sind die Ergebnisse stark von den bei 3cm größeren Abweichungen beeinträchtigt.



(a) Differenzen in der Kuppel



(b) Differenzen im Unterbau

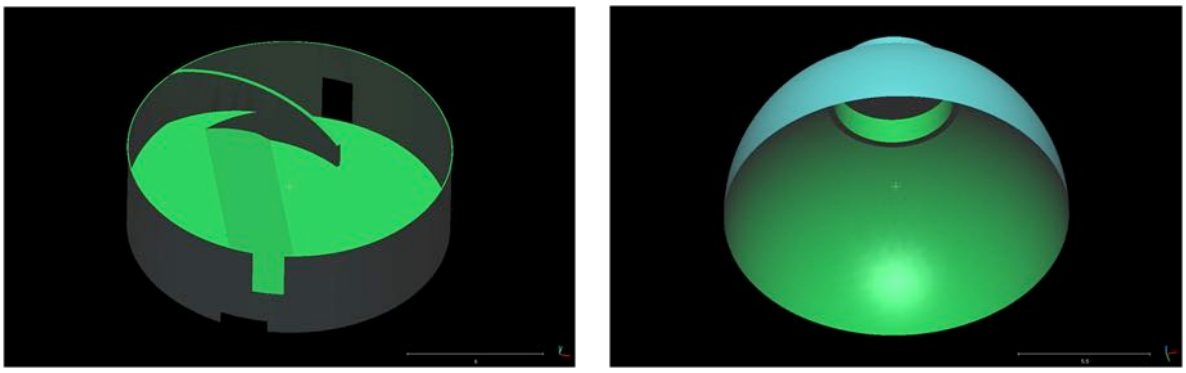
Abbildung 5.12: Darstellung der Ergebnisse aus RealWorks aus dem Vergleich der Punktwolken mit dem CAD-Modell

Wie bei der Interpretation der graphischen Ergebnisse in RealWorks bringen die für den Hörsaal erhaltenen Resultate nicht viel mehr Information mit sich als die, die sich schon aus der Auswertung des Vergleiches in der Kuppel und im unteren Bereich ergeben haben. Deshalb werden sie hier nicht weitergehend kommentiert.

5.2.2 Vergleich in CloudCompare

Diese Software wurde ab 2004 im Rahmen der Doktorarbeit eines französischen Ingenieurs entwickelt, um Vergleiche zwischen zwei 3D-Punktwolken oder zwischen einer Punktwolke und einer Dreiecksvermaschung durchführen zu können. Sie beruht auf einer Octree-Struktur, die für solche Aufgaben besonders leistungsfähig ist und es ermöglicht, große Datenmengen sehr schnell (einige Sekunden[2]) zu bearbeiten. Das Programm bietet auch fortschrittliche Algorithmen, zum Beispiel für die Registrierung, die interaktive oder automatische Segmentierung, die Bestimmung der Abstände zwischen Punktwolken oder für statistische Berechnungen an. Wie es am Anfang des Kapitels schon erwähnt wurde, ist CloudCompare ein OpenSource Projekt und kann ohne Weiteres im Internet heruntergeladen werden [Girardeau-Montaut, 2009].

Als erstes wurden die aus RealWorks im ASCII-Format exportierten Punktwolken und das aus Rhinoceros 3D als Objekt-Datei hergestellte CAD-Modell geöffnet (Abb. 5.13). So wurde mindestens gewährleistet, dass die in der Trimble-Software und in CloudCompare verwendeten Datensätze identisch sind. Bezüglich des Rhino-Modells kann allerdings nicht garantieren werden, dass die DWG- und Objekt-Datei zu 100% übereinstimmen, die Rechenvorgänge beim Export aus Rhinoceros 3D und beim Import in die jeweilige Software seien nämlich unbekannt. Dennoch wurde davon ausgegangen, dass auftretende Abweichungen vernachlässigt werden können.



(a) Datenbereich „Unterbau” (b) Datenbereich „Kuppel”

Abbildung 5.13: CAD-Modell in CloudCompare (Ansicht: Perspektive)

CloudCompare ist eine sehr benutzerfreundliche Software, die auch von unerfahrenen Benutzern intuitiv verwendet werden kann. Der Vergleich zwischen einer Punktwolke und dem Modell erfolgt anhand der Funktion „Cloud/Mesh Dist.”. Nach ungefähr drei Sekunden werden schon die ersten approximativen Ergebnisse in einem neuen Fenster angezeigt (Abb. 5.14). Die minimale, maximale und mittlere Distanzen sowie die Standardabweichung und der maximale Relativfehler

[2]Die Zeitangaben beziehen sich auf einen Computer mit Intel® Core™2 Duo Prozessor von 3GHz und 3,5GB RAM sowie eine Datenmenge von etwa 2 Mio. Punkte (für den gesamten Hörsaal).

werden aus der im ersten Durchgang berechneten Chanfrein'schen Entfernungen[3] ermittelt. Der untere Teil des Fensters ermöglicht genauere Ergebnisse nach der Hausdorff-Metrik[4] zu bestimmen. Der Anwender kann zum Beispiel eine maximale Entfernung eingeben, jenseits derer die Berechnung einer präzisen Distanz nicht notwendig ist. Ein lokales Modell kann auch ausgewählt werden. Diese Möglichkeit wurde bei dem Vergleich der Punktwolken untereinander in Anspruch genommen und wird in dem entsprechenden Abschnitt 5.3.2 beschrieben. Zur Bestimmung der genauen Abstände der Punktwolke SW1 zum CAD-Modell braucht das Programm keine drei Sekunden, was ein Zeichen dafür ist, dass die Software für solche Anwendungen implementiert wurde.

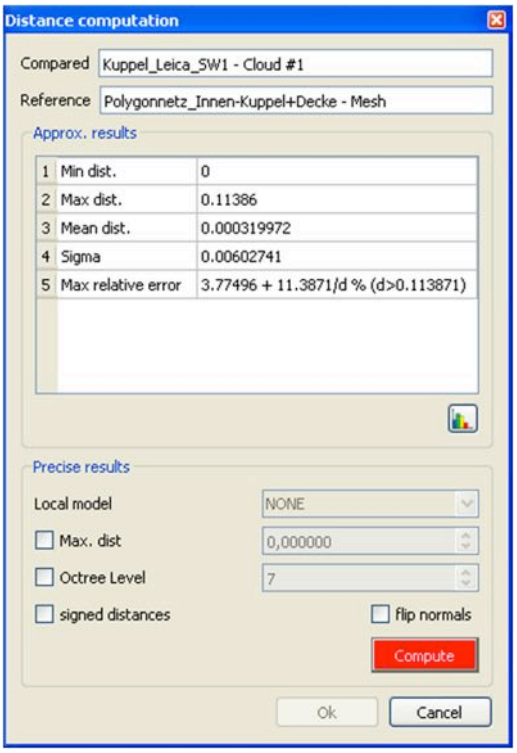


Abbildung 5.14: „Distance computation"-Fenster

In CloudCompare können Ansichtsfenster beliebig geöffnet und eingerichtet werden. Das „3D View 3" in der Abb. 5.15 stellt die Kontroll-Punktwolke für die Kuppel dar, d.h. die Ergebnisse des Vergleiches zwischen der ScanWorld 1 (3D View 1) und dem Rhino-Modell (3D View 2). Um die Auswertung wie in RealWorks durchführen zu können, wurden die Kontroll-Punktwolken sowohl für die Leica-Datensätze als auch für die Trimble-Messdaten erneut in kleine Intervalle (wiederum 1mm) unterteilt. Mit dem Tool „Filter by scalar value" können minimale und maximale Entfernungen eingegeben werden, was die Segmentierung der ursprünglichen Datenmenge und die Herstellung einer neuen Punkwolke für jedes Intervall zur Folge hat. Die Richtung der Abweichung bleibt auch bei dieser Software unbekannt.

[3]Chanfrein'sche Entfernung: diskrete Entfernung, die sehr schnell zu berechnen ist, aber nur eine Annäherung des euklidischen Abstandes liefert [http://fr.wikipedia.org/wiki/Distance_de_chanfrein]

[4]Hausdorff-Metrik: Abstand δ(A,B) zwischen nichtleeren kompakten Teilmengen A, B eines metrischen Raums E. Anschaulich haben zwei kompakte Teilmengen umso geringeren Hausdorff-Abstand, je besser sie einander wechselseitig überdecken [http://de.wikipedia.org/wiki/Hausdorff-Metrik]

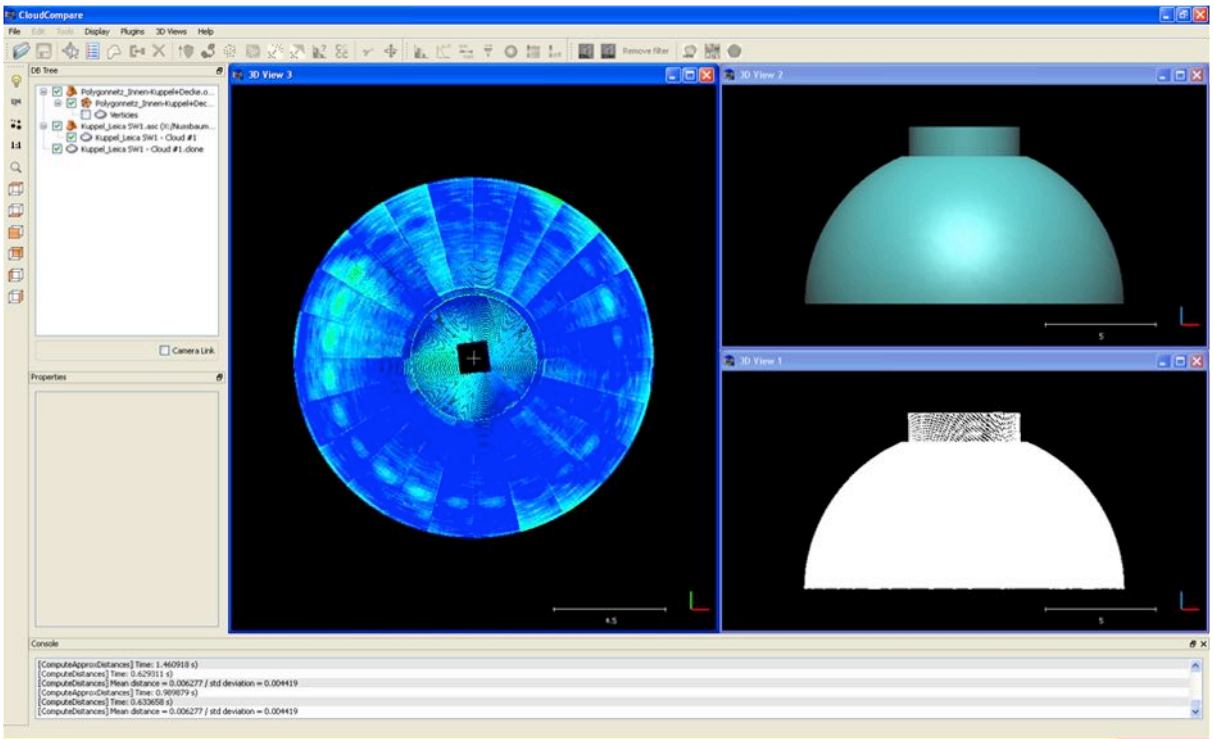


Abbildung 5.15: Benutzeroberfläche in CloudCompare: Beispiel der Ergebnisse der Funktion „Cloud/Mesh Dist." (SW1-Kuppel)

Graphische Ergebnisse (CloudCompare)

In diesem Abschnitt werden die von CloudCompare gelieferten graphischen Darstellungen verglichen (Abb. 5.16, 5.17 sowie weitere Abbildungen im Anhang D.1) und einige weitere Optionen, die vom Programm angeboten werden, kurz beschrieben.

Die Kontroll-Punkwolken der mit CloudCompare durchgeführten Vergleiche zwischen der Leica-Punktwolke SW1 und dem Rhino-Modell entsprechen - sowohl für die Kuppel als auch für den Unterbau - den graphischen Ergebnissen aus RealWorks. Die ellipsenförmigen Flecke in der Kuppel sowie die Unebenheit des Bodens im unteren Bereich sind nochmals zu erkennen.

Bemerkenswert ist die Skala bzw. die Anzahl der Nachkommastellen der Angaben (sieben Nachkommastellen für Werte in [m]). Auch wenn diese Ergebnisse auf eine sehr genaue Berechnung der Abstände deuten, wird dadurch an Anschaulichkeit verloren. Außerdem scheint die Kontroll-Punktwolke der registrierten ScanWorld SW1-SW4 etwas heller als die zwei anderen Datensätze zu sein, was wahrscheinlich an der höheren Punktdichte liegt. Es ist allerdings möglich, die oberen und unteren Grenzen der Farbpalette einzugeben, aber es können keine gleichmäßigen Intervalle festgelegt werden, so dass der direkte Vergleich erschwert wird. Trotzdem sehen die Ergebnisse sowohl in der Kuppel als auch im unteren Bereich sehr ähnlich aus.

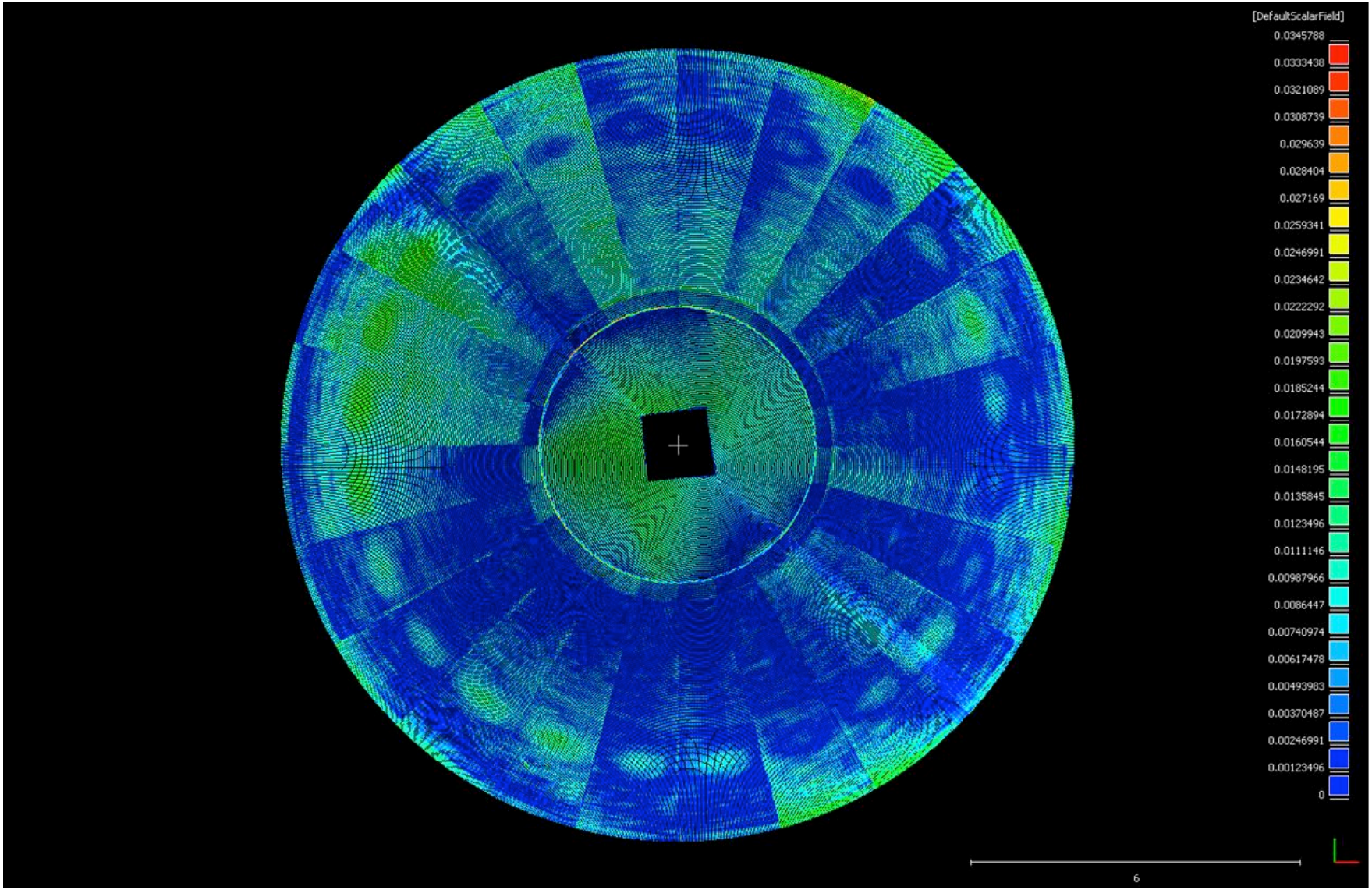


Abbildung 5.16: Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke der Kuppel

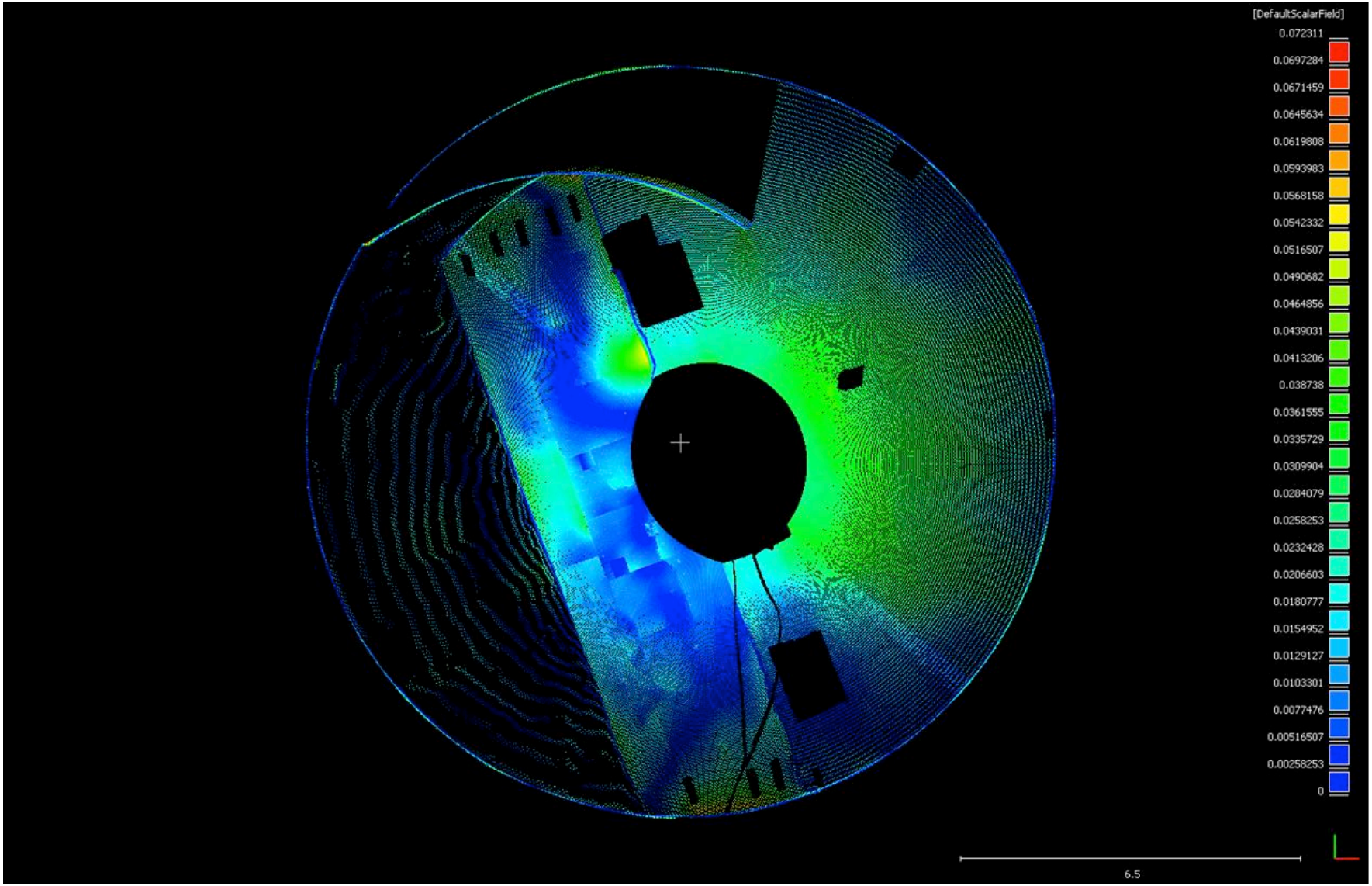


Abbildung 5.17: Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke des unteren Bereiches

Das Programm bietet dennoch weitere Funktionen an, die eine statistische Analyse der Kontroll-Punktwolke ermöglichen. Sie werden anhand des Beispiels der ScanWorld 1 im Kuppelbereich erläutert. Wie vorher schon erwähnt werden bereits bei der Ermittlung der approximativen Resultate der minimale, maximale und mittlere Wert sowie die Standardabweichung angezeigt. Jedoch sind diese Ergebnisse zu ungenau, um sie weiterhin zu verwenden. Wenn die Grenzwerte nach der Ermittlung der Hausdorff'schen Entfernungen im Eigenschaftsfenster oder auf der Skala zu finden sind, können auch weitere statistischen Merkmale neu berechnet werden. Dies erfolgt mit dem Tool „Compute stat. params", das zwei verschiedene Verteilungen zur Auswahl stellt: die Normalverteilung nach Gauß und die Weibull-Verteilung[5]. Dadurch werden von der Software Kurven an das Histogramm so gut wie möglich angepasst und die entsprechenden Parameter werden oben angezeigt. Bei der Normalverteilung handelt es sich um den Mittelwert und die Standardabweichung und bei der Weibull-Verteilung um die Parameter (a,b). In der Konsole der CloudCompare-Benutzeroberfläche wird dazu jeweils das Ergebnis des χ^2-Tests vermerkt, das beschreibt, wie das Histogramm und die theoretische Verteilung zusammenpassen. Allerdings ist keine der beiden Möglichkeiten für die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführten Vergleiche geeignet. Diese Funktion und deren Ergebnisse werden also nicht weiter verwendet.

Interessant sind auch die Histogramme. Abb. 5.18 stellt die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen aus dem Vergleich der Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell in der Kuppel dar (entsprechende Abbildung im Anhang D.1). Bei der Standardeinstellung werden 128 Klassen dargestellt, wobei dies geändert werden kann. Für jede Klasse kann der entsprechende Abstand zur Fläche sowie der Prozentanteil der Punkte, die kleinere Abweichungen als diesen Wert aufweisen, angezeigt werden. Beim vorliegenden Beispiel handelt es sich um die Klasse 22, deren Wert 0,0082688m ist. Es liegen 68,03% der Abweichungen unterhalb dieser Grenze, was bedeutet, dass die Standardabweichung bei etwa 8,3mm liegt. Dies stimmt mit den in Excel erhaltenen Ergebnissen überein. Auch die Form des Histogramms passt mit der der Excel-Graphik zusammen.

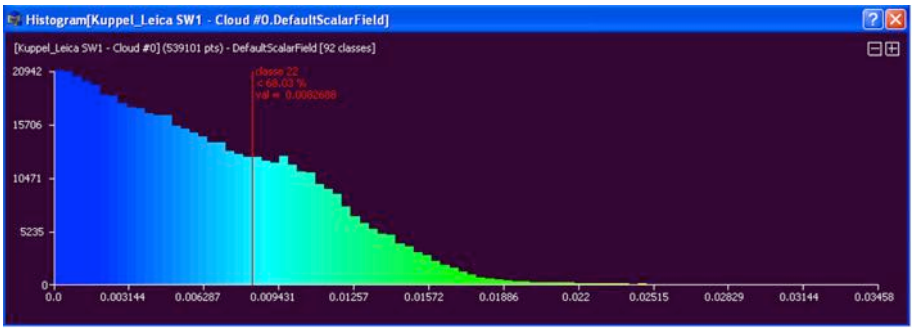


Abbildung 5.18: Histogramm der gesamten Kontroll-Punktwolke SW1 in der Kuppel

Zudem kann eine auf ein bestimmtes Intervall eingeschränkte Untersuchung durchgeführt werden. Das Histogramm muss nämlich nicht unbedingt für die gesamte Punktwolke erzeugt werden. Abb. 5.19 stellt die Kontroll-Punktwolke SW1 in der Kuppel gefiltert zwischen 0 und 1cm dar. Aus dem entsprechenden Histogramm (Abb. 5.20) können ebenfalls für jede Klasse der Grenzwert

[5]Weibull-Verteilung: wird häufig zur Beschreibung steigender, konstanter und fallender Ausfallraten technischer Systeme verwendet und ist in der Praxis neben der Exponentialverteilung die am häufigsten verwendete Lebensdauerverteilung [http://de.wikipedia.org/wiki/Weibull-Verteilung]

und ein Prozentanteil ermittelt werden. Beispielsweise weisen für das Intervall 0-1cm ungefähr 58% der Punkte Abweichungen kleiner als 5mm auf. Diese Ergebnisse entsprechen wiederum denen aus Excel.

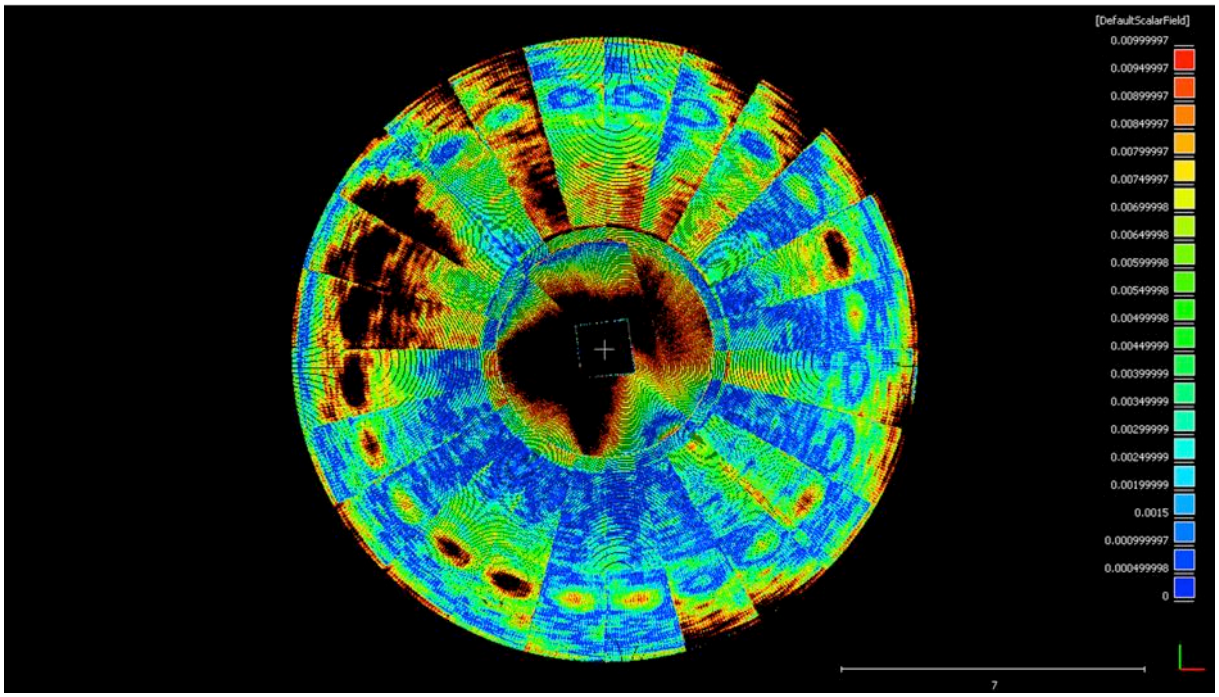


Abbildung 5.19: Vergleich mit dem CAD-Modell: Gefilterte Kontroll-Punktwolke SW1 in der Kuppel (Skala: 0 bis 1cm)

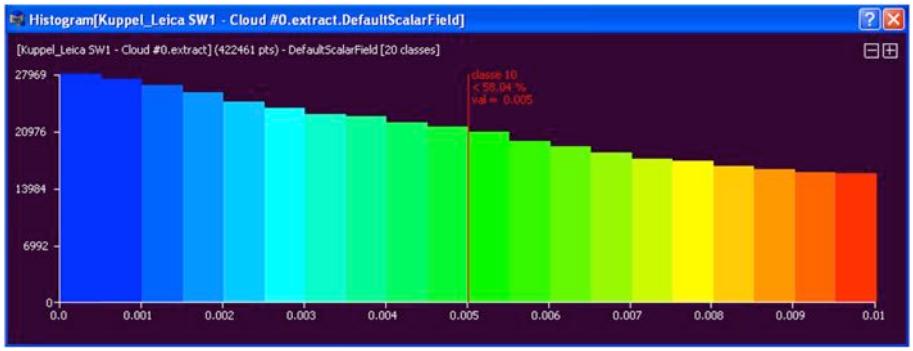


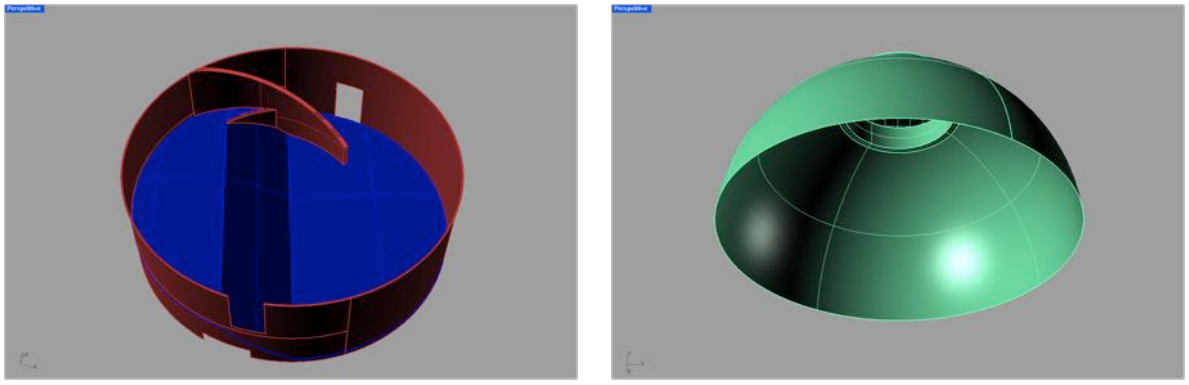
Abbildung 5.20: Histogramm der gefilterten Kontroll-Punktwolke SW1 in der Kuppel

Statistische Ergebnisse (Excel)

Die Auswertung der CloudCompare-Ergebnisse in Excel erfolgte exakt auf die selbe Art und Weise wie die, die schon für die Resultate aus RealWorks eingesetzt wurde. Die daraus berechneten Prozentanteile sowie Mittelwert und Standardabweichung entsprechen den Werten, die aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in RealWorks erhalten wurden. Die Tabellen und Abbildungen zur Visualisierung der statistischen Ergebnisse sind im Anhang D.1 zu finden. Eine Zusammenfassung und ein ausführlicher Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Software-Systemen werden im Kap. 5.2.4 dargestellt.

5.2.3 Vergleich in Rhinoceros 3D

Das von den Architekten zur Verfügung gestellte Modell des „Hauses der Astronomie” war im CAD-Programm Rhinoceros 3D vorhanden. Da Interesse an einem in dieser Software durchgeführten Vergleich zwischen einer Punktwolke und einer Fläche bestand, wurde die dafür angebotene Funktion „Abweichung des Punktsatzes” untersucht.



(a) Datenbereich „Unterbau” (b) Datenbereich „Kuppel”

Abbildung 5.21: CAD-Modell in Rhinoceros 3D (Ansicht: Perspektive)

Graphische Ergebnisse (Rhinoceros 3D)

Zunächst wurden die in RealWorks vorbereiteten Punktwolken importiert. Danach wird das CAD-Modell der Kuppel bzw. des unteren Bereiches (Abb. 5.21) mit der jeweiligen Punktwolke mittels des Befehls „Abweichung des Punktsatzes” verglichen. Im entsprechenden Anzeigefenster (Abb. 5.22) können die Farbe der ausgewählten Punkte geändert und sie mit Residuen-Vektoren (sog. „Haarlinien”, die der Residuen-Darstellung entsprechen) markiert werden. Die Haarlinien können auch skaliert werden, d.h. dass sie vom tatsächlichen Abstand zur Fläche um diesen Faktor vergrößert werden, um kleinere Abweichungen deutlich erkennbar darstellen zu können. Obwohl der Standardwert 10 ist, wurde der Faktor 1 verwendet, um die Darstellung nicht zu überfrachten (Abb. 5.23 und 5.24). Ist die Option „Haarlinie dauerhaft erzeugen” ausgewählt, wird am Ende für jeden Punkt ein Linienobjekt erzeugt, wobei jede Farbe der Skala einem neuen Layer der Rhino-Zeichnung entspricht.

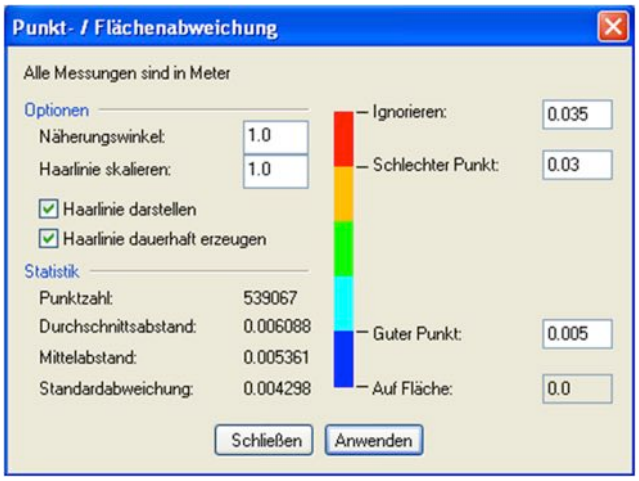


Abbildung 5.22: Dialogfenster „Punkt-/Flächenabweichung” (SW1-Kuppel) in Rhino 3D

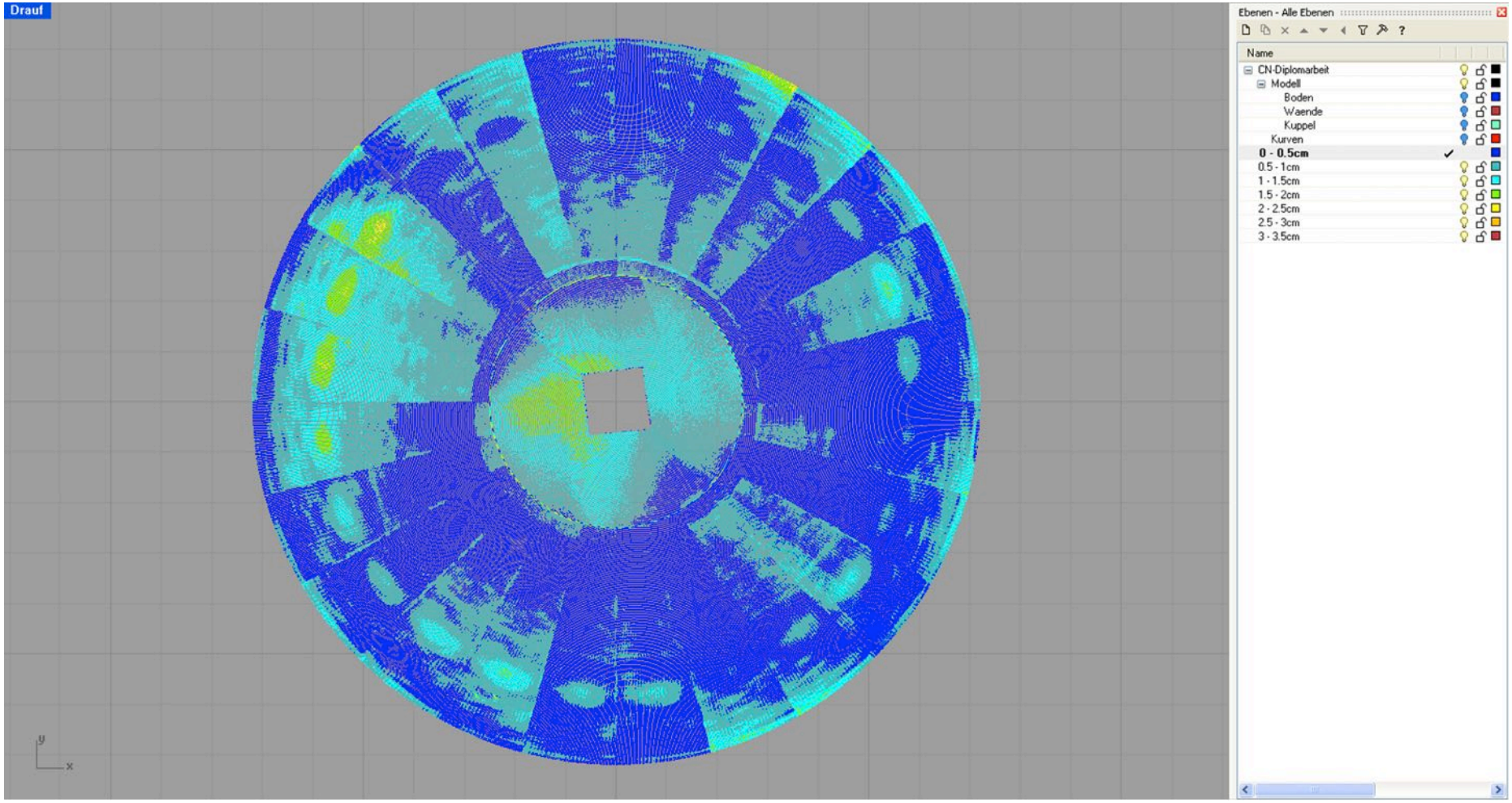


Abbildung 5.23: Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke der Kuppel

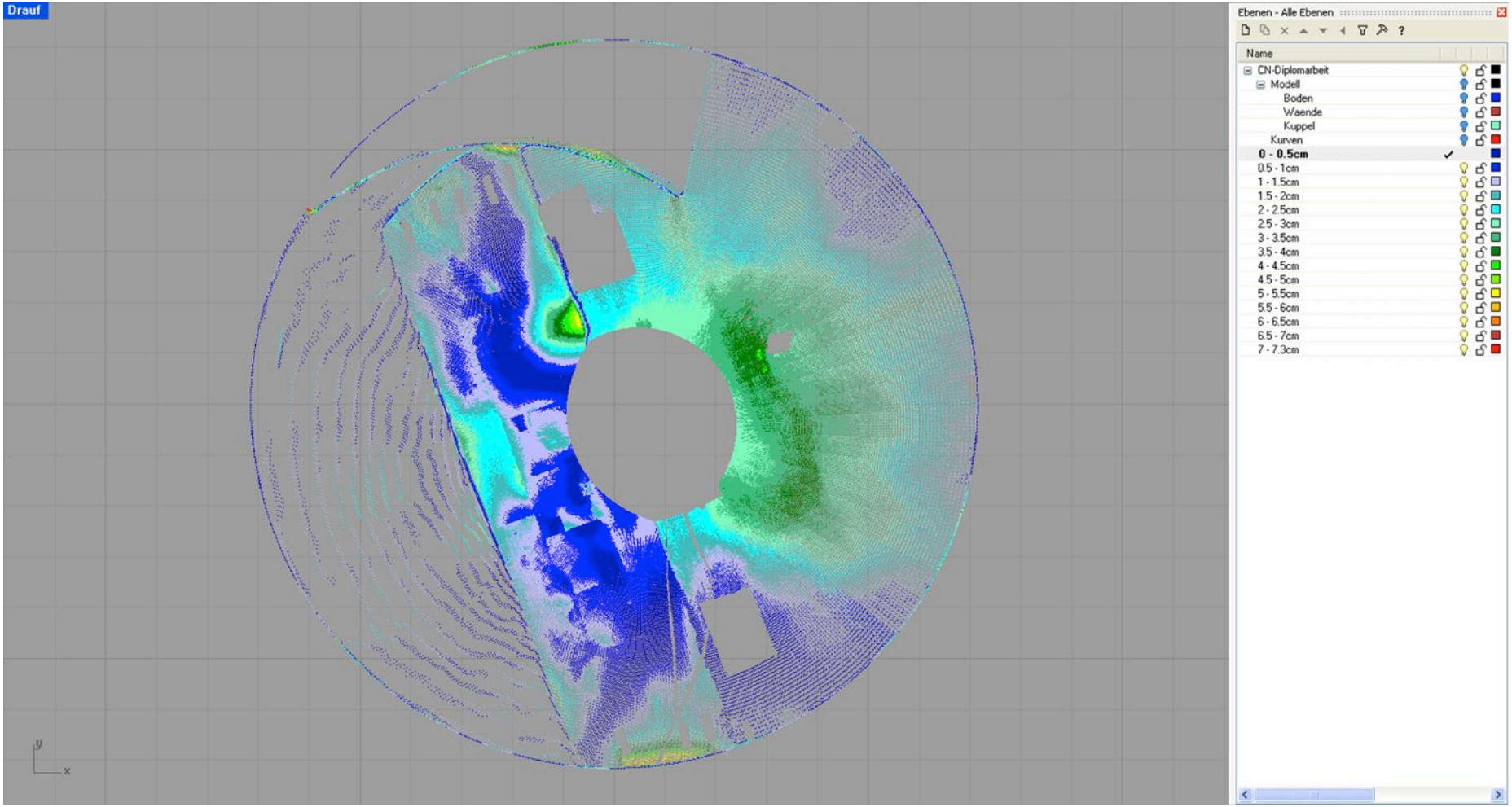


Abbildung 5.24: Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke des unteren Bereiches

Bei der Skala können Werte für die Punkte, die als gut und schlecht betrachtet oder sogar ignoriert werden, eingegeben werden. Um den Betrag der maximalen Abweichung zu bestimmen, wurde darauf geachtet, dass die angezeigte Punktanzahl der gesamten Datenmenge entspricht. Unter „Statistik" werden zusätzlich zur Punktanzahl der Durchschnitts- und Mittelabstand sowie die Standardabweichung aufgelistet. Diese Ergebnisse stimmen mit denen aus der Auswertung in Excel (maximal 0,2mm Unterschied, s. Anhang D.2) überein.

Im Gegensatz zu RealWorks und CloudCompare kann die Skala nur schwer angepasst werden. Wie schon erwähnt, wird für jeden Farbbereich ein neuer Layer erzeugt, der die entsprechenden Residuen beinhaltet. Die Unterteilung der Kontroll-Punktwolken in Abstandsschichten mit kleinen Intervallen (1mm) wie bei den anderen Software-Systemen ist in Rhinoceros 3D nicht vorstellbar: um die Grenzen der Skala ändern zu können, muss die Funktion „Abweichung des Punktsatzes" jedes Mal neu aufgerufen und ausgeführt werden. Dies wäre viel zu aufwändig und würde wegen unzureichendem Speicherplatz zum Absturz des Programms führen. Es wurde also entschieden, größere Intervalle (5mm) zu erzeugen. Beispielsweise wurden für die Punktwolke SW1 im Kuppelbereich die in Tab. 5.8 zusammengestellten Werte eingegeben.

Durchgang	1	2
Auf Fläche	0.000m	0.000m
Guter Punkt	0.005m	0.025m
Schlechter Punkt	0.020m	0.040m
Ignorieren	0.025m	0.045m

Tabelle 5.8: Eingegebene Werte für die Skala bei den zwei Durchgängen des Vergleiches zwischen der Punkwolke SW1 und dem CAD-Modell in Rhino

Die aus dem zweiten Durchgang resultierenden dunkelblauen (0-2,5cm), orangen (3,5-4,0cm) und roten (4,0-4,5cm) Layer wurden gelöscht. Schließlich wurde die Farbpalette etwas geändert, damit die Abweichungen besser visuell erkennbar werden. Wie beim Vergleich anhand der beiden anderen Software-Systeme kann leider über die Skala keine Information über die Richtung der Abweichung abgeleitet werden. Werden negative Werte eingegeben, liegt die Punktanzahl bei 0. Für die Zuweisung der Farbe wird also nur der Betrag der Abweichungen betrachtet. Trotzdem liefert die Darstellung in Rhinoceros 3D dank der Residuen-Vektoren einen Hinweis über die Lage des Punktes gegenüber der Fläche. Dies kann man in den Abb. 5.25 und 5.26 gut erkennen. Es handelt sich um den Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell. Nur für eine bessere Visualisierung wurden die Abstände zum einen mit einem Skalierungsfaktor von 10 dargestellt (Abb. 5.25), zum anderen wurde der Rechenvorgang wiederholt und die Abweichungen im Maßstab 1:1 angezeigt (Abb. 5.26). In jedem schwarzen Punkt wird eine Residue generiert, die senkrecht zur grünen Fläche ausgerichtet ist. Außerdem sind die Haarlinien eines Farbintervalls unterschiedlich lang, was vom Betrag der entsprechenden Abweichung abhängt. Bemerkenswert ist, dass die Punkte am unteren Rand der Kuppel überwiegend außerhalb des CAD-Modells und damit außerhalb der geplanten Kuppel liegen und dass sich im Gegensatz dazu die Punkwolke im mittleren Bereich innerhalb des Modells befindet. Die Fertigteile haben sich vermutlich durch die Verlagerung leicht verbogen.

Ansonsten können anhand einer einfachen graphischen Analyse keine neuen Schlussfolgerungen gezogen werden. Ob die Datensätze miteinander oder mit den aus CloudCompare und RealWorks stammenden graphischen Ergebnissen verglichen werden, weisen sie sowohl in der Kuppel als auch im unteren Bereich ungefähr die selben Abweichungen auf, wie bei den anderen Vergleichen (s. Anhang D.2).

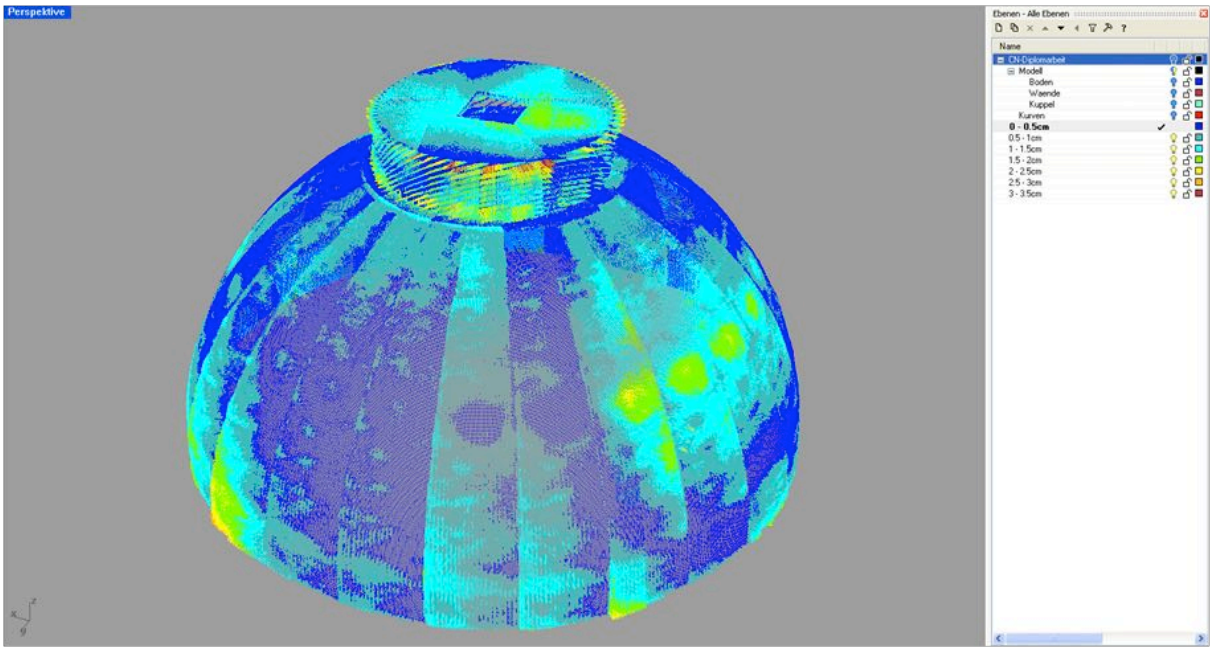


Abbildung 5.25: Vergleich mit dem CAD-Modell: Darstellung der zehnfach vergrößerten Residuen (SW1-Kuppel)

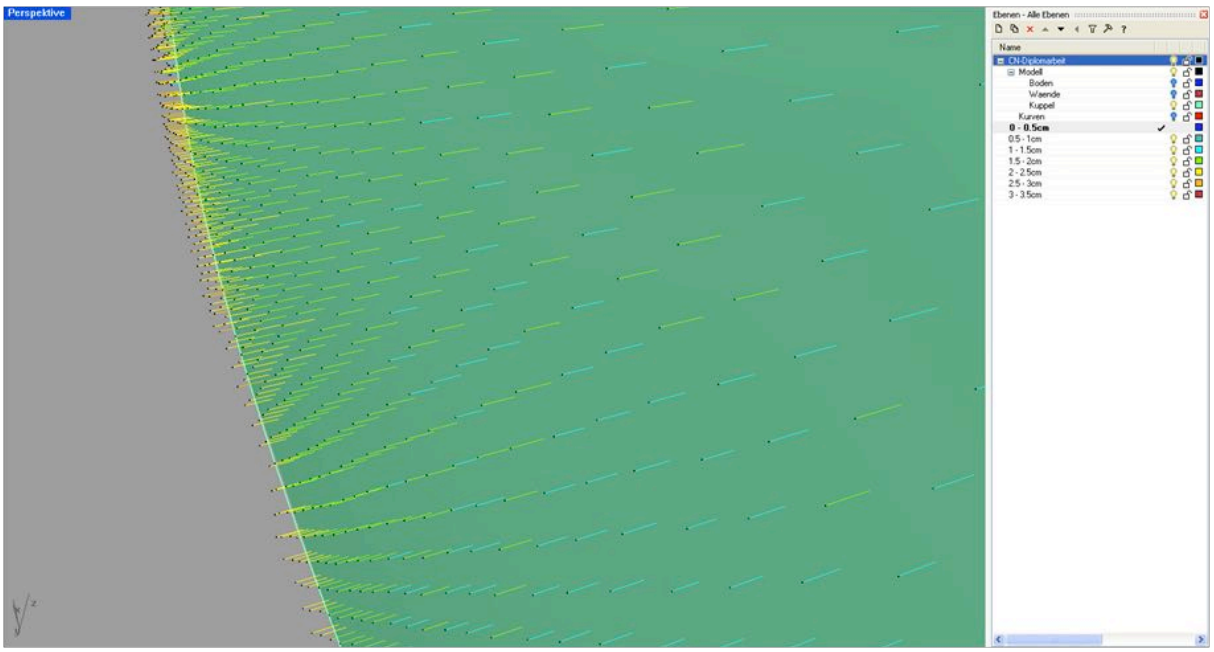


Abbildung 5.26: Hinweis über die Richtung der Abweichungen dank der Residuen (Skalierungsfaktor 1)

Da die Software für die Bearbeitung einer solchen Datenmenge nicht entwickelt wurde, traten bei der Berechnung der Abweichungen einige Probleme auf. Das Programm stürtzte mehrmals ab, so dass es zuerst notwendig wurde, die Punktwolken nochmals in zwei Teile zu unterteilen (in RealWorks). Jeder Teil der Punktwolke wurde dann separat mit dem CAD-Modell in Rhino verglichen und die Ergebnisse bzw. Residuen wurden schließlich in einer neuen Zeichnung zusammengefügt.

Statistische Ergebnisse (Excel)

Bei der Auswertung der Ergebnisse aus Rhinoceros 3D in Excel fällt auf, dass die Trimble-Punktwolke in der Kuppel eine etwas größere mittlere Abweichung d_M als die beiden Leica-Datensätze aufweist aber dass ihr Mittelwert im unteren Bereich deutlich geringer (2 bis 3mm) ist (s. Tab. D.2, Anhang D.1). In dem Histogramm des unteren Bereiches (Abb. D.3, Anhang D.1) sind die markanten Abweichungen wegen der bereits mehrfach angesprochenen Beule in der Brüstung, die zwischen den beiden Laserscanaufnahmen entfernt wurde, deutlich zu erkennen: für das Intervall 3,0-3,5cm sind die Balken zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung bei den Leica-Punktwolken (und besonders bei SW1) deutlich höher als die zur Visualisierung des Prozentanteils an Trimble-Punkten.

Diese Resultate sowie ihre Interpretation sind mit denen aus RealWorks und CloudCompare vergleichbar.

Wie im vorherigen Abschnitt schon erwähnt, passen die im Dialogfenster „Punkt-/Flächenabweichung" angezeigten Durchschnittsabstände und Standardabweichungen mit den in Excel gerechneten Werten zusammen. Somit spielte die Entscheidung, den Mittelwert über die mittlere Entfernung des Intervalls zu bestimmen, keine entscheidende Rolle.

5.2.4 Vergleich der Ergebnisse

In diesem Kapitel geht es nicht mehr darum, die von einer bestimmten Software gelieferten Kontroll-Punktwolken miteinander zu vergleichen, sondern für einen Datensatz die Ergebnisse aus den drei Programmen konkret gegenüberzustellen. Es wurde schon festgestellt, dass sich sowohl die graphische als auch die statistische Auswertung der Resultate aus RealWorks, CloudCompare und Rhino sehr ähnlich sind. Um dies zu bestätigen, wurden erneut Excel-Tabellen hergestellt. Wie diese aussehen und was gerechnet wurde, wird anhand des Beispiels der Leica-Punktwolke SW1 im Kuppelbereich illustriert und erläutert (Abb. 5.27, Tab. 5.10 und 5.9).

Abb. 5.27 enthält zwei Histogramme, die den Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Software-Systemen darstellen. Zuerst werden die Auswertungen der Daten aus RealWorks und CloudCompare, die für 1mm-Intervalle durchgeführt wurden, verglichen (Abb. 5.27a), danach erfolgt der Vergleich mit den Ergebnissen aus Rhinoceros 3D (Abb. 5.27b). Die Tab. 5.27 und die Diagramme weisen darauf hin, dass die Resultate aus RealWorks und CloudCompare kaum unterschiedlich sind, während die aus Rhinoceros 3D etwas optimistischer (mehr Punkte mit kleinen Abweichungen) sind. Da die gleiche Punktwolke und das gleiche CAD-Modell verwendet wurden, liegen die Unterschiede vermutlich darin, dass der Punktabstand zum Modell in Rhino anders berechnet wird. Wie bereits erklärt, wurde das Programm nicht gezielt für die

Bearbeitung von Punktwolken entwickelt, so dass die entsprechenden Algorithmen vermutlich etwas schlechter als die von RealWorks und CloudCompare sind. Sogar die Gesamt-Punktanzahl liegt bei 539.067 Punkten für Rhinoceros 3D gegen 539.101 bzw. 539.102 Punkten für die beiden anderen Software-Systeme, was darauf hindeutet, dass ein paar Punkte bei der Berechnung der Abweichungen zum Modell gar nicht berücksichtigt wurden. Allerdings ist der Unterschied gering genug, dass für alle Software-Systeme die minimale und maximale Distanzen sowie der erhaltene Mittelwert gleich sind (Tab. 5.9). Nur die Standardabweichung der Ergebnisse aus Rhino ist mit ±7,6mm um 0,1mm kleiner als die der beiden anderen, was vernachlässigbar bleibt.

Diese Interpretation trifft auf jede Punktwolke in der Kuppel zu. Eine Verallgemeinerung ist allerdings schwierig: im unteren Bereich weist nämlich Rhinoceros 3D pessimistischere Ergebnisse als die beiden anderen Software-Systeme auf. Bei der Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen liegen die maximalen Differenzen bei 0,6mm (Trimble Unterbau) bzw. 0,3mm (Trimble Kuppel und Unterbau), was noch als sehr gut betrachtet werden kann.

SW1-Kuppel	RealWorks	CloudCompare	Rhino
Min. Dist. [mm]	0	0	0
Max. Dist. [mm]	35	35	35
d_M [mm]	6,3	6,3	6,3
σ_d [mm]	±4,4	±4,4	±4,2
σ [mm]	±7,7	±7,7	±7,6

Tabelle 5.9: Vergleich mit dem CAD-Modell: Zusammenfassung der statistischen Ergebnisse aus RealWorks, CloudCompare und Rhinoceros 3D (SW1-Kuppel)

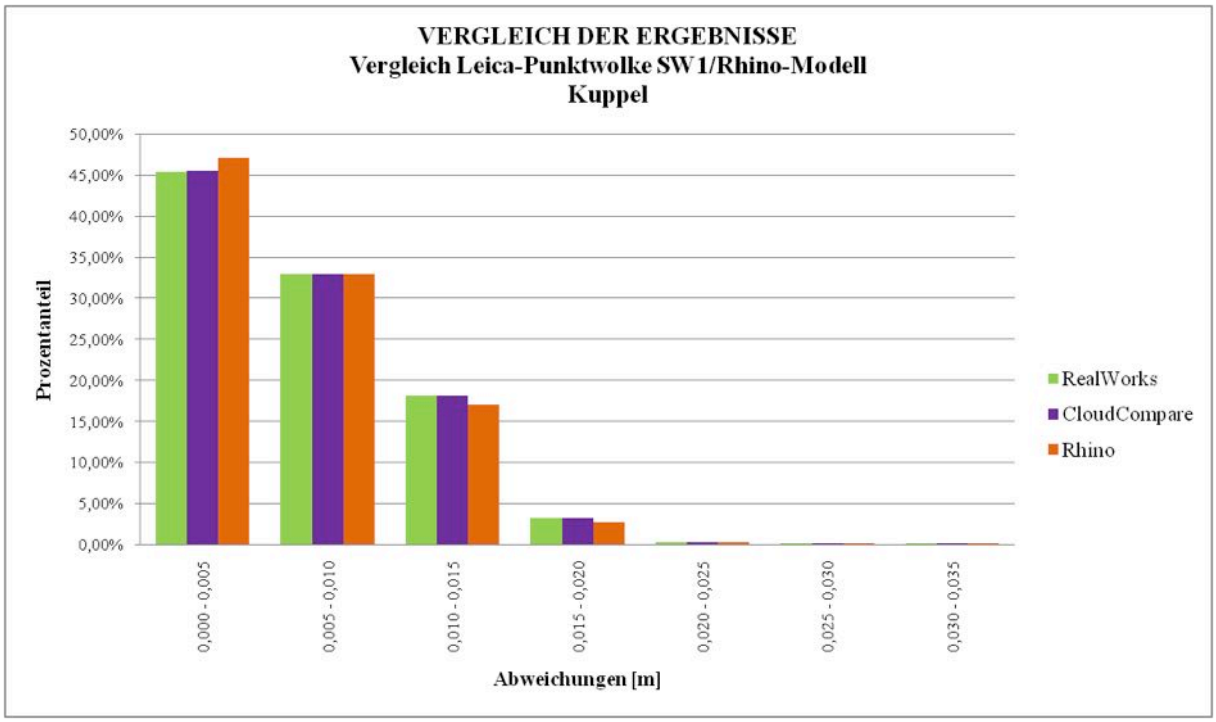


Abbildung 5.27: Vergleich mit dem CAD-Modell: Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Software-Systeme für die Punktwolke SW1 im Kuppelbereich

	RealWorks			CloudCompare			Rhino		
Entfernung [m]	Punktanzahl	Prozentanteil		Punktanzahl	Prozentanteil		Punktanzahl	Prozentanteil	Entfernung [m]
Gesamt (SW1)	539.101	100%	100%	539.102	100%	100%	539.067	100%	Gesamt (SW1)
0,000 - 0,001	55.017	10,21%		55.350	10,27%				
0,001 - 0,002	52.230	9,69%		52.239	9,69%				
0,002 - 0,003	48.216	8,94%	45,43%	48.391	8,98%	45,48%	253.783	47,08%	0,000 - 0,005
0,003 - 0,004	45.841	8,50%		45.735	8,48%				
0,004 - 0,005	43.588	8,09%		43.486	8,07%				
0,005 - 0,006	40.547	7,52%		40.597	7,53%				
0,006 - 0,007	37.570	6,97%		37.396	6,94%				
0,007 - 0,008	34.668	6,43%	32,95%	34.818	6,46%	32,88%	177.679	32,96%	0,005 - 0,010
0,008 - 0,009	33.040	6,13%		32.880	6,10%				
0,009 - 0,010	31.826	5,90%		31.570	5,86%				
0,010 - 0,011	29.500	5,47%		29.775	5,52%				
0,011 - 0,012	24.439	4,53%		24.233	4,50%				
0,012 - 0,013	18.754	3,48%	18,10%	18.601	3,45%	18,11%	91.672	17,01%	0,010 - 0,015
0,013 - 0,014	14.038	2,60%		14.268	2,65%				
0,014 - 0,015	10.852	2,01%		10.749	1,99%				
0,015 - 0,016	7.824	1,45%		7.913	1,47%				
0,016 - 0,017	4.653	0,86%		4.611	0,86%				
0,017 - 0,018	2.491	0,46%	3,17%	2.482	0,46%	3,17%	14.462	2,68%	0,015 - 0,020
0,018 - 0,019	1.343	0,25%		1.344	0,25%				
0,019 - 0,020	766	0,14%		766	0,14%				
0,020 - 0,021	550	0,10%		549	0,10%				
0,021 - 0,022	442	0,08%		443	0,08%				
0,022 - 0,023	300	0,06%	0,30%	300	0,06%	0,30%	1.256	0,23%	0,020 - 0,025
0,023 - 0,024	201	0,04%		201	0,04%				
0,024 - 0,025	122	0,02%		122	0,02%				
0,025 - 0,026	86	0,02%		86	0,02%				
0,026 - 0,027	61	0,01%		61	0,01%				
0,027 - 0,028	54	0,01%	0,05%	54	0,01%	0,05%	183	0,03%	0,025 - 0,030
0,028 - 0,029	23	0,00%		23	0,01%				
0,029 - 0,030	23	0,00%		23	0,00%				
0,030 - 0,031	14	0,00%		14	0,00%				
0,031 - 0,032	12	0,00%		12	0,00%				
0,032 - 0,033	5	0,00%	0,01%	5	0,00%	0,01%	32	0,01%	0,030 - 0,035
0,033 - 0,034	2	0,00%		2	0,00%				
0,034 - 0,035	3	0,00%		3	0,00%				

Tabelle 5.10: Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Software - Vergleich der SW1-Punktwolke mit dem CAD-Modell im Kuppelbereich

5.3 Vergleich der beiden Laserscanaufnahmen

Nach dem Vergleich der Datensätze mit dem CAD-Modell werden nun die Laserscanaufnahmen selbst gegenübergestellt. Dies erfolgte in RealWorks und CloudCompare. Das Programm Rhinoceros 3D eignet sich nicht für eine solche Aufgabe und bietet dafür keine Funktion an. Wie im Kap. 5.2 werden die Auswertungen in den kommenden Abschnitten anhand der verschiedenen Software-Systeme beschrieben und ihre graphischen und statistischen Ergebnisse miteinander verglichen.

Sowohl in RealWorks als auch in CloudCompare wurden die Leica-Punktwolken SW1 bzw. SW1-SW4 als Referenz verwendet. Der Trimble-Datensatz wurde zunächst in beiden Programmen mit den reinen Leica-Punkten verglichen. Danach wurde die Referenz bearbeitet, d.h. entweder gefiltert und vermascht (RealWorks) oder modelliert (CloudCompare), und ein erneuter Vergleich zwischen den Trimble- und Leica-Datensätzen durchgeführt. In den folgenden Abschnitten wird daher zwischen dem Vergleich ohne und mit Modellierung unterschieden.

5.3.1 Punktwolkenvergleich in RealWorks

Die Gegenüberstellung zweier Punktwolken erfolgt in der Trimble-Software in gleicher Weise wie beim Vergleich mit dem CAD-Modell mittels des Tools „3D Kontrollwerkzeug". Der einzige Unterschied liegt darin, dass die eine Punkwolke als Referenz ausgewählt werden muss. Der zu vergleichende Datensatz musste wiederum so weiterverarbeitet werden, dass keine groben Fehler mehr auftraten. Um den Arbeitsaufwand bei diesem Teilschritt zu minimieren, wurde aufgrund der umfangreichen Aufnahmen mit dem HDS6000 die Leica-Punktwolken als Referenzen definiert und die Trimble-Punkte jeweils damit verglichen. Der Trimble-Datensatz wurde für den Vergleich mit SW1 sowie mit SW1-SW4 vorbereitet und die bereinigten Punktwolken als ASCII-Dateien zur Anwendung in CloudCompare exportiert. Schließlich wurden die mit dem „3D Kontrollwerkzeug" erhaltenen Kontroll-Punktwolken wie gehabt in dünne Datenschichten (1mm-Intervalle) unterteilt.

Wird keine Modellierung der Referenz vorgenommen, entspricht die Abweichung dem Abstand des Trimble-Punktes zum nächstliegenden Leica-Punkt. Die Ergebnisse aus einem solchen Vergleich sind numerisch falsch (Abstände i.d.R. zu lang) und daher schwer zu interpretieren, weil nicht zu erwarten ist, dass die zwei Punktwolken exakt übereinander liegen. Deswegen musste zur Ermittlung der kürzesten Entfernung die Referenz modelliert werden. Dies erfolgte in RealWorks anhand einer zunehmenden Vermaschung (s. Kap. 4.2.3). Aufgrund der Verschiebung zwischen den registrierten Punktwolken SW1 und SW4 wurde nur die Punktwolke SW1 vermascht. Darüber hinaus musste der Datensatz aus technischen Gründen zuerst gefiltert werden. Die Methode des „räumlichen Filterns" mit einem Abstand von 2cm wurde gewählt.

Graphische Ergebnisse (RealWorks)

Abb. 5.28 und 5.30 stellen die Kontroll-Punktwolken SW1 sowie SW1-SW4 ohne Modellierung sowohl in der Kuppel als auch im unteren Bereich dar. Die Ergebnisse sehen sehr ähnlich aus. Die Unterschiede hängen von der Punktdichte ab (z.B. im Schattenbereich der ScanWorld 1). Interessanter ist die Gegenüberstellung der Ergebnisse des Vergleiches mit der vermaschten Punktwolke SW1: wie erwartet ist die maximale Abweichung in beiden Fällen deutlich kleiner (Abb.

5.29 und 5.31) als beim direkten Vergleich . Die überwiegend dunkelblaue Farbe weist auf einen großen Anteil an Punkte hin, deren Abweichungen unter 1cm liegen, was ein zufriedenstellendes Ergebnis darstellt. Aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Messrauschen (±1,3mm für Leica und ±2,4mm für Trimble) waren Unterschiede zwischen den beiden Punktwolken zu erwarten. Darüber hinaus hat der Vergleich mit einer vermaschten Punktwolke den Nachteil, dass die Ergebnisse vom Messrauschen der Referenz beeinträchtigt werden, was beim Vergleich mit einer durch eine ausgleichende Fläche modellierten Punktwolke weniger der Fall ist.

An dieser Stelle wäre die von der Software nicht gelieferte Richtung der Residuen besonders interessant. Es könnte nämlich sein, dass es sich nicht um zufällige sondern um systematische Abweichungen handelt, was heißen würde, dass ein Laserscanner immer länger bzw. kürzer als der andere messen würde.

Außerdem ist der Ist-Zustand aufgrund der Abweichungen zum Soll-Modell nicht genau bekannt, so dass zur Beurteilung der Qualität der Punktwolken ein umfassendes, sehr aufwändiges tachymetrisches Aufmaß des Hörsaals fehlt. Ob die Leica- oder die Trimble-Punktwolke besser zur aktuellen Form des Bauwerks passt, kann anhand der durchgeführten Messungen nicht bewiesen werden. Dies stellt ein Nachteil eines solchen Vergleiches anhand eines praktischen Beispiels dar.

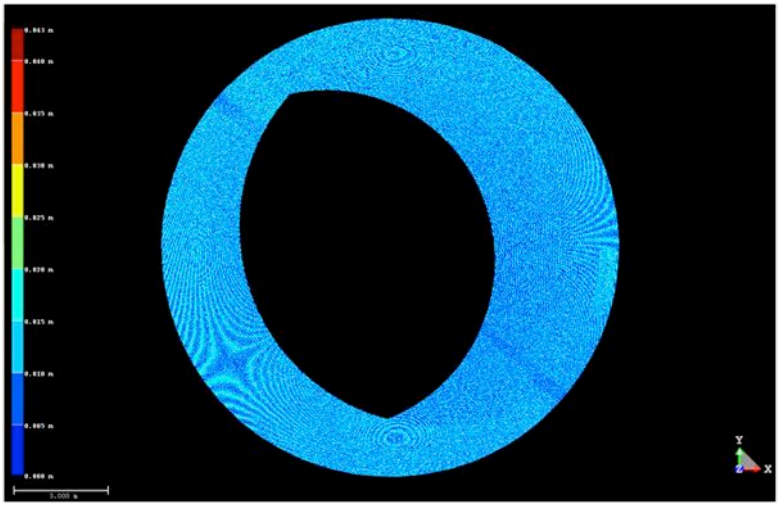
Statistische Ergebnisse (Excel)

Der verwendete Rechenvorgang ist genau derselbe wie beim Vergleich mit dem CAD-Modell. Die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen sind in der Tab. 5.11 zusammengefasst. Diese Ergebnisse bestätigen die graphische Interpretation: beim Vergleich der Trimble-Punktwolke mit der vermaschten ScanWorld 1 treten deutlich kleinere statistischen Werte auf als beim Vergleich mit den unmodellierten Punktwolken (Werte in Klammer gesetzt, weil unbrauchbar). Außerdem liegen sowohl in der Kuppel als auch im Unterbau der erhaltene Mittelwert bei 3,1mm und die Standardabweichung σ bei ±3,9mm. Bei der Berechnung von σ wird allerdings wieder angenommen, dass die Abweichungen normalverteilt sind, was aufgrund der fehlenden Information über deren Richtung, nicht nachgewiesen werden kann.

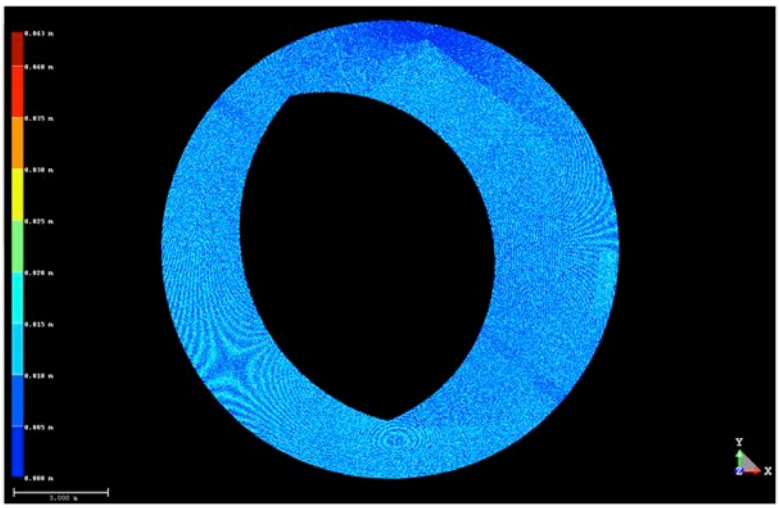
Anhand den graphischen Darstellungen in RealWorks wurde bereits festgestellt, dass beim Vergleich des Trimble-Datensatzes mit der modellierten Punkwolke SW1 die meisten Punkte Abstände kleiner als 1cm aufweisen. Diese Ergebnisse werden mittels der Histogramme in der Abb. 5.32 veranschaulicht.

	Kuppel			**Unterbau**		
	d_M **[mm]**	σ_d **[mm]**	σ **[mm]**	d_M **[mm]**	σ_d **[mm]**	σ **[mm]**
SW1	(11,6)	(±4,1)	-	(11,1)	(±4,8)	-
SW1-SW4	(10,2)	(±3,9)	-	(10,3)	(±5,5)	-
SW1 vermascht	3,1	±2,4	±3,9	3,1	±2,5	±3,9
Max.	11,6	±4,1	-	11,1	±5,5	-
Min.	3,1	±2,4	-	3,1	±2,5	-
Diff. (Max-Min)	8,5	1,7	-	8,0	3,0	-

Tabelle 5.11: Mittelwerte und Standardabweichungen aus der Gegenüberstellung der Laserscanaufnahmen in RealWorks



(a) SW1 (Skala: 0 bis 4,3cm)



(b) SW1-SW4 (Skala: 0 bis 4,3cm)

Abbildung 5.28: Differenz der Punktwolken SW1 bzw. SW1-SW4 und der Trimble-Punktwolke ohne Modellierung: Kontroll-Punktwolken der Kuppel

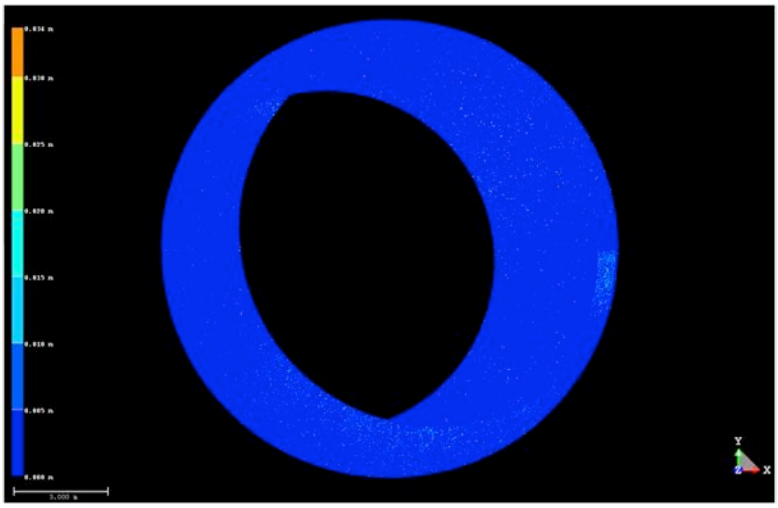
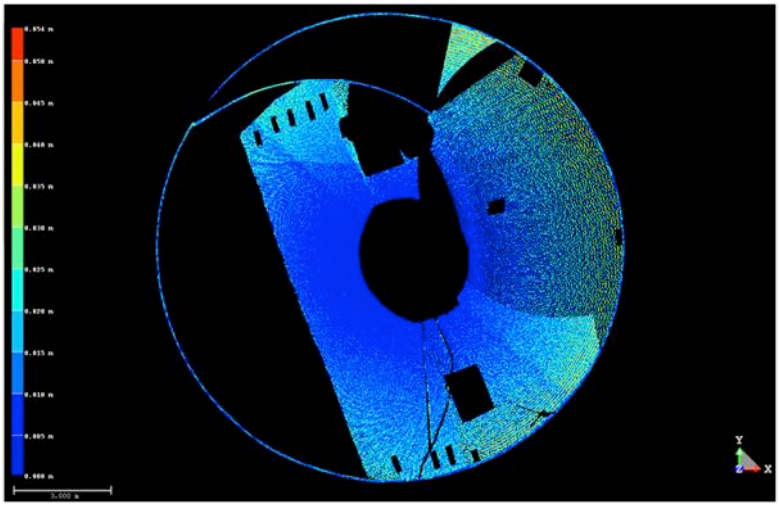
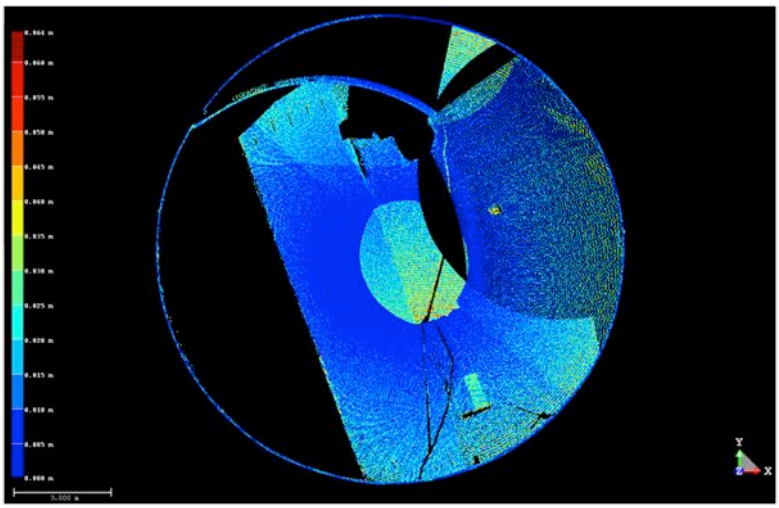


Abbildung 5.29: Differenz der Punktwolke SW1 mit Modellierung und der Trimble-Punktwolke: Kontroll-Punktwolke der Kuppel (Skala 0 bis 3,4cm)



(a) SW1 (Skala: 0 bis 5,4cm)



(b) SW1-SW4 (Skala: 0 bis 6,4cm)

Abbildung 5.30: Differenz der Punktwolken SW1 bzw. SW1-SW4 und der Trimble-Punktwolke ohne Modellierung: Kontroll-Punktwolken des unteren Bereiches

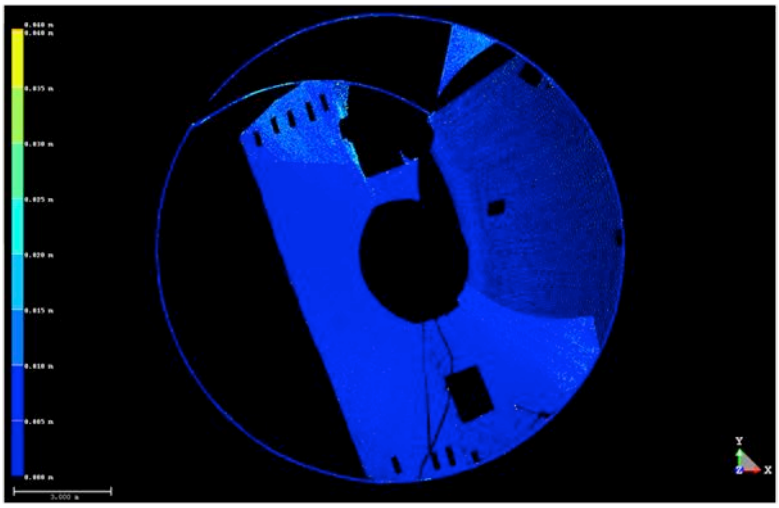
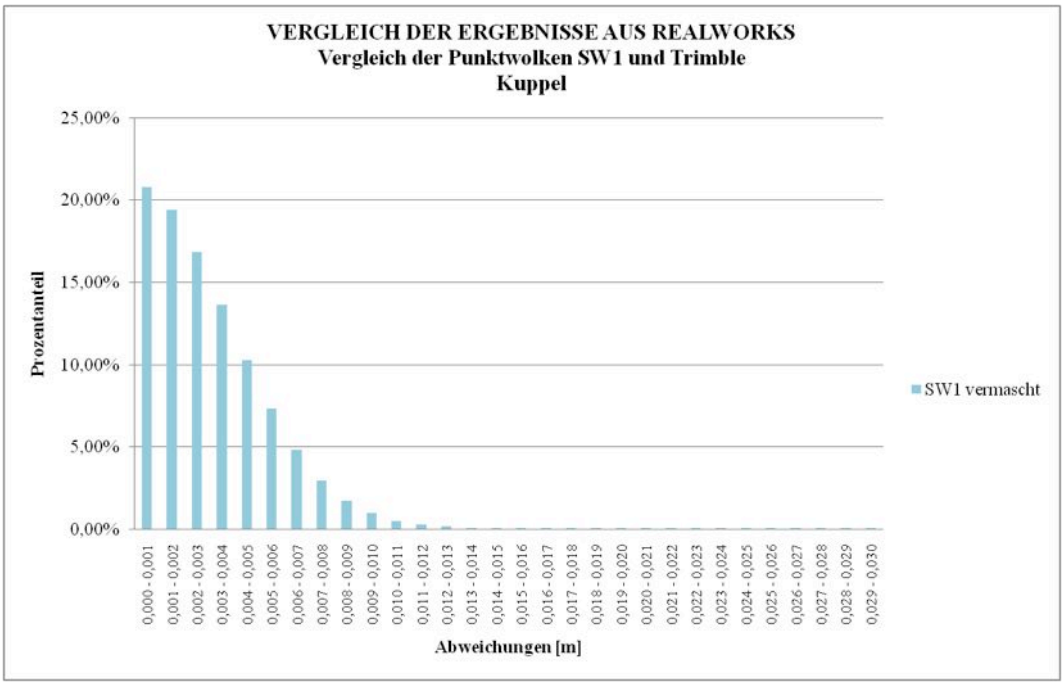
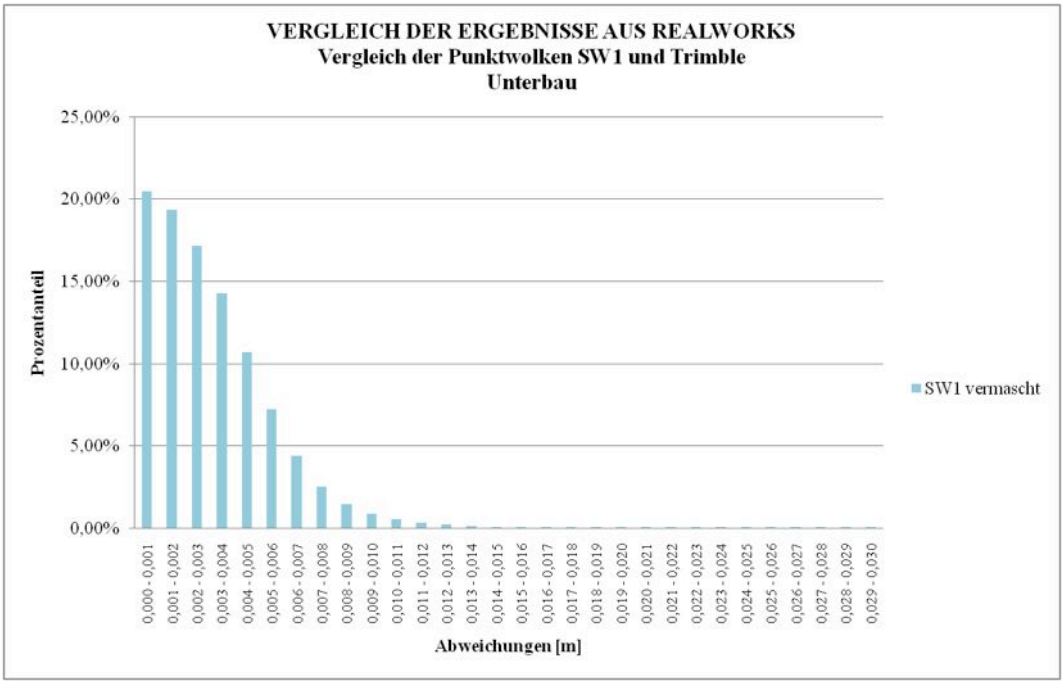


Abbildung 5.31: Differenz der Punktwolke SW1 mit Modellierung und der Trimble-Punktwolke: Kontroll-Punktwolke des unteren Bereiches (Skala: 0 bis 4cm)



(a) in der Kuppel



(b) im unteren Bereich

Abbildung 5.32: Darstellung der Ergebnisse aus RealWorks für die Differenz der Punktwolken SW1 und Trimble

5.3.2 Punktwolkenvergleich in CloudCompare

In CloudCompare erfolgte der Vergleich zwischen den Punktwolken anhand der Option „Cloud/Cloud Dist.", deren Funktionsweise fast identisch zu der des Tools „Cloud/Mesh Dist." ist. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Funktion der Punktwolken festgelegt werden muss, indem eine als Referenz definiert wird. Dieser Schritt ist beim Vergleich mit einem

CAD-Modell nicht notwendig, weil dieses automatisch als Bezug dient. In dem geöffneten „Distance computation”-Fenster werden wieder statistischen Angaben, die aus den Chanfrein'schen Entfernungen ermittelt wurden, angezeigt. Dank „Compute” findet eine genauere Berechnung der Abweichungen zwischen den Datensätzen nach der Hausdorff-Metrik statt. Interessant ist an der Stelle die Möglichkeit, der Referenz-Punktwolke ein lokales Modell anzupassen. Die folgende Auswahl steht zur Verfügung:

- NONE: keine Modellierung (Standardeinstellung), der Abstand zum nächstliegenden Punkt wird gerechnet.
- Least Square Plane: lokale Annäherung der Punktwolke mit einer Ebene (nach der Methode der kleinsten Quadrate) - nicht sehr genau aber dafür sehr schnell.
- 2,5D Triangulation: lokale Annäherung der Punktwolke mit einer 2,5D Delaunay-Triangulation (nach Projektion der Punkte auf eine nach der Methode der kleinsten Quadrate angepasste Ebene) - mittlere Rechen-Geschwindigkeit und Genauigkeit.
- Height Function: lokale Annäherung der Punktwolke mit einer quadratischen Höhenfunktion der Form $z = ax + by + cx^2 + dy^2 + exy$ (nach Projektion der Punkte auf eine nach der Methode der kleinsten Quadrate angepasste Ebene) - bessere Genauigkeit aber langsamer.

Aufgrund der besseren Genauigkeit wurde die Leica-Punktwolke mittels der „Height Function” modelliert. Da bei dieser Diplomarbeit keine sehr großen Datenmengen vorliegen, spielte die Rechenzeit bei der Auswahl des Modellierungsansatzes keine entscheidende Rolle (ca. 5 Sekunden). Die erhaltenen Kontroll-Punktwolken wurden wie gewöhnlich zur Bearbeitung in Excel in Schichten mit kleinen Intervallen unterteilt.

Graphische Ergebnisse (CloudCompare)

Die von der Software gelieferten Darstellungen sind sehr ähnlich und die Unterschiede hängen wiederrum von den verschiedenen Punktdichten ab. Dies fällt besonders im Unterbau auf: die größten Abweichungen beim Vergleich zwischen SW1-SW4 und Trimble befinden sich in der Mitte des Hörsaals. In diesem Bereich sind nur Punkte der ScanWorld 4 zu finden (Schattenbereich des ersten Standpunktes), während er bei der Laserscanaufnahme mit dem Trimble GX zweimal erfasst wurde.

Die rechteckige Zone in der Kuppel, in der etwas größere Abweichungen als für den Rest der Punktwolke auftreten, entspricht dem Bereich, der mit dem Trimble GX 3D-Scanner fein aufgenommen wurde (nur als Test) und deshalb eine deutlich höhere Punktdichte besitzt. Dass die Abweichungen genau in diesem Bereich etwas größer als für die Gesamtpunktwolke sind, ist allerdings purer Zufall. Bei einer Inkrementierung von 3cm auf 15m (Einstellung bei den anderen Laserscanaufnahmen mit dem Trimble GX) wären diese Diskrepanzen vermutlich nicht aufgefallen. Die entsprechenden Abbildungen befinden sich im Anhang E.1.

Es wurde im Abschnitt 5.2.2 schon darauf eingegangen, dass CloudCompare weitere Optionen, wie die Erzeugung von Histogrammen, anbietet. Abb. 5.33 stellt die Kontroll-Punktwolke und Histogramm des Vergleiches der Trimble-Punktwolke mit der modellierten ScanWorld 1 in der Kuppel dar. Die Verteilung entspricht der statistischen Auswertung der RealWorks-Ergebnisse

und gibt einen ersten Eindruck über die zu erwartende Excel-Resultate bzw. Diagramme. Laut diesem Histogramm weisen 67,55% der Punkte Abweichungen kleiner als 7,7mm auf. Wie in RealWorks können in CloudCompare nur die Beträge der Abstände ermittelt werden. Wird die Annahme getroffen, dass es sich um zufällige Abweichungen handelt, würde es bedeuten, dass die Standardabweichung bei etwa ±7,7mm liegt.

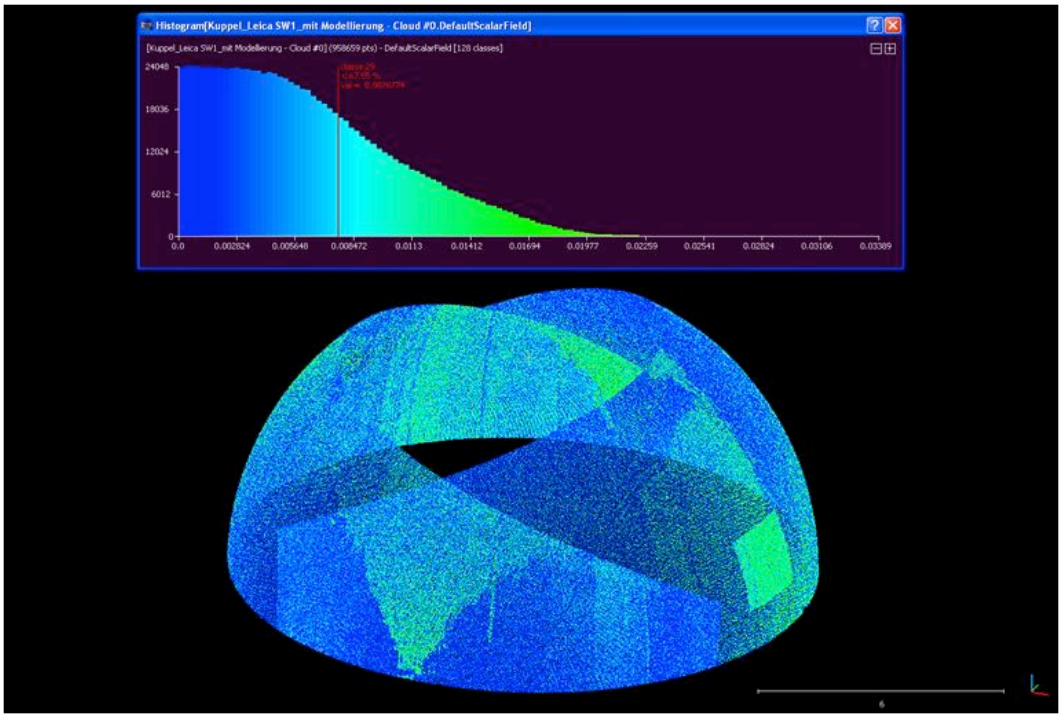


Abbildung 5.33: Kontroll-Punktwolke und Histogramm aus dem Vergleich der modellierten Punktwolke SW1 mit der Trimble-Punktwolke in CloudCompare

Statistische Ergebnisse (Excel)

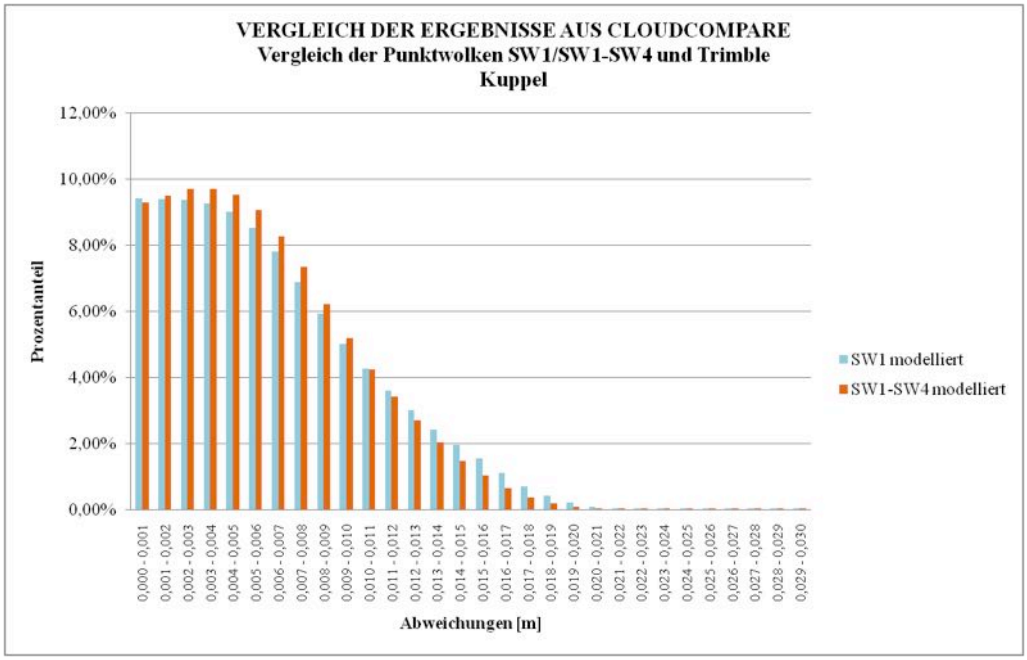
Die in Excel ermittelten Mittelwerte und Standardabweichungen (Tab. 5.12) entsprechen den graphischen Resultaten. Für den Vergleich der modellierten Punktwolke SW1 mit dem Trimble-Datensatz in der Kuppel wurde z.B. eine Standardabweichung σ von ±7,5mm berechnet (gegen ±7,7mm anhand des Histogramms in CloudCompare).

Im Gegensatz zu den RealWorks-Ergebnissen, sind hier die Mittelwerte und Standardabweichungen in der Kuppel und im Unterbau nicht gleich: sowohl für den Vergleich mit SW1 als auch mit SW1-SW4 sind die mittleren Abweichungen im Kuppelbereich größer als die im unteren Bereich des Hörsaals. Außerdem ist überhaupt kein Trend in den Werten zu erkennen. Dies liegt vermutlich in der Modellierung der Punktwolke, die stärker als eine Vermaschung von der Geometrie des Objektes und der Punktdichte abhängig ist.

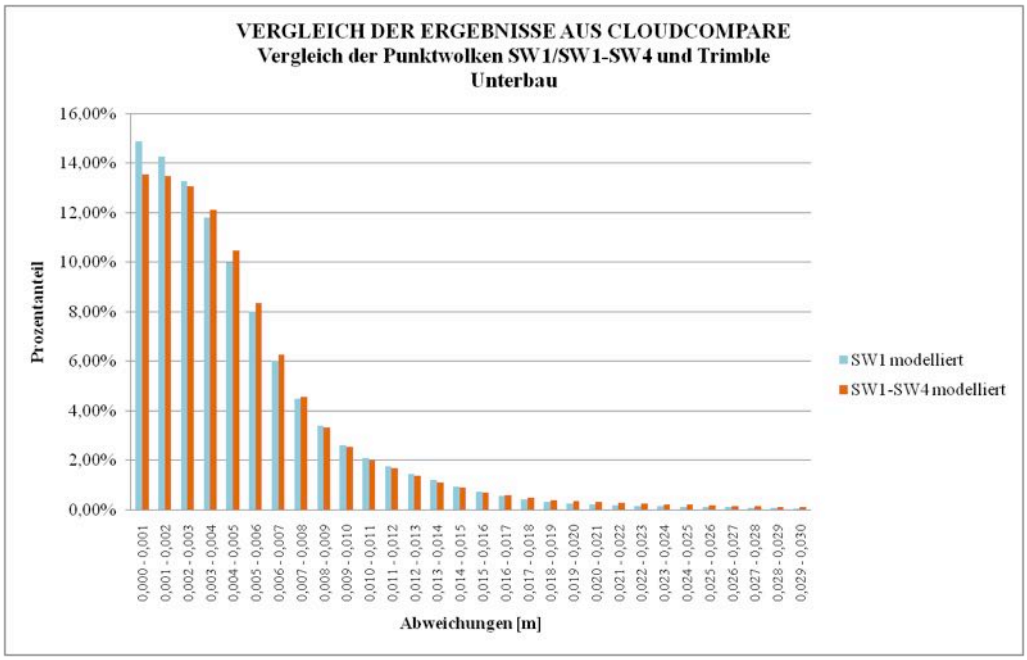
Beim Vergleich mit einer Modellierung der Referenz weisen die meisten Punkte Abstände kleiner als 1cm auf. Dennoch sind die Prozentanteile an Punkten unter 5mm-Abweichung nicht mehr so hoch wie die aus dem Vergleich mit der vermaschten Leica-Punkwolke in RealWorks. Da es sich in RealWorks um eine Vermaschung und in CloudCompare um eine Modellierung handelt, sind die Ergebnisse selbst nicht direkt vergleichbar. Allerdings können anhand der Ergebnisse die unterschiedlichen Ansätze zur Bestimmung der Abstände verglichen werden (s. Kap. 5.3.3).

	Kuppel			Unterbau		
	d_M [mm]	σ_d [mm]	σ [mm]	d_M [mm]	σ_d [mm]	σ [mm]
SW1 modelliert	6,2	±4,3	±7,5	4,9	±4,7	±6,8
SW1-SW4 modelliert	5,9	±4,0	±7,1	5,2	±5,3	±7,4
Max.	6,2	±4,3	±7,5	5,2	±5,3	±7,4
Min.	5,9	±4,0	±7,1	4,9	±4,7	±6,8
Diff. (Max-Min)	0,3	0,3	0,4	0,3	0,6	0,6

Tabelle 5.12: Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich der Laserscanaufnahmen in CloudCompare



(a) in der Kuppel



(b) im unteren Bereich

Abbildung 5.34: Darstellung der Ergebnisse aus CloudCompare für die Differenz der modellierten Punktwolken SW1/SW1-SW4 und Trimble

5.3.3 Vergleich der Ergebnisse

Zunächst wird kurz erklärt, wieso in RealWorks keine Modellierung und in CloudCompare keine Vermaschung der Leica-Punktwolken durchgeführt werden konnten:

- **RealWorks:** aufgrund der realen Geometrie des Hörsaals wäre die Modellierung der Punktwolke mit einem von der Software angebotenen mathematischen Körper sehr aufwändig gewesen. Darüber hinaus wurde das „Modell-Oberflächen-Vergleichs-Tool", das sich zum Vergleich zwischen einem modellierten Datensatz und einer Punktwolke eignet, nicht für den Vergleich mit einer Kugel implementiert. Deshalb wäre die Gegenüberstellung in der Kuppel gar nicht möglich gewesen.

- **CloudCompare:** im Gegensatz zu RealWorks sind die Ergebnisse einer Vermaschung der Punktwolken nicht zufriedenstellend. Die Software bietet keine zunehmende Vermaschung an, sondern nur eine 2,5D-Delaunay-Triangulation, deren Ergebnisse nicht zum Vergleich mit dem Trimble-Datensatz verwendet werden können.

Da die Punktwolken in RealWorks gefiltert und vermascht und in CloudCompare mit einem lokalen Modell angepasst wurden, ist der direkte Vergleich kritisch zu bewerten. Da jedoch die Eingangsdaten identisch sind, können die unterschiedlichen Berechnungsarten der Abstände verglichen werden. Im Gegensatz zum Vergleich mit dem CAD-Modell liefern RealWorks und CloudCompare beim Vergleich der Leica- und Trimble-Punktwolken unterschiedliche Ergebnisse. Dies wird anhand des Beispiels der vermaschten bzw. modellierten ScanWorld 1 mittels zweier Histogramme (entsprechende Tabellen im Anhang E.2) und einer zusammenfassenden Tabelle veranschaulicht (Abb. 5.35 und Tab. 5.13).

Beim Vergleich der Leica- mit der Trimble-Punktwolke sind sowohl in der Kuppel als auch im Unterbau die von RealWorks gelieferten Abweichungen kleiner als die aus CloudCompare. Beim Vergleich mit der vermaschten Referenz liegen etwa 81% der Punkte unter 5mm Abweichung gegen rund 47% beim Vergleich mit der modellierten Leica-Punktwolke. Dies liegt darin, dass die Referenz jeweils modelliert wurde, aber dass zwei völlig verschiedene Ansätze eingesetzt wurden. Bei der in CloudCompare durchgeführten Modellierung anhand der „Height Function" wird die Referenz durch eine lokale, ausgleichende Ebene angenähert. Somit läuft die erhaltene Fläche nicht exakt durch die Punkten der Referenz. Im Gegensatz dazu wird bei einer zunehmenden Vermaschung in RealWorks (ohne Glättung oder Entfernung der Spitzen) jeder Punkt mit dem Nächstliegenden verbunden. Der Nachteil ist allerdings, dass das geometrische Messrauschen durch eine Dreiecksvermaschung nicht eliminiert wird, was bedeutet, dass die unvermeidbaren, zufälligen Abweichungen den Vergleich beeinträchtigen. Trotzdem stellt die Vermaschung der Referenz die geeignetste Lösung zum Punktwolkenvergleich dar: bei der Modellierung wird zwar das geometrische Messrauschen berücksichtigt aber dadurch kann auch die Mikro-Struktur des Objektes im Rauschen „untergehen".

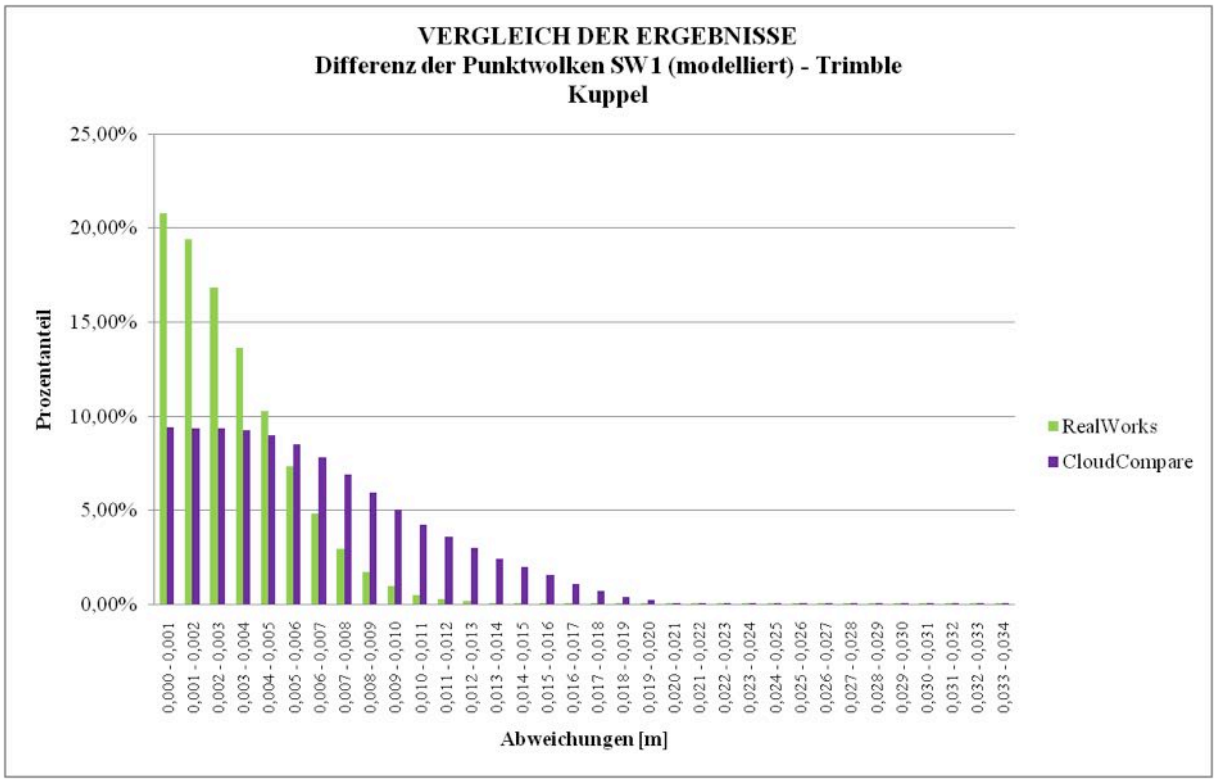
Tab. 5.13 bestätigt, dass alle Werte aus der Auswertung der von CloudCompare gelieferten Ergebnisse etwa doppelt so groß wie die aus den RealWorks-Resultaten sind. Beispielsweise in der Kuppel weist CloudCompare einen mittleren Abstand von 6,2mm gegen 3,1mm für RealWorks (obwohl die maximale Entfernung jeweils bei 34mm liegt). Im unteren Bereich des Hörsaals sind sogar die maximalen Entfernungen zwischen den beiden Punktwolken unterschiedlich (39mm und 53mm).

	Kuppel		Unterbau	
SW1/Trimble	**RealWorks**	**CloudCompare**	**RealWorks**	**CloudCompare**
Min. Dist. [mm]	0	0	0	0
Max. Dist. [mm]	34	34	39	53
d_M [mm]	3,1	6,2	3,1	4,9
σ_d [mm]	±2,4	±4,3	±2,5	±4,7
σ [mm]	±3,9	±7,5	±3,9	±6,8

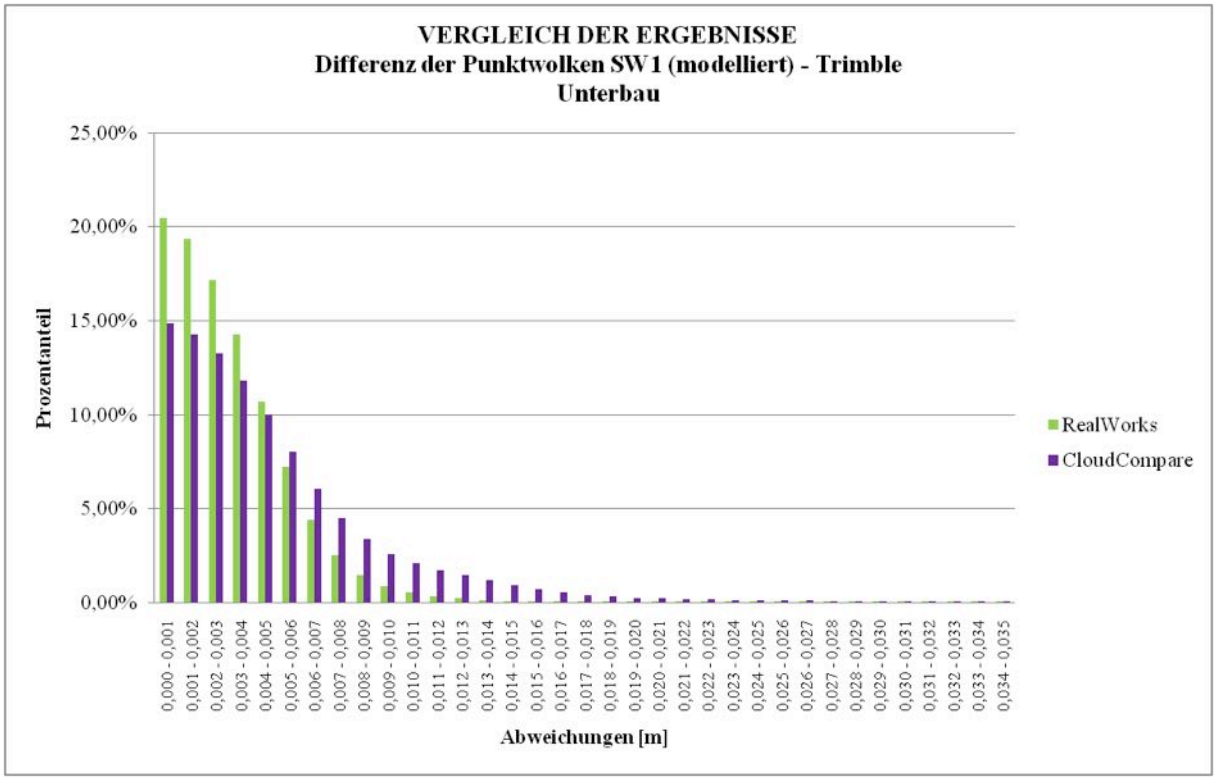
Tabelle 5.13: Vergleich der modellierten Punktwolke SW1 mit der Trimble-Punktwolke: Zusammenfassung der statistischen Ergebnisse aus RealWorks und CloudCompare

Angemerkt sein noch, dass mit der Software CloudCompare keine Modellierung außerhalb der Tools „Cloud/Mesh Dist." und „Cloud/Cloud Dist." möglich ist. Deshalb bleibt das graphische Ergebnis der Annäherung der Punktwolke mit einer quadratischen Höhenfunktion unbekannt.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Wahl der angewandten Vermaschung bzw. Modellierung beim Vergleich zwischen zwei Laserscanaufnahmen eine entscheidende Rolle spielt, woraus folgt, dass die wohlbedachte Wahl der eingesetzten Software grundlegend ist.



(a) in der Kuppel



(b) im unteren Bereich

Abbildung 5.35: Differenz der Punktwolken SW1 und Trimble: Vergleich der Ergebnisse aus RealWorks und CloudCompare

KAPITEL 6

FAZIT UND AUSBLICK

Das terrestrische Laserscanning stellt ein relativ neues Messverfahren dar, das im Rahmen dieser Diplomarbeit anhand des praktischen Beispiels des Hörsaals im Heidelberger „Haus der Astronomie" eingesetzt und untersucht wurde. Das Messprinzip beruht auf einer inkrementellen Abtastung des Objektes, bei welcher die Entfernung und die Raumwinkel jedes Punktes ermittelt werden. Das Ergebnis einer solchen Aufnahme ist eine Punktwolke. Die vorliegende Arbeit befasste sich mit der Verarbeitung und Auswertung der erhaltenen Datensätze, im Sinne eines Soll-Ist-Vergleiches mit dem CAD-Modell des Gebäudes und einer Gegenüberstellung der Laserscanaufnahmen selbst. Verschiedene Softwarepakete wurden dafür verwendet, deren angebotenen Funktionen und erzielten Ergebnisse zum einen analysiert und zum anderen miteinander verglichen wurden. Wichtig war dabei, die hauptsächlichen Unterschiede sowie die Stärken und Schwächen der Programme bei einer solchen Aufgabe aufzudecken.

Zwei verschiedene Laserscanner, der Leica HDS6000 und der Trimble GX 3D, kamen zum Einsatz. Während der Erste auf das Phasenvergleichsverfahren mit einer Scanrate von etwa 500.000 Punkte/Sek. basiert, funktioniert der Zweite nach dem Prinzip der Impulslaufzeitmessung und erreicht deswegen nur eine hundertfach kleinere Messrate. Darüber hinaus gehört das Leica-Gerät zur Kategorie der Panoramascanner, die ein Sichtfeld von 360° x 310° abdecken im Gegensatz zum Trimble-Scanner, der über ein in Vertikalrichtung auf 60° eingeschränktes Sichtfeld verfügt. Mit diesem Instrument konnte deshalb die 12m hohe Kuppel des Hörsaals nicht vollständig erfasst werden. Außerdem unterscheidet sich auch grundsätzlich der Ablauf der Laserscanaufnahmen bei den beiden Instrumenten. Vor der Messung mit dem Leica HDS6000 mussten zuerst einige ausgedruckte „Black&White"-Targets gut verteilt im Hörsaal angebracht werden, die dann tachymetrisch aufgenommen wurden und somit Koordinaten im übergeordneten System bekamen. Am Tag der Laserscanaufnahme wurde das Instrument an bestimmten Stellen stationiert, die Hauptscans durchgeführt und die Targets fein aufgenommen, so dass ihre Mittelpunkte jeweils automatisch bestimmt werden konnte. Allerdings erfolgte vor Ort keine Verknüpfung der aus den verschiedenen Standpunkten ermittelten Punktwolken, deren Punkte nur in einem standpunktbezogenen Koordinatensystem bekannt waren. Die Registrierung und Georeferenzierung fanden im Nachhinein anhand der tachymetrisch ermittelten Koordinaten der Zielmarken statt. Mit dem Trimble GX liefen die Messungen ganz anders, indem der Scanner

nach der Methode der „Freien Stationierung” stationiert wurde. Die Zielmarken wurden über im Gebäude-Koordinatensystem bekannten Festpunkte aufgestellt und am Anfang des Scanvorganges fein aufgenommen. Der Standpunkt wurde also georeferenziert und die resultierenden Punktwolken auch, so dass sie auf der Baustelle bereits verknüpft waren. Diese Vorgehensweise spielte bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse eine wichtige Rolle.

Die Auswertung der Punktwolken fing mit den notwendigen Vorverarbeitungsschritten an. Die Leica-Datensätze mussten zuerst registriert und georeferenziert werden. Danach wurden sowohl die Leica- als auch die Trimble-Punktwolken von allen Störmessungen bereinigt, um sicher zu gehen, dass bei den verschiedenen Vergleichen keine groben Fehler aufgrund mobiler Elemente wie Baulampen usw. auftreten würden. Diese sehr aufwändige Arbeit wurde nicht vernachlässigt, um relevante Ergebnisse gewährleisten zu können. Danach wurden die Datensätze auf ihr geometrisches Messrauschen untersucht, basierend auf dem Abstand jedes Punktes zu einer durch die Punktwolke gelegten ausgleichenden Fläche. Aufgrund der Geometrie des Hörsaals konnte dies nicht in einem Rechenvorgang durchgeführt werden. Die Kuppel (Halbkugel), die Wände des unteren Bereiches (Zylinder) und der Boden (Ebene) wurden einzeln betrachtet. Aus einer Modellierung in den Auswertesoftware-Systemen Leica Cyclone und Trimble RealWorks wurde festgestellt, dass die Kuppel, die Wände und der Boden nicht exakt einem einfachen Körper, wie z.B. einer Halbkugel, einem Zylinder oder einer Ebene, entsprechen, sondern dass systematische Abweichungen auftreten. Das geometrische Messrauschen konnte also nicht anhand der existierenden Software-Systeme bestimmt werden, so dass eine andere Lösung gefunden werden musste.

Zu diesem Zweck wurden aus den Punktwolken fünf Patches für den Boden und jeweils vier Patches für die Kuppel und die Wände ausgeschnitten (s. Kap. 5.1). Diese Patches entsprechen etwa 1m^2 großen Bereichen, die wiederum in kleine Sub-Patches (20cm x 20cm) unterteilt wurden. Nachgewiesen wurde, dass diese kleine Bereiche ohne Verlust an Genauigkeit durch eine ausgleichende Ebene approximiert werden konnten. Anhand einer selbst implementierten Matlab-Routine wurden für jedes Sub-Patch die Parameter der ausgleichenden Ebene sowie der mittlere Punktabstand und die Standardabweichung berechnet. Das gesuchte geometrische Messrauschen entspricht dabei der Standardabweichung der Abstände zur ausgleichenden Ebene. Die Ergebnisse wurden gemittelt, so dass zunächst ein Wert für den Boden, die Kuppel und die Wände und dann ein allgemeines Resultat jeweils für die Leica- und Trimble-Punkwolke ermittelt wurden. Die Standardabweichungen wurden zu ±1,3mm und ±2,4mm bestimmt. Der Unterschied hängt vermutlich von den zur Bestimmung des geometrischen Messrauschens angewandten Punktwolken ab: einerseits wurde die unregistrierte Leica-ScanWorld 1, andererseits der bereits vor Ort registrierte Trimble-Datensatz verwendet. Aus der Verknüpfung der von den verschiedenen Standpunkten aus erfassten Punktwolken folgt in den Überlappungsbereichen aufgrund kleiner, unvermeidlicher Restfehler eine gewisse Ungenauigkeit, was das etwas schlechtere Ergebnis des Trimble-Datensatzes erklären könnte. Dennoch bleiben die erhaltenen Standardabweichungen unter den Herstellerangaben und somit sehr gut.

Vergleich der Punktwolken mit dem CAD-Modell (s. Kap. 5.2)

Nachdem das geometrische Messrauschen bestimmt wurde, konnte auf einen wesentlichen Aspekt dieser Arbeit eingegangen werden, nämlich der Soll-Ist-Vergleich zwischen den erhobenen Punktwolken und dem CAD-Modell. Da diese Funktionalität im Programm Rhinoceros 3D vorhanden war, hatten sowohl die Architekten als auch das Bauunternehmen ganz besonderes Interesse an einem Vergleich anhand dieser Software. Jedoch wurden die Software-Systeme RealWorks und CloudCompare, die für solche Aufgaben entwickelt wurden und deshalb zahlreiche Funktionen anbieten, zusätzlich verwendet. Es wurden die folgenden Datensätze analysiert: die unregistrierte Leica-ScanWorld 1 (SW1), die aus der Verknüpfung resultierende Punktwolke ScanWorld 1 - ScanWorld 4 (SW1-SW4) sowie den gesamten Trimble-Datensatz. Eine visuelle Interpretation der graphischen Darstellungen sowie eine in Excel durchgeführte Auswertung der Ergebnisse wurden jeweils vorgenommen.

In den drei Software-Systemen wurde beim Vergleich der Punktwolke mit dem CAD-Modell eine farbige Darstellung der Abweichungen erzeugt. Aus der visuellen Analyse konnte in der Kuppel ein Trend (ellipsenförmiger Fleck) im mittleren Bereich der Fertigteile erkannt werden. Es wurde auch festgestellt, dass vier Fertigteile besonders große Abweichungen bis etwa 2,5cm zur Soll-Fläche aufweisen. Leider liefern sowohl RealWorks als auch CloudCompare zwar sehr genaue Abweichungen, jedoch keine Information über deren Richtung. Im Gegensatz dazu wird in Rhino aus jedem Punkt ein Residuen-Vektor generiert, der senkrecht zur Soll-Fläche ausgerichtet ist. Allerdings können keine Vorzeichen bei der Auswahl der Skala eingegeben werden, so dass die Farben auch keine Information über die Richtung sondern nur über die Beträge der Abweichungen liefern. Dennoch konnte anhand der Residuen-Vektoren die Biegungsrichtung der Fertigteile ermittelt werden und zwar, dass die Punkte im oberen und unteren Teil der Kuppel immer oberhalb und im mittleren Bereich unterhalb der Soll-Fläche liegen also eine Verbiegung nach innen. Im Unterbau des Hörsaals traten an der Stelle, wo die Wand und die Brüstung zusammenstoßen, Abstände zum CAD-Modell bis zu 7,5cm auf. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass der Boden nicht eben und die Brüstung nicht vertikal gegossen wurden. Diese Beule in der Brüstung wurde bereits vor der Aufnahme der Laserscandaten anhand einer tachymetrischen Aufnahme entdeckt, und zwischen der Erfassung mit dem Leica HDS6000 und der mit dem Trimble GX 3D von der Baufirma nachgearbeitet. Deshalb waren nicht nur visuelle sondern auch statistische Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Vergleiche zu erwarten.

Bei der in Excel durchgeführten Analyse der Resultate wurden u.a. Histogramme zur Darstellung der Prozentanteile an Punkten in Abhängigkeit von den Abweichungsbeträgen erstellt. Aufgrund der soeben erklärten Veränderung der Brüstung zwischen den Laserscanaufnahmen trat bei den Leica-Datensätzen tatsächlich ein deutlich größerer Punktanteil mit Abweichungen zwischen 2,8cm und 3,6cm auf als bei der Trimble-Punktwolke. Zur Ergänzung der Histogramme wurden der Mittelwert der Beträge d_M (Gl. 5.5) und zwei verschiedene Standardabweichungen σ_d (Gl. 5.6) und σ (Gl. 5.7) berechnet. Die Erste entspricht der Streuung der Abstandsbeträge um deren Mittelwert, was relativ wenig aussagt. Die Zweite dagegen stellt die Streuung der Abstände zum CAD-Modell dar, was viel interessanter, jedoch auch kritisch zu betrachten ist, da hier vorausgesetzt wird, dass die Abweichungen vom Modell normalverteilt sind. Die wesentlichen Ergebnisse der Vergleiche mit der Soll-Fläche befinden sich in der Tab. 6.1a. Zum

einen kann festgestellt werden, dass die von RealWorks und CloudCompare gelieferten Ergebnisse etwa gleich sind, während die Mittelwerte und Standardabweichungen aus Rhino andere Werte aufweisen. Beim Vergleich der Resultate aus den verschiedenen Software-Systemen wurde auch gezeigt, dass anhand von Rhino etwas optimistischere Werte (mehr Punkte mit kleineren Abweichungen) ermittelt werden. Dies hängt vermutlich von den verschiedenen Algorithmen zur Bestimmung der Abstände zum CAD-Modell ab. Da die Bearbeitung von großen Datenmengen bzw. Punktwolken nicht die Hauptaufgabe von Rhino darstellt, verfügt die im Programm vorhandene Funktion möglicherweise über Rechenvorgänge zur Ermittlung der Abweichungen zwischen einer Punktwolke und einem CAD-Modell, die nicht so genau ist wie die, die in RealWorks bzw. CloudCompare realisiert sind. Zum anderen fällt in der Tab. 6.1a auf, dass die Mittelwerte des Trimble-Datensatzes in der Kuppel größer und umgekehrt im Unterbau kleiner als die mittleren Abweichungen der Leica-Punktwolken sind. In diesem Fall sind die Ergebnisse des Unterbaus wegen der nachträglichen Änderung der Brüstung erklärbar. Im Kuppelbereich treten Differenzen zwischen Leica und Trimble bis zu 0,8mm auf, was sowohl in dem geometrischen Messrauschen als auch in den unterschiedlichen Ansätzen zur Registrierung und Georeferenzierung liegen könnte. Angemerkt sein noch, dass außer für die maximale Abweichung - was vermutlich in isolierten, nicht bereinigten Punkten liegt - die berechneten Werte für SW1 und SW1-SW4 sehr ähnlich sind, was bedeutet, dass die Registrierung keinen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dies kann in anderen Fällen, wo eine Registrierung zur Erfassung des ganzen Objektes unvermeidbar ist, ein wichtiges Ereignis darstellen.

Insgesamt weisen die Punktwolken maximale Abweichungen bis zu 4cm in der Kuppel und 7,5cm im unteren Bereich auf. In der Kuppel handelt es sich um Einzelpunkte, die bei der Bereinigung nicht entfernt wurden, aber die aufgrund der großen Punktanzahl keine entscheidende Rolle spielen. Im Unterbau treten weitgehend größere Abweichungen zur Soll-Fläche auf. Somit wurde eine mittlere Differenz von 7,2mm±8,6mm für die Kuppel und von 14,1mm±17,4mm im unteren Bereich des Hörsaals ermittelt. Während die Abweichungen des Unterbaus etwas überraschend, deren Auswirkungen jedoch unrelevant für die weiteren Bauarbeiten sind, wurden aufgrund der beim Einbau der Fertigteile auftretende Probleme deutlichere Diskrepanzen im Kuppelbereich erwartet. Bei einer solchen Struktur und Geometrie können diese Ergebnisse als gut betrachtet werden und das Rhino-Modell ohne Weiteres von den Architekten und der Baufirma für die Anbringung der Verkleidung verwendet werden.

Vergleich der beiden Laserscanaufnahmen (s. Kap. 5.3)

Da zwei völlig unterschiedliche Laserscanner im Hörsaal im „Haus der Astronomie” zum Einsatz kamen, war nicht nur der Soll-Ist-Vergleich mit dem CAD-Modell sondern auch ein direkter Vergleich zwischen den Punktwolken interessant. Dies erfolgte ausschließlich in RealWorks und CloudCompare, da Rhinoceros 3D dafür kein Tool anbietet. Ansonsten wurde wie beim Vergleich mit der Soll-Fläche jeweils eine graphische und statistische Auswertung durchgeführt.

Zur Gegenüberstellung zweier Punkwolken muss zuerst ein Datensatz als Referenz definiert werden. Aufgrund der umfangreichen Aufnahmen mit dem HDS6000 übernahmen die Leica-Punktwolken SW1 bzw. SW1-SW4 diese Rolle und die Trimble-Punkte wurden jeweils damit verglichen. Die gesuchten Abweichungen entsprechen dann nicht dem Abstand eines Trimble-

Punktes zum nächstliegenden Leica-Punkt (i.d.R. zu lang), sondern dem Abstand senkrecht zur durch die Leica-Punktwolke gelegten ausgleichenden Fläche. Deswegen musste die Referenz vermascht („Zunehmende Vermaschung" in RealWorks) bzw. modelliert (Anpassung einer quadratischen „Height Function" in CloudCompare) werden. Dass zwei verschiedene Ansätze (Dreiecksvermaschung und Modellierung) eingesetzt wurden, lag in den von den Software-Systemen angebotenen Funktionen und deren Ergebnisse. Aufgrund der Geometrie des Hörsaals wäre eine Modellierung der Punktwolke mit einem von RealWorks angebotenen einfachen Körper sehr aufwändig und in der Kuppel gar nicht möglich gewesen. Im Gegensatz dazu verfügt CloudCompare nur über eine 2,5D-Delaunay-Triangulation, deren Ergebnisse nicht zufriedenstellend sind und deshalb nicht zum Vergleich verwendet werden können. Außerdem wurde die Leica-Punktwolke SW1-SW4 wegen der auf die Registrierung zurückzuführenden kleinen Verschiebung nicht vermascht. Zusammenfassend wurden folgende Datensätze als Referenz verwendet: die gefilterte (räumliches Filtern von 2cm), vermaschte ScanWorld 1 in RealWorks und die modellierten Punktwolken SW1 und SW1-SW4 in CloudCompare.

Anhand der graphischen Darstellungen kann in diesem Fall weniger als beim Vergleich mit dem CAD-Modell erkannt werden. Obwohl die Leica- und Trimble-Punktwolken nicht genau übereinander liegen, waren keine großen Abweichungen zu erwarten, was durch die überwiegend dunkelblaue Farbe bestätigt wurde. Der größte Anteil an Punkten weisen Abweichungen unter 1cm auf, was ein gutes Ergebnis ist. Damit werden auch die systematischen Abweichungen vom CAD-Modell durch zwei unabhängige Erfassungen bestätigt. Besonders interessant wäre hier die von den Software-Systemen nicht gelieferte Richtung der Residuen, anhand denen die Zufälligkeit der Abweichungen geprüft werden könnten. Möglich wäre, dass ein Laserscanner immer länger bzw. kürzer als der andere misst, was mittels der vorliegenden Darstellungen bzw. Ergebnisse nicht ermittelt werden kann.

Die Resultate der in Excel durchgeführten statistischen Analyse sind in der Tab. 6.1b zusammengefasst. Dass die maximalen Differenzen bei 3,7cm im Kuppelbereich und 6,5cm im Unterbau liegen, hängt nicht von deutlichen Diskrepanzen zwischen den Punktwolken sondern nur von der Bereinigung der Datensätze ab. Sollten noch Trimble-Punkte außerhalb vom modellierten Referenz-Datensatz liegen (Punkte der Verkabelung, Baulampen usw.), treten größere Abweichungen auf, die keinen relevanten Unterschieden sondern Ausreißern entsprechen. Da die Referenz in RealWorks vermascht und in CloudCompare modelliert wurde, ist der direkte Vergleich kritisch zu betrachten. Allerdings wurden die selben Eingangsdaten verwendet, d.h. dass die unterschiedlichen Ansätze zur Berechnung der Abstände verglichen werden können. Beim Vergleich mit der vermaschten ScanWorld 1 in RealWorks weisen 81% der Punkte Abweichungen unter 5mm auf, gegen rund 47% beim Vergleich mit der modellierten Referenz in CloudCompare. Generell wurden deutlich kleinere statistischen Merkmale (maximale Abstände, Mittelwerte und Standardabweichungen) aus den Ergebnissen von RealWorks als aus deren von CloudCompare berechnet. Dies liegt vermutlich daran, dass bei einer Modellierung eine ausgleichende Fläche durch die Punktwolke angelegt wird, die zwar das geometrische Messrauschen der Referenz berücksichtigt aber die Mikro-Struktur des Zielobjektes glättet. Zum Punktwolkenvergleich stellt die von RealWorks angebotene zunehmende Vermaschung die geeignetste Lösung, da die Punkten der Referenz ohne weitere Verarbeitung verbunden werden.

Beim Vergleich mit dem vermaschten Datensatz in RealWorks wurde sowohl in der Kuppel

als auch im unteren Bereich des Hörsaals ein Mittelwert der Abweichungsbeträge von 3,1mm ermittelt. Diese Ergebnisse scheinen unabhängig von der Form und Struktur des Objektes. Dagegen wurden beim Vergleich der Trimble-Punktwolke mit der in CloudCompare modellierten ScanWorld 1 mittlere Abstände von 6,2mm für die Kuppel und 4,9mm für den Unterbau berechnet. Diese Unterschiede sind vermutlich von der Geometrie der modellierten Fläche abhängig; die Modellierung mittels einer quadratischen „Height Function" nähert nämlich die erhobene Punktwolke mit lokalen ausgleichenden Ebenen an, was in der kugelförmigen Kuppel zu ungenaueren Ergebnisse führen könnte. Generell kann man daraus schließen, dass die zwei Punktwolken leicht verschoben sind. Die Abweichungen sind auf die verschiedenen Stationierungs-, Registrierungs- und Georeferenzierungsverfahren sowie die unterschiedlichen geometrischen Messrauschen zurückzuführen. Ob die Leica- oder die Trimble-Punktwolke besser mit dem Ist-Zustand übereinstimmt, kann allerdings anhand der im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Messungen und deren Auswertung nicht eindeutig gesagt werden, da die aktuelle reale Geometrie des Gebäudes nicht genau bekannt ist. Dies ist ein Nachteil eines solchen Vergleiches anhand eines praktischen Beispiels, dessen Ist-Geometrie vom Soll-Zustand abweicht. Um eine Aussage treffen zu können, sollte z.B. eine umfangreiche tachymetrische Aufnahme vorgenommen werden, womit die Punktwolken verglichen werden müssten.

Ausblick

Diese Arbeit bestand aus zwei wesentlichen Teilen: der für das Architekturbüro und das Bauunternehmen durchgeführte Vergleich mit dem CAD-Modell und der Punktwolkenvergleich zur Gegenüberstellung der eingesetzten Laserscanner. Beim Ersten wurde festgestellt, dass Rhinoceros 3D Ergebnisse lieferte, die etwas unterschiedlich gegenüber denen aus RealWorks und CloudCompare waren. Obwohl Rhino nicht hauptsächlich für die Verarbeitung von Punktwolken entwickelt wurde, könnte die Funktion zum Vergleich mit dem Modell verbessert werden, so dass keine weitere Software zum Einsatz kommen müsste. Allerdings gibt Rhino - unter Voraussetzung einer Vorverarbeitung der Punktwolken - bereits zahlreiche Informationen für praktische Anwendungen aus, da der Trend in der Kuppel sowie die Beule in der Brüstung deutlich zu erkennen waren.

Der größte Mangel der verwendeten Softwarepakete war die nicht darstellbare bzw. bestimmbare Richtung der Residuen. Bereits zur visuellen Interpretation wären die Richtungen wichtig gewesen. Es wäre nämlich besser, wenn sich die Punkte, die sich oberhalb bzw. unterhalb der Soll-Fläche befinden, bereits anhand der Farbe unterscheiden würden. Darüber hinaus werden die Abweichungen ohne Vorzeichen geliefert, was bedeutet, dass bei einer statistischen Auswertung die Annahme einer Normalverteilung getroffen werden muss, um eine aussagekräftige Standardabweichung überhaupt berechnen zu können. Die eigentliche Verteilung bleibt daher unbekannt.

Trotzdem kann man schließlich sagen, dass aufgrund der Geometrie und Oberflächenstruktur des Hörsaals das terrestrische Laserscanning die beste Lösung zur Aufdeckung von Abweichungen zwischen Ist- und Soll-Zustand darstellte. Da dieses Messverfahren noch relativ neu ist, kann davon ausgegangen werden, dass sowohl die Laserscanner als auch die entsprechenden Software-Systeme innerhalb der nächsten Jahren verbessert werden.

		d_{Max} [mm]			d_{Mittel} [mm]			σ_d [mm]			σ [mm]		
		RW	CC	Rhino	RW	CC	Rhino	RW	CC	Rhino	RW	CC	Rhino
Kuppel	SW1	35	35	35	6,3	6,3	6,3	±4,4	±4,4	±4,2	±7,7	±7,7	±7,6
	SW1-SW4	40	40	40	6,4	6,4	6,4	±4,7	±4,7	±4,6	±7,9	±7,9	±7,9
	Trimble	38	36	39	7,2	7,2	6,7	±4,8	±4,8	±4,5	±8,6	±8,6	±8,1
	Max.	40	40	40	7,2	7,2	6,7	±4,8	±4,8	±4,6	±8,6	±8,6	±8,1
		40			**7,2**			**±4,8**			**±8,6**		
Unterbau	SW1	72	73	73	13,9	13,9	14,1	±10,3	±10,3	±10,3	±17,3	±17,3	±17,4
	SW1-SW4	72	75	74	13,4	13,4	13,6	±9,0	±9,0	±9,0	±16,2	±16,2	±17,3
	Trimble	73	73	73	12,0	11,4	11,5	±8,5	±8,2	±8,2	±14,7	±14,1	±14,2
	Max.	73	75	74	13,9	13,9	14,1	±10,3	±10,3	±10,3	±17,3	±17,3	±17,4
		75			**14,1**			**±10,3**			**±17,4**		

(a) Vergleich der erfassten Punktwolken mit dem CAD-Modell

		d_{Max} [mm]		d_{Mittel} [mm]		σ_d [mm]		σ [mm]	
		RW	CC	RW	CC	RW	CC	RW	CC
Kuppel	SW1 modelliert	34	34	3,1	6,2	±2,4	±4,3	±3,9	±7,5
	SW1-SW4 modelliert	-	37	-	5,9	-	±4,0	-	±4,0
	Max.	34	37	3,1	6,2	±2,4	±4,3	±3,9	±7,5
		37		**6,2**		**±4,3**		**±7,5**	
Unterbau	SW1 modelliert	39	53	3,1	4,9	±2,5	±4,7	±3,9	±6,8
	SW1-SW4 modelliert	-	65	-	5,2	-	±5,3	-	±5,3
	Max.	39	65	3,1	5,2	±2,5	±5,3	±3,9	±6,8
		65		**5,2**		**±5,3**		**±6,8**	

(b) Vergleich der Punktwolken

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der erhaltenen maximalen Abweichungen, Mittelwerte und Standardabweichungen

LITERATURVERZEICHNIS

[@Bernhardt+Partner, 2011] @Bernhardt+Partner (2011). Architekten Bernhardt und Partner. URL: http://www.bernhardtundpartner.de/.

[Deumlich und Staiger, 2002] Deumlich, F. und Staiger, R. (2002). *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.

[Eling, 2009] Eling, D. (2009). Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Dissertation Heft Nr. 641, Deutsche Geodätische Kommission, München. URL: http://dgk.badw.de/docs/c-641.pdf.

[Girardeau-Montaut, 2009] Girardeau-Montaut, D. (2009). *CloudCompare - Manuel utilisateur de la version 2.1*. EDF, Recherche et Developpement. URL: http://www.danielgm.net/cc/.

[Hesse, 2007] Hesse, C. (2007). Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. Dissertation Heft Nr. 608, Deutsche Geodätische Kommission, München. URL: http://dgk.badw.de/docs/c-608.pdf.

[Joeckel und Stober, 1999] Joeckel, R. und Stober, M. (1999). *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*. Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart.

[Kern, 2003] Kern, F. (2003). *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Dissertation, Technischen Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig.

[Kern, 2007] Kern, F. (2007). *Terrestrisches Laserscanning kurz und bündig*.

[Leica Geosystems AG, 2007] Leica Geosystems AG (2007). *Leica HDS6000 Gebrauchsanweisung*. Heerbrugg, Schweiz. URL: http://www.leica-geosystems.com/de/index.htm (unter Kundendienst, Downloads).

[RNZ, 2011] RNZ (2011). Weltweit einmaliger Platz unter den Sternen. *In: Rhein-Neckar-Zeitung Heidelberg*, 27.04.2011.

[Thiel und Wehr, 2004] Thiel, K.-H. und Wehr, A. (2004). Performance capabilities of laser scanners: an overview and measurement principle analysis. *In: International Archives of*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bd. 36 (Part 8): S. 14–18.

[Trimble, 2009] Trimble (2009). Datenblatt Trimble GX 3D-Scanner.

[@TrimbleS6, 2011] @TrimbleS6 (2011). Firma Trimble (URL: www.trimble.com), Trimble S6-Totalstation. URL: http://www.trimble.com/trimbleS6.shtml.

[@TUMünchen, 2011] @TUMünchen (2011). Technische Universität München, Geodäsie und Geoinformation. URL: http://www.gug.bv.tum.de/geomet/laserscanning-2.html.

[Voegtle et al., 2008] Voegtle, T., Schwab, I., und Landes, T. (2008). Influences of different materials on the measurements of a terrestrial laser scanner (TLS). *In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Bd. XXXVII (Part B5): S. 1061–1066.

[Voegtle und Wakaluk, 2009] Voegtle, T. und Wakaluk, S. (2009). Effects on the measurements of the terrestrial laser scanner HDS 6000 (Leica) caused by different object materials. *In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Bd. XXXVIII. URL: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/3-W8/papers/p80.pdf.

[Wakaluk, 2009] Wakaluk, S. (2009). Untersuchungen der Einflüsse unterschiedlicher Materialien auf die Messungen des TLS HDS6000. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Karlsruhe (KIT).

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1 Schnitt aus dem CAD-Modell des „Hauses der Astronomie” mit dem Hörsaal in seiner Mitte [@Bernhardt+Partner, 2011] 1

1.2 Luftbild des „Hauses der Astronomie” während der Bauphase 3

2.1 Schematische Darstellung eines Messvorgangs [@TUMünchen, 2011] 6

2.2 Systemkriterien eines Laserscanners [Kern, 2003] 7

2.3 Anwendungsbereiche des TLS im Vergleich mit anderen Verfahren [Kern, 2007] . 8

2.4 Messprinzip des Phasenvergleichsverfahrens[Joeckel und Stober, 1999] 9

2.5 Phasenvergleich [Joeckel und Stober, 1999] 10

2.6 Prinzip des Impulslaufzeitverfahrens [Deumlich und Staiger, 2002] 10

2.7 Unterscheidung nach Sichtfeld [Hesse, 2007] 11

2.8 Arten der Strahlablenkung [Hesse, 2007] 11

2.9 Reflexionsarten [Kern, 2003] 13

2.10 Wirkung der Strahldivergenz bei unterschiedlichen Oberflächengeometrien [Kern, 2003] 13

2.11 Einfluss der Temperatur und des Luftdrucks auf die Streckenmessung mit einem grünen (λ=532nm) und einem roten (λ=905nm) Laser [Kern, 2003] 16

3.1 „Haus der Astronomie”: CAD-Modelle der drei Stockwerksebenen [@Bernhardt+Partner, 2011] 17

3.2 Der Hörsaal 18

3.3 Tachymeter Trimble S6 und Ausrüstung 19

3.4 „Black&White”-Target der Firma Leica 20

3.5 Verteilung der angebrachten „Black&White”-Targets (Leica) 21

3.6 Scanner HDS6000 und entsprechendes Instrumentarium im Hörsaal 23
3.7 Sichtfeld des HDS6000 24
3.8 Die vier Standpunkte des HDS6000 zur Erfassung des Hörsaals 26
3.9 Drei zusätzliche Passpunkte zur Registrierung der ScanWorld 3 26
3.10 Feinscans eines „Black&White”-Targets und einer Kugel 27
3.11 Darstellung der ScanWorld 1 im Scan-Control-Fenster 28
3.12 Die zwei Standpunkte für den Trimble GX 30
3.13 Feinscan einer Trimble-Zielmarke 31
3.14 Panoramabilder der zu messenden Bereiche 32
3.15 Erfasste Punktwolke vom ersten Standpunkt aus (PointScape) 32

4.1 Cyclone Navigator 33
4.2 Registration-Fenster in Cyclone 35
4.3 Fehlerhafte Targeterkennung der Zielmarke T30 36
4.4 Cyclone Navigator: neu angelegte ScanWorld nach der Registrierung 36
4.5 Unbereinigte Punktwolke aus der Registrierung SW1-SW3-SW4 37
4.6 Modellierung der Wände in Cyclone 39
4.7 TIN-Vermaschung des Hörsaals in Cyclone 39
4.8 Echtfarben-Bild der Trimble-Punktwolke 40
4.9 „Punktbasierendes Modellierungstool” in RealWorks 41
4.10 „Modell-Oberflächen-Vergleichs-Tool” in RealWorks 43
4.11 „ZunehmendeVermaschung” der Trimble-Punktwolke in RealWorks 44

5.1 Auswahl der Patches für den Boden 47
5.2 Einfluss der Krümmung in der Halbkugel und im Zylinder 48
5.3 Einfluss der Winkel- bzw. Streckenmessgenauigkeit auf die Abweichung zur ausgleichenden Ebene bei flachem Einfallswinkel 54
5.4 Abweichungen zwischen SW1 und SW4 nach der Registrierung 55
5.5 CAD-Modell in RealWorks (Ansicht: Perspektive) 56
5.6 Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke der Kuppel 58
5.7 Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke des unteren Bereiches 59
5.8 Vergleich der Leica- (SW1, SW1-SW4) und der Trimble-Punktwolke mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken der Kuppel (Ansicht: Oben) 60

5.9 Vergleich der Leica- (SW1, SW1-SW4) und der Trimble-Punktwolke mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken des unteren Bereiches (Ansicht: Oben) . . . 61

5.10 Vergleich der Leica-Punktwolke SW1-SW4 mit dem CAD-Modell: Unterbau (Ansicht: Perspektive) 62

5.11 Vergleich der Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell in RealWorks - Punktanzahl in Abhängigkeit von den Abweichungsbeträgen [m] 65

5.12 Darstellung der Ergebnisse aus RealWorks aus dem Vergleich der Punktwolken mit dem CAD-Modell 67

5.13 CAD-Modell in CloudCompare (Ansicht: Perspektive) 68

5.14 „Distance computation”-Fenster 69

5.15 Benutzeroberfläche in CloudCompare: Beispiel der Ergebnisse der Funktion „Cloud/Mesh Dist.” (SW1-Kuppel) 70

5.16 Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke der Kuppel 71

5.17 Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke des unteren Bereiches 72

5.18 Histogramm der gesamten Kontroll-Punktwolke SW1 in der Kuppel 73

5.19 Vergleich mit dem CAD-Modell: Gefilterte Kontroll-Punktwolke SW1 in der Kuppel (Skala: 0 bis 1cm) 74

5.20 Histogramm der gefilterten Kontroll-Punktwolke SW1 in der Kuppel 74

5.21 CAD-Modell in Rhinoceros 3D (Ansicht: Perspektive) 75

5.22 Dialogfenster „Punkt-/Flächenabweichung” (SW1-Kuppel) in Rhino 3D 75

5.23 Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke der Kuppel 76

5.24 Vergleich der Leica-Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolke des unteren Bereiches 77

5.25 Vergleich mit dem CAD-Modell: Darstellung der zehnfach vergrößerten Residuen (SW1-Kuppel) 79

5.26 Hinweis über die Richtung der Abweichungen dank der Residuen (Skalierungsfaktor 1) 79

5.27 Vergleich mit dem CAD-Modell: Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Software-Systeme für die Punktwolke SW1 im Kuppelbereich 81

5.28 Differenz der Punktwolken SW1 bzw. SW1-SW4 und der Trimble-Punktwolke ohne Modellierung: Kontroll-Punktwolken der Kuppel 85

5.29 Differenz der Punktwolke SW1 mit Modellierung und der Trimble-Punktwolke: Kontroll-Punktwolke der Kuppel (Skala 0 bis 3,4cm) 85

5.30 Differenz der Punktwolken SW1 bzw. SW1-SW4 und der Trimble-Punktwolke ohne Modellierung: Kontroll-Punktwolken des unteren Bereiches 86

5.31 Differenz der Punktwolke SW1 mit Modellierung und der Trimble-Punktwolke: Kontroll-Punktwolke des unteren Bereiches (Skala: 0 bis 4cm) 86

5.32 Darstellung der Ergebnisse aus RealWorks für die Differenz der Punktwolken SW1 und Trimble 87

5.33 Kontroll-Punktwolke und Histogramm aus dem Vergleich der modellierten Punktwolke SW1 mit der Trimble-Punktwolke in CloudCompare 89

5.34 Darstellung der Ergebnisse aus CloudCompare für die Differenz der modellierten Punktwolken SW1/SW1-SW4 und Trimble 90

5.35 Differenz der Punktwolken SW1 und Trimble: Vergleich der Ergebnisse aus RealWorks und CloudCompare 93

D.1 Vergleich mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken der Kuppel (Ansicht: Oben) 124

D.2 Vergleich mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken des unteren Bereiches (Ansicht: Oben) 125

D.3 Darstellung der Ergebnisse aus CloudCompare beim Vergleich der Punktwolken mit dem CAD-Modell 127

D.4 Vergleich mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken der Kuppel (Ansicht: Oben) 128

D.5 Vergleich mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken des unteren Bereiches (Ansicht: Oben) 129

D.6 Darstellung der Ergebnisse aus Rhino beim Vergleich der Punktwolken mit dem CAD-Modell 131

E.1 Gegenüberstellung der Punktwolken mit Modellierung: Kontroll-Punktwolken der Kuppel (Ansicht: Oben) 134

E.2 Gegenüberstellung der Punktwolken mit Modellierung: Kontroll-Punktwolken des unteren Bereiches (Ansicht: Oben) 135

TABELLENVERZEICHNIS

2.1 Streckenkorrektion d, Messunsicherheit U_c und geometrisches Messrauschen σ für Beton in Abhängigkeit von der Entfernung [Wakaluk, 2009] 14

3.1 Wichtigste Leistungsspezifikationen des Trimble S6 [@TrimbleS6, 2011] 19

3.2 Standardabweichungen [mm] bei der Ermittlung der Koordinaten der Zielmarken 22

3.3 Punktabstand und Messdauer in Abhängigkeit der fünf Auflösungsstufen [Leica Geosystems AG, 2007] 24

3.4 Leistungsmerkmale des Leica HDS6000 [Leica Geosystems AG, 2007] 25

3.5 Eigenschaften des Leica HDS6000 in Abhängigkeit von der Entfernung und der Albedo [Leica Geosystems AG, 2007] 25

3.6 Leistungsmerkmale des Trimble GX 3D-Scanners [Trimble, 2009] 29

5.1 Ergebnisse der Bestimmung der Mittelwerte der absoluten Abstände d_M und der Standardabweichungen σ (Messrauschen) für alle Sub-Patches aus der Leica-Punktwolke der Kuppel 49

5.2 Ergebnisse der Bestimmung der Mittelwerte der absoluten Abstände d_M und der Standardabweichungen σ (Messrauschen) für alle Sub-Patches aus der Leica-Punktwolke des Bodens 50

5.3 Ergebnisse der Bestimmung der Mittelwerte d_M und der Standardabweichungen σ (Messrauschen) für alle Sub-Patches aus der Trimble-Punktwolke der Kuppel . 51

5.4 Ergebnisse der Bestimmung der Mittelwerte d_M und der Standardabweichungen σ (Messrauschen) für alle Sub-Patches aus der Trimble-Punktwolke des Bodens . 52

5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Bestimmung des geometrischen Messrauschens (d_M : Mittelwert der absoluten Abstände, σ : Standardabweichung = Messrauschen) 54

5.6 Vergleich der Punktwolke SW1 mit dem Rhino-Modell (Kuppel) in RealWorks - Punktanzahl und Prozentanteil in Abhängigkeit von der Entfernung 64

5.7 Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in RealWorks 65

5.8 Eingegebene Werte für die Skala bei den zwei Durchgängen des Vergleiches zwischen der Punkwolke SW1 und dem CAD-Modell in Rhino 78

5.9 Vergleich mit dem CAD-Modell: Zusammenfassung der statistischen Ergebnisse aus RealWorks, CloudCompare und Rhinoceros 3D (SW1-Kuppel) 81

5.10 Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Software - Vergleich der SW1-Punktwolke mit dem CAD-Modell im Kuppelbereich 82

5.11 Mittelwerte und Standardabweichungen aus der Gegenüberstellung der Laserscanaufnahmen in RealWorks 84

5.12 Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich der Laserscanaufnahmen in CloudCompare 90

5.13 Vergleich der modellierten Punktwolke SW1 mit der Trimble-Punktwolke: Zusammenfassung der statistischen Ergebnisse aus RealWorks und CloudCompare . . . 92

6.1 Zusammenfassung der erhaltenen maximalen Abweichungen, Mittelwerte und Standardabweichungen 101

D.1 Vergleich der Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell (Kuppel) in CloudCompare - Punktanzahl und Prozentanteil in Abhängigkeit von der Entfernung 126

D.2 Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in CloudCompare 127

D.3 Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in Rhino - Ergebnisse aus dem Dialogfenster „Punkt-/Flächenabweichung” 130

D.4 Vergleich der Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell (Kuppel) in Rhino - Punktanzahl und Prozentanteil in Abhängigkeit von der Entfernung 130

D.5 Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in Rhino - Ergebnisse der Berechnung in Excel 130

D.6 Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in Rhino - Vergleich der Ergebnisse aus Rhino und Excel 130

E.1 Vergleich der modellierten Punktwolke SW1 mit Trimble (Kuppel) 136

E.2 Vergleich der modellierten Punktwolke SW1 mit Trimble (Unterbau) 137

ANHANG

ANHANG A

ERGEBNISSE DER REGISTRIERUNGEN IN CYCLONE

Dieser Anhang beinhaltet die Ergebnisse der Registrierungen bzw. Georeferenzierungen, die in Cyclone durchgeführt und im Rahmen dieser Diplomarbeit verwendet wurden (SW1 und SW1-SW4).

Sowohl bei der Georeferenzierung der ScanWorld 1 (SW1) als auch bei der Registrierung und Georeferenzierung der ScanWorlds 1 und 4 (SW1-SW4) wurde ein durchschnittlicher absoluter Punktfehler von 2mm erreicht.

A.1 Georeferenzierung SW1

```
Status: VALID Registration

Mean Absolute Error:
   for Enabled Constraints = 0.002 m
   for Disabled Constraints = 0.004 m

Date: 2011.03.18 16:15:18

Database name : HDA-HD
```

ScanWorlds:
ScanWorld 1
Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)

Constraints

Name	ScanWorld	ScanWorld	Type	On/Off	Weight	Error	Error Vector	Horz	Vert
Auto [TargetID: 101 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, 0.001) m	0.000 m	0.001 m
Auto [TargetID: 102 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.001, -0.001, 0.001) m	0.001 m	0.001 m
Auto [TargetID: 103 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.000, 0.000, 0.002) m	0.001 m	0.002 m
Auto [TargetID: 201 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, 0.001) m	0.000 m	0.001 m
Auto [TargetID: 202 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.001, 0.001, -0.001) m	0.001 m	-0.001 m
Auto [TargetID: 203 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, 0.000) m	0.001 m	0.000 m
Auto [TargetID: 204 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, 0.001) m	0.000 m	0.001 m
Auto [TargetID: 301 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.002, 0.000, -0.001) m	0.002 m	-0.001 m
Auto [TargetID: 302 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.002, 0.001, 0.000) m	0.002 m	0.000 m
Auto [TargetID: 303 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	0.004 m	(0.004, -0.001, 0.000) m	0.004 m	0.000 m
Auto [TargetID: 304 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.002, 0.000, -0.002) m	0.002 m	-0.002 m

```
ScanWorld Transformations
ScanWorld 1
   translation: (0.478, -0.423, 560.144) m
   rotation: (0.0000, -0.0001, -1.0000):130.848 deg

Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)
   translation: (0.000, 0.000, 0.000) m
   rotation: (0.0000, 1.0000, 0.0000):0.000 deg


Unused ControlSpace Objects
ScanWorld 1:
    Sphere : TargetID : S10
    Sphere : TargetID : S20
    Vertex : TargetID : T30

Koord_Zielmarken_Leica (Leveled):
    Vertex : unlabeled
```

A.2 Registrierung und Georeferenzierung SW1-SW4

Status: VALID Registration

Mean Absolute Error:
for Enabled Constraints = 0.002 m
for Disabled Constraints = 0.000 m

Date: 2011.03.18 15:51:52

Database name : HDA-HD

ScanWorlds
ScanWorld 1
ScanWorld 4
Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)

Constraints

Name	ScanWorld	ScanWorld	Type	On/Off	Weight	Error	Error Vector	Horz	Vert
TargetID: 102	ScanWorld 1	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, -0.001) m	0.000 m	-0.001 m
TargetID: 303	ScanWorld 1	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.002, -0.001, 0.001) m	0.002 m	0.001 m
TargetID: 304	ScanWorld 1	ScanWorld 4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(-0.001, 0.001, 0.000) m	0.001 m	0.000 m
TargetID: S10	ScanWorld 1	ScanWorld 4	Coincident: Sphere-Sphere	On	1.0000	0.002 m	(0.000, -0.002, -0.001) m	0.002 m	-0.001 m
Auto [TargetID: 101 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.001, 0.001) m	0.001 m	0.001 m
Auto [TargetID: 102 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, -0.001, 0.001) m	0.001 m	0.001 m
Auto [TargetID: 103 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, 0.000, 0.002) m	0.001 m	0.002 m
Auto [TargetID: 201 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, 0.001) m	0.000 m	0.001 m
Auto [TargetID: 202 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.000, 0.001, -0.001) m	0.001 m	-0.001 m
Auto [TargetID: 203 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, 0.000) m	0.000 m	0.000 m
Auto [TargetID: 204 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, 0.001) m	0.000 m	0.001 m
Auto [TargetID: 301 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.003, 0.001, -0.001) m	0.003 m	-0.001 m
Auto [TargetID: 302 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.001, 0.001, 0.000) m	0.002 m	0.000 m
Auto [TargetID: 303 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004 m	(0.004, 0.000, 0.000) m	0.004 m	0.000 m
Auto [TargetID: 304 - unlabeled] 1	ScanWorld 1	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.002, 0.000, -0.002) m	0.002 m	-0.002 m
Auto [TargetID: 102 - unlabeled] 2	ScanWorld 4	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.000, -0.001, 0.001) m	0.001 m	0.001 m
Auto [TargetID: 303 - unlabeled] 2	ScanWorld 4	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.002, 0.000, 0.000) m	0.002 m	0.000 m
Auto [TargetID: 304 - unlabeled] 2	ScanWorld 4	Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.001, -0.001) m	0.001 m	-0.001 m

ScanWorld Transformations
ScanWorld 1
translation: (0.479, -0.423, 560.144) m
rotation: (0.0000, -0.0001, -1.0000):130.849 deg

ScanWorld 4
translation: (1.158, 6.648, 561.055) m
rotation: (-0.0007, -0.0016, 1.0000):52.787 deg

Koord_Zielmarken_Leica (Leveled)
translation: (0.000, 0.000, 0.000) m
rotation: (0.0000, 1.0000, 0.0000):0.000 deg

Unused ControlSpace Objects
ScanWorld 1:
Sphere : TargetID : S20
Vertex : TargetID : T30

Koord_Zielmarken_Leica (Leveled):
Vertex : unlabeled

ANHANG B

PRAKTISCHE HINWEISE

Es werden hier einige praktischen Hinweise zur Handhabung der im Rahmen dieser Diplomarbeit eingesetzten Software-Systeme gegeben.

B.1 Handhabung der Software Cyclone

Um die „Störungen" in Cyclone zu beseitigen, wird ein Rahmen (Polygon) um die zu eliminierenden Punkte gezogen und der Inhalt wird gelöscht. Über einen Rechtklick und unter der Option „Fence" (engl. für Zaun) den gewünschten Löschbefehl ausgewählt werden. Bei der Umsetzung ist es allerdings zu beachten, dass es sich um einen zweidimensionalen Rahmen handelt, der eine dreidimensionale Punktwolke umfasst. Diese muss also so gedreht und gezoomt werden bis keine Punkte mehr, die nicht gelöscht werden müssen, hinter den zu beseitigen Störungen liegen.

Angemerkt sein noch, dass bei der Software Cyclone 5.8 die Bereinigung nur für die geöffnete ModelSpace-View-Datei gilt. Die Punkte werden also nicht definitiv aus der ScanWorld gelöscht. Deswegen sollte die Beseitigung der „Störpunkte" eher nach der Registrierung durchgeführt werden, um sich die Doppelarbeiten zu sparen. Damit wurde leider am Anfang der Diplomarbeit viel Zeit verschwendet.

B.2 Handhabung der Software RealWorks

Bei der Bereinigung der Punktwolke gibt es die Möglichkeit entweder eine Polygon- oder eine Rechteckauswahl zu benutzen. So wird ein Rahmen um die Punkte, die entweder zu löschen oder zu behalten sind, erzeugt. Im Gegensatz zu Cyclone wird allerdings jedes Mal ein neues Objekt, das den ausgewählten Ausschnitt der Punktwolke enthält, erstellt. Die Punkte verschwinden nicht, sind aber in einer anderen Punktwolke zu finden. Deswegen wurde dieses Software-System zur Unterteilung (Kuppel, Unterbau) sowohl der Leica-Punktwolken als auch des Trimble-Datensatzes verwendet.

ANHANG C

GEOMETRISCHES MESSRAUSCHEN

Die folgende Matlab-Routine wurde zur Ermittlung der Parameter einer ausgleichenden Ebene und Bestimmung des geometrischen Messrauschens implementiert. Die Dateien, die die Patches enthalten, werden dabei systematisch bearbeitet und als Ausgabe wird pro Patch eine Text-Datei erzeugt, die für jeden kleinen Sub-Patch die berechneten Ebenenparameter sowie den Mittelwert der absoluten Abstände und die Standardabweichung beinhaltet. Die Dateien, die weniger als 20 Punkte enthalten wurden nicht bearbeitet, sondern in einer weiteren Text-Datei aufgelistet und deren Anzahl ermittelt.

```
% BERECHNUNG DER AUSGLEICHENDEN EBENENPARAMETER
% ZUR BESTIMMUNG DES GEOMETRISCHEN MESSRAUSCHENS
% Autor: Claire Nussbaumer
% Datum: 06. April 2011
clear all;
clc
```

```
%% Ordner "Ergebnisse" neu erstellen
if exist('Ergebnisse', 'dir')
rmdir('Ergebnisse', 's')
end
mkdir('Ergebnisse')
```

```
%% Anfang der Schleifen über Ordner und über Dateien
% Dadurch werden die Dateien systematisch gesucht und geöffnet.
% Schleife über Ordner
ordnerliste = dir('Daten\Patches*');
```

```
for j = 1:numel(ordnerliste)
% Ergebnisordner erstellen
mkdir(['Ergebnisse\', ordnerliste(j).name])
% Dateiliste erstellen
dateiliste = dir(['Daten\', ordnerliste(j).name, '\*_P*']);
% Schleife über Dateien
for l = 1:numel(dateiliste)
% Laden der nötigen Daten
data = load (['Daten\', ordnerliste(j).name, '\', dateiliste(l).name]);
X = data(:,2:4);
% Die erste Spalte von data enthält die Punktnummer.
% Sie wird nicht berücksichtigt.
% Datei nur verwenden, falls mindestens 20 Punkte enthalten sind.
if size(X, 1) >= 20
% Anzahl vorhandener Punkte
np = length(X);
```

```
%% Ausgleichende Ebenenparameter
% Koordinaten des Schwerpunktes
sx = 0.0;
sy = 0.0;
sz = 0.0;
sx = sx + mean(X(:,1));
sy = sy + mean(X(:,2));
sz = sz + mean(X(:,3));
% Schwerpunktreduzierung der Koordinaten
X(:,1) = X(:,1) - sx;
X(:,2) = X(:,2) - sy;
X(:,3) = X(:,3) - sz;
% Designmatrix
A=[X(:,1) X(:,2) X(:,3)];
% Normalgleichungsmatrix N=AtA
N=A'*A;
% Eigenvektore und Eigenwerte
[W,D] = eig(N);
% Eigenvektor mit dem kleinsten Eigenwert
lambda_min = min(diag(D));
```

```
[zeile,spalte] = find(D==lambda_min);
% Ebenenparameter:
% Normierter Normalenvektor der ausgleichenden Ebene
n0 = W(:,zeile);
n0_x = n0(1,1);
n0_y = n0(2,1);
n0_z = n0(3,1);
% Distanzparameter der ausgleichenden Ebene
dist = n0_x*sx+n0_y*sy+n0_z*sz;
```

```
%% Mittlerer Punktfehler und Standardabweichung der Abstände
% Abstände der Punkte zur ausgleichenden Ebene
E = n0_x*X(:,1) + n0_y*X(:,2) + n0_z*X(:,3);
% Mittlerer Abstand (über die absolute Abstände gerechnet)
Mittelwert = mean(abs(E));
% Standardabweichung der Abstände
Stdabw = std(E);
```

```
%% Ausgabe
fid = fopen(['Ergebnisse\', ordnerliste(j).name, '\', dateiliste(l).name(1:6),
'.txt'], 'at');
fprintf(fid, 'Datei: %s\n\n', dateiliste(l).name);
fprintf(fid, 'Parameter der ausgleichenden Ebene:\n');
fprintf(fid, '\tNormierter Normalenvektor:\n');
fprintf(fid, '\t\tn0_x = %8.4f m\n', n0_x);
fprintf(fid, '\t\tn0_y = %8.4f m\n', n0_y);
fprintf(fid, '\t\tn0_z = %8.4f m\n', n0_z);
fprintf(fid, '\tDistanzparameter:\n');
fprintf(fid, '\t\td = %9.4f m\n\n', dist);
fprintf(fid, 'Mittlerer Abstand der Punkte zur Ebene: %.1f mm\n', Mittelwert*1000);
fprintf(fid, 'Standardabweichung der Abstände: %4.1f mm\n', Stdabw*1000);
fprintf(fid, '--------------------------------------------------
-------------------------\n\n\n');
fclose(fid);
else
% Die Datei enthält weniger als 20 Punkte:
% sie wird in der Datei "Nicht_verwendet" aufgelistet.
```

```
fid = fopen('Ergebnisse\Nicht_verwendet.txt', 'at');
fprintf(fid, 'Datei %s enthält zu wenig Punkte.\n', dateiliste(l).name);
fclose(fid);
end
% Ende Schleife über Dateien
end
% Ende Schleife über Ordner
end
```

```
%% Anzahl nicht verwendeter Dateien
% Anzahl bestimmen
fid_nv = fopen('Ergebnisse\Nicht_verwendet.txt', 'r');
zusatzinfo = textscan(fid_nv, '%s %*s %*s %*s %*s %*s');
anzahl = size(cell2mat(zusatzinfo{1}), 1);
fclose(fid_nv);
% Anzahl ausgeben
fid = fopen('Ergebnisse\Nicht_verwendet.txt', 'at');
fprintf(fid, '\nAnzahl der nicht verwendeten Dateien: %i', anzahl);
fclose(fid);
```

ANHANG D

VERGLEICH MIT DEM CAD-MODELL

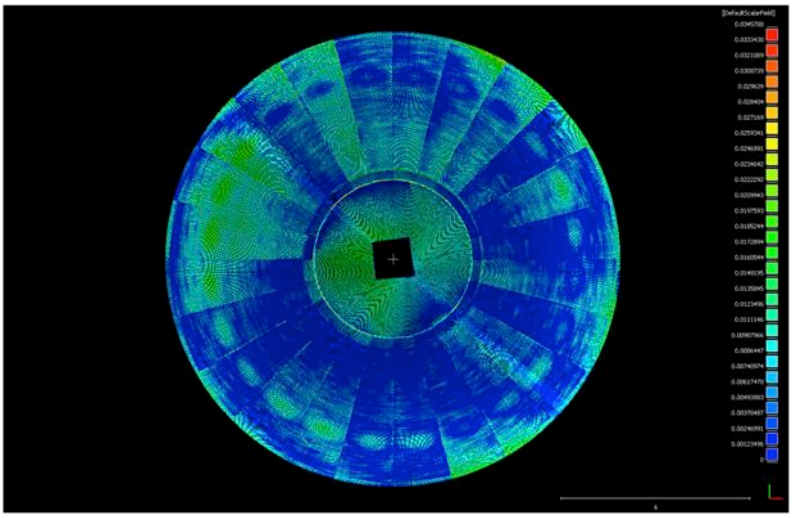
Die Punktwolken wurden mit dem von den Architekten zur Verfügung gestellten CAD-Modell verglichen. Dies erfolgte mittels verschiedener Software-Systeme: RealWorks, CloudCompare und Rhino. Die Auswertung der Ergebnisse aus RealWorks wurde in Kap. 5.2.1 ausführlich beschrieben und durch zahlreiche Abbildungen und Tabellen illustriert.

In diesem Anhang befinden sich die entsprechenden Abbildungen und Tabellen zur Darstellung der von CloudCompare und Rhino gelieferten Ergebnisse. Dabei wird es jeweils zwischen graphischen und statistischen Resultaten unterschieden.

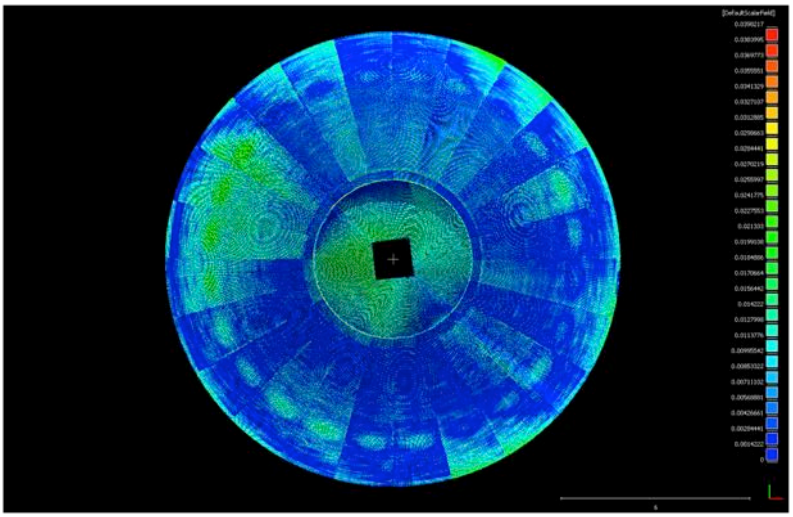
D.1 Ergebnisse aus CloudCompare

Siehe nächste Seite.

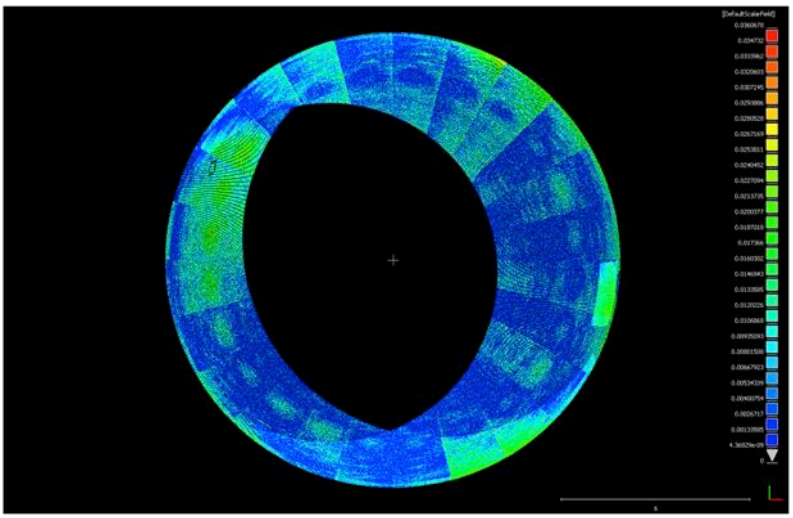
Graphische Ergebnisse (CloudCompare)



(a) SW1

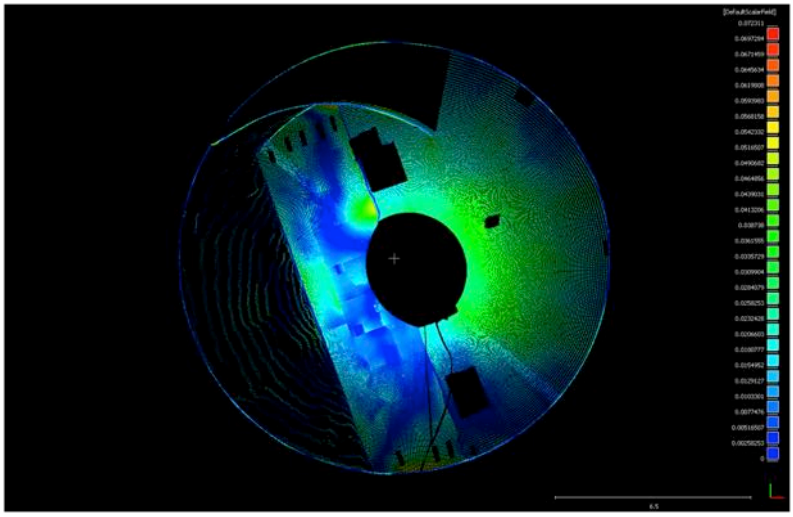


(b) SW1-SW4

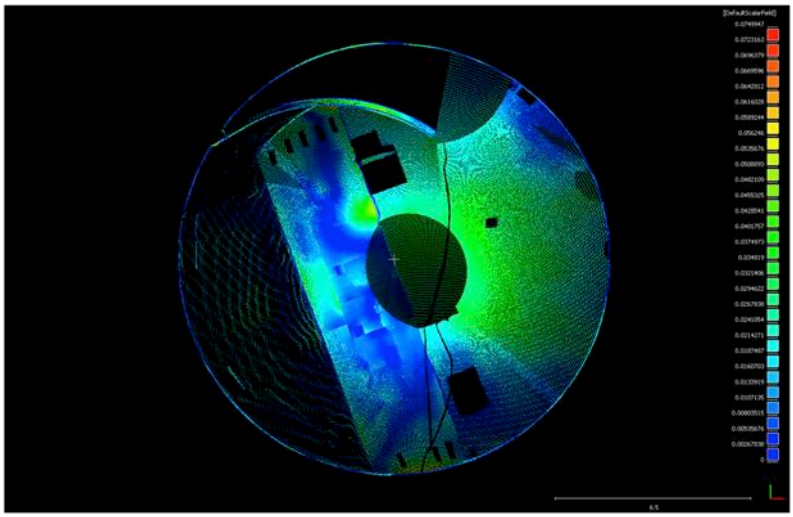


(c) Trimble

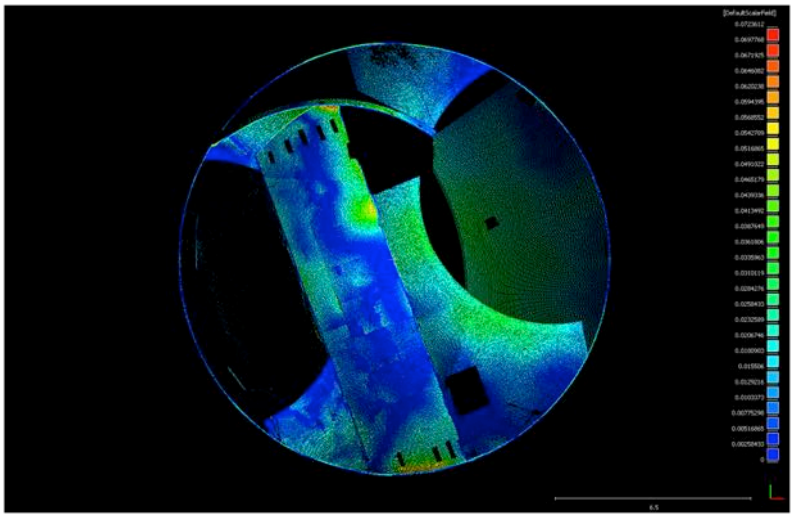
Abbildung D.1: Vergleich mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken der Kuppel (Ansicht: Oben)



(a) SW1



(b) SW1-SW4



(c) Trimble

Abbildung D.2: Vergleich mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken des unteren Bereiches (Ansicht: Oben)

Statistische Ergebnisse (Excel)

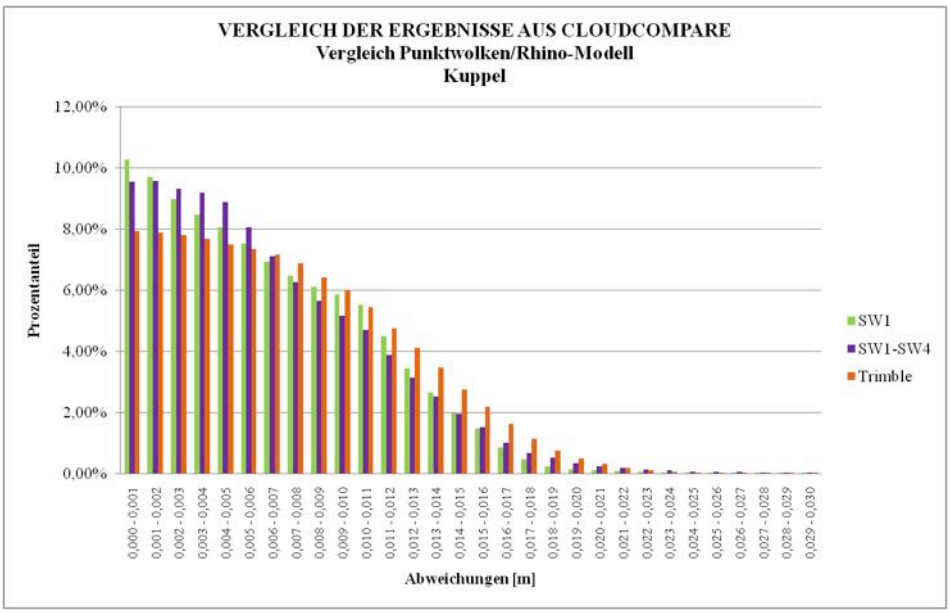
Wenn es bei den graphischen Ergebnissen um eine visuelle Interpretation geht, stammen die folgenden Tabellen und Abbildungen aus einer in Excel durchgeführten statistischen Analyse der Ergebnisse. Für jede Kontroll-Punktwolke (Ergebnis des Vergleiches) wurden der Mittelwert der absoluten Abweichungen und die Standardabweichung gerechnet. Beispielsweise werden zunächst die Ergebnisse für die Punkwolke SW1 im Kuppelbereich dargestellt. Dann werden die alle Ergebnisse werden zusammengefasst und anhand von Histogrammen dargestellt.

Entfernung [m]	Punktanzahl n_i	Prozentanteil	
Gesamt (Leica SW1)	539.101	100%	100%
0,000 - 0,001	55.350	10,27%	
0,001 - 0,002	52.239	9,69%	
0,002 - 0,003	48.391	8,98%	45,48%
0,003 - 0,004	45.735	8,48%	
0,004 - 0,005	43.486	8,07%	
0,005 - 0,006	40.597	7,53%	
0,006 - 0,007	37.396	6,94%	
0,007 - 0,008	34.818	6,46%	32,88%
0,008 - 0,009	32.880	6,10%	
0,009 - 0,010	31.570	5,86%	
0,010 - 0,011	29.775	5,52%	
0,011 - 0,012	24.233	4,50%	
0,012 - 0,013	18.601	3,45%	18,11%
0,013 - 0,014	14.268	2,65%	
0,014 - 0,015	10.749	1,99%	
0,015 - 0,016	7.913	1,47%	
0,016 - 0,017	4.611	0,86%	
0,017 - 0,018	2.482	0,46%	3,17%
0,018 - 0,019	1.344	0,25%	
0,019 - 0,020	766	0,14%	
0,020 - 0,021	549	0,10%	
0,021 - 0,022	443	0,08%	
0,022 - 0,023	300	0,06%	0,30%
0,023 - 0,024	201	0,04%	
0,024 - 0,025	122	0,02%	
0,025 - 0,026	86	0,02%	
0,026 - 0,027	61	0,01%	
0,027 - 0,028	54	0,01%	0,05%
0,028 - 0,029	23	0,00%	
0,029 - 0,030	23	0,00%	
0,030 - 0,031	14	0,00%	
0,031 - 0,032	12	0,00%	
0,032 - 0,033	5	0,00%	0,01%
0,033 - 0,034	2	0,00%	
0,034 - 0,035	3	0,00%	
Kontrolle (Summe)	539.102	100%	100%

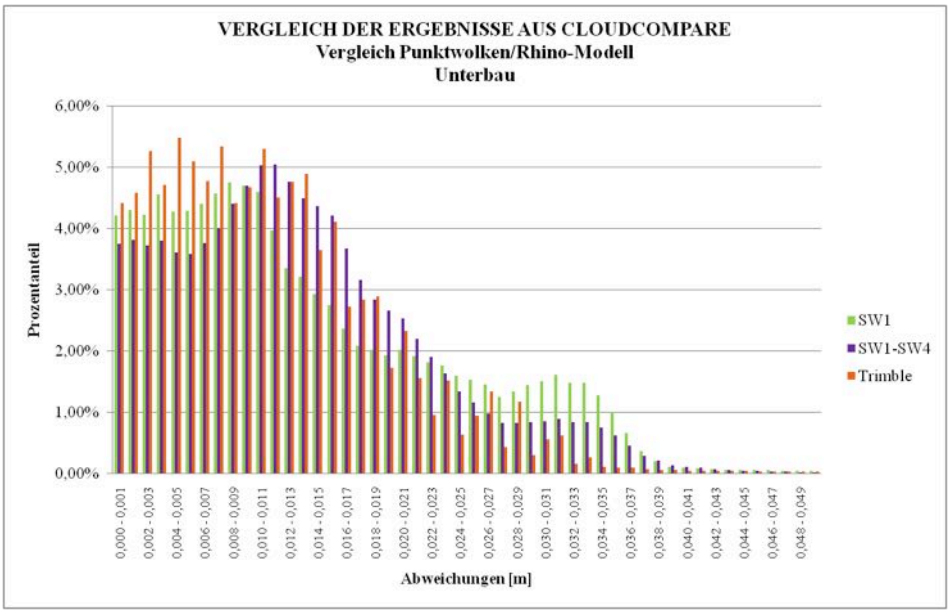
Tabelle D.1: Vergleich der Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell (Kuppel) in CloudCompare - Punktanzahl und Prozentanteil in Abhängigkeit von der Entfernung

	Kuppel			Unterbau		
	d_M [mm]	σ_d [mm]	σ [mm]	d_M [mm]	σ_d [mm]	σ [mm]
SW1	6,3	±4,4	±7,7	13,9	±10,3	±17,3
SW1-SW4	6,4	±4,7	±7,9	13,4	±9,0	±16,2
Trimble	7,2	±4,8	±8,6	11,4	±8,2	±14,1
Max.	7,2	±4,8	±8,6	13,9	±10,3	±17,3
Min.	6,3	±4,4	±7,7	11,4	±8,2	±14,1
Diff. (Max-Min)	0,9	0,4	0,9	2,5	2,1	3,2

Tabelle D.2: Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in CloudCompare



(a) in der Kuppel

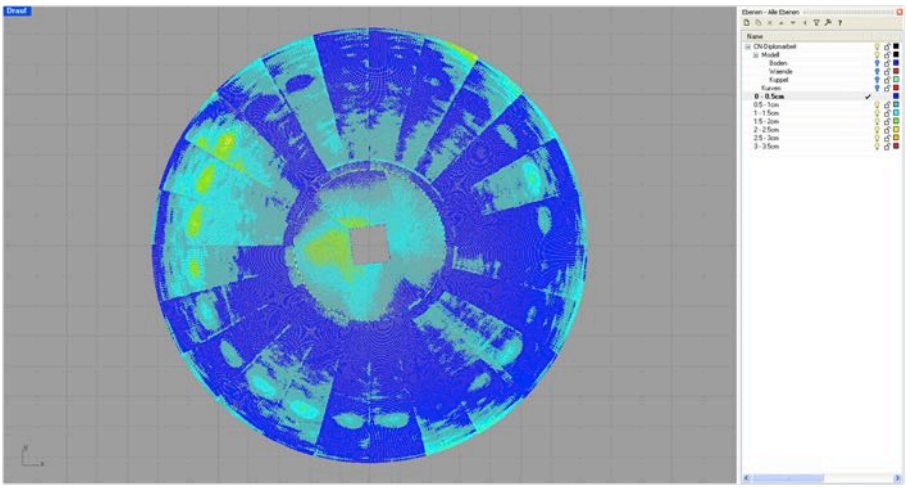


(b) im unteren Bereich

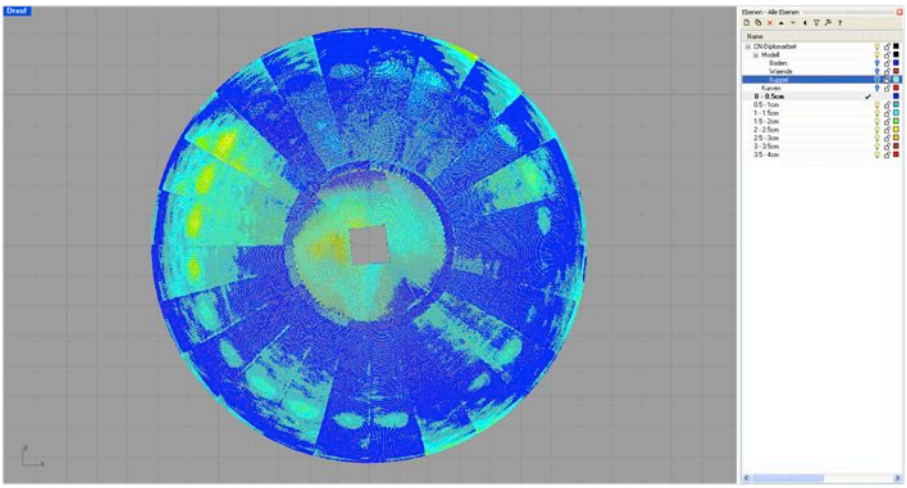
Abbildung D.3: Darstellung der Ergebnisse aus CloudCompare beim Vergleich der Punktwolken mit dem CAD-Modell

D.2 Ergebnisse aus Rhino

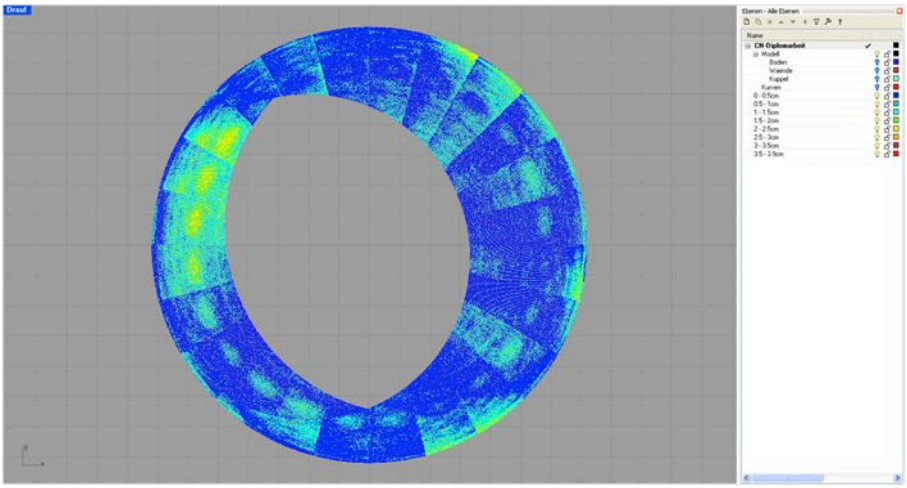
Graphische Ergebnisse (Rhino)



(a) SW1

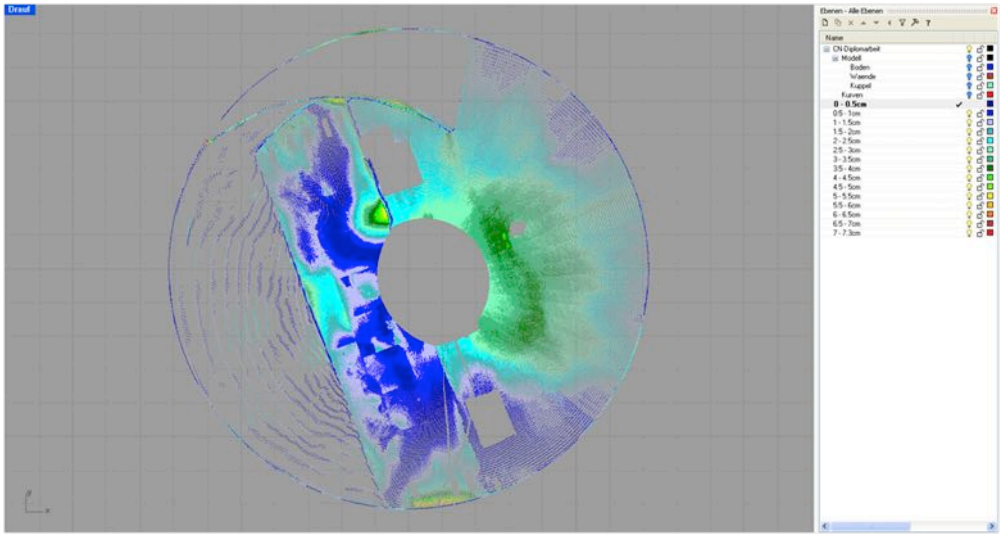


(b) SW1-SW4

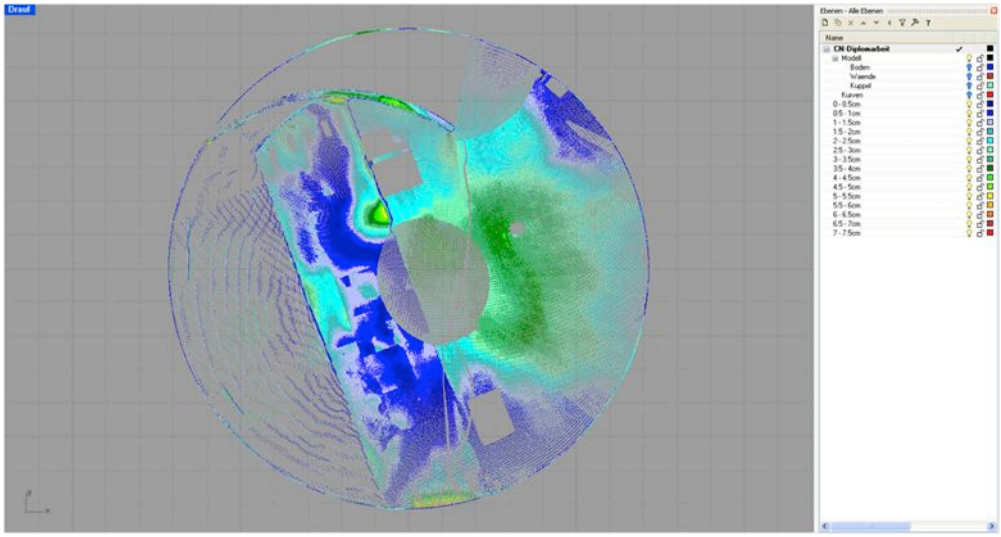


(c) Trimble

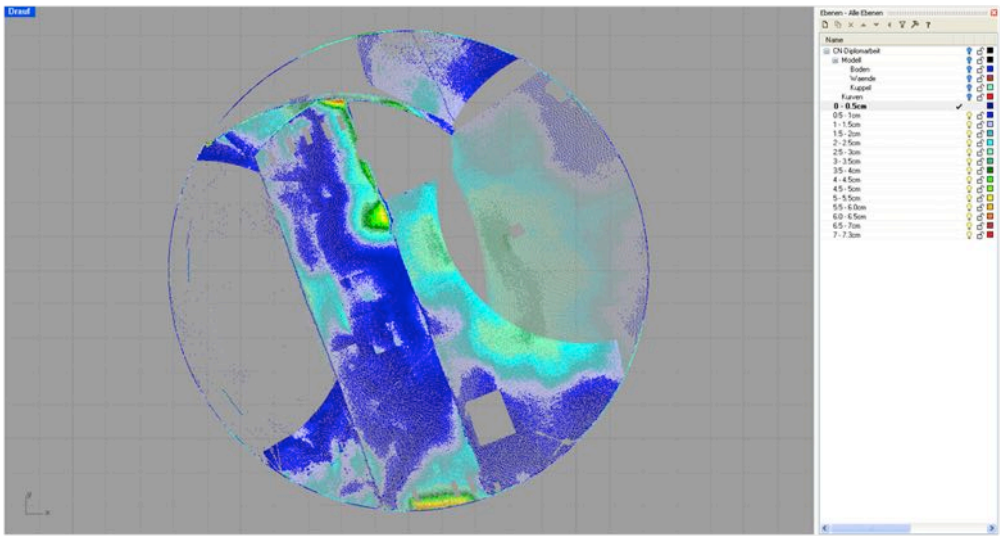
Abbildung D.4: Vergleich mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken der Kuppel (Ansicht: Oben)



(a) SW1



(b) SW1-SW4



(c) Trimble

Abbildung D.5: Vergleich mit dem CAD-Modell: Kontroll-Punktwolken des unteren Bereiches (Ansicht: Oben)

	Kuppel		Unterbau	
	d_M [mm]	σ_d [mm]	d_M [mm]	σ_d [mm]
SW1	6,1	±4,3	14,0	±10,3
SW1-SW4	6,2	±4,7	13,6	±9,0
Trimble	6,6	±4,5	11,5	±8,2
Max.	6,6	±4,7	14,0	±10,3
Min.	6,1	±4,3	11,5	±8,2
Diff. (Max-Min)	0,5	0,4	2,5	2,0

Tabelle D.3: Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in Rhino - Ergebnisse aus dem Dialogfenster „Punkt-/Flächenabweichung"

Statistische Ergebnisse (Excel)

Entfernung [m]	Punktanzahl n_i	Prozentanteil
Gesamt (Leica SW1)	539.067	100%
0,000 - 0,005	253.783	47,08%
0,005 - 0,010	177.679	32,96%
0,010 - 0,015	91.672	17,01%
0,015 - 0,020	14.462	2,68%
0,020 - 0,025	1.256	0,23%
0,025 - 0,030	183	0,03%
0,030 - 0,035	32	0,01%
Kontrolle (Summe)	539.067	100%

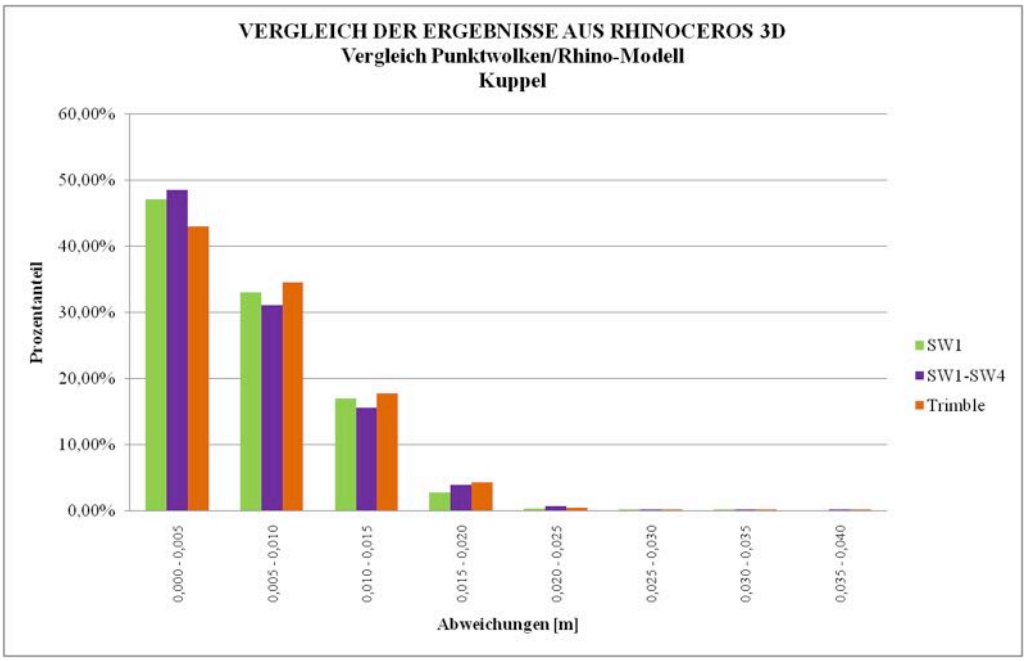
Tabelle D.4: Vergleich der Punktwolke SW1 mit dem CAD-Modell (Kuppel) in Rhino - Punktanzahl und Prozentanteil in Abhängigkeit von der Entfernung

	Kuppel			Unterbau		
	d_M [mm]	σ_d [mm]	σ [mm]	d_M [mm]	σ_d [mm]	σ [mm]
SW1	6,3	±4,2	±7,6	14,1	±10,3	±17,4
SW1-SW4	6,4	±4,6	±7,9	13,6	±9,0	±17,3
Trimble	6,7	±4,5	±8,1	11,5	±8,2	±14,2
Max.	6,7	±4,6	±8,1	14,1	±10,3	±17,4
Min.	6,3	±4,2	±7,6	11,5	±8,2	±14,2
Diff. (Max-Min)	0,4	0,4	0,5	2,6	2,1	3,2

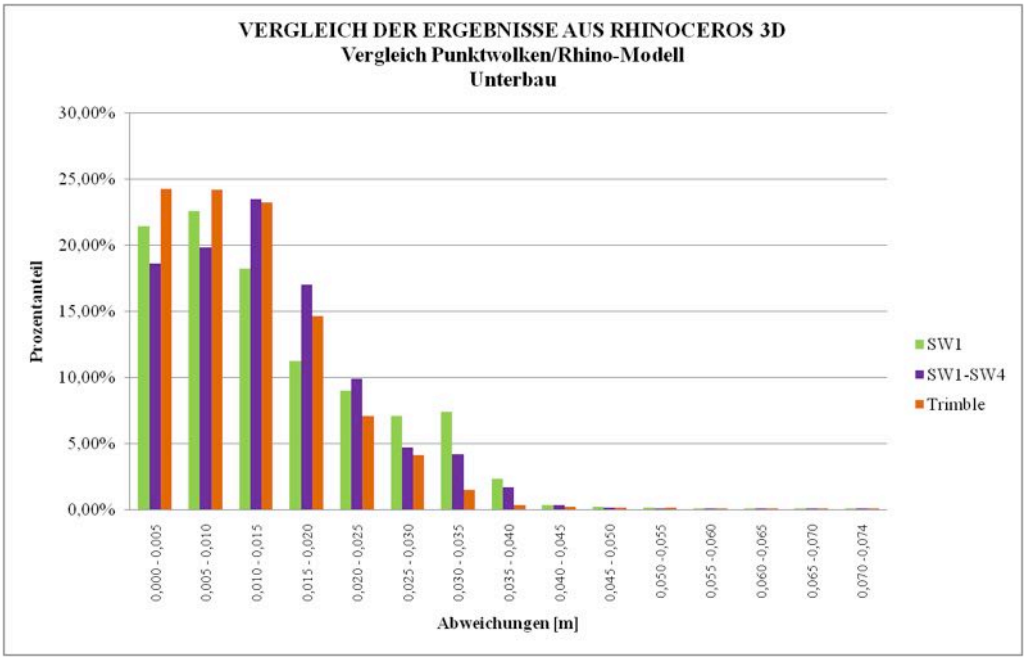
Tabelle D.5: Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in Rhino - Ergebnisse der Berechnung in Excel

	Kuppel		Unterbau	
	d_M [mm]	σ_d [mm]	d_M [mm]	σ_d [mm]
SW1	0,2	0,1	0,1	0,0
SW1-SW4	0,2	0,1	0,0	0,0
Trimble	0,1	0,0	0,0	0,0

Tabelle D.6: Mittelwerte und Standardabweichungen aus dem Vergleich mit dem CAD-Modell in Rhino - Vergleich der Ergebnisse aus Rhino und Excel



(a) in der Kuppel



(b) im unteren Bereich

Abbildung D.6: Darstellung der Ergebnisse aus Rhino beim Vergleich der Punktwolken mit dem CAD-Modell

ANHANG E

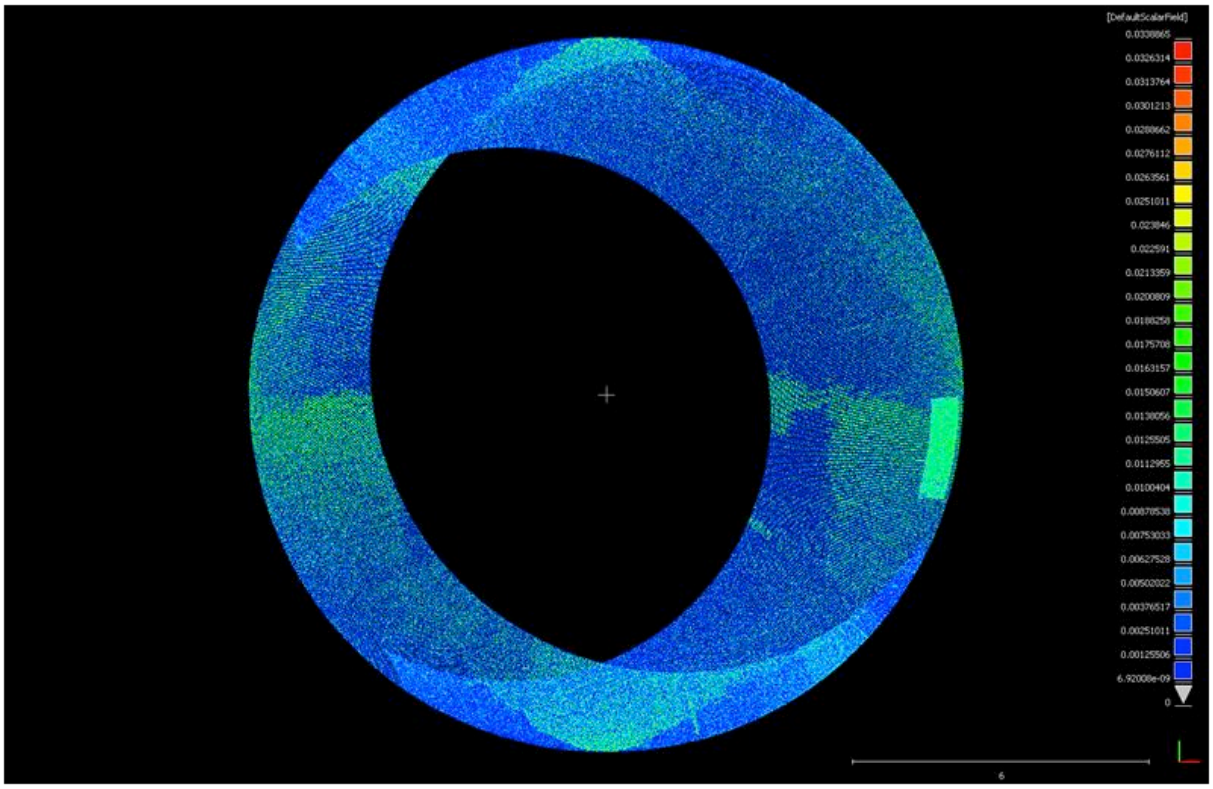
VERGLEICH DER BEIDEN LASERSCANAUFNAHMEN

Da zwei völlig unterschiedliche Scanner-Systeme zum Einsatz kamen, wurden die erhobenen Punktwolken anhand des praktischen Beispieles des „Hauses der Astronomie" verglichen. Der Trimble-Datensatz wurde den Leica-Punktwolken SW1 und SW1-SW4 gegenübergestellt.

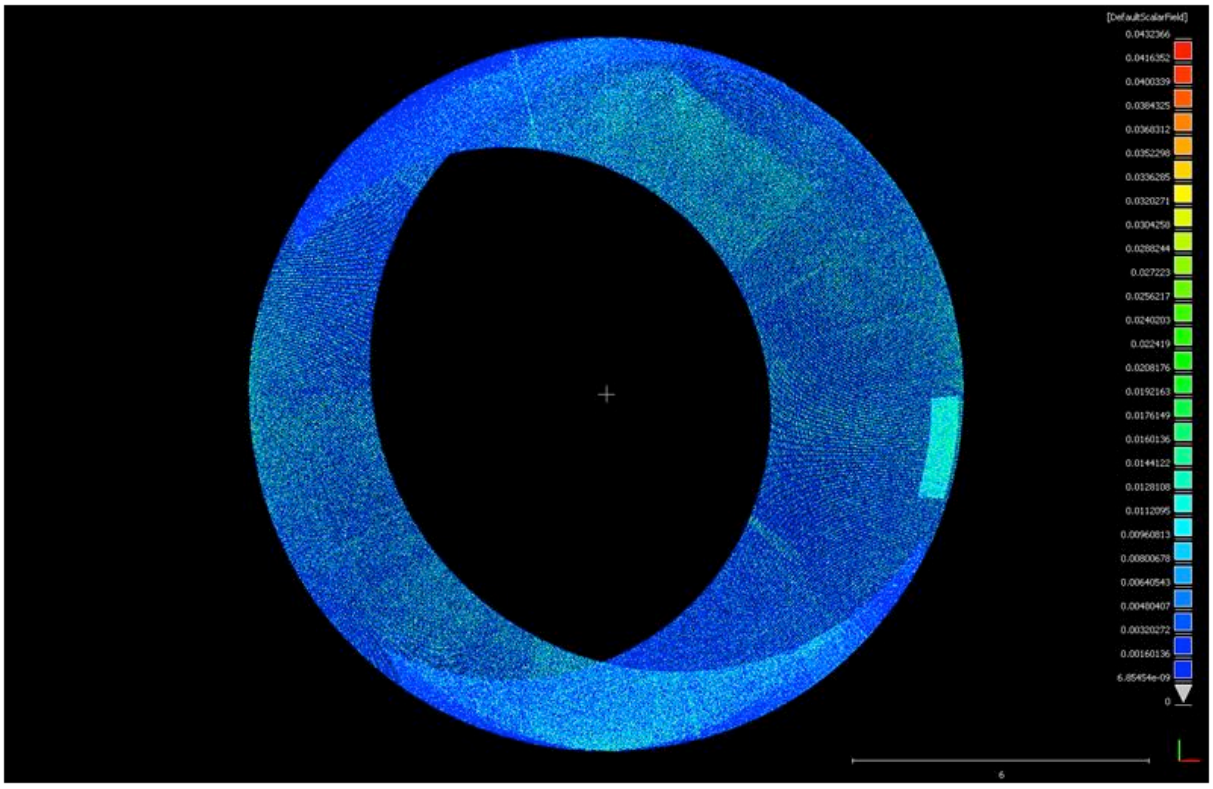
Diese Vergleiche konnten mit Rhino, das über keine Funktion zur Bearbeitung mehreren Punktwolken verfügt, nicht durchgeführt werden. Die Ergebnisse aus RealWorks wurden in Kap. 5.3.1 ausführlich präsentiert. Die Abbildungen, die den Resultaten der Auswertung mit CloudCompare entsprechen, sind in diesem Anhang zu finden. Außerdem wird im zweiten Kapitel dieses Anhanges Tabellen zum Vergleich der Ergebnisse aus RealWorks und CloudCompare vorgestellt.

E.1 Graphische Ergebnisse aus CloudCompare

Siehe nächste Seite.

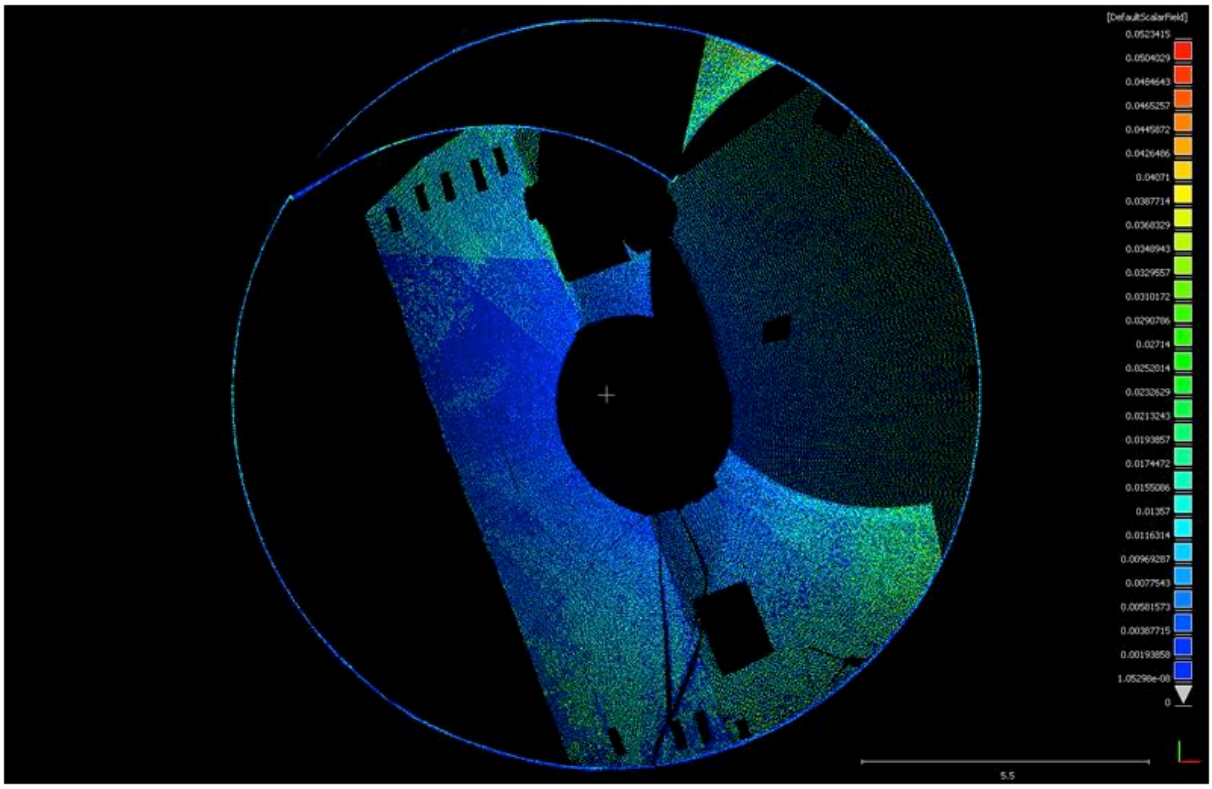


(a) SW1 modelliert

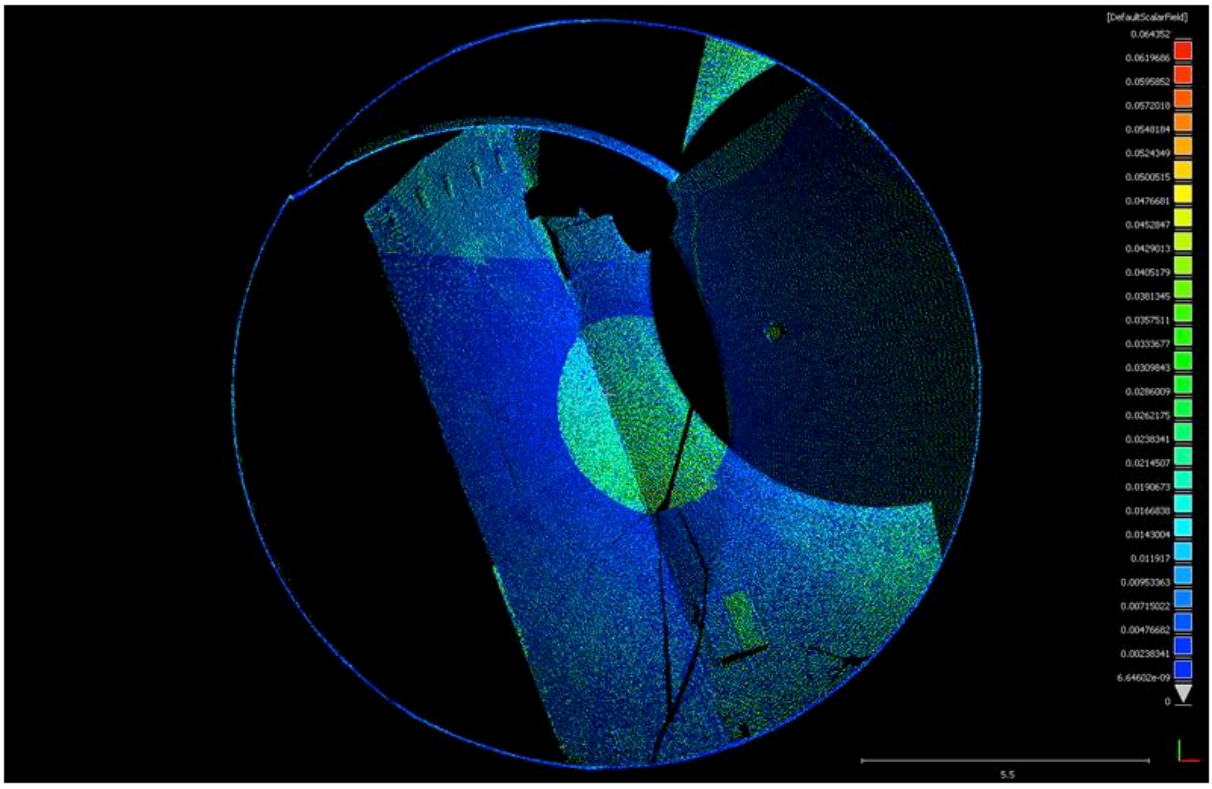


(b) SW1-SW4 modelliert

Abbildung E.1: Gegenüberstellung der Punktwolken mit Modellierung: Kontroll-Punktwolken der Kuppel (Ansicht: Oben)



(a) SW1 modelliert



(b) SW1-SW4 modelliert

Abbildung E.2: Gegenüberstellung der Punktwolken mit Modellierung: Kontroll-Punktwolken des unteren Bereiches (Ansicht: Oben)

E.2 Vergleich der Ergebnisse

	RealWorks			CloudCompare		
Entfernung [m]	Punktanzahl	Prozentanteil		Punktanzahl	Prozentanteil	
Gesamt (Trimble)	958.660	100%	100%	958.660	100%	100%
0,000 - 0,001	199.546	20,82%	81,02%	90.395	9,43%	46,44%
0,001 - 0,002	185.841	19,39%		89.965	9,38%	
0,002 - 0,003	161.718	16,87%		89.696	9,36%	
0,003 - 0,004	130.944	13,66%		88.750	9,26%	
0,004 - 0,005	98.690	10,29%		86.400	9,01%	
0,005 - 0,006	70.339	7,34%	17,81%	81.683	8,52%	34,16%
0,006 - 0,007	46.315	4,83%		74.879	7,81%	
0,007 - 0,008	28.275	2,95%		66.080	6,89%	
0,008 - 0,009	16.601	1,73%		56.789	5,92%	
0,009 - 0,010	9.249	0,96%		48.066	5,01%	
0,010 - 0,011	4.909	0,51%	1,07%	40.805	4,26%	15,27%
0,011 - 0,012	2.625	0,27%		34.609	3,61%	
0,012 - 0,013	1.419	0,15%		28.854	3,01%	
0,013 - 0,014	816	0,09%		23.234	2,42%	
0,014 - 0,015	446	0,05%		18.855	1,97%	
0,015 - 0,016	307	0,03%	0,08%	14.785	1,54%	3,96%
0,016 - 0,017	175	0,02%		10.546	1,10%	
0,017 - 0,018	118	0,01%		6.703	0,70%	
0,018 - 0,019	87	0,01%		3.965	0,41%	
0,019 - 0,020	75	0,01%		1.939	0,20%	
0,020 - 0,021	56	0,01%	0,01%	819	0,09%	0,16%
0,021 - 0,022	37	0,00%		399	0,04%	
0,022 - 0,023	16	0,00%		182	0,02%	
0,023 - 0,024	18	0,00%		104	0,01%	
0,024 - 0,025	10	0,00%		51	0,01%	
0,025 - 0,026	12	0,00%	0,00%	38	0,00%	0,01%
0,026 - 0,027	7	0,00%		28	0,00%	
0,027 - 0,028	2	0,00%		17	0,00%	
0,028 - 0,029	3	0,00%		9	0,00%	
0,029 - 0,030	1	0,00%		5	0,00%	
0,030 - 0,031	1	0,00%	0,00%	3	0,00%	0,00%
0,031 - 0,032	1	0,00%		3	0,00%	
0,032 - 0,033	1	0,00%		2	0,00%	
0,033 - 0,034	1	0,00%		3	0,00%	

Tabelle E.1: Vergleich der modellierten Punktwolke SW1 mit Trimble (Kuppel)

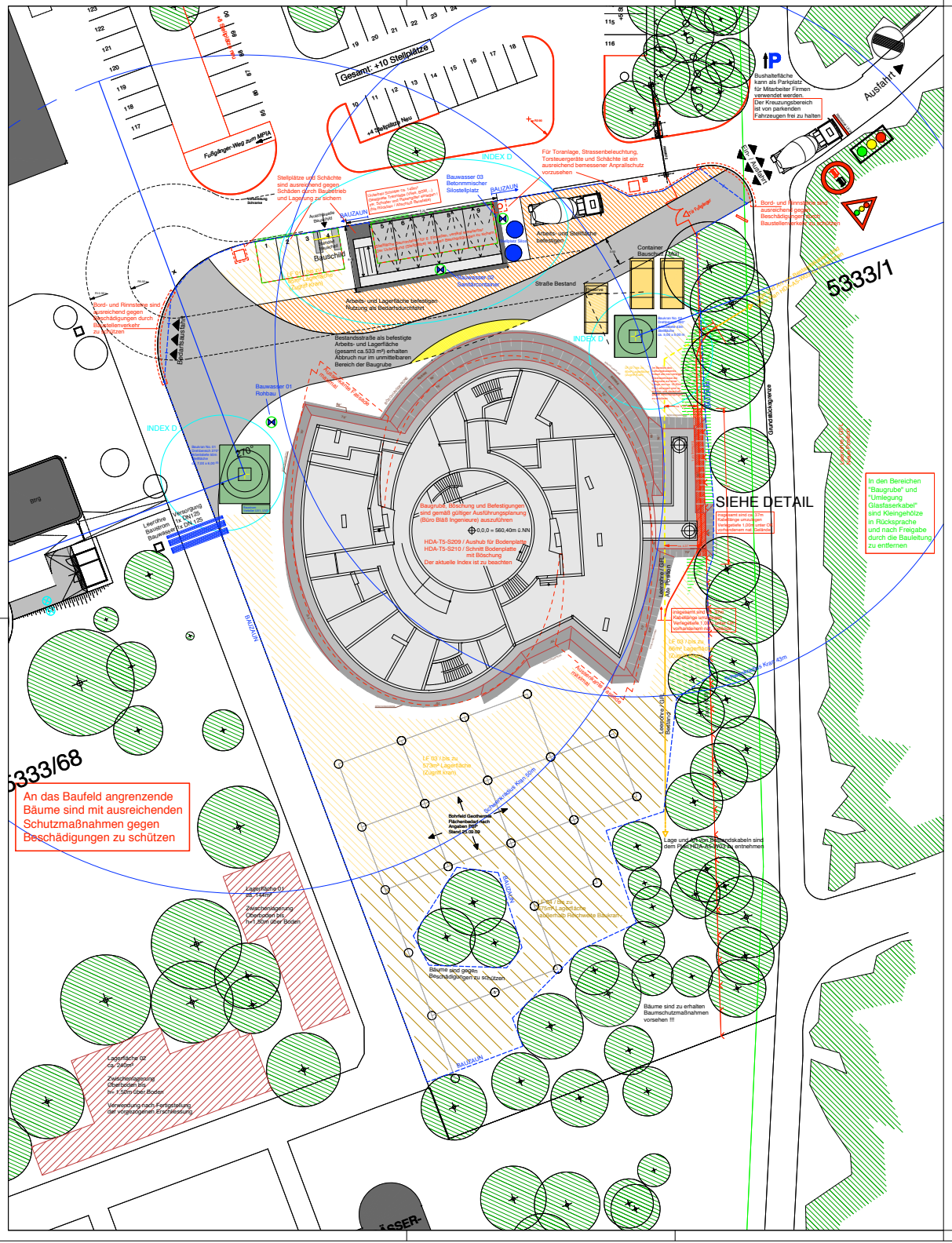
	RealWorks			CloudCompare		
Entfernung [m]	Punktanzahl	Prozentanteil		Punktanzahl	Prozentanteil	
Gesamt (Trimble)	763.244	100%	100%	763.244	100%	100%
0,000 - 0,001	156.431	20,50%		113.625	14,89%	
0,001 - 0,002	147.762	19,36%		108.948	14,27%	
0,002 - 0,003	130.902	17,15%	81,99%	101.344	13,28%	64,24%
0,003 - 0,004	109.093	14,29%		90.132	11,81%	
0,004 - 0,005	81.621	10,69%		76.245	9,99%	
0,005 - 0,006	54.977	7,20%		61.224	8,02%	
0,006 - 0,007	33.495	4,39%		46.135	6,04%	
0,007 - 0,008	19.458	2,55%	16,47%	34.273	4,49%	24,53%
0,008 - 0,009	11.005	1,44%		25.805	3,38%	
0,009 - 0,010	6.807	0,89%		19.821	2,60%	
0,010 - 0,011	4.201	0,55%		15.907	2,08%	
0,011 - 0,012	2.617	0,34%		13.342	1,75%	
0,012 - 0,013	1.598	0,21%	1,30%	11.052	1,45%	7,43%
0,013 - 0,014	951	0,12%		9.158	1,20%	
0,014 - 0,015	544	0,07%		7.223	0,95%	
0,015 - 0,016	385	0,05%		5.467	0,72%	
0,016 - 0,017	267	0,03%		4.185	0,55%	
0,017 - 0,018	203	0,03%	0,15%	3.109	0,41%	2,26%
0,018 - 0,019	158	0,02%		2.538	0,33%	
0,019 - 0,020	129	0,02%		1.939	0,25%	
0,020 - 0,021	110	0,01%		1.533	0,20%	
0,021 - 0,022	86	0,01%		1.329	0,17%	
0,022 - 0,023	85	0,01%	0,06%	1.198	0,16%	0,78%
0,023 - 0,024	71	0,01%		1.028	0,13%	
0,024 - 0,025	72	0,01%		885	0,12%	
0,025 - 0,026	46	0,01%		850	0,11%	
0,026 - 0,027	46	0,01%		724	0,09%	
0,027 - 0,028	35	0,00%	0,02%	672	0,09%	0,43%
0,028 - 0,029	32	0,00%		541	0,07%	
0,029 - 0,030	17	0,00%		457	0,06%	
0,030 - 0,031	12	0,00%		388	0,05%	
0,031 - 0,032	10	0,00%		347	0,05%	
0,032 - 0,033	8	0,00%	0,00%	294	0,04%	0,20%
0,033 - 0,034	3	0,00%		271	0,04%	
0,034 - 0,035	2	0,00%		211	0,03%	
0,035 - 0,036	1	0,00%		205	0,03%	
0,036 - 0,037	0	0,00%		185	0,02%	
0,037 - 0,038	1	0,00%	0,00%	162	0,02%	0,10%
0,038 - 0,039	1	0,00%		115	0,02%	
0,039 - 0,040	0	0,00%		76	0,01%	
0,040 - 0,041	0	0,00%		57	0,01%	
0,041 - 0,042	0	0,00%		52	0,01%	
0,042 - 0,043	0	0,00%	0,00%	38	0,00%	0,03%
0,043 - 0,044	0	0,00%		37	0,00%	
0,044 - 0,045	0	0,00%		22	0,00%	
0,045 - 0,046	0	0,00%		29	0,00%	
0,046 - 0,047	0	0,00%		19	0,00%	
0,047 - 0,048	0	0,00%	0,00%	15	0,00%	0,01%
0,048 - 0,049	0	0,00%		12	0,00%	
0,049 - 0,050	0	0,00%		6	0,00%	
0,050 -0,051	0	0,00%		10	0,00%	
0,051 -0,052	0	0,00%	0,00%	4	0,00%	0,00%
0,052 -0,053	0	0,00%		1	0,00%	

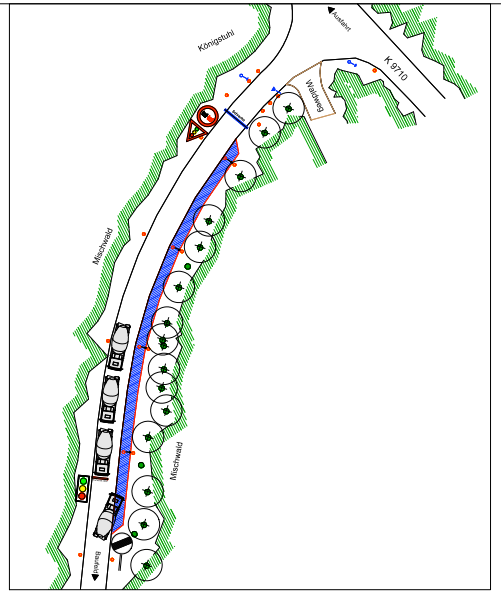
Tabelle E.2: Vergleich der modellierten Punktwolke SW1 mit Trimble (Unterbau)

ANHANG F

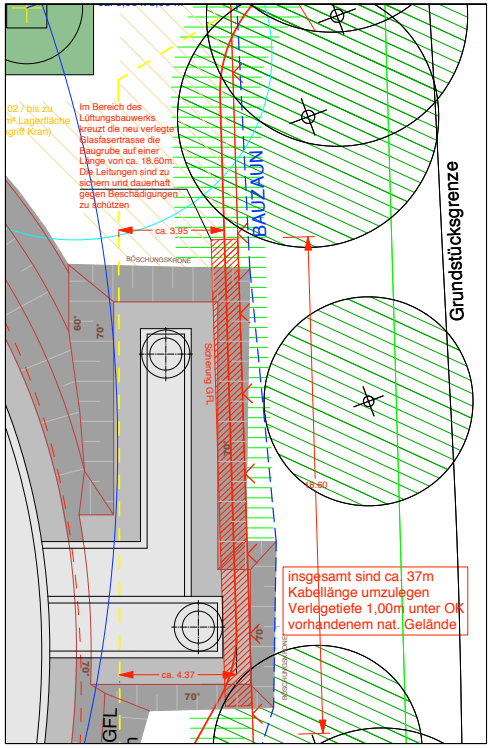
PLÄNE DES „HAUSES DER ASTRONOMIE”

In diesem Anhang sind Pläne des „Hauses der Astronomie” zu finden: zunächst der Baustelleneinrichtungsplan, der von den Architekten zur Visualisierung des Gebäudes in seiner Umgebung hergestellt wurde; dann ein Plan zur Darstellung der Ebene G0, in dem der Hörsaal in Draufsicht zu erkennen ist; schließlich zwei Schnittansichte vom Bauwerk, in dem die künftige Einrichtung des Hörsaals bereits dargestellt wurde.





Verkehrsregelung Zufahrt Gelände M 1:500



Detail Absicherung Glasfaserkabel M 1:100

Im gesamten Bereich ist mit undokumentierten Erdkabeln zu rechnen. Bekannte Kabeltrassen sind dem Plan HDA-A5-W03 zu entnehmen.

Bei Erdarbeiten freigelegte Wurzelbereiche sind nach Bedarf mit fachgerechten Hilfskonstruktionen gegen Beschädigungen zu schützen.

Wichtige Hinweise :

Alle Quadratmeterangaben richten sich nach den Rohbaumaßen.
Alle Ausführungspläne haben nur Gültigkeit in Verbindung mit den Schlitz- und Aussparungsplänen.
Alle Maße sind am Bau von den ausführenden Firmen selbstverantwortlich zu prüfen.
Bei Maßunstimmigkeiten ist unverzüglich die Bauleitung zu unterrichten.
Die Statik und der Wärmeschutznachweis sind zu beachten.

Allgemeines :

OKFFB Gebäude = ± 0,00 = +560,40 m ü.NN

OKFFB +/-0,00

OKFFB +/-0,00

S1 Schnittbezeichnung

Flächenstempel

Flächen-Nr.	Bezeichnung
Umfang	Fläche
Bodenbelag	

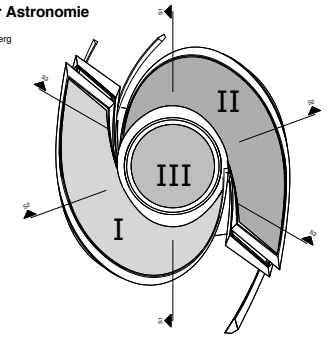
Verweis auf Detail

Plan Nr.

BAUSTROM: gemäß Planung G + B : HDA-E5-D09
BAUWASSER: gemäß Planung PSP : HDA-H5-???

Index	Datum	Gez.	Planänderung
D	04.02.10	CO	- Ergänzung Schotterunterbau Baucontainer Anpassung Anzahl, Typ + Position Baukräne, Anpassung Lagerflächen
C	11.12.09	CO	- Ergänzung Bauschild
B	17.11.09	CO	- Aktualisierung Aussenanlagen (Oberflächen + Positionen) - Überarbeitung Layout
A	22.10.09	CO	- Umlegung Glasfaserkabel / Leerohre: Anpassung Grabenführung, Festlegung Verlegetiefe auf 1m unter OK vorhandenes natürliches Gelände (Bestand), Optimierung Baumschutz - Anpassung Position Container Bauschutt

HDA
Haus der Astronomie
Königstuhl 18
69117 Heidelberg



Bauherr:

Klaus Tschira Stiftung gGmbH
Schloss-Wolfsbrunnenweg 33
69118 Heidelberg

www.klaus-tschira-stiftung.de

Architekt:

Bernhardt + Partner
Birkenweg 13F
64295 Darmstadt

Tel.:06151/3620-0 info@bp-da.de

Projektsteuerer:

Schuhmann Projektsteuerung
Schöfferstraße 12
64295 Darmstadt

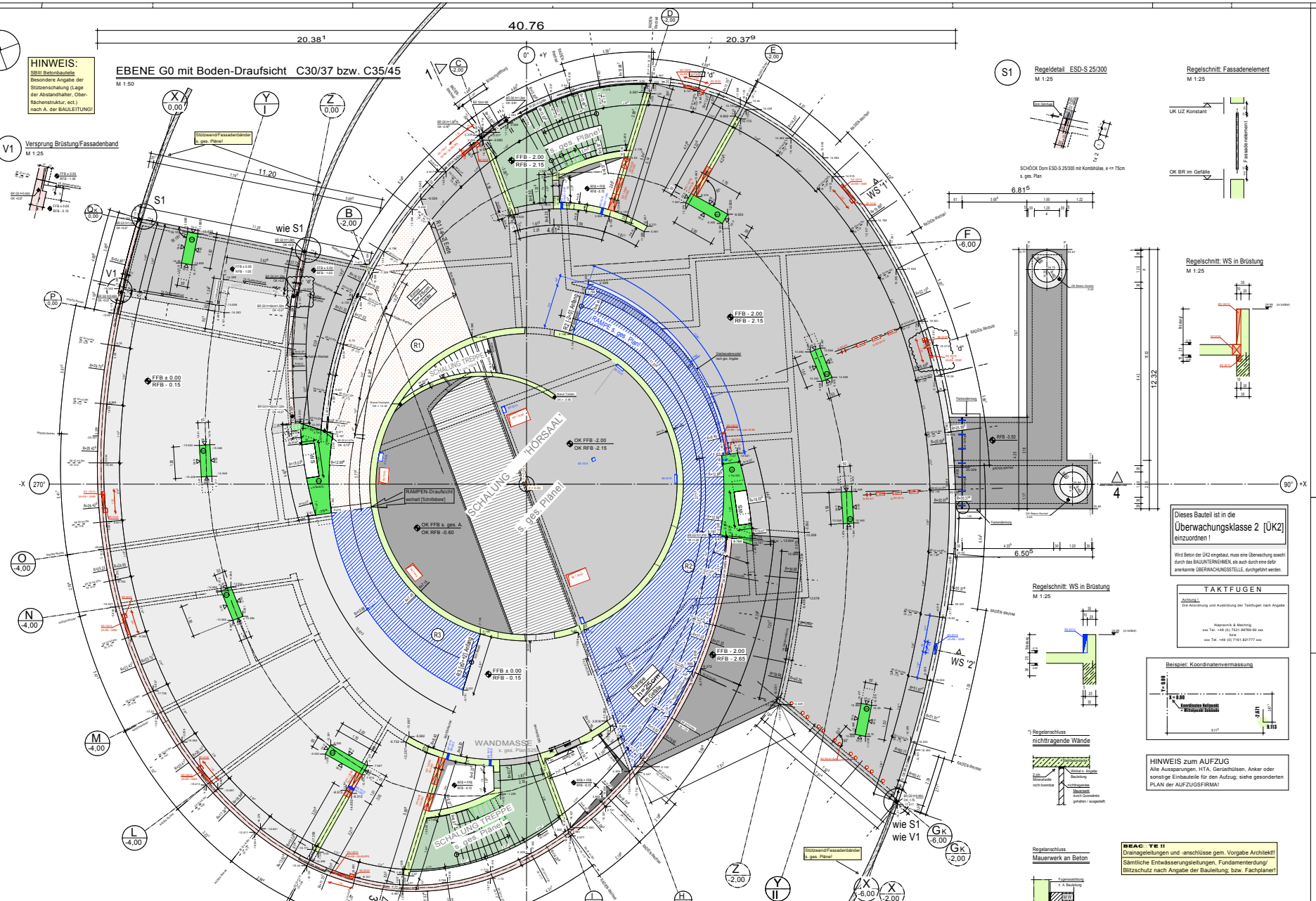
Tel.: 06151/39147-0 hda@schumann-projektsteuerung.de

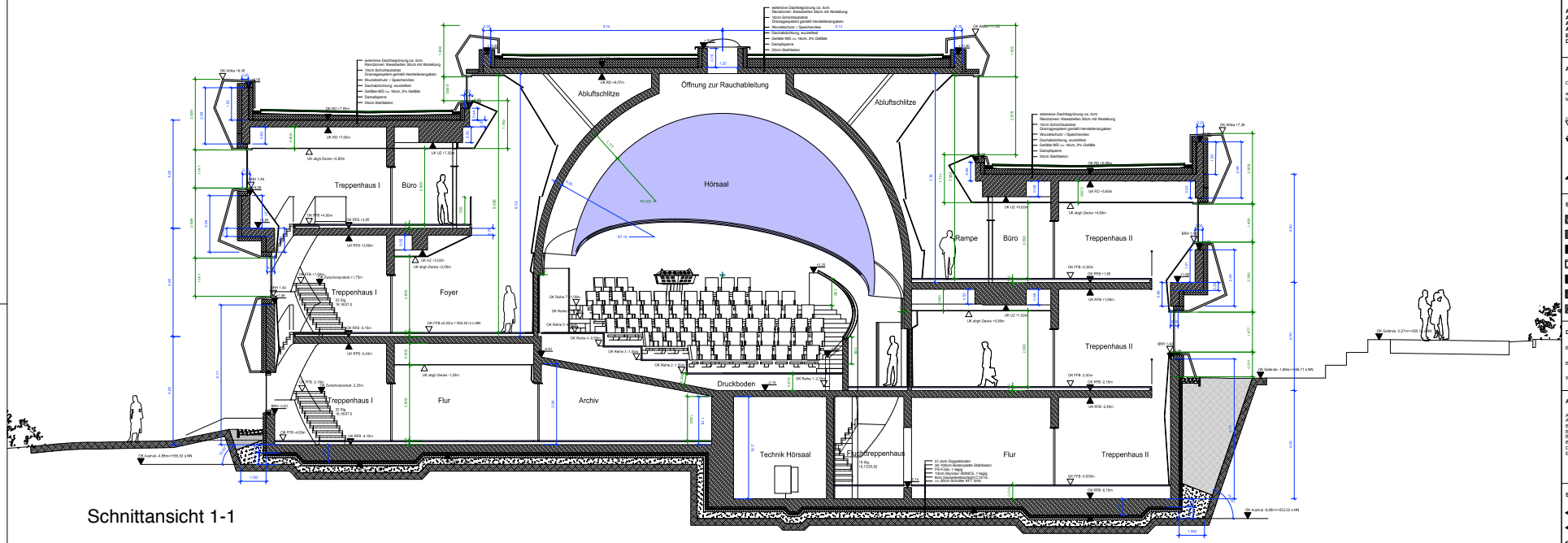
Planart: Ausführungsplanung

Planbez.: Baustelleneinrichtungsplan

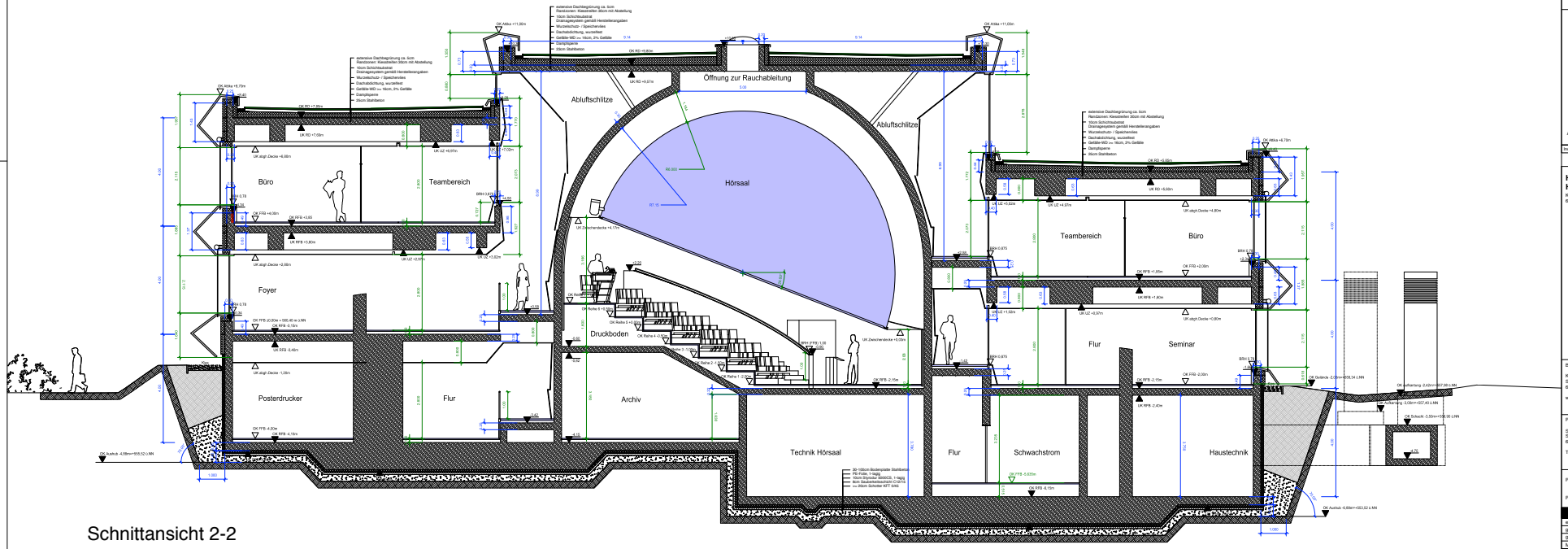
Plan zur Ausführung freigegeben !

erstellt am:	10.06.09	Darstellung	Plannummer - Index
geändert am:	04.02.10	ARCHITEKT	HDA-A5-L02-D
gezeichnet/ geprüft:	CO / TM		
Maßstab:	1:250		
Format:	841 x 594 mm		


EBENE G0 mit Boden-Draufsicht C30/37 bzw. C35/45
M 1:50
HINWEIS:
SBIII Betonbauteile
Besondere Angabe der Stützenschalung (Lage der Abstandhalter, Oberflächenstruktur, ect.) nach A. der BAULEITUNG!
V1 Versprung Brüstung/Fassadenband
M 1:25
Stützwand/Fassadenbänder s. ges. Pläne!
40.76
20.38
20.37
38.71
19.35
11.20
wie S1
SCHALUNG "HÖRSAAL" s. ges. Pläne!
SCHALUNG TREPPE s. ges. Pläne!
RAMPEN-Draufsicht wechselt [Schnittebene]
OK FFB -2.00
OK RFB -2.15
OK FFB s. ges. A.
OK RFB -0.60
FFB - 2.00
RFB - 2.15
FFB ± 0.00
RFB - 0.15
FFB - 2.00
RFB - 2.65
WANDMASSE s. ges. Plan
Stützwand/Fassadenbänder s. ges. Pläne!
wie S1
wie V1
S1
Regeldetail ESD-S 25/300
M 1:25
SCHÖCK Dom ESD-S 25/300 mit Kombihülse, e <= 75cm
s. ges. Plan
6.81
6.50
Regelschnitt: Fassadenelement
M 1:25
UK UZ Konstant
OK BR im Gefälle
Fassadenelement
Regelschnitt: WS in Brüstung
M 1:25
12.32
Regelschnitt: WS in Brüstung
M 1:25
Dieses Bauteil ist in die
Überwachungsklasse 2 [ÜK2]
einzuordnen !
Wird Beton der ÜK2 eingebaut, muss eine Überwachung sowohl durch das BAUUNTERNEHMEN, als auch durch eine dafür anerkannte ÜBERWACHUNGSSTELLE, durchgeführt werden.
TAKTFUGEN
Achtung !
Die Anordnung und Ausbildung der Taktfugen nach Angabe
Nagravnik & Mechnig
xxx Tel.: +49 (0) 7531.99769-60 xxx
bzw
xxx Tel.: +49 (0) 7161.821777 xxx
Beispiel: Koordinatenvermassung
X = 0.00
Koordinaten Nullpunkt = Bildpunkt Gebäude
HINWEIS zum AUFZUG
Alle Aussparungen, HTA, Gerüsthülsen, Anker oder sonstige Einbauteile für den Aufzug; siehe gesonderten PLAN der AUFZUGSFIRMA!
Regelanschluss
nichttragende Wände
Regelanschluss
Mauerwerk an Beton
BEAC TE !!
Drainageleitungen und -anschlüsse gem. Vorgabe Architekt!!
Sämtliche Entwässerungsleitungen, Fundamenterdung/ Blitzschutz nach Angabe der Bauleitung; bzw. Fachplaner!
Sämtliche Arbeitsräume sind lageweise zu verfüllen und zu verdichten; ggf. mit Magerbeton auffüllen!
Bei Differenzen gegenüber den Annahmen in der statischen Berechnungen ist der Statiker unverzüglich in Kenntnis zu setzten!
Dieser Plan gilt nur in Verbindung mit den Plänen angrenzender Bauteile und den Werkplänen des Architekten !
Schnitte s. auch ges. Pläne!
Hinweis zur Abdichtung!
Legende :
C30/37 (WU) [Ansicht]
C30/37 [Ansicht]
C35/45 [Ansicht]
Mauerwerk (KS-PE 12/1.8/DBM) "nicht tragend"
Keine Darstellung/Angaben zu Metallständerwänden!
Rohbauangaben zur Geschossdecke
Angaben zum Geschossboden
OK RFB Oberkante Rohfussboden
OK FFB Oberkante Fertigfussboden
BRH Brüstungshöhe, ab OK RFB
UKD/UKRD Unterkante Rohdecke
RD Rohdecke
(H,L,S) Heizung, Lüftung, Sanitär
(E) Elektro
WS Wandschlitz
WD Wanddurchbruch
DD Deckendurchbruch
BD Bodendurchbruch
Adk. Abdichtungskonzept
Kontrollmasse
rote Aussparungen = HKLS
blaue Aussparungen = Elt
schwarze Aussparungen = sonstige
WÄRMEDÄMMUNG ist KEINE ROHBAULEISTUNG!
Einbau nur bei gesonderter Angabe!
PERIMETERDÄMMUNG im Erdreich IST ROHBAULEISTUNG!
± 0.00 = 560.40m ü.NN
Schnitte siehe ges. Pläne
Änderungen siehe Wolken
Parkplatz
M 1:5000
M 1:1000
Projekt: HDA Haus der Astronomie
Bauherr: Klaus Tschira Stiftung gGmbH
Schloss-Wolfsbrunnenweg 33
D-69118 Heidelberg
www.klaus-tschira-stiftung.de
Projektsteuerung
Schumann Projektsteuerung
Architekten Bernhardt + Partner
Tragwerksplaner
Büro für Statik und Konstruktion im Bauwesen
Planart: Schalplan
Planbez.: Ebene G0 mit Boden-Draufsicht h=25cm
Plan zur Ausführung freigegeben !
Grundlage: RHINO-Modell
Stand: 12. März 2010
Plannummer: HDA-T5-G0-S 213 d
Schalung



Schnittansicht 1-1



Schnittansicht 2-2

Wichtige Hinweise :

Alle Quadratmeterangaben richten sich nach den Rohbaumaßen.
Alle Ausführungspläne haben nur Gültigkeit in Verbindung mit den Schlitz- und Aussparungsplänen.
Alle Maße sind am Bau von den ausführenden Firmen selbstverantwortlich zu prüfen.
Bei Maßunstimmigkeiten ist unverzüglich die Bauleitung zu unterrichten.
Die Statik und der Wärmeschutznachweis sind zu beachten.

Allgemeines :

OKFFB = 0,00 = +560,40 m ü.NN

alle Maße ab OKRFB,
falls nicht anders im Plan vermerkt!

OKFFB =+0,05 / OKRFB =+0,05

OKFFB =+0,05 / OKRFB =+0,00

S1 Schnittbezeichnung

Raumstempel

Raum-Nr.	Raumbezeichnung
lichte Höhe/Umfang	Fläche
Bodenbelag	Deckenbelag

Durchbruchangaben
Art / Größe
Lage / Gewerk

Verweis auf Detail
Plan Nr.

Schraffuren :

Stahlbeton	unbewehrter Beton	xx
Mauerwerk	xx	xx
Estrich	xx	xx
Trockenbau	Trockenbau F30	Trockenbau F90
Holz	xx	xx
Dämmung	Dämmung, druckfest	xx
Erdreich	Kies	Substrat

Durchbrüche / Schlitze:

Bodendurchbruch	BD b / h cm	Wandschlitz	WS b / h / l cm
Bodenschlitz	BS b / h / l cm	Deckendurchbruch	DD b / h cm
Wanddurchbruch	WD b / h cm	Deckenschlitz	DS b / h / l cm

Abkürzungen :

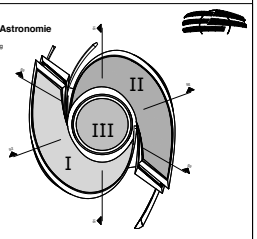
A	nichtbrennbar	F	Feuerlöscher	KS	Kanalsohle	RÖ	Revisionsöffnung
AD	Abgehängte Decke	FS	Fundamentsohle	L	Lüftung	S	Gewerk Sanitär
BA	Brüstungsauf	FST	Fertig-Stufe	OK	Oberkante	UK	Unterkante
BRH	Brüstungshöhe	F30	Feuerhemmend	FB	Fertigboden	RD	Rohrdecke
B1	schwerentflammbar	F90	Feuerhemmend	RB	Rohrboden	UZ	Unterzug
B2	normalentflammbar	F90	Feuerbeständig	RA	Rohraachse	ÜZ	Überzug
DA	Dachaufbau	IK	Innenkante	RH	Raumhoch	VK	Vorderkante
E	Gewerk Elektro	H	Gewerk Heizung	RST	Roh-Stufe	VS	Versprung
		HK	Heizkörper				

Sichtbare Wandoberflächen (letzte Aufbauschicht) :

Sichtbeton	gespachtelt, gestrichen	Glas	X
Sichtmauerwerk	Putz, Fliesen	X	X
Putz, Anstrich	Fliesen	Anstrich	X

Index	Datum	Ges.	Planänderung
A	03.12.09	TM CO	allgemeine Aktualisierung (Fassade, Anschlußpunkte, WD, Dachaufbauten,...)

HDA
Haus der Astronomie
Königstuhl 18
69117 Heidelberg



Bauherr:
Klaus Tschira Stiftung gGmbH
Schloss-Wolfsbrunnenweg 33
69118 Heidelberg
www.klaus-tschira-stiftung.de

Architekt:
Bernhardt + Partner
Birkenweg 13F
64295 Darmstadt
Tel.:06151/3620-0 hda@bp-da.de

Projektsteuerer:
Schuhmann Projektsteuerung
Schiffartstraße 12
64295 Darmstadt
Tel.: 06151/39147-0 hda@schumann-projektsteuerung.de

Fachplaner:
Name
Straße Hausnummer
PLZ Ort
Tel.: mail.:

Planart: **Ausführungsplanung**

Planbez.: **Schnittansicht 1 und Schnittansicht 2**

Plan noch NICHT zur Ausführung freigegeben!

erstellt am:	14.04.09	Darstellung:	Plannummer - Index
geändert am:	04.12.09	Architekt	HDA-A5-S12-A
gezeichnet/ geprüft:	TM, CO / AM		
Maßstab:	1:50		
Format:	1350 x 880 mm		