

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

# Technische Universität Wien

Studienrichtung Vermessung und Geoinformation

## Diplomarbeit

### Modellierung terrestrischer Laserscanner-Daten

ausgeführt am

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

von

Alexander Haring  
Baumeistergasse 1/17/8  
1160 Wien

Begutachter:

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Kraus

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Pfeifer

Dipl.-Ing. Christian Bries

Wien, im September 2003

.....

## Kurzfassung

Terrestrisches Laserscanning und die (Nahbereichs-)Photogrammetrie sind konkurrierende Technologien zur Aufnahme von Objekten im Nahbereich, wobei jede der beiden Aufnahmemethoden ihre Stärken und Schwächen aufweist. Terrestrisches Laserscanning liefert eine sehr hohe Punktdichte bei weitgehend automatisch ablaufendem Aufnahmevorgang [Pfeifer und Rottensteiner, 2001]. Im Gegensatz zur Photogrammetrie besteht bei der geometrischen Rekonstruktion des Objekts infolge des aktiven Messsystems keinerlei Abhängigkeit von der natürlichen Beleuchtung und der Textur der Objektoberfläche. Jedoch ist gerade die Texturinformation für diverse Anwendungen von Interesse, da sie einen dokumentarischen Wert besitzt. Neben der Erfassung der Objekttextur stellt die gute Bestimmbarkeit von Objektkanten eine weitere Stärke der Photogrammetrie dar. An der Objektoberfläche vorhandene Kanten können – bei entsprechend gutem Kontrast – direkt und präzise in den Photos gemessen werden. In Kanten- bzw. Konturnähe treten beim Laserscanning hingegen Probleme aufgrund fehlerhafter Distanzmessungen auf. Bei kombiniertem Einsatz können die Stärken beider Aufnahmemethoden genützt werden.

Für diese Arbeit stehen Aufnahmen des terrestrischen Laserscanners LMS-Z360 der Fa. Riegler sowie digitale Photos von der Marc-Anton-Plastik (Secession, Wien) zur Verfügung. Der erste Schwerpunkt der Diplomarbeit liegt in der gemeinsamen Orientierung der Laserscanner-Aufnahmen und der Photos über signalisierte Verknüpfungspunkte. Dazu müssen diese Verknüpfungspunkte sowohl in den Intensitätsbildern der Laserscanner-Aufnahmen als auch in den Photos gemessen werden. Im Rahmen einer simultanen, hybriden Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate können anschließend die Orientierungsparameter aller Laserscanner-Aufnahmen und Photos sowie die Koordinaten der Verknüpfungspunkte bestimmt werden. Die Ergebnisse dieser Ausgleichung werden analysiert und einer kritischen Betrachtung unterworfen.

Den zweiten Schwerpunkt der Arbeit bildet die geometrische 3D-Modellierung der Objektoberfläche basierend auf den Laserscanner-Daten. Dafür steht das Software-Paket Geomagic Studio der Firma Raindrop Geomagic zur Verfügung. Die ursprüngliche Punktwolke wird zunächst bearbeitet und dann trianguliert. Anschließend wird die Triangulierung verbessert und daraus eine NURBS-(*Non Uniform Rational B-Splines*-) Oberflächendarstellung bestimmt. In der Arbeit wird sowohl auf die im Zuge der Modellierung gemachten Erfahrungen eingegangen als auch das Ergebnis der Modellierung kritisch betrachtet.

Den Abschluss der Arbeit bildet ein Ausblick auf das Einbeziehen von Photos für die Modellierung, wobei es um die Nutzung von Photos zur besseren Bestimmung von Objektkanten und die Erstellung eines 3D-Photomodells für dokumentarische Zwecke geht.

---

## Abstract

Terrestrial laser scanning and (close-range) photogrammetry are competing technologies for surveying of close-range objects, whereas each of these methods has its individual advantages and drawbacks. Terrestrial laser scanning provides a very high point density at a widely automatically running data acquisition process [Pfeifer and Rottensteiner, 2001]. Unlike photogrammetry, there is – due to the active measuring system – no dependency on the natural illumination nor on the surface's texture when reconstructing the object geometrically. However, just the texture information is – because of its documentary value – of interest to diverse applications. Beside the acquisition of the object's texture, the good determinability of the object's edges is another strength of photogrammetry. Edges existing on the object's surface can – at an appropriate contrast – be measured directly and precisely in the photos. When using laser scanning, problems in the vicinity of edges and the contour exist due to erroneous distance measurements. When combining the two acquisition techniques, the strengths of both methods may be used.

For this work, scans acquired by the terrestrial laser scanner LMS-Z360 (company Riegler) as well as digital photos of the "Marc-Anton"-Sculpture (City of Vienna) are available.

The diploma thesis' first main focus is the simultaneous orientation of the laser scans and the photos using signalised tie points. Therefore, these tie points have to be measured in the intensity images of the laser scans as well as in the photos. Afterwards, the orientation parameters of all laser scans and of all photos as well as the co-ordinates of the tie points can be determined within a simultaneous hybrid least-square adjustment. The results of the adjustment are analysed.

The second main focus of the diploma thesis is the geometric 3-D modelling of the object's surface based on the laser scanner data. For this purpose, the software package Geomagic Studio of the company Raindrop Geomagic is available. The original point cloud is edited and triangulated, afterwards the triangulation is improved and a NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) surface representation is determined. Within the thesis, the experiences gained during the modelling process are mentioned and the outcome of the modelling is analysed critically.

At the end of the thesis, there is an outlook regarding the involvement of photos for modelling, whereas the main themes are the use of photos in order to better determine the object's edges as well as the creation of a 3-D photo model for documentary purposes.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Terrestrisches Laserscanning.....</b>	<b>4</b>
2.1	<i>Prinzip des terrestrischen Laserscannings.....</i>	4
2.2	<i>Verfahren der Distanzmessung.....</i>	6
2.3	<i>Reflexion an Oberflächen.....</i>	7
2.4	<i>Der Laserscanner RIEGL LMS-Z360 .....</i>	8
2.4.1	Aufbau und Funktionsweise .....	8
2.4.2	Die Software 3D-RiScan .....	12
2.5	<i>Orientierung mehrerer Laserscanner-Aufnahmen.....</i>	14
2.5.1	Orientierung mit Hilfe von Verknüpfungspunkten .....	14
2.5.2	Orientierung mit Hilfe des ICP-Algorithmus.....	15
<b>3</b>	<b>Aufnahme der Marc-Anton-Plastik.....</b>	<b>18</b>
3.1	<i>Charakteristika des aufzunehmenden Objekts.....</i>	18
3.2	<i>Datenerfassung.....</i>	19
3.2.1	Die digitale Kamera Kodak Professional DCS 460c .....	19
3.2.2	Aufnahmekonfiguration .....	20
<b>4</b>	<b>Orientierung der Laserscanner-Aufnahmen und der Photos.....</b>	<b>23</b>
4.1	<i>Definition eines globalen Objektkoordinatensystems.....</i>	23
4.2	<i>Interaktive Messung der Verknüpfungspunkte in den Intensitätsbildern und in den Photos mit Hilfe des Programmsystems ORPHEUS .....</i>	24
4.2.1	Das Programmsystem ORPHEUS .....	24
4.2.2	Messung der Verknüpfungspunkte in den Intensitätsbildern .....	26
4.2.3	Messung der Verknüpfungspunkte in den Photos .....	29
4.3	<i>Hybride Ausgleichung .....</i>	31
4.3.1	Das Programmsystem ORIENT .....	31
4.3.2	Umwandlung der Intensitätsbildmessungen in Polarbeobachtungen mittels bilinearer Interpolation .....	32

---

4.3.3	Parametrisierung und Ermittlung von Näherungswerten für die Drehwinkel bei Laserscanner-Aufnahmen und Photos.....	34
4.3.4	Bestimmung der Koordinaten der Standpunkte und der Neupunkte durch sukzessive Ausgleichung .....	36
4.3.5	Aufdeckung und Elimination grober Beobachtungsfehler .....	36
4.3.6	Bilanz und Ergebnisse der Ausgleichung .....	39
<b>5</b>	<b>Modellierung der Objektoberfläche .....</b>	<b>45</b>
5.1	<i>Das Modellierungs-Software-Paket Geomagic Studio .....</i>	<i>45</i>
5.2	<i>Bearbeitung der 3D-Punktwolke.....</i>	<i>47</i>
5.2.1	Import der Daten und grobe Editierung der Punktwolke .....	47
5.2.2	Elimination fehlerhafter Punkte im Kanten- bzw. Kontur-Bereich.....	49
5.2.3	Unterteilung der Punktwolke in Sockel und eigentliche Plastik.....	50
5.2.4	Modellierung des Sockels durch Ebenen .....	51
5.2.5	Filterung der Punktwolke.....	53
5.3	<i>Bearbeitung der Triangulierung.....</i>	<i>56</i>
5.3.1	Problematik von Datenlöchern bzw. unzureichend erfassten Kleinstrukturen.....	56
5.3.2	Nachbearbeitung der Triangulierung.....	58
5.4	<i>Beschreibung der Objektoberfläche durch NURBS.....</i>	<i>60</i>
5.4.1	Allgemeines zur Modellierung mit NURBS .....	60
5.4.2	Erstellen des Patch-Layouts und Berechnen des NURBS-Modells .....	61
5.5	<i>Beurteilung der Ergebnisse und gewonnene Erkenntnisse.....</i>	<i>63</i>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>66</b>
	<b>Anhang A: ORIENT-Protokolle der Ausgleichung.....</b>	<b>69</b>
A.1	<i>Zwangsfreie Ausgleichung .....</i>	<i>69</i>
A.2	<i>Freie Netzausgleichung .....</i>	<i>73</i>
A.3	<i>Freie Netzausgleichung ohne Photos .....</i>	<i>76</i>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>79</b>
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>81</b>

# 1 Einleitung

Für Aufnahme und Dokumentation von Objekten im Nahbereich ist die Photogrammetrie (genauer: Nahbereichsphotogrammetrie) eine altbewährte Methode. Nachdem sich am Anfang der 90er-Jahre das flugzeuggetragene ("*airborne*") Laserscanning zur Erfassung der Geländeoberfläche als Alternative zur Luftbildphotogrammetrie etablierte, hat sich in den letzten Jahren auch das terrestrische Laserscanning zu einer interessanten Aufnahmemethode für verschiedene Anwendungen entwickelt.

Der Erfolg dieser noch relativ jungen Technologie ist unter anderem auf folgende Vorteile zurückzuführen:

- Sehr hohe Punktdichte auf der Objektoberfläche bei weitgehend automatisch ablaufendem Aufnahmevorgang [Pfeifer und Rottensteiner, 2001]
- Die Aufnahmeplanung bei Laserscanning, insbesondere bei komplexeren Objekten, ist wesentlich einfacher als bei der photogrammetrischen Aufnahme, da bei letzterer bei der Wahl der Kamerapositionen folgende Grundregel zu beachten ist: Die die Strahlenbündel verknüpfenden Objektpunkte müssen auf mindestens 2 Bildern, besser mindestens auf 3 Bildern abgebildet sein, und außerdem dürfen die Strahlen in diesen gemeinsamen Objektpunkten keine schleifenden Schnitte bilden [Kraus, 1997]. Beim Laserscanning reicht hingegen bereits eine Aufnahme, um (lokale) dreidimensionale Koordinaten der Objektpunkte zu bestimmen.
- Während man bei der (monokularen) photogrammetrischen Auswertung naturgemäß stark von der Textur abhängig ist, spielt dies beim Laserscanning keine Rolle, da das Objekt von einem aktiven Sensor abgetastet wird und somit die natürlichen Beleuchtungsverhältnisse bzw. die Textur unbedeutend sind (für die Verknüpfungspunkte werden i.a. retroreflektierende Zielmarken verwendet).

Andererseits zeichnet sich die Photogrammetrie durch folgende Stärken aus:

- Durch eine photographische Aufnahme wird die Textur des Objekts erfasst. Dies ist bei Laserscanner-Aufnahmen an sich nicht der Fall. Es gibt zwar Geräte, in denen ein RGB-Sensor (Ein-Pixel-Kamera) integriert ist, jedoch kommt die Qualität der so registrierten Textur nicht annähernd an jene einer photographischen Aufnahme heran. Dies ist eine bedeutende Stärke der Photogrammetrie, insbesondere wenn von dem aufzunehmenden Objekt ein qualitativ hochwertiges 3D-Photomodell erzeugt werden soll.
- Kanten können in photographischen Bildern aufgrund der dort vorhandenen Grauwertsprünge meist direkt und präzise gemessen werden, während das Laserscanning gerade an Kanten problematisch ist: Aufgrund der im Vergleich zu

Photos i.a. deutlich geringeren Auflösung werden einerseits die der Aufnahme-position zugewandten Kanten relativ stark abgerundet, andererseits treten bei Konturkanten bzw. Konturlinien aufgrund der Ausdehnung der vom Laserstrahl beleuchteten Fläche grob falsche Distanzmessungen auf (siehe dazu Kapitel 5).

Man kann erkennen, dass sich Photogrammetrie und Laserscanning sehr gut ergänzen. Um also die Stärken beider Methoden nutzen zu können, bietet sich deren kombinierter Einsatz an. Laut Kraus (2001) sorgt Laserscanning derzeit für einen Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie. Auch einige Hersteller der terrestrischen Laserscanner setzen auf die Vorzüge der hybriden Aufnahme und haben daher begonnen, Kameras in ihre Systeme zu integrieren.

Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien (I.P.F.) wurde bereits vor drei Jahren im Rahmen einer Diplomarbeit [Rottensteiner G., 2000] Einsatz und Praxistauglichkeit eines terrestrischen Laserscanner der Firma Riegler für Innenraumaufnahmen untersucht. In den letzten Jahren hat das I.P.F. die Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet verstärkt und dieser Technologie bereits einen hohen Stellenwert in der Lehre beigemessen.

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der 3D-Modellierung eines geometrisch komplexen Objekts. Als Beispiel dient die Marc-Anton-Plastik (befindet sich neben der Secession in Wien). Das Kunstwerk wurde mit dem terrestrischen Laserscanner LMS-Z360 (Kap. 2.4) der Firma Riegler gescannt, wobei zusätzlich Photos mit der digitalen Kamera des I.P.F. aufgenommen wurden (siehe Kap. 3). Diese Scans und die photographischen Aufnahmen bilden die Datengrundlage für diese Diplomarbeit.

Der erste Schwerpunkt der Diplomarbeit liegt in der gemeinsamen Orientierung von Laserscanner-Aufnahmen und Photos über Verknüpfungspunkte (Kap. 4), die auf dem Objekt und in dessen Umgebung mittels retroreflektierender Zielmarken signalisiert wurden. Dazu ist es notwendig, diese Verknüpfungspunkte sowohl in den Photos als auch in den Intensitätsbildern der Laserscanner-Aufnahmen zu messen (Kap. 4.2). Dies geschah in diesem Fall manuell. Eine automatische Messung wäre auch denkbar. Die Messung erfolgte mit dem am I.P.F. entwickelten Programmsystem ORPHEUS [Kager et al., 2002], welches einerseits eine graphische Benutzeroberfläche für das hybride photogrammetrische Ausgleichungssystem ORIENT bietet, andererseits die interaktive Messung von Punkten und Linien in digitalen Photos ermöglicht [ORIENT, 2003]. Mit Hilfe von ORIENT können die Laserscanner-Standpunkte, die Projektionszentren der Photos, die Drehwinkel sowohl der Laserscanner-Aufnahmen als auch der Photos und die Verknüpfungspunkte in einer hybriden Ausgleichung (Kap. 4.3) nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden. Aus geodätischer Sicht sind vor allem die dabei erzielten Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten von Interesse. Die Genauigkeiten werden kritisch betrachtet.

---

Den zweiten Schwerpunkt der Arbeit bildet die geometrische 3D-Modellierung der Oberfläche, wobei dafür ausschließlich die Laserscanner-Daten verwendet werden. Zur Verfügung steht das von der Firma Raindrop Geomagic entwickelte Modellierungssoftwarepaket Geomagic Studio 5.0 (Kap. 5.1), welches die Verarbeitung der vom Laserscanner gelieferten Punktwolke bis zu einem CAD-Modell des entsprechenden Objekts ermöglicht [Geomagic, 2003a]. Dabei erfolgt die Modellierung i.a. in mehreren Schritten. Zuerst wird die Punktwolke bearbeitet (Kap. 5.2), danach wird – darauf basierend – eine 3D-Triangulierung der Oberfläche berechnet, diese wird ebenfalls bearbeitet (Kap. 5.3), und schließlich erfolgt die Vereinfachung der Oberflächenrepräsentation durch NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) (Kap. 5.4), also mathematisch beschreibbaren Flächenstücken. Diese NURBS-Repräsentation spielt unter anderem bei CAD- (*Computer Aided Design*-)Modellen eine Rolle. In Kapitel 5 werden auch die typischen Probleme aufgezeigt, die beim Modellierungsvorgang auftreten. Die Ursachen dafür sind einerseits die fehlerhaften Punkte in der Nähe von Kanten und Konturlinien aufgrund der bereits erwähnten Fehler der Distanzmessung, andererseits die aufgrund der Komplexität des Objekts vorhandenen Datenlöcher, die u.U. zu falschen Dreiecksvermaschungen führen können. Am Ende von Kapitel 5 wird das Ergebnis der Objektmodellierung einer kritischen Betrachtung unterworfen.

Am Ende der Diplomarbeit wird als Ausblick (siehe Kap. 6) auf die Möglichkeit eingegangen, die Photos für die Objektmodellierung einzubeziehen. Zur Verbesserung des 3D-Oberflächenmodells können die Kanten bzw. Konturlinien in den Bildern direkt gemessen werden. Außerdem kann die in den Photos enthaltene Texturinformation für eine Erweiterung des Modells zu einem 3D-Photomodell genutzt werden.

## 2 Terrestrisches Laserscanning

Dieses Kapitel beginnt mit einem allgemeinen Teil, der sich mit dem Prinzip des terrestrischen Laserscannings, den für die Distanzmessung angewandten Verfahren, und den verschiedenen Arten der Reflexion an Oberflächen befasst. Anschließend wird jenes Laserscanner-System vorgestellt, das die Datengrundlage für diese Arbeit bereitstellt. Zum Abschluss wird auf die Orientierung mehrerer Laserscanner-Aufnahmen (sowohl mit als auch ohne Verwendung von Verknüpfungspunkten) eingegangen.

### 2.1 Prinzip des terrestrischen Laserscannings

Terrestrisches Laserscanning ist eine Methode zur dreidimensionalen Aufnahme von Objekten im Nahbereich. Die Bezeichnung "terrestrisch" dient zur Unterscheidung vom flugzeuggetragenen ("airborne") Laserscanning, das zur Erfassung der Erdoberfläche aus der Luft eingesetzt wird. Im folgenden handelt es sich stets um "terrestrisches" Laserscanning, auch dann, wenn die Bezeichnung "terrestrisch" fehlt.

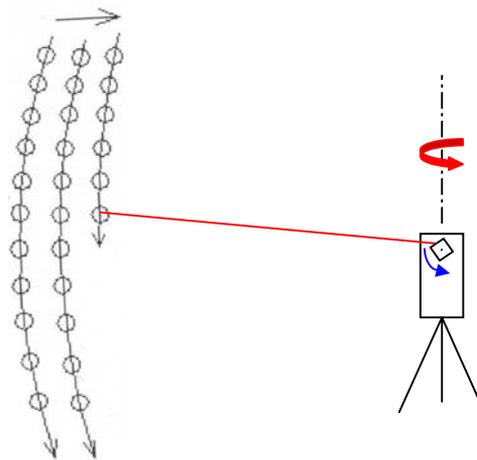


Abb. 2-1: Aufnahmeprinzip beim terrestrischen Laserscanning

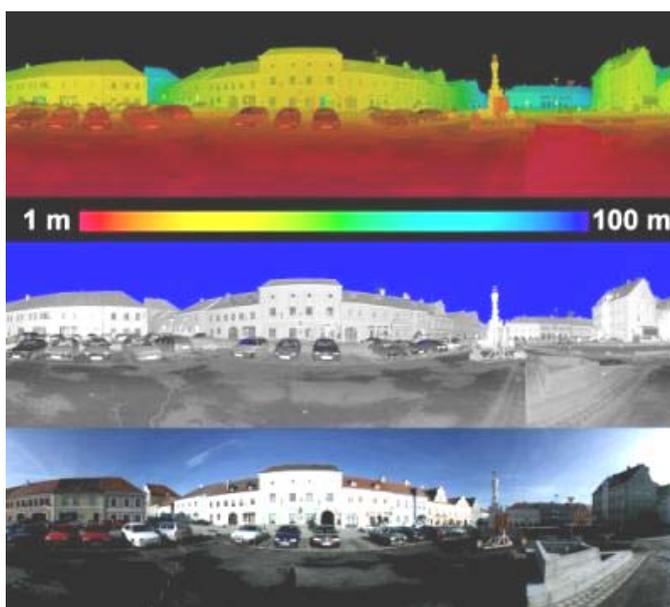
Bei einer Laserscanner-Aufnahme wird die Oberfläche des zu vermessenden Objektes durch einen Laserstrahl automatisch sukzessive abgetastet (Abb. 2-1): Der Laserstrahl durchläuft dabei inkrementell ein gitterförmig angeordnetes Richtungsbündel, dessen Gitterweite durch vorgegebene, aber jeweils konstante Winkelschrittweiten in horizontaler bzw. vertikaler Richtung bestimmt ist.

Die Ausrichtung des Strahls in die einzelnen Richtungen erfolgt in der Regel mit Hilfe einer (i.a. optomechanischen) Ablenkungseinheit. Meist geschieht dies zeilenweise, d.h. entlang einer vertikalen Scan-Zeile wird der Vertikalwinkel um eine konstante Schrittweite

so lange erhöht, bis das Ende der Zeile (des Vertikal-Scans) erreicht ist. Danach wird der Horizontalwinkel um eine konstante Schrittweite erhöht, anschließend wird der nächste Vertikal-Scan durchgeführt, usw. Der aufzunehmende Bereich kann durch einen Horizontal- und einen Vertikalwinkelbereich vorgegeben werden.

Für jede eingestellte Strahlrichtung wird die Distanz zur Oberfläche bestimmt sowie die tatsächlichen Ist-Werte der beiden Winkel, die i.a. geringfügig von den durch die Schrittweiten vorgegebenen Soll-Werten abweichen. Somit erhält man für jeden gemessenen Punkt 3D-Polarkoordinaten. Im Vergleich zu photographischen Aufnahmen, die ein photogrammetrisches Strahlenbündel festlegen, wird also beim Laserscanning zu jedem der Strahlen die jeweilige Distanz gemessen, d.h. das Ergebnis einer Aufnahme ist eine 3D-Punktwolke im lokalen Scanner-Koordinatensystem.

Für jeden Punkt wird zusätzlich zu den Polarkoordinaten auch noch der sogenannte Intensitätswert registriert. An retroreflektierenden Folien, wie sie zur Signalisierung von Verknüpfungspunkten verwendet werden, ist dieser Intensitätswert um ein Vielfaches größer als an diffus reflektierenden Materialien (vgl. Kap. 2.3).



*Abb. 2-2: Entfernungsbild überlagert mit Intensitätsbild (oben), Intensitätsbild allein (Mitte), und RGB-Bild (unten) als Darstellungen einer Laserscanner-Aufnahme [Riegl, 2003]*

Die in einer Matrix angeordneten Messungen lassen sich als Bildelemente auffassen, aus denen man beispielsweise folgende digitale Bilder zusammensetzen kann (siehe Abb. 2-2): Ein (meist farbcodiertes) Entfernungsbild, ein Intensitätsbild, und – falls das Gerät über einen RGB- (Rot-Grün-Blau-) Sensor zur Ermittlung der Farbwerte der gemessenen Punkte verfügt – ein RGB-Bild. Im Gegensatz zu Photos liegt diesen Bildern die Projektion

auf eine Kugelfläche zugrunde, die anschließend analog zur "Quadratischen Platkarte von Marinus" auf eine Ebene abgebildet wird [Pfeifer und Rottensteiner, 2001].

Das Intensitätsbild spielt insofern eine besondere Rolle, da in diesem die signalisierten Verknüpfungspunkte aufgrund ihrer hohen Intensitätswerte leicht identifiziert und gemessen werden können. Durch Messung von Verknüpfungspunkten wird die Verknüpfung mehrerer Laserscanner-Aufnahmen und deren Transformation in ein einheitliches Objektkoordinatensystem ermöglicht. Alternativ dazu gibt es jedoch auch Verfahren, die ohne Verknüpfungspunkte auskommen. Näheres dazu wird in Kapitel 2.5 erläutert.

### 2.2 Verfahren der Distanzmessung

Die Distanzmessung erfolgt bei den meisten Geräten nach dem Prinzip der optischen Impulslaufzeitmessung (*Time of Flight*). Wie der Name schon sagt, wird die Laufzeit  $t$  eines Laserimpulses (über die doppelte Strecke) gemessen, woraus durch Multiplikation mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  die Distanz  $D$  gemäß Gl. (2-1) bestimmt werden kann [Niemeier und Wild, 1995]:

$$D = \frac{c \cdot t}{2} \tag{2-1}$$

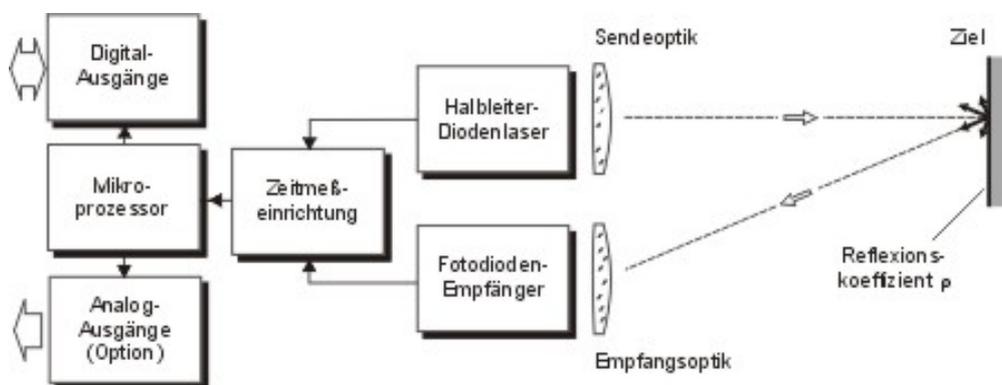


Abb. 2-3: Prinzip der optischen Impulslaufzeitmessung (*Time of Flight*) [Riegl, 2003]

Abbildung 2-3 zeigt das Funktionsprinzip der optischen Impulslaufzeitmessung. Ein elektrischer Impulsgenerator steuert in periodischer Folge einen Halbleiter-Diodenlaser an. Dieser gibt daraufhin kurze Lichtimpulse ab, die durch die Sendeoptik gebündelt und als Sendesignal abgestrahlt werden. Über die Empfangsoptik gelangt ein Teil des vom Ziel reflektierten Signals auf eine Fotodiode, die ein entsprechendes Empfangssignal (Echo) liefert. Eine Auswerteeinrichtung misst nun das Zeitintervall  $t$  zwischen Sende- und Empfangsimpuls. Dieses wird mit einer quarzstabilisierten Taktfrequenz ausgezählt und der

errechnete Distanzwert wird dem geräteinternen Mikroprozessor zugeführt, der die weitere Aufbereitung der Messwerte für die Datenausgabe vornimmt [Riegl, 2003].

Ein anderes Verfahren zur Distanzmessung ist das Phasenvergleichsverfahren, das z.B. bei den Laserscanner-Systemen der Firma Zoller+Fröhlich angewandt wird [Zoller+Fröhlich, 2003]. Dabei wird die Phasendifferenz zwischen ausgesandtem und reflektiertem Signal ermittelt. Zum Einsatz kommen beispielsweise zwei verschiedene Wellenlängen, ein "Grobmaßstab" und ein "Feinmaßstab". Der Feinmaßstab liefert die Restphase mit hoher Genauigkeit, ist jedoch mehrdeutig. Der Grobmaßstab hingegen ist genau genug, um diese Mehrdeutigkeit aufzulösen. Im Vergleich zum Impulslaufzeitverfahren ist dieses Verfahren etwas genauer, jedoch ist das Signal-Rausch-Verhältnis ungünstiger und die Reichweite geringer, da die Kohärenz des Laserstrahls auf größeren Distanzen verloren geht [Niemeier und Wild, 1995].

Ein weiteres Verfahren ist das Triangulationsverfahren, welches z.B. bei Scannern der Firma MENSİ zum Einsatz kommt [MENSİ, 2003]. Das Gerät besitzt eine Basis, an deren einem Ende ein ausgesandter Laserstrahl von einem rotierenden Spiegel abgelenkt wird, und an deren anderem Ende sich eine CCD-(*Charged Coupled Device*)-Kamera befindet, welche die durch den Laserstrahl beleuchtete Fläche auf dem Objekt (*footprint*) aufnimmt. Durch ebenen Vorwärtsschnitt kann jeweils der 3D-Objektpunkt in einem lokalen ebenen Aufnahmekoordinatensystem bestimmt werden. Nach Vollendung eines solchen ebenen Scans dreht sich die Aufnahmeebene um einen inkrementellen Winkel weiter. Das Verfahren ist äußerst genau, besitzt jedoch je nach Gerät eine eher geringe Reichweite (z.B. MENSİ-Scanner < 25m).

### **2.3 Reflexion an Oberflächen**

Neben der Laufzeit des Signals wird auch dessen Stärke an der Empfängereinrichtung registriert. Diese entspricht dem bereits erwähnten Intensitätswert, der (bei konstanter Wellenlänge des Lasers) neben dem Einfallswinkel und der Distanz von den Reflexionseigenschaften des reflektierenden Materials abhängig ist. Dieser Abschnitt bietet eine kurze Übersicht über die Reflexion an (idealisierten) Oberflächen.

Für die diffuse Reflexion (Abb. 2-4a) wird oft der Lambert'sche Reflektor als Referenzmodell herangezogen. Solche Reflektoren weisen eine (verglichen mit der Wellenlänge des Strahls) raue Oberfläche auf und reflektieren das Licht gemäß dem Lambert'schen Cosinus-Gesetz (vgl. [Kraus und Schneider, 1988]). Je nach Absorptionseigenschaften des Materials kann der sogenannte diffuse Reflexionskoeffizient  $\rho$  zwischen 0 und 1 (bzw. 0% und 100%) betragen.

Bei spiegelähnlich reflektierenden (Abb. 2-4b) oder retroreflektierenden Zielen (Abb. 2-4c) kann der (theoretische) Wert von  $\rho$  den diffusen Maximalwert von 100% bei weitem überschreiten. Für die zur Signalisierung von Verknüpfungspunkten verwendete retroreflektierende Folie der Firma Rieggl beträgt dieser Wert (bei einer Wellenlänge von etwa  $0.9 \mu\text{m}$ ) beispielsweise 1250% [Rieggl, 2003]. Allerdings ist zu beachten, dass auch andere Oberflächen wie Verkehrsschilder oder Kfz-Kennzeichen über retroreflektive Eigenschaften verfügen.

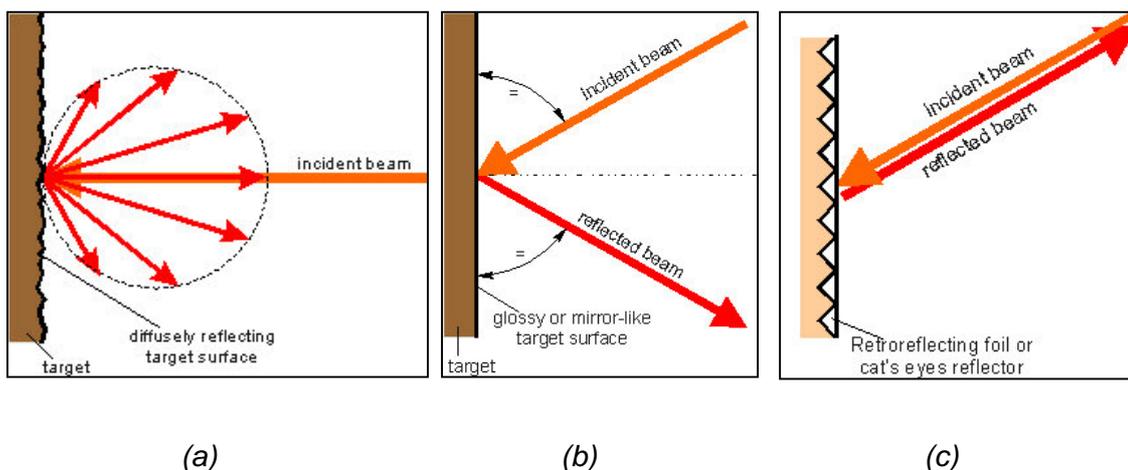


Abb. 2-4: Diffuse Reflexion (a), spiegelähnliche Reflexion (b), Retroreflexion (c) [Rieggl, 2003]

Diffuse und spiegelähnliche Reflexion sind Idealfälle der Reflexion. Reale natürliche Reflektoren besitzen sowohl einen Anteil an diffuser als auch an gerichteter Reflexion.

## 2.4 Der Laserscanner RIEGL LMS-Z360

Nach den bisher allgemeinen Grundlagen folgt nun ein Abschnitt über einen konkreten terrestrischen Laserscanner, nämlich dem LMS-Z360 der Firma Rieggl. Dieses Gerät wurde zur Erfassung der Messdaten verwendet, die der Diplomarbeit zugrunde liegen. Auch auf die dazugehörige Software 3D-RiScan wird eingegangen.

### 2.4.1 Aufbau und Funktionsweise

Der Laserscanner RIEGL LMS-Z360 (Abb. 2-5) besteht aus einem festen (unteren) und einem drehbaren (oberen) Teil. Um eine hohe Messrate erzielen zu können, erfolgt die

vertikale<sup>1</sup> Ausrichtung des Laserstrahls durch optomechanische Ablenkung (siehe dazu Abb. 2-6), d.h. der von der Strahlungsquelle (1) ausgesandte Strahl (2) wird durch einen kontinuierlich oszillierenden bzw. rotierenden Polygonspiegel (3) in die jeweilige Richtung abgelenkt. Der Vertikalwinkel ergibt sich aus dem Ablenkwinkel  $\theta$ . Pro Sekunde können bis zu 20 vertikale (*line*-)Scans durchgeführt werden. Der im Vergleich dazu deutlich langsamere horizontale Scan (*frame scan*) erfolgt durch Rotation des beweglichen Gehäuseteils (4), der Zeilenablenkeinrichtung sowie Teilen des Distanzmessers (1).



Abb. 2-5: RIEGL LMS-Z360 [Riegl, 2003]

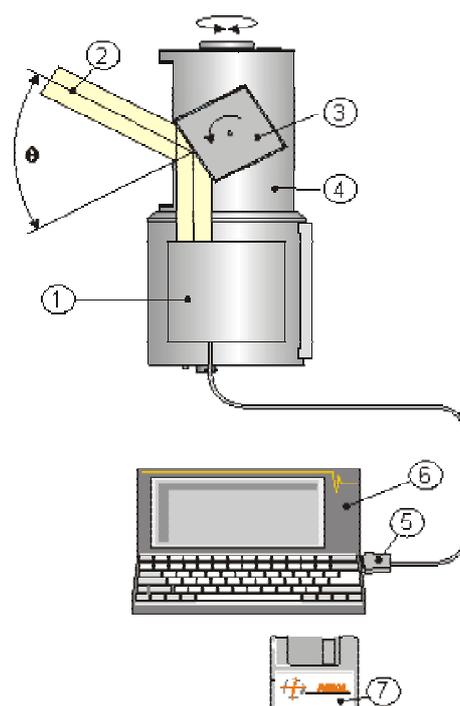


Abb. 2-6: Komponenten des Messsystems, siehe Text [Riegl, 2003]

Der Messbereich für den vertikalen Winkel ist aufgrund des optomechanischen Prinzips eingeschränkt und beträgt bei diesem System 90° (siehe Abbildung 2-7, links). Bei langsamen Scan-Raten und/oder kleinen Winkelbereichen oszilliert der Spiegel linear auf und ab, bei schnellen Scan-Raten und/oder Winkelbereichen nahe bei 90° rotiert hingegen der Spiegel gleichmäßig [Riegl, 2003]. Die minimal einstellbare Schrittweite für den Vertikalwinkel beträgt 0.01°, er kann auf 0.002° aufgelöst werden (siehe Tab. 2-1). Der horizontale Scan-Bereich beträgt volle 360°. Die minimale Schrittweite für den Horizontalwinkel

<sup>1</sup> Der Begriff "vertikal" bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Längsachse des Geräts, die nicht unbedingt lotrecht sein muss (siehe Ende dieses Abschnitts), entsprechend ist mit "horizontal" "orthogonal auf die Längsachse des Geräts" gemeint.

beträgt ebenfalls 0.01°, dessen Auflösung weist mit 0.0025° einen geringfügig höheren Wert als beim Vertikalwinkel auf. Über eine Schnittstelle (5) werden die Messdaten (Winkeln, Distanz, Intensität, RGB-Farbwert) auf einen PC oder Laptop (6) übertragen, wo sie mit Hilfe der Software 3D-RiScan (7) in Form von Entfernungsbild, Intensitätsbild oder Echtfarbenbild visualisiert werden können. Diese Software ermöglicht neben der Darstellung der Messdaten außerdem auch die Aufnahmesteuerung des terrestrischen Laserscanners (z.B. Auswahl des zu scannenden Bereichs, Schrittweite, etc.).

Abb. 2-7 zeigt die Dimensionen und die Scan-Bereiche des Geräts sowie die strichpunktierten Achsen, die das sensoreigene Koordinatensystem definieren (vgl. Abb. 2-12 in Kap. 2.4.2). Für Aufnahmen in Zenitnähe lässt sich das Scannergehäuse um 90° umlegen. Das Gewicht des Scanners beträgt ca. 13kg.

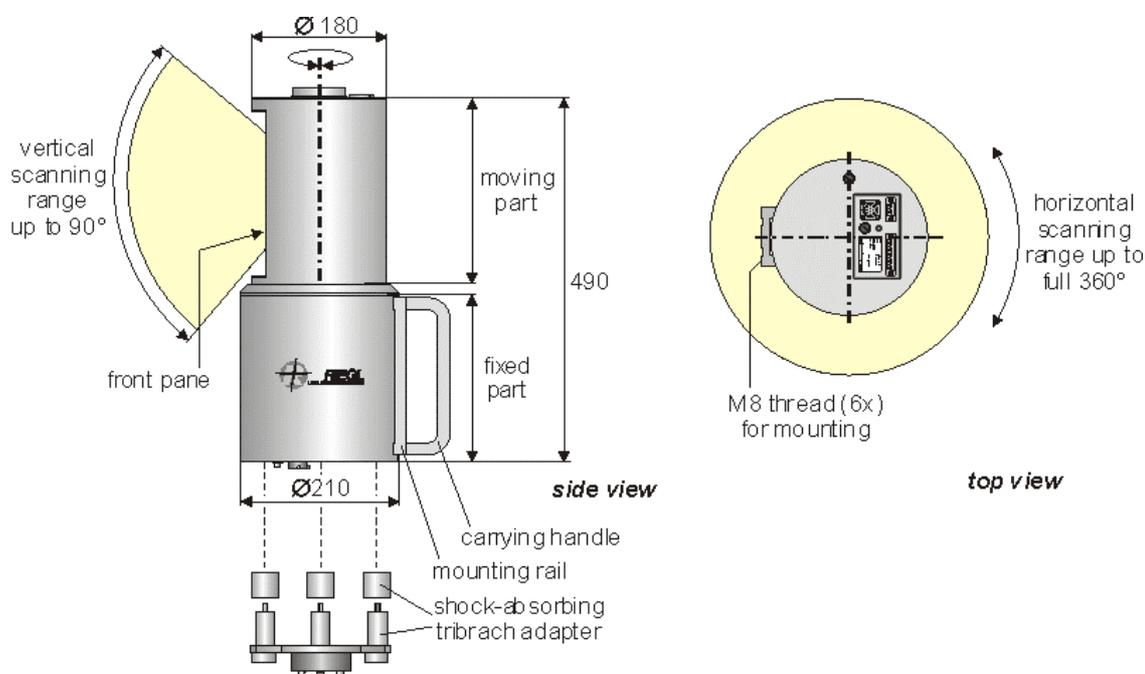


Abb. 2-7: Dimensionen und Scan-Bereiche des Laserscanners LMS-Z360 der Firma Riegl [Riegl, 2003]

Scanner:		
	Vertikaler ( <i>line-</i> ) Scan	Horizontaler ( <i>frame-</i> ) Scan
Scan-Bereich	bis zu 90°	bis zu 360°
Scan-Mechanismus	rotierender/oszillierender Spiegel	rotierendes Scanner-Gehäuse
Scan-Rate	1 Scan/Sek. bis 20 Scans/Sek. bei max. Scan-Bereich (90°)	0.01°/Sek. to 15°/Sek.
Minimale Winkelschrittweite	0.01°	0.01°
Winkelauflösung	0.002°	0.0025°

Tab. 2-1: Technische Daten des Laserscanners RIEGL LMS-Z360 [RIEGL, 2003]

Die Distanzmessung erfolgt bei diesem System nach dem bereits erwähnten Pulslaufzeitverfahren (Kap. 2.2). Der Laser des LMS-Z360, dessen Wellenlänge im nahen Infrarotbereich liegt, hat eine Strahldivergenz von 2mrad, d.h. bei einer Entfernung von 10m beträgt der Durchmesser des Laserstrahls 2cm. Der Entfernungsmessbereich liegt zwischen 1m und 60 bis 200m (je nach Reflexionseigenschaften des Ziels (siehe Tab. 2-2)). Die Genauigkeit einer einzelnen Messung liegt bei  $\pm 12\text{mm}$ . Die maximal erreichbare Messrate des Distanzmessgeräts liegt bei 12,000 Punkten pro Sekunde.

Die technischen Daten des Distanzmessgeräts sind in der Tabelle 2-2 zusammengefasst.

<b>Distanzmesser (Rangefinder):</b>	
Reichweite für natürliche Ziele, $\rho \geq 80\%$ für natürliche Ziele, $\rho \geq 10\%$	bis zu 200m bis zu 60m
Minimale Distanz	1m
Messgenauigkeit	typ. $\pm 6\text{mm}$ (gemittelt) typ. $\pm 12\text{mm}$ (Einzelmessung)
Messauflösung	5mm
Messrate	bis zu 12,000 Pkte/Sek. bei niedriger Scan-Rate (oszillierender Spiegel) bis zu 8,000 Pkte/Sek. bei hoher Scan-Rate (rotierender Spiegel)
Laser-Wellenlänge	nahes Infrarot
Strahldivergenz	2mrad

Tab. 2-2: Technische Daten des Distanzmessgeräts [RIEGL, 2003]

Wie bereits erwähnt, heben sich die registrierten Intensitätswerte an den Stellen der retroreflektierenden Zielmarken im Intensitätsbild deutlich von der Umgebung ab (Abb. 2-8).



Abb. 2-8: Ausschnitt eines Intensitätsbildes mit (in der Realität) quadratischen retroreflektierenden Zielmarken

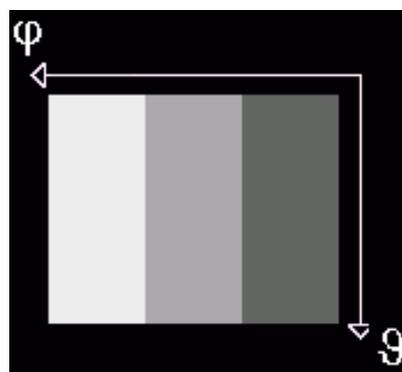


Abb. 2-9: Inhomogene Energieverteilung des Laserstrahls mit drei Balken unterschiedlicher Empfindlichkeit

Jedoch ergibt sich – wie bereits in [Rottensteiner G., 2000] erwähnt – aufgrund der inhomogenen Intensitätsverteilung des Messstrahls (Abb. 2-9), die wegen der Optimierung des LMS-Z360 für große Entfernungen notwendig ist, ein Intensitätsbild, das im Bereich der Retroreflektoren eine Art Schweif in eine horizontale Richtung (quer zur Längsachse des Geräts) aufweist (Abb. 2-8). Das tatsächliche Intensitätsbild resultiert also quasi aus einer (entfernungsabhängigen) Faltung des (theoretisch korrekten) Intensitätsbildes mit einem kleinen Bild, das die Verteilung der Strahlungsintensität des Lasers (drei Balken in Richtung des Vertikalwinkels  $\zeta$ ) beschreibt.

### 2.4.2 Die Software 3D-RiScan

3D-RiScan ist die Begleit-Software der Firma Riegler zu ihren Laserscanner-Systemen. Sie erlaubt – wie bereits kurz erwähnt – einerseits die Definition der Aufnahmeparameter (z.B. Schrittweite, Scan-Bereich), andererseits die numerische Anzeige und Visualisierung der Messdaten einer Aufnahme. Außerdem verfügt 3D-RiScan über die Möglichkeit, bereits im Feld die Aufnahmen jeweils paarweise über signalisierte Verknüpfungspunkte zueinander zu orientieren, d.h. in ein einheitliches globales Koordinatensystem zu transformieren (Allerdings handelt es sich dabei nicht um eine strenge simultane Ausgleichung aller Aufnahmen, wie sie in Kap. 2.5 vorgeschlagen wird). Das erleichtert natürlich die Datenerfassung, da schon im Feld erkennbar ist, wo es noch Datenlücken gibt und an welchen Stellen daher noch weitere Aufnahmen notwendig sind, damit das aufzunehmende Objekt möglichst vollständig erfasst werden kann. Die Verknüpfung zweier Aufnahmen basiert auf der Identifizierung von zumindest vier identen Punkten [Riegler, 2003]. Dies erfolgt durch automatisches Auffinden der signalisierten Ziele und Berechnung einer besten Übereinstimmung der gefundenen Verknüpfungspunkte, wobei auch Qualitätsinformationen zur ermittelten Lösung von 3D-RiScan bereitgestellt wird [Riegler, 2003].

In dieser Arbeit werden die von 3D-RiScan ermittelten Transformationsparameter jedoch nicht verwendet. Aus geodätischer Sicht ist nämlich eine simultane Kleinste-Quadrate-Ausgleichung mit Angabe von Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsmaßen zu bevorzugen. Außerdem stehen für diese Arbeit neben den Laserscanner-Aufnahmen auch Photos (von anderen Positionen aus) zur Verfügung, die ebenfalls zu orientieren sind. Hierfür wird das hybride Ausgleichungssystem ORIENT verwendet [ORIENT, 2003] (siehe Kap. 4.3).

Für diese Arbeit ist die Software 3D-RiScan ausschließlich für die Aufbereitung der Messdaten der einzelnen Aufnahmen von Interesse, d.h. die Organisation der Daten in Form einer Matrix und deren Visualisierung durch die anfangs erwähnten digitalen Bilder. Die Daten einer Aufnahme werden in einem binären Format (3DD-File) der Firma Riegler gespeichert. Durch Öffnen einer solchen 3DD-Datei in 3D-RiScan werden das farbkodierte Entfernungsbild, das monochromatische Intensitätsbild, und das Echtfarbenbild – i.a. ähn-

lich wie in Abb. 2-2 untereinander angeordnet – angezeigt. Stellen, an denen keine Distanz gemessen werden konnte (z.B. zu schwache Reflexion des Laserstrahls oder überhaupt kein Reflektor (Himmel)), werden im Entfernungsbild schwarz bzw. im Intensitätsbild blau dargestellt. Der Ursprung des Bildkoordinatensystems liegt in dem Mittelpunkt des rechten, oberen Eckpixels. Von dort aus zeigt die col-Achse (engl: *column*=Spalte) in Richtung des zunehmenden Vertikalwinkels und die row-Achse (engl: *row*=Zeile) in Richtung des zunehmenden Horizontalwinkels (Abb. 2-11). Den Zeilen der Matrix (die im Bild jedoch vertikal dargestellt werden) entsprechen somit die vertikalen (line) Scans.

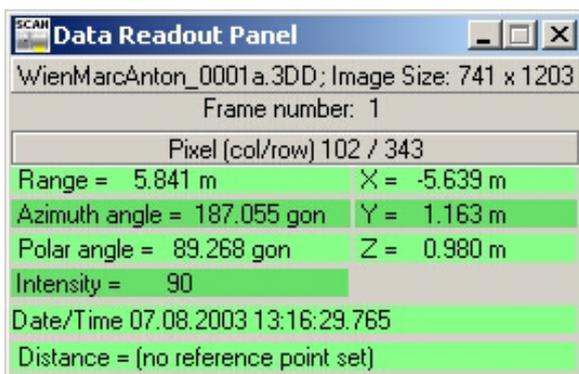


Abb. 2-10: Anzeige der Messdaten und der daraus berechneten lokalen kartesischen Sensorkoordinaten

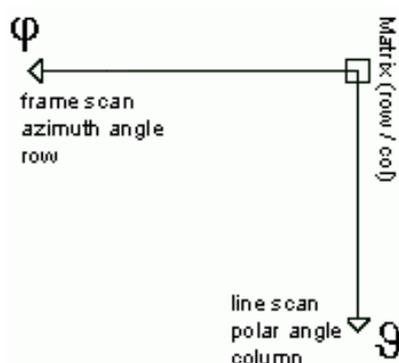


Abb. 2-11: Bildkoordinatensystem von Entfernung-, Intensitäts-, bzw. RGB-Bild

Durch Bewegung des Mauszeigers über die Bildelemente kann man sich im sogenannten *Data Readout Panel* (Abb. 2-10) für jede Position die Messungen (Distanz, Winkeln, Intensität) anzeigen lassen kann. Durch Laden eines SOP-Files (*Scanner Orientation and Position File*), welches die Drehung und die Position des lokalen Sensorkoordinatensystems (Abb. 2-12) im übergeordneten Koordinatensystem beschreibt, könnte man diesem Fenster auch zusätzlich die globalen kartesischen Koordinaten des entsprechenden Punktes entnehmen. Steht kein SOP-File zur Verfügung, werden die lokalen kartesischen Koordinaten angezeigt (wie in Abb. 2-10).

Die drei digitalen Bilder können jeweils als Bitmap- (\*.BMP) oder als JPG-File abgespeichert werden, wovon bei dieser Arbeit Gebrauch gemacht wurde. Die Daten lassen sich neben der Visualisierung als Bilder auch in Form einer Rohdatentabelle betrachten.

3D-RiScan verfügt noch über einige weitere – hier nicht benötigte – Funktionen, welche vor allem die Selektion von Daten nach bestimmten Kriterien betreffen. Außerdem ist es möglich, das 3DD-File als Punktwolke in mehrere Dateiformate zu exportieren.

In Zukunft wird es im Rahmen der neuen Version RiScan-Pro möglich sein, ganze Projekte, bestehend aus mehreren Laserscanner-Aufnahmen und Bilder von einer aufgesetzten

Kamera, zu verwalten. Außerdem wird auch eine strenge simultane Ausgleichung aller Aufnahmen nach der Methode der kleinsten Quadrate verfügbar sein.

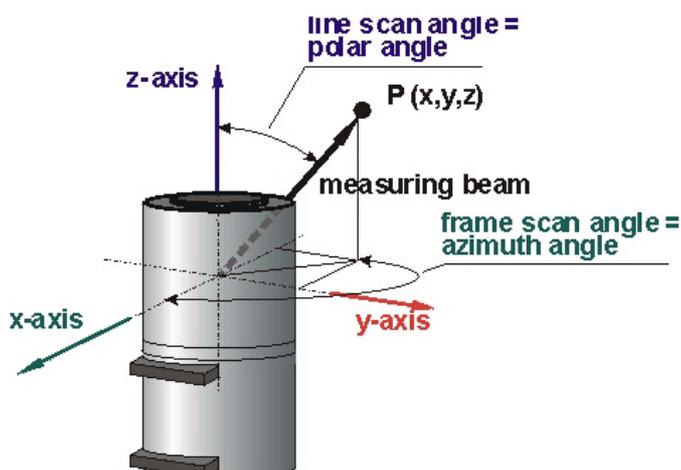


Abb. 2-12: Das sensoreigene Koordinatensystem des RIEGL LMS-Z360 [Riegl, 2002]

## 2.5 Orientierung mehrerer Laserscanner-Aufnahmen

Wie bereits erwähnt, befindet sich jede von einer Laserscanner-Aufnahme gelieferte Punktwolke zunächst in einem lokalen Sensorkoordinatensystem (Abb. 2-12). Sind mehrere Aufnahmen von einem Objekt vorhanden, ist es notwendig, diese zu orientieren, d.h. in ein gemeinsames übergeordnetes Koordinatensystem zu transformieren.

Die Orientierung erfolgt entweder mit Hilfe von Verknüpfungspunkten oder durch iterative Verfahren wie z.B. den ICP-Algorithmus.

### 2.5.1 Orientierung mit Hilfe von Verknüpfungspunkten

Die Strategie ist hierbei der Photogrammetrie ähnlich: Die Orientierung der Aufnahmen erfolgt durch die nachträgliche Messung von einzelnen gut definierten, meist signalisierten Verknüpfungspunkten in den Bildern (in diesem Fall in den Intensitätsbildern).

Für jede Aufnahme sind in Bezug auf das übergeordnete XYZ-System die 3 Standpunktskoordinaten (Ursprung des jeweiligen Sensor-Koordinatensystems) und die 3 Drehwinkel zu bestimmen. Im Gegensatz zur Tachymetrie ist das Gerät nämlich bei einer Aufnahme i.a. nicht streng horizontal, bei zenitnahen Aufnahmen ja sogar um etwa 90° umgelegt (Abb. 2-13).

Bei Vernachlässigung eines Maßstabfaktors (wenn also der Maßstab der Laserdistanzmessung ohne Anpassung an ein anderes System direkt verwendet wird) hat man pro Aufnahme jeweils 6 Unbekannte. Es handelt sich also jeweils um eine räumliche Ähnlichkeitstransformation (allerdings ohne Maßstabfaktor). Über 3 idente Punkte könnten diese

6 Parameter (mit bereits leichter Redundanz) bestimmt werden. Jedoch zielt man in der Praxis auf eine höhere Überbestimmung ab. In der Regel sollten zumindest 4 idente Punkte pro Aufnahme vorhanden sein.

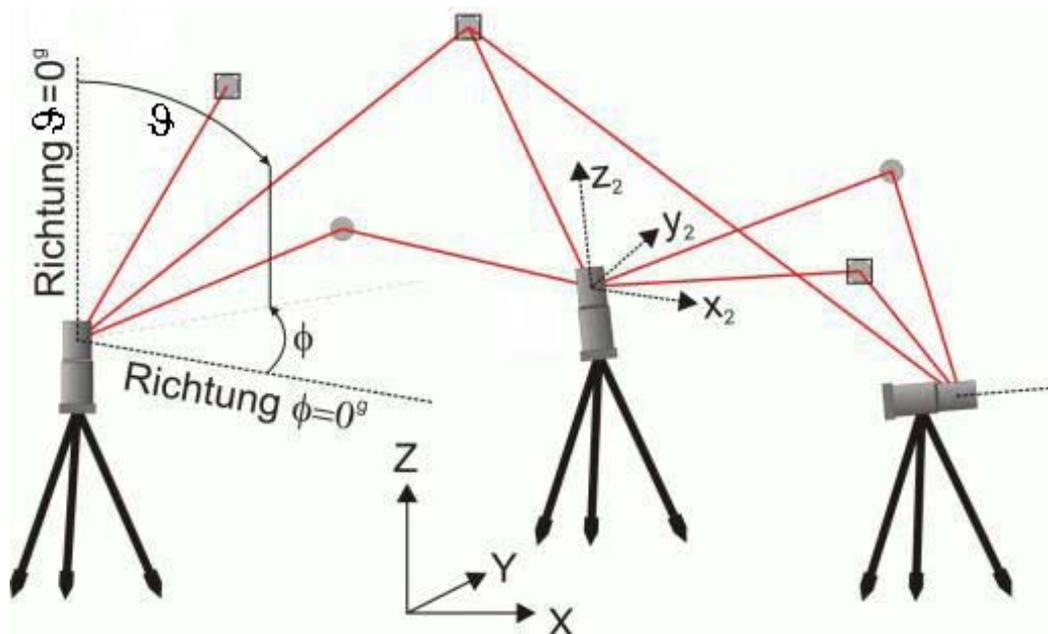


Abb. 2-13: Transformation mehrerer Laserscanner-Aufnahmen in ein einheitliches XYZ-System mit Hilfe von Verknüpfungspunkten (nach [Pfeifer und Rottensteiner, 2001])

Die Verknüpfung der Aufnahmen erfolgt durch eine verkettete räumliche Ähnlichkeits-Transformation [Pfeifer und Rottensteiner, 2001], wobei "verkettet" bedeutet, dass nicht jede Aufnahme einzeln und unabhängig voneinander transformiert wird, sondern alle Aufnahmen unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate in einem Guss ausgeglichen werden. Somit können umfassende Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsmaße berechnet werden. Außerdem lassen sich über die Verknüpfungspunkte auch Beobachtungen in Photos in die Ausgleichung miteinbeziehen, indem man einfach die entsprechenden Beobachtungsgleichungen hinzufügt. Man spricht dann von einer hybriden Ausgleichung (siehe Kap. 4.3).

### 2.5.2 Orientierung mit Hilfe des ICP-Algorithmus

Eine andere Möglichkeit, die Laserscanner-Aufnahmen zueinander zu orientieren, ist die Anwendung des sogenannten ICP-Algorithmus (*Iterative Closest Point Algorithm*) auf die jeweils im lokalen System vorhandenen Punktwolken. Dabei werden keine Verknüpfungspunkte benötigt. Die Orientierung der Aufnahmen – in der Literatur auch oft als Registrierung bezeichnet – wird nämlich nicht über einzelne Punkte ermittelt, sondern über die Punktwolken selbst.

Ablauf des ICP-Algorithmus [Besl und McKay, 1992]:

- (1) Jedem Punkt  $\mathbf{p}_i$  der zu orientierenden Punktwolke wird jeweils jener Punkt  $\mathbf{x}_i$  der Referenz-Punktwolke zugeordnet, welcher die kürzeste euklidische Distanz zu ihm aufweist.
- (2) Die Transformationsparameter (Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  und Translationsvektor  $\mathbf{d}$ ) werden so bestimmt, dass die Quadratsumme der Distanzen zwischen den  $N_p$  korrespondierenden Punktpaaren zum Minimum wird.

$$f(\mathbf{R}, \mathbf{d}) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}_i - \mathbf{d}\|^2 \rightarrow \text{Min.} \quad (2-2)$$

- (3) Die Transformation wird mit den in (2) ermittelten Transformationsparametern auf die zu orientierende Punktwolke angewendet.

Die Schritte (1) bis (3) erfolgen iterativ.

- (4) Der Algorithmus wird abgebrochen, falls sich der mittlere quadratische Fehler (die in (2) berechnete Quadratsumme dividiert durch die Anzahl  $N_p$  der Punktpaare) von jenem der vorhergehenden Iteration um weniger als ein vorgegebener  $\epsilon$ -Toleranzwert unterscheidet.

Die Drehmatrix, die bekanntlich drei Orthogonalitäts- und drei Normierungsbedingungen erfüllen muss [Kraus, 1997], wird für die Lösung der obigen Extremwertaufgabe besser als Einheitsquaternion  $\mathbf{q}_R = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$  mit  $q_0 \geq 0$  und  $\|\mathbf{q}_R\| = 1$  beschrieben.

Die Drehmatrix lautet dann:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

Das optimale Einheitsquaternion  $\mathbf{q}_R = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$  (also die optimale Drehung) ergibt sich als normierter Eigenvektor zum größten Eigenwert einer symmetrischen  $4 \times 4$ -Matrix. Der optimale Translationsvektor verschiebt den Schwerpunkt der mit der optimalen Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  gedrehten Punkte  $\mathbf{p}_i$  in den Schwerpunkt der Punkte  $\mathbf{x}_i$ .

Es lässt sich beweisen, dass die Zielfunktion (minimaler mittlerer quadratischer Fehler) von Iteration zu Iteration monoton fällt und gegen ein lokales Minimum konvergiert, wobei etwa 30 bis 50 Iterationen zu guten Resultaten führen [Besl und McKay, 1992].

Der Algorithmus braucht hinreichend gute Näherungswerte, damit er gegen das gewünschte globale Minimum konvergiert.

Jedoch hat der ICP-Algorithmus in seiner ursprünglichen Form zwei entscheidende Nachteile [Pottmann et al., 2001]:

- (1) Es wird implizit angenommen, dass eine der Punktwolken eine Teilmenge der anderen ist. Die Existenz von Punkten, die keinen entsprechenden Punkt in der anderen Punktwolke haben, führt zu falschen Zuordnungen.
- (2) Der ICP-Algorithmus ist ein Ansatz für zwei Punktwolken und ist nicht direkt auf mehrere Punktwolken erweiterbar. Dessen aufeinanderfolgende paarweise Anwendung führt zu einer Akkumulation von Orientierungsfehlern, sodass manche Punktwolken nur sehr schlecht orientiert werden können.

Inzwischen existieren modifizierte ICP-Algorithmen und auch zahlreiche andere Ansätze, die eine simultane Orientierung mehrerer Punktwolken ermöglichen, z.B. mittels kinematischer Analyse [Pottmann et al., 2001].

### 3 Aufnahme der Marc-Anton-Plastik

Dieses Kapitel beginnt mit einer kurzen Beschreibung des aufgenommenen Objekts. Anschließend folgt ein Abschnitt über die Datenerfassung. Dabei wird die zu dem in Kapitel 2 beschriebenen Laserscanner zusätzlich eingesetzte digitale Kamera vorgestellt. Des Weiteren wird auf die für die Vermessung des Objekts verwendete Aufnahmekonfiguration eingegangen.

#### 3.1 Charakteristika des aufzunehmenden Objekts

Die Marc-Anton-Plastik (genauer: Marc-Anton-Gruppe [Czeike, 1974]) befindet sich in der Gartenanlage neben dem Gebäude der Wiener Secession. Sie zeigt den römischen Feldherrn und Staatsmann Marcus Antonius, in einem Streitwagen sitzend, gezogen von einem aus 3 Löwen bestehenden Löwengespann (Abb. 3-1, links). Ein vierter Löwe befindet sich rechts hinter dem Wagen (Abb. 3-1, rechts). Das Objekt besteht aus einem etwa 5m langen, 2.5m breiten, und 0.8m hohen Sockel, und der eigentlichen Bronzeplastik. Der höchste Punkt (Kopf des Marc Anton) befindet sich etwa 3m über dem Boden.



Abb. 3-1: Marc-Anton-Plastik bei der Wiener Secession

Aus geometrischer Sicht ist diese Plastik ein ziemlich komplexes Objekt, dessen Oberfläche durch eine einfache analytische Fläche (wie z.B. Ebene, Zylinderfläche, Kegelfläche, Kugelfläche) nicht beschreibbar ist. Das Objekt lässt sich auch nicht aus einigen wenigen Primitiven zusammensetzen. Die Oberfläche weist einige Stellen mit feinen Strukturen auf, vor allem die Mähne des mittleren Löwen, die Falten in der Kleidung des Marc Anton, oder dessen Kopf. Auch Löcher, wie beispielsweise zwischen den Speichen der Räder erhöhen die Komplexität des Objekts. Sehr komplex und ohne enormen Aufwand nicht erfassbar sind die Bereiche zwischen bzw. unter dem Löwengespann, wo sich auch das Gestänge befindet, und insbesondere der Bereich zwischen den Rädern.

Der Sockel kann für die meisten Anwendungen durch Ebenen angenähert und modelliert werden. Er könnte daher auch durch tachymetrische Aufnahme der Eckpunkte erfasst werden.

Für die Aufnahme der komplexen Plastik müssen hingegen Methoden angewandt werden, die eine große Anzahl von Punkten auf der Objektoberfläche liefern, um das Objekt detailliert beschreiben zu können. Solche Methoden sind Photogrammetrie und Laserscanning. Laserscanning alleine liefert unabhängig von der Textur des Objekts und den natürlichen Beleuchtungsverhältnissen eine hohe Punktdichte auf der Objektoberfläche, jedoch eben keine Textur. Bei Einsatz der Photogrammetrie wird die Textur in hoher Auflösung registriert, jedoch ist man bei der geometrischen Rekonstruktion des Objekts von der Textur abhängig. Bei Kombination der beiden Technologien können deren Stärken vereinigt werden.

### 3.2 Datenerfassung

Für die Aufnahme des Objekts wurden sowohl der bereits vorgestellte terrestrische Laserscanner RIEGL LMS-Z360 (siehe Kap. 2.2) als auch die digitale Kamera Kodak Professional DCS 460c eingesetzt. Diese wurde noch nicht erwähnt und soll deshalb am Beginn dieses Abschnitts als Ergänzung in aller Kürze vorgestellt werden.

#### 3.2.1 Die digitale Kamera Kodak Professional DCS 460c

Die digitale Kamera Kodak DCS 460c (Abb. 3-2) ist die Farbversion der Kodak DCS 460. Sie besitzt einen CCD-(*Charged Coupled Device*-)Flächensensor mit 3072x2048 Bildelementen (Pixel). Die Größe des Sensors beträgt 27.6x18.4mm<sup>2</sup> [Kodak, 2003], d.h. die Pixelgröße liegt bei etwa 9x9µm<sup>2</sup>. Vor dem Sensor befinden sich Rot-, Grün-, und Blaufilter, die gemäß Abb. 3-3 angeordnet sind. Aus der Abbildung 3-3 ist ersichtlich, dass 50% der Bildelemente für den grünen Farbwert und jeweils 25% für den Rot- bzw. Blauwert empfindlich sind.



Abb. 3-2: Kodak DCS 460c [Kodak, 2003]

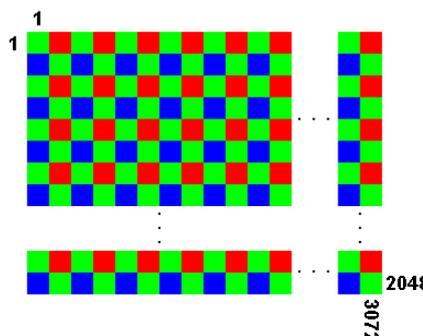


Abb. 3-3: Schematischer Aufbau des Farbfilters bei der Kodak DCS 460c

Mit Hilfe eines Programms kann man eine DCS-Originaldatei in eine RGB-TIFF-Datei konvertieren. Die Bildelemente dieser Datei erhalten ihre RGB-Werte durch Farbbinterpolation, wodurch die Dimension des digitalen Bildes (3060 x 2036 Pixel) letztendlich etwas kleiner ist als jene des Sensors.

### 3.2.2 Aufnahmekonfiguration

Um sowohl das Objekt als auch die in der Umgebung befindlichen signalisierten Verknüpfungspunkte mit der DCS 460c erfassen zu können, wurde eine 28mm-Linse verwendet, was einer Pixelgröße auf dem Objekt von ca. 1/3000 der (variablen) Aufnahmeentfernung entspricht (bei einer Entfernung von beispielsweise 5m beträgt die Pixelgröße also ca. 1.7mm).

Insgesamt wurden 22 Photos aufgenommen und 10 Laserscanner-Standpunkte ausgewählt, wobei pro Standpunkt jeweils sowohl ein 360°-Panorama-Scan (mit dem maximal möglichen vertikalen Scan-Bereich von 90°) als auch ein Detail-Scan (mit variablem, jeweils angepasstem Scan-Bereich) des Objekts durchgeführt wurde. Die Panorama-Scans, bei denen auch jeweils mehrere Verknüpfungspunkte in der Peripherie aufgenommen wurden, dienten dabei vorwiegend zur Stabilisierung der Orientierung, und erfolgten mit einer groben Auflösung: Ihre Schrittweite beträgt 0.2° (ca. 222mgon), was bei einer Entfernung von 5m einem Punktabstand auf dem Objekt von ca. 17mm entspricht. Die Detail-Scans weisen eine Schrittweite von 0.05° (ca. 56mgon) auf, was bei gleicher Entfernung ca. 4mm auf dem Objekt entspricht (vgl. Abb. 3-4).



*Abb. 3-4: Ausschnitt aus dem RGB-Bild eines groben Panorama-Scans (links), des dazugehörigen feineren Detail-Scans (Mitte), und aus einem aus ca. gleicher Entfernung aufgenommenen Photo (rechts). Die Pixelgrößen auf dem Objekt verhalten sich etwa wie 10 : 2.5 : 1 (Photo=1).*

Die Aufnahmeanordnung ist in Abb. 3-5 dargestellt.

Um auch die höhergelegenen Teile der Objektoberfläche erfassen zu können, wurden 5 Photos von einer Leiter aufgenommen und für 2 Laserscanner-Standpunkte (#9 und #10

in Abb. 3-5) ein Hochstativ verwendet. Scan #10 wurde aus einer deutlich näheren Position aufgenommen (Abb. 3-5), um vor allem die Rücken der Löwen zu erfassen.

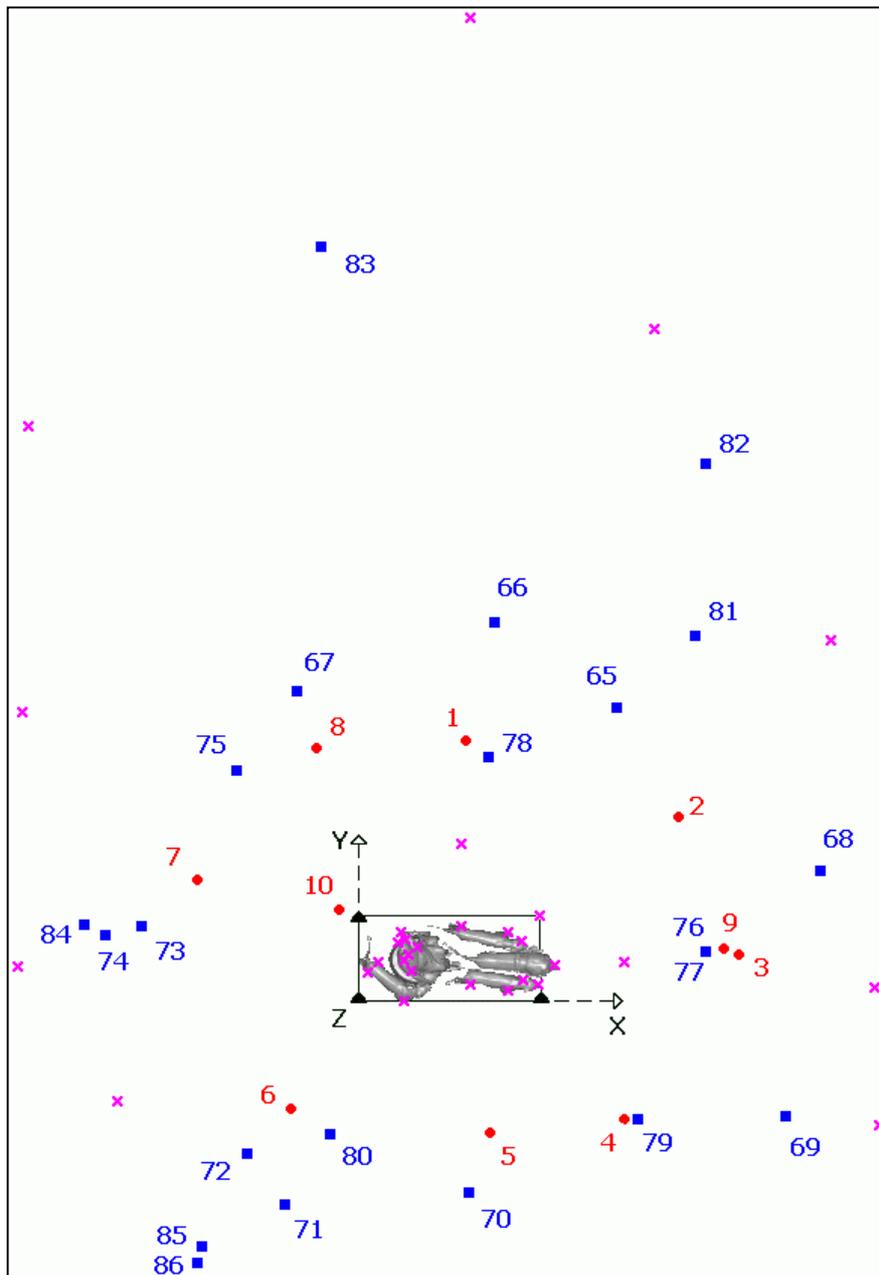


Abb. 3-5: Aufnahmeanordnung: Laserscanner-Standpunkte (rote Kreise), Projektionszentren der Photos (blaue Quadrate) und Verknüpfungspunkte (magenta Kreuze). Drei Eckpunkte des Sockels (schwarze Dreiecke) definieren das globale Objektkoordinatensystem (siehe Kap. 4.1).

Vor der Aufnahme wurden sowohl an dem Objekt als auch in dessen Umgebung insgesamt 29 Verknüpfungspunkte signalisiert. Darunter waren 18 quadratische retroreflektierende Folien (ca. 2x2cm<sup>2</sup>), die an der Plastik angebracht wurden. Für die restlichen 11 Punkte wurden retroreflektierende Zylinder (ca. 5cm Durchmesser und ca. 7cm Höhe) verwendet, die um das Objekt herum aufgestellt wurden. Dabei war zu beachten, dass

sowohl in jeder Laserscanner-Aufnahme als auch in jedem Photo zumindest 4 retroreflektierende Ziele erfasst werden, um eine gute Kontrolle für jede Aufnahme sicherzustellen. Das Signalisieren dauerte sowohl für die quadratischen als auch für die zylindrischen Reflektoren jeweils 10 Minuten.

Die Aufnahme der 22 Photos erfolgte innerhalb einer Stunde, während für die insgesamt 20 Scans etwa 2.5 Stunden benötigt wurden.

## 4 Orientierung der Laserscanner-Aufnahmen und der Photos

Dieses Kapitel befasst sich mit der gemeinsamen Orientierung der einzelnen Laserscanner-Aufnahmen und der Photos.

Zur Orientierung der Aufnahmen ist die Definition eines globalen Koordinatensystems notwendig. Außerdem müssen die Verknüpfungspunkte in den entsprechenden digitalen Bildern (in den Intensitätsbildern und den digitalen Photos) gemessen werden. Danach folgt ein Abschnitt über die hybride Ausgleichung der Beobachtungen. Das Kapitel endet mit einer Analyse der Ausgleichungsergebnisse.

### 4.1 Definition eines globalen Objektkoordinatensystems

Um das Objekt als Gesamtes modellieren zu können, müssen die einzelnen Aufnahmen (sowohl die des Laserscanners als auch die der Kamera) in ein einheitliches kartesisches Koordinatensystem transformiert werden. Falls hinreichend viele Passpunkte in einem bereits definierten übergeordneten Koordinatensystem (Landessystem) auf oder in der Nähe des Objekts vorhanden wären (z.B. nach Einmessung dieser Punkte durch GPS oder Tachymetrie), könnten die Aufnahmen über die koordinativ bekannten Punkte in dieses System gebracht werden. Jedoch stellt das Einmessen von Passpunkten einen zusätzlichen, sehr hohen Aufwand dar, und außerdem ist es oft gar nicht notwendig, dass das Objekt im Landeskoordinatensystem vorhanden ist.

Wenn also keine Passpunkte zur Verfügung stehen, muss ein solches übergeordnetes Objektkoordinatensystem erst festgelegt werden. In der Geodäsie spricht man von einer sogenannten Datumsfestlegung. Mit der Datumsfestlegung wird ein im 3D-Raum vorhandenes Beobachtungsnetz in einem räumlichen kartesischen Bezugssystem gelagert. Bei einer Datumsdefinition in einem Beobachtungsnetz aus Strahlenbündeln (Photos) und räumlichen Polarkoordinaten (Laserscanner) hat man i.a. 7 Freiheitsgrade, nämlich drei Translationen, drei Rotationen und einen Maßstabsfaktor. Wird der Maßstab – wie es hier der Fall ist – aus den Laserscanner-Beobachtungen übernommen, gibt es nur 6 Freiheitsgrade. Dies führt zu einem Rangdefekt  $d=6$  der Normalgleichungsmatrix, der auch als Datumsdefekt bezeichnet wird. Um diesen Datumsdefekt zu beheben, werden genauso viele (in diesem Fall also sechs) Datumparameter willkürlich festgelegt. Man spricht dann von einer zwangsfreien Ausgleichung. Im Fall terrestrischer Laserscanner-Aufnahmen wäre es beispielsweise denkbar, einen der Standpunkte zu wählen und das entsprechende lokale Sensorkoordinatensystem auch als globales Koordinatensystem zu verwenden.

Für die Modellierung dieses Objekts wurde das Objektkoordinatensystem jedoch dem Objekt angepasst: Die Achsen wurden so gewählt, dass die XY-Ebene der Sockeloberfläche entspricht und die Z-Achse orthogonal darauf in Richtung Zenit weist (vgl. Abb. 3-5). Dazu wurde der Ursprung in die rechte, hintere Ecke der rechtecksförmigen Sockeloberfläche gelegt (dadurch werden 3 Translationen festgelegt), die Richtung der x-Achse durch einen Punkt mit  $Y=Z=0$  an der rechten vorderen Ecke definiert (Festlegung von 2 Rotationen), und die XY-Ebene durch einen Punkt mit  $Z=0$  an der linken hinteren Ecke (Festlegung der 3. Rotation). Die restlichen Koordinatenwerte bleiben frei, d.h. sind im Rahmen der Ausgleichung erst zu bestimmen (zur Datumsfestlegung siehe Tab. 4-1).

	X	Y	Z
Ursprung	0	0	0
Punkt auf X-Achse	frei	0	0
Punkt in XY-Ebene	frei	frei	0

Tab. 4-1: Fingierte Koordinaten der Datumspunkte

## **4.2 Interaktive Messung der Verknüpfungspunkte in den Intensitätsbildern und in den Photos mit Hilfe des Programmsystems ORPHEUS**

Zunächst folgt eine kurze Vorstellung des verwendeten Programmsystems ORPHEUS. Anschließend wird auf die Besonderheiten bzw. Probleme bei der Messung der Verknüpfungspunkte in den Intensitätsbildern und in den Photos eingegangen.

### **4.2.1 Das Programmsystem ORPHEUS**

Das Programmsystem ORPHEUS (ORIENT Photogrammetric Engineering Utilities System) wurde auf dem I.P.F. entwickelt. Es stellt einerseits einen digitalen Mehrbild-Monokomparator dar, d.h. in mehreren Bildern können simultan und interaktiv Punkte bzw. Linien gemessen werden. Andererseits können diese Beobachtungen in ORPHEUS ausgeglichen werden. ORPHEUS setzt auf dem hybriden photogrammetrischen Ausgleichungssystem ORIENT auf und bietet die graphische Benutzeroberfläche dazu.

Die wichtigsten ORIENT-Module können über die graphische Oberfläche von ORPHEUS ausgeführt werden. Die (noch) nicht in ORPHEUS implementierten Module lassen sich über eine Kommandozeile durch Eingabe der entsprechenden ORIENT-Direktiven ausführen.

In dieser Arbeit wurde ORPHEUS einerseits für die interaktive Messung der Verknüpfungspunkte in den Photos und in den Intensitätsbildern der Laserscanner-Aufnahmen

verwendet, andererseits erfolgte mit Hilfe dieses Programmsystems auch die hybride Ausgleichung.

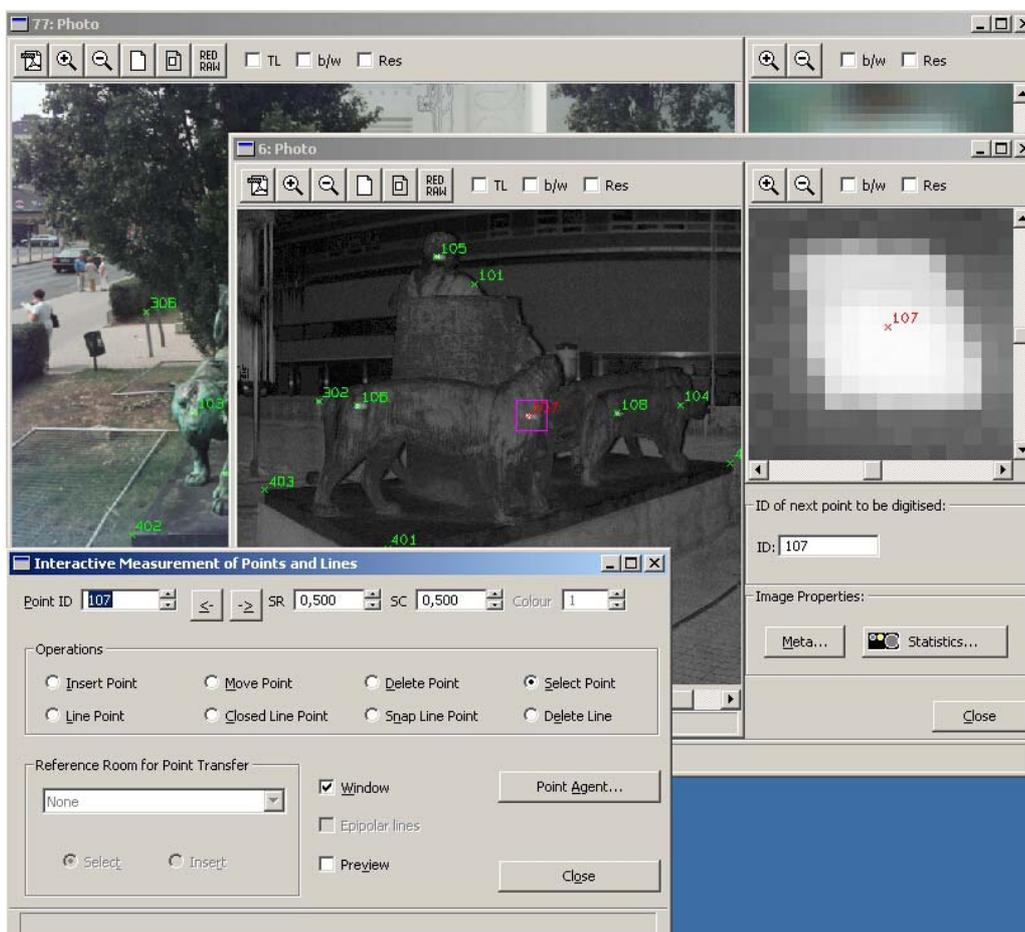


Abb. 4-1: Interaktive Messung der Bildkoordinaten in Photos und Intensitätsbildern mit Hilfe des Programmsystems ORPHEUS

Zur interaktiven Messung der Bildkoordinaten wird im sogenannten Photo Manager das gewünschte Bild ausgewählt, worauf ein Photo-Fenster geöffnet wird. Darin befindet sich ein großes Fenster mit dem entsprechenden digitalen Bild und in der rechten oberen Ecke ein kleines Fenster, welches einen Ausschnitt des Bildes enthält (siehe Abb. 4-1). In dem großen Bild befindet sich zusätzlich ein kleines Rechteck, das den Ausschnitt des kleinen Bildes definiert. Durch Klicken mit der mittleren Maustaste an eine Stelle im großen Bild wird dieser Bereich im kleinen Bild vergrößert dargestellt. Das große Fenster dient also als Überblicksfenster zum Auffinden der zu messenden Punkte, während im kleinen Fenster die Messung der Bildkoordinaten mit Sub-Pixel-Genauigkeit durchgeführt werden kann. Es ist möglich, mehrere dieser Photo-Fenster zu öffnen und gleichzeitig anzuzeigen. Das hat den Vorteil, dass man anhand der Bilder, in denen bereits gemessen wurde, die Punkte in den noch zu messenden Bildern leichter auffinden kann. Das gerade aktive

Photo-Fenster wird von einem Messfenster gesteuert, das die interaktive Messung von Punkten und Linien im Bild ermöglicht. Mit Hilfe dieses Messfensters können auch bereits gemessene Punkte hervorgehoben, versetzt oder auch gelöscht werden. Für jeden zu messenden Punkt muss zuerst eine Punktnummer angegeben werden bzw. wird diese automatisch um 1 erhöht. Einfacher jedoch ist es, ein Photo-Fenster mit bereits erfolgten Messungen als Referenz auszuwählen. Die bereits gemessenen Punkte werden dann automatisch in ansteigender Reihenfolge angezeigt und quasi zur Messung in den anderen Bildern "vorgeschlagen". Dies ist gerade bei größeren Projekten mit vielen Punkten sehr nützlich, weil dadurch Punktverwechslungen und Fehler aufgrund doppelt vergebenen Punktnummern vermieden werden können. Neben der Messung der Punkte (linke Maustaste) steht auch eine Lupenfunktion zum Ein- und Auszoomen zur Verfügung.

#### **4.2.2 Messung der Verknüpfungspunkte in den Intensitätsbildern**

Wie bereits erwähnt, gibt es insgesamt 10 Laserscanner-Standpunkte mit jeweils einem groben Panorama-Scan und dem Detail-Scan des Objekts. Die Definition des globalen Objektkoordinatensystems wurde in Kap. 4.1 erläutert. Die Orientierungen der Laserscanner-Aufnahmen (Standpunktskoordinaten und drei Drehwinkel) in Bezug auf dieses System können durch Messen der Verknüpfungspunkte und anschließender Ausgleichung bestimmt werden. Die Messung kann natürlich nicht – wie bei einem Tachymeter – durch direktes Anvisieren dieser Punkte erfolgen, sondern die Punkte müssen nachträglich in einem der digitalen Bilder gemessen werden. Am besten ist dies im Intensitätsbild möglich, da in diesem die mit Retroreflektoren signalisierten Punkte sehr gut zu erkennen sind. Jedem Pixel dieses Bildes ist ein Tripel von räumlichen Polarkoordinaten zugeordnet (zwei Winkel und die Distanz). Die Punkte können jedoch in den Bildern mit Sub-Pixel-Genauigkeit gemessen werden. Die Polarkoordinaten eines im Bild gemessenen Punktes lassen sich aus den umliegenden Bildelementen interpolieren (näheres dazu folgt in Kap. 4.3.2). In der für diese Arbeit verwendeten ORPHEUS-Version bestand noch nicht die Möglichkeit, die Intensitätsbilder mit den jeweiligen Laserscanner-Daten zu verknüpfen, da für Laserscanning noch kein eigenes Modul vorhanden war. Um trotzdem das interaktive Messwerkzeug in ORPHEUS nutzen zu können, werden die Intensitätsbilder als Photos importiert und in diesen die Bildkoordinaten der Punkte gemessen. Mit einem Hilfsprogramm können anschließend die durchgeführten Messungen dieser Bildkoordinaten durch Zugriff auf die Laserscanner-Daten und mit Hilfe lokaler Interpolationsmethoden in Polarbeobachtungen umgewandelt werden. Letztere stellen einen Beobachtungstyp in ORIENT dar und lassen sich somit in die Ausgleichung einbeziehen.

Um die Intensitätsbilder in das Programmsystem ORPHEUS importieren zu können, müssen diese im TIFF-Format vorliegen. Die mit dem Programm 3D-RiScan exportierten Intensitätsbilder müssen daher zuvor noch von dem Bitmap-Format in das TIFF-Format umgewandelt werden, wobei es günstig ist, die ziemlich großen 24-Bit-Bilder auf 8-Bit-Bilder zu reduzieren (dadurch geht lediglich der blau gekennzeichnete Bereich der Fehlmessungen verloren, was die Messung nicht weiter stört).

In Zukunft werden diese Schritte durch Weiterentwicklung von ORPHEUS jedoch nicht mehr notwendig sein.

Die Messung der Punkte in den Intensitätsbildern ist teilweise sehr schwierig, besonders bei den Panorama-Scans, die nur eine sehr grobe Auflösung aufweisen (Abb. 4-2). Wie in Kap. 3.2 erwähnt, beträgt für diese Scans die Pixelgröße auf dem Objekt (bei zum Laserstrahl paralleler Flächennormale) etwa 17x17mm. Die quadratischen Retroreflektoren haben eine Dimension von ca. 20x20mm, d.h. dass diese bei einer Entfernung von 5m auf 2x2 bis maximal 3x3 Bildelemente abgebildet werden, wobei auch Mischpixel auftreten, da der registrierte Intensitätswert für jedes Pixel einem Mittelwert des auf dem Objekt auftreffenden Laser-*footprints* entspricht (siehe Abb. 4-2,a und b).

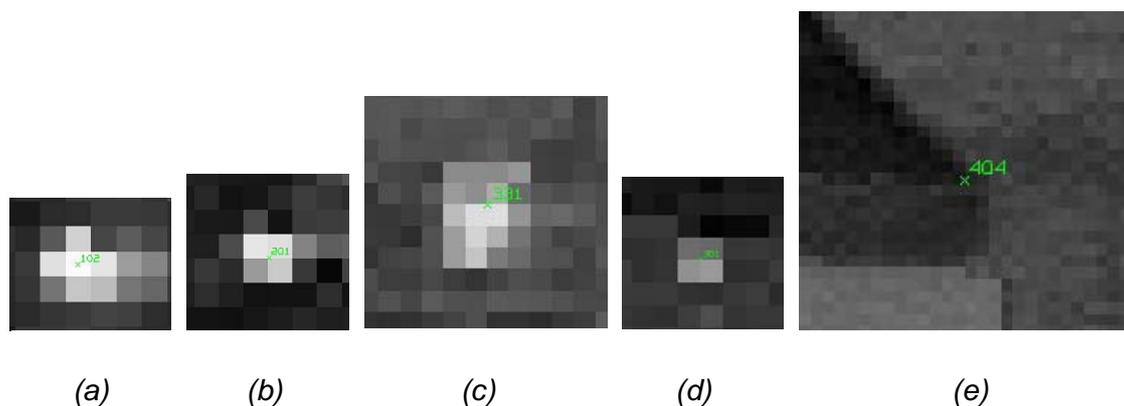


Abb. 4-2: Messung in den grob aufgelösten Panorama-Scan-Bildern: (a) und (b) sind Abbildungen von quadratischen Reflektoren, (c) und (d) die von zylindrischen Reflektoren, (e) zeigt den auftretenden Schleier an Kanten

Bei Punkten nahe an der Kontur sind die Verknüpfungspunkte kaum mehr zu identifizieren. Die zylinderförmigen Retroreflektoren sind zwar größer (Durchmesser ca. 50mm und Höhe ca. 70mm) und werden auch auf mehr Pixel abgebildet, jedoch befinden sich diese Zylinder auf dem Boden, was zu einem relativ hohen Zenitwinkel (deutlich über 100gon) führt. Der eigentliche Punkt (Mitte der Zylinderachse) ist daher beim Messen verhältnismäßig schwierig abzuschätzen (Abb. 4-2,c). Bei weit entfernten Punkten kann die Abbildung des Signals schon ziemlich schwach sein und überhaupt nur aus einigen Mischpixel bestehen (Abb. 4-2,d). Dazu kommt noch der in Kap. 2 erwähnte, durch die inhomogene Strahlungsverteilung bewirkte horizontale Schweif neben den Bildern der Retroreflektoren.

Bei den grob aufgelösten Panorama-Scans überlagert sich dieses Phänomen teilweise mit den Mischpixels. Aufgrund dieses Phänomens und der groben Auflösung besonders schwierig zu messen sind die nicht signalisierten Punkte an den 4 Ecken der Sockeloberfläche (Abb. 4-2,e).

In den Detail-Scans hingegen können die Verknüpfungspunkte etwas besser identifiziert werden, da die Auflösung etwa viermal höher als in den Panorama-Scans ist, d.h. die 2x2-Reflektoren bei einer Entfernung von 5m im Schnitt auf etwa 10x10 Pixel abgebildet werden (Abb. 4-3,a und b). Für die zylindrischen Reflektoren ergibt sich – bedingt durch die höhere Auflösung - auch eine Erleichterung beim Messvorgang. Die weit entfernten Punkte heben sich zwar immer noch nicht besonders stark ab, sind aber einigermaßen gut identifizierbar (Abb. 4-3,c). Außerdem lassen sich Schweiß und "korrekte" Abbildung aufgrund der höheren Auflösung leichter auseinanderhalten. Jedoch ist auch in den Detail-Scans sowohl die Messung der zylindrischen Reflektoren als auch die der Sockeleckpunkte wegen des Schleiers nicht einfach (Abb. 4-3,d bzw. e).

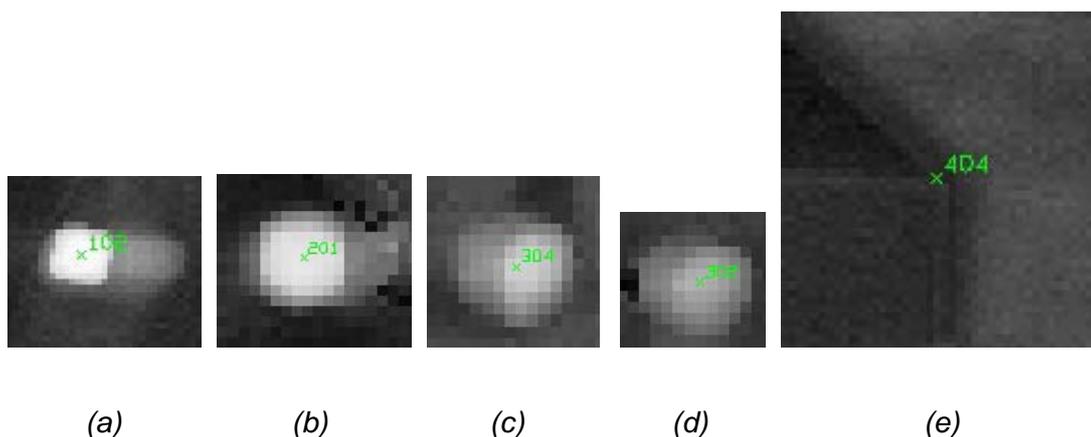
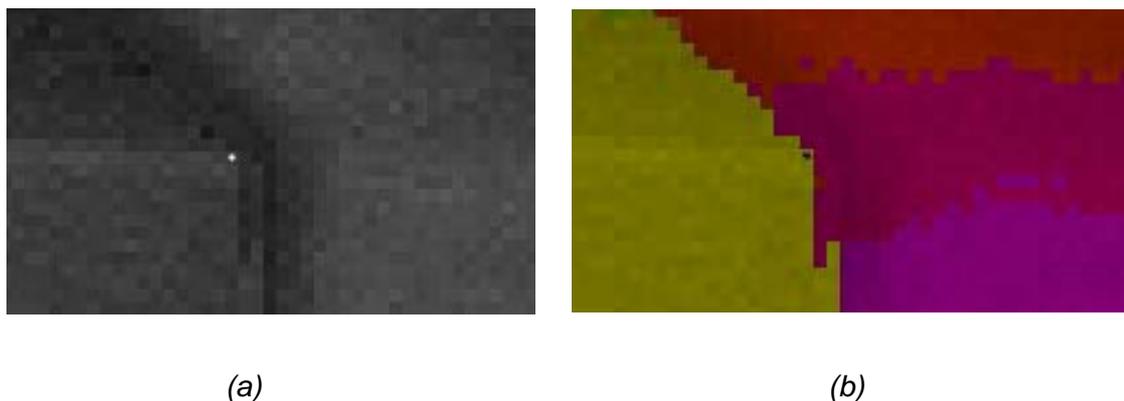


Abb. 4-3: Messung in den höher aufgelösten Detail-Scan-Bildern: (a) und (b) sind Abbildungen von quadratischen Reflektoren, (c) und (d) die von zylindrischen Reflektoren, (e) zeigt den auftretenden Schleier an Kanten

Der Schleier ist besonders gut erkennbar, wenn man in Intensitäts- und Entfernungsbild das gleiche Pixel betrachtet (siehe Abb. 4-4). Deshalb kann es beim Messen in manchen Fällen von Vorteil sein, das farbkodierte Entfernungsbild als Vergleichsbild zu Hilfe zu nehmen.

Die Messung von nicht signalisierten Punkten in den Intensitätsbildern ist jedoch in der Praxis wegen des Aufwands und der Unsicherheit nicht zu empfehlen und wurde hier nur der Vollständigkeit halber durchgeführt.



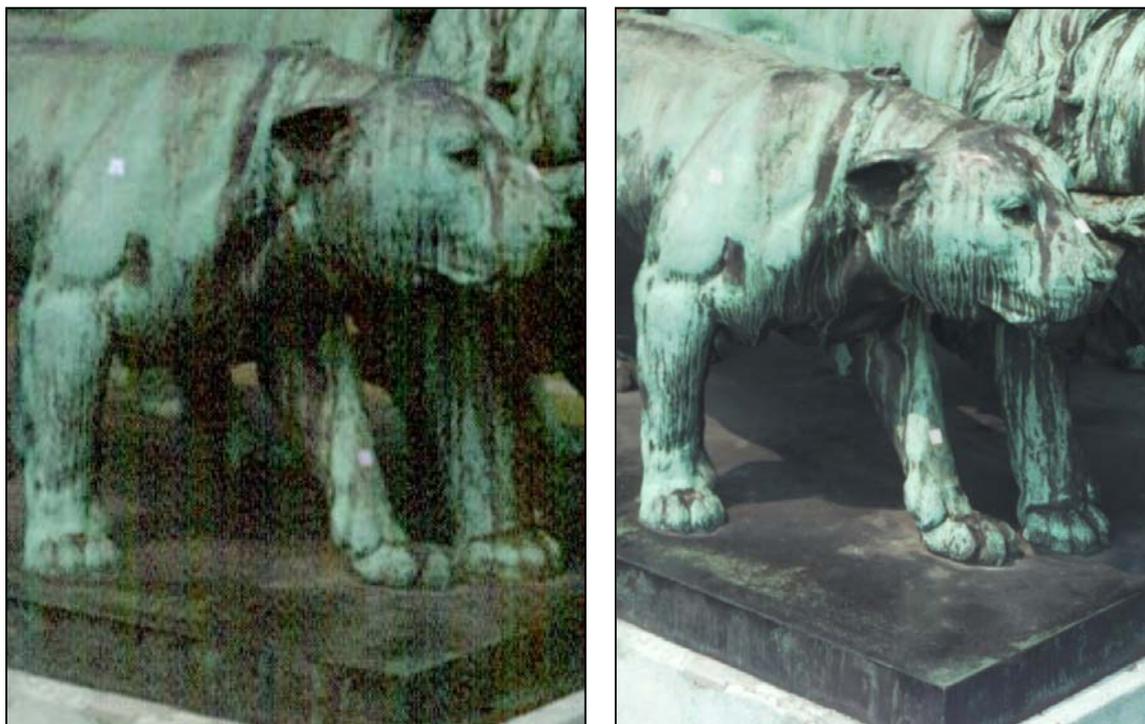
*Abb. 4-4: Problematik beim Messen von nicht signalisierten Eckpunkten der Sockeloberfläche: (a) ist eine Vergrößerung von Abb. 4-3(e) und zeigt den schlechten Kontrast im Intensitätsbild entlang der Sockelkanten, (b) zeigt den gleichen Ausschnitt, jedoch überlagert mit dem farbkodierten Entfernungsbild. Das gleiche Pixel ist in beiden Bildern jeweils durch einen kleinen Punkt (links: weiß, rechts: schwarz) hervorgehoben.*

### 4.2.3 Messung der Verknüpfungspunkte in den Photos

Wie bereits erwähnt, wurden zusätzlich zu den Laserscanner-Aufnahmen auch Photos aufgenommen. Für die geometrische Modellierung des Objekts wären die Laserscanner-Aufnahmen allein zwar ausreichend, wenn man jedoch ein hochqualitatives Photo-Modell des Objekts erstellen will, reicht die Qualität der Texturinformation des im Laserscanner vorhandenen RGB-Sensors nicht aus. Am Beginn dieses Abschnitts soll die Qualität dieses RGB-Bildes mit jener einer photographischen Aufnahme verglichen werden.

Wie in Kap. 3.2.2 bereits berechnet, ist die geometrische Auflösung eines Photos um etwa den Faktor 2.5 höher als bei dem RGB-Bild der detaillierten Laserscanner-Aufnahme. Betrachtet man Abb. 4-5, so sieht man, dass das RGB-Bild radiometrisch äußerst instabil ist, was sich an vertikalen streifenartigen Strukturen bemerkbar macht. Der Grund dafür liegt darin, dass die Belichtungszeit bei einer Messrate von mehreren tausend Punkten pro Sekunde nur entsprechend kurz sein kann. Ein von der Ein-Pixel-Kamera Pixel für Pixel aufgenommenes RGB-Bild ist also sowohl in punkto geometrischer Auflösung als auch hinsichtlich der radiometrischen Qualität einem von einem Flächensensor aufgenommenen Photo unterlegen. Für die Erzeugung photorealistischer Modelle ist der im Scanner integrierte RGB-Sensor bei weitem kein gleichwertiger Ersatz für eine Kamera wie die DCS 460c.

Da die 24-Bit-Farbbilder der DCS460c-Kamera ziemlich große Dateien (ca. 17.8MB) benötigen, ist es zweckmäßig, Bildpyramiden zu erzeugen. Dabei werden Bilder erzeugt, bei denen pro Hierarchieebene (Pyramidenniveau) jeweils die geometrische Auflösung um



*Abb. 4-5: Vergleich der Qualität eines RGB-Bildes des Laserscanners (links) und eines Photo (rechts). Die Aufnahmepositionen sind annähernd gleich.*

einen Faktor (meist 2) reduziert wird. Dadurch muss beim Zoomen nicht immer das hochaufgelöste Originalbild komplett geladen werden, sondern je nach Zoomstufe kann jeweils jenes Bild mit der ausreichenden Auflösung geladen werden, was den Bildaufbau beim Messen wesentlich beschleunigt. In diesem Fall wurden mittels ORPHEUS Bilder für 4 Pyramidenniveaus berechnet.

Im Vergleich zu den Intensitätsbildern sind die meisten Verknüpfungspunkte in den hochaufgelösten Photos deutlich besser messbar. Die Eckpunkte der Sockeloberfläche können aufgrund des durch die natürliche Beleuchtung gegebenen Kontrastes besonders gut gemessen werden. Allerdings ist bei manchen Punkten der Kontrast zwischen den weißen Retroreflektoren und dem hellgrünen Hintergrund ziemlich schwach. Durch Verwenden eines Blitzes bei der Aufnahme wäre eine Erhöhung dieses Kontrastes möglich. Abb. 4-6 zeigt Punkte, die in den Photos verschieden gut gemessen werden können.

Generell kann man sagen, dass die meisten Punkte, vor allem die nicht signalisierten Punkte an den Ecken der Sockeloberfläche, in den Photos am besten messbar sind. Es ist also zu erwarten, dass im Zuge der Ausgleichung (siehe Kap. 4.3) hauptsächlich Beobachtungen in den Intensitätsbildern (besonders in den groben Panorama-Bildern) eliminiert werden.

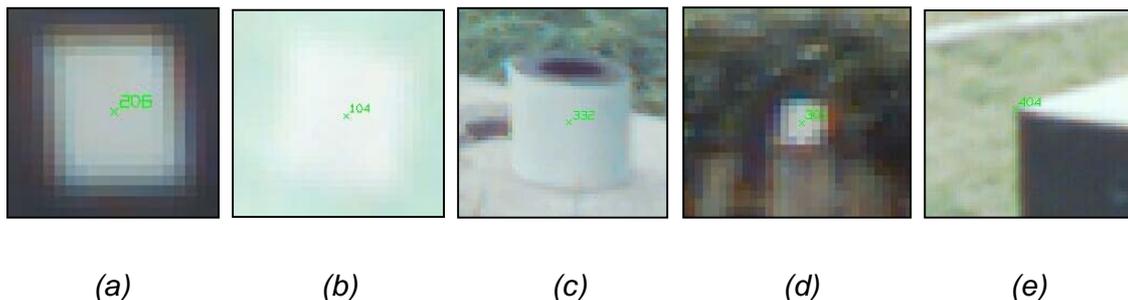


Abb. 4-6: Messung in den Photos: (a) zeigt die Abbildung eines quadratischen Reflektors mit gutem Kontrast, (b) ebenfalls, jedoch mit schlechtem Kontrast, (c) die eines zylindrischen Reflektors aus der Nähe, (d) ebenfalls, jedoch aus deutlich größerer Entfernung, (e) zeigt eine gut messbare Ecke der Sockeloberfläche

### 4.3 Hybride Ausgleichung

Zunächst wird das für die Ausgleichung verwendete Programmsystem ORIENT kurz vorgestellt, anschließend wird die Umwandlung der im Intensitätsbild gemessenen Bildkoordinaten in Polarbeobachtungen erläutert. Danach folgt ein kurzer Abschnitt, der sich mit der Parametrisierung der Drehwinkel der Laserscanner-Aufnahmen und der Photos sowie mit der Beschaffung von Näherungswerten für die Drehmatrizen befasst. Schließlich werden die Ausgleichungsergebnisse des konkreten Projekts analysiert.

#### 4.3.1 Das Programmsystem ORIENT

ORIENT ist ein universelles Programmsystem für strenge Ausgleichungen auf dem Gebiet der photogrammetrischen Punktbestimmung, wobei viele verschiedene Arten von Beobachtungen und/oder Parameter gleichzeitig verarbeitet werden können. Die von ORIENT unterstützten Beobachtungen bzw. Parameter sind in der Tabelle 4-2 aufgelistet.

Beobachtungen	Parameter
Bildpunkte: aus Perspektiven (x,y) aus Zeilenscannern(x=t,y)	Transformationsparameter (Kalibrierung, Orientierung)
Modellpunkte (x,y,z)	Zusätzliche Parameter: für Bilddeformationen (Verzeichnung, Wölbung) für Ausformung von Objektgestalten
Polarpunkte (Richtung, Zenitdistanz, Entfernung)	Modellierung von Scannerflugbahnen (Polynome oder Splines)
Passpunkte (X,Y,Z)	
Fiktive Beobachtungen: (Ebenen, Geraden, Oberflächen und Kurven (Polynome), Splines)	

Tab. 4-2: Vom Programmsystem ORIENT unterstützte Beobachtungen bzw. Parameter [ORIENT, 2003]. Die für diese Arbeit relevanten Beobachtungen bzw. Parameter sind hervorgehoben.

In ORIENT sind die Beobachtungen und Parameter in sogenannten Räumen organisiert, und zwar in Beobachtungs- bzw. Parameterräumen. ORIENT ist sehr allgemein konzipiert, sämtliche Transformationsformeln wurden aus der räumlichen Ähnlichkeitstransformation abgeleitet. Seit der Erstellung des ORIENT-Konzepts (Mitte der 70er-Jahre) wurde das System ständig weiterentwickelt. Im Zeitraum von 1980 bis 1984 wurden Methoden zum Aufspüren und Eliminieren grober Fehler implementiert (Robuste Schätzung und Data Snooping, siehe Kap. 4.3.5). Seit 1983 gibt es die Möglichkeit, geodätische Polarmessungen (Tachymetrie) in die Ausgleichung einzubeziehen. Damit können auch Laserscanner-Daten an der Ausgleichung teilhaben. ORIENT wird interaktiv durch Direktiven gesteuert. Dazu wurde eine eigene Kommandosprache entwickelt, nämlich DIRAN (Direktiven ANalyasator). Das seit dem Jahr 1999 vorhandene, als graphische Benutzeroberfläche und als interaktives Messwerkzeug dienende Programmsystem ORPHEUS erleichtert die Verwendung von ORIENT. Jedoch ist es nach wie vor möglich bzw. bei manchen Modulen sogar notwendig, innerhalb von ORPHEUS in einem DIRAN-Fenster die entsprechenden ORIENT-Direktiven einzugeben. Bekannte Parameter können entweder als Konstante oder als Beobachtungen behandelt werden. Unbekannte Parameter werden durch strenge Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt [ORIENT, 2003].

### 4.3.2 Umwandlung der Intensitätsbildmessungen in Polarbeobachtungen mittels bilinearer Interpolation

Im Kapitel 4.2.2 wurde bereits erwähnt, dass die für diese Arbeit verwendete ORPHEUS-Version noch nicht über ein eigenes Modul für Laserscanning verfügt. Deshalb müssen die Intensitätsbilder in ORPHEUS zunächst als Photos deklariert werden. Natürlich dürfen diese Photo-Räume nicht in die Ausgleichung einbezogen werden. Mit Hilfe des interaktiven Messtools können die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte (wie bei Photos) mit Sub-Pixel-Genauigkeit gemessen werden. Für jede Laserscanner-Aufnahme muss nun ein Polarraum erzeugt werden, in dem für jeden im Intensitätsbild gemessenen Punkt drei Polarbeobachtungen (Vertikal-, Horizontalwinkel, und Distanz), also das Tripel  $(\varphi_p, \vartheta_p, d_p)$ , ermittelt werden müssen. Diese Polarbeobachtungen sind jedoch nur an diskreten Stellen, nämlich in den Pixelzentren, vorhanden. Es gäbe jetzt die Möglichkeit, jene Polarmessungen zu übernehmen, die für jenes Pixel vorhanden sind, in welchem sich der im Bild gemessene Punkt befindet. Die Messung der Bildkoordinaten würde sich somit auf die Identifizierung eines Pixel reduzieren, wobei die erzielte Sub-Pixel-Genauigkeit nicht optimal genutzt würde. Dieses Verfahren nennt man "*nearest neighbourhood*", weil das nächstgelegene Pixelzentrum ermittelt wird. Günstiger ist es, die in

der Bildverarbeitung oft verwendete bilineare Interpolation (Abb. 4-7) zu verwenden. Dabei werden zuerst die vier nächstgelegenen Pixel bestimmt. Durch die vier Pixelmittelpunkte, an denen tatsächliche Polarmesswerte vorliegen, wird ein Quadrat definiert, innerhalb dessen sich der gemessene Punkt befindet und die Interpolation durchgeführt wird.

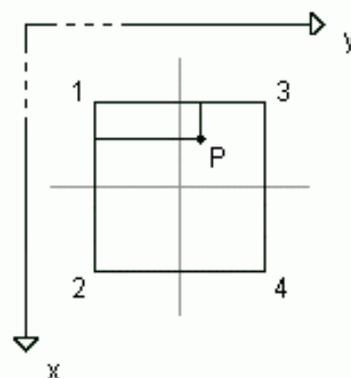


Abb. 4-7: Bilineare Interpolation: 1 bis 4 sind die Pixelzentren, P ist der gemessene Bildpunkt, für den die Polarkoordinaten interpoliert werden sollen, die grauen Linien repräsentieren die Pixelgrenzen

Die Interpolation erfolgt in beiden Bildkoordinatenrichtungen jeweils linear. Deutet man die jeweilige Polarbeobachtung als dritte Koordinate ("Höhe"), liegt der interpolierte Punkt auf einer durch die vier Punkte definierten HP-Fläche (hyperbolisches Paraboloid).

Die Formel für die bilineare Interpolation [Kraus, 1997] vereinfacht sich bei einem Quadrat mit der Seitenlänge 1 wie folgt:

$$z_p = \mathbf{w}^T \mathbf{z} \tag{4-1}$$

$$\text{mit } \mathbf{w} = \begin{pmatrix} (1 - \Delta x) \cdot (1 - \Delta y) \\ \Delta x \cdot (1 - \Delta y) \\ (1 - \Delta x) \cdot \Delta y \\ \Delta x \cdot \Delta y \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{z} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{pmatrix}, \text{ wobei } \begin{matrix} \Delta x = (x_p - x_1) \\ \Delta y = (y_p - y_1) \end{matrix}$$

Die Interpolation wird für jede der drei Polarkoordinaten  $\varphi$ ,  $\vartheta$ ,  $d$  getrennt angewandt.

Allerdings ist zu beachten, dass an Punkten, die an Konturlinien liegen, die Distanz durch die bei der Interpolation stattfindende gewichtete Mittelung der vier Stützwerte aufgrund von "Hintergrundpunkten" unter Umständen stark verfälscht werden kann. Daher ist zu erwarten, dass im Zuge der Ausgleichung die meisten Distanzen an solchen Punkten als grobe Fehler erkannt werden.

Bei signalisierten Punkten, die auf hinreichend viele Pixel abgebildet werden und somit annähernd gleich große, nur aufgrund des Strahleinfallswinkels und des Messrauschens variierende Distanzen aufweisen, liefert diese Interpolation jedoch gute Werte.

Die Interpolation kann mit einem kleinen Programm durchgeführt werden, das den Bezug zwischen den in ORPHEUS gemessenen Bildkoordinaten und den row/col-Indizes des 3DD-Riegl-File herstellt, und in der ORIENT-Datenbank für jede Laserscanner-Aufnahme einen entsprechenden Polarraum mit den jeweiligen "Beobachtungen" erzeugt. Zu beachten ist auch noch, dass im Gegensatz zur Tachymetrie der Horizontalwinkel  $\varphi$  mathematisch positiv gezählt wird, was in ORIENT umgestellt werden kann. Damit sind die für die hybride Ausgleichung notwendigen Beobachtungsräume vorhanden.

### 4.3.3 Parametrisierung und Ermittlung von Näherungswerten für die Drehwinkel bei Laserscanner-Aufnahmen und Photos

Bevor mit der Berechnung der Ausgleichung begonnen werden kann, müssen Näherungswerte für die Rotationsparameter der Photos und der Laserscanner-Aufnahmen ermittelt werden. Zunächst muss man eine Parametrisierung der Drehwinkel für die beiden Arten von Aufnahmen festlegen.

Für die Drehwinkel der Laserscanner-Aufnahmen wird die aus der Luftbildphotogrammetrie bekannte  $\omega\varphi\kappa$ -Parametrisierung [Kraus, 1997] verwendet (der Drehwinkel  $\varphi$  ist dabei nicht mit dem Horizontalwinkel des lokalen Laserscanner-Koordinatensystems zu verwechseln!), da bei den vorliegenden Aufnahmen – wie bei Luftbildern – die lokale z-Achse des Sensorkoordinatensystems annähernd parallel zur Z-Achse des Objekt-Koordinatensystems ist, d.h. der Primärdrehwinkel  $\omega$  und der Sekundärdrehwinkel  $\varphi$  betragen annähernd 0gon, während die Tertiärdrehung  $\kappa$  näherungsweise der aus der Tachymetrie bekannten Orientierungsunbekannten entspricht. Da das Sensorkoordinatensystem für jeweils zwei Aufnahmen (Panorama, Detail) identisch ist, sind insgesamt 10 Tripel ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) zu bestimmen.



*Abb. 4-8: Die horizontale Nullrichtung der Aufnahme befindet sich am rechten Bildrand. Ihre Lage bezüglich des globalen Objektkoordinatensystem kann aufgrund der ungewohnten Abbildung kaum abgeschätzt werden. Einfacher ist es, in der Abbildung eine (projizierende) Ebene zu suchen, die annähernd parallel zu eine vertikalen globalen Hauptebene (XZ- oder YZ-Ebene) ist, für diese mittels 3D-RiScan die Horizontalrichtung abzulesen, und daraus die Nullrichtung der Aufnahme in Bezug auf das globale XYZ-System zu berechnen. Hier wurde eine zur XZ-Ebene (vgl. Abb. 3-5) parallele Ebene (durch eine vertikale Linie hervorgehoben) gewählt.*

Die Näherungswerte für  $\omega$  und  $\varphi$  können für alle Laserscanner-Standpunkte mit Null angenommen werden, während der Näherungswert für  $\kappa$  hingegen jeweils aus den Intensitätsbildern geschätzt werden kann. Da in jedem Intensitätsbild der Sockel abgebildet ist, erfolgt dies am besten durch Ablesen der Horizontalrichtung einer zu einer globalen vertikalen Hauptebene (XZ- oder YZ-Ebene) parallelen (projizierenden) Ebene mit Hilfe des Programms 3D-RiScan (Abb. 4-8). Daraus lässt sich die Nullrichtung der Aufnahme in Bezug auf das globale XYZ-System abschätzen. Das direkte Abschätzen der Nullrichtung ist aufgrund der ungewohnten Abbildung kaum möglich.

Für die Drehwinkel der Photos wird die in ORIENT verfügbare  $\alpha\zeta\kappa$ -Parametrisierung verwendet, da die  $\omega\varphi\kappa$ -Parametrisierung für terrestrische Aufnahmen (mit annähernd horizontaler Aufnahmerichtung) versagt [Kraus, 1996]. Dabei erfolgt die Primärdrehung  $\alpha$  um die Z-Achse, die Sekundärdrehung  $\zeta$  um die rotierte Y-Achse, und die Tertiärdrehung  $\kappa$  wieder um die inzwischen rotierte Z-Achse. Bei annähernd horizontaler Aufnahmerichtung und horizontaler x-Bildkoordinatenachse betragen  $\zeta$  und  $\kappa$  annähernd 100gon, während  $\alpha$  die annähernd horizontale Aufnahmerichtung (gezählt von der negativen X-Achse) beschreibt. Die Sekundärdrehung  $\zeta$  entspricht dem Nadirwinkel der Aufnahmerichtung. Die Winkel  $\alpha$  und  $\zeta$  legen somit die räumliche Aufnahmerichtung im Objektkoordinatensystem fest, der Winkel  $\kappa$  hingegen beschreibt die Kantung des Bildes. Abb. 4-9 zeigt ein Beispiel für die Ermittlung der Näherungswerte für die Drehwinkel.

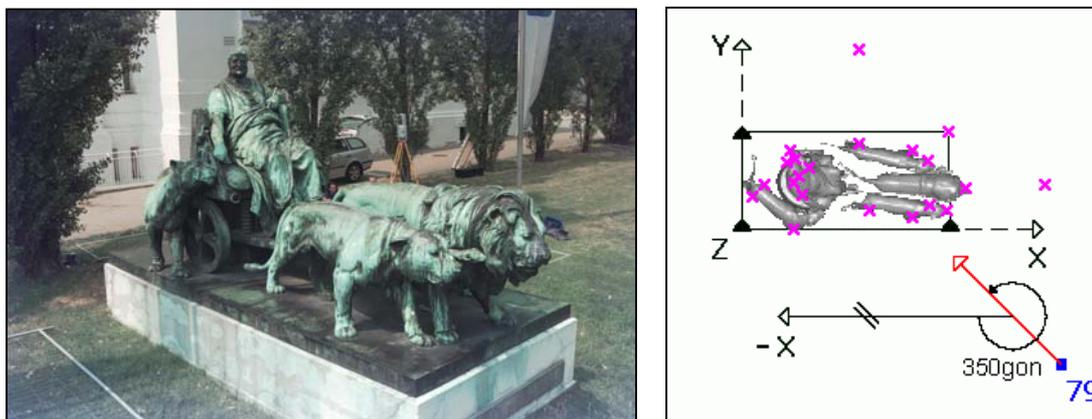


Abb. 4-9: Beispiel für die Ermittlung von Näherungswerten für die Drehwinkel (links: Photo 79, rechts Grundrissdarstellung der Aufnahmerichtung): Die Horizontalkomponente der Aufnahmerichtung schließt mit der negativen X-Achse einen Winkel von ca. 50gon ein,  $\alpha$  beträgt daher ca. 350gon. Die Aufnahme ist ein wenig nach unten geneigt, daher kann für  $\zeta$  ein Näherungswert von 90gon angenommen werden. Die Kantung  $\kappa$  kann bei 100gon belassen werden, da die x-Achse des Bildkoordinatensystems im globalen System annähernd horizontal liegt.

#### 4.3.4 Bestimmung der Koordinaten der Standpunkte und der Neupunkte durch sukzessive Ausgleichung

Um zu Näherungswerten für die Koordinaten der Laserscanner-Standpunkte bzw. der Projektionszentren der Photos zu kommen, werden die unbekanntes Neupunkte (Verknüpfungspunkte) zunächst in ORIENT deaktiviert. Aus den Messungen der Bildkoordinaten bzw. aus den Polarbeobachtungen der Datumspunkte können anschließend Näherungswerte für die Aufnahmeorte und die frei gelassenen Koordinaten der Datumspunkte bestimmt werden. Am besten beginnt man mit jenen Laserscanner-Aufnahmen, in denen der Eckpunkt, der den Ursprung des XYZ-Objektkoordinatensystems (in diesem Fall der einzige Vollpasspunkt) definiert, gemessen wurde. Bei näherungsweise bekannter Drehmatrix reichen nämlich bereits die drei Polarbeobachtungen zu einem Vollpasspunkt, um die drei Unbekannten der Translation (Standpunktskoordinaten) näherungsweise zu bestimmen. Hat man dies für einige Standpunkte durchgeführt, können die Neupunkte Schritt für Schritt aktiviert werden. Durch räumliche Vorwärtsschnitte lassen sich Neupunkte berechnen, über diese Neupunkte können dann mehrere Aufnahmen verknüpft werden, wodurch die Näherungswerte für die unbekanntes Parameter sukzessive verbessert werden. Die Ausgleichung erfolgt also in mehreren Schritten, wobei stufenweise zusätzliche Beobachtungen hinzugefügt werden. Zum Schluss werden alle Beobachtungen ausgeglichen und alle unbekanntes Parameter in einer gemeinsamen Ausgleichung bestimmt. Jedoch sind in den Beobachtungen noch grobe Fehler (vor allem grob falsche Distanzen) vorhanden, die aufgedeckt werden müssen.

#### 4.3.5 Aufdeckung und Elimination grober Beobachtungsfehler

In ORIENT stehen drei Möglichkeiten für das Aufspüren von groben Fehlern zu Verfügung, wobei jede dieser Methoden in einer bestimmten Phase der Ausgleichung angewandt wird [Kager et al., 2002].

a.) Residuen-Analyse:

Beobachtungen mit sehr großen Residuen (Verbesserungen), die mitunter sogar die Konvergenz des Ausgleichs verhindern, weisen auf sehr grobe Beobachtungsfehler hin. Grob falsche Distanzen (Fehler  $> 0.5\text{m}$ ), die durch bilineare Interpolation (Kap. 4.3.2) entstanden sind, können mit dieser Methode beispielsweise leicht aufgedeckt werden.

b.) Robuste Schätzung:

Diese Methode eignet sich gut für die Erkennung von groben Fehlern "mittlerer Größe". Sie arbeitet iterativ, wobei die Residuen der Beobachtungen nach einem Iterationsschritt der Ausgleichung die Gewichte dieser Beobachtungen im nächsten Iterationsschritt beein-

flussen. Um die Verbesserungen  $v_i$  von Beobachtungen verschiedener Beobachtungsgruppen (mit verschiedenen Einheiten bzw. a-priori-Genauigkeiten) miteinander vergleichen zu können, werden diese jeweils in Einheiten ihrer entsprechenden a-priori-Standardabweichung  $\sigma_i$  quantifiziert. Die Absolutbeträge dieser normierten Verbesserungen werden in ORIENT als *a priori normalized discrepancies*  $d_i$  bezeichnet:

$$d_i = \frac{|v_i|}{\sigma_i} \quad (4-2)$$

Für jede Beobachtung wird nun das Gewicht  $p_{i,k+1}$  für die (k+1)te Iteration mit Hilfe einer Gewichtsfunktion  $w(d_{i,k})$ , die vom Wert  $d_{i,k}$  der vorhergehenden Iteration k abhängig ist, berechnet. Die Gewichtsfunktion ist eine Glockenkurve, deren Form durch die Parameter h und s bestimmt wird (Abb. 4-10). Die Halbwertsbreite (*halfweight*) h gibt an, bei welchem Wert von  $d_{i,k}$  das Gewicht  $w(d_{i,k})$  halb so groß wie das ursprüngliche Gewicht  $p_i$  ist. Der Parameter s (*slant*) steuert die Steilheit der Kurve an der Stelle h und entspricht dem negativen Reziprokwert der dortigen Tangentensteigung  $w'(h)$ . Des weiteren gibt es einen Parameter t (*marktol*), der bestimmt, ab welchem Wert  $d_{i,k}$  die Beobachtung markiert wird. Markierte Beobachtungen ( $w=0$ ) nehmen im nächsten Iterationsschritt an der Ausgleichung nicht teil, können sich jedoch rehabilitieren, falls sie zu Unrecht markiert wurden, weil beispielsweise eine andere tatsächlich grob fehlerhafte Beobachtung nicht erkannt wurde.

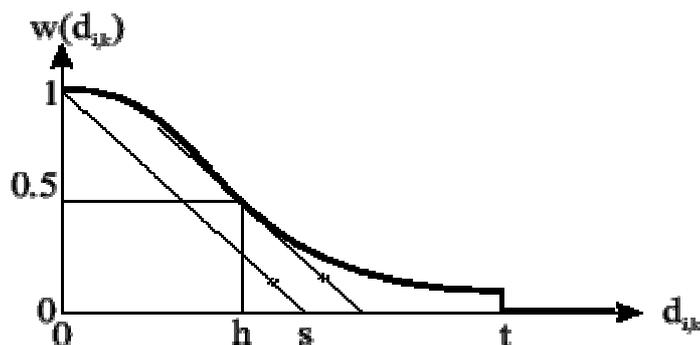


Abb. 4-10: Gewichtsfunktion  $w(d_{i,k})$  zur Neu-Gewichtung der Beobachtungen in der nächsten Iteration in Abhängigkeit der a-priori-normalisierten Abweichungen  $d_{i,k}$ . Die Parameter h, s und t bestimmen die Gestalt dieser Funktion. [Rottensteiner, 2001]

Wird  $s=h$  gewählt, wird die Form der Glockenkurve allein durch den Parameter h bestimmt. Dies ist auch die Standardeinstellung in ORIENT. In diesem Programmsystem werden jedoch nicht die ursprünglichen Gewichte  $p_i$  mit  $w(d_{i,k})$  multipliziert, sondern

deren Quadratwurzeln  $\sqrt{p_i}$ , weil die linearisierten Beobachtungsgleichungen für die Ausgleichung durch Multiplikation mit  $\sqrt{p_i}$  homogenisiert werden und somit alle das Gewicht 1 erhalten [Rottensteiner F., 2001]. Die in ORIENT verwendete Neu-Gewichtung für die (k+1)te Iteration lautet:

$$\sqrt{p_{i,k+1}} = w(d_{i,k}) \cdot \sqrt{p_i} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{i,k}}{h}\right)^4} \cdot \sqrt{p_i} \quad (4-3)$$

Somit erhält man für Beobachtungen mit  $d_{i,k} = h$  ein neues Gewicht, das einem Viertel des ursprünglichen Werts entspricht, d.h. eine solche Beobachtung wird so behandelt, als hätte sie eine doppelt so hohe Standardabweichung wie ursprünglich angenommen.

Die Markierungstoleranz  $t$  hat bei der hier beschriebenen Ausgleichung denselben Wert wie die Halbwertsbreite  $h$ .

Die robuste Schätzung erfolgt nun so, dass für die (k+1)te Iteration der Wert des Parameters  $h$  immer so gewählt wird, dass er zwischen den beiden größten Werten der aus der k-ten Iteration erhaltenen *a priori normalized discrepancies* der nicht markierten Beobachtungen liegt. Somit wird die Halbwertsbreite schrittweise herabgesetzt, wobei jeweils die Beobachtung mit der größten Abweichung (die also gerade noch nicht markiert wurde) als grober Fehler angenommen und in dem nächsten Iterationsschritt markiert wird. Auf diese Weise erhalten die mit groben Fehlern behafteten Beobachtungen schrittweise immer kleinere Gewichte, bis sie schließlich markiert werden. Ist man bei etwa  $h=3$  bzw.  $h=4$  angelangt, kann die robuste Schätzung beendet werden, da alle verbleibenden Beobachtungen Abweichungen unter ihrer jeweiligen 3- bzw. 4-fachen a-priori-Standardabweichung aufweisen und daher mit großer Wahrscheinlichkeit als normalverteilt betrachtet werden können. Zum Abschluss wird die Ausgleichung ohne die letztendlich markierten Beobachtungen berechnet.

#### c.) *Data Snooping*:

Diese Methode wird für die Aufdeckung "kleiner" grober Fehler verwendet. Dazu werden die Beobachtungen mittels statistischer Hypothesentests untersucht, wobei jene Beobachtung gesucht wird, welche die größte Wahrscheinlichkeit besitzt, falsch zu sein [Kager et al., 2002]. Als Testgrößen werden die a-posteriori-normierten Verbesserungen verwendet, wofür die Standardabweichungen des Verbesserungen berechnet werden (Diagonale der Matrix  $\mathbf{Q}_{vv}$ ). Da die Theorie des *Data Snoopings* voraussetzt, dass nur ein grober Fehler in den Beobachtungen enthalten ist, erfolgt auch hier die Fehlersuche in mehreren Iterationsschritten [Kager et al., 2002]. Für das *Data Snooping* gibt es keine graphische Oberfläche in ORPHEUS.

Mit Hilfe der Matrix  $Q_{vv}$  lässt sich auch eine Varianzkomponentenschätzung durchführen. Dabei wird für die verschiedenen Beobachtungsgruppen deren a-priori-Genauigkeiten überprüft und für jede dieser Gruppen ein Faktor ermittelt, mit dem dieser Wert zu multiplizieren ist, um eine bessere Genauigkeitsabschätzung für die Beobachtungsgruppe zu bekommen. Durch Eingabe dieser Faktoren mit Hilfe entsprechender ORIENT-Direktiven im DIRAN-Fenster wird die a-priori-Genauigkeit für jede Beobachtungsgruppe neu festgesetzt und die Ausgleichung wiederholt. Es handelt sich dabei also um einen manuell gesteuerten iterativen Vorgang. Dieser kann beendet werden, sobald die erwähnten Faktoren alle hinreichend nahe um den Wert 1 liegen (in der Praxis z.B. zwischen 0.9 und 1.1). Durch die Varianzkomponentenschätzung wird das stochastische Modell verbessert.

### 4.3.6 Bilanz und Ergebnisse der Ausgleichung

Dieses Kapitel befasst sich wieder mit dem konkreten Beispiel der Marc-Anton-Plastik, wobei die Bilanz und die Ergebnisse der Ausgleichung präsentiert werden. Zur Elimination grober Fehler wurden alle drei im vorigen Kapitel erwähnten Methoden angewandt. Eine Varianzkomponentenschätzung wurde ebenfalls durchgeführt. Um die innere Genauigkeit für die Neupunkte zu erhalten, wurde außerdem eine freie Netzausgleichung berechnet. Zum Abschluss erfolgt eine Interpretation der Ergebnisse.

Die Bilanz der Ausgleichung ist in der Tabelle 4-3 zusammengefasst:

Anzahl d. Beobachtungen i. d. 20 Intensitätsbildern (273 Punkte mit je 3 Beobachtungen):	819
Anzahl d. Beobachtungen i. d. 22 Photos (254 Punkte mit je 2 Beobachtungen):	508
Anzahl d. fiktiven Beobachtungen ("beobachtete" Datumselemente):	6
Anzahl d. ursprünglich vorhandenen Beobachtungen:	$\Sigma=$ 1333
Anzahl d. mittels Residuen-Analyse eliminierten Distanzen:	-33
Anzahl d. Beobachtungen vor der robusten Schätzung:	$\Sigma=$ 1300
Anzahl d. nach robuster Schätzung/ <i>Data Snooping</i> markierten Punkte:	-62
<b>Anzahl der Beobachtungen:</b>	<b><math>\Sigma=</math> 1238</b>
Anzahl d. zu bestimmenden Orientierungsparameter (32 Standpunkte mit je 6 Parametern):	192
Anzahl d. zu bestimmenden Neupunktkoordinaten (30 Neupunkte mit je 3 Parametern):	90
Anzahl d. zu bestimmenden Datumspunktkoordinaten (3 Datumspkte mit je 3 Parametern):	9
<b>Anzahl der Unbekannten:</b>	<b><math>\Sigma=</math> 291</b>
<b>Redundanz:</b>	<b>947</b>

Tab. 4-3: Bilanz der Ausgleichung mit Angabe der im Zuge der Residuen-Analyse, der robusten Schätzung, und *Data Snooping* eliminierten Beobachtungen

Wie man erkennen kann, ist die Redundanz trotz Elimination von insgesamt 95 Beobachtungen immer noch sehr hoch. Die ausgeglichenen Koordinaten der drei Datumspunkte

stellen Unbekannte dar, die sechs festgehaltenen bzw. vor der freien Ausgleichung näherungsweise bekannten Datumselemente gelten in ORIENT als fiktive Beobachtungen. Somit gilt die angegebene Bilanz sowohl für die auf den festgehaltenen Datumselementen gelagerte zwangsfreie Ausgleichung als auch für die freie Ausgleichung.

In der Tabelle 4-4 folgt eine Übersicht über die eliminierten Beobachtungen, aufgeschlüsselt nach Beobachtungsgruppe und Art der Signalisierung (Quadrat, Zylinder, Nicht signalisiert):

		Quadrat-Reflektor	Zylinder-Reflektor	Nicht signalisiert	Gesamt
<b>Residuen-Analyse:</b>					
Detail-Scans:	Eliminierte Distanzen:	1	1	13	15
Panorama-Scans:	Eliminierte Distanzen:	2	1	15	18
<b>Eliminierte Beobachtungen: <math>\Sigma=</math></b>		<b>3</b>	<b>2</b>	<b>28</b>	<b>33</b>
<b>Robuste Schätzung/Data Snooping:</b>					
Detail-Scans:	Eliminierte Horizontalwinkel:	2	0	7	9
	Eliminierte Vertikalwinkel:	1	0	0	1
	Eliminierte Distanzen:	1	0	3	4
Panorama-Scans:	Eliminierte Horizontalwinkel:	1	1	7	9
	Eliminierte Vertikalwinkel:	4	5	0	9
	Eliminierte Distanzen:	3	3	5	11
Photos:	Eliminierte x-Koordinaten:	1	0	7	8
	Eliminierte y-Koordinaten:	1	6	4	11
<b>Eliminierte Beobachtungen: <math>\Sigma=</math></b>		<b>14</b>	<b>15</b>	<b>33</b>	<b>62</b>
<b>Eliminierte Beobachtungen insgesamt: <math>\Sigma=</math></b>		<b>17</b>	<b>17</b>	<b>61</b>	<b>95</b>

Tab. 4-4: Übersicht über die in den einzelnen Beobachtungsgruppen enthaltenen aufgedeckten groben Beobachtungsfehler mit Angabe der Signalisierungsart des jeweils beobachteten Punktes (Quadratischer Retroreflektor, Zylindrischer Retroreflektor, Nicht signalisiert)

Betrachtet man die im Zuge der Residuen-Analyse eliminierten Distanzen, so ist erkennbar, dass die grob falschen Distanzen erwartungsgemäß an den nicht signalisierten Eckpunkten der Sockeloberfläche auftreten. Auch an signalisierten Punkten gibt es grob fehlerhafte Distanzen. Diese Punkte liegen teils nahe an der Kontur, teils in weiter Entfernung von dem jeweiligen Aufnahmeort (Abbildung auf wenige Pixel!). Bei der bilinearen Interpolation werden im Prinzip vier Distanzen (mit verschiedener Gewichtung) gemittelt, wobei bereits eine deutlich größere Hintergrund-Distanz ausreicht, um die Distanz grob zu verfälschen. Besser wäre es, für Punkte nahe an der Kontur die Methode der nächsten Nachbarschaft (siehe Kap. 4.3.2) als Übergang von Intensitätsbild-Beobachtungen zu den Polarbeobachtungen zu verwenden. Das Problem fehlerhafter Distanzen aufgrund der Strahldivergenz des Laserstrahls (siehe dazu Abb. 5-3) bestünde jedoch auch in diesem Falle.

Im Zuge der robusten Schätzung und des *Data Snoopings* wurden vor allem Polarbeobachtungen – besonders in den gröber aufgelösten Panorama-Scans – eliminiert. Dabei wurden “mittelgrobe“ Distanzfehler wiederum vorwiegend an den Eckpunkten aufgedeckt. Letztere konnten sowohl in den Intensitätsbildern als auch in den Photos in vertikaler Richtung besser gemessen werden. Die Ursache dafür ist bei den Intensitätsbildern der bereits erwähnte, in horizontaler Richtung auftretende Schleier, und bei den Photos der in vertikaler Richtung bessere Kontrast, der durch die stärkere natürliche Beleuchtung der Sockeloberfläche in einigen Bildern zustande kommt (siehe Abbildungen in den Kapiteln 4.2.2 und 4.2.3).

Wie eingangs bereits erwähnt, wurde im Zuge des *Data Snoopings* zur Verbesserung des stochastischen Modells auch eine Varianzkomponentenschätzung durchgeführt. Dabei wurden insgesamt sieben Beobachtungsgruppen gebildet, nämlich jeweils drei Gruppen für die Polarbeobachtungen von Detail- bzw. Panorama-Scan, sowie eine Gruppe für die Beobachtungen der Bildkoordinaten in den Photos. In der Tabelle 4-5 sind die Ergebnisse dieser Varianzkomponentenschätzung (VKS) aufgelistet und den Genauigkeitsangaben des RIEGL LMS-Z360 gegenübergestellt.

Beobachtungsgruppe	Ergebnis der VKS	Messgenauigkeit laut Hersteller (Kap. 2)	Verwendete Schrittweite
Detail-Scan – Horizontalwinkel [mgon]	<b>48</b>	2.2	56
Detail-Scan – Vertikalwinkel [mgon]	<b>31</b>	2.8	56
Detail-Scan – Distanz [mm]	<b>12</b>	12	
Panorama-Scan – Horizontalwinkel [mgon]	<b>74</b>	2.2	226
Panorama-Scan – Vertikalwinkel [mgon]	<b>42</b>	2.8	226
Panorama-Scan – Distanz [mm]	<b>16</b>	12	
Photo – Bildkoordinaten [Pixel]	<b>0.37</b>		

Tab. 4-5: Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung (VKS) und Vergleich mit den Herstellerangaben des Riegl LMS-Z360 bzw. mit der jeweils verwendeten Schrittweite

Man kann erkennen, dass die jeweils verwendete Winkelschrittweite die entscheidende Größe für die erhaltene Winkelgenauigkeit ist, d.h. selbst wenn die vom Hersteller angegebene Messgenauigkeit beliebig hoch wäre, gäbe es immer noch die Einschränkung, dass die Bildkoordinaten-Messung im Intensitätsbild nur mit einer begrenzten Sub-Pixelgenauigkeit durchgeführt werden kann (Diskretisierungsproblem!). Bei den Detail-Scans entsprechen die erhaltenen Werte für Horizontal- bzw. Vertikalwinkel einer Messgenauigkeit von 86% bzw. 55% eines Pixels im Intensitätsbild, bei den Panorama-Scans entsprechend 33% bzw. 19%. Wiederum lässt sich der jeweils schlechtere Wert in Horizontalrichtung durch den schon einige Male erwähnten Schleier erklären. Die abgeschätzte Genauigkeit der Bildkoordinaten in den Photos von 37% der Pixelgröße ist plausibel (vgl. [Kraus, 1997]).

Die Genauigkeiten der Unbekannten werden bei der zwangsfreien Ausgleichung durch die Genauigkeiten der festgehaltenen Datumselemente (ursprüngliche Annahme:  $\pm 10\text{mm}$ ) verfälscht, außerdem ist die Auswahl der Datumpunkte mehr oder weniger willkürlich. Des weiteren ist zu beachten, dass es bei den von den Datumpunkten weiter entfernten Punkten zu Extrapolationen der Genauigkeitsmaße kommt [Kraus, 1996]. Deshalb wurde neben der zwangsfreien Ausgleichung auch eine freie Netzausgleichung durchgeführt, welche die inneren Genauigkeiten für die Unbekannten des Beobachtungsnetzes liefert. Während die zwangsfreie Ausgleichung direkt mit Hilfe der ORPHEUS-Oberfläche berechnet werden kann (Abb. 4-11), wird die freie Netzausgleichung durch Eingabe der entsprechenden ORIENT-Direktiven durchgeführt.

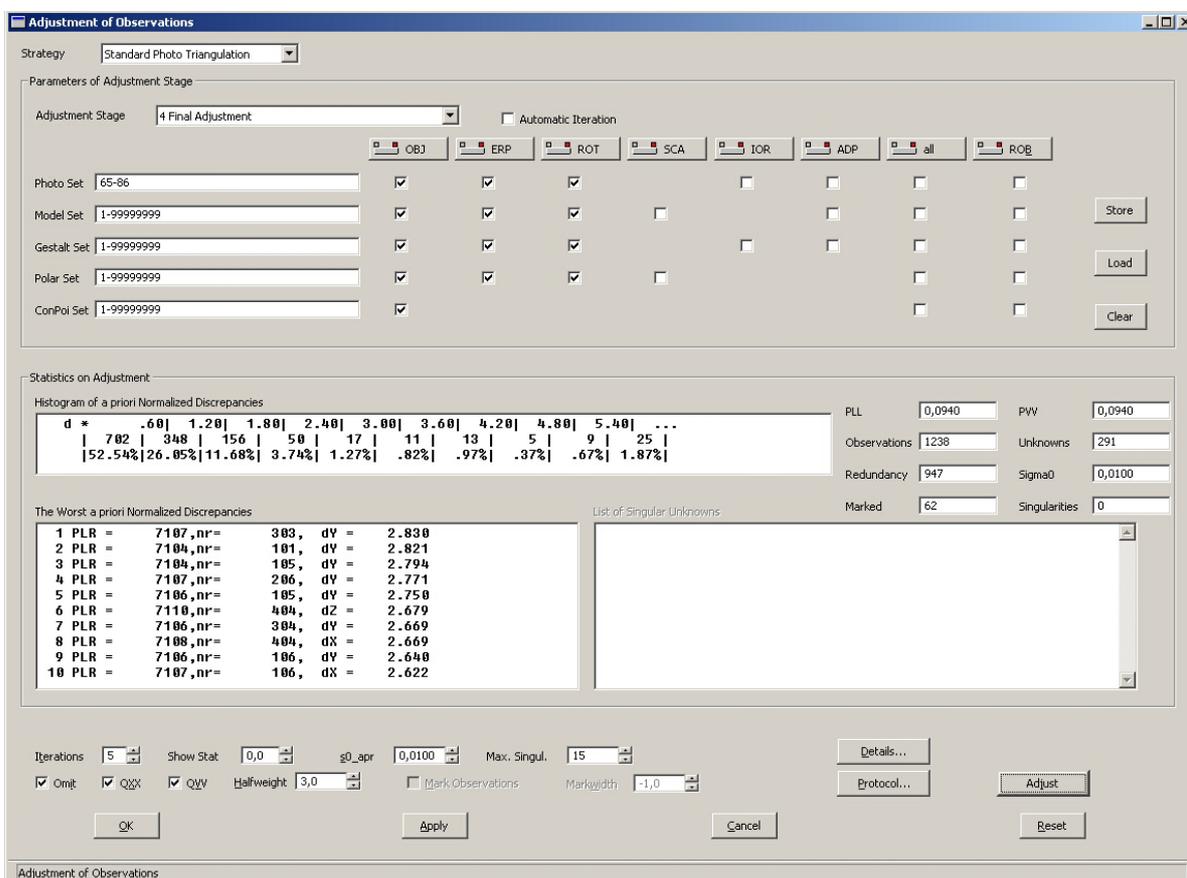


Abb. 4-11: Ausgleichungsfenster in ORPHEUS nach Durchführung der zwangsfreien Ausgleichung

In den folgenden Tabellen sind die durchschnittlichen Genauigkeiten von Gruppen der Unbekannten, ermittelt aus zwangsfreier bzw. freier Netzausgleichung, angegeben.

	Genauigkeit der Position			Genauigkeit der Drehwinkel		
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	dω[mgon]	dφ[mgon]	dκ[mgon]
<b>Laserscanner-Aufnahmen</b>	<b>16</b>	<b>19</b>	<b>28</b>	<b>378</b>	<b>177</b>	<b>174</b>
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	dα[mgon]	dζ[mgon]	dκ[mgon]
<b>Photos</b>	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>46</b>	<b>176</b>	<b>287</b>	<b>274</b>
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]			
Verknüpfungspunkte (am Objekt)	11	11	9			
Verknüpfungspunkte (Peripherie)	28	26	61			
<b>Verknüpfungspunkte gesamt</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>28</b>			

Tab. 4-6: Durchschnittliche Genauigkeiten der Unbekannten ermittelt aus der zwangsfreien Ausgleichung (verfälscht durch die Lagerungsgenauigkeit des Datums von ±10mm für jede "festgehaltene" Datumspunktcoordinate)

	Genauigkeit der Position			Genauigkeit der Drehwinkel		
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	dω[mgon]	dφ[mgon]	dκ[mgon]
<b>Laserscanner-Aufnahmen</b>	<b>1.9</b>	<b>1.8</b>	<b>2.9</b>	<b>38</b>	<b>26</b>	<b>15</b>
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	dα[mgon]	dζ[mgon]	dκ[mgon]
<b>Photos</b>	<b>2.4</b>	<b>2.2</b>	<b>2.8</b>	<b>17</b>	<b>20</b>	<b>17</b>
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]			
Verknüpfungspunkte (am Objekt)	0.7	0.7	0.6			
Verknüpfungspunkte (Peripherie)	3.3	3.1	3.5			
<b>Verknüpfungspunkte gesamt</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>			

Tab. 4-7: Durchschnittliche Genauigkeiten der Unbekannten ermittelt aus der freien Netzausgleichung (liefert die besten Genauigkeitsmaße für die Unbekannten, da die innere Genauigkeit der Netzgeometrie erhalten bleibt)

Wie man erkennen kann, ist die innere Genauigkeit des Netzes deutlich höher. Die aus der freien Netzausgleichung ermittelten Genauigkeitsmaße sind aussagekräftiger, da das Beobachtungsnetz auf den Näherungskoodinaten aller Punkte gelagert wird. Die hohe Genauigkeit der auf dem Objekt befindlichen Verknüpfungspunkte ist dadurch zu erklären, dass die Überbestimmung sehr hoch und die Aufnahmegeometrie sehr günstig ist, weil die Punkte auf dem Objekt aus vielen verschiedenen Richtungen beobachtet wurden. Der Wert von 0.7mm pro Koordinatenrichtung scheint plausibel, wenn man bedenkt, dass bei einer typischen Aufnahmeentfernung der hochaufgelösten Photos zwischen 5m und 8m die Pixelgröße auf dem Objekt zwischen 1.6mm und 2.7mm beträgt, und laut Varianzkomponentenschätzung etwa auf ein Drittel Pixel genau gemessen werden konnte. Interessant ist es noch die Frage, welche Ergebnisse man bei Weglassen der Photo-Beobachtungen (also bei einer reinen Ausgleichung der Laserscanner-Standpunkte) er-

hält. Erwartungsgemäß verschlechtern sich die Genauigkeiten der Unbekannten gegenüber der hybriden Ausgleichung (siehe Tab. 4-8).

<b><u>Bilanz:</u></b>						
Anzahl der Beobachtungen	749 <i>(1238)</i>					
Anzahl der Unbekannten	159 <i>(291)</i>					
Redundanz	590 <i>(947)</i>					
<b><u>Genauigkeiten der Unbekannten:</u></b>						
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	dω[mgon]	dφ[mgon]	dκ[mgon]
<b>Laserscanner-Aufnahmen</b>	<b>2.1</b> <i>(1.9)</i>	<b>2.1</b> <i>(1.8)</i>	<b>3.2</b> <i>(2.9)</i>	<b>40</b> <i>(38)</i>	<b>27</b> <i>(26)</i>	<b>15</b> <i>(15)</i>
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]			
Verknüpfungspunkte (am Objekt)	1.8 <i>(0.7)</i>	2.2 <i>(0.7)</i>	2.3 <i>(0.7)</i>			
Verknüpfungspunkte (Peripherie)	3.9 <i>(3.3)</i>	3.6 <i>(3.1)</i>	5.1 <i>(3.5)</i>			
<b>Verknüpfungspunkte gesamt</b>	<b>2.5</b> <i>(1.5)</i>	<b>2.6</b> <i>(1.5)</i>	<b>3.2</b> <i>(1.5)</i>			

Tab. 4-8: Ausgleichung ohne Verwendung der Photos. Bilanz und durchschnittliche Genauigkeiten der Unbekannten ermittelt aus der freien Netzausgleichung (in Klammern und kursiver Schrift sind zum Vergleich die Genauigkeiten aus der hybriden Ausgleichung angegeben).

Die Genauigkeiten der Orientierungsparameter der Laserscanner-Aufnahmen verschlechtern sich kaum. Auch die Genauigkeiten der Verknüpfungspunkte in der Peripherie (für die es vor allem in den Panorama-Aufnahmen Beobachtungen gibt) werden nur ein wenig durch das Weglassen der Photos beeinträchtigt. Die Verknüpfungspunkte am Objekt weisen hingegen einen deutlichen Genauigkeitsverlust auf (Standardabweichung etwa verdreifacht!). Dies ist jedoch plausibel, da in den hochaufgelösten Photos gerade diese Punkte vorwiegend beobachtet wurden.

Weitere Details zur Ausgleichung sind den entsprechenden ORIENT-Protokollen im Anhang A zu entnehmen.

## 5 Modellierung der Objektoberfläche

Dieses Kapitel befasst sich mit der Erzeugung eines geometrischen 3D-Oberflächenmodells aus terrestrischen Laserscanner-Daten anhand des Beispiels der Marc-Anton-Plastik, wobei ausschließlich die Daten aus den zehn Detail-Scans herangezogen werden. Die Panorama-Scans und die aufgenommenen Photos werden für diese geometrische Modellierung nicht verwendet, obwohl letztere wertvolle Informationen (speziell was die gut messbaren Kanten betrifft) liefern würden. Ein solches Oberflächenmodell kann z.B. eine Triangulierung oder ein (weitestgehend) kontinuierliches, aus analytisch beschreibbaren Flächen bestehendes NURBS-(*Non Uniform Rational B-Splines*-) Modell sein. Für diese Diplomarbeit wurde das Modellierungs-Software-Paket Geomagic Studio 5.0 [Geomagic, 2003a] verwendet, welches am Beginn des Kapitels vorgestellt wird. Anschließend wird der Modellierungsvorgang von der Bearbeitung der Punktwolke über die Triangulierung bis hin zu der Erzeugung des NURBS-Modells erläutert, wobei insbesondere auf die dabei gemachten Erfahrungen eingegangen wird. Am Ende dieses Kapitels wird schließlich das Ergebnis der Modellierung mit der ursprünglichen Punktwolke quantitativ verglichen (mit Hilfe des Programmpakets Geomagic Qualify, das der Qualitätsbeurteilung von geometrischen Modellen dient) und einer kritischen Betrachtung unterworfen.

### 5.1 Das Modellierungs-Software-Paket Geomagic Studio

Die Erfassung von Punkten auf der Oberfläche eines realen Objekts und die anschließende software-gestützte Erzeugung eines digitalen CAD-Modells wird als *Reverse Engineering* bezeichnet [Geometrie, 2003]. Ein Software-Paket, das primär für solche *Reverse-Engineering*-Anwendungen entwickelt wurde, ist Geomagic Studio [Geomagic, 2003a] von der Firma Raindrop Geomagic. Es ermöglicht die Weiterverarbeitung von 3D-Punktwolken, wie sie Laserscanner-Aufnahmen liefern, zu einem Polygonmodell (triangulierte Oberfläche) und anschließend zu einem CAD-Modell, in welchem die Oberfläche durch NURBS-Flächen repräsentiert wird. Das Programmpaket ist vor allem für die Aufgabenstellungen der Fertigungsindustrie konzipiert, eignet sich jedoch auch für geodätische Zwecke. Allerdings merkt man, dass das Programm aus einer anderen Disziplin stammt, da die in Geomagic Studio verfügbaren Werkzeuge aus geodätischer Sicht teilweise anders implementiert worden wären. Außerdem gibt es begriffliche Unterschiede, so wird beispielsweise an Stelle des aus der Photogrammetrie bekannten Begriffes "Orientierung" die Bezeichnung "Registrierung" für die Überführung der einzelnen Scanner-Aufnahmen in ein einheitliches Koordinatensystem verwendet. Geomagic Studio ist modu-

lar aufgebaut, wobei die Funktionen der folgenden drei Module zur Verfügung stehen (siehe auch Abb. 5-1):

- Mit Geomagic Capture können die Rohdaten einer oder mehrerer Laserscanner-Aufnahmen (3D-Punktwolke) importiert und weiterverarbeitet werden.
- Geomagic Wrap ermöglicht die Umwandlung der Punktwolke in ein Polygonmodell (Triangulierung) und dessen Editierung.
- Geomagic Shape erlaubt schließlich die Erzeugung einer CAD-tauglichen NURBS-Oberflächenrepräsentation aus dem Polygonmodell.

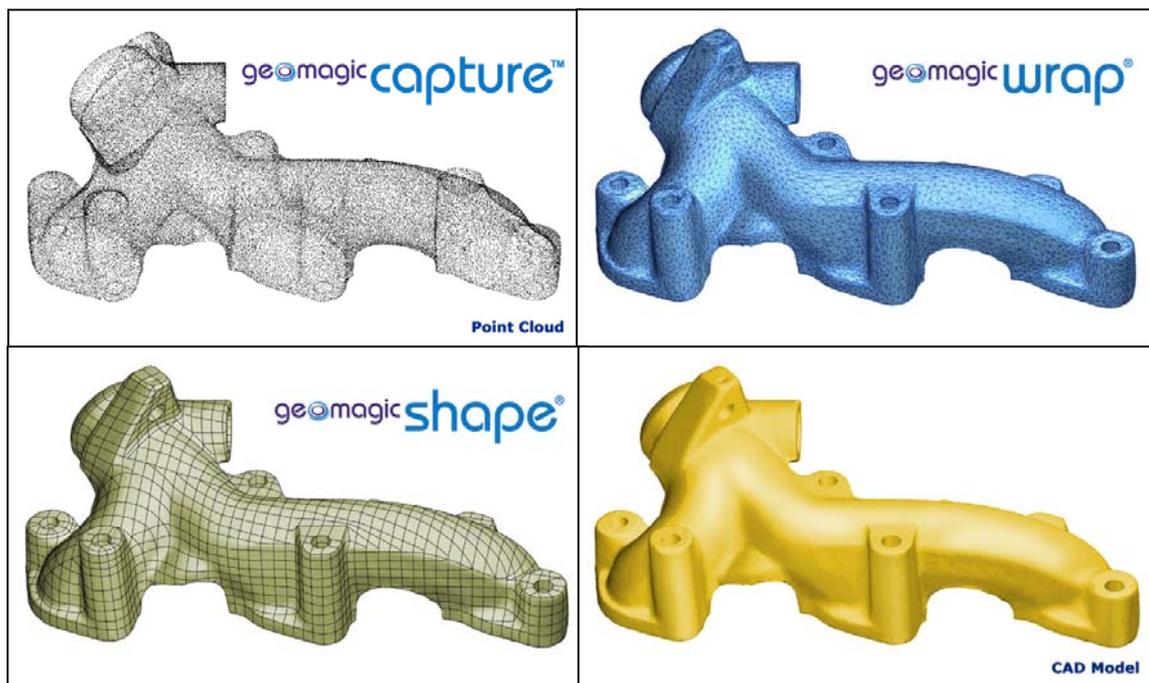


Abb. 5-1: Die drei Module in Geomagic Studio ermöglichen die Verarbeitung der Punktwolke (links oben) zu einer triangulierten Oberfläche (rechts oben) und anschließend die Erzeugung einer NURBS-Oberflächenrepräsentation (links unten). Das resultierende CAD-Modell ist rechts unten dargestellt. [Geomagic, 2003a]

In Geomagic Studio gibt es drei aufeinanderfolgende Phasen der Modellierung, nämlich *Point Phase*, *Polygon Phase*, und *Shape Phase*. Diese drei Phasen entsprechen den oben genannten Modulen.

Der Benutzer hat bei den in Geomagic Studio verfügbaren Funktionen die Möglichkeit, diese durch Wahl bzw. Eingabe von Parametern zu beeinflussen. Diese Parameter sind jedoch meist in Werten angegeben, über deren exakte Bedeutung der Benutzer im Unklaren gelassen wird, d.h. oft sind die Parameter für eine Funktion aus prozentuellen Wertebereichen (ohne Angabe eines Bezugswertes) zu wählen bzw. stehen überhaupt nur einige wenige kryptische Stufen (z.B. *minimum*, *medium*, *maximum* bei der Wahl der Stärke

der Filterung) zur Verfügung. Nichtsdestotrotz lassen sich aus der Arbeit mit diesem Programmpaket Erfahrungen gewinnen, die wissenschaftlich von Interesse sind.

## **5.2 Bearbeitung der 3D-Punktwolke**

In diesem Kapitel wird auf die erste Phase der Modellierung, der Bearbeitung der von den (orientierten) Laserscanner-Aufnahmen erfassten 3D-Punktwolke eingegangen. Ziel dieser Phase ist es, die ursprüngliche Punktwolke durch Anwenden verschiedener Bearbeitungsschritte in eine "triangulierbare" Punktwolke umzuwandeln. Zu diesen Maßnahmen zählen u.a. die Auswahl des (räumlichen) Interessensgebietes, die Elimination von Ausreißern bzw. grob falschen Punkten, das Ausdünnen der Punktwolke (Datenreduktion), und vor allem die Filterung der Punktwolke zum Reduzieren des Messrauschens.

### **5.2.1 Import der Daten und grobe Editierung der Punktwolke**

Vor der eigentlichen Bearbeitung der Punktwolke müssen die orientierten Laserscanner-Aufnahmen in das Modellierungsprogramm Geomagic Studio importiert werden.

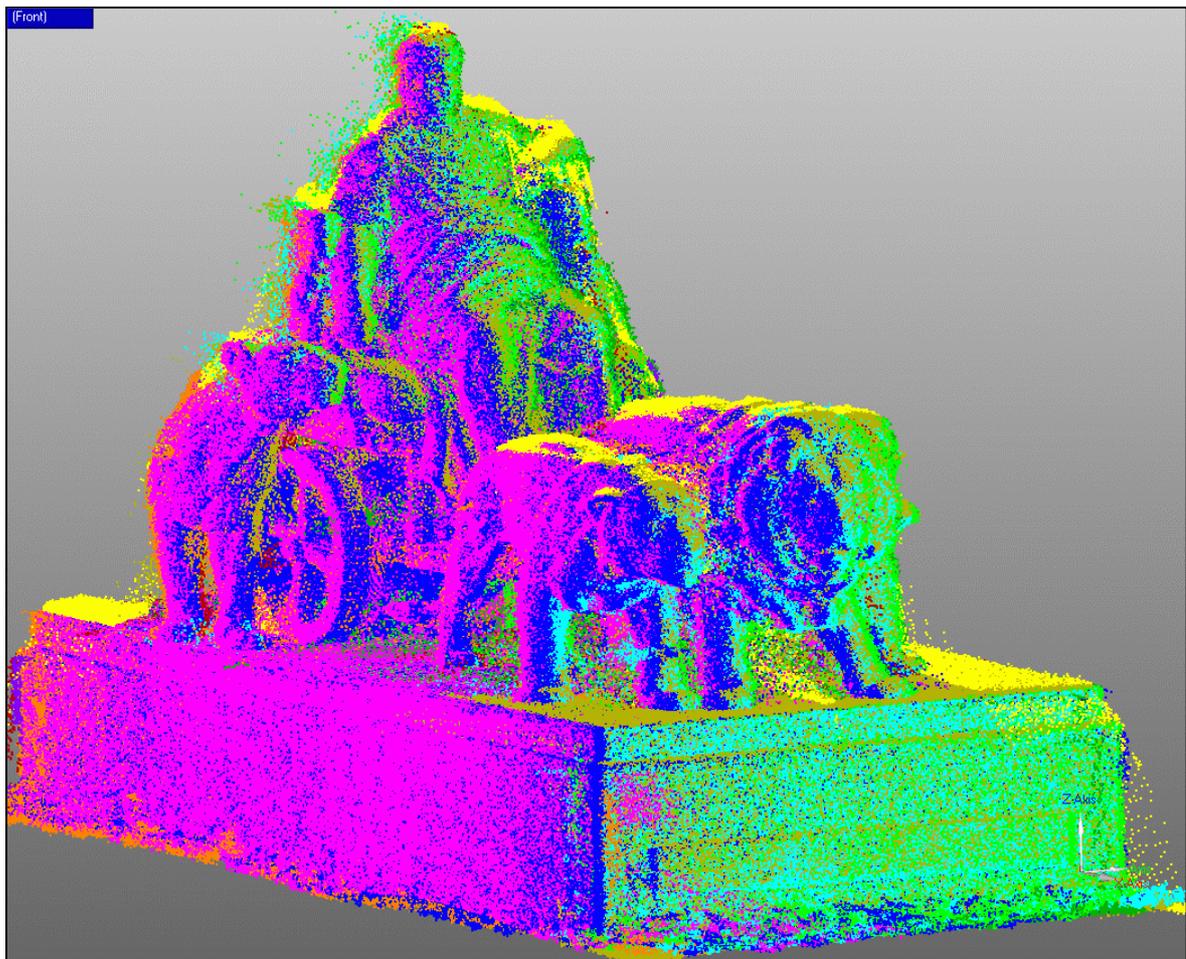
Die Transformationsparameter (Parameter der äußeren Orientierung) der zehn Aufnahmen wurden bereits im Zuge der hybriden Ausgleichung bestimmt (Kap. 4). Die Orientierung der Aufnahmen wäre jedoch alternativ auch in Geomagic Studio mit Hilfe eines ICP-basierten Algorithmus (Kap. 2) möglich gewesen. Mit Hilfe eines Programms wurden die jeweiligen Transformationen auf die zehn Detail-Scans angewandt und die zehn Punktwolken als xyz-Dateien (ASCII) exportiert. Anschließend wurden diese zehn Dateien in das Modellierungsprogramm importiert und als eine wrp-Datei (proprietäres Geomagic-Format) gespeichert. Das Programm Geomagic Studio ermöglicht zwar für einige Laserscanner-Systeme einen direkten Import der Messdaten, jedoch zählt das 3DD-Format der Firma Riegler leider nicht dazu. Das Speichern einer Punktwolke als xyz-Datei führt dazu, dass die durch die Rohdaten-Matrix vorhandene topologische Information (Nachbarschaftsverhältnisse) verloren geht und somit die ursprünglich vorhandene Ordnung der Punktwolke von der Modellierungs-Software nicht mehr erkannt wird.

Seit der Version 5.0 gibt es in Geomagic Studio Funktionen, die speziell für geordnete Punktwolken entwickelt wurden. Dazu zählt beispielsweise die Funktion "*Select Best Data*", welche in Überlappungsbereichen der Scans die Punkte aus dem jeweils geometrisch günstigsten Scan selektiert, wobei als Kriterium der Winkel zwischen dem Laserstrahl und der für den entsprechenden Objektpunkt abgeschätzten Flächennormale herangezogen wird. Ferner sind die Rechenzeiten für Punktwolken mit implizit gespeicherter Topologie deutlich geringer [Geomagic Studio, 2003b], besonders was die Filterung oder die Berechnung der Triangulierung anbelangt. Auch die Qualität dieser Ergebnisse dürfte besser

sein. Wie bereits erwähnt, können diese Vorteile und die zusätzlichen Programm-Funktionen in diesem Fall jedoch nicht genutzt werden.

Da die 3DD-Dateien der zehn Scans jeweils komplett als xyz-Dateien exportiert wurden, war es zunächst notwendig, die ursprüngliche Punktwolke auf das Interessensgebiet (Marc-Anton-Plastik) zu reduzieren. Dies erfolgte mit einem kleinen Programm, das die nichtbenötigten Punkte außerhalb eines koordinativ definierten Interessensquaders eliminierte. Danach mussten noch einige Bereiche (vor allem Punkte auf dem Boden und auf einem über der Plastik hängenden Ast eines in der Nähe vorhandenen Baumes) manuell gelöscht werden, was in Geomagic Studio effizient durchgeführt werden kann. Dadurch wurde die Anzahl der Punkte von ca. 7.4 Millionen auf 4.0 Millionen reduziert.

Die einzelnen Scans können in Geomagic Studio in verschiedenen Farben dargestellt werden (Abb. 5-2).



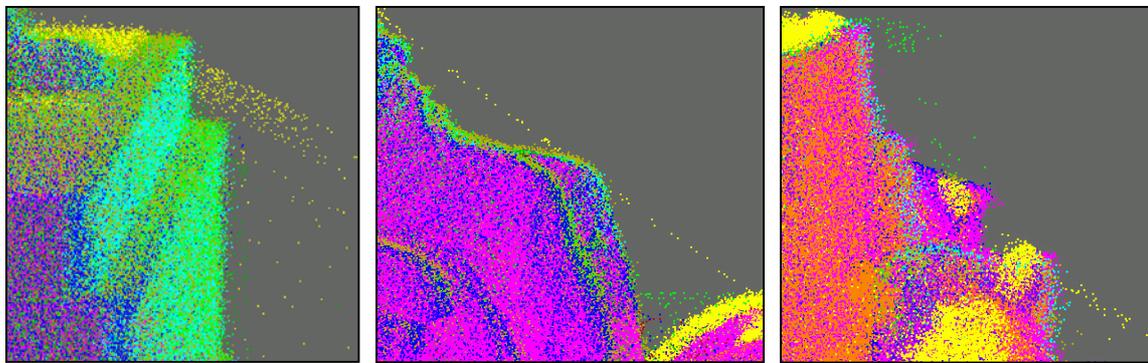
*Abb. 5-2: Grob editierte Punktwolke (jede Farbe entspricht einem der 10 Detail-Scans)*

Wie man mit Hilfe der farblichen Trennung leicht erkennen kann, befinden sich in den einzelnen Scans noch zahlreiche grob fehlerhafte Punkte, die vor allem an den Konturlinien

(bezüglich des jeweiligen Aufnahmestandpunktes) bzw. Kanten auftreten, was auf fehlerhafte (zu große) Distanzmesswerte zurückzuführen ist. Diese kommen durch Mittelung über die vom Laserstrahl jeweils beleuchtete Fläche (*footprint*) zustande. Bei konturnahen Punkten befindet sich ein Teil dieser Fläche im "Hintergrund".

### 5.2.2 Elimination fehlerhafter Punkte im Kanten- bzw. Kontur-Bereich

Im nächsten Schritt sollten möglichst viele dieser fehlerhaften Punkte eliminiert werden, was allerdings manuelle Arbeit bedeutete. Wie jedoch in Abb. 5-3 zu sehen ist, treten diese mit groben Distanzfehlern behafteten Punkten meist in größeren Gruppen und in markanten Strukturen auf, wodurch die optische Fehlersuche erheblich erleichtert wird.



*Abb. 5-3: Gruppen fehlerhafter Punkte aufgrund grober Distanzfehler der Laser-scanner-Aufnahmen entlang der Kontur (bezüglich des jeweiligen Aufnahmestandpunktes)*

Natürlich wäre es sinnvoller, Punkte mit fehlerhaften Distanzen bereits in der Rohdaten-Matrix "abzufangen", allerdings müsste dazu das Entfernungsbild bzw. Intensitätsbild zumindest grob klassifiziert werden, um "unsichere" Punkte in Kontur- bzw. Kantennähe erkennen zu können. Die Entwicklung einer solchen Klassifizierung für ein derart komplexes Objekt hätte jedoch den Rahmen dieser Diplomarbeit gesprengt.

Obwohl Geomagic Studio über eine Funktion zur automatischen Erkennung von Ausreißern verfügt ("*Select Outliers*"), wurden bei deren Anwendung bei weitem nicht alle (augenscheinlich) falschen Punkte eliminiert. Der Grund dafür dürfte darin liegen, dass Gruppen von fehlerhaften Punkten doch noch nahe genug am Objekt liegen, sodass sie gerade nicht als selbständige (fehlerhafte) Komponenten vom Programm erkannt werden. Die Funktion lässt sich zwar über einen Parameter steuern, der definiert, wie weit ein Ausreißer von der Punktwolke entfernt sein darf, um als solcher detektiert zu werden. Allerdings umfasst der Wertebereich des Parameters Werte zwischen 0% und 100%, wobei weder die genaue Bedeutung dieser Prozentwerte noch der dahinter steckende Algorithmus dokumentiert ist. Es gelingt zwar, einen Wert zu finden, der für die Elimination aller falschen Punkte sorgen würde, jedoch hätte dies dann auch das Löschen zahlreicher richtiger

Punkte zur Folge. Deshalb wurde mit dieser Programmfunktion eher vorsichtig umgegangen, d.h. nur verhältnismäßig wenige Punkte eliminiert. Einzelne fehlerhafte Punkte (statistische Ausreißer) wurden vorerst nicht gelöscht, sondern erst später im Zuge der Filterung eliminiert.

Diese grob bereinigte Punktwolke war der Ausgangsdatensatz für die weiteren Verarbeitungsschritte.

### 5.2.3 Unterteilung der Punktwolke in Sockel und eigentliche Plastik

Es erschien sinnvoll, die gesamte Punktwolke bzw. das Objekt in zwei Teilbereiche zu unterteilen, nämlich in den Sockel und die (eigentliche) Plastik. Diese beiden Objektteile weisen aus geometrischer Sicht eine ziemlich gegensätzliche Charakteristik auf. Der Sockel lässt sich aufgrund seiner prismatischen, eckigen Form und seiner relativ scharfen Kanten ohne weiteres durch Ebenen beschreiben. Für die Modellierung der Plastik hingegen werden aufgrund ihrer hohen Komplexität am besten Freiformflächen verwendet.

Als Trennebene zwischen Sockel und Plastik wurde jene Horizontalebene gewählt, die sich ca. 2cm über der Sockeloberfläche befindet, da das Messrauschen der Sockeloberfläche etwa innerhalb eines Bandes von  $\pm 2\text{cm}$  liegt (Abb. 5-4). Innerhalb dieses Rauschens gehen die Punkte der Plastik (z.B. an den Löwenfüßen oder an den Wagenrädern) mehr oder weniger unter.

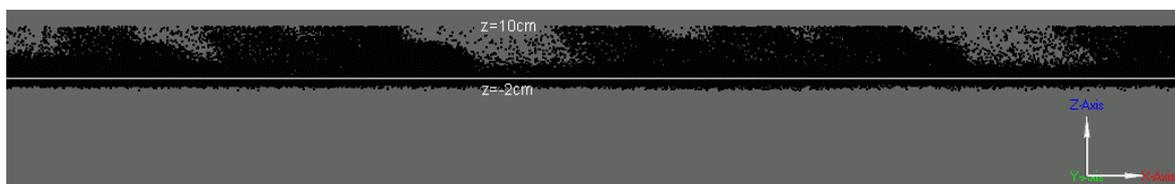
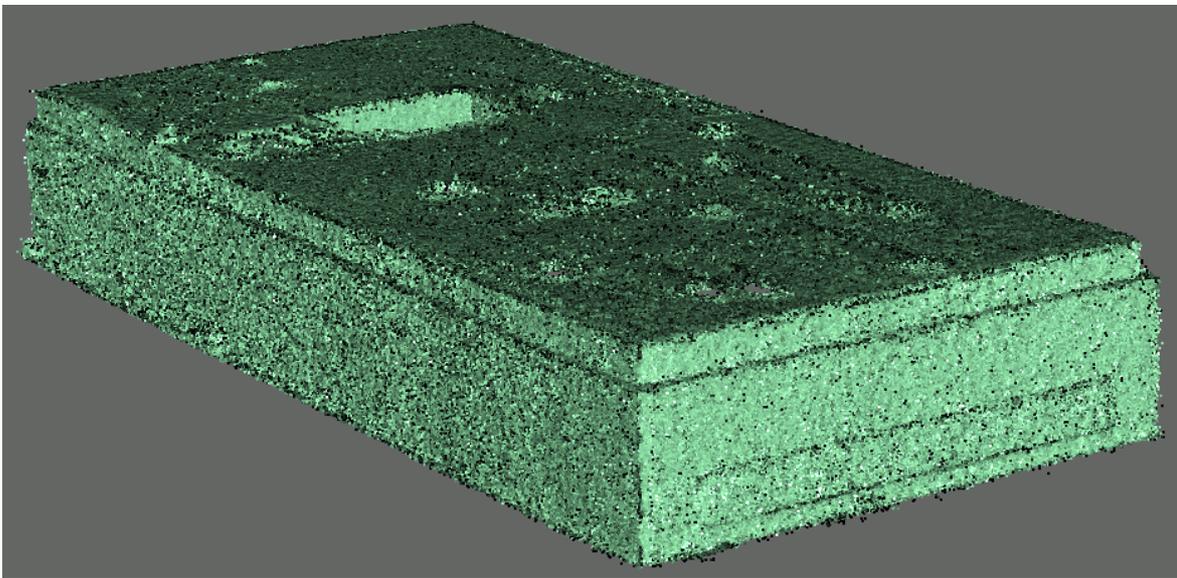


Abb. 5-4: Rauschen an der Sockeloberfläche. Der Bereich der Punktwolke zwischen  $Z=-2\text{cm}$  und  $Z=10\text{cm}$  ist in einem Seitenriss (Blickrichtung positive  $y$ -Achse) dargestellt. Die weiße Linie repräsentiert die (projizierende)  $XY$ -Ebene. Innerhalb eines Bandes von etwa  $\pm 2\text{cm}$  um die  $XY$ -Ebene (Sockeloberfläche) liegt das Messrauschen der Punkte der Sockeloberfläche. Oberhalb dieses Bandes kann man die Löwenfüße erkennen.

Durch die Trennung von Sockel und Plastik konnte die relativ große Datenmenge (ca. 91MB bzw. 4 Millionen Punkte) in etwa zwei gleich große Dateien aufgeteilt werden, wobei außerdem noch jeweils eine homogene Ausdünnung ("uniform sampling") der Punktwolke erfolgte. Im Rahmen dieser Ausdünnung wurde der gesamte Raum in 1cm-Würfel (Voxels) zerlegt, und anschließend in jedem dieser Würfel jeweils alle bis auf einen Punkt gelöscht. Im Falle der Plastik reduzierte sich dadurch die Anzahl der Punkte auf ca. 1.4 Millionen.

### 5.2.4 Modellierung des Sockels durch Ebenen

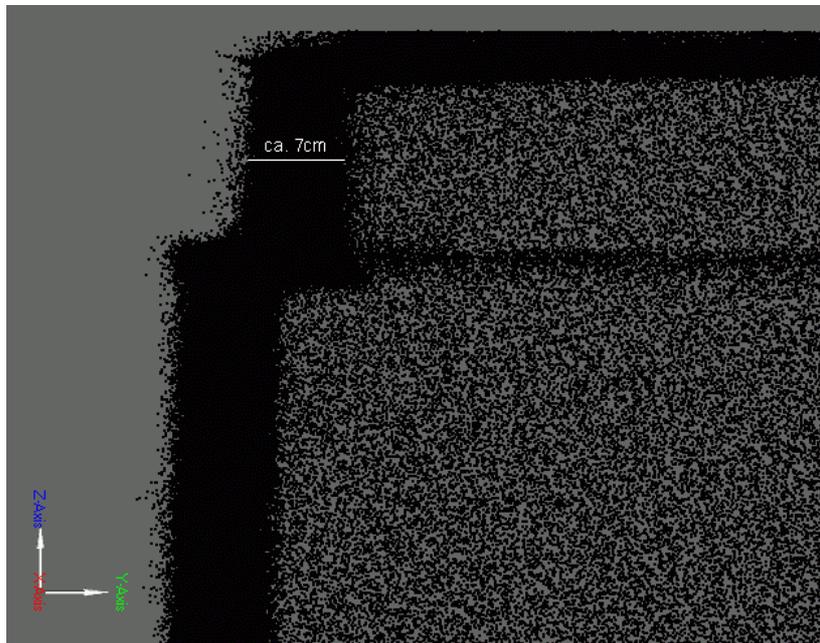
Aufgrund seiner einfachen geometrischen Form ist es zweckmäßig, den Sockel mittels Ebenen zu beschreiben. Dazu gibt es in Geomagic Studio eine Funktion "Detect Planes", bei der die Punktwolke automatisch auf Ebenen untersucht wird, wobei der Nutzer Schwellwert- und Toleranzparameter vorgeben kann. Aufgrund des Rauschens, das im Verhältnis zum Sockelvorsprung relativ groß ist, lieferte diese automatische Ebenensuche kein befriedigendes Ergebnis. Deshalb wurde die halbautomatische Funktion "Capture Plane" für jede Ebene einzeln verwendet, wobei die Ebenen durch den Benutzer intuitiv vorgegeben werden können. Auf Basis von selektierten Punkten des Benutzers, die dieser auf einer gemeinsamen Ebene vermutet, bestimmt diese Funktion die restlichen Punkte auf dieser Ebene und die dazugehörigen Ebenenparameter.



*Abb. 5-5: Schattierte Punktwolke, die den Sockel repräsentiert. Bei Vernachlässigung der Tafel an der Vorderseite (in der Abbildung rechts unten) kann der Sockel durch zehn Ebenen angenähert werden, nämlich durch jeweils vier Seitenflächen oberhalb und unterhalb des Vorsprungs, durch eine annähernd horizontale Ebene in der Höhe des Vorsprungs sowie in der Höhe der Sockel-Deckfläche.*

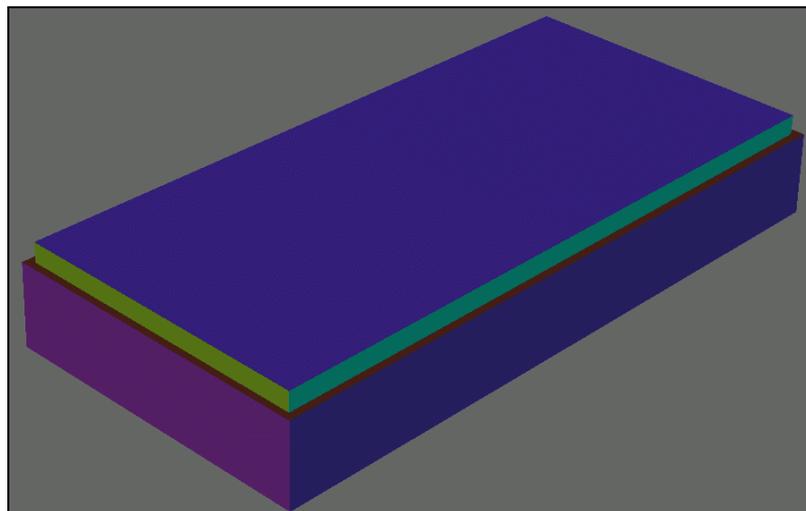
Bei Vernachlässigung der vorne auf der Vorderseite befindlichen Inschrift besteht der Sockel aus insgesamt 10 Ebenen (Abb. 5-5), für welche die Ebenen-Parameter bestimmt werden müssen. Wie die Abb. 5-6 zeigt, sind die Kanten bei den Sockelvorsprüngen aufgrund des Rauschens und der vergleichsweise kleinen senkrechten Flächen kaum visuell zu erkennen. Ausgleichende Ebenen durch diese kleinen Flächen würden stark verfälscht werden (geneigt statt lotrecht). Deshalb wurden die Koordinaten der vier Eckpunkte der Sockeloberfläche aus der Ausgleichung übernommen und die Bedingung eingeführt, dass diese vier Ebenen streng vertikal sein müssen. Für die horizontale Ebene in der Höhe des Vorsprungs standen insgesamt (auf allen vier Seiten) ausreichend viele Punkte für eine

Ausgleichung zur Verfügung. Auch für die vier Seitenflächen unterhalb des Vorsprungs wurde jeweils eine ausgleichende Ebene ermittelt.



*Abb. 5-6: Rauschen im Bereich des Sockelvorsprungs, Blick in Richtung negativer X-Achse. Die Ebenen sind in diesem Bereich besonders schwer zu extrahieren, weil die Seitenfläche im Verhältnis zum Rauschen klein ist. Sowohl die automatische als auch die manuelle Programmfunktion zur Ebenenextraktion scheitern in diesem Fall.*

Schließlich wurden die analytisch bestimmten Ebenen miteinander verschnitten. Das Ergebnis ist in Abb. 5-7 dargestellt.



*Abb. 5-7: Ergebnis der Modellierung des Sockels, bestehend aus insgesamt zehn Ebenen, wobei in dieser Abbildung sechs davon sichtbar sind (in der Höhe des Vorsprungs wurde eine gemeinsame horizontale Ebene bestimmt).*

### 5.2.5 Filterung der Punktwolke

Nachdem die Modellierung des Sockels abgeschlossen war, wurde mit der eigentlichen Aufgabe – der Modellierung der komplexen Oberfläche der Plastik – begonnen. Wie man anhand von Abb. 5-8 erkennen kann, war die ungefilterte Punktwolke noch stark verrauscht. Die Berechnung einer Triangulierung war zu diesem Zeitpunkt daher noch nicht sinnvoll. Auch ein krümmungsbasiertes Ausdünnen (*“Curvature-Based Sampling“*) der Punktwolke war nicht empfehlenswert, da das starke Rauschen die an der Oberfläche lokal abgeschätzten Krümmungswerte verfälschen würde. Laut den Ergebnissen der Varianzkomponentenschätzung im Zuge der hybriden Ausgleichung (Kap. 4) beträgt die Genauigkeit der Distanzmessung in den Detail-Scans 12mm. Allerdings nahmen letztendlich vorwiegend Distanzen zu signalisierten Punkten bei meist günstigem Winkel zwischen Strahl und Flächennormale an der Ausgleichung teil, d.h. für die Massenpunkte dürfte dieser Genauigkeitswert zu optimistisch sein.

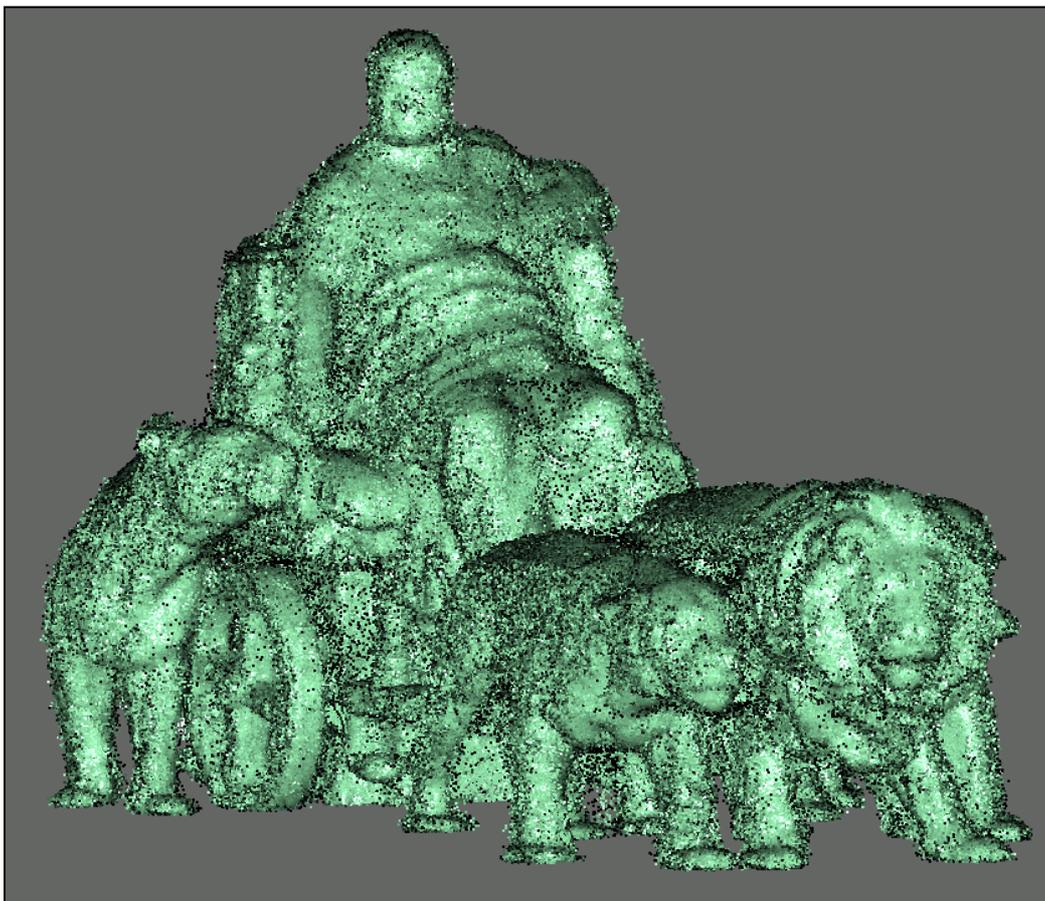


Abb. 5-8: Die ungefilterte Punktwolke ist noch stark verrauscht. Für schwarze Punkte konnte kein Normalvektor abgeschätzt und folglich kein Farbwert für die Schattierung ermittelt werden.

Das Filtern in Geomagic Studio (*“Reduce Noise“*) ist leider nur als Black Box verfügbar, da so gut wie nichts über den verwendeten Filterprozess preisgegeben wird. Auch der Einfluss des Benutzers auf die Filterung ist sehr gering, denn es besteht lediglich die Möglichkeit, die Stärke der Filterung durch Wahl von *“minimum“*, *“medium“*, *“maximum“* festzulegen und die Charakteristik des Objekts auszuwählen, auf das die Filterung anzuwenden ist (*“prismatic“* oder *“free-form“*). Die Einstellung *“prismatic“* ist für Objekte mit mehreren scharfen Kanten wie beispielsweise Werkstücke zu wählen (Geomagic Studio, 2003b). Die komplexe Plastik hat jedoch – wie bereits erwähnt – den Charakter einer Freiformfläche. Deshalb bleibt für die Einstellung der Filterung nur die Wahl der Filterungsstärke aus den oben angegebenen drei Möglichkeiten übrig.

Mangels Dokumentation des Filterprozesses war es notwendig, die für das Objekt beste Einstellung durch Ausprobieren zu finden. Die Beurteilung der Ergebnisse nach Ausprobieren der Filterung erfolgte dabei jeweils visuell durch Betrachten der schattierten Punktwolke und vor allem der daraus berechneten Triangulierung, da man anhand dieser am besten erkennen konnte, ob noch ein Filterungsvorgang notwendig war, oder ob die Filterung bereits übertrieben stark war. Das Rauschen erwies sich dabei als derartig stark, dass eine einmalige Filterung – selbst bei der Einstellung *“maximum“* – nicht ausreichte. Dreimaliges Filtern (jeweils *“maximum“*) mit jeweils anschließender Ausreißerelimination (*“Select Outliers“*) stellte sich als guter Kompromiss zwischen Reduzieren des starken Rauschens und Erhaltung der Details heraus (siehe Tab. 5-1 und Abb. 5-9,3a).

	Maximale Abweichung [mm]	Mittlere Abweichung [mm]	Standardabweichung [mm]	Anzahl der eliminierten Punkte	Gesamtanzahl der Punkte an der Oberfläche der Plastik
					1,363,064
<b>1.Filterung</b>	27.5	6.9	4.9		
Ausreißersuche				53,410	
					1,309,654
<b>2.Filterung</b>	23.6	3.5	3.1		
Ausreißersuche				22,855	
					1,286,799
<b>3.Filterung</b>	25.7	1.3	1.4		
Ausreißersuche				7,070	
					1,279,729

Tab. 5-1: Statistik (Ausgabe von Geomagic Studio) der drei aufeinanderfolgenden Filterungen der Punktwolke und Anzahl der eliminierten Punkte bei der jeweilig anschließenden Ausreißersuche.

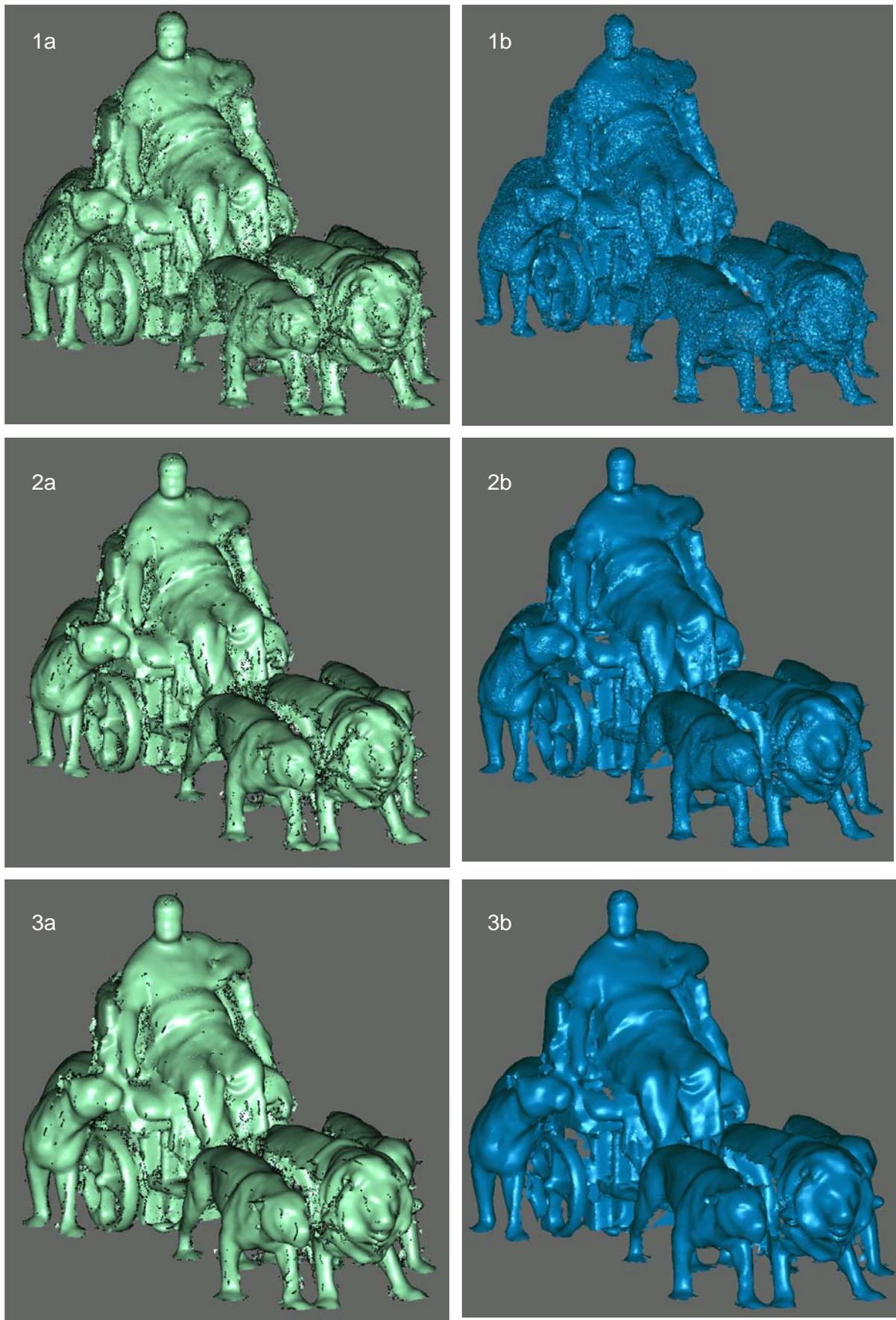


Abb. 5-9: Schattierte Punktwolke und Triangulierung nach mehreren Filterungsschritten (Beschreibung siehe Text)

Die Abbildung 1a zeigt die schattierte Punktwolke nach der ersten durchgeführten Filterung einschließlich Ausreißerelimination. Anhand der schwarzen Punkte – für diese Punkte konnte kein Normalvektor für die Ermittlung der Schattierung abgeschätzt werden – kann man die Stärke des Rauschens visuell erkennen. Die Abbildungen 2a bzw. 3a zeigen die Punktwolke nach Durchführung der 2. bzw. der 3. Filterung (wieder jeweils mit Ausreißerelimination). In den Abbildungen 1b bis 3b sind die zu den jeweiligen Punktwolken dazugehörigen Triangulierung zu sehen, für deren Berechnung jedoch die Punktwolken zuvor auf 25% (vgl. nächster Absatz) ausgedünnt wurden, um Rechenzeit zu sparen. Die Triangulierung (und die dazugehörige Schattierung) gibt dem Benutzer eine gute Möglichkeit, die Stärke des Rauschens visuell zu beurteilen.

Nach der Filterung wurde die Punktwolke mittels krümmungsbasierter Ausdünnung (*“Curvature-Based Sampling“*) auf 25% der Punkte reduziert (auf ca. 320,000 Punkte). Dabei wurden von Geomagic Studio lokale Krümmungswerte berechnet und Punkte in stärker gekrümmten Bereichen der Oberfläche eher beibehalten, während Punkte in schwächer gekrümmten Bereichen entsprechend reduziert wurden. Damit konnte die Punktphase verlassen und in die Polygonphase übergegangen werden.

### **5.3 Bearbeitung der Triangulierung**

Obwohl die Punktwolke durch die eben beschriebenen Maßnahmen auf die Triangulierung vorbereitet wurde, gibt es vor allem in der Nähe von Datenlöchern bzw. an Kleinstrukturen (klein im Verhältnis zur Scan-Auflösung) immer noch fehlerhafte Punkte bzw. falsche Dreiecksvermaschungen aufgrund fehlender Zwischenpunkte. Der folgende Abschnitt befasst sich mit dieser Problematik sowie mit der Verbesserung dieser Triangulierungsfehler.

#### **5.3.1 Problematik von Datenlöchern bzw. unzureichend erfassten Kleinstrukturen**

Die ursprüngliche Triangulierung, die unmittelbar aus der bearbeiteten Punktwolke berechnet wurde (Dauer ca. 5-10min), ist bereits für den Großteil der Objektoberfläche recht zufriedenstellend. Es gibt allerdings noch zahlreiche Fehler in der Triangulierung, die auf falsche bzw. überhaupt fehlende Punkte (Datenlöcher) zurückzuführen sind. Bevor auf diese Problematik eingegangen wird, soll noch auf einen anderen im Zuge der Triangulierung aufgetretenen Fehler eingegangen werden. Anhand Abb. 5-10 kann man erkennen, dass die drei vorderen Löwen der Plastik im Zuge der Triangulierung zusammengewachsen sind, d.h. das Programm behandelt diese drei Löwen als eine einzige zusammenhängende Oberfläche des Objekts. Aufgrund einer Verdrehung des Normalvektors zwischen zwei Löwen kehrt sich die Orientierung der Oberfläche an einem gesamten Löwen um.

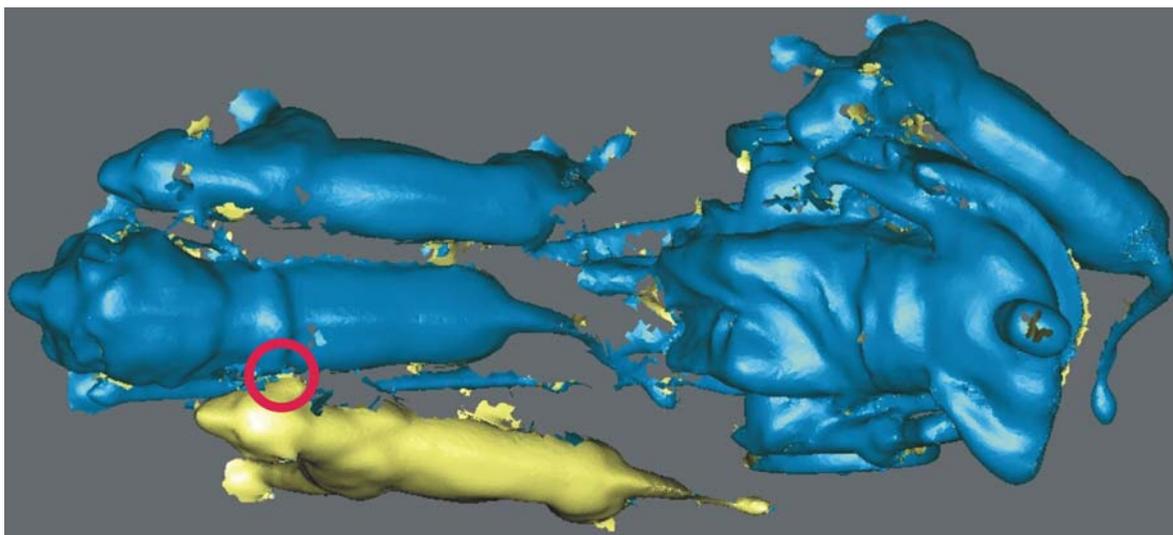


Abb. 5-10: Uneditierte Triangulierung. Die Dreiecke werden hier von Geomagic Studio auf der Außenseite der Oberfläche blau und auf deren Innenseite gelb dargestellt. Die drei Löwen werden vom Programm für eine gemeinsame Komponente des Objekts gehalten. Im Bereich der eingezeichneten ringförmigen Markierung (zwischen zwei Löwen) kehrt sich die Orientierung des Flächennormalvektors um, wodurch ein gesamter Löwe an der Außenseite seiner Oberfläche fälschlicherweise gelb dargestellt wird.

Dieser Fehler konnte relativ einfach durch manuelles Löschen der falschen (die Löwen verbindenden) Dreiecke behoben werden.

Wie sich anhand von Abb. 3-5 (Aufnahmeanordnung) erahnen lässt, werden durch die zehn Laserscanner-Detailaufnahmen bei weitem nicht alle Teile des Objekts erfasst (aufgrund sichttoter Räume). Vor allem an den Unter- bzw. Innenseiten der Löwenkörper sowie im Bereich zwischen den Wagenrädern treten daher Datenlöcher auf (Abb. 5-11).

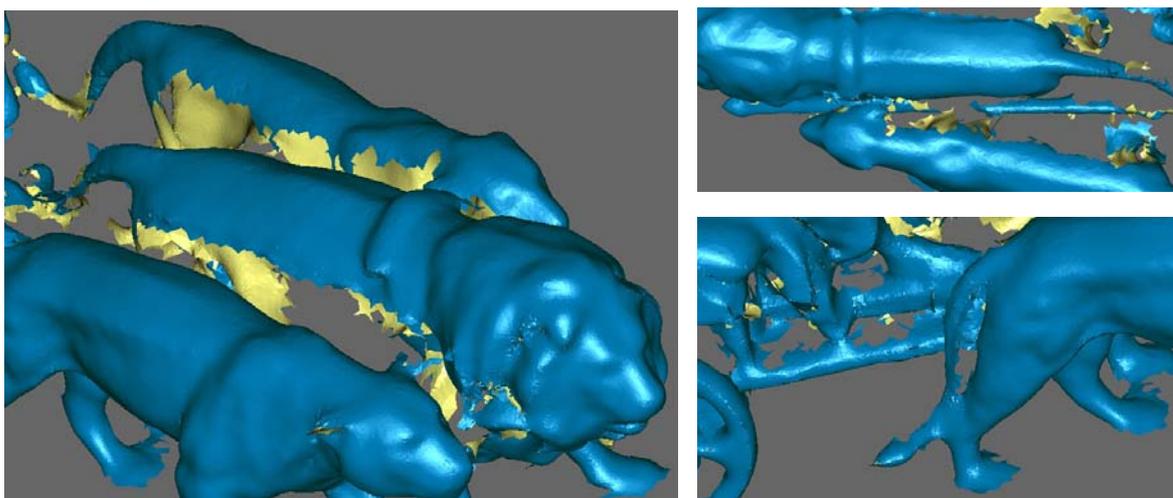


Abb. 5-11: Datenlöcher an der Innen- und Unterseite der Löwenkörper (links), unvollständig erfasstes Gestänge des Löwengespanns (rechts oben) sowie Löwenschwanz, der – aufgrund fehlender Daten an der Innenseite – mit dem Löwenbein “zusammengewachsen“ ist (rechts unten).

Wesentlich unangenehmer als solche großräumigen, gut abgegrenzten Datenlöcher sind allerdings Bereiche (meist Kleinstrukturen wie die Schwänze der Löwen oder das feine Gestänge des Löwengespanns), die unvollständig bzw. unzureichend (aufgrund der für diese Strukturen zu großen Winkelschrittweite des Scanners) aufgenommen wurden (Abb. 5-11). In solchen Fällen muss man (von Fall zu Fall) entscheiden, ob diese Bereiche – falls überhaupt möglich – rekonstruiert oder vernachlässigt werden sollen.

### 5.3.2 Nachbearbeitung der Triangulierung

Geomagic Studio bietet zwar vollautomatische Funktionen zum Verbessern der Triangulierung an, jedoch stellte sich heraus, dass – zumindest was den vorliegenden Datensatz betrifft – diese kaum kontrollierbar sind und oft zu falschen Ergebnissen führen (bei den “schönen“ Testdatensätzen der Demonstrationsbeispiele sind diese Funktionen hingegen sehr gut anwendbar). Das bedeutet, dass die Nachbesserung der Triangulierung mit Hilfe der halbautomatischen Werkzeuge des Programms durchgeführt werden mussten. Zunächst wurden allerdings die offensichtlichen, gravierenden Triangulierungsfehler durch manuelles Löschen der entsprechenden Dreiecke beseitigt. Um den Aufwand für das Nachbessern der Triangulierung in Grenzen zu halten, wurde die Anzahl der Dreiecke mittels der Funktion “*Decimate Polygons*“ auf etwa die Hälfte reduziert (von ca. 615,000 auf ca. 307,000). Dabei wurde der “*shape preservation*“-Modus verwendet, bei dem die Gesamtform des Objekts möglichst erhalten bleiben soll [vgl. Geomagic, 2003b]. Es gingen fast keine Details verloren, da ja die Dreiecke bereits eine Oberfläche repräsentierten, und benachbarte Dreiecke in näherungsweise gleicher Ebene zusammengefasst werden konnten.

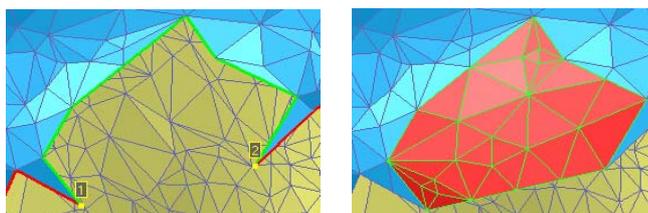


Abb. 5-12: Schließen partieller Löcher durch krümmungsbasierte Interpolation. Die Außenseite der Fläche ist blau, die Innenseite gelb dargestellt. Die neu hinzugefügten Dreiecke sind rot hervorgehoben.

Bei der zeitintensiven, weil mit relativ hohem manuellem Aufwand verbundenen Nachbearbeitung der Triangulierung wurden vor allem Löcher bzw. partielle Löcher (Abbildungen 5-12 und 5-13) geschlossen, die Oberfläche lokal geglättet (Abb. 5-14), Spitzen (*spikes*) entfernt bzw. falsche Dreiecke entfernt, Dreiecke in krümmungsarmen Bereichen reduziert, in stark gekrümmten Bereichen hingegen die Dreiecksvermaschung verfeinert, und ähnliche Maßnahmen durchgeführt. Sofern Löcher in der Triangulierung nicht zu groß

sind (im Verhältnis zu den lokalen Krümmungsverhältnissen), können diese analog zu den partiellen Löchern durch krümmungsbasierte Interpolation gefüllt werden. Allerdings ist zu beachten, dass bei zu großen Löchern diese Methode versagt, da es in diesem Fall zu einem unerwünschten Ausschwingen bzw. bei großen partiellen Löchern zu deutlichen Fehlern aufgrund von Extrapolationen kommen kann.

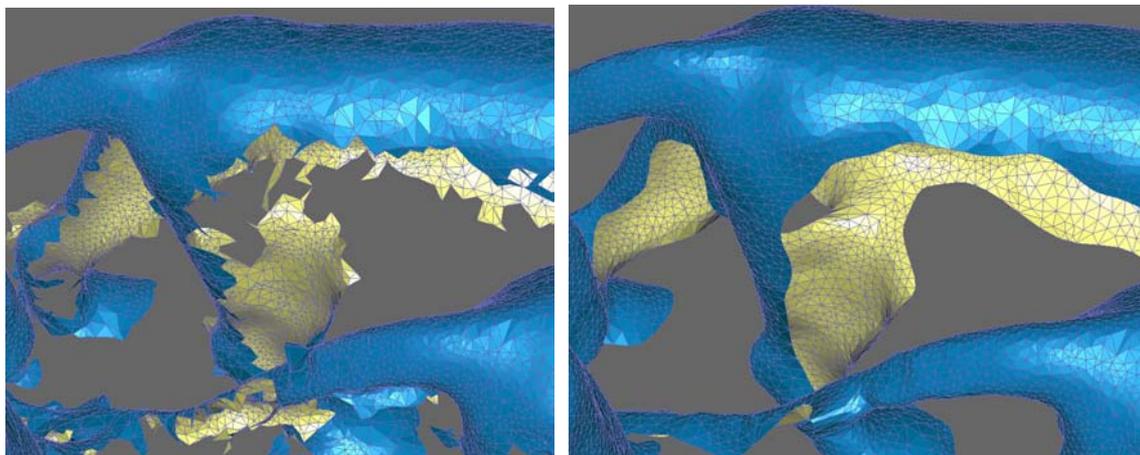


Abb. 5-13: Glätten des Randes der Datenlöcher durch Schließen partieller Löcher und Bearbeiten der Randkurve.

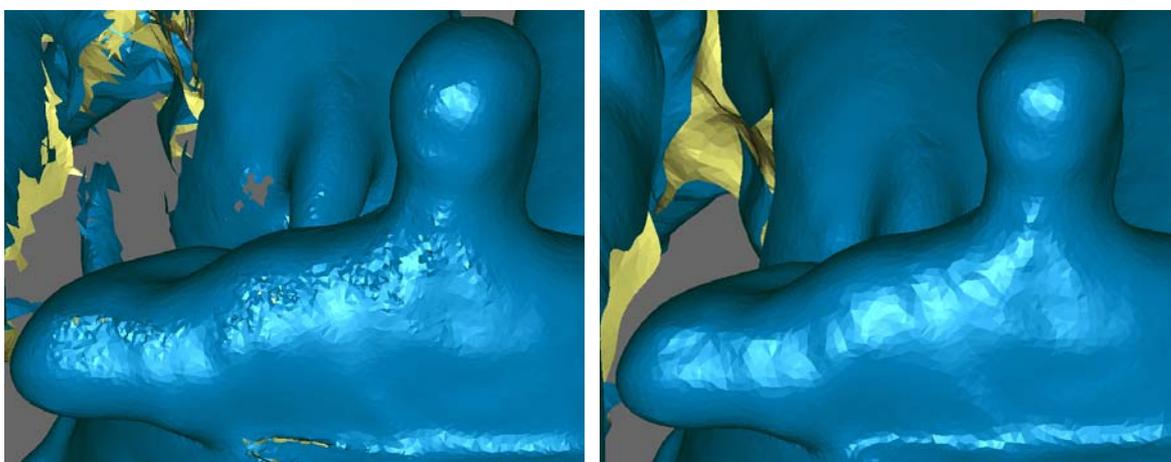


Abb. 5-14: Lokales Glätten der Oberfläche mittels der in Geomagic Studio 5.0 verfügbaren "Sandpaper"-(Schleifpapier-)Funktion

Der hohe Aufwand bei der Nachbearbeitung der Triangulierung ist jedoch reduzierbar, wenn die zugrunde liegende Punktwolke davor bereits entsprechend bereinigt werden kann (z.B. durch Kenntnis der Topologie und Auswahl der besten Daten (vgl. Kap. 5.2.1)). Nachdem die Nachbearbeitung der Triangulierung abgeschlossen war, wurde die Anzahl der Dreiecke neuerlich auf die Hälfte reduziert und noch kleine Ausbesserungen ausgeführt. Am Ende der Polygonphase wurde die Oberfläche der Plastik schließlich durch 79,634 Punkte und 155,762 Dreiecke modelliert (Abb. 5-15). Mit dieser Oberflächenrepräsentation wurde in die dritte Modellierungsphase (*shape*-Phase) übergegangen.

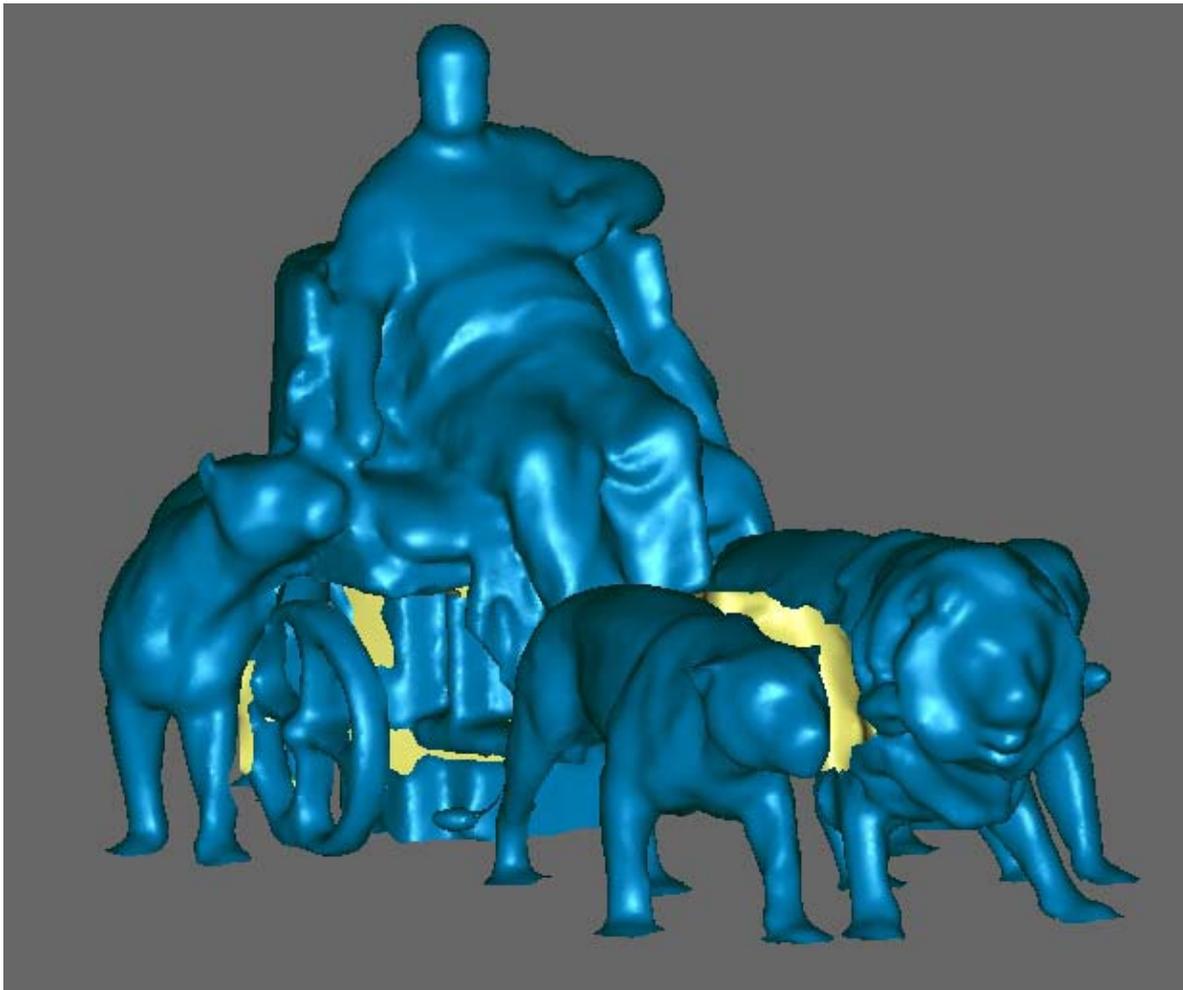


Abb. 5-15: Endergebnis der Triangulierung. Große Datenlöcher wurden nicht geschlossen, um großräumige Extrapolationen zu vermeiden.

## 5.4 Beschreibung der Objektoberfläche durch NURBS

Dieses Kapitel befasst sich mit der Erstellung einer NURBS-(*Non Uniform Rational B-Splines*-)Oberflächenrepräsentation des Objekts auf Basis der Triangulierung. Zunächst folgt ein kurzer allgemeiner Abschnitt über die Modellierung mit NURBS. Anschließend wird auf die Erstellung des sogenannten *Patch*-Layouts zur Segmentierung der Oberfläche und schließlich auf das Ergebnis der NURBS-Modellierung eingegangen.

### 5.4.1 Allgemeines zur Modellierung mit NURBS

NURBS-(*Non Uniform Rational B-Splines*-)Flächen zählen zur Gruppe der Tensor-Produkt-Flächen [Hoschek und Lasser, 1989]. Diese entstehen durch Bewegung einer Kurve durch den Raum, wobei auch Deformationen der Kurve erlaubt sind. Bei den NURBS-Flächen sind dies NURBS-Kurven. Sie sind die allgemeinsten Arten von Kurven und eignen sich daher gut zur Beschreibung von Freiformkurven [Hoschek und Lasser,

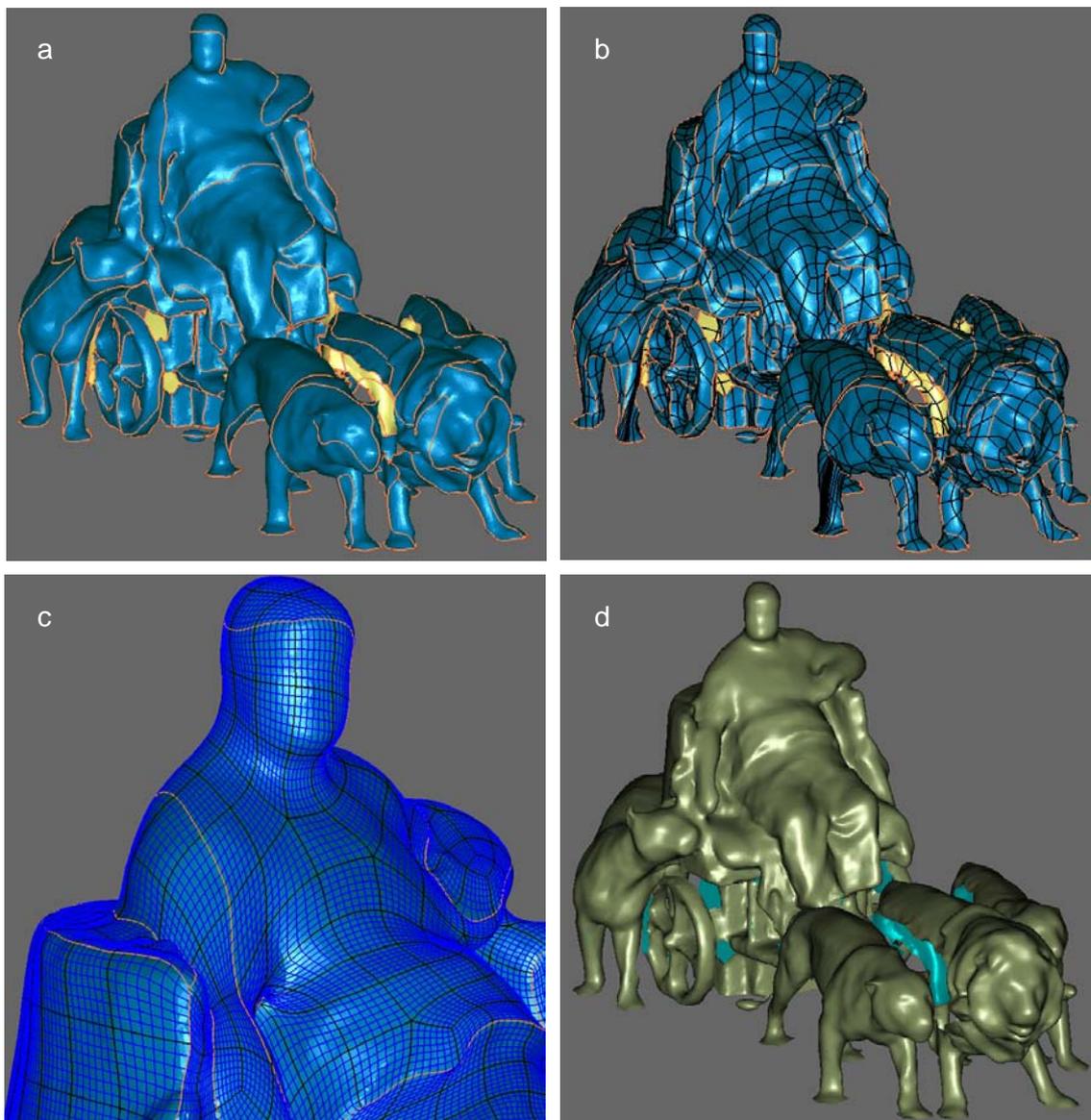
1989]. “*Non Uniform*“ bedeutet, dass die Abstände zwischen den Werten des Kontrollvektors nicht konstant sind. “*Rational*“ heißt, dass der Einfluss eines Kontrollpunktes über ein Gewicht gesteuert wird, welches sich aus dem Quotienten zweier Polynome ergibt. *B-Splines* (Basis-*Splines*) weisen gegenüber Bézier-Kurven, die ebenfalls für die Darstellung von Freiformkurven verwendet werden, u.a. den Vorteil auf, dass sie lokal definiert sind, d.h. die Änderung eines Punktes des dazugehörigen Kontrollpolygons ändert den Kurvenverlauf nur lokal [Hoschek und Lasser, 1989].

NURBS-Flächen stellen – im Gegensatz zur Triangulierung – eine kontinuierliche Oberflächenrepräsentation dar. Allerdings reicht eine einzige NURBS-Fläche i.a. nicht aus, um die gesamte Objektoberfläche zu beschreiben. Die Oberfläche des Objekts muss daher in mehrere Flächenstücke (sogenannte “*Patches*“) segmentiert werden, wobei für jedes *Patch* jeweils eine NURBS-Fläche (meist niedrigen Grades) so zu bestimmen ist, dass die Abweichung zwischen analytischer Fläche und Messdaten minimiert wird. Ein solches *Patch* wird i.a. über einem rechteckigen Parametergebiet definiert. Innerhalb der definierten Grenzen ist das NURBS-Oberflächenmodell differenzierbar. Entlang der *Patch*-Grenzen hingegen ist die Differentiation nur näherungsweise möglich ( $\epsilon$ -Stetigkeit) [Pfeifer, 2002]. Die Oberflächenrepräsentation mittels NURBS braucht normalerweise weniger Speicherplatz als die Triangulierung, da die einzelnen *Patches* durch verhältnismäßig wenige Parameter beschrieben werden können.

#### 5.4.2 Erstellen des Patch-Layouts und Berechnen des NURBS-Modells

Das *Patch*-Layout (Segmentierung der Oberfläche) ist die Grundlage für die Berechnung des NURBS-Modells. Der erste Schritt zur Erstellung des *Patch*-Layouts ist das Auffinden jener Kurven, an denen die Krümmung besonders stark ist. Diese Kurven heißen in Geomagic Studio “*Contour Lines*“. Diese werden durch das Programm so bestimmt, dass diese ein Netzwerk bilden. Mit Hilfe eines Parameters (*Curvature Level*) kann die für die *Contour Lines* notwendige Stärke der Krümmung vorgegeben werden. Aus den *Contour Lines* kann automatisch ein *Patch*-Layout (mit viereckigen *Patches*) abgeleitet werden, wobei die *Contour Lines* gleichzeitig als *Patch*-Grenzen dienen. Bei Bedarf können sowohl die *Contour Lines* als auch das *Patch*-Layout manuell editiert werden. Es wäre auch möglich, das *Patch*-Layout von Anfang an manuell zu gestalten. Der nächste Schritt ist die Konstruktion einer (viereckigen) Gitterstruktur innerhalb der einzelnen *Patches* mit Hilfe der Programmfunktion “*Construct Grids*“, wobei der Parameter “*Grid Resolution*“ für die Auflösung des Gitters gewählt werden kann. Falls notwendig, können auch noch scharfe Kanten, die erhalten werden sollen, als solche gekennzeichnet werden. Schließlich wird auf Basis der *Patches* und der Gitterstrukturen mit Hilfe der Funktion “*Fit Surfaces*“ das NURBS-Modell erzeugt.

Aufgrund der Komplexität der Marc-Anton-Plastik und dem damit verbundenen hohen Zeitaufwand wurde auf das manuelle Erstellen bzw. Editieren des *Patch-Layouts* verzichtet und stattdessen die seit der Version 5.0 verfügbare Programmfunktion „*Auto Surface*“ verwendet. Durch Eingabe entsprechender Parameter lässt sich damit automatisch aus dem Polygonmodell (Triangulierung) direkt das NURBS-Modell (Abb. 5-15) erstellen, wobei die notwendigen Zwischenschritte wie Auffinden der *Contour Lines* (Abb. 5-15,a), Erstellung des *Patch-Layouts* (Abb. 5-15,b) und des Gitternetzes (Abb. 5-15,c) sowie schließlich die Berechnung der NURBS-Flächen (Abb. 5-15,d) unmittelbar hintereinander in einem Batch-Prozess durchgeführt werden.



(a) Contour Lines, (b) Patch-Layout, (c) Gitternetz, (d) NURBS-Modell

Abb. 5-16: Notwendige Schritte zur Erzeugung eines NURBS-Oberflächenmodells aus einem Polygonmodell (Triangulierung). Hierfür wurde in diesem Fall die in *Geomagic Studio 5.0* verfügbare Programmfunktion „*Auto Surface*“ verwendet.

## 5.5 Beurteilung der Ergebnisse und gewonnene Erkenntnisse

Wie man anhand von Abb. 5-15d erkennen kann, ist das Ergebnis der automatischen NURBS-Modellierung durchaus zufriedenstellend. Allerdings gibt es einige Problemstellen wie z.B. die Ohren der Löwen oder ähnlich feine Details. Diese Stellen werden durch die NURBS-Flächen teilweise stark abgerundet. Durch manuelles Editieren (lokale Verdichtung der *Patches*) könnte dies behoben werden, was allerdings einen ziemlich hohen zeitlichen Aufwand erfordern würde. Die Details können zwar auch durch Verfeinerung des Gitters besser erhalten werden, jedoch wirkt diese Verfeinerung global, sodass auch bei den schwach gekrümmten großen *Patches* eine (unnötige) Erhöhung der Gitterlinien erfolgt. Unter Verwendung der Default-Werte für die Funktion "Auto Surface" wurden 3,293 *Patches* erzeugt, was letztendlich eine Dateigröße von 205MB für die NURBS-Darstellung verursachte. Im Vergleich dazu beträgt die Dateigröße des Polygonmodells nur 26MB. Die im vorigen Kapitel erwähnte Datenreduzierung wurde somit ad absurdum geführt. Betrachtet man das *Patch*-Layout (Abb. 5-15,b) etwas genauer, so fällt auf, dass sich am rechten Vorderbein des rechten vorderen Löwen zahlreiche *Patches* nebeneinander befinden, was natürlich völlig unnötig ist. Überhaupt würde man als Mensch insgesamt deutlich weniger *Patches* erzeugen und in den zuvor erwähnten kritischen Bereichen das *Patch*-Layout intelligenter gestalten. Dieses Objekt ist höchstwahrscheinlich zu komplex für das automatische Generieren des *Patch*-Layouts, denn bei den (geometrisch einfacheren) Datensätzen der Geomagic-Studio-Demonstrationsbeispiele liefert diese automatische Funktion fast gleich gute Ergebnisse wie die manuelle Bearbeitung. Natürlich hängt die notwendige Qualität der Modellierung letztendlich davon ab, für welchen Zweck man das Modell benötigt.

Die Abbildung 5-17a zeigt die mittels Geomagic Qualify 5.0 berechneten Abweichungen des Polygonmodells (Triangulierung) von der grob editierten Punktwolke. Die mittlere Distanz der Punkte zum Modell beträgt 12mm und die Standardabweichung dieser Differenzen beträgt 13mm. Da in der grob editierten, aber ungefilterten Punktwolke – wie bereits erwähnt – noch fehlerhafte Punkte enthalten sind, gibt es maximale Differenzen von 28cm zwischen Punktwolke und Triangulierung. Jene Details, die der starken Filterung zum Opfer gefallen sind, wie z.B. die Augenhöhlen der Löwen oder die Nase des Marc Anton, sind in dieser farbkodierten Darstellung erkennbar.

In Geomagic Studio lassen sich die Triangulierung und die NURBS-Oberfläche gleichzeitig anzeigen, wodurch ein grober visueller Vergleich gegeben ist (siehe Abb. 5-17,b).

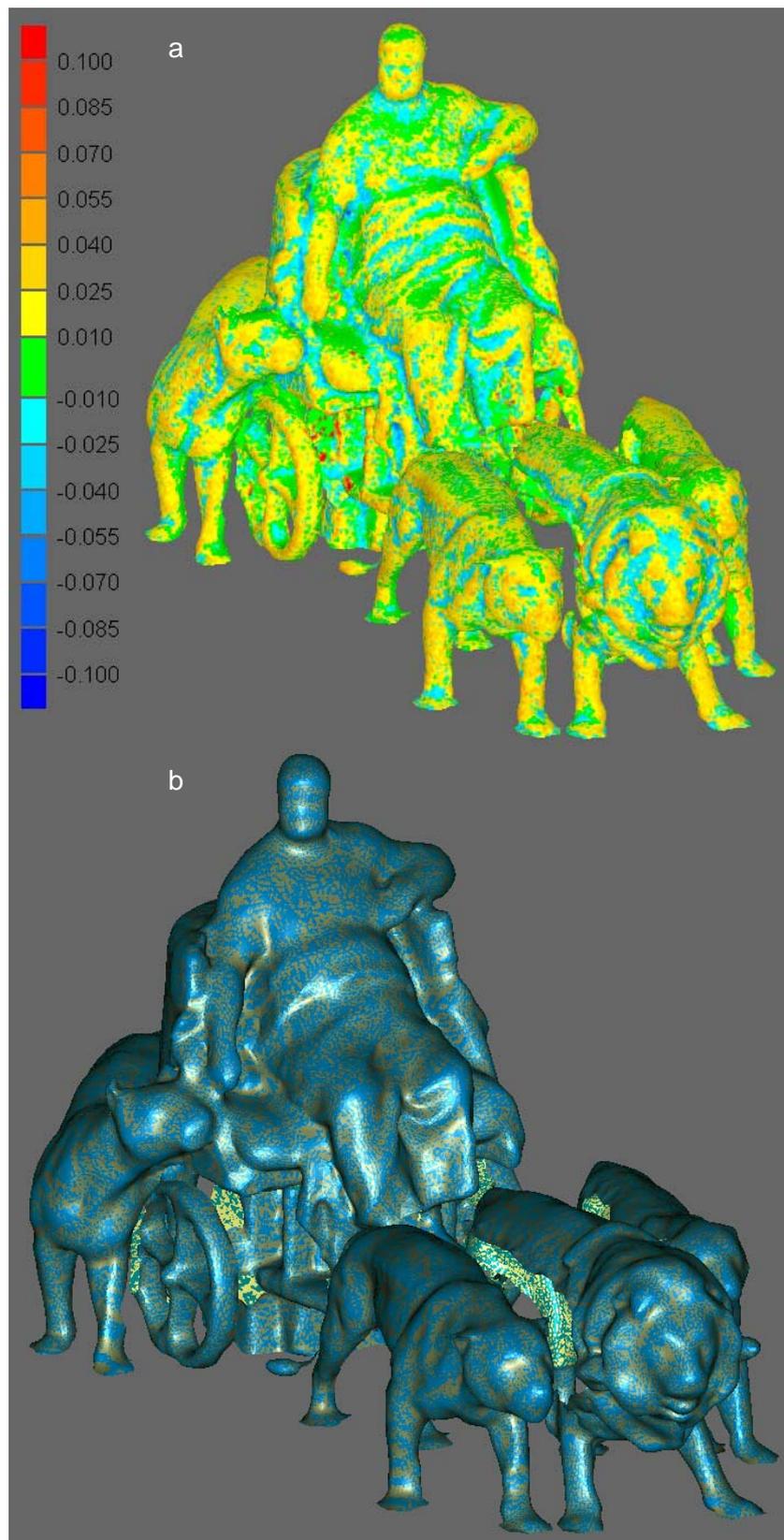


Abb. 5-17: (a) Farbkodierte Abweichungen zwischen der grob editierten, ungefilterten Punktwolke und der Triangulierung, (b) Überlagerung der Triangulierung mit dem NURBS-Modell

Abschließend folgen noch zusammenfassend einige Bemerkungen zu den Erfahrungen mit der Modellierung der Objektoberfläche (insbesondere mit dem Programmpaket Geomagic Studio) und den daraus gewonnen Erkenntnissen:

Den meisten Zeitaufwand für die Modellierung beanspruchte allein das Ausprobieren der Programmfunktionen und das Herausfinden der notwendigen Schritte bzw. deren Reihenfolge sowie der passenden Parameter. Der Grund dafür ist – wie schon erwähnt – die vage Dokumentation der zur Verfügung stehenden Werkzeuge (Black Box).

Andererseits gibt es kein allgemeines Patentrezept für die auszuführenden Modellierungsschritte, da diese Schritte sowohl von der Qualität der Messdaten (Auflösung, Genauigkeit) bzw. der Aufnahmekonfiguration als auch von der Komplexität des zu modellierenden Objekts abhängig sind. Beispielsweise sind die für die Modellierung einer Fassade notwendigen Maßnahmen mit Sicherheit andere als jene, die für dieses Objekt verwendet wurden. Des weiteren hat natürlich auch der vorgesehene Anwendungszweck des Modells einen gewissen Einfluss auf die für die Modellierung zu wählenden Bearbeitungsschritte, vor allem, inwiefern die Details erhalten werden müssen (Vollständigkeit).

Die Hauptschwierigkeit bei der Modellierung dieses Objekts war das (relativ zur Objektdimension) starke Messrauschen kombiniert mit einer komplexen Objektgeometrie. Bei der Modellierung der Punktwolke im Rahmen von Geomagic Studio gehen nicht die Herstellerangaben bezüglich der Genauigkeiten ein, was aber besonders für den Filterungsprozess wünschenswert wäre. Deshalb wäre es günstiger, den Filterungsprozess der Punktwolke mit Hilfe einer transparenteren Filtermethode bereits vor der Bearbeitung mit Geomagic Studio durchzuführen.

Die groben Fehler sollten besser vorab (bereits in den einzelnen Aufnahmen unter Ausnützen der Topologieinformation) eliminiert werden, da es im Laufe des Modellierungsprozesses immer schwieriger wird, grob fehlerhafte Punkte zu detektieren. Überhaupt scheint es günstiger, mögliche Schwierigkeiten bereits in der Punktphase zu erkennen und die für deren Behebung notwendige Zeit zu investieren, um eine gute Triangulierung zu erhalten. Geomagic Studio scheint – zumindest im Falle des hier vorliegenden Beispiels – für die Bearbeitung der ursprünglichen Punktwolke nicht besonders gut geeignet (vgl. Kap. 5.2.2).

Steht eine gut bearbeitete Punktwolke zur Verfügung, stellt Geomagic Studio jedoch ein mächtiges Werkzeug dar, besonders was die Triangulierung und deren Bearbeitung betrifft. Das automatisch erzeugte *Patch*-Layout zur Erstellung eines NURBS-Modells erleichtert die Modellierung erheblich. Dieses bedarf jedoch – besonders bei komplexeren Objekten – noch einer manuellen Nachbearbeitung, welche i.a. einen hohen Zeitaufwand erfordern dürfte.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurde die Modellierung von terrestrischen Laserscanner-Daten anhand eines konkreten Beispiels (Marc-Anton-Plastik bei der Wiener Secession) gezeigt. Diese Daten wurden von dem Laserscanner LMS-Z360 der Firma Riegler erfasst (Kap. 2.3). Zusätzlich wurden von dem Objekt auch digitale Photos mit der Kamera DCS 460c aufgenommen (Kap. 3.2.1). Der erste Schwerpunkt der Arbeit lag in der gemeinsamen simultanen Ausgleichung der Laserscanner-Aufnahmen und der Photos (Kap. 4). Dazu wurden (mit Retroreflektoren) signalisierte Verknüpfungspunkte verwendet, die sowohl in den Intensitätsbildern der Laserscanner-Aufnahmen als auch in den Photos gemessen wurden (Kap. 4.2). Während diese Punkte in den hochauflösenden Photos gut identifiziert und gemessen werden konnten, gab es bei der Messung in den Intensitätsbildern teilweise Probleme aufgrund der inhomogenen Energieverteilung des Laserstrahls. Die in den Intensitätsbildern gemessenen Bildkoordinaten wurden anschließend mittels bilinearer Interpolation in Polarkoordinaten des jeweiligen Sensorkoordinatensystems umgewandelt. Dabei wurden teilweise systematische Fehler begangen, weil bereits eine einzelne Distanzmessung in Kantennähe aufgrund der Strahldivergenz grob falsch sein kann und – unabhängig davon – das Interpolieren von Distanzen in Kantennähe an sich problematisch ist. Im Zuge der Ausgleichung (vgl. Kap. 4.3) wurden die groben Beobachtungsfehler eliminiert, wobei als Methoden Residuenanalyse, robuste Schätzung und *Data Snooping* zum Einsatz kamen. Dabei zeigte sich, dass vor allem Polarbeobachtungen verworfen wurden. Die Durchführung einer Varianzkomponentenschätzung ermöglichte eine Abschätzung der Genauigkeiten der einzelnen Beobachtungsgruppen, wobei unterschiedliche Genauigkeiten für die Panorama- und Detail-Scans ermittelt wurden. Als Ergebnis für die Genauigkeit der Bildkoordinatenmessung in den Photos ergab sich ca. ein Drittel der Pixelgröße. Um für die Genauigkeiten der Unbekannten aussagekräftige Werte zu bekommen, wurde außerdem eine freie Netzausgleichung durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass die direkt am Objekt gelegenen Verknüpfungspunkte, die auch in zahlreichen Photos gemessen wurden, die höchsten Genauigkeiten aufwiesen. Bei Ausgleichung ohne die Beobachtungen in den Photos verdreifachte sich die (durchschnittliche) Standardabweichung an den (zuvor) gut bestimmten Verknüpfungspunkten am Objekt, während sich die Genauigkeiten an den anderen Punkten nur geringfügig verschlechterten.

Für die Modellierung der Objektfläche (Kap. 5) stand das Programmpaket Geomagic Studio zur Verfügung. In der ursprünglichen Punktwolke waren zahlreiche falsche Punkte aufgrund grob fehlerhafter Distanzmessungen vorhanden (Kap. 5.2.2). Außerdem erforderte das starke Messrauschen mehrmaliges Filtern (Kap. 5.2.5). Da die Filterung – wie

es überhaupt bei den Funktionen von Geomagic Studio der Fall ist – nur als Black Box verfügbar war, mussten die geeigneten Parameterwerte durch systematisches Ausprobieren gefunden werden. Anschließend wurde eine Triangulierung ermittelt, die allerdings aufgrund von Datenlöchern, unvollständig erfassten Feinstrukturen, und noch immer vorhandenen falschen Punkten Fehler aufwies und deshalb noch manuell nachbearbeitet werden musste (Kap. 5.3). Danach wurde mit Hilfe der Modellierungs-Software automatisch eine Segmentierung der Oberfläche und anschließend ein NURBS-Modell (Kap. 5.4) berechnet, das für den Großteil der Objektoberfläche zufriedenstellend war. In gewissen Bereichen wäre jedoch eine manuelle Nachbearbeitung notwendig gewesen, worauf aus Zeitgründen verzichtet wurde.

Die Photos wurden in dieser Arbeit nur zur Stabilisierung des Blocks und zur Erhöhung der Redundanz der Ausgleichung verwendet. Die in der Einleitung erwähnten Vorteile des gemeinsamen Einsatzes der beiden sich ergänzenden Technologien Laserscanning und Photogrammetrie wurden in dieser Arbeit im Zuge der Objektmodellierung noch nicht ausgeschöpft. Die Schwächen des Laserscannings im Bereich von Kanten bzw. Konturlinien können durch Einbeziehung von Photos kompensiert werden, indem man die Kanten bzw. Konturlinien direkt in den Photos misst, was meist sehr gut möglich ist. Die Abbildung 6-1 zeigt eine VRML-Visualisierung, bei der die in einem Photo gemessenen Konturpunkte von zwei Löwen auf eine vertikale Ebene projiziert werden. Durch die Verbindung der projizierten Punkte mit dem Projektionszentrum des Photos wird eine allgemeine Kegelfläche definiert. Die Information aus dem Photo könnte durch Schnitt dieser Kegelfläche mit dem Modell für die Bestimmung von Kanten genützt werden.

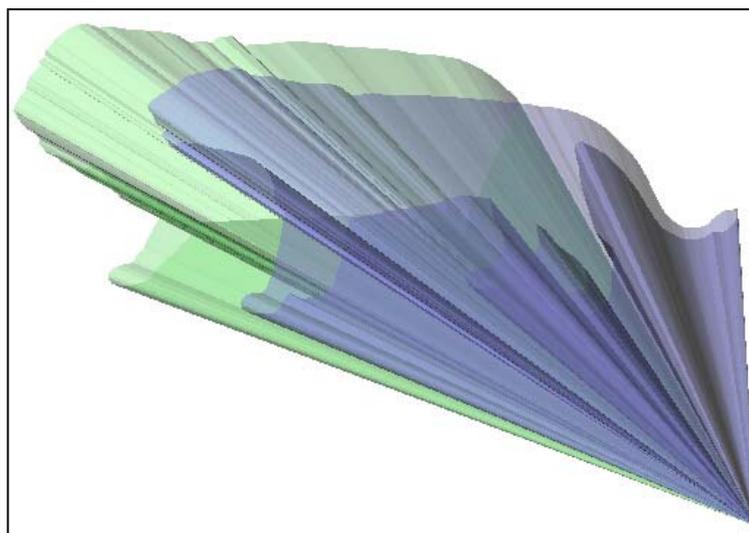


Abb. 6-1: VRML-Visualisierung der in einem Photo gemessenen Konturlinien von zwei Löwen, die auf eine vertikale Ebene projiziert werden. Dabei wird eine allgemeine Kegelfläche definiert (Spitze im Projektionszentrum des entsprechenden Photos).

Auch die in den orientierten Photos enthaltene Texturinformation könnte beispielsweise auf das Oberflächenmodell aufprojiziert werden. Somit wäre die Erstellung eines Photomodells möglich, was im Falle eines Kunstwerks wie der Marc-Anton-Plastik von hohem dokumentarischen Wert ist. Als mögliche Anwendung wäre ein räumliches Informationssystem denkbar, d.h. durch die Verknüpfung des Modells mit einer Datenbank könnte eine Art dreidimensionales Inhaltsverzeichnis des Kunstwerks (z.B. für den Denkmalschutz) geschaffen werden.

# Anhang A: ORIENT-Protokolle der Ausgleichung

Im Folgenden sind die ORIENT-Protokolle der zwangsfreien Ausgleichung (A.1), der freien Netzausgleichung (A.2) und der freien Netzausgleichung ohne Photos (A.3) angeführt.

## A.1 Zwangsfreie Ausgleichung

```

< File MARCHYB5_NEU.PRT opened FORMATTE UNKNOWN SEQUENTI > F
PROJECT(marchyb5) USER(alexander haring) 03Sep-03 13:16:45 <1779>

Varianzkomp.schätzung

directory: 67 entries used, 33 available;
core_memory: 23790 words used, 9976208 available.
-----
<***> $D ADJUST CONF=OBJ(1-99999999) PHO=ORG=ROT=OBJ(65-86) $C TTY 159607.8 13:16:45
-----
<***> ADJUST CONF=OBJ(1-99999999) PHO=ORG=ROT=OBJ(65-86) $C TTY 161755.3 13:16:45
<***> PLR=ORG=ROT=OBJ(1-99999999) SMA SHOW(0) SIGMA(0.01) SINGUL(15) OMIT $C TTY 166050.2 13:16:45
<***> WEIGHT(5) IT(4) HISTOGRAM; $C TTY 170345.2 13:16:45

ADJUST PHOTOS=OBJECT =EXTREFFO =ROTPAR( 65-86) CONPOINT=OBJECT( 1-99999999)
REFSYS_( 9001) SIGMA( 0.01) ITERATE( 4) SHOWSTAT =SMARKED( 0.) POLARPOI
=OBJECT =EXTREFFO =ROTPAR( 1-99999999) SINGULAR( 15) WEIGHTFU( 5.) OMITMARK
HISTOGRAM

REFSYS.000 refrak=0 curvat=0 {-1.0191E-08 6378000.0} units 1.E+00[m]
REF 9001.000: 65/ 95, 0 !!!
ShowMarked point ( dx dy dz ) weights index
pho 65 331 ( -.363 1.972 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 66 202 ( 1.390 2.535 .000) 0.0E+00 0.0E+00 1.0E+00 0 0 0
pho 66 402 ( -.012 -2.426 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 3 0 0
pho 66 404 ( 1.905 -.639 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 6 0
pho 68 404 ( 2.831 .087 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 8 0
pho 69 331 ( .004 3.756 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 69 401 ( -3.226 -1.735 .000) 0.0E+00 0.0E+00 1.0E+00 0 0 0
pho 69 402 ( -1.473 .415 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 4 0
pho 74 404 ( -2.430 -.730 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 7 0
pho 77 404 ( 2.906 -.460 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 8 0
pho 79 401 ( -.090 -1.903 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 79 404 ( -.209 2.351 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 80 303 ( .094 -4.455 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 81 306 ( -.389 8.757 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 83 332 ( -.013 -1.306 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 84 403 ( 3.473 .162 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 * 0
pho 85 303 ( -.292 -3.206 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
plr 6001 403 ( -.104 -.005 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 6001 404 ( .020 -.020 -.067) 3.2E-01 2.1E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 6002 403 ( .112 -.044 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 6003 404 ( -.163 -.057 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 6 0
plr 6005 401 ( -.121 -.004 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 6005 402 ( .021 -.065 -.052) 3.2E-01 2.1E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 6006 101 ( -.138 -.191 -.005) 0.0E+00 0.0E+00 8.6E-01 0 0 4
plr 6007 401 ( -.111 -.083 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 6007 403 ( -.139 -.002 -.004) 0.0E+00 2.1E-01 8.6E-01 0 5 1
plr 6009 402 ( .071 .032 -.057) 3.2E-01 2.1E-01 0.0E+00 1 3 0
plr 6009 404 ( -.186 -.042 -.010) 0.0E+00 2.1E-01 8.6E-01 0 7 1
plr 6010 106 ( .018 .069 .041) 3.2E-01 2.1E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 6010 206 ( -.214 -.018 .004) 0.0E+00 2.1E-01 8.6E-01 0 7 1
plr 7101 203 ( -.018 .064 -.464) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 7103 404 ( -.243 .134 .000) 0.0E+00 1.3E-01 0.0E+00 0 6 0
plr 7104 107 ( -.012 .256 -.004) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 3 0 4
plr 7104 201 ( .028 .143 -.345) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 2 1 0
plr 7104 305 ( .005 .078 -.049) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 7104 306 ( -.040 .400 .000) 2.4E-01 0.0E+00 0.0E+00 4 0 0
plr 7105 202 ( -.052 .288 -.020) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 1 0 4
plr 7105 306 ( -.013 .327 .005) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 2 0 5
plr 7105 402 ( -.018 .053 -.087) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 2 1 0
plr 7106 306 ( -.079 .081 -.115) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 2 0
plr 7106 401 ( -.278 .137 -.014) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 7 2
plr 7107 105 ( -.060 .243 -.011) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 1 0 4
plr 7107 207 ( .017 .264 -.015) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 2 0 4
plr 7107 208 ( -.100 .055 -.051) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 3 0
plr 7107 304 ( .048 .230 .018) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 1 0 4
plr 7107 306 ( -.023 .309 .018) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 2 0 5
plr 7107 332 ( .012 .278 .028) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 2 0 4
plr 7107 404 ( .232 -.074 .000) 0.0E+00 1.3E-01 0.0E+00 0 6 0
plr 7108 403 ( -.165 -.026 .008) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 4 1
plr 7109 304 ( -.219 .147 .016) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 6 2
plr 7109 342 ( -.015 .053 -.090) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 7109 402 ( -.136 .096 -.061) 0.0E+00 1.3E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 7109 403 ( -.023 -.056 -.104) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 4 1 0
plr 7109 404 ( -.152 -.107 -.062) 0.0E+00 1.3E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 7110 206 ( -.230 -.046 .003) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 6 1
plr 7110 401 ( -.010 -.039 -.422) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 7110 404 ( .163 -.037 -.043) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 4 1

WEIGHTFU( 5.000 5.000), MARK d > 1.0E+31: 62 obs. OMCATEG(x:8 y:7 z:6) marked
d * 1.00| 2.00| 3.00| 4.00| 5.00| 6.00| 7.00| 8.00| 9.00| ...
72.60%| 19.46%| 3.22%| 1.72%| .52%| .97%| .60%| .22%| .15%| .52%|
Ndap [68.27%| 27.18%| 4.28%| .26%| .01%| .00%| .00%| .00%| .00%| .00%] G01

The worst discrepancies [ in units of sigma-a-priori of obs.(=robfac) ]:
1 PLR = 7107,nr= 303, dY = 2.830
2 PLR = 7104,nr= 101, dY = 2.821
3 PLR = 7104,nr= 105, dY = 2.794
4 PLR = 7107,nr= 206, dY = 2.771
5 PLR = 7106,nr= 105, dY = 2.750
6 PLR = 7110,nr= 404, dZ = 2.679
7 PLR = 7106,nr= 304, dY = 2.669
8 PLR = 7108,nr= 404, dX = 2.669
9 PLR = 7106,nr= 106, dY = 2.640
10 PLR = 7107,nr= 106, dX = 2.622

```

```

Solutiontime = 8590.000 sec., trace= .000, swei= 1.00E+06, eps= 1.00E-06
Count of computed points in:
REF : 65, ROT : 32

pll= 9.3973E-02, pvv= 9.3973E-02, nx= 291, no= 1238, nt= 0, oeq= 18230, neq= 17755, adj= 1345
IT= -2, s(pl1/nobs= 1238) = 8.7125E-03 s(pvv/nred= 947) = 9.9616E-03 =sigma0 ; S_apriori= 1.00E-02

SubMatrices A: 0, N: 973, R: 1578, x: 97, qvv: 0, qxx: 0, fill: 0, diag: 1
CPU-time oeq A: .05, order 6:2147.48, R: .02, x:****, trsp .00, qvv: 0, qxx: .00, total: 8590.00 sec.
Storage: 18230 17755 0 0 used 17755 words
Storage available: 9940164 words
$C TTY 185377.7 13:16:45

<***> $D ADJUST CONP=OBJ(1-99999999) PHO=ORG=ROT=OBJ(65-86)
-----
<***> ADJUST CONP=OBJ(1-99999999) PHO=ORG=ROT=OBJ(65-86) $C TTY 187525.2 13:16:45
<***> PLR=ORG=ROT=OBJ(1-99999999) SMA SHOW(0) SIGMA(0.01) SINGUL(15) OMIT $C TTY 191820.2 13:16:45
<***> WEIGHT(5) QXX QVV QFO PRI HISTOGRAM $C TTY 193967.7 13:16:45

ADJUST PHOTOS =OBJECT =EXTREFFO =ROTPAR( 65-86) CONPOINT =OBJECT( 1-99999999)
REFSYS( 9001) SIGMA=QXX =QVV =Q_FORCED( 0.01) SHOWSTAT =PRINT =SMARKED(
0.) POLARPOI =OBJECT =EXTREFFO =ROTPAR( 1-99999999) SINGULAR( 15) WEIGHTFU(
5.) OMITMARK HISTOGRAM

REFSYS.000 refrak=0 curvat=0 {-1.0191E-08 6378000.0} units 1.E+00[m]
REF 9001.000: 65/ 95, 0 !!!

REF 9001.000: average discrepancies before adjustment 1346, CATEGORY 1
Observation :ukn :#all-#mk:used co:sum_res robfac _resres, resmax _nammax # sigma erp/prc rotpar ior/sca adp .sub
ShowMARKed point ( dx dy dz ) weights index
pho 65 331 ( -0.363 1.972 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
PHO 65:OPR__ 13 : 13 x: -.007 1.251 .236 .493 404 individ. 90000065 65 99946028 99946028 .002
: 12 y: -.001 1.311 .302 -.490 402 individ.
pho 66 202 ( 1.390 2.535 .000) 0.0E+00 0.0E+00 1.0E+00 0 0 0
pho 66 402 ( -.013 -2.426 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 3 0 0
PHO 66 404 ( 1.905 .639 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 6 0
PHO 66:OPR__ 16, 2: 14 x: -.009 1.990 .287 -.744 401 individ. 90000066 66 99946028 99946028 .002
: 14 y: -.006 2.492 .454 -.932 401 individ.
PHO 67:OPR__ 14 : 14 x: .000 1.369 .239 -.512 403 individ. 90000067 67 99946028 99946028 .002
: 14 y: .000 1.263 .253 -.472 201 individ.
pho 68 404 ( 2.831 .088 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 8 0
PHO 68:OPR__ 14, 1: 13 x: -.002 1.701 .275 -.636 102 individ. 90000068 68 99946028 99946028 .002
: 14 y: -.001 .874 .173 -.327 332 individ.
pho 69 331 ( -.005 3.756 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 69 401 ( -3.225 -1.735 .000) 0.0E+00 0.0E+00 1.0E+00 0 0 0
pho 69 402 ( -1.472 .415 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 4 0
PHO 69:OPR__ 12, 2: 10 x: -.004 1.408 .227 -.526 202 individ. 90000069 69 99946028 99946028 .002
: 10 y: .001 1.423 .295 -.532 202 individ.
PHO 70:OPR__ 8 : 8 x: .003 1.239 .296 .463 101 individ. 90000070 70 99946028 99946028 .002
: 8 y: -.004 1.391 .256 -.520 108 individ.
PHO 71:OPR__ 11 : 11 x: .003 1.334 .227 .499 402 individ. 90000071 71 99946028 99946028 .002
: 11 y: .000 1.084 .229 .405 106 individ.
PHO 72:OPR__ 10 : 10 x: -.002 1.398 .278 .523 331 individ. 90000072 72 99946028 99946028 .002
: 10 y: .002 .597 .105 .223 107 individ.
PHO 73:OPR__ 9 : 9 x: -.007 1.516 .343 .567 403 individ. 90000073 73 99946028 99946028 .002
: 9 y: .001 .995 .186 -.372 404 individ.
pho 74 404 ( -2.430 -.729 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 7 0
PHO 74:OPR__ 10, 1: 9 x: -.001 1.331 .228 .498 332 individ. 90000074 74 99946028 99946028 .002
: 10 y: -.002 1.951 .319 -.729 404 individ.
PHO 75:OPR__ 11 : 11 x: .005 .860 .204 .321 206 individ. 90000075 75 99946028 99946028 .002
: 11 y: .002 1.911 .358 .715 206 individ.
PHO 76:OPR__ 7 : 7 x: .003 1.310 .279 -.490 101 individ. 90000076 76 99946028 99946028 .002
: 7 y: .000 .978 .191 -.366 103 individ.
pho 77 404 ( 2.906 -.460 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 8 0
PHO 77:OPR__ 12, 1: 11 x: .004 .555 .117 -.207 205 individ. 90000077 77 99946028 99946028 .002
: 12 y: .004 1.615 .293 .604 332 individ.
PHO 78:OPR__ 10 : 10 x: -.003 1.132 .196 .423 208 individ. 90000078 78 99946028 99946028 .002
: 10 y: .004 .998 .176 -.373 206 individ.
pho 79 401 ( -.091 -1.903 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 79 404 ( -.209 2.351 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
PHO 79:OPR__ 11 : 11 x: .002 .860 .191 .321 105 individ. 90000079 79 99946028 99946028 .002
: 9 y: .001 1.252 .225 -.468 107 individ.
pho 80 303 ( .095 -4.455 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
PHO 80:OPR__ 10 : 10 x: .003 1.440 .340 -.538 101 individ. 90000080 80 99946028 99946028 .002
: 9 y: .009 1.024 .246 .383 106 individ.
pho 81 306 ( -.390 8.758 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
PHO 81:OPR__ 15 : 15 x: .001 1.042 .182 -.390 306 individ. 90000081 81 99946028 99946028 .002
: 14 y: -.002 1.549 .228 -.579 402 individ.
PHO 82:OPR__ 14 : 14 x: .004 .868 .182 .325 202 individ. 90000082 82 99946028 99946028 .002
: 14 y: .001 2.193 .398 -.820 402 individ.
pho 83 332 ( -.013 -1.306 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
PHO 83:OPR__ 17 : 17 x: .003 .973 .216 -.364 206 individ. 90000083 83 99946028 99946028 .002
: 16 y: -.001 .985 .182 .368 304 individ.
pho 84 403 ( 3.473 .163 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 * 0
PHO 84:OPR__ 9, 1: 8 x: .007 1.102 .213 -.412 401 individ. 90000084 84 99946028 99946028 .002
: 9 y: .000 1.365 .292 .510 401 individ.
pho 85 303 ( -.291 -3.206 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
PHO 85:OPR__ 12 : 12 x: -.002 1.214 .232 .454 104 individ. 90000085 85 99946028 99946028 .002
: 11 y: -.002 .803 .127 .300 402 individ.
PHO 86:OPR__ 9 : 9 x: -.001 .366 .109 -.137 107 individ. 90000086 86 99946028 99946028 .002
: 9 y: .001 .585 .146 -.219 331 individ.
plr 6001 403 ( -.104 -.005 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 6001 404 ( -.020 -.020 -.067) 3.2E-01 2.1E-01 0.0E+00 1 1 0
PLR 6001:OER__ 12, 1: 11 a: .007 .956 .0157 .0295 203 .031 90000001 1 6001 .002
: 12 z: -.002 1.429 .0356 .0690 203 .048
: 10 s: .000 1.794 .0092 -.0209 203 .012
plr 6002 403 ( -.112 -.044 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 4 0
PLR 6002:OER__ 10, 1: 9 a: .011 1.473 .0244 .0455 202 .031 90000002 2 6001 .002
: 10 z: -.022 1.140 .0330 -.0551 402 .048
: 8 s: -.003 1.779 .0113 -.0207 102 .012
plr 6003 404 ( -.163 -.057 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 6 0
PLR 6003:OER__ 11, 1: 10 a: .004 1.304 .0191 .0403 202 .031 90000003 3 6001 .002
: 11 z: -.028 1.227 .0434 -.0593 402 .048
: 9 s: -.003 1.821 .0109 .0212 306 .012
PLR 6004:OER__ 12 : 12 a: -.004 1.487 .0255 .0459 105 .031 90000004 4 6001 .002
: 12 z: -.040 2.117 .0486 -.1022 404 .048
: 10 s: .000 1.783 .0105 .0208 402 .012
plr 6005 401 ( -.121 -.004 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 6005 402 ( .021 -.065 -.052) 3.2E-01 2.1E-01 0.0E+00 1 1 0
PLR 6005:OER__ 8, 1: 7 a: .004 1.529 .0291 .0473 105 .031 90000005 5 6001 .002
: 8 z: -.034 1.991 .0563 -.0961 104 .048
: 6 s: -.002 1.108 .0070 -.0129 202 .012
plr 6006 101 ( .137 -.191 -.005) 0.0E+00 0.0E+00 8.6E-01 0 0 4
PLR 6006:OER__ 10, 1: 8 a: -.004 1.890 .0325 -.0584 403 .031 90000006 6 6001 .002
: 8 z: -.057 2.010 .0623 -.0971 107 .048
: 8 s: -.002 1.370 .0087 -.0160 108 .012
plr 6007 401 ( -.111 -.083 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 6007 403 ( -.139 -.002 -.004) 0.0E+00 2.1E-01 8.6E-01 0 5 1
PLR 6007:OER__ 10, 2: 8 a: .009 2.440 .0334 .0754 404 .031 90000007 7 6001 .002
: 10 z: -.033 2.296 .0517 -.1108 404 .048
: 8 s: .005 1.832 .0104 .0214 210 .012
PLR 6008:OER__ 10 : 10 a: -.009 2.563 .0352 -.0792 401 .031 90000008 8 6001 .002
: 10 z: -.003 2.193 .0558 .1059 201 .048
: 8 s: .003 1.089 .0077 .0127 207 .012
plr 6009 402 ( .071 .032 -.057) 3.2E-01 2.1E-01 0.0E+00 1 3 0
plr 6009 404 ( -.186 -.042 -.010) 0.0E+00 2.1E-01 8.6E-01 0 7 1
PLR 6009:OER__ 12, 1: 11 a: .000 2.301 .0362 .0711 402 .031 90000009 9 6001 .002
: 12 z: -.010 1.443 .0301 -.0697 403 .048

```

```

plr 6010 106 ( , 1: 10 s: .000 2.020 .0115 .0236 403 .012
      .018 .069 .041) 3.2E-01 2.1E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 6010 206 ( , 1: 4 s: -.214 -.018 .004) 0.0E+00 2.1E-01 8.6E-01 0 7 1
PLR 6010:OER__ 6, 1: 5 a: -.002 .966 .0162 -.0299 401 .031 90000010 10 6001 .002
      6 z: -.013 1.458 .0437 -.0704 404 .048
      4 s: .011 2.541 .0175 .0296 304 .012
plr 7101 203 ( , 1: 21 a: -.018 .064 -.464) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 1 0
PLR 7101:OER__ 21, 1: 21 a: -.007 1.321 .0271 -.0553 403 .042 90000001 1 6001 .002
      18 s: .002 1.862 .0353 -.0640 202 .074
      18 s: .003 2.290 .0116 -.0370 332 .016
      19 a: -.009 2.204 .0392 -.0922 402 .042 90000002 2 6001 .002
      19 z: .031 2.603 .0743 .1933 332 .074
      16 s: -.002 1.918 .0151 -.0310 206 .016
plr 7103 404 ( , 1: 17 a: -.243 .134 .000) 0.0E+00 1.3E-01 0.0E+00 0 6 0
PLR 7103:OER__ 18, 1: 17 a: -.005 1.663 .0384 -.0696 203 .042 90000003 3 6001 .002
      18 z: .048 1.817 .0738 .1350 332 .074
      16 s: -.005 1.896 .0183 -.0306 101 .016
plr 7104 107 ( , 1: 19 a: -.012 .256 -.004) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 3 0 4
plr 7104 201 ( , 1: 13 s: -.028 .143 -.345) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 2 1 0
plr 7104 305 ( , 1: 13 s: -.005 .078 -.049) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 7104 306 ( , 1: 13 s: -.040 .400 .000) 2.4E-01 0.0E+00 0.0E+00 4 0 0
PLR 7104:OER__ 19, 1: 19 a: -.005 2.322 .0396 .0971 402 .042 90000004 4 6001 .002
      2: 17 z: .088 2.821 .1081 .2095 101 .074
      2: 13 s: -.005 1.558 .0158 -.0251 101 .016
plr 7105 202 ( , 1: 15 a: -.053 .288 -.020) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 1 0 4
plr 7105 306 ( , 1: 13 s: -.013 .327 -.005) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 2 0 5
plr 7105 402 ( , 1: 13 s: -.018 .053 -.087) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 2 1 0
PLR 7105:OER__ 15, 1: 15 a: -.003 2.418 .0390 .1012 105 .042 90000005 5 6001 .002
      2: 13 z: .072 1.636 .0805 .1215 105 .074
      1: 13 s: .000 1.224 .0098 -.0198 202 .016
plr 7106 306 ( , 1: 12 a: -.079 .081 -.115) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 2 0
plr 7106 401 ( , 1: 12 a: -.278 .137 -.014) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 7 2
PLR 7106:OER__ 13, 1: 12 a: .005 2.015 .0520 .0843 106 .042 90000006 6 6001 .002
      13 z: .107 2.750 .1353 .2042 105 .074
      1: 10 s: -.007 1.212 .0109 -.0196 108 .016
plr 7107 105 ( , 1: 17 a: -.060 .243 -.011) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 1 0 4
plr 7107 207 ( , 1: 17 a: .017 .264 -.015) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 2 0 4
plr 7107 208 ( , 1: 17 a: -.100 .055 -.051) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 3 0
plr 7107 304 ( , 1: 17 a: .048 .230 .018) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 1 0 4
plr 7107 306 ( , 1: 17 a: -.023 .309 .018) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 2 0 5
plr 7107 332 ( , 1: 17 a: -.012 .278 .028) 2.4E-01 0.0E+00 6.2E-01 2 0 4
plr 7107 404 ( , 1: 17 a: .232 -.074 .000) 0.0E+00 1.3E-01 0.0E+00 0 6 0
PLR 7107:OER__ 17, 1: 16 a: -.008 2.622 .0589 .1097 106 .042 90000007 7 6001 .002
      5: 12 z: .064 2.830 .1089 .2102 303 .074
      1: 14 s: -.003 2.395 .0181 -.0386 403 .016
plr 7108 403 ( , 1: 18 a: -.165 -.026 .008) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 4 1
PLR 7108:OER__ 19, 1: 18 a: .009 2.668 .0464 .1116 404 .042 90000008 8 6001 .002
      19 z: -.006 2.204 .0656 .1637 201 .074
      17 s: .001 1.863 .0136 -.0301 205 .016
plr 7109 304 ( , 1: 17 a: -.219 .147 .016) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 6 2
plr 7109 342 ( , 1: 17 a: -.015 .053 -.090) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 7109 402 ( , 1: 17 a: .136 .096 -.061) 0.0E+00 1.3E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 7109 403 ( , 1: 17 a: -.023 .056 -.104) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 4 1 0
plr 7109 404 ( , 1: 17 a: -.152 -.107 -.062) 0.0E+00 1.3E-01 0.0E+00 0 4 0
PLR 7109:OER__ 20, 3: 17 a: .001 1.894 .0444 .0793 201 .042 90000009 9 6001 .002
      20 z: .027 2.225 .0781 .1652 332 .074
      4: 16 s: -.001 1.489 .0120 -.0240 201 .016
plr 7110 206 ( , 1: 10 a: -.230 -.046 .003) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 6 1
plr 7110 401 ( , 1: 10 a: -.010 -.039 -.422) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 7110 404 ( , 1: 10 a: .163 -.037 -.043) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 4 1
PLR 7110:OER__ 12, 2: 10 a: .002 1.407 .0277 -.0589 302 .042 90000010 10 6001 .002
      12 z: .003 1.302 .0431 .0967 106 .074
      1: 11 s: -.005 2.679 .0184 -.0432 404 .016
CONP 8888:O_____ 9, 1: 1 x: .000 .000 .000 .000 401 individ.
      2 y: .000 .000 .000 .000 402 individ.
      3 z: .000 .000 .000 .000 403 individ.

```

```

WEIGHTFU( 5.000 5.000), MARK d > 1.0E+31: 62 obs. OMCATEG(x:8 y:7 z:6) marked
d * 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 7.00 | 8.00 | 9.00 | ...
      970 | 260 | 43 | 23 | 7 | 13 | 8 | 3 | 2 | 7 |
Ndp 72.60% | 19.46% | 3.22% | 1.72% | .52% | .97% | .60% | .22% | .15% | .52% |
      68.27% | 27.18% | 4.28% | .26% | .01% | .00% |
G01

```

The worst discrepancies [ in units of sigma-a-priori of obs.(=robfac) ]:

```

1 PLR = 7107,nr= 303, dY = 2.830
2 PLR = 7104,nr= 101, dY = 2.821
3 PLR = 7104,nr= 105, dY = 2.794
4 PLR = 7107,nr= 206, dY = 2.771
5 PLR = 7106,nr= 105, dY = 2.750
6 PLR = 7110,nr= 404, dZ = 2.679
7 PLR = 7106,nr= 304, dY = 2.669
8 PLR = 7108,nr= 404, dX = 2.668
9 PLR = 7106,nr= 106, dY = 2.640
10 PLR = 7107,nr= 106, dX = 2.622

```

```

Solutiontime = 12885.109 sec., trace= 946.987, swei= 1.00E+06, eps= 1.00E-06
Count of computed points in:
REF : 65, ROT : 32

```

```

pll= 9.3973E-02, pvv= 9.3973E-02, nxx= 291, no= 1238, nt= 0, oeq: 18230, neq: 21684, adj= 1346
IT= -2, s(pll/nobs= 1238)= 8.7125E-03 s(pvv/nred= 947)= 9.9615E-03 =sigma0 ; S_apriori= 1.00E-02

```

```

Coord_red: .000 .000 .000 stored
--> 4 observations without redundancy compared to Qeeps= 1.0E-05.

```

```

Qmin= .00082, Qmax= .98826; Sigma_0= .010; Sig_apriori= .010 = Sa
inner_

```

```

The worst obs.: point, coo normalized_discrepancy r(i) reliab.
1 PHO = 66,nr= 401, qvY = 3.181*SO =^= 3.17*Sa, r= .6184, 5.1
2 PLR = 7107,nr= 303, qvY = 3.052*SO =^= 3.04*Sa, r= .8665, 4.3
3 PLR = 7106,nr= 306, qvX = 3.017*SO =^= 3.01*Sa, r= .3987, 6.3
4 PHO = 73,nr= 303, qvX = 2.909*SO =^= 2.90*Sa, r= .2038, 8.9
5 PHO = 82,nr= 305, qvY = 2.905*SO =^= 2.89*Sa, r= .2365, 8.2
6 PLR = 7104,nr= 101, qvY = 2.882*SO =^= 2.87*Sa, r= .9651, 4.1
7 PLR = 7104,nr= 105, qvY = 2.857*SO =^= 2.85*Sa, r= .9635, 4.1
8 PLR = 7106,nr= 105, qvY = 2.835*SO =^= 2.82*Sa, r= .9479, 4.1
9 PLR = 7107,nr= 206, qvY = 2.834*SO =^= 2.82*Sa, r= .9638, 4.1
10 PLR = 7106,nr= 304, qvY = 2.823*SO =^= 2.81*Sa, r= .9004, 4.2

```

```

Sigma_0= .010; Sig_apriori= .010

```

```

point X Y Z A B phi Pxy Pxyz Equ
REF = 9001 subtype= 0
Coord_reduc.: , , , , , stored
f: 101 1.470 # .0117, .861 # .0142, 2.032 # .0058 ( .0149, .0108, 71.81, .0184, .0193) 39
f: 102 4.666 # .0102, .569 # .0092, .241 # .0094 ( .0103, .0090, -22.41, .0137, .0166) 31
f: 103 5.124 # .0104, .456 # .0111, .838 # .0102 ( .0111, .0104, 112.15, .0152, .0183) 28
f: 104 4.265 # .0103, .286 # .0097, .819 # .0083 ( .0103, .0097, 10.81, .0141, .0164) 34
f: 105 1.267 # .0122, 1.154 # .0158, 2.309 # .0061 ( .0165, .0112, 73.36, .0199, .0208) 42
f: 106 .228 # .0105, .806 # .0110, .929 # .0071 ( .0117, .0097, 57.65, .0152, .0168) 35
f: 107 1.282 # .0102, -.018 # .0093, .841 # .0080 ( .0103, .0092, 18.31, .0139, .0160) 31
f: 108 3.163 # .0103, .463 # .0085, .760 # .0067 ( .0103, .0085, 5.48, .0134, .0149) 34
f: 201 1.386 # .0123, 1.325 # .0153, 2.234 # .0064 ( .0161, .0112, 71.49, .0196, .0206) 54
f: 202 1.647 # .0121, 1.531 # .0137, 1.942 # .0071 ( .0146, .0110, 65.00, .0183, .0196) 53
f: 203 5.593 # .0107, 1.018 # .0107, .908 # .0127 ( .0123, .0104, 125.10, .0161, .0205) 41
f: 204 4.634 # .0114, 1.712 # .0108, 1.023 # .0130 ( .0119, .0103, -39.18, .0157, .0204) 44
f: 205 4.227 # .0113, 1.950 # .0084, .092 # .0132 ( .0117, .0079, -21.63, .0141, .0193) 48

```



```

PHO =OBS SIG_l= .3739 S_gr= 8.81E-01 r= 286.08 N= 489 2.048E-01 2.221E-02 4.195E-02
PLR SIG_l= .0309 S_gr= 9.76E-01 r= 77.96 N= 91 9.338E-02 7.434E-03 8.720E-03
PLR SIG_l= .0483 S_gr= 1.02E+00 r= 87.54 N= 99 1.018E-01 9.079E-03 1.036E-02
PLR SIG_l= .0117 S_gr= 9.15E-01 r= 77.82 N= 81 8.278E-02 6.514E-03 6.852E-03
PLR SIG_l= .0418 S_gr= 1.10E+00 r= 138.07 N= 164 1.403E-01 1.658E-02 1.968E-02
PLR SIG_l= .0743 S_gr= 1.19E+00 r= 142.88 N= 164 1.505E-01 2.028E-02 2.264E-02
PLR SIG_l= .0161 S_gr= 9.32E-01 r= 136.65 N= 144 1.112E-01 1.188E-02 1.237E-02
CONP=OBS SIG_l= .0100 S_gr= 8.06E-04 r= .00 N= 2 1.274E-05 1.680E-13 1.622E-10
sum_r= 947.00 N= 1234 + 4 = 1238=no

SubMatrices A: 1578, N: 973, R: 1578, x: 97, qvv: 16408, qxx: 2812, fill: 0, diag: 1
CPU-time oeq A: .06, order 6:2147.48, R: 2147.48, x:****, trsp****, qvv: .13, qxx: .02, total:12885.11 sec.
Storage: 18230 17755 3468 7 used 21684 words
Storage available: 9936235 words
$C TTY 213295.3 13:16:45

<***> $D COR PROT(marchyb5.PRT).
-----
<***> COR PROT(marchyb5.PRT). $C TTY 215442.8 13:16:45

```

## A.2 Freie Netzausgleichung

PROJECT(marchyb5) USER(alexander haring ) 03Aug-12 18:25:18 <1781>

Varianzkomp.schätzung

ADJUST PHOTOS( 65-86) REFSYS\_( 9001) QXX =QVV\_( 0.01 0.01 0.01) SHOWSTAT =SMARKED\_( 0.) FREENET OMITMARK

REFSYS.000 refrak=0 curvat=0 {-1.0191E-08 6378000.0} units 1.E+00[m]  
REF 9001.000: 65/ 95, 0 !!!

```

REF 9001.000: average discrepancies before adjustment 1343, CATEGORY 1
Observation :ukn :#all-#mk:used co:sum_res robfac _resres, resmax _nammax # sigma erp/prc rotpar ior/sca adp .sub
ShowMARKed point ( dx dy dz ) weights index
pho 65 331 ( -.363 1.972 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
PHO 65:OPR.. 13 : 13 x: .007 1.250 .236 .468 404 individ. 90000065 65 99946028 99946028 .002
: 12 y: -.001 1.311 .302 -.490 402 individ.
: 14 z: 2.535 .000 0.0E+00 0.0E+00 1.0E+00 0 0 0
pho 66 202 ( 1.390 2.535 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 66 402 ( -.012 -2.426 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 66 404 ( 1.904 .639 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 1 0
PHO 66:OPR.. 16, 2: 14 x: -.009 1.989 .287 -.744 401 individ. 90000066 66 99946028 99946028 .002
: 14 y: -.006 2.492 .454 -.932 401 individ.
: 14 z: 1.368 .239 -.511 403 individ. 90000067 67 99946028 99946028 .002
PHO 67:OPR.. 14 : 14 x: .000 1.263 .253 -.472 201 individ.
: 14 y: .087 .000 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 1 0
pho 68 404 ( 2.831 .087 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 1 0
PHO 68:OPR.. 14, 1: 13 x: .001 1.701 .275 -.636 102 individ. 90000068 68 99946028 99946028 .002
: 14 y: -.001 .874 .173 .327 332 individ.
: 14 z: .004 3.756 .000 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 69 331 ( -.004 3.756 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 69 401 ( -3.227 -1.735 .000) 0.0E+00 0.0E+00 1.0E+00 0 0 0
pho 69 402 ( -1.472 .415 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 1 0
PHO 69:OPR.. 12, 2: 10 x: -.005 1.410 .227 -.527 202 individ. 90000069 69 99946028 99946028 .002
: 10 y: .001 1.423 .295 -.532 202 individ.
: 10 z: .002 1.238 .296 .463 101 individ. 90000070 70 99946028 99946028 .002
PHO 70:OPR.. 8 : 8 x: .002 1.238 .296 .463 101 individ. 90000070 70 99946028 99946028 .002
: 8 y: -.005 1.391 .256 -.520 108 individ.
: 11 x: .001 1.331 .227 .497 402 individ. 90000071 71 99946028 99946028 .002
PHO 71:OPR.. 11 : 11 y: .000 1.084 .229 .405 106 individ.
: 10 x: -.002 1.397 .278 .522 331 individ. 90000072 72 99946028 99946028 .002
: 10 y: .002 .598 .105 .223 107 individ.
PHO 72:OPR.. 10 : 9 x: -.007 1.516 .343 .567 403 individ. 90000073 73 99946028 99946028 .002
: 9 y: .001 .995 .186 -.372 404 individ.
: 2: 10 x: -.729 .000 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 1 0
pho 74 404 ( -2.430 -.729 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 1 0
PHO 74:OPR.. 10, 1: 9 x: -.001 1.332 .228 .498 332 individ. 90000074 74 99946028 99946028 .002
: 10 y: -.002 1.951 .319 -.729 404 individ.
: 11 x: .005 .860 .204 .322 206 individ. 90000075 75 99946028 99946028 .002
PHO 75:OPR.. 11 : 11 y: .002 1.911 .358 .714 206 individ.
: 7 x: .003 1.310 .279 -.490 101 individ. 90000076 76 99946028 99946028 .002
PHO 76:OPR.. 7 : 7 y: .000 .978 .191 -.366 103 individ.
: 2: 906 -.461 .000 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 1 0
pho 77 404 ( 2.906 -.461 .000) 0.0E+00 2.7E-02 1.0E+00 0 1 0
PHO 77:OPR.. 12, 1: 11 x: .004 .555 .117 -.207 205 individ. 90000077 77 99946028 99946028 .002
: 12 y: .004 1.615 .293 .604 332 individ.
: 10 x: -.003 1.132 .196 .423 208 individ. 90000078 78 99946028 99946028 .002
PHO 78:OPR.. 10 : 10 y: .004 .998 .176 -.373 206 individ.
: 10 x: -.090 -1.903 .000 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 79 401 ( -.090 -1.903 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
PHO 79:OPR.. 11, 2: 11 x: .003 .860 .191 .322 105 individ. 90000079 79 99946028 99946028 .002
: 9 y: .001 1.251 .225 -.468 107 individ.
: 10 x: .095 -4.455 .000 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 80 303 ( .095 -4.455 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
PHO 80:OPR.. 10, 1: 10 x: .003 1.440 .340 -.538 101 individ. 90000080 80 99946028 99946028 .002
: 9 y: .009 1.025 .246 .383 106 individ.
: 15 x: .001 1.043 .182 -.390 306 individ. 90000081 81 99946028 99946028 .002
PHO 81:OPR.. 15 : 14 y: -.002 1.549 .228 -.579 402 individ.
: 14 x: .004 .868 .182 .325 202 individ. 90000082 82 99946028 99946028 .002
PHO 82:OPR.. 14 : 14 y: .001 2.194 .398 -.820 402 individ.
: 17 x: .003 .972 .216 -.363 206 individ. 90000083 83 99946028 99946028 .002
PHO 83:OPR.. 17 : 16 y: .000 .985 .182 .368 304 individ.
: 8 x: .007 1.102 .213 -.412 401 individ. 90000084 84 99946028 99946028 .002
PHO 84:OPR.. 9, 1: 9 y: .000 1.365 .292 .510 401 individ.
: 12 x: -.292 -3.206 .000 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
pho 85 303 ( -.292 -3.206 .000) 2.7E-02 0.0E+00 1.0E+00 1 0 0
PHO 85:OPR.. 12, 1: 11 y: -.002 1.213 .232 .453 104 individ. 90000085 85 99946028 99946028 .002
: 11 y: -.002 .803 .127 .300 402 individ.
: 9 x: -.001 .366 .109 -.137 107 individ. 90000086 86 99946028 99946028 .002
PHO 86:OPR.. 9 : 9 y: .001 .585 .146 -.219 331 individ.
: 11 a: .007 .956 .0157 .0295 203 .031 90000001 1 6001 .002
plr 6001 403 ( -.104 -.005 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 1 0
plr 6001 404 ( .020 -.067) 3.2E-01 2.1E-01 0.0E+00 1 1 0
PLR 6001:OER.. 12, 1: 10 s: .000 1.794 .0092 -.0209 203 .012
: 11 z: -.022 1.140 .0330 -.0551 402 .048
: 8 s: -.003 1.779 .0113 -.0207 102 .012
plr 6002 403 ( -.112 -.044 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 1 0
PLR 6002:OER.. 10, 1: 9 a: .011 1.473 .0244 .0455 202 .031 90000002 2 6001 .002
: 10 z: -.022 1.140 .0330 -.0551 402 .048
: 9 s: -.003 1.821 .0109 .0212 306 .012
plr 6003 404 ( -.163 -.057 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 1 0
PLR 6003:OER.. 11, 1: 10 a: .004 1.304 .0191 .0403 202 .031 90000003 3 6001 .002
: 11 z: -.028 1.227 .0434 -.0593 402 .048
: 9 s: -.003 1.821 .0109 .0212 306 .012
PLR 6004:OER.. 12 : 12 a: -.004 1.487 .0255 .0459 105 .031 90000004 4 6001 .002
: 12 z: -.040 2.117 .0486 -.1022 404 .048
: 10 s: .000 1.783 .0105 .0208 402 .012
plr 6005 401 ( -.121 -.004 .000) 0.0E+00 2.1E-01 0.0E+00 0 1 0
plr 6005 402 ( .021 -.065 -.052) 3.2E-01 2.1E-01 0.0E+00 1 1 0

```





```

F: trace(Qxx)= 1.233E+01 count= 291
Variance Components Analysis: {multiply SIG_1 by S_gr until S_gr=1}
PHO =OBS SIG_1= .3739 S_gr= 8.81E-01 r= 286.08 N= 489 2.048E-01 2.221E-02 4.195E-02
PLR SIG_1= .0309 S_gr= 9.76E-01 r= 77.96 N= 91 9.338E-02 7.434E-03 8.720E-03
PLR SIG_1= .0483 S_gr= 1.02E+00 r= 87.54 N= 99 1.018E-01 9.079E-03 1.036E-02
PLR SIG_1= .0117 S_gr= 9.15E-01 r= 77.82 N= 81 8.278E-02 6.514E-03 6.852E-03
PLR SIG_1= .0418 S_gr= 1.10E+00 r= 138.07 N= 164 1.403E-01 1.658E-02 1.968E-02
PLR SIG_1= .0743 S_gr= 1.19E+00 r= 142.88 N= 164 1.505E-01 2.028E-02 2.264E-02
PLR SIG_1= .0161 S_gr= 9.32E-01 r= 136.65 N= 144 1.112E-01 1.188E-02 1.237E-02
CONP=OBS SIG_1= .0100 S_gr= 2.00E-04 r= .01 N= 3 3.396E-06 3.155E-14 1.153E-11
sum_r= 947.01 N= 1235 + 3 = 1238=no

SubMatrices A: 1578, N: 973, R: 1578, x: 97, qvv: 16408, qxx: 2812, fill: 0, diag: 1
CPU-time oeq A: .06, order 6:2147.48, R: .02, x:*****, trsp:*****, qvv: .11, qxx: .05, total:10737.66 sec.
Storage: 18812 17755 3468 2240 used 23917 words
Storage available: 9933420 words

```

### A.3 Freie Netzausgleichung ohne Photos

PROJECT(marchyb5) USER(alexander haring) 03Sep-03 13:05:26 <1779>

Varianzkom.p.schätzung

```

ADJUST REFSYS( 9001) HISTOGRA QXX =QVV( 0.01 0.01 0.01) SHOWSTAT =SMARKED_(
0.) WEIGHTFU( 5.) OMITMARK FREENET PHOTOS( 0)

```

```

REFSYS.000 refrak=0 curvat=0 {-1.0191E-08 6378000.0} units 1.E+00[m]
REF 9001.000: 65/ 95, 0 !!!

```

REF	9001.000:	average discrepancies before adjustment	1346,	CATEGORY	1	sigma	erp/prc	rotpar	ior/sca	adp	.sub
Observation	:ukn	:#all-#mk:used	co:sum_res	robfac	_resres,	resmax	_nammax	#			
ShowMARKed	point (	dx	dy	dz	)	weights	index				
plr	6001	403 (	-.014	.013	.000)	0.0E+00	2.1E-01	0.0E+00	0 1 0		
plr	6001	404 (	.010	.049	-.063)	3.2E-01	2.1E-01	0.0E+00	1 1 0		
PLR	6001:OER_	12,	1:	11 a:	.002	.958	.0140	.0296	203	.031	90000001
			1:	12 z:	.004	1.604	.0325	-.0774	203	.048	.002
			1:	10 s:	.000	1.453	.0077	-.0169	203	.012	
plr	6002	403 (	.159	-.059	.000)	0.0E+00	2.1E-01	0.0E+00	0 6 0		
PLR	6002:OER_	10,	1:	9 a:	.009	.970	.0181	.0300	102	.031	90000002
			1:	10 z:	-.018	1.230	.0272	-.0594	403	.048	.002
			1:	8 s:	.001	2.018	.0121	-.0235	404	.012	
plr	6003	404 (	-.150	-.008	.000)	0.0E+00	2.1E-01	0.0E+00	0 5 0		
PLR	6003:OER_	11,	1:	10 a:	.003	.892	.0117	.0276	203	.031	90000003
			1:	11 z:	-.025	1.128	.0278	-.0545	203	.048	.002
			1:	9 s:	-.001	1.670	.0097	-.0195	306	.012	
PLR	6004:OER_	12	1:	12 a:	-.005	2.037	.0269	-.0629	401	.031	90000004
			1:	12 z:	-.038	1.991	.0445	-.0961	201	.048	.002
			1:	10 s:	-.001	1.716	.0103	.0200	402	.012	
plr	6005	401 (	-.170	-.013	.000)	0.0E+00	2.1E-01	0.0E+00	0 6 0		
plr	6005	402 (	.019	-.053	-.052)	3.2E-01	2.1E-01	0.0E+00	1 1 0		
PLR	6005:OER_	8,	1:	7 a:	.004	1.116	.0193	.0345	101	.031	90000005
			1:	8 z:	-.032	1.377	.0490	-.0665	104	.048	.002
			1:	6 s:	-.001	.689	.0050	.0080	104	.012	
plr	6006	101 (	-.215	-.200	-.006)	0.0E+00	0.0E+00	8.6E-01	0 0 5		
PLR	6006:OER_	10,	1:	8 a:	-.003	2.082	.0320	-.0643	403	.031	90000006
			1:	8 z:	-.055	1.891	.0583	-.0913	105	.048	.002
			1:	8 s:	-.003	1.606	.0104	-.0187	108	.012	
plr	6007	401 (	-.073	-.063	.000)	0.0E+00	2.1E-01	0.0E+00	0 3 0		
plr	6007	403 (	-.211	.006	.000)	0.0E+00	2.1E-01	8.6E-01	0 7 1		
PLR	6007:OER_	10,	2:	8 a:	.009	1.710	.0244	.0529	404	.031	90000007
			1:	10 z:	-.032	1.311	.0430	-.0633	404	.048	.002
			1:	8 s:	.005	1.281	.0100	.0149	210	.012	
PLR	6008:OER_	10	1:	10 a:	-.010	1.554	.0213	-.0480	205	.031	90000008
			1:	10 z:	.004	1.532	.0348	.0740	201	.048	.002
			1:	8 s:	.001	.915	.0057	.0107	207	.012	
plr	6009	402 (	.061	.064	-.055)	3.2E-01	2.1E-01	0.0E+00	1 2 0		
plr	6009	404 (	-.176	-.017	-.002)	0.0E+00	2.1E-01	8.6E-01	0 6 1		
PLR	6009:OER_	12,	1:	11 a:	-.001	1.978	.0296	.0611	402	.031	90000009
			1:	12 z:	-.010	1.383	.0317	-.0668	403	.048	.002
			1:	10 s:	.004	1.984	.0113	.0231	403	.012	
plr	6010	106 (	-.011	-.010	.042)	3.2E-01	2.1E-01	0.0E+00	1 1 0		
plr	6010	206 (	-.144	.011	-.002)	0.0E+00	2.1E-01	8.6E-01	0 5 1		
PLR	6010:OER_	6,	1:	5 a:	.000	.353	.0088	-.0109	207	.031	90000010
			1:	6 z:	-.007	1.193	.0252	-.0576	304	.048	.002
			1:	4 s:	.005	1.952	.0128	.0228	304	.012	
plr	7101	203 (	-.018	.072	-.460)	2.4E-01	1.3E-01	0.0E+00	2 1 0		
PLR	7101:OER_	21	1:	21 a:	-.002	1.257	.0268	-.0526	303	.042	90000001
			1:	21 z:	-.011	1.947	.0496	-.1446	332	.074	.002
			1:	18 s:	.004	1.911	.0114	.0308	332	.016	
PLR	7102:OER_	19	1:	19 a:	-.007	1.920	.0359	-.0803	402	.042	90000002
			1:	19 z:	.016	1.263	.0487	.0938	402	.074	.002
			1:	16 s:	.001	1.801	.0147	-.0291	206	.016	
plr	7103	404 (	-.230	.183	.000)	0.0E+00	1.3E-01	0.0E+00	0 6 0		
PLR	7103:OER_	18,	1:	17 a:	-.003	1.477	.0281	.0618	303	.042	90000003
			1:	18 z:	.033	2.463	.0695	.1829	404	.074	.002
			1:	16 s:	-.003	1.805	.0171	-.0291	101	.016	
plr	7104	107 (	.017	.258	-.008)	2.4E-01	0.0E+00	6.2E-01	3 0 4		
plr	7104	201 (	.025	.100	-.338)	2.4E-01	1.3E-01	0.0E+00	2 1 0		
plr	7104	305 (	.002	.061	-.043)	2.4E-01	1.3E-01	0.0E+00	1 1 0		
plr	7104	306 (	-.016	.324	.000)	2.4E-01	0.0E+00	0.0E+00	3 0 0		
PLR	7104:OER_	19	2:	19 a:	.006	1.881	.0333	.0787	402	.042	90000004
			2:	17 z:	.074	2.689	.0941	.1997	101	.074	.002
			2:	13 s:	-.006	1.483	.0150	-.0239	101	.016	
plr	7105	202 (	-.033	.287	-.013)	2.4E-01	0.0E+00	6.2E-01	1 0 4		
plr	7105	306 (	-.008	.228	-.009)	2.4E-01	0.0E+00	6.2E-01	1 0 4		
plr	7105	402 (	-.020	.064	-.086)	2.4E-01	1.3E-01	0.0E+00	2 1 0		
PLR	7105:OER_	15	2:	15 a:	-.004	.961	.0252	-.0402	104	.042	90000005
			1:	13 z:	.057	1.362	.0647	.1011	107	.074	.002
			1:	13 s:	.000	.853	.0082	-.0138	305	.016	
plr	7106	306 (	-.070	-.019	-.116)	2.4E-01	1.3E-01	0.0E+00	1 2 0		
plr	7106	401 (	-.249	.137	-.010)	0.0E+00	1.3E-01	6.2E-01	0 6 2		
PLR	7106:OER_	13,	1:	12 a:	.003	1.678	.0429	-.0702	306	.042	90000006
			1:	13 z:	.093	2.743	.1243	.2037	106	.074	.002
			1:	10 s:	-.007	1.439	.0110	-.0232	107	.016	
plr	7107	105 (	-.043	.252	-.004)	2.4E-01	0.0E+00	6.2E-01	1 0 4		
plr	7107	207 (	-.005	.235	-.018)	2.4E-01	0.0E+00	6.2E-01	2 0 4		
plr	7107	208 (	-.056	.037	-.057)	2.4E-01	1.3E-01	0.0E+00	2 2 0		
plr	7107	304 (	.037	.205	.018)	2.4E-01	0.0E+00	6.2E-01	1 0 3		
plr	7107	306 (	.003	.175	.018)	2.4E-01	0.0E+00	6.2E-01	2 0 3		
plr	7107	332 (	.034	.212	.024)	2.4E-01	0.0E+00	6.2E-01	2 0 3		
plr	7107	404 (	.209	-.027	.000)	0.0E+00	1.3E-01	0.0E+00	0 6 0		

```

PLR 7107:OER_ 17, 1: 16 a: -.008 1.833 .0397 -.0767 206 .042 90000007 7 6001 .002
, 5: 12 z: .064 2.832 .1019 .2103 206 .074
, 1: 14 s: -.003 2.159 .0165 -.0348 403 .016
plr 7108 403 ( -.138 -.013 .015) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 4 1
PLR 7108:OER_ 19, 1: 18 a: .010 2.362 .0385 .0989 208 .042 90000008 8 6001 .002
, 19 z: -.012 1.774 .0494 .1317 201 .074
, 17 s: .001 1.643 .0139 -.0265 205 .016
plr 7109 304 ( -.206 .099 .008) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 5 2
plr 7109 342 ( -.012 .044 -.088) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 7109 402 ( -.126 .128 -.059) 0.0E+00 1.3E-01 0.0E+00 0 4 0
plr 7109 403 ( .002 -.053 -.105) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 4 1 0
plr 7109 404 ( -.142 -.083 -.055) 0.0E+00 1.3E-01 0.0E+00 0 4 0
PLR 7109:OER_ 20, 3: 17 a: .001 1.465 .0352 -.0613 332 .042 90000009 9 6001 .002
, 20 z: .012 1.726 .0606 .1282 402 .074
, 4: 16 s: .001 1.112 .0110 -.0179 201 .016
plr 7110 206 ( -.159 -.017 -.003) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 4 1
plr 7110 401 ( .013 .001 -.426) 2.4E-01 1.3E-01 0.0E+00 1 1 0
plr 7110 404 ( .153 .028 -.046) 0.0E+00 1.3E-01 6.2E-01 0 4 1
PLR 7110:OER_ 12, 2: 10 a: .000 1.238 .0218 -.0518 302 .042 90000010 10 6001 .002
, 12 z: -.003 .740 .0329 -.0550 341 .074
, 1: 11 s: -.006 2.871 .0180 -.0463 404 .016
CONP 8888:O_____ 9, 1: 1 x: .004 .387 .004 .004 401 individ.
, 2 y: .001 .223 .002 .002 401 individ.
, 3 z: -.003 .476 .003 -.005 402 individ.

```

```

WEIGHTFU( 5.000 5.000), MARK d > 1.0E+31: 43 obs. OMCATEG(x:8 y:7 z:6) marked
d * 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 7.00 | 8.00 | 9.00 | ...
| 599 | 168 | 23 | 14 | 8 | 9 | 3 | 1 | 0 | 3 |
NDep | 72.34% | 20.29% | 2.78% | 1.69% | .97% | 1.09% | .36% | .12% | .00% | .36% |
| 68.27% | 27.18% | 4.28% | .26% | .01% | .00% | | | | | |
G01

```

```

The worst discrepancies [ in units of sigma-a-priori of obs.(-robfac) ]:
1 PLR = 7110,nr= 404, dZ = 2.871
2 PLR = 7107,nr= 206, dY = 2.832
3 PLR = 7106,nr= 106, dY = 2.743
4 PLR = 7104,nr= 101, dY = 2.689
5 PLR = 7103,nr= 404, dY = 2.463
6 PLR = 7106,nr= 105, dY = 2.449
7 PLR = 7107,nr= 303, dY = 2.378
8 PLR = 7108,nr= 208, dX = 2.362
9 PLR = 7104,nr= 105, dY = 2.320
10 PLR = 7108,nr= 404, dX = 2.259

```

```

Solutiontime = 10737.492 sec., trace= 590.000, swei= 1.00E+06, eps= 1.00E-06
REF 9001 : 22 unused points
Count of computed points in:
REF : 43, ROT : 10

```

```

pll= 5.3296E-02,pvv= 5.3189E-02,nx= 159,no= 749,nt= 0,oeq: 11624,neq: 10458,adj= 1346
IT= -2, s(pvl/nobs= 749)= 8.4354E-03 s(pvv/nred= 590)= 9.4948E-03 =sigma0 ; S_apriori= 1.00E-02
Coord_red: .000 .000 .000 stored
--> 3 observations without redundancy compared to Qepps= 1.0E-05.

```

```

Qmin= .00005, Qmax= .97547; Sigma_0= .009; Sig_apriori= .010 = Sa
inner-
The worst obs.: point, coo normalized_discrepancy r(i) reliab_
1 PLR = 7106,nr= 306, qvX = 3.379*Sa, r= .2735, 7.6
2 PLR = 7106,nr= 106, qvY = 3.189*Sa, r= .8204, 4.4
3 PLR = 7110,nr= 404, qvZ = 3.102*Sa, r= .9695, 4.1
4 PLR = 7107,nr= 206, qvY = 3.099*Sa, r= .9262, 4.2
5 PLR = 7104,nr= 101, qvY = 2.979*Sa, r= .9038, 4.2
6 PLR = 7101,nr= 332, qvY = 2.886*Sa, r= .5044, 5.6
7 PLR = 6006,nr= 403, qvX = 2.872*Sa, r= .5827, 5.2
8 PLR = 7108,nr= 208, qvX = 2.792*Sa, r= .7943, 4.5
9 PLR = 7106,nr= 105, qvY = 2.781*Sa, r= .8606, 4.3
10 PLR = 7107,nr= 303, qvY = 2.770*Sa, r= .8172, 4.4
Sigma_0= .009; Sig_apriori= .010

```

```

F: Free Network Constraint-flags: {XYZabcS} FF
F: using 65 object-, 10 rotation-, and 0 scale-constraints of category 5
F: cg_reduc.: 2.899 # .926 # local center of gravity
F: shift: .006 # .0014, .001 # .0014, -.004 # .0014 of center of gravity
F: rotation: -.00305 # .0153, .03399 # .0160, -.03768 # .0112 around center of gravity
F: scale: 1.00010 # 1.75E-04 from center of gravity

```

```

point X Y Z A B phi Pxy Pxyz Equ
REF = 9001 subtype= 0
Coord_reduc.: .000 # .000 # .000 # stored
F: 101 1.469 # .0023, .862 # .0023, 2.030 # .0025 (.0028, .0018, -49.98, .0033, .0042) 25
F: 102 4.667 # .0020, .564 # .0018, .239 # .0022 (.0020, .0018, -7.53, .0026, .0035) 23
F: 103 5.123 # .0022, .456 # .0018, .835 # .0023 (.0023, .0018, -24.33, .0029, .0037) 18
F: 104 4.265 # .0016, .283 # .0024, .814 # .0022 (.0024, .0016, 109.60, .0029, .0037) 18
F: 105 1.274 # .0019, 1.155 # .0021, 2.309 # .0023 (.0023, .0018, 134.62, .0029, .0037) 22
F: 106 .232 # .0015, .799 # .0020, .927 # .0022 (.0020, .0015, 114.94, .0025, .0033) 17
F: 107 1.283 # .0018, -.023 # .0021, .837 # .0022 (.0021, .0018, 115.49, .0028, .0036) 17
F: 108 3.164 # .0017, .461 # .0024, .754 # .0023 (.0024, .0017, 113.76, .0029, .0037) 18
F: 201 1.381 # .0018, 1.329 # .0020, 2.237 # .0022 (.0020, .0017, 121.28, .0027, .0035) 34
F: 202 1.644 # .0016, 1.535 # .0020, 1.941 # .0022 (.0020, .0016, 112.12, .0025, .0034) 35
F: 203 5.592 # .0020, 1.016 # .0017, .906 # .0022 (.0020, .0017, 17.94, .0026, .0034) 23
F: 204 4.630 # .0020, 1.710 # .0018, 1.018 # .0022 (.0020, .0018, 5.83, .0026, .0034) 24
F: 205 4.227 # .0018, 1.947 # .0017, .087 # .0022 (.0018, .0017, -38.13, .0025, .0033) 30
F: 206 2.931 # .0017, 2.140 # .0021, .768 # .0021 (.0021, .0017, 106.93, .0026, .0034) 28
F: 207 1.320 # .0017, 1.731 # .0019, 1.704 # .0021 (.0020, .0016, 135.13, .0026, .0033) 23
F: 208 1.195 # .0019, 1.964 # .0023, .384 # .0024 (.0024, .0018, 118.54, .0030, .0038) 17
F: 209 .514 # .0020, 1.114 # .0044, .904 # .0031 (.0044, .0020, 99.23, .0049, .0058) 12
F: 210 1.076 # .0019, 1.656 # .0024, 1.105 # .0024 (.0024, .0018, 120.31, .0030, .0039) 18
F: 301 3.200 # .0049, 28.290 # .0050, .501 # .0071 (.0050, .0049, 87.82, .0070, .0100) 21
F: 302 8.414 # .0039, 19.326 # .0046, .321 # .0068 (.0046, .0039, 87.51, .0060, .0091) 27
F: 303 13.463 # .0035, 10.384 # .0040, .226 # .0050 (.0045, .0028, 59.44, .0053, .0072) 24
F: 304 14.706 # .0033, .372 # .0024, -.908 # .0038 (.0034, .0023, -17.87, .0041, .0056) 34
F: 305 14.872 # .0036, -3.583 # .0032, -.037 # .0043 (.0042, .0025, -41.73, .0048, .0065) 26
F: 306 -6.894 # .0037, -2.937 # .0029, -1.102 # .0047 (.0038, .0027, 27.48, .0047, .0067) 21
F: 331 7.564 # .0020, 1.097 # .0022, -.814 # .0030 (.0022, .0019, 74.59, .0029, .0042) 18
F: 332 2.889 # .0021, 4.505 # .0022, -.707 # .0034 (.0023, .0020, 130.69, .0030, .0045) 17
F: 341 -9.771 # .0044, .961 # .0031, -.768 # .0045 (.0046, .0029, 18.95, .0054, .0070) 21
F: 342 -9.653 # .0057, 8.311 # .0043, .898 # .0055 (.0063, .0034, -32.88, .0071, .0090) 14
F: 343 -9.447 # .0054, 16.517 # .0058, .738 # .0082 (.0061, .0051, 139.90, .0079, .0114) 15
F: 401 .004 # .0015, .002 # .0020, -.002 # .0018 (.0021, .0015, 108.81, .0025, .0031) 26
F: 402 5.174 # .0016, -.001 # .0018, -.005 # .0020 (.0018, .0015, 78.16, .0024, .0031) 25
F: 403 .004 # .0018, 2.398 # .0022, -.002 # .0019 (.0023, .0017, 85.84, .0028, .0034) 26
F: 404 5.166 # .0016, 2.399 # .0018, -.016 # .0019 (.0018, .0015, 126.92, .0024, .0030) 32
F: 90000001 3.040 # .0017, 7.476 # .0020, 1.298 # .0034 (.0020, .0017, 96.19, .0026, .0043) 0
F: 90000002 9.138 # .0018, 5.279 # .0020, 1.132 # .0030 (.0021, .0017, 62.36, .0027, .0040) 0
F: 90000003 10.835 # .0022, 1.321 # .0017, 1.029 # .0027 (.0022, .0017, -10.26, .0028, .0039) 0
F: 90000004 7.583 # .0022, -3.430 # .0020, 1.150 # .0034 (.0022, .0020, -23.23, .0030, .0045) 0
F: 90000005 3.706 # .0019, -3.836 # .0021, 1.083 # .0047 (.0021, .0019, 110.24, .0029, .0055) 0
F: 90000006 -1.937 # .0022, -3.117 # .0023, 1.101 # .0030 (.0024, .0020, 51.46, .0032, .0044) 0
F: 90000007 -4.651 # .0022, 3.462 # .0019, 1.134 # .0025 (.0022, .0019, -28.70, .0029, .0038) 0
F: 90000008 -1.240 # .0020, 7.259 # .0021, 1.389 # .0035 (.0022, .0019, 124.97, .0029, .0045) 0
F: 90000009 10.422 # .0024, 1.498 # .0024, 3.338 # .0030 (.0024, .0023, 42.59, .0034, .0045) 0
F: 90000010 -.602 # .0019, 2.591 # .0026, 3.430 # .0025 (.0027, .0018, 118.67, .0033, .0041) 0
F: trace 43 3.262E+00 # .0026, 3.432E+00 # .0027, 5.902E+00 # .0035 ( 1.260E+01 # .0030 )
ROT = 1 subtype= 2
F: 1 2.50556 # .0362, -2.07974 # .0257, 94.16038 # .0149
ROT = 2 subtype= 2

```

```

F:      2      -1.12055 # .0298,      1.47261 # .0267,      28.62322 # .0132
ROT =   3 subtype= 2
F:      3      3.34871 # .0325,      1.29344 # .0247,      384.05472 # .0128
ROT =   4 subtype= 2
F:      4      -.24682 # .0404,      -.59933 # .0277,      345.80444 # .0168
ROT =   5 subtype= 2
F:      5      .88905 # .0660,      -1.15599 # .0285,      340.41931 # .0186
ROT =   6 subtype= 2
F:      6      -.78502 # .0451,      1.21594 # .0308,      263.39392 # .0175
ROT =   7 subtype= 2
F:      7      1.94857 # .0391,      .04189 # .0269,      172.75647 # .0136
ROT =   8 subtype= 2
F:      8      1.41865 # .0346,      -1.12471 # .0283,      155.68437 # .0148
ROT =   9 subtype= 2
F:      9      -.91322 # .0328,      -.66802 # .0258,      60.73453 # .0137
ROT =  10 subtype= 2
F:     10      6.48163 # .0395,      -2.51166 # .0278,      125.48517 # .0137
F: trace 10      4.556E-02 # .0408,      2.044E-02 # .0273,      6.222E-03 # .0151 ( 7.222E-02 # .0297 )
    
```

F: trace(Qxx)= 1.267E+01 count= 159

```

Variance Components Analysis:      {multiply SIG_1 by S_gr until S_gr=1 }
PLR   SIG_1= .0309 S_gr= 9.09E-01 r= 57.42 N= 91 8.652E-02 4.742E-03 7.486E-03
PLR   SIG_1= .0483 S_gr= 9.26E-01 r= 72.66 N= 99 9.326E-02 6.225E-03 8.697E-03
PLR   SIG_1= .0117 S_gr= 8.58E-01 r= 75.24 N= 81 7.743E-02 5.538E-03 5.995E-03
PLR   SIG_1= .0418 S_gr= 9.34E-01 r= 120.01 N= 164 1.220E-01 1.048E-02 1.489E-02
PLR   SIG_1= .0743 S_gr= 1.08E+00 r= 130.75 N= 164 1.370E-01 1.536E-02 1.876E-02
PLR   SIG_1= .0161 S_gr= 9.00E-01 r= 133.92 N= 144 1.073E-01 1.085E-02 1.152E-02
CONP=OBS SIG_1= .0100 S_gr= 5.81E-03 r= .00 N= 2 7.572E-05 2.020E-13 5.733E-09
sum_r= 590.00 N= 745 + 4 = 749=no
    
```

```

SubMatrices A:      822,      N:      435, R:      593, x:      53,      qvv:      4716, qxx:      814, fill:      0, diag:      56
CPU-time oeq A:      .03, order 6:      .00, R:      .01, x:      .00, trsp .00, qvv:      .02, qxx:      .01, total:      .07 sec.
Storage:      11624      6788      2208      1228 used 10458 words
Storage available: 9954089 words
    
```

---

## Literaturverzeichnis

- [Besl und McKay, 1992] Besl, P.J., McKay, N.D., 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, February 1992. S. 239-256.
- [Czeike, 1974] Czeike, F., 1974. Das große Groner Wien Lexikon. Wien-München-Zürich.
- [Geomagic, 2003a] Firma Raindrop Geomagic. <http://www.geomagic.com>, Zugriff August 2003.
- [Geomagic, 2003b] Firma Raindrop Geomagic, 2003. Geomagic Studio 5.0, Online-Hilfe.
- [Geometrie, 2003] Institut für Geometrie, TU Wien.  
[http://www.geometrie.tuwien.ac.at/ig/rd/re\\_text.html](http://www.geometrie.tuwien.ac.at/ig/rd/re_text.html), Zugriff August, 2003.
- [Hoschek und Lasser, 1989] Hoschek, J., Lasser, D., 1989. Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. Teubner, Stuttgart.
- [Kager et al., 2002] Kager, H., Rottensteiner, F., Kerschner, M., Stadler, P., 2002. OR-PHEUS 3.2.1 User Manual. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- [Kodak, 2003] Firma Kodak.  
<http://www.kodak.com/global/en/professional/products/cameras/dcs460/dcs460.jhtml>, Zugriff August 2003.
- [Kraus, 1997] Kraus, K., 1997. Photogrammetrie Band 1, Grundlagen und Standardverfahren. Mit Beiträgen von P. Waldhäusl. Dümmler, Bonn. 6. Auflage.
- [Kraus, 1996] Kraus, K., 1996. Photogrammetrie Band 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Mit Beiträgen von J. Jansa und H. Kager. Dümmler, Bonn. 3. Auflage.
- [Kraus, 2001] Kraus, K., 2001. Laser-Scanning - Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), 21. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, Konstanz, Deutschland, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 10, September 2001. S. 13-22.
- [Kraus und Schneider, 1988] Kraus, K., Schneider, W., 1988. Fernerkundung Band 1, Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechnik. Dümmler, Bonn.
- [MENSI, 2003] Firma MENSI. <http://www.mensi.com>, Zugriff August 2003.
- [Niemeier und Wild, 1995] Niemeier, W., Wild, P., 1995. Use of Laser Scanners for the Determination of Building Geometries. Grün, A. und Kahmen, H. (Hrsg.), Optical 3D-Measurement Techniques III. Wichmann, Heidelberg. S. 275-284.

- 
- [ORIENT, 2003] Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.  
[http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html\\_hjk/orient.html](http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html_hjk/orient.html), Zugriff August 2003.
- [Pfeifer, 2002] Pfeifer, N., 2002. 3D Terrain Models on the Basis of a Triangulation. Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- [Pfeifer und Rottensteiner, 2001] Pfeifer, N., Rottensteiner, G., 2001. The Riegl Laser Scanner for the Survey of the Interiors of Schönbrunn Palace. Grün, A. und Kahmen, H. (Hrsg.), Optical 3-D Measurement Techniques V. Wichmann, Heidelberg. S. 571-578.
- [Pottmann et al., 2002] Pottmann, H., Leopoldseder, S., Hofer, M., 2002. Simultaneous registration of multiple views of a 3D object. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 3A, Commission III, S. 265-270.
- [Riegl, 2002] Firma Riegl, 2002. 3D-RiScan, Version 2.27.1.1, Online-Hilfe.
- [Riegl, 2003] Firma Riegl. <http://www.riegl.com>, Zugriff August 2003.
- [Rottensteiner F., 2001] Rottensteiner, F., 2001. Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS. Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- [Rottensteiner G., 2000] Rottensteiner, G., 2000. Verwendung eines abbildenden terrestrischen 3D-Laser-Scanners für photogrammetrische Aufgaben. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- [Zoller+Fröhlich, 2003] Firma Zoller+Fröhlich. <http://www.zofre.de>, Zugriff August 2003.

## Lebenslauf

Name: Alexander Haring  
Geburtsdatum: 16. November 1978  
Geburtsort: Wien  
Wohnort: Wien  
Staatsbürgerschaft: Österreich  
Vater: Karl Haring, Bibliothekar  
Mutter: Christa Haring (geb. Neuwirth), kaufmännische Angestellte a.D.

### Bildungsweg:

1985 – 1989      Volksschule, Wien  
1989 – 1997      AHS, Wien  
Juni 1997        Matura  
ab Herbst 1997   Studium an der TU Wien (Vermessungswesen)  
April 2000        1. Diplomprüfung  
                      --> Studienzweig Geoinformation