

Vermessung der Pegasus-Statue auf der Wiener Staatsoper mittels Photogrammetrie sowie terrestrischen und Nahbereichs-Laserscannings

CAMILLO RESSL¹

***Zusammenfassung:** Es wird die Erstellung eines 3D-Modells einer Pegasus-Statue aus Laserscanner-Daten zum Zwecke statischer Untersuchungen beschrieben. Die Standbeine der Statue wurden mit dem Nahbereichs-Laserscanner Minolta VIVID 900 erfasst, wobei für jedes Standbein etwa 45 Einzelscans benötigt wurden. Der Rest der Statue wurde mit dem terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i in 8 Aufstellungen erfasst. Die Vermessung dieser Statue mit den genannten Instrumenten ist deswegen besonders hervorzuheben, da hier einerseits für einen terrestrischen Laserscanner ein besonders „kleines“ Objekt aus noch dazu sehr kurzer Entfernung, und andererseits für einen Nahbereichsscanner ein sehr „großes“ Objekt aufgenommen wurde. Die gegenseitige Ausrichtung zwischen den Riegl-Daten und den zusammengesetzten Minolta-Daten wurde in einer hybriden Bündelblockausgleichung bestimmt, in der auch verknüpfende Photos der Statue verwendet wurden. Abschließend wurde aus den Daten ein „wasserdichtes“, für statische Untersuchungen geeignetes 3D-Modell dieser komplexen Statue abgeleitet.*

1 Einleitung

Am Dach der Wiener Staatsoper wurden im 19. Jahrhundert zwei Pegasus-Statuen errichtet. Aufgrund dieses hohen Alters und der ungünstigen Stabilisierung (jedes Pferd steht nur auf drei Beinen, die noch dazu fast in einer Linie angeordnet sind; siehe Abb. 1) wurden Bedenken bezüglich der Standsicherheit der Statuen laut. In der Folge wurde das Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik der TU Wien mit der Erstellung eines statischen Gutachtens für eine der beiden Statuen (Ausmaße: 4x3x4 m) beauftragt.

Voraussetzung für die statische Untersuchung ist ein 3D-Modell der gesamten Statue. Aufgrund der statischen Problemstellung ist die Modellierungsgenauigkeit der Standbeine besonders wichtig. Der restliche Körper der Statue kann hingegen gröber modelliert werden. Mit der Erstellung eines solchen 3D-Modells wurde das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien beauftragt.

An der TU Wien wurden im Rahmen sogenannter innovativer Projekte zwei Laserscanner angekauft: der terrestrische Laserscanner Riegl LMS-Z420i (Messbereich: 2-800m mit cm-Messgenauigkeit) [RIEGL LMS 2004] im Rahmen des innovativen Projektes "The Introduction of ILScan technology into University Research and Education" und der Nahbereichs-Laserscanner Minolta VIVID 900 (Messbereich: 0,6-2,5m mit mm-Messgenauigkeit), [MINOLTA 2004], im Rahmen des innovativen Projektes "3D Technology". Diese Geräte wurden für die Vermessung der Pegasus-Statue eingesetzt, wobei die Standbeine mit dem Minolta-Scanner erfasst wurden und der Rest der Statue mit dem Riegl-Scanner. Um beide Laserscanner-Datensätze in ein gemeinsames Koordinatensystem zusammenführen zu können, wurden zusätzlich Photos mit der Kodak DCS 460c um die Statue verteilt aufgenommen. In diesem Aufsatz werden die einzelnen Arbeitsschritte von den Vermessungsarbeiten über die Registrierung der Daten bis zur Erstellung des 3D-Modells beschrieben.

¹ DI Dr. Camillo Ressler, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstr. 27-29, 1040 Wien, e-mail: car@ipf.tuwien.ac.at



Abb. 1: Links: Die zu modellierende Pegasus-Statue auf der Wiener Staatsoper.
Rechts: Der Laserscanner Riegl LMS-Z420i im Einsatz (Foto: Riegl LMS).

2 Vermessungsarbeiten

Tabelle 1 enthält eine Kurzcharakterisierung der für die Vermessung der Statue zur Verfügung stehenden Laserscanner.

	Minolta VIVID 900	Riegl LMS-Z420i
Klassifizierung	Nahbereichs-Laserscanner	terrestrischer Laserscanner
Entfernungsmessung	Lichtschnittverfahren	Impulslaufzeit
Messbereich	mit Weitwinkelobjektiv: Blickfeld (Hz × V): 33° × 25° Entfernung: 0,6-2m (abhängig von Fokussierung)	Hz: 0-360° V: 40-120° Entfernung: 2-800m
Messgenauigkeit	< ±1mm (auf 1m)	< ±1cm (auf 3m)
Punkte pro Scan	680 x 480	bis zu 280.000.000 (abhängig von Winkelbereich und Winkelschrittweite)
Texturinformation	RGB: immanent	Laserintensität: immanent RGB: optional
Messdauer	2,5 sec	ca. 24.000 Punkte/sec

Tab. 1: Kurzcharakterisierung der zur Verfügung stehenden Laserscanner

2.1 Der Nahbereichs-Laserscanner Minolta VIVID 900

Der Minolta-Scanner ist in erster Linie für den Innenraumeinsatz zur Erfassung von Gegenständen in dm-Größe konzipiert. Aufgrund des verwendeten Lichtschnittverfahrens zur Entfernungsmessung setzt der Einsatz des Minolta-Scanners gewisse Anforderungen an das Umgebungslicht (d.h. Gleichmäßigkeit und nicht zu hell). Der Scannvorgang sieht üblicherweise so aus, dass der Gegenstand auf einem Drehteller positioniert wird und mehrmals in verschiedenen Drehstellungen vom fix stehenden Minolta-Scanner mit Überlappung aufgenommen wird. *Relativ zum Gegenstand* liefert somit jeder Einzelscan eine Punktwolke in

einem anderen Koordinatensystem. Die so in unterschiedlichen Koordinatensystemen anfallenden Einzelscans müssen danach in einem gemeinsamen Koordinatensystem zusammengeführt werden. Für diesen Vorgang hat sich der Ausdruck „Registrierung“ eingebürgert (als Übersetzung des entsprechenden Englischen Ausdrucks ‚registration‘, was soviel bedeutet wie ‚genaues Ausrichten‘). Da im Allgemeinen in den Einzelscans keine korrespondierenden Punkte identifizierbar sind, die ein Zusammenführen mittels räumlicher Drehung und Schiebung erlauben würden, wird für diese Registrierung meist eine Form des sogenannten ICP-Algorithmus (engl. ‚iterative closest point‘ [BESL & MCKAY, 1992]) verwendet.

Beim ICP-Algorithmus wird die Registrierung von zwei Punktwolken – eine ausreichende Überlappung vorausgesetzt – in der Weise erreicht, dass eine Punktwolke festgehalten wird und die andere so von einer zur nächsten Iteration verdreht und verschoben wird, dass der Abstand zum nächstgelegenen Punkt der festgehaltenen Punktwolke minimiert wird. Da die iterativ zugeordneten Punkte nie wirklich korrespondieren können, wird die endgültige Registrierung im Allgemeinen nicht optimal sein.

Eine Weiterentwicklung des ICP-Algorithmus ist die sogenannte SDM-Methode (engl. squared-distance-minimization; z.B. [POTTMANN ET AL., 2002]). Hier wird zu einem Punkt der ersten Wolke, nicht wie beim ICP-Algorithmus der Abstand zum nächstgelegenen Punkt der zweiten Wolke minimiert, sondern der Abstand zur nächstgelegenen Tangentialebene der zweiten Wolke. Dadurch ergibt sich erstens eine qualitativ bessere Registrierung, und zweitens konvergiert diese Methode schneller als der ICP-Algorithmus (quadratisch statt linear).

Die vom Minolta-Scanner aufgenommenen Daten können direkt im Softwarepaket Raindrop Geomagic Studio 5 [RAINDROP GEOMAGIC, 2004] verarbeitet werden. Diese Software erlaubt die Registrierung von zwei und mehreren Einzelscans nach der SDM-Methode.

2.2 Der terrestrische Laserscanner Riegl LMS-Z420i

Der LMS-Z420i eignet sich für den Innen- und Außeneinsatz gleichermaßen, setzt wegen der aktiven Laserquelle kaum Anforderungen an die Beleuchtungsverhältnisse, und wird im Vergleich zum Minolta-Scanner zum Scannen von Objekten mit Durchmessern von wenigen Metern bis mehreren hundert Metern verwendet. Unabhängig von der Größe des Objekts wird auch bei der Aufnahme durch den Riegl-Scanner im Allgemeinen mehr als ein Scan notwendig sein um das Objekt vollständig erfassen zu können. Obwohl die einzelnen Riegl-Scans im Prinzip auch per ICP oder SDM registriert werden können, werden jedoch in der Praxis meist vor dem Laserscanning retroreflektierende Signalmarken am Objekt oder in der Nachbarschaft aufgeklebt und während des Scanvorgangs erfasst. Dadurch ist erstens eine Registrierung der Einzelscans mit Hilfe korrespondierender Punkte möglich, und zweitens können – im Prinzip – die einzelnen Scans mit deutlich geringerer Überlappung aufgenommen werden als für eine ICP- oder SDM-Registrierung notwendig wäre.

Die Steuerung des Riegl-Scanners und die Bearbeitung der aufgenommenen Daten erfolgt mit der Software RiSCAN-Pro [RIEGL LMS, 2004].

2.3 Die Vermessung der Pegasus-Statue

Da die Standbeine detaillierter zu modellieren waren als der Rest der Pegasus-Statue, wurde für die Standbeine der genauere Minolta-Scanner eingesetzt. Aufgrund des kleinen Blickfelds des Minolta-Scanners musste jedes Standbein (Höhe ca. 1,5m) aus vielen Einzelscans zu-

sammengesetzt werden. Ein Einzelscan deckte eine Fläche von etwa $30 \times 30 \text{ cm}^2$ mit einem typischem Punktabstand von 1mm am Objekt ab; Abb. 2 (mitte). Um diese Scans in Geomatic Studio mittels SDM-Methode registrieren zu können, wurde auf eine Überlappung der Einzelscans von 30-40% geachtet. Manche Teile der Beine waren schwer zugänglich, so waren die Beininnenseiten nur unter der Statue erreichbar. Andere Teile wiederum waren schwer einsehbar, wie die Hufpartien oder die abgewinkelte Ferse. Aufgrund dieser Umstände bedurfte es etwa 200 Minolta-Einzelscans um die drei Standbeine vollständig zu erfassen (Aufnahmedauer: etwa 10 Stunden verteilt auf drei Tage).

Deutlich einfacher war die Aufnahme der gesamten Statue mit dem Riegl-Scanner. Innerhalb von 6 Stunden konnte die gesamte Statue mit 8 Scans erfasst werden (inklusive Bauch, exklusive einiger höher gelegener nicht einsichtiger Bereiche; Gesamtpunkteanzahl: ca. 2,4 Mill.). Mit Hilfe von 23 Signalmarken konnten die Scans bereits vor Ort registriert werden.

Von den Statikern wurden an der Statue radiographische und Ultraschall-Messungen zur Materialanalyse vorgenommen, und die Orte dieser Messungen wurden mit weißen Klebestreifen markiert; siehe Abb. 2 (links). Letztere sollten koordinativ bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurden von der Statue 8 Aufnahmen mit der digitalen Kamera Kodak DCS 460c mit einem 15mm-Objektiv gemacht. Da in diesen Bildern auch die meisten Riegl-Signalmarken abgebildet sind, stellen die Bilder den Rahmenblock für das spätere Zusammenführen der Riegl- und Minolta-Daten dar, wobei die Verknüpfung der verschiedenen Datensätze durch die weißen Klebestreifen und die Riegl-Signalmarken erfolgt: Im Intensitätsbild jedes Riegl-Scans sind neben den Riegl-Signalmarken auch viele weiße Klebestreifen zu erkennen. Letztere können auch im RGB-Bild mancher Minolta-Scans identifiziert werden.

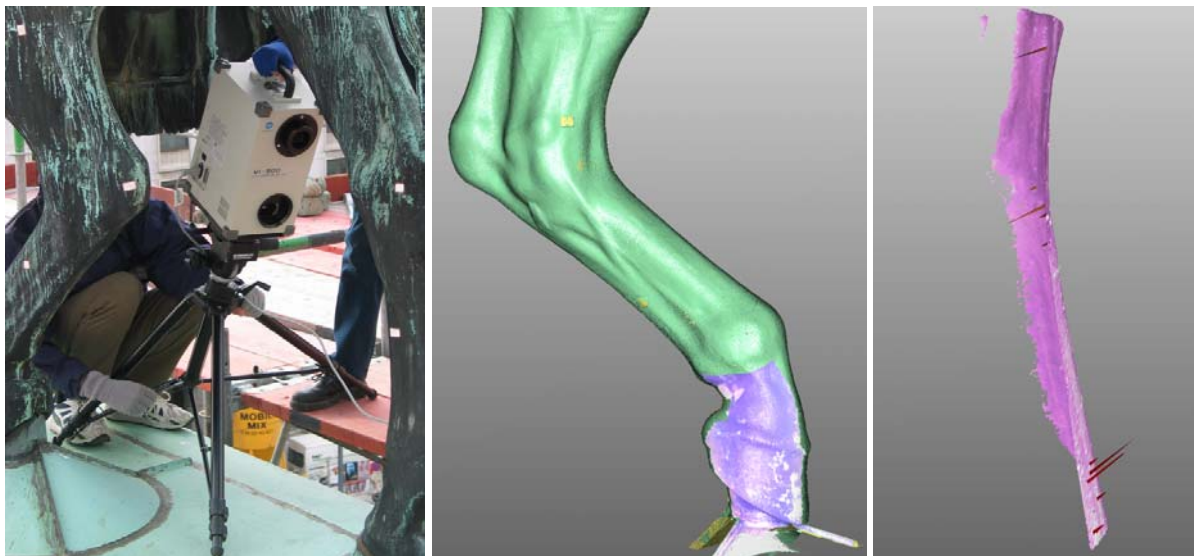


Abb. 2: Links: Der Laserscanner Minolta VIVID 900 im Einsatz (Foto: N. Studnicka).

Mitte: Ein ausgewählter Minolta-Einzelscan von insgesamt 42, die für die Modellierung des geknickten Standbeins verwendet wurden. Dieser Einzelscan ist mit seiner aufgezeichneten RGB-Information wiedergegeben und der in grün dargestellten Gesamtregistrierung aller 42 Einzelscans überlagert.

Rechts: Grobe Scanfehler (rot betont, max. 4.5cm) eines Minolta-Einzelscans (mit der aufgezeichneten RGB-Textur dargestellt, Größe: ca. $30 \times 15 \times 8 \text{ cm}^3$).

Um die Modellierung der Pegasus-Statue korrekt in Bezug zum natürlichen Lot durchführen zu können, wurden die Riegl-Signalmarken zusätzlich noch mit einem Nivellier eingemessen. Alle Vermessungsarbeiten fanden Anfang bis Mitte November 2003 statt. Der Einsatz des

Riegl-Scanners und des Minolta-Scanners bei der Pegasus-Statue ist in Abb. 1 (rechts) bzw. Abb. 2 (links) dargestellt.

3 Orientierung aller Daten

Zunächst erfolgte die Registrierung der Minolta-Einzelscans für jedes Standbein getrennt. Danach wurden alle Daten – 8 Bilder, 8 Riegl-Scans, 3 Minolta-Standbeine und die Nivellierdaten – in einer gemeinsamen hybriden Bündelblockausgleichung zusammengeführt.

3.1 Registrierung der Minolta-Daten

Von den ursprünglich insgesamt 200 aufgenommenen Minolta-Einzelscans wurden letztendlich etwa 45 Einzelscans pro Standbein verwendet (siehe Abb. 2 (mitte) und Abb. 3 a)). Vor der Registrierung der Einzelscans, die mit dem Programm Raindrop Geomagic Studio 5 durchgeführt wurde, wurden zunächst alle Einzelscans von groben Scan-Fehlern manuell befreit (siehe Abb. 2 (rechts)) und das Rauschen in den Daten leicht reduziert. Bei der Registrierung selbst startet man zunächst mit zwei Scans. Einen davon hält man fest und registriert den anderen zum festgehaltenen. Die dafür verwendete SDM-Methode benötigt eine grobe Startregistrierung, die durch manuelles Identifizieren von drei korrespondierenden Bereichen in den beiden Scans erfolgt.

Danach hält man die beiden bereits registrierten Scans fest und fügt einen dritten hinzu, usw. bis alle Einzelscans eines Standbeins zusammengefügt sind. Im Anschluss daran kann die gegenseitige Ausrichtung aller Scans noch verbessert werden indem eine sogenannte globale Registrierung durchgeführt wird. Dabei werden alle Scans gleichzeitig gegeneinander leicht verdreht und verschoben. Nach der globalen Registrierung der Einzelscans wurde jedes Standbein durch rund 4,5 Mill. Punkte beschrieben. Um die Weiterverarbeitung einfacher zu gestalten, wurden die Punkte speziell im Überlappungsbereich, wo sich oft bis zu 4 Einzelscans überdeckten, ausgedünnt. Mit der Geomagic-Funktion „Select Best Data“ wurden die Daten pro Standbein auf rund 2 Mill. Punkte reduziert; d.h. die ursprünglich erstellten Einzelscans überlappen sich im Durchschnitt zu 50%.

Am Ende einer globalen Registrierung gibt Geomagic Studio die Standardabweichung der Distanzen zwischen den Scans aus. Für jedes Standbein ergab sich etwa ein Wert von 0,2mm. Leider ist ein solch kleiner Wert für die Standardabweichung der Distanzen kein Garant für eine saubere Registrierung. So waren trotz dieser kleinen Standardabweichung bei allen Beinen noch einige grobe Registrierungsfehler vorhanden, siehe Abb. 3, ohne dass man von Geomagic Studio in dieser Hinsicht informiert wird. Besonders problematisch ist dabei, dass man beim Betrachten des Ergebnisses nur grobe Registrierungsfehler außerhalb des Beins erkennen kann. Fehler im Inneren bleiben verdeckt. Eine mögliche Strategie auch Fehler im Inneren zu finden besteht darin, die registrierten Daten auszudünnen (z.B. nur ein Punkt pro 4mm-Voxel) und nach Punktanhäufungen zu suchen; siehe Abb. 3.

Eine Ursache für diese groben Registrierungsfehler konnte nicht gefunden werden. Mögliche Ursachen könnten sein:

- Die Aufnahmebedingungen waren nicht optimal:
 - Der Zugang zur Statue war nur über ein Baugerüst möglich, bei dem Schwingungen nicht vermeidbar waren. Oft musste der Minolta-Scanner vom Stativ genommen werden, um die Sicht zu bestimmten Statuenteilen zu erhalten.

Mehrmals musste der Scanner dazu auch in ungewöhnlicher Weise (stark gekippt oder fast ‚am Rücken liegend‘) ausgerichtet werden. Dabei konnte der Scanner nur per Hand oder mit Pflöcken stabilisiert werden. Aufgrund der zwar kurzen aber doch endlichen Aufnahmedauer von ca. 2,5 Sekunden sind daher Fehler dynamischer Natur in den Aufzeichnungen nicht auszuschließen.

- Nach dem Scannen der Beine am ersten Tag stellte sich heraus, dass nicht alle Bereiche erfasst wurden. Somit mussten an einem weiteren Tag Ergänzungsaufnahmen durchgeführt werden. An beiden Messtagen (im November) herrschten einerseits generell sehr kalte Temperaturen (die von den üblichen Labortemperaturen deutlich abwichen), und andererseits waren die Temperaturverhältnisse für beide Tage und für die Einzelscans, die im Laufe eines Tages bei unterschiedlichem Sonnen- und Wolkenstand aufgenommen wurden, unterschiedlich. Diese Temperaturänderungen könnten die Basislänge zwischen Laser- und Kamerateil des Scanners beeinflussen. Daher ist es denkbar, dass Gruppen von Einzelscans mit leicht unterschiedlichen Maßstäben aufgenommen wurden; d.h. man hätte an jedem Messtag mehrmals die Kalibrierung des Geräts überprüfen müssen, was allerdings ein entsprechendes (mobil einsetzbares) Kalibrierungsobjekt voraussetzt.
- Die große Anzahl von 45 Einzelscans pro Standbein, deren hohe Überlappung und die riesige Anzahl von etwa 4.5 Mill. Punkten könnten womöglich den Registrierungsalgorithmus von Geomagic überfordert haben. Speziell könnte das Aufstellen der Korrespondenzen zwischen den Punkten und der Tangentialebenen davon betroffen sein.

Nach der ersten globalen Registrierung jedes Beines wurde das Ergebnis auf grobe Registrierungsfehler untersucht und die entsprechenden Einzelscans zur Gänze entfernt. Anschließend wurde die globale Registrierung wiederholt.

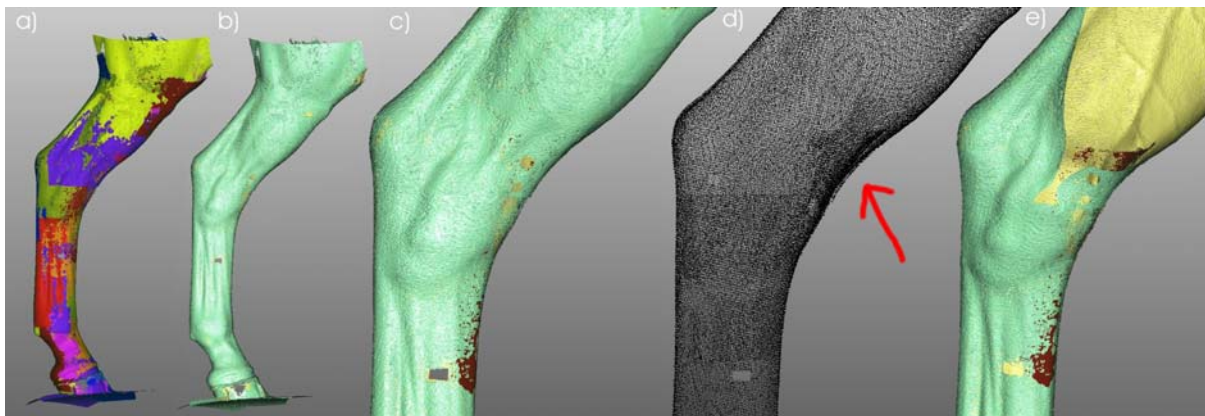


Abb. 3: Das ausgestreckte hintere Standbein

- a) Ergebnis der ersten globalen Registrierung; jeder Einzelscan ist in einer anderen Farbe dargestellt.
- b) wie a); alle Einzelscan sind gleich eingefärbt (grün = Außenseite, gelb = Innenseite)
- c) Detail von b); in rot ist ein grob falsch registrierter Einzelscan dargestellt, der von außen aber nicht als solcher erkannt wird.
- d) wie c); ausgedünnter Datensatz mit einem Punkt pro 4mm-Voxel. Die Bereiche mit dichter liegenden Punkten markieren Bereiche mit Registrierungsfehlern.
- e) wie c); verdrehte Darstellung mit ebenem Anschnitt. Die Schnittlinie des roten Einzelscans sollte mit der Schnittlinie der restlichen grünen Einzelscans zusammenfallen.

3.2 Hybride Bündelblockausgleichung aller Daten

Nachdem in den Bildern, den Riegl-Scans und den in Geomagic Studio zusammengesetzten Minolta-Standbeinen die weißen Klebestreifen und Riegl-Signalmarken manuell gemessen wurden, erfolgte eine hybride Ausgleichung dieser Beobachtungsdaten gemeinsam mit den Nivellementmessungen im Programm ORIENT [ORIENT 2004]. Tabelle 2 enthält die Ausgleichungs-Statistik. Das Datum wurde dabei wie folgt festgelegt: der Ursprung wurde in eine der Riegl-Signalmarken am Fundament der Statue gelegt, zwei Rotationen wurden durch die Nivellementmessungen bestimmt und der Maßstab war über beide Scannerdaten und das Nivellement gegeben. Die fehlende horizontale Verdrehung wurde so bestimmt, dass sich eine korrekte azimutale Ausrichtung des Blocks ergab. Letzteres war notwendig, da die Statiker Aufzeichnungen der Zentralen Wetterwarte über Windrichtung und -stärke verarbeiten wollten, um deren Einfluss auf die Statik der Statue – speziell die Flügel des Pegasus – abschätzen zu können.

Beobachtungstyp	1- σ -Genauigkeit
Photos (DCS 460c)	0,5pixel
Riegl-Scans:	
Horizontal-Winkel	0,07 ^{gon}
Vertikal-Winkel	0,05 ^{gon}
Strecke	0,02m
Minolta-Scans:	
x,y,z	0,003m
Nivellement	0,005m

Tab. 2: Genauigkeiten (als 1-fache Standardabweichung) der einzelnen Beobachtungstypen in der hybriden Ausgleichung

Das Ergebnis der Bündelblockausgleichung sind im Wesentlichen die verbesserten Positionen und Verdrehungen der 8 Riegl-Scans und der zusammengesetzten Minolta-Standbeine relativ zum definierten Datum. Abb. 4 visualisiert dieses Ergebnis in Form der Überlagerung der Punktwolken der 8 Riegl-Scans und der Minolta-Standbeine.

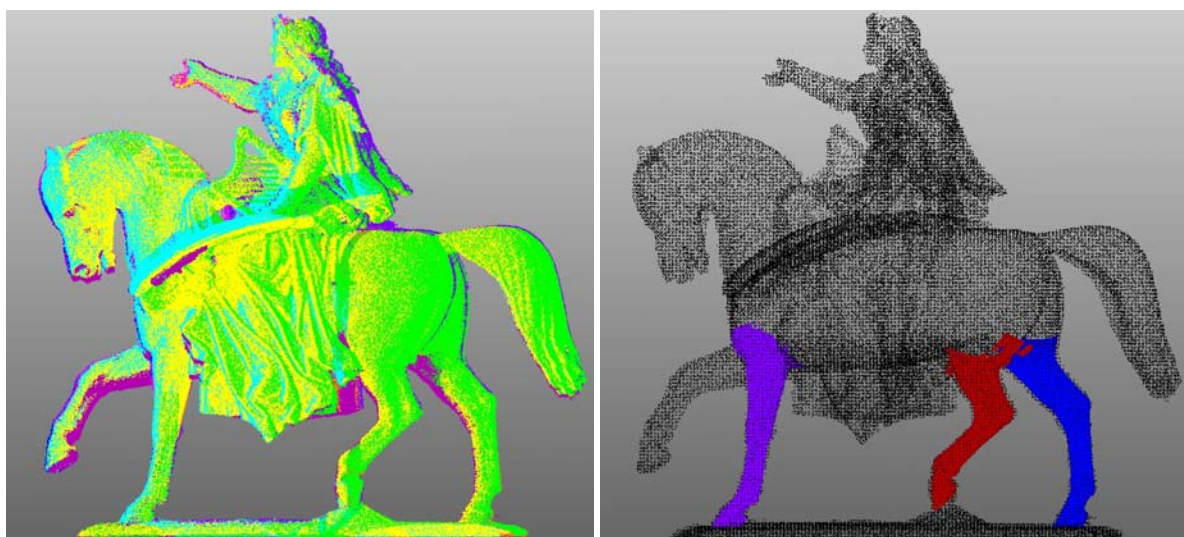


Abb. 4: Visualisierung der aus der Bündelblockausgleichung resultierenden Orientierung der Riegl-Scans und Minolta-Standbeine. Links: die 8 Riegl-Scans in unterschiedlichen Farben dargestellt. Rechts: Die Stellung der Minolta-Standbeine relativ zu den Riegl-Daten; letztere sind zur Verbesserung der Darstellung ausgedünnt.

Bevor die Minolta-Standbeine in die Bündelblockausgleichung mitaufgenommen wurden, wurde versucht, die Minolta-Daten mit der SDM-Methode in Geomagic mit den bereits registrierten Riegl-Daten zu verknüpfen. Jedoch war das Ergebnis nicht sehr zufriedenstellend, was sich darin ausdrückte, dass die Minolta-Standbeine leicht asymmetrisch in den Riegl-Daten zu liegen kamen. Die Ursache dafür wird im unterschiedlichen Rauschen in den Riegl- und Minolta-Daten vermutet, und dass sich dadurch Probleme bei der SDM-Methode ergeben können: die stärker verrauschten Riegl-Daten, die bei der Registrierung fest gehalten werden, definieren die Tangentialebenen für die SDM-Methode, auf die dann die weniger verrauschten Minolta-Daten eingepasst werden.

Aus diesem Grund wurden die Minolta-Standbeine mit den weißen Klebestreifen als Verknüpfungspunkte in den Bündelblock mitaufgenommen. Die damit erhaltene Lagerung zwischen den Riegl- und Minolta-Daten war etwas besser als jene der SDM-Registrierung in Geomagic. Wegen der erwähnten Probleme bei der Registrierung der Minolta-Daten und der daraus resultierten Ungewissheit bezüglich der Korrektheit der zusammengesetzten Standbeine, wurden die Standbeine in je zwei überlappende Ober- und Unterteile geteilt. Im Bündelblock konnten sich diese geteilten Minolta-Datensätze über die Verknüpfungen bestmöglich an die anderen Datensätze (Riegl-Daten und Photos) anpassen. Konsequenterweise wurde damit die Lagerung zwischen den Riegl- und Minolta-Daten noch etwas verbessert.

4 3D-Modellierung der Statue

Ziel der Vermessung war ein 3D-Modell der Statue. Wegen der anschließenden statischen Modellierungen durfte das geometrische Modell selbst keine Löcher aufweisen; es musste ein Volumen beschreiben, also ‚wasserdicht‘ sein. Da die Statiker für ihre eigene Modellierung das geometrische Volumen durch finite Elemente ersetzen, musste das geometrische Modell möglichst kompakt repräsentiert werden.

Aus diesen Gründen (Löcher und riesige Datenmenge) konnten die registrierten ausgedünnten Punktwolken nicht einfach trianguliert werden. Anstatt dessen wurde mittels Geomagic ein NURBS-Modell abgeleitet. NURBS steht für ‚Non-Uniform Rational B-Splines‘. Ein NURBS-Modell ist eine analytische Beschreibung der Statue, die aus der originalen Punktwolke abgeleitet wird. Somit vereint ein NURBS-Modell den Detailreichtum einer dichten Punktwolke mit der Effizienz einer analytischen Beschreibung.

Die Erzeugung des NURBS-Modells wurde mit Geomagic Studio in mehreren Schritten durchgeführt (wobei die Minolta- und Riegl-Daten erst zum Schluss zusammengeführt wurden):

1. Transformation der einzelnen Datensätze ins gemeinsame Datum:
Mit dem Geomagic-Hilfsmittel ‚transform‘ können die im Bündelblock bestimmten Verschiebungen und Verdrehungen an die einzelnen Datensätze (8 Riegl-Scans und die zusammengesetzten Minolta-Standbeine) angewendet werden.
2. Ausdünnung der originalen Punktwolke (Geomagic-Befehl ‚uniform sample‘):
Die Minolta-Standbeine wurden mit einem Punktabstand von 3mm (Huf) bis 15mm (oberes Beinende) ausgedünnt. Somit wurde jedes Minolta-Standbein letztendlich durch ca. 150.000 Punkte beschrieben. Die Riegl-Daten wurden mit 15 – 20mm Punktabstand ausgedünnt und enthielten am Ende ca. 450.000 Punkte.
3. Triangulierung jedes Datensatzes (Geomagic-Befehl ‚wrap‘) mit Triangulierungskorrektur (Geomagic-Befehl ‚clean‘) und einmaliger minimaler Rauschverminderung (Geomagic-Befehl ‚noise reduction‘):

Es hat sich als vorteilhaft erwiesen ,wrap' gemeinsam mit ,clean' mehrmals hintereinander auszuführen, wobei vor jeder Wiederholung die Triangulierung aufgehoben werden muss (Geomagic-Befehl ,modify current points'), um die angepasste Punktwolke erhalten zu können. In dieser Weise wird die Anzahl der Punkte etwas, die Anzahl der Löcher jedoch deutlich reduziert. So wurde beim Riegl-Datensatz die Anzahl der Löcher von anfangs 100.000 nach viermal ,wrap' und ,clean' auf unter 200 gebracht. Die verbleibenden Löcher konzentrierten sich auf drei Stellen (Flügeloberseite, Übergang Reiterin und Pferderücken, Übergang Satteldeckeinnenseite und Pferdebauch), die manuell gefüllt werden konnten.

4. Zusammenfügen aller triangulierten Datensätze (Geomagic-Befehl ,merge') und automatische NURBS-Erzeugung; siehe Abb. 5.

Da die Punktdichte zwischen den vier Datensätzen (3 Minolta-Standbeine und der Riegl-Rumpf) sehr unterschiedlich ist, müssen die Datensätze als Triangulationen zusammengefügt werden und nicht als Punktwolken. In letzterem Fall würde die anschließende Triangulierung wieder Löcher erzeugen. Es existiert in Geomagic ein gutes Werkzeug, das mittels weniger Steuerparameter (z.B. Oberflächengenauigkeit und Detailreichtum) aus einer triangulierten Fläche automatisch eine NURBS-Repräsentation erzeugt.

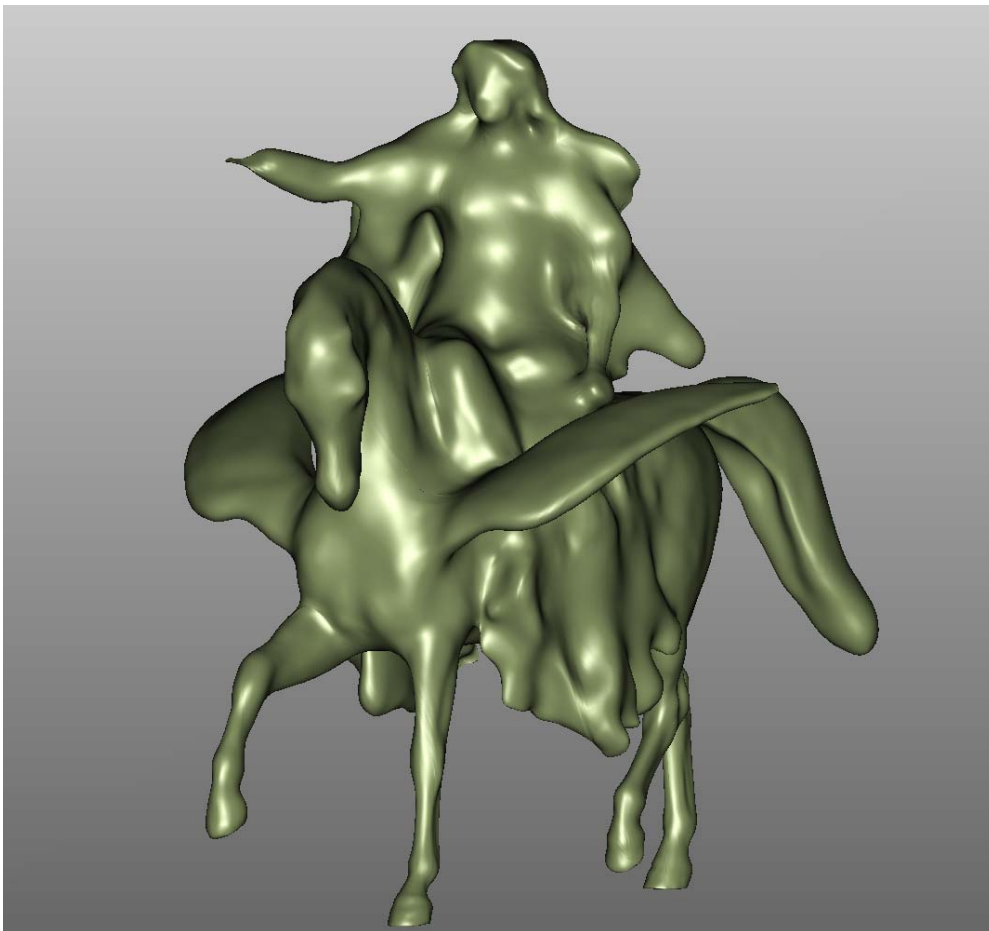


Abb. 5: Das 3D-Modell der gesamten Pegasus-Statue in der NURBS-Repräsentation. Von den original gescannten Punkten (drei Minolta-Standbeine zu je ca. 4,5 Mill. Punkte und acht Riegl-Einzelscans zu insgesamt 2,3 Mill. Punkte) wurden letztendlich nur 165.000 für die NURBS-Erzeugung verwendet. Beim Oberkörper sind viele Details aufgrund der geringeren Punktdichte bei der Modellierung verloren gegangen (z.B. Harfe oder rechte Hand). Für die nachfolgenden statischen Untersuchungen waren diese Details jedoch nicht von Belang.

5 Zusammenfassung

Es wurde beschrieben, wie unter Verwendung des Nahbereichs-Laserscanner Minolta VIVID 900 und des terrestrischen Laserscanners Riegl LMS-Z420i ein 3D-Modell einer Pegasus-Statue zum Zwecke statischer Untersuchungen erstellt wurde. Die Registrierung der Minolta-Einzelscans erfolgte mit dem Programm Raindrop Geomagic Studio 5. Es zeigte sich dabei, dass nach der globalen Registrierung immer noch einige grobe Registrierungsfehler vorhanden waren, obwohl die Standardabweichung zwischen den Scans mit 0,2mm ausgegeben wurde. Als Ursachen für diese groben Fehler werden die ungünstigen Aufnahmebedingungen bzw. eine Überforderung des Registrierungsalgorithmus von Geomagic aufgrund der hohen Anzahl von Einzelscans vermutet.

Die gegenseitige Ausrichtung zwischen den Riegl-Daten und den zusammengesetzten Minolta-Daten wurde in einer hybriden Bündelblockausgleichung bestimmt, in der auch verknüpfende Photos der Statue verwendet wurden. Die nach der Ausgleichung geschätzte Genauigkeit der zusammengesetzten Minolta-Daten ergab sich dann an einzelnen diskreten Punkten zu etwa $\pm 3\text{mm}$. Dieses Beispiel zeigt, dass die Registrierung von Punktwolken ohne Korrespondenzen, zumindest so wie sie in Raindrop Geomagic Studio 5 realisiert ist, eine diffizile Angelegenheit sein kann. Dies gilt besonders für Aufnahmen, die nicht unter Laborbedingungen erstellt wurden und für Objekte, bei denen sehr viele Einzelscans zur vollständigen Erfassung notwendig sind. In diesem Fall geht viel der Genauigkeit der Einzelscans in der Summe der Registrierungen verloren.

Die erreichte Genauigkeit war für das gegebene Problem nach Rücksprache bei den Statikern mehr als ausreichend. Die statischen Untersuchungen basierend auf dem erzeugten NURBS-Modell der Statue sind mittlerweile abgeschlossen und es werden die auftretenden Spannungszustände bei verschiedenen ‚worst-case‘-Belastungsszenarien als unbedenklich beurteilt.

In der Zwischenzeit wurde die Version Raindrop Geomagic Studio 6 veröffentlicht, die mit einigen Erweiterungen im Bereich der Registrierung ausgestattet sein soll. Es ist daher geplant, zumindest für Teile des Minolta-Datensatzes die Registrierung mit dieser neuen Version von Geomagic Studio zu wiederholen. Unter Umständen ergeben sich dadurch neue Erkenntnisse über die möglichen Ursachen der in Kapitel 3.2 beschriebenen Registrierungsfehler.

6 Literaturverzeichnis

BESL, P.J., MCKAY, N.D., 1992: A method for registration of 3-D shapes. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 14 (2), 239-256.

MINOLTA, 2004: <http://www.minoltausa.com/vivid/default.asp>

ORIENT, 2004: ORIENT - An Universal Photogrammetric Adjustment System, Product Information, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Vienna, http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html_hjk/orient_e.html

POTTMANN, H., LEOPOLDSEDER, S., HOFER, M., 2002: Simultaneous registration of multiple views of a 3D object. Processings PCV '02, Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 3A, Commission III.

RAINDROP GEOMAGIC, 2004: <http://www.geomagic.com/products/studio/>

RIEGL LMS, 2004: <http://www.riegl.co.at/>