

Bachelorarbeit:

Realisierung eines virtuellen 3D-Spaziergangs durch eine historische Werkstatt mittels Computer Vision

Von Anna Nikolaieva

Studiengang: Geoinformatik und Satellitenpositionierung

Sommersemester 2018

Abgabetermin: 26.07.2018

Betreuer:

Prof. Dr. Peter Krzystek

Prof. Dr. Markus Oster

Die Arbeit wurde angefertigt in Kooperation mit dem Landesamt für

Digitalisierung, Breitband und Vermessung

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Thomas Meier

**LANDESAMT FÜR
DIGITALISIERUNG,
BREITBAND UND
VERMESSUNG**



Inhaltsverzeichnis

1 Einführung

- 1.1 Motivation
- 1.2 Zielsetzung der Arbeit
- 1.3 Teilergebnisse der Arbeit
- 1.4 Struktur der Arbeit

2 Datenmaterial

- 1.5 Verwendete Kamera
 - 2.1.1 Technische Daten
 - 2.1.2 Bilderfassung
- 1.6 Aufnahmetechniken
- 1.7 Auswahl eines Raumes
- 1.8 Aufnahme von Passpunkten mit dem Tachymeter
- 1.9 Aufnahme eines Raumes mit der Kamera

3 Methoden

- 3.1 Computervision
 - 3.1.1 Aufnahmekonzepte
 - 3.1.2 Komponenten eines photogrammetrischen Gesamtsystems
 - 3.1.3 Grundlagen eines photogrammetrischen Auswerteprozesses
 - 3.1.4 Grundsätze einer Messkamera
- 3.2 Verwendete Software
 - 3.2.1 ContextCapture
 - 3.2.2 Agisoft PhotoScan
 - 3.2.3 Autodesk ReCap
 - 3.2.4 Pix4D
 - 3.2.5 Sure
 - 3.2.6 VisualSFM
- 3.3 Virtuelle Realität

4 Experimente und Ergebnisse

4.1 3D-Bildpunktwolken und 3D-Modellen eines gesamten Raums

4.1.1 ContextCapture

4.1.2 Agisoft PhotoScan

4.1.3 Autodesk ReCap

4.1.4 Pix4D

4.1.5 Sure

4.1.6 VisualSFM

4.2 3D-Bildpunktwolken und 3D-Modellen von einzelnen Objekten des Raums

4.2.1 Agisoft PhotoScan

4.2.2 Autodesk ReCap Photo

4.2.3 ContextCapture

4.3 Umsetzung des virtuellen Spazierganges

5 Diskussion und Bewertung

5.1 Vergleich der 3D-Modelle des gesamten Raums

5.2 Vergleich der 3D-Modelle von einzelnen Objekten des Raums

5.3 Virtuelle Realität

6 Zusammenfassung und Ausblick

Eigenständigkeitserklärung

Literaturverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1 EINFÜHRUNG

1.1 Motivation

Computer Vision oder Maschinelles Sehen entwickelte sich über die letzten Jahrzehnte von einem kleinen Gebiet zu einem der aktivsten Forschungsgebiete diese Tage. Es ist heutzutage zwischen der realen Welt und künstlichen Computer Welt eine vielversprechende Verbindung in Form der Mensch-Maschinen-Kommunikation entstanden. Darum gibt es auch auf dem Markt eine Reihe an Softwarelösungen, die ganz einfach aus einem realen Objekt der Realität ein 3D-Modell am Computer generieren.

Ein bekanntes Verfahren des Computer Vision ist Structure from Motion (SfM). Dieses Verfahren wurde speziell dafür entwickelt, die Punkte aus einer Reihe von überlappenden Bilder, die aus verschiedenen Positionen aufgenommen wurden zu identifizieren. Allgemein verdankt das SfM-Verfahren seiner Existenz mathematischen Modellen und Innovationen, die vor vielen Generationen in der Photogrammetrie entwickelt wurden. Über das SfM Verfahren haben bisher viele Autoren in ihren Bücher geschrieben (z. B. Spetsakis und Aloimonos (1999): S.245-255.); Szeliski und Kang (1994): S. 189-210.).

Genauso wie traditionelle Photogrammetrie, verwendet die SfM-Photogrammetrie überlappende Bilder, die aus mehreren Aussichtspunkten erworben werden. Jedoch unterscheidet sich die SfM Photogrammetrie von traditionellen Photogrammetrischen Ansätzen durch die Bestimmung von Parameter der inneren und äußeren Orientierung ohne die Notwendigkeit von vordefinierten "Bodenkontrollpunkte" mit bekannten Koordinaten (Westoby (2012): S.300-314). Die genaue Umsetzung von SfM variiert, es hängt davon ab wie es codiert ist, dieser allgemeine Ansatz wurde bereits von vielen Autoren erfasst (Westoby (2012): S.300-314); Fonstad (2013): S.817-827). Im Wesentlichen werden mehrere Ansichten eines Objekts mit einer Digitalkamera aus verschiedenen Positionen erfasst. Die gemeinsamen Merkmale in allen Bildern werden dann mit Hilfe von SIFT-Operator klassifiziert und die räumlichen Beziehungen zwischen den ursprünglichen Bildstandorten in einem 3D-Koordinatensystem aufgebaut. Durch

Bündelblockausgleichung werden gemessene Bildkoordinaten in 3D-Koordinaten des Objekts transformiert (z.B Snavely (2008): S. 189-210). Als Ergebnis bekommt man eine dreidimensionale Punktwolke im gleichen lokalen 3D-Koordinatensystem (Micheletti (2015): S.5). Durch die Oberflächenrekonstruktion der Punktwolke wird eine geschlossene Modelloberfläche erstellt und als fertiges 3D-Modell übermittelt.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist das Erzeugen eines fotorealistisches 3D-Modells eines Innenraums der druckhistorischen Werkstätte LDBV München und Umsetzung dieses 3D-Raums in die virtuelle Realität.

Grundsätzlich werden in dieser Arbeit zwei Problemstellungen behandelt. Die erste behandelt die 3D-Erfassung des gesamten Raums der druckhistorischen Werkstätte inklusive der Druckmaschinen. Diese Aufgabe wird mithilfe des Verfahren der Computer Vision wie Structure-from-Motion (SfM) gelöst. Die zweite Problemstellung betrifft die Umsetzung des aus den Bildern gewonnenen 3D-Modells in die virtuelle Realität. Dies geschieht mittels 3D-Modellierungsprogramm Unity.

1.2 Teilergebnisse der Arbeit

Zum Berechnen der Bildpunktwolken und 3D-Modellen wurden sechs Programmen verwendet: Pix4D, VisualSfM, Autodesk ReCap, ContextCapture, Sure und Agisoft PhotoScan. Der Berechnungsablauf erfolgt in drei Schritten. Im ersten Schritt werden die Parameter für die Kamerakalibrierung (innere Orientierung) und die Bildorientierungen (äußere Orientierung) automatisch berechnet. Als nächstes wird eine dünne 3D-Punktwolke und danach eine dichte 3D-Punktwolke wiederum vollautomatisch berechnet. Im letzten Schritt wird eine 3D-Modell aus den Bilddaten vollautomatisch fotorealistisch texturiert.

Die Aufnahme der druckhistorischen Werkstätte erfolgte in zwei Phasen. In der ersten Phase wurde der Raum mit allen Möbelstücken und Geräten zusammen aufgenommen und danach mit verschiedenen Programmen berechnet. Der Raum wurde mit wenig Erfolg erfasst, da die 3D-Modellen viele Rekonstruktionslöcher sowie fehlerhafte Geometrie beinhalten.

In der zweiten Phase wurde der Versuchsraum aufgeteilt und jedes Gerät einzeln von

allen Seiten mit der Kamera aufgenommen und anschließend, dieses Mal nur mit drei Programmen - Agisoft PhotoScan, ContextCapture und Autodesk ReCap Photo, berechnet. Grund dafür ist große Verlustinformationen bei der 3D-Modellerstellung in der 1. Phase. Von jedem Gerät wurden mind. 100 Fotos aufgenommen. Dies sollte eine detaillierte 3D-Modellberechnung ermöglichen.

Anschließend wurde das 3D-Modell des Raums in das 3D-Modellierungsprogramm Unity importiert und durch die VR-Verbindung anschaulich mit VR-Brille gemacht.

1.3 Struktur der Arbeit

In dieser Arbeit werden die Grundlegenden Konzepte der SfM-Photogrammetrie vorgestellt und am Beispiel der 3D-Erfassung von den druckhistorischen Werkstätten eingesetzt, um das Potenzial von SfM-Anwendungen für die 3D-Datenerfassung von räumlichen Daten darzustellen.

Auf die Kameraeigenschaften sowie wichtige Hinweise zur Erfassung von Objekten mit der Kamera inklusive günstige Aufnahmekonfigurationen für die bessere Erfassung der Objekte und die Auswahl des Aufnahmeobjekts sowie deren Vorbereitung und Aufnahme werden in Kapitel 2 eingegangen.

Der gesamte photogrammetrische Auswerteprozess inklusive das Wissen über die üblichen Koordinatensysteme wie Pixel-, Bild-, Objekt- und Modelkoordinatensystem, Kenntnisse der Inneren und Äußeren Orientierungen, Kamerakalibrierung, Bildorientierung und Oberflächenrekonstruktion und Erklärung der Aufnahmetechnik sowie wichtigsten Komponenten der photogrammetrischen Gesamtsystems werden in Kapitel 3 deutlich erklärt.

Der zu rekonstruierende Raum wurde mit sechs verschiedenen Auswerteprogrammen berechnet und visualisiert. Die Ergebnisse und Vergleiche der 3D-Modellenberechnung werden in Kapitel 4 zusammengefasst und in Kapitel 5 bewertet und ausdiskutiert. Dabei werden die zur Verfügung gestellte Softwareprogramme durch die Berechnung der Punktwolken und 3D-Modellen der Objekte visuell und quantitative geprüft.

Abschließend in Kapitel 6 werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsgebieten und Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

2 DATENMATERIAL

2.1 Verwendete Kamera

Für die photogrammetrischen Aufnahmen wurde eine Digitale Spiegelreflexkamera Nikon D3300 eingesetzt.

2.1.1 Technische Daten

Die technischen Daten der Kamera sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Die Kamera besitzt einen leistungsstarken CMOS-Sensor mit Aufnahme­fläche von 23,5 x 15,6 mm groß; mit 6.000 x 4.000 Pixel erreicht er eine Auflösung von 24 Megapixel. Die Lichtempfindlichkeit der Kamera kann zwischen ISO 100 und ISO 12.800 gewählt werden. Bildqualität verschlechtert sich erst ab ISO 3.200. Die Kamera schießt scharfe Bilder in hoher Qualität ohne Tiefpassfilter bei Tageslicht und mit Blitzlicht. Mit einer Akkuladung kann man bis zu 1000 Fotos aufnehmen, Abb.1 (Nikon: www.nikon.de).



Abb.1 Benutzte für die Aufnahme digitale Spiegelreflexkamera Nikon D3300 (Nikon: www.nikon.de).

Tabelle 1: Technische Daten der Kamera Nikon D3300 (Nikon: www.nikon.de)

Kamera Typ	Digitale Spiegelreflexkamera
Bildsensor	CMOS-Sensor, 23,5 x 15,6 mm 24,8 Megapixel (physikalisch) 24,2 Megapixel (SDHC effektiv)
Gesamtpixelzahl	24,78 Millionen
Max Bildauflösung	6.000 x 4.000 Bildpunkte
Serienbilder pro Sekunde	5,0 Bilder pro Sekunde
Dateiformat	NEF (RAW), JPEG, NEF (RAW)+JPEG
Speichermedium	SD, SDXC
Objektiv	Nikon-F-Bajonett (mit AF-Kontakten)
ISO-Empfindlichkeit	ISO 100 bis ISO 12.800
Gewicht	ca. 460 g mit Akku und Speicherkarte, jedoch ohne Gehäusedeckel; ca. 410 g (nur Kameragehäuse)

2.1.2 Bilderfassung

Die Rekonstruktion von Innenräumen mittels Photogrammetrie ist eine schwierige Aufgabe. Die kurze Distanz zum Objekt und die große Menge an Objekten erhöhen drastisch die Anzahl der Bilder, die benötigt werden, um die Szene richtig zu rekonstruieren. Um die maximale Entfernung von der Szene zu erreichen, sollte man sich nahe an die Wand stellen und auf die gegenüberliegende Seite des Raumes schießen. Ein häufiger Fehler besteht darin, in der Mitte des Raumes zu stehen und panoramisch zu fotografieren. Möglicherweise muss man das Objekt in verschiedenen Höhen aufnehmen. Wenn Tische oder andere Möbelstücke im Raum stehen, werden zusätzliche Fotos benötigt, um den unteren oder hinteren Teil davon zu erfassen, siehe

Abb.2-3. Ein anderes häufiges Problem ist das Fehlen von Textur an den Wänden. Dies kann zu Löchern im 3D-Modell oder sogar zu einem Ausfall während der Aerotriangulation führen (ContextCapture.2015: S.5)

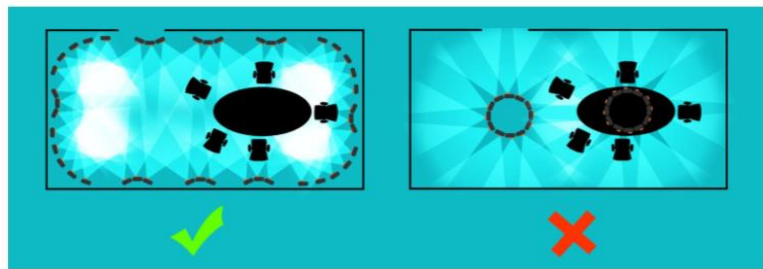


Abb.2 Das korrekte Aufnahmemuster von Innenraum (ContextCapture.2015: S.5)

Bei der Erfassung von Objekten mit der Kamera sollten diese Hinweise beachtet werden (Agisoft PhotoScan.2016: S.5):

1. Verwenden von einer Digitalkamera mit einigermaßen hoher Auflösung (5 MP oder mehr).
2. Vermeiden von Weitwinkel- und Fischaugenobjektive. Die beste Wahl sind Objektive mit 50 mm Brennweite (35 mm Filmäquivalent). Es wird empfohlen, eine Brennweite von 20 bis 80 mm im 35-mm-Äquivalent zu verwenden.
3. Fixierte Linsen sind bevorzugt. Wenn Zoom-Objektive verwendet werden, sollte die Brennweite während des gesamten Aufnahmestudiums entweder auf maximal oder auf einen minimalen Wert eingestellt werden, um stabilere Ergebnisse zu erzielen
4. Aufnahme der Bilder mit der maximalen Auflösung
5. Der ISO-Wert sollte auf den niedrigsten Wert eingestellt sein, da andernfalls die hohe ISO-Werte zu Bildrauschen führen.
6. Der Blendenwert sollte hoch genug sein, um eine ausreichende Brennweite zu erzielen. Damit kann man scharfe, nicht verschwommene Fotos aufnehmen.
7. Die Verschlusszeit sollte nicht zu langsam sein, da sonst durch die leichte Bewegungen Unschärfe auftreten können.
8. Vermeiden von den homogenen, glänzenden, spiegelnden oder transparenten Objekten z.B. glatte Wände ohne Textur, Glas oder Wasser.
9. Vermeiden von Überbelichtung und Unterbelichtung der Bilder.
10. Vermeiden von den unerwünschten Vordergrundbereichen.

11. Vermeiden von Verschieben von Objekten innerhalb der zu rekonstruierenden Szene.
12. Vermeiden von den absolut flachen Objekten oder Szenen.
13. Es müssen genügend Fotos gemacht werden, um das gesamte zu rekonstruierende Objekt abzudecken. Jeder Punkt der Szene muss mindestens in 2 benachbarten Fotos erfasst werden.
14. Nur Originalbilder. Beschneiden, Drehen oder Veränderung der Größe der Bilder ist verboten.

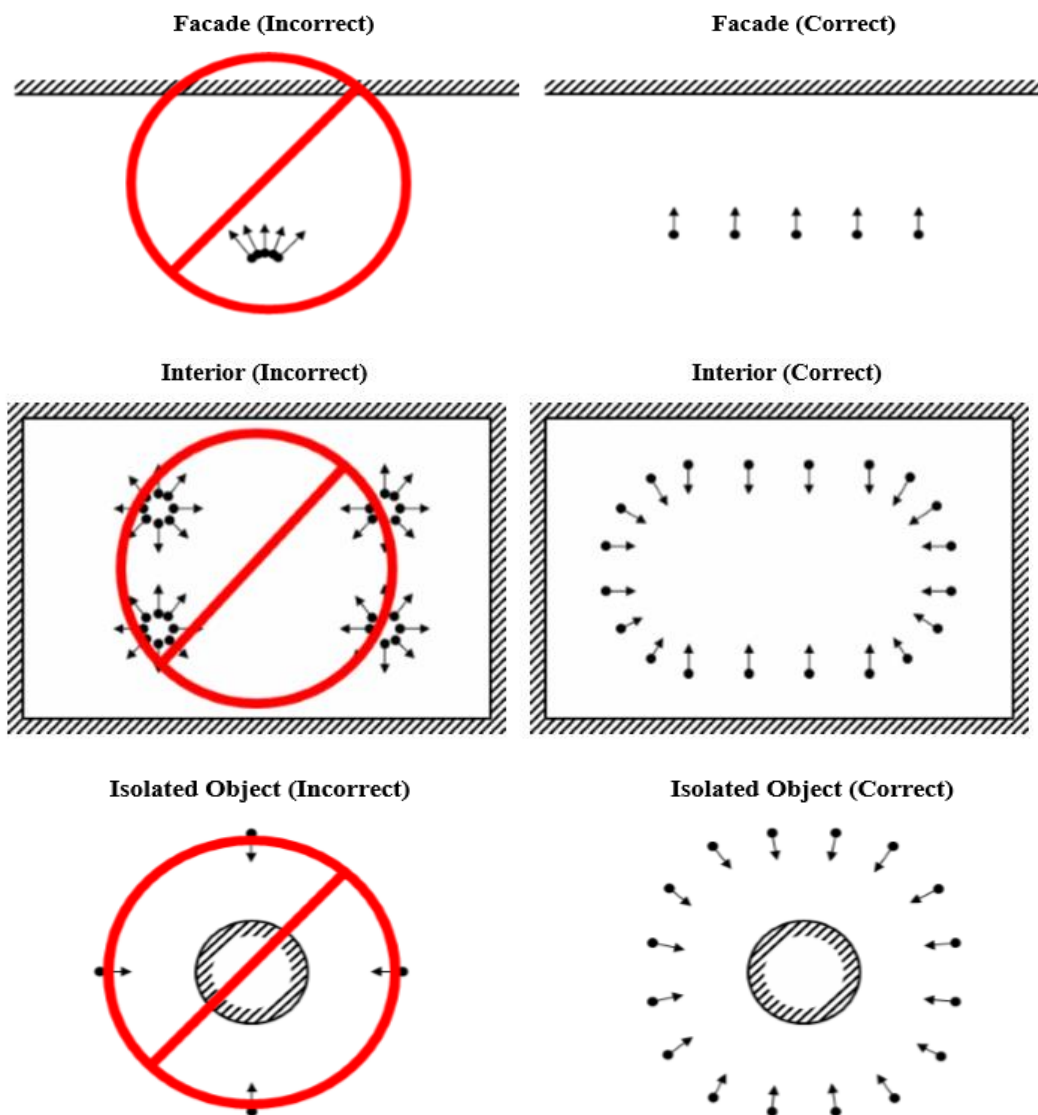


Abb. 3: Aufnahmekonfigurationen (Agisoft PhotoScan.2016: S.5-6)

2.2 Aufnahmetechniken

Photogrammetrische Aufnahmetechnik erfasst alle Komponente der Vorbereitung des Messobjektes und Bildaufnahme.

Nach Vorgaben des LDBV steht der Raum der Druckhistorischen Werkstätte zur 3D-Erfassung. Druckhistorische Werkstätte befindet sich im Gebäude des Landesamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern in München. Der Raum ist ca. 12m x 15m groß. Der Zugang zum Museum ist nur nach der vorherigen Absprache möglich.

Vor der photogrammetrischen Aufnahme wurde der Raum mit Laserscanner aufgenommen. Die Aufnahme wurde vom Amt selbst durchgeführt. Die Laserscanneraufnahme wurde in diesem Projekt nicht benutzt, da der Auftraggeber mit dem Ergebnis nicht zufrieden war.

Die neue Idee ist den Raum photogrammetrisch mit Hilfe einer digitalen Kamera dreidimensional zu erfassen. Hierfür gab es keine Genauigkeitsanforderungen. Die 3D-Abbildung des Raums sollte möglichst lückenfrei und fotorealistisch aussehen. Die leistungsstarken Computer, Kamera, den Stativ, Leiter und Aushilfe beim Bewegen von manchen Geräten wurden gerne von LDBV zur Verfügung gestellt.

Das Projekt ist seitens Photogrammetrie sehr attraktive und sollte unter vorgegebenen Bedingungen auch realisierbar sein. Es könnte nur an der Zeit und Softwaregrenzen scheitern.

Die ausgewählte Computer Vision Methode ist kostengünstig und liefert voll automatisch hoch aufgelöste 3D-Modelle. Die Objekterfassung erfolgt mit beliebig vielen Bildern durch Mehrbildaufnahme, unter Berücksichtigung eines ausreichenden Schnittwinkel der Strahlenbündel. Jeder Objektpunkt muss in mind. zwei Bildern aus unterschiedlichen Aufnahmestandorten erfasst werden. Die Objektkoordinaten werden durch Verfahren der Mehrbildtriangulation bestimmt (Photogrammetrie. Vorlesung (2006)).

2.3 Auswahl eines Raumes

In Erinnerung an alte Zeiten wurde im Jahr 1996 bei LDBV München die druckhistorische Werkstatt eingerichtet.

Diese Landkartendruckerei ist die älteste noch existierende Flachdruckerei, an der Senefelder selbst gearbeitet hat. Die Druckhistorische Werkstatt bietet einen Einblick in die Geschichte des Druckwesens. Eindrucksvolle Druckmaschinen, wie z. B. eine originale Sternpresse, versetzen den Besucher zurück in eine Zeit des Umbruchs und Fortschritts¹.

An besonderen Tagen und Veranstaltungen wie z.B. der „Langen Nacht der Museen“ wird es dem Besucher angeboten, die Druckhistorische Werkstatt und Steinkeller einzutreten und die Anfertigung eines Abbildes von einem originalen Lithographiestein durch die alte Steindruckpresse zu erleben. Und damit die Besucher der druckhistorischen Werkstatt noch mehr Spaß und Informationen in andere Weise bekommen können, hat der LDBV München in Zusammenarbeit mit der Hochschule München ein Projekt "3D - Spaziergang durch historische Werkstatt" ins Leben geworfen und als Bachelor Arbeit angeboten. Somit steht die eingerichtete Druckerei des LDBV zur Verfügung für weiterer Aufnahme. Der Raum ist 12 m x 15 m groß, möbliert und hat sechs Druckgeräte, die entlang der gut beleuchteten Fensterseite platziert sind. An den Wänden hängen unter dem Glas geramte Plakate mit wichtiger Information zu jedem Gerät. Dadurch, dass der Raum über glatte Flächen (z.B. Wände, Türe), Fenster mit Glasscheiben und Überbelichtete und Unterbelichtete Ecken verfügt, wird erwartet, dass es an diesen Stellen Lücken in der Modellierung auftreten, da die automatische Mustererkennung hier zu falschen Punktzuordnungen führen kann (Greb J. (2015): S.17).

¹Druckhistorische Werkstatt: www.ldbv.bayern.de

2.3 Aufnahme von Passpunkten mit dem Tachymeter

Als erstes wurde einen Termin für die Aufnahme des Raums mit dem Tachymeter vereinbart. Speziell dafür wurden 19 Zielmarken 6,5cm x 6,5cm groß aus festem Fotopapier angefertigt und gleichmäßig verteilt im Raum platziert. Für die erfolgreiche künftige Aufnahme mit dem Tachymeter sollen die Marken aus einem Standort sichtbar sein. Über die Marken wird später das Objekt skaliert und in einem übergeordneten Koordinatensystem verortet. Somit wird das Objekt bis in den Randbereich abgedeckt, um den Genauigkeitsverlusten zu verhindern.

Der Tachymeter Leica TS15 wurde auch gerne von LDBV justiert und zur Verfügung gestellt. Die Passpunkte wurden lokal aufgenommen, da es im Innenraum keine Festpunkte gab. Sie werden später für die Bestimmung von Lage, Form und Größe und besserer Bildzuordnung der Objekte mit den Programmen ContextCapture und Pix4D benötigt.

2.10 Aufnahme eines Raumes mit der Kamera

Am nächsten Tag wurde die Druckerei mit der digitalen Spiegelreflexkamera Marke Nikon D3300 aufgenommen. Zuerst wurde der Raum rundherum in alle Richtungen in ca. 20 Grad Abstand (kreisförmig) fotografiert, um den Überblick über das Ganze zu haben. Danach erfolgte eine präzise Aufnahme von jedem Gerät. Dadurch dass es im Raum viele verschiedene Möbelstücke und Druckgeräte gibt, wurde jeder davon soweit es möglich war von allen Seiten mit der Kamera erfasst. Als Resultat wurden 177 Fotos des gesamten Raums gemacht und im zweiter Phase wurden noch zusätzlich min. 100 Fotos von jedem Gerät einzeln aufgenommen. Der Zeitaufwand für eine fotografische Erfassung hing von der gewünschten Aufnahmekonfiguration und der notwendigen Belichtungszeit ab und betrug pro eine Sitzung ca. 5-7 Stunden.

3 METHODEN

3.1 Computervision

Es ist noch nicht allzu lange her, dass es in der Geodäsie, Architektur, Archäologie und bei Denkmalschutz, die zu erfassende Objekte ausschließlich mit 3D-Laserscanner erfasst wurden. Hiermit hat man detailgenaue und hochauflösende Daten bekommen, was einerseits nicht immer mit einem großen Informationsgewinn zu rechnen war und andererseits, mit mehr Arbeit und Kosten für ein gebildetes Fachpersonal verbunden war. Im Gegensatz dazu, bietet die Entwicklung von Computervision - Methoden eine kostengünstige und voll automatisierte dreidimensionale Datenerfassung und Datenverarbeitung ohne speziellen Vorkenntnissen. SFM liefert hochaufgelöste und genaue räumliche Daten erfasst mit einfachen Digitalkameras (Richwien.B.(2007): S.7-9)).

3.1.1 Aufnahmekonzepte

In einem photogrammetrischen Prozess wird es unterschieden zwischen Offline- und Online- Verfahren. Bei Online-Verfahren erfolgt die Auswertung der Bilder unmittelbar nach der Aufnahme vor Ort und bei Offline-Verfahren im Nachhinein. Offline-Verfahren werden praktisch bei allen Anwendungen der Luftbildphotogrammetrie eingesetzt, da dort in der Regel Bildaufnahme und Bildauswertung zeitlich und räumlich voneinander getrennt verlaufen (Luhmann (2010): S.25).

Im Offline-Verfahren wird eine unbegrenzte Anzahl von Bilder erfasst. Die Auswertung kann zu einem späteren Zeitpunkt und an einem anderen Ort und sogar von einem anderen Bediener erfolgen. Die Kamera muss nicht unbedingt vor der Aufnahme vorkalibriert werden. Es geschieht während der photogrammetrischen Objektrekonstruktion durch Bündelausgleichung, indem die Kamerakalibrierung und Objektauswertung simultan und mit höher Redundanz berechnet werden. Dadurch wird die höchste Messgenauigkeit erreicht. Offline-Photogrammetrie wird häufig bei den

klassischen Luftbildanwendungen oder bei der Erstellung von Plänen und 3D-Modellen in Architektur, Archäologie und Facility Management oder bei der Erfassung von Verkehrsunfällen sowie bei der Bilderfassung aus unbemannten Flugkörpern eingesetzt (Luhmann 2010, 3.Auflage, s.130).

Im **Offline-Verfahren mit vorkalibrierter Kamera** wird die Kamera vor der Aufnahme mittels eines geeigneten Testfeld, das über gut messbare signalisierte Punkte verfügt, vorkalibriert. Außerdem sollte die Kamera genug stabil sein, um die angestrebte Messgenauigkeit für die ganze Dauer der Bildaufnahme zu erhalten. Die Fokussierung muss fest eingestellt und unverändert bleiben, da die Fehler der Kamerakalibrierung direkt den photogrammetrischen Objektauswertungsprozess beeinflussen und können im Nachhinein nicht mehr beseitigt werden. Es werden auch nur noch wenige Bilder von Objekt aus mehr oder weniger als einer Blickrichtung erfasst. Einen praktischen Einsatz findet dieser verfahren bei der Aufnahme von Verkehrsunfällen oder in der Architekturphotogrammetrie (Luhmann (2010): S.24).

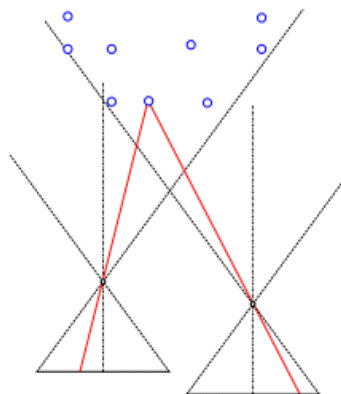


Abb. 4 Aufnahmeconfiguration mit geringerer Bildanzahl (Luhmann (2010): S.25)

Offline-Verfahren mit der unkalibrierten Kamera. Die Kamera wird simultan im Auswerteprozess kalibriert. Wichtig ist dabei die ausreichende Anzahl und günstige Verteilung der aufgenommenen Bilder sowie die Verfügbarkeit von Referenzinformationen im Objektraum. Der photogrammetrische Prozess umfasst drei Schritte: Aufnahme des Objektes mit der unkalibrierten Kamera, Bildmessung (Pass- und Verknüpfungspunkte) und Kalibrierung, Orientierung und 3D-Objektrekonstruktion (Luhmann (2010): S.25).

Kalibrierung, Orientierung und 3D-Punktbestimmung erfolgen simultan, durch

Bündelausgleichung. Dadurch, dass es nur mit den gemessenen Bildkoordinaten von Objektpunkten gerechnet wird, wird auch ein optimales geometrisches Modell der Aufnahmesituation mit minimalen Restklaffungen definiert.

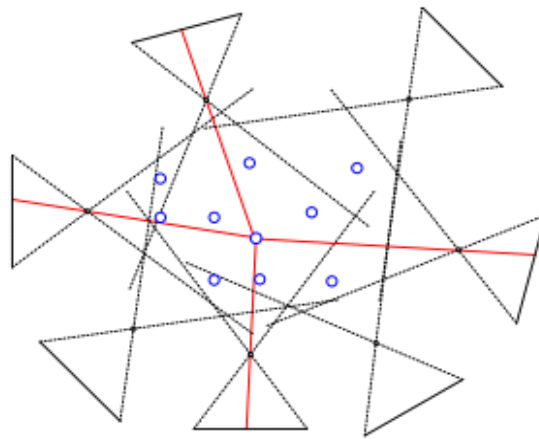


Abb.5 Aufnahmekonfiguration mit höherer Bildanzahl (Luhmann (2010): S.26)

Online-Photogrammetrie-Systeme verfügen über eine begrenzte Zahl von Kameras. Es wird unterschieden zwischen Einkamera-, Stereokamera- und Mehrbildmesssysteme, die im Laufe eines festgelegten Zeitraums 3D-Objektinformationen liefern. Diese Systeme haben fest integrierte Bildsensoren, die vorher kalibriert (innere Orientierung) und orientiert (äußere Orientierung) werden und bleiben je nach Systemstabilität auf Dauer konstant (Luhmann 2010, 3.Auflage, s.131).

Online-Verfahren mit vorkalibrierter Kamera eignen sich ganz gut als Mehrbildmesssysteme für die industrielle Fertigungskontrolle, als Stereonavigationssysteme für die computergestützte Chirurgie oder Systeme zur Verfolgung (tracking) von Objekten. Normalerweise werden hier die Kameras fest zueinander angebracht. Dadurch ist die simultane Kamerakalibrierung ausgeschlossen. Generell müssen die Parameter der inneren- und äußeren Orientierung vor der eigentlichen Messung bestimmt werden. Der photogrammetrische Prozess beinhaltet Kalibrierung und Orientierung der eingesetzten Kameras durch Testfeldkalibrierung, Bildmessung (Pass- und Verknüpfungspunkte) und 2D- oder 3D-Objektrekonstruktion (Luhmann (2010): S.27)

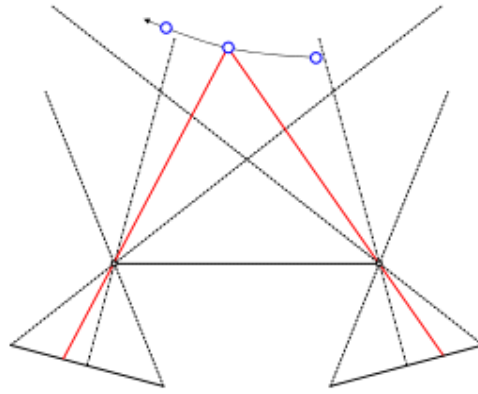


Abb.6 Onlinekonfiguration mit zwei synchronen Kameras (Luhmann (2010): S.27)

Die Kombination von **Online-Verfahren mit unkalibrierter Kamera** ist erst dann in messtechnischen Anwendungen sinnvoll, wenn es ausreichend viele Referenzdaten im Objektraum jeder Zeit zur Verfügung stehen, womit die fehlende oder sich allezeit veränderte innere Orientierung einer Messkamera bestimmt werden kann. Dieser Verfahren wird häufig zur Beobachtung dynamischer Prozesse mit ein- oder Mehrkamerasysteme eingesetzt. Der photogrammetrische Prozess erfasst Bildmessung (Pass- und Verknüpfungspunkte), Kalibrierung und Orientierung der eingesetzten Kameras sowie 2D- oder 3D-Objektrekonstruktion (Luhmann (2010): S.29)

Die Aufnahme eines Mehrbildverbandes und die Auswertung über selbstkalibrierende Bündelausgleichung gilt heute als genauestes und leistungsfähigstes photogrammetrisches Messverfahren (z.B. Godding 1993, Atkinson 1996, Luhmann 2003) (Luhmann 2010)².

Bei **Mehrbildaufnahme** werden allgemein viele Bilder erfasst, die einen ausreichenden Schnittwinkel der Strahlenbündel im Objektraum zulassen. Jeden Objektpunkt muss dabei in mind. zwei Bildern aus unterschiedlichen Aufnahmestandorten erfasst werden. Objektkoordinaten werden durch Verfahren der Mehrbildtriangulation (Bündelausgleichung, räumlicher Vorwärtsschnitt) bestimmt. Eine homogene Objektgenauigkeit in allen Koordinatenrichtungen kann bei einer ausreichenden Anzahl und Konfiguration von Bildstrahlen (mind. 3-4 Bilder pro Objektpunkt) erreicht werden. Diese Methode wird üblich bei der Aufnahme von feinen oder verdeckten Details eines Objektes eingesetzt. Somit werden die Verdeckungen, bei Innen- und Außenaufnahme des Objektes wiederhergestellt. Die Bilder können streifen-

² Luhmann (2010): S.26

oder blockweise oder als Rundum-Verband aufgenommen werden. Mehrbildverbände mit passender Konfiguration ermöglichen eine Simultankalibrierung der Aufnahmekamera(s) im Laufe der Bündelausgleichung (Luhmann 2010, 3.Auflage, s.133).

3.1.2 Komponente eines photogrammetrischen Gesamtsystems

Ein photogrammetrisches System besteht aus einer großen Menge von Komponenten. Sie wirken in komplexer Weise zusammen und haben Einfluss auf die Qualität des Endergebnisses. Die optimale Messgenauigkeit, die Optimierung einzelner Komponenten oder sogar der effiziente Einsatz in der Praxis sind für das Verständnis des Gesamtsystems unvermeidlich. Es wird in drei schematische Räume aufgeteilt: Physischer Objektraum, Optischer Bildraum und Digitaler Bildraum (Luhmann (2010): S.30).

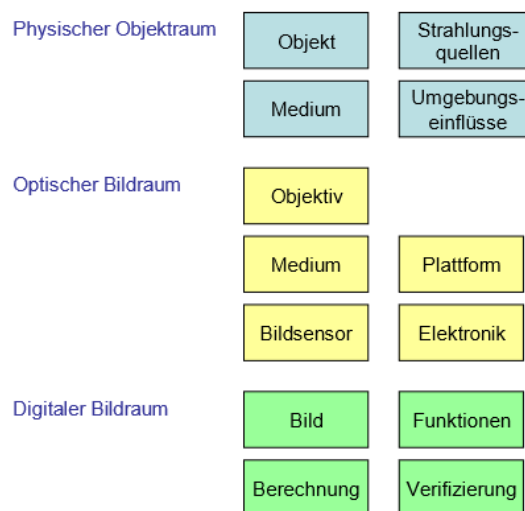


Abb. 7 Komponente eines photogrammetrischen Gesamtsystems (Luhmann (2010): S.30)

Physischer Objektraum. Das aufzunehmende Messobjekt befindet sich in einem 3D-Objektraum und ist dort durch die bekannten und unbekannt Merkmale seiner Gestalt und Oberflächeneigenschaften definiert. Es ist von zeitlichen Veränderungen abhängig. Der Objektraum besteht normalerweise aus einer oder mehreren Medien (Luft, Wasser) mit spezifischen physikalisch-chemischen Merkmalen, die sich durch ihre individuellen Eigenschaften für Absorption, Refraktion und Extinktion ersichtlich machen. Das Medium und Objektoberfläche unterliegen einer wechselhaften Wirkung seitens Strahlungsenergie, die von einer oder mehreren Strahlungsquellen erzeugt wird

(Luhmann (2010): S.31)

Optischer Bildraum. Der optische Bildraum umfasst das photogrammetrische Aufnahmesystem, Bildsensor, Objektiv und elektronische Module zur Signalverarbeitung. Im Aufnahmesystem herrschen wiederum mehrere optische Medien wie z.B. Glas, Kunststoff, Luft, die einen essenziellen Einfluss auf den Strahlverlauf in der Kamera ausüben. Zu einem optischen Bildraum zählt auch eine Aufnahmeplattform. Sie führt absolute Bewegungen des Aufnahmesystems im Objektraum oder relative Bewegungen zwischen Bildsensor und Objektiv aus (Luhmann (2010): S.31)

Digitaler Bildraum.

Die flächenhaft verteilten Bilddaten bilden einen digitalen Bildraum und werden vom Bildsensor simultan oder sequentiell erfasst. Somit erhält das hier abgespeicherte Bild geometrische und radiometrische Eigenschaften. Sie werden durch eine spezifische Verteilung von Grau- oder Farbwerten abgebildet. Mathematische Algorithmen und Parameter beschreiben diese Farbwertverteilung. Der digitale Bildraum ist sowohl im Prozessor des Aufnahmesystems als auch in einem externen Rechner zu finden (Luhmann (2010): S.31)

3.1.3 Grundlagen eines photogrammetrischen Auswerteprozesses

Koordinatensysteme

Mathematische Beziehungen zwischen Objektraum und Bildraum werden durch die Definition einer Koordinatensysteme in beiden Räumen definiert. Jeder Punkt muss dabei durch die XYZ-Koordinaten in einem kartesischen Koordinatensystem festgelegt sein.

Das Pixelkoordinatensystem besteht aus Zeilen v und Spalten u bestehender Koordinatensystem eines digitalen Bildes. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im oberen linken Pixel. Wenn Pixelkoordinatensystem identisch mit dem Sensorkoordinatensystem der Kamera ist, dann hat das digitale Bild einen Bezug zum Bildsensor der Kamera. Somit wird in der Matrix die Lage der isometrischen Pixel eines digitalen Bildes definiert (Luhmann 2010, 3.aufgabe, s.24).

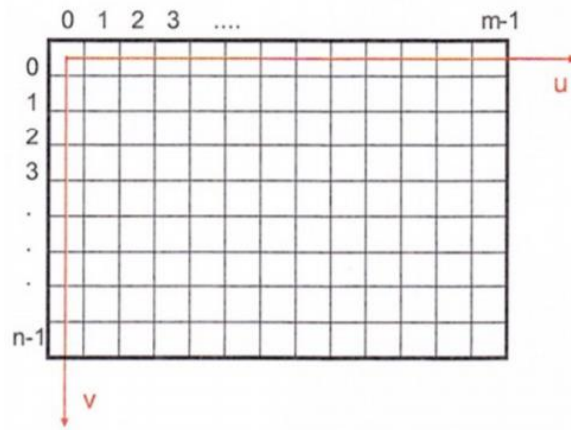


Abb. 8 Pixelkoordinatensystem (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.24)

Das Bildkoordinatensystem bestimmt die Lage eines Bildpunktes im Bildraum. Über das Bildkoordinatensystem wird ein kamerafestes Bezugssystem festgelegt, deren Ursprung in der Mitte des Bildes liegt, Abb.9 (Luhmann 2010, 3.auflage, s.24). Es wird als ebenes rechtwinkliges kartesisches Koordinatensystem $x'y'$ mit dem Ursprung im Projektionszentrum O' und mit einer zur Bildebene parallelen Koordinatenebene definiert. Dieser Koordinatenebene wird durch Bildmarken festgelegt. Die z-Achse des Bildkoordinatensystems steht auf der Bildebene und zeigt näherungsweise in die Richtung der Aufnahmeachse. Die Beziehungen zur Aufnahmekamera bei analogen Aufnahmesystemen werden über kamerafeste im Bild abgebildete Referenzpunkte (Rahmenmarken, Réseau), definiert (Geoinformatik. Lexikon. (2018): <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de>).

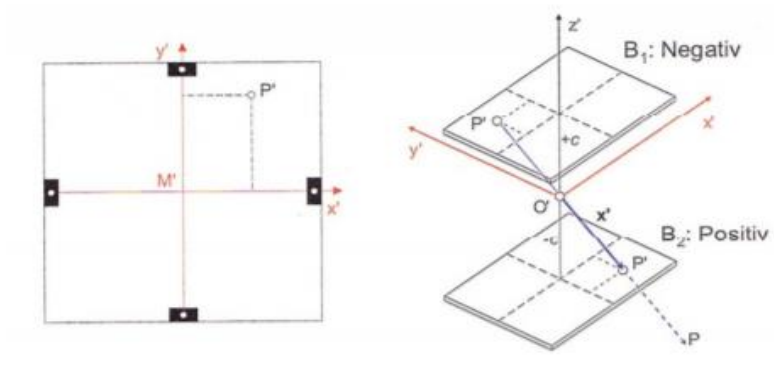


Abb. 9 Ebenes und räumliches Bildkoordinatensystem (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.25)

Die Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem wird durch die Parameter der inneren Orientierung (c Kamerakonstante und XYZ-Koordinaten des Bildhauptpunktes) festgelegt (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.25).

Objektkoordinatensystem oder Weltkoordinatensystem ist das übergeordnete räumliche, kartesische Koordinatensystem XYZ, das über Bezugspunkte eines Objektes definiert ist, siehe Abb.9. Damit werden die Lage von Punkten im Objektraum und die Position und Ausrichtung von Aufnahmesystemen berechnet (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.26).

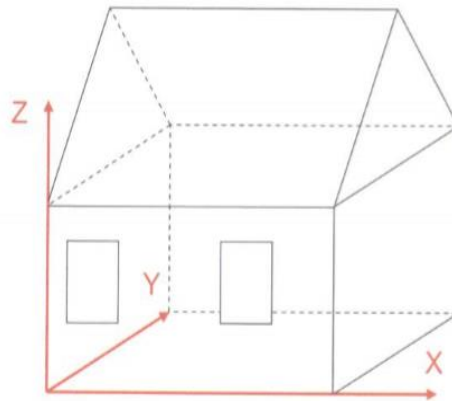


Abb.10 Objektkoordinatensystem (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.26)

Als **Modellkoordinatensystem** wird ein räumliches kartesisches Koordinatensystem bezeichnet, das durch die Lage und Ausrichtung zweier oder mehrerer Bilder definiert ist. Der Ursprung des Systems befindet sich im Projektionszentrum des ersten Bildes. Das Modellkoordinatensystem kann in das übergeordnete Objektkoordinatensystem über eine räumliche Ähnlichkeitstransformation mit Hilfe von drei identischen Passpunkten in beiden Systemen transformiert werden. Dabei werden 3 Translationen, 3 Rotationen sowie ein Maßstabsfaktor bestimmt (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.25).

Sensorkoordinatensystem

Bei der Verwendung von fest eingebauten Flächensensoren (Sensormatrix) und direkter digitaler Bildauslesung besteht der Bezug zwischen dem digitalen Bild und dem optoelektronischen Bildsensor. Der Ursprung eines Sensorkoordinatensystems liegt oben links. Das Koordinatensystem ist somit linkshändig. Man darf auf keinen Fall die Bilder geometrisch verändern z.B. Größe ändern oder einen Ausschnitt machen, da dadurch der Kamerabezug unwiderruflich verloren geht (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.140-1).

Abb. 11 zeigt wie die verschiedenen Koordinatensysteme individuell mittels geeigneter Transformationen mit einander verbunden sind. Dabei wird das Ziel verfolgt, die gesuchte Information im Zielkoordinatensystem zurück ins Sensorkoordinatensystem transformieren zu können (Luhmann (2010): S.49).

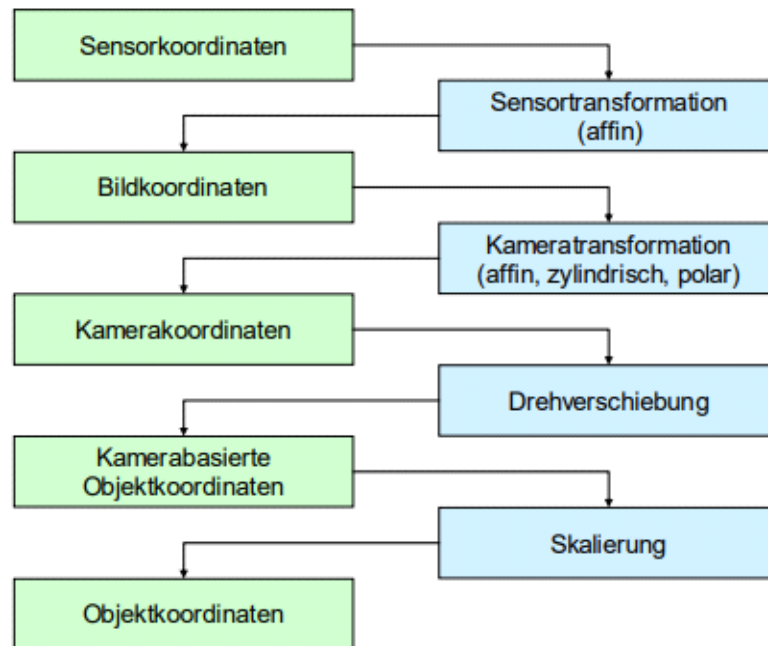


Abb.11 Photogrammetrische Koordinatensysteme und Transformationen (Luhmann (2010): S.49)

Orientierungen

Innere Orientierung einer Aufnahmekamera

Innere Orientierung, in der Photogrammetrie die Definition der Lage des bildseitigen Projektionszentrums eines Objektivs gegenüber der Bildebene einer Kamera unter Beachtung der Verzeichnung.³

Es wird die Lage des Projektionszentrums im Bildraum definiert. Die Parameter der inneren Orientierung einer Kamera sind die Kamerakonstante c und die Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes O (X'_0, Y'_0) sowie die Funktion der Verzeichnung des Objektivs. Das Wissen über die Daten der inneren Orientierung erlaubt die Rekonstruktion des Aufnahmestrahlenbündels eines Bildes (Lexikon der Geowissenschaften (2018): www.spektrum.de).

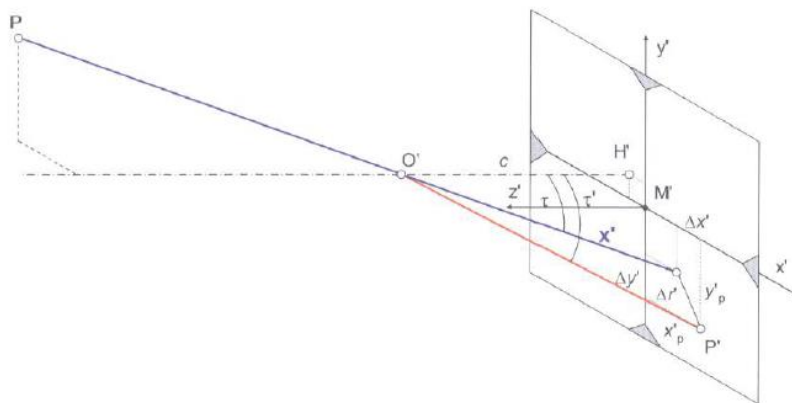


Abb. 12 Innere Orientierung (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.144).

Der Bildhauptpunkt H ist ein Lotfußpunkt des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem mit den Koordinaten (x'_0, y'_0) , der bei gebräuchlichen Kameras näherungsweise in der Bildmitte liegt. Kamerakonstante c ist ein Lotrechter Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene in negativer z' -Richtung. Sie wird auch als Bilddistanz bezeichnet, siehe Abb.12. Funktion der Verzeichnung des Objektivs beschreibt die Abweichungen vom zentralperspektivischen Modell, in erster Linie den Einfluss der radial-symmetrischen Verzeichnung.

Die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung erfolgt im Rahmen der Kamerakalibrierung (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.144).

³ Lexikon der Geowissenschaften (2018): www.spektrum.de

Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung beschreibt durch sechs Parameter die Lage und Ausrichtung des räumlichen Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem.⁴

Es wird die Lage des Projektionszentrums im Objektraum definiert (Abb.13). Die Parameter der äußeren Orientierung sind die Objektkoordinaten des Projektionszentrums O (X_0, Y_0, Z_0) und die Rotationen des Bildkoordinatensystems um die drei Raumachsen. Das Projektionszentrum O ist der Ursprung des Bildkoordinatensystems (Lexikon der Geowissenschaften (2018): www.spektrum.de).

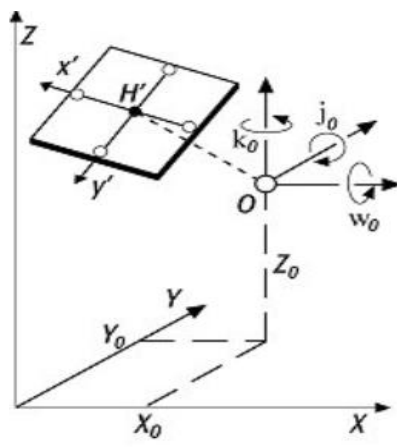


Abb. 13 Äußere Orientierung (Lexikon der Geowissenschaften (2018): www.spektrum.de)

Die äußere Orientierung kann direkt mit Hilfe eines räumlichen Rückwärtsschnitts bestimmt werden. Die Berechnung kann auf Basis der Kollinearitätsgleichungen erfolgen (nicht lineare Lösung, mind. drei XYZ-Passpunkte im Objektraum und Näherungswerte der gesuchten Orientierungsunbekannten sind nötig) oder durch projektive Beziehungen (direkte lineare Transformation DLT, mind. sechs XYZ-Passpunkte ohne Näherungswerte) gelöst werden (Luhmann 2010, 3.aufgabe, s.242). Oder indirekt mittels Bildkoordinatenmessung von Passpunkten und Verknüpfungspunkten in allen Bildern innerhalb eines Blocks. Im Anschluss danach kommt Aerotriangulation über Bündelblockausgleichung, womit die Objektkoordinaten aller gemessener Punkte sowie die Parameter der äußeren Orientierung aller Bilder simultan bestimmt werden (Linder (2012): S.26).

⁴ Luhmann 2010, 3.Auflage, S.236

Relative und Absolute Orientierung

Durch **die gegenseitige relative Orientierung** wird die räumliche Lage zweier Bilder zueinander in einem gemeinsamen lokalen Modellkoordinatensystem bestimmt, siehe Abb.14. Ein photogrammetrisches Modell wird nur dann gebildet, wenn die beiden Bilder gemeinsame Bildbereiche besitzen (Przybilla (2005): S.2).

Dadurch, dass die relative Orientierung nur die gegenseitige Ausrichtung der beiden Bilder definiert, kann das Modellkoordinatensystem einen beliebigen Maßstab aufnehmen und dem Basiskomponenten wird einen beliebigen Wert zugewiesen z.B. $b_x=1$. Somit werden nur fünf unabhängige Elemente $b_y, b_z, \omega_2, \kappa_2, \varphi_2$ zur Bestimmung der relativen Orientierung benutzt (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.276).

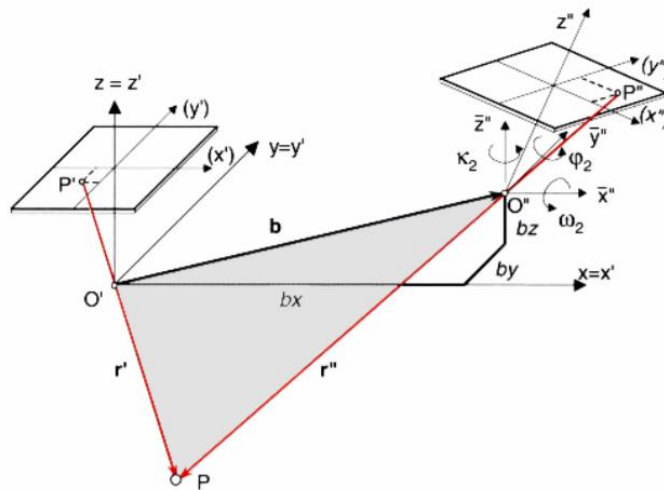


Abb.14 Relative Orientierung (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.276).

Durch **die absolute Orientierung** werden alle erforderliche Transformationen beschrieben, die dabei helfen ein photogrammetrisches Modell in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu überführen, siehe Abb. 15.

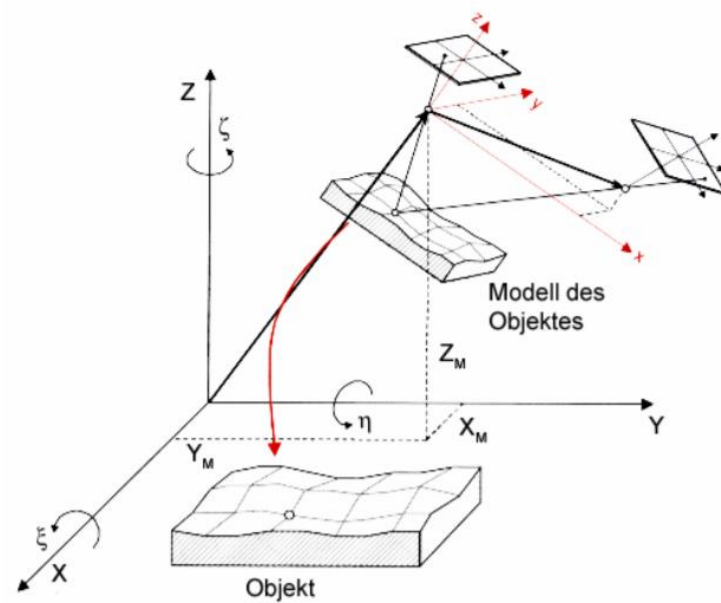


Abb. 15 Absolute Orientierung (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.289).

Die Transformation erfolgt über die Passpunkte, deren Modellkoordinaten und X, Y, Z-Koordinaten im Objektsystem bekannt sind. Es können die Verknüpfungspunkte oder bestimmte Modellpunkte sein. Benötigt werden sieben Punktinformationen: drei Translationen, drei Rotationen und ein Maßstabsfaktor. Der Maßstabsfaktor m wird zur Skalierung der Modellkoordinaten in das Objektkoordinatensystem (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.289).

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \mu * \underline{D}(\omega, \varphi, \kappa) * \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$$

Wenn die Parameter der relativen und absoluten Orientierungen zweier Bilder bekannt sind, könnte daraus die äußere Orientierung der Einzelbilder abgeleitet werden (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.291).

Auswerteverfahren

Bei der photogrammetrischen Auswertung von Bildpaaren werden die Verknüpfungspunkte benötigt. Verknüpfungspunkte sind identische (homologe oder korrespondierende) Objektpunkte, deren Bildkoordinaten bekannt sind. Sie werden zur Verknüpfung zweier oder mehrerer Bilder benutzt. Dadurch sollte eine ausreichende Bildfläche abdeckt werden und eine feste Verbindung der Bilder untereinander gewährleistet werden. Die homologen Punkte können visuell durch stereoskopische Betrachtung oder durch monoskopische Einzelbildmessung identifiziert werden. Zudem könnte auch das Verfahren der digitalen Stereobildzuordnung eingesetzt. Hier erfolgt die Zuordnung der identischen Punkte durch die Ähnlichkeitsmaße von Grauwertmustern (Korrelation) (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.271).

Mit Hilfe der **Epipolargeometrie** wird den korrespondierenden Suchbereich im Nachbarbild für die identischen Punkte auf die Epipolarlinie eingeschränkt, siehe Abb.16 (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.274).

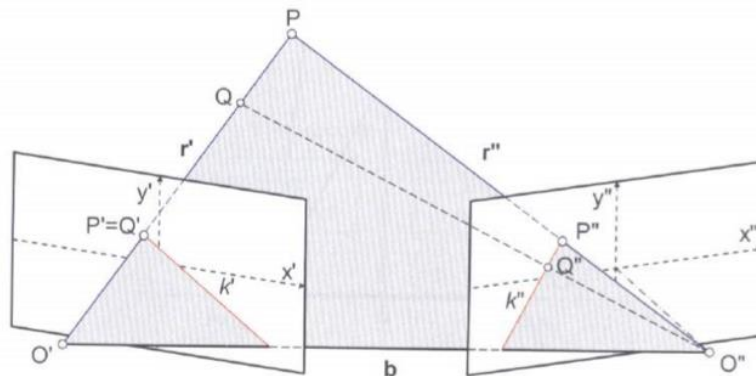


Abb.16 Epipolargeometrie (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.274).

Epipolarebene wird durch den Abbildungsstrahlen r' und r'' , die von Projektionszentren P' und P'' zum Objektpunkt P verlaufen, und durch die Basis b gebildet. Schnitt der Epipolarebene mit den Bildebenen in den Schnittgeraden k' und k'' wird als Epipolarlinien genannt. Der Suchraum wird dann eingeschränkt, wenn ein zu P' identischer Bildpunkt P'' in der Epipolarebene als auch in der Epipolarlinie k'' liegt (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.273-4).

Zur Zuordnung der homologen Punkte werden merkmalsbasierte oder flächenbasierte Verfahren angewendet.

SIFT-Operator ist ein Interest-Operator und gehört zu dem merkmalsbasierten Verfahren. Unter Interest-Operatoren versteht man Algorithmen zur Extraktion markanter Bildstellen, die für eine Bild-zu-Bild Zuordnung am besten geeignet sind. Grauwertmuster sind die geeignetsten homologen Punkte. Pro Bildposition wird eine oder mehrere Kenngrößen (Interest-Wert) berechnet. Zur Kriterien einen markanten Zuordnungskandidaten gehören Deutlichkeit (lokale Einzigartigkeit), Invarianz, Robustheit (Unempfindlichkeit gegen Rausch), Seltenheit und Interpretierbarkeit. Somit werden die homologen Punkte zur gegenseitigen Orientierung der Bilder berechnet sowie die Näherungspunkte zur Oberflächenmessung. SIFT-Operator ist vor allem zur Zuordnung von Bildern mit unterschiedlichen Maßstäben, Rotationen und Perspektiven geeignet (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.455-60).

Die feinste Zuordnung liefern flächenbasierte Verfahren wie Korrelations- und Kleinste-Quadrate Lösungen. Hier werden zur Steigerung von Genauigkeit und Zuverlässigkeit, die geometrische Zusatzinformationen wie Epipolargeometrie und Disparitätslimit benutzt (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.455).

Die **Disparität** ist ein Maß für die Entfernung. Sie ist der Unterschied zwischen den x-Koordinaten von korrespondierenden Pixeln in einem Stereobildpaar. Je näher sich dabei ein betrachteter Punkt im Raum an der Kamera befindet, desto größer ist die Disparität. Disparitätslimit: es wird angenommen, dass der euklidische Abstand zwischen den homologen Punkten (Disparität) sehr klein ist und die Länge des Suchweges eine bestimmte Schwelle nicht überschreitet.

Das **Korrelationsverfahren** ist ein flächenbasiertes Verfahren. Dieses Verfahren bestimmt die Lage der größten Ähnlichkeit eines Referenzmusters (Ausschnitt eines natürlichen Bildes). Der Korrelationskoeffizient ist ein Ähnlichkeitsmaß zwischen einem Musterbild und einem Suchbild. Der wird mittels Grau- oder Farbwerte des Pixels sowie seiner Nachbarschaft definiert. Zeigt der Korrelationskoeffizient sein Maximum, dann ist es mit hoher Wahrscheinlichkeit die gesuchte Position eines Referenzmusters im Bild. Dieses Verfahren ist sehr robust und kontrastunabhängig, aber mit hohem Rechenaufwand. Allerdings führen die rotierenden Bilder oder Bilder mit verschiedenen Maßstäben zu einem geringem Ähnlichkeitsmaß. Es wird eine Bildmessgenauigkeit mit 0.1 Pixel erreicht (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.438-40).

Das **Verfahren nach kleinsten Quadraten** minimiert die Quadratsumme der Grauwertdifferenzen zwischen Musterbild und Suchbild. Es basiert auf einer iterativen geometrischen (Affintransformation, $x_1=f(x_1)$) und radiometrischen Transformation. Bei der letzten werden die konstante Helligkeits- und Kontrastunterschiede r_1 und r_2 zwischen den Bildausschnitten berücksichtigt. Die Grauwerte werden in eine Gerade durch die folgenden linearen Beziehungen zugeordnet: $g_1(x_1) = r_1+r_2 \cdot g_2(x_2)$, $x_2 = a_1+a_2 \cdot x_1$ (Das Lexikon der Erde: www.geodz.com).

Die Kleinste-Quadrate-Anpassung wurde in den 80 er Jahre für die digitale Stereobildauswertung entwickelt und ist mittlerweile ein universales Bildmessverfahren. Bei der 3D-Objektrekonstruktion wird dieses Verfahren durch den räumlichen Vorwärtsschnitt oder die Bündeltriangulation formuliert (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.441).

Mehrbildauswertung

Die Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung von Mehrbildverbänden durch Bündelausgleichung mit Selbskalibrierung ist das Standardverfahren der photogrammetrischen Kalibrierung und Orientierung. Das Verfahren wurde inzwischen vier Jahrzehnte entwickelt und ist hinreichend dokumentiert (z.B. Brown 1976, Kruck 1983, Wester-Ebbinghaus 1985, Hinsken 1989, Kager 1989). Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Homogenität der Ergebnisse lassen sich durch geeignete Aufnahmekonfiguration optimieren und werden bisher von keinem anderen mathematischen Ansatz übertroffen.⁵

Die **Bündelblockausgleichung** ist das leistungsfähigste und genaueste Verfahren zur Bildorientierung und Punktbestimmung in der Photogrammetrie. Simultan können beliebig viele im Raum angewiesene Bilder berechnet werden. Es gibt keine Einschränkungen bezüglich der Aufnahmestandpunkte und der Anzahl der Bilder. 3D-Rekonstruktion erfolgt durch die Verknüpfung der einzelnen Bilder über identische Punkte unter Berücksichtigung optimaler Schnittbedingungen. Die 3D-Objektkoordinaten und Orientierungsparameter der Bilder werden durch eine Ausgleichung in einem überbestimmten Gleichungssystem definiert. Bekannte Parameter (gemessene Bildkoordinaten) und unbekannte Parameter (innere- und äußere Orientierung, Objektkoordinaten der Verknüpfungs- und Neupunkte) eines photogrammetrischen Bildverbandes werden gleichzeitig in einem Berechnungsvorgang berücksichtigt und optimiert, siehe Abb.17. Als Ergebnis bekommt man die

⁵ Luhmann (2010): S.62

ausgeglichenen Objektkoordinaten, die innere Orientierung einer Kamera und die äußeren Orientierungen der Bilder (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.301-2).

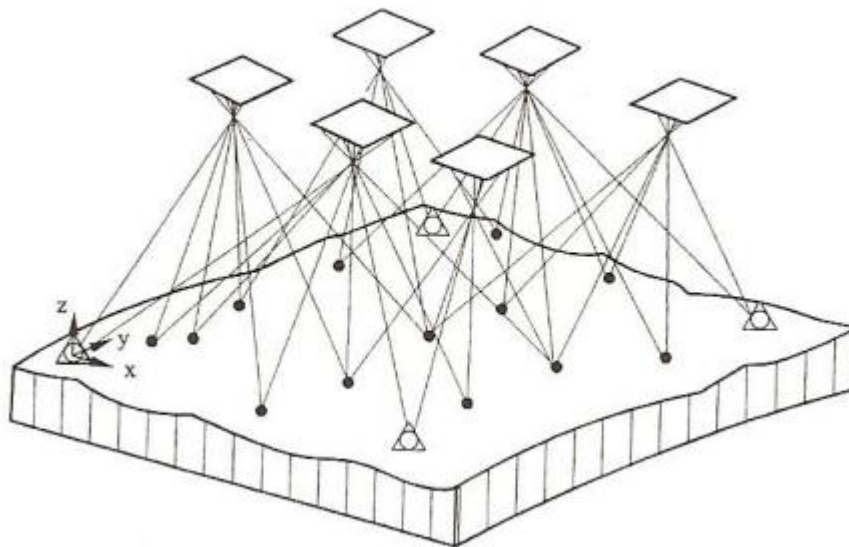


Abb. 17 Bündelblockausgleichung (Kraus (1994): S.269)

Wenn die Koordinaten der Objektpunkte bekannt sind, können deren Bildkoordinaten berechnet werden. Zugrunde liegt das Modell einer Lochkamera, die am besten die Realisierbarkeit der Zentralprojektion präsentiert. Das mathematische Modell der Zentralprojektion wird durch den Kollinearitätsgleichungen realisiert (Kollinearitätsgleichungen: www.wikipedia.org):

$$x = x_H - c \frac{r_{11}(X - X_O) + r_{21}(Y - Y_O) + r_{31}(Z - Z_O)}{r_{13}(X - X_O) + r_{23}(Y - Y_O) + r_{33}(Z - Z_O)} + dx$$

$$y = y_H - c \frac{r_{12}(X - X_O) + r_{22}(Y - Y_O) + r_{32}(Z - Z_O)}{r_{13}(X - X_O) + r_{23}(Y - Y_O) + r_{33}(Z - Z_O)} + dy$$

Für die automatische photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion wird allgemein das Verfahren der Mehrbildzuordnung benutzt, da es die vertikale und auch hängende Oberfläche eines Objekts erfassen lässt, wichtig dabei ist, dass diese Flächen in mindestens zwei Bildern zu finden sind.

Heutzutage erfolgt die Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen mittels spezieller Software am Computer. Das Verfahren der Mehrbildauswertung wurde in speziellen Auswerteprogrammen umgesetzt und erweitert.

3.1.4 Grundsätze einer Messkamera

Eine Messkamera erzeugt Messbilder. In der SfM-Photogrammetrie werden digitale Messbilder in Form von digitalen Photographien angewendet. Diese Bilder verfügen über eine zentralperspektivische Abbildung sowie die Festlegung des Projektionszentrums in Bezug zum Bild. Ein zentralperspektivisches Bild wird durch neun Parameter definiert: drei Parameter der inneren Orientierung, die das Projektionszentrum des räumlichen Strahlenbündels in Bezug zur Bildebene festlegen und sechs Parameter der äußeren Orientierung, die das räumliche Strahlenbündel mithilfe des Projektionszentrums und Position des Bildes in das Objektkoordinatensystem festlegen. Jede Messkamera besitzt ein Koordinatensystem, das bei den digitalen Kameras durch den engen Zusammenhang zwischen Bildmatrix und Kamera realisiert wird. In der Bildmatrix werden die Bildpunkte (Pixeln) gemessen (Kraus (2004): S.36-47).

Das Auflösungsvermögen einer Messkamera ist ein Maß für die Abbildungsqualität. Es zeigt, wie viele dunkle Balken (Linien) man pro Millimeter von ihren gleich großen hellen Zwischenräumen unterscheiden kann. Die Beugung, Aberration und Unschärfe beeinflussen das Auflösungsvermögen. Es verschlechtert sich von der Bildmitte zum Bildrand. Dies kann aber durch starkes Abblenden reduziert werden (Kraus (2004): S.64-66).

Scharfbildung. Der Durchmesser eines Zerstreuungskreises oder Unschärfekreis u' soll unter einer Auflösungsgrenze liegen: bei photographischen Systemen - ca. 20-30 μm und bei digitalen Sensoren - mit ca. 1-3 Pixel. Die Schärfentiefe hängt von Blendenzahl und Abbildungsmaßstab ab. Sie kann durch die Verkürzung der Brennweite oder Vergrößerung der Aufnahmeabstand erhöht werden (Luhmann (2010): 3. Auflage, S.165).

Das elektromagnetische Spektrum bewegt sich in der Photogrammetrie auf Wellenlängen in sichtbaren und Infrarotbereich, da die verwendeten Aufnahmesensoren z.B. CCD- und CMOG-Sensoren auf Wellenlängen zw. 200nm -1100nm eingeschränkt sind (Luhmann (2010): 3. Auflage, S.156).

Geometrische Abbildungsfehler:

Radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung

Die radial-symmetrische Verzeichnung ist von der Wellenlänge, der Blendeneinstellung, der aktuellen Fokussierung und Objektentfernung bei konstanter Fokussierung abhängig (Luhmann 2010, 3. Auflage, S.148).

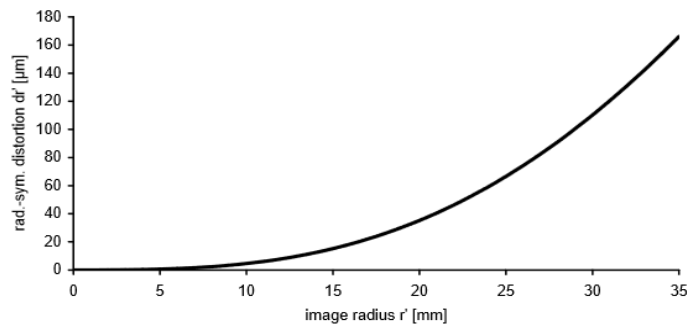


Abb.18 Radial-symmetrischen Verzeichnung in Abhängigkeit vom Bildradius (Luhmann (2010):3.Auflage, S.148)

Im Abb.18 ist die Wirkung der radial-symmetrischen Verzeichnung in Abhängigkeit vom Bildradius eines Bildpunktes abgebildet. Je größer der Abstand vom Bildhauptpunkt ist, desto größer wird auch die Verzeichnung. Sie kann über 100 µm für die gebräuchliche Objektivsteigen. Die der radial-symmetrischen Verzeichnung kann in Form einer Reihenentwicklung mit Verzeichnungsparameter A_1 bis A_n ausgedrückt (Luhmann 2010, 3. Auflage, S.139):

$$\Delta r'_{rad} = A_1 r'^3 + A_2 r'^5 + A_3 r'^7 + \dots$$

Für die meisten Objektivste kann die Reihenentwicklung nach dem zweiten oder dritten Term abgebrochen werden. Die Bildkoordinaten werden proportional proportional korrigiert:

$$\Delta x'_{rad} = x' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}$$

$$\Delta y'_{rad} = y' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}$$

Die radial-symmetrische und tangentielle Verzeichnung entsteht meistens durch die fehlerhafte Zentrierung (Dezentrierung) der Linsen eines Objektivste (Luhmann (2010): 3. Auflage, S.153):

$$\Delta x'_{\text{tan}} = B_1(r'^2 + 2x'^2) + 2B_2x'y'$$

$$\Delta y'_{\text{tan}} = B_2(r'^2 + 2y'^2) + 2B_1x'y'$$

Der Einfluss von der tangentialen Verzeichnung ist im Vergleich zu radial-symmetrischen Verzeichnung für die meisten Qualitätsobjekte deutlich geringer und wird nur im Fall der hohen Genauigkeit mitgerechnet (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.153):

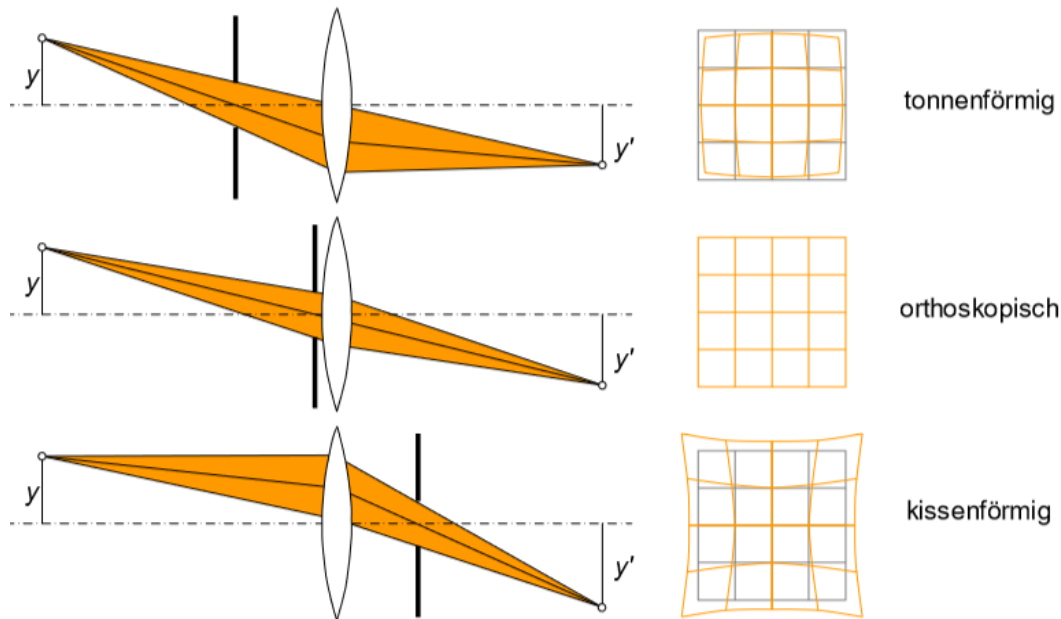


Abb.19 Verzeichnung in Abhängigkeit der Blendelage (Luhmann (2010): S.40)

Im Abb.19 wird die Wirkung der radial-symmetrischen Verzeichnung in Abhängigkeit von der Lage der Blende angezeigt. Tonnenförmige Verzeichnung entsteht, wenn die Blende objektseitig verschoben ist. Bei bildseitiger Blendelage kommt es zu einer kissenförmigen Verzeichnung. Orthoskopische Verzeichnung weist die einzige verzeichnungsfreie Abbildung (Luhmann (2010): S.40).

Affinität und Scherung

Abweichungen von Orthogonalität und Gleichmaßstäbkeit der Bildkoordinatenachsen werden durch Affinität und Scherung beschrieben. Diese Effekte können bei analoger Aufnahme sowie bei digitaler Aufnahme auftreten. Bei analoger Kamera werden sie direkt durch Affintransformation kompensiert und bei digitaler Aufnahmesysteme – durch eine ungleichmäßige Anordnung der Sensorelemente. Diese Effekte kann man in folgender Weise lösen (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.153):

$$\begin{aligned}\Delta x'_{aff} &= C_1 \cdot x' + C_2 \cdot y' \\ \Delta y'_{aff} &= 0\end{aligned}$$

Bei dem Initialisierungsschritt eines photogrammetrischen Auswerteprozesses werden Bilder von Verzeichnungen und Abbildungsfehlern befreit, entzerrt und in die Epipolarbildgeometrie umgerechnet.

3.2 Verwendete Softwares

Für die automatische Erstellung von 3D-Punktwolken und 3D-Oberflächenmodellen aus Fotografien wurden unten genannte Softwarepakete verwendet.

3.2.1 ContextCapture

ContextCapture wurde von Acute3D, einem Unternehmen von Bentley Systems, entwickelt. Diese Software bietet neue Lösung, mit der sich aus einfachen Fotos hochauflösende 3D-Modelle ohne menschlichen Eingriffen erstellen lassen. ContextCapture basiert auf hochmodernen Computer Vision-, Photogrammetrie- und Computational Geometry-Algorithmen. Somit erfüllt diese Software die industriellen Qualitätsanforderungen bezüglich Präzision, Skalierbarkeit, Effizienz, Robustheit, Nutzung und Interoperabilität. ContextCapture hat keine Speicherbeschränkungen. Große Mengen an Daten werden durch einen komplizierten Tiling-Mechanismus automatisch in Jobs aufgeteilt und Hardware Speicherkapazität wird nicht überschritten. Man kann nahtlos Terabytes an Eingabebildern mit Hilfe dieses Tiling-Mechanismus verarbeiten. Die Verarbeitungszeit kann durch die gleichzeitige Ausführung mehreren ContextCapture-Engines auf mehreren Computern, in dem sie zu einer Jobwarteschlange zugeordnet sind, drastisch reduziert werden. ContextCapture liefert Punktwolken, digitale Oberflächenmodelle, texturierte 3D-Modelle und Orthophotos. Es kann auch die von anderen Software erhaltene Punktwolke in Format. e57 einlesen und ein 3D-Modell daraus generieren (Richwien (2007): S. 3-4).

3.2.2 Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan wurde von der russischen Firma AgiSoft LLC entwickelt. Die Firma ist grundsätzlich im Bereich 3D-Modellierung und Bildverarbeitung tätig. Agisoft PhotoScan gehört zu einer 3D-Rekonstruktions-Software. Für die Erstellung der 3D-Modelle werden digitale Photographien verwendet. Als Endprodukt erhält man robuste Bildorientierungen ohne codierten Zielmarken, dichte Punktwolken, digitale Oberflächenmodelle, Orthophotos und texturierte 3D-Modelle (Tagungsband LC3D Workshop: apps.gi.hs-mainz.de).

3.2.3 Autodesk ReCap

Autodesk ist ein US-amerikanisches Software-Unternehmen, der im Bereich digitales 2D- und 3D-Design forscht und die Software für computer-aided design (CAD) und Computeranimation herstellt. Angefragt sind die Bereiche Architektur, Gebäudetechnik und Hoch- und Tiefbau, Automotive und Transportwesen, Mechanik und Maschinenbau, Medien und Unterhaltung sowie Versorgung und Telekommunikation. Autodesk-Technologie wird vor allem zur Erstellung digitaler Modelle und Abläufe für die Visualisierung, Simulation und Analyse derer Projekte benutzt (Autodesk: www.wikipedia.org).

ReCap Pro, ein Produkt der Firma Autodesk, gehört zu einer Point-Cloud-Software, die für die Realitätserfassung benutzt wird. Eine genaue 3D-Modellierung erfolgt durch die Zusammenführung von Laserscan- und UAV-Scandaten. ReCap Photo ist das neueste Produkt von Autodesk für 3D-Realitätserfassung auf Photogrammetriebasis. Es ist eine Desktop-App, Ergänzung zur ReCap Pro (Autodesk. Blog: www.blogs.autodesk.com).

ReCap Photo ist ein auf Cloud basiertes App, in dem das 3D-Modell in eigenem Autodesk 360-Cloud-Drive gespeichert werden kann. Man kann auch das 3D-Modell in verschiedenen Formaten herunterladen und dann mit anderen 3D-Programmen weiterbearbeiten. Als Student erhält man eine kostenlose Lizenz für das Programm und kann auf einmal bis 100 Fotos hochladen und ohne Benutzereingriff bearbeiten lassen. ReCap Photo liefert qualitativ hochwertige texturierte 3D-Modelle, Foto-basierte Punktwolken mit Geolokalisierung und hochauflösende Orthophotos. Die mit ReCap Photo gemachten Erfahrungen waren bezüglich der Rekonstruktion von Bildverbände und Texturberechnung beeindruckend (Pomaska (2016): S.362).

3.2.4 Pix4D

Pix4D ist eine amerikanische Firma, die seit 2011 Softwareprodukten entwickelt. Pix4D benutzt Photogrammetrie- und Computer Vision- Algorithmen zur Umwandlung von RGB- und multispektralen Bilder in 3D-Karten und 3D-Modelle (Pix4D: www.wikipedia.org). Pix4D spezialisiert sich auf die Auswertung von UAV Bilder, insbesondere in Bau und Landwirtschaft. Es können Punktwolken, digitale Oberflächenmodelle, texturierte 3d-Modelle, Orthomosaik und Orthophotos generiert

werden (Pix4D: www.support.pix4d.com).

3.2.5 Sure

Das Unternehmen NFrames mit Hauptsitz in Stuttgart entwickelt neue innovative und branchenführende 3D-Oberflächenrekonstruktionssoftware für Unternehmen, um ihre Workflows für die Bildoberflächenrekonstruktion individuell anzupassen. Die Kernkomponente ist der Semi-Global-Matching-Algorithmus (SGM). Die SURE-Software liefert dichte Punktwolken, digitale Oberflächenmodelle, True-Orthophotos und texturierte Netze. Es gibt keine Einschränkungen bezüglich Anzahl der Bilder, Gebietsgröße und Datenmenge. Input – orientierte Bilder in .jpeg, .png oder .tif Format oder nicht orientierte Bilder mit Orientierungen in ASCII, .nvm, .out oder .prj Format. (nFrames: www.nframes.com).

3.2.6 VisualSFM

VisualSFM ist wurde an der Universität Washington von Chanchang Wu entwickelt. VisualSFM ist eine schnelle GUI- Anwendung für die 3D-Rekonstruktion. Diese Software basiert auf multicore-Berechnungen und hat eine graphische Benutzeroberfläche. Hier wurden sowohl der SIFT-Algorithmus auf dem Grafikprozessor (SiftGPU) als auch eine Multicore-Bündelausgleichung integriert (ifP: www.ifp.uni-stuttgart.de).

VisualSfM arbeitet mit beliebigen Bildern und ist sowohl unter kontrollierten als auch unter unkontrollierten Bedingungen effizient. Bilder können aus jeder Position genommen werden, sofern das zu rekonstruierende Objekt auf mindestens zwei Fotos sichtbar ist. Sowohl die Bildausrichtung als auch die 3D-Modellrekonstruktion sind vollständig automatisiert. VisualSfM liefert Punktwolke, 3D-Modelle und Orthophotos.

3.3 Virtuelle Realität

Virtuelle Realität (*Virtual Reality, VR*) ist eine computergenerierte Wirklichkeit mit Bild (3D) und Ton, die über Großbildleinwände, in speziellen Räumen (Cave Automatic Virtual Environment) oder über ein Head-Mounted-Display (Video- bzw. VR-Brille) übertragen wird. Virtuelle Realität ist eine Simulation. Die realistisch erscheinende Umgebung wird mit Hilfe von Computergrafik definiert. Sie ist nicht statisch und reagiert auf die Benutzereingaben (Gabler Wirtschaftslexikon: www.wirtschaftslexikon.gabler.de).

VR Interaktion oder die körperliche Bewegung durch die virtuelle Welt und die Interaktion mit anderen Objekten der virtuellen Welt werden außer Video- oder VR-Brille auch durch die speziellen Eingabegeräte wie 3D-Maus und Datenhandschuh realisiert und unverzüglich in Steuerbefehle umgesetzt und auf die virtuelle Umgebung ausgewirkt. Mit jeder Bewegung der Betrachter ändert sich die Perspektive und Größe der virtuellen Umgebung. Zugriff auf den virtuellen Gegenständen wird durch Tastbewegungen im Datenhandschuh durch haptische Sensoren realisiert. Durch solche Interaktionen taucht der Betrachter in die virtuelle Welt ein, er wird Teil der Aktion und kann darin seine Vorstellungen verwirklichen (IT. Wissen. Info 2: www.itwissen.info).

Virtuelle Realität spielt eine wesentliche Rolle bei der Ausbildung und Weiterbildung (Benutzung von Flug- oder Operationssimulatoren), bei der Informationsvermittlung (Aufklärung in Bezug auf Massentierhaltung oder Bauvorhaben) und in der Unterhaltung (Erkundung von und Erprobung in Abenteuer- und Fantasy Welten, Fortbewegung mit Rennauto und Achterbahn, Stimulation über Pornografie) (Gabler Wirtschaftslexikon: www.wirtschaftslexikon.gabler.de).

Das Eintauchen in die virtuelle Realität kann ausdrucksstark und wissenswert einerseits und verwirrend andererseits sein. Je länger man in der virtuellen Welt bleibt, desto unterdrückender wirkt die normale Wirklichkeit auf ihn und es könnte schwierig werden, diese zurückzukehren und sich wieder in dieser Wirklichkeit zu orientieren. Manchmal kommt es zu Schwindelanfällen, besonders, wenn künstliche und tatsächliche Bewegung bzw. Beschleunigung voneinander abweichen. Die

wirtschaftliche Bedeutung von Virtual Reality und Mixed Reality ist hoch. Bedeutend sind die unterschiedlichen Anwendungsgebiete und -systeme (nicht nur Hard-, sondern auch Software) und das Engagement von Anbietern und Benutzern (Gabler Wirtschaftslexikon: www.wirtschaftslexikon.gabler.de).

4 EXPERIMENTE UND ERGEBNISSE

Zum Berechnen der Bildpunktvolken und 3D-Modellen wurden sechs Programmen verwendet: Pix4D, VisualSfM, Autodesk ReCap, ContextCapture, Sure und Agisoft PhotoScan. Der Berechnungsablauf ist bei allen Softwarepaketen gleich. Im ersten Schritt werden die Parameter für die Kamerakalibrierung (innere Orientierung) und die Bildorientierungen (äußere Orientierung) automatisch berechnet. Die Bilder werden ausgerichtet. Als nächstes wird eine dünne 3D-Punktvolke und danach eine dichte 3D-Punktvolke wiederum vollautomatisch berechnet. Im letzten Schritt wird eine 3D-Modell aus den Bilddaten vollautomatisch fotorealistisch texturiert. Das einzige was der Anwender bei den Einstellungen verändern kann ist der Genauigkeitsgrad der berechneten 3D-Punktvolke und 3D-Modelle und das Ausgangsformat. Je höher der Genauigkeitsgrad ist, desto länger dauert die Berechnung. Zusätzlich kann man bei Pix4D, ContextCapture und Agisoft PhotoScan manuell eine Messung von Passpunkten durchführen.

4.1 Berechnen der Bildpunktvolken und 3D-Modellen eines gesamten Raums

In der ersten Phase wurde versucht den ganzen Raum mit dem Möbel und Druckgeräten zusammen anhand der Photographien mit sechs photogrammetrischen Programmen zu berechnen. Es gab zwei Versuche: erstes Mal mit 177 Fotos und zweites Mal mit 885 Fotos.

Bei der Berechnung mit Pix4D und ContextCapture wurden die Punktvolken und 3D-Modelle außerdem durch manuelle Messung von Passpunkten gestärkt, um zu schauen, ob es eine große Auswirkung auf die Ergebnisse ausübt.

5.1.1 ContextCapture

In der ersten Phase wurde mit ContextCapture ein 3D-Modell mit 177 Fotos ohne Angabe über bekannte Passpunkte berechnet. Den Erwartungen nach, weist das 3D-Modell viele Lücken auf den durchsichtigen Objekten wie Fenster sowie auf den flachen Objekten wie z.B. Wand, Fensterbrett, Tisch, Tresor, flache Seiten von Druckgeräten. Die Textur ist erkennbar, jedoch sind die Details und Oberfläche stark verfälscht. Was Berechnung der 3D-Punktwolke angeht, hat die Software eine dichte Punktwolke mit 1.4 Mio Punkte definiert, siehe Abb. 20.



Abb. 20. 3D-Modell berechnet mit ContextCapture aus 177 Bildern

In der zweiten Phase wurde mit ContextCapture ein 3D-Modell mit 177 Fotos über bekannte Passpunkte berechnet. Visuell sieht man kaum Unterschied zwischen dem Model ohne PP und dem Model mit PP. Bei der detaillierteren Betrachtung der Berechnungsergebnisse fällt es auf, dass in der zweiten Phase die Normalen auch mitberechnet wurden, was in der ersten Phase nicht der Fall war.

Der mittlere Fehler in der Lage ist 0,09 m, Fehler in der Höhe 0,16 m.

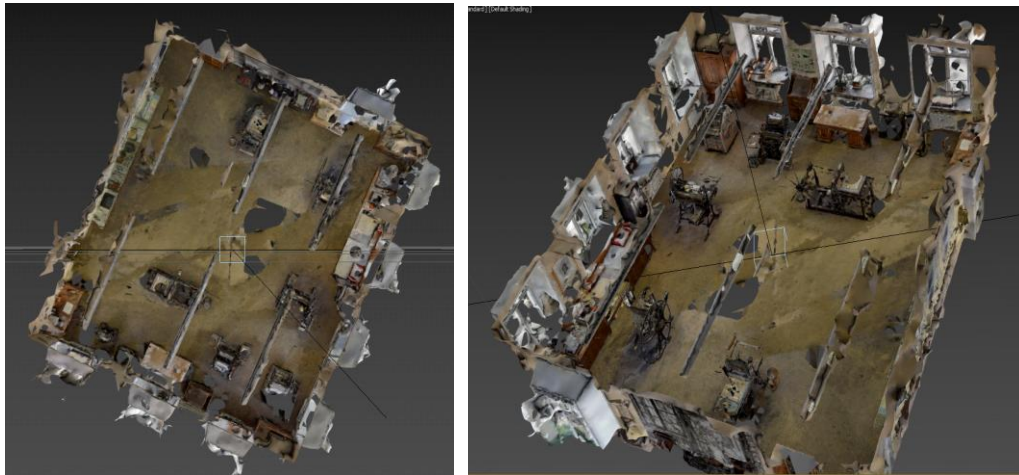


Abb.21 3D-Modell berechnet mit ContextCapture aus 177 Bildern mit PP

In der zweiten Phase wurde auch mit ContextCapture ein 3D-Modell (Abb.22) mit 373 Fotos über bekannte PassPunkte berechnet, da ohne PP die Aerotriangulation mit Misserfolg erfolgte. Es wurden 94099 TiePoins gefunden. Die dichte Punktwolke besteht in diesem Fall aus ca. 2,6 Mio Punkte. Der mittlere Fehler in der Lage ist 0,09 m und Fehler in der Höhe 0,01 m.

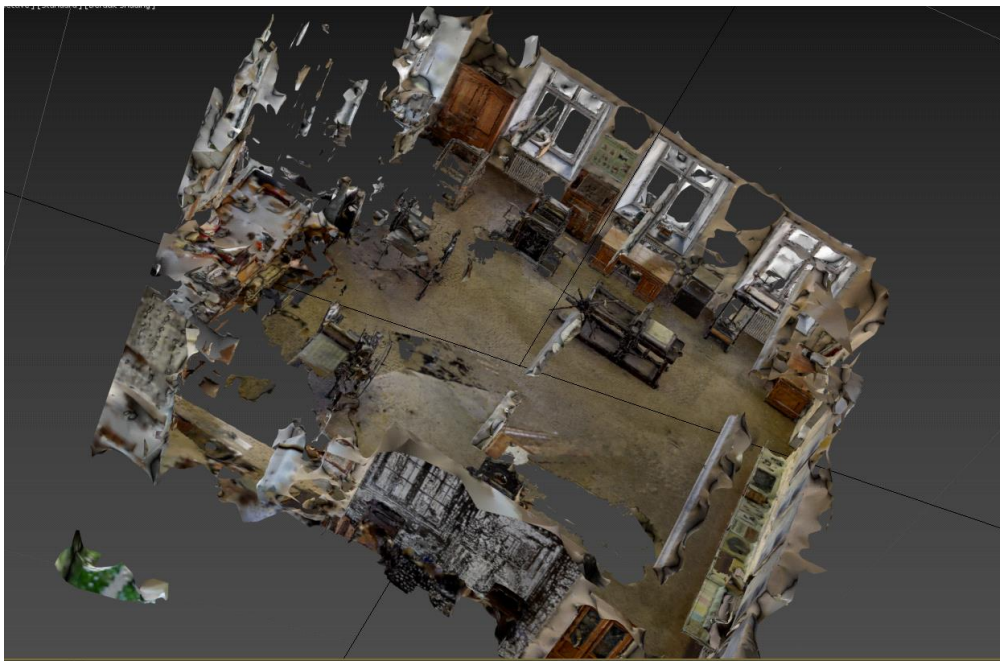


Abb.22 3D-Modell berechnet mit ContextCapture aus 373 Bildern mit PP

Die Geometrie des Raums ist verloren gegangen. Es entstanden neue Lücken am Boden und auf den Wänden. Eine Seite ist sowie weggefliegen, wenn die Seite nebenbei eine sehr gute 3D-Abbildung der da vorhandenen Geräte aufweist, siehe Abb. 23. Die Farbwiedergabe, Textur und Details sind hier sehr realistisch und geometrietreu.



Abb. 23 3D-Modell berechnet mit ContextCapture aus 373 Fotos mit PP

5.1.2 Agisoft PhotoScan Professional

Zuerst wurden mit Agisoft PhotoScan 177 Bilder ausgerichtet und mit dem Genauigkeitsgrad "Hoch" berechnet. Als Resultat wurden 72.716 Verknüpfungspunkte identifiziert und daraus eine dichte Punktwolke mit 37 Mio Punkte abgeleitet. Das 3D-Modell weist genauso viele Lücken wie das mit dem ContextCapture berechnete Modell (Abb.24). Im Unterschied dazu zeigen sich hier starke Unregelmäßigkeiten in den Bereichen Wände, Boden und Geräte. Die Kanten sind unscharf, teilweise verschwommen und verzehrt. Die Oberfläche und die Details wurden Aufgrund der Unebenheiten stark verfälscht. Manche Objekte sind einfach verschwunden, so dass es nur die leichte Umriss zu sehen sind.

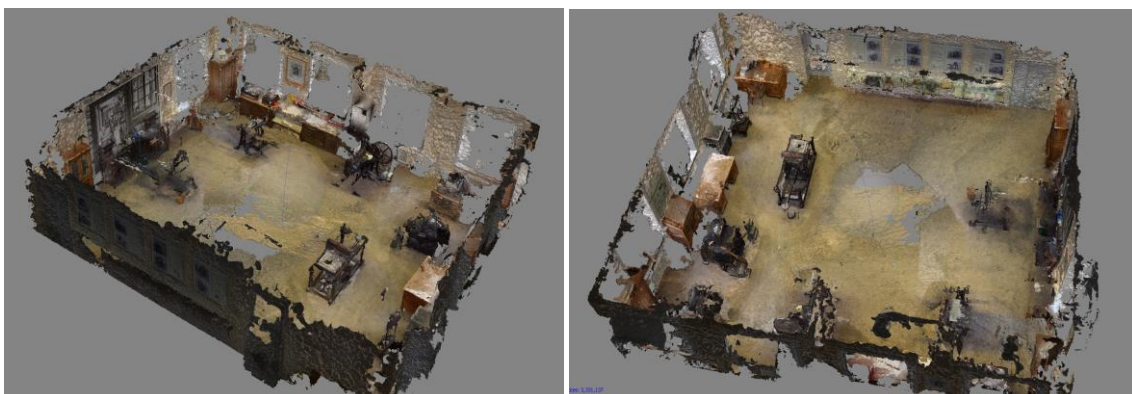


Abb. 24 3D-Modell berechnet mit Agisoft PhotoScan Professional aus 177 Fotos

Als nächstes wurde mit Agisoft PhotoScan eine Berechnung von 875 Bildern mit dem Genauigkeitsgrad "Ultra Hoch" durchgeführt. Die Software hat 635.586 Verknüpfungspunkte registriert und daraus eine sehr dichte 3D-Punktwolke mit ca. 499 Mio. Punkte bestimmt. Das Erstellen von 3D-Modell ist vermutlich wegen nicht ausreichendem RAM Speicherplatz, immer wieder fehlgeschlagen.

Aus der dichten 3D-Punktwolke sind die Texturen und die Details der Druckgeräte sehr gut zu erkennen. Die Wände mit den Fenstern und die Türe wurden überhaupt nicht rekonstruiert, siehe Abb.25-26.

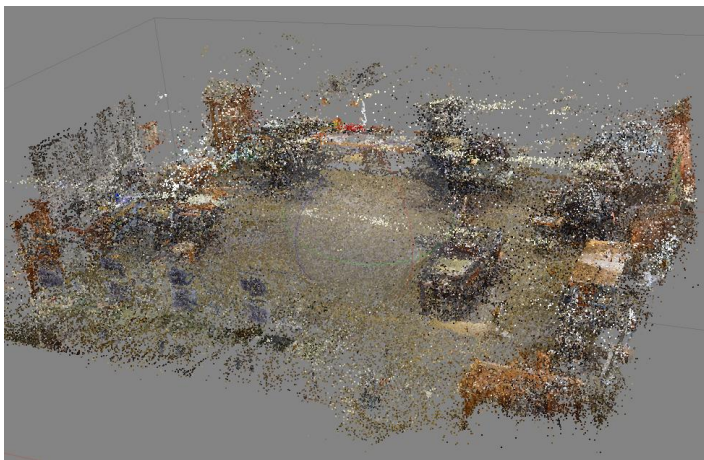
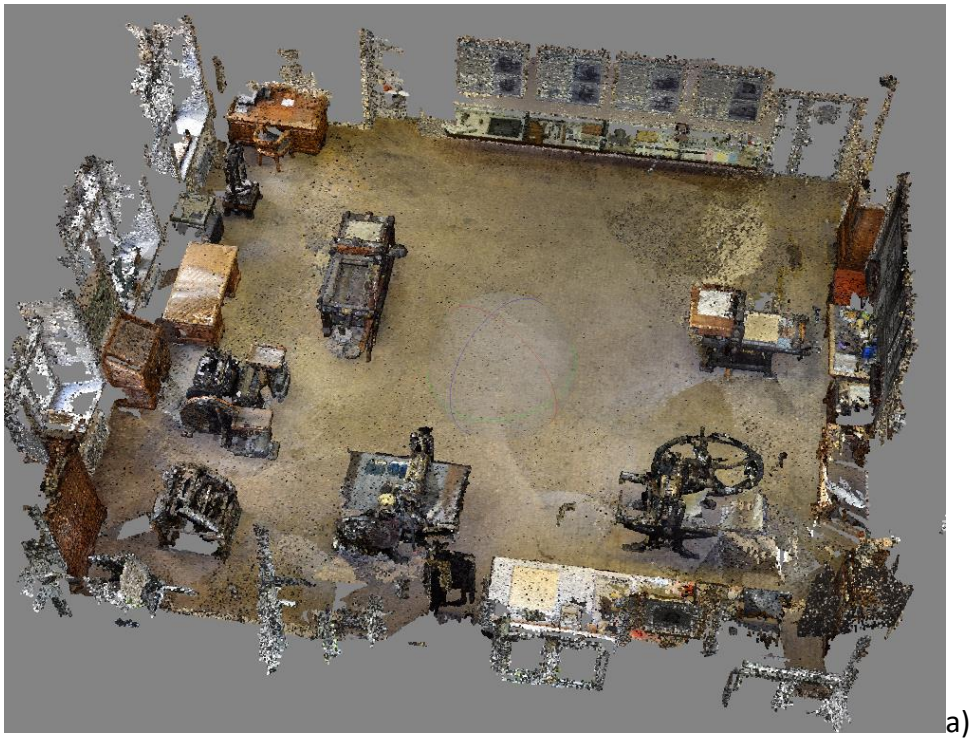


Abb. 25 Dünne Punktwolke berechnet mit Agisoft PhotoScan Professional aus 834 Fotos



a)



b)

Abb. 26 a) &b) Dichte 3D-Punktwolke berechnet mit Agisoft PhotoScan Professional aus 834 Bildern

5.1.3 Autodesk ReCap Photo

Autodesk Recap Pro ist eine cloudbasierte Software. Mit der studentischen kostenlosen Lizenz steht 25 GB Cloudspeicher zur Verfügung. Die zur Rekonstruktion benötigte Bilder (Fotografien) müssen zuerst auf die Autodesk Server hochgeladen werden. Danach könnte die Qualitätsstufe des 3D-Modells sowie die Formatausgabe ausgewählt werden. Die Berechnung selbst erfolgt auf den Servern von Autodesk. Am Ende steht eine vermaschte und texturierte Punktwolke zum Herunterladen. Leider ist die studentische Version auf maximal 100 die zur Berechnung hochgeladene Bilder eingeschränkt. Aufgrund dieser Einschränkung ist es nicht möglich den ganzen Raum vollständig zu erfassen, da es dafür mehr als 100 Bilder benötigt sind.

Wie es in der Abb. 27 zu sehen ist, weißt auch dieses 3D-Modell Lücken auf. Sie treten im Bodenmitte, im Hintergrund der Objekte und auf den Wänden. Die Objektgeometrie ist fehlerhaft. Es scheint zu sein, dass 100 Bilder doch nicht ausreichend für die detailtreue und genaue Wiedergabe der Geometrie sind.



Abb. 27 3D-Modell eines gesamten Raums berechnet aus 100 Bildern mit Recap Pro Photo

5.1.4 Pix4D

Überraschend schlechte Ergebnisse hat das Programm Pix4D geliefert. Zuerst wurden mit dem Programm 177 Bilder mit Hilfe von Passpunkte berechnet. Daraus wurden ca. 600.000 Verknüpfungspunkte identifiziert und über 11 Mio. dichte 3D-Punktwolke definiert. Abb. 26 veranschaulicht das Ergebnis. Allerdings sind durch starke Unebenheiten im ganzen Raum nur grobe Merkmale der Objekte zu erkennen. Die Kanten sind unscharf und fehlerhaft. Außerdem ist in der Raummitte eine riesige Lücke zu merken, wo es ganz wenige Punkte für die Rekonstruktion des Raums aufgefunden sind (Abb.28).

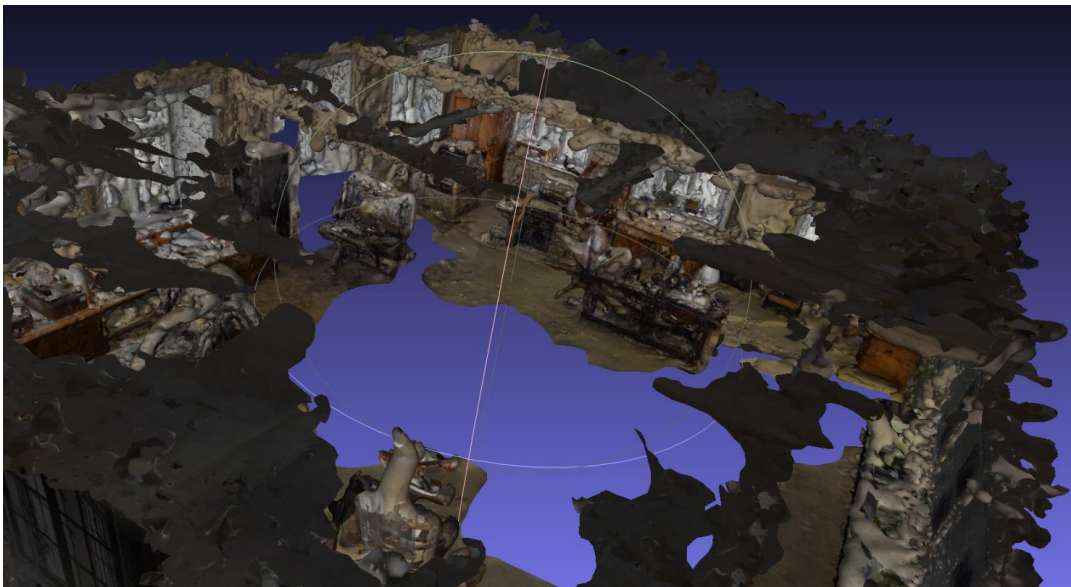


Abb. 28 3D-Modell berechnet mit Pix4D aus 177 Bilder mit PP

Als nächstes sollten mit dem Pix4D die 177 Bilder ohne Passpunkte berechnet werden. Bei dem Berechnungsprozess ist es schon bei der automatischen Kamerakalibrierung kritisch geworden, da aus 177 Bilder nur 50 Bilder überhaupt kalibriert worden. Mit 10.000 identifizierten Verknüpfungspunkte wurde trotzdem eine dichte Punktwolke mit ca. 2 Mio. Punkte bestimmt. Das daraus generierte 3D-Modell hat gar nichts mit dem 3D-Raum zu tun, siehe Abb.29. Es ist eher eine aus verschiedenen Teile des Raums bestehende 3D-Masse. Die Auswirkung einer fehlergeschlagenen automatischen

Kamerakalibrierung lässt sich nicht mehr zu ändern. Einerseits ist es erstaunlich, dass es keinen Programmabsturz gab, andererseits, heißt es, dass das Programm ganz einfach fehlerhafte Ergebnisse liefern kann.

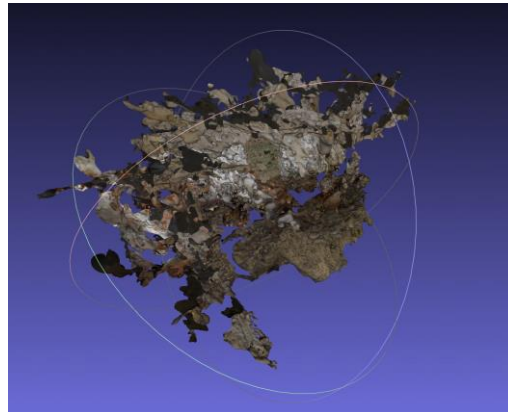


Abb. 29 3D-Modell berechnet mit Pix4D aus 177 Bilder ohne PP

5.1.5 Sure

Keine besonders guten Resultate hat auch das Programm Sure geliefert. Für die Berechnung von 177 Bilder wurden die mit PhotoScan gewonnen Orientierungen benutzt. Die Berechnung selbst wurde mit dem Genauigkeitsgrad "Hoch" durchgeführt. Nach ein paar Tage war das 3d-Modell fertig gestellt. Die dichte Punktwolke umfasste ca. 4 Mio. Punkte, siehe Abb. 30. Trotzdem wurden extrem wenige geeignete unter Verwendung eines Semi Global Matching (SGM) -Algorithmus Bildpaare ausgewählt, wodurch es mit vielen Lücken bei der Rekonstruktion zu rechnen ist. Orientierung der Bilder ist auch nicht ohne Probleme verlaufen. Die Geometrie des Raums ist vollständig zerstört, siehe Abb. 30-31.

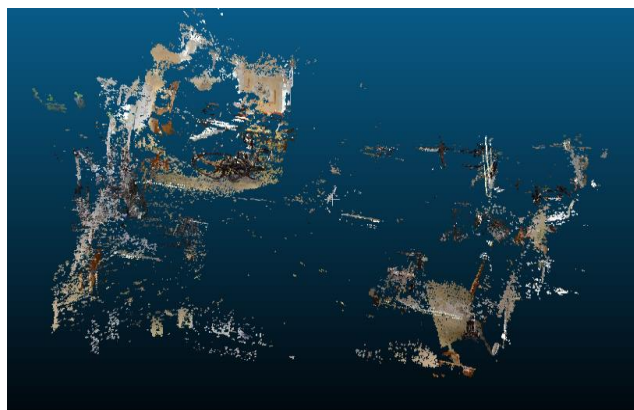


Abb. 30 3D-Punktwolke berechnet mit Sure aus 177 Bilder

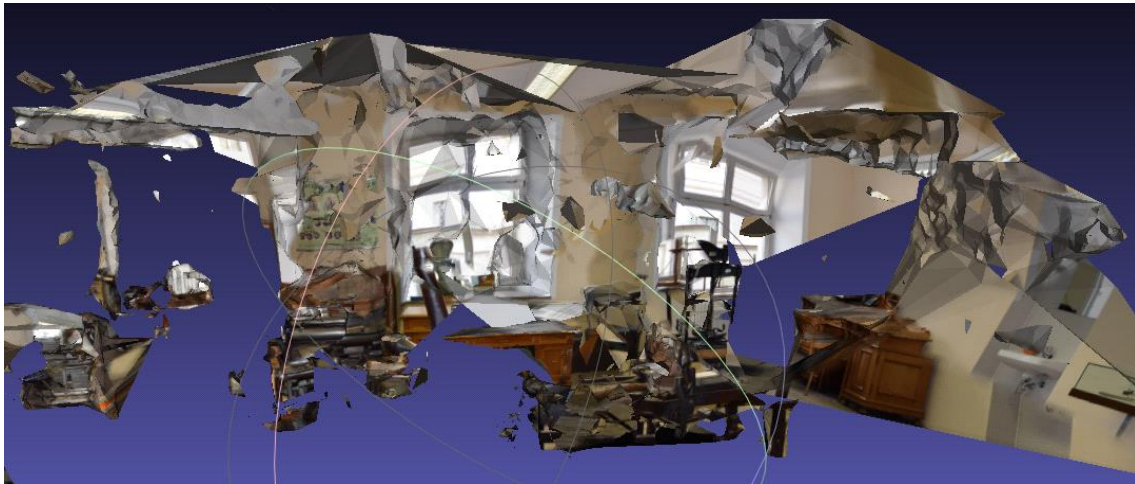
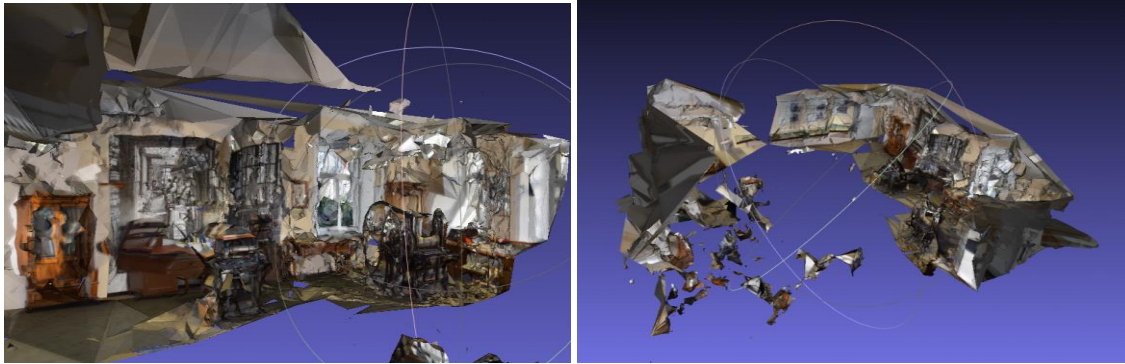


Abb. 31 3D-Modelle (oben und unten) berechnet mit Sure aus 177 Fotos

Die Berechnung mit 885 Bilder hat auch nicht wirklich gut funktioniert. Es wurde zwar über 12,5 Mio. Punkte dichte 3D-Punktwolke generiert, das Programm ist aber nach diesem Schritt abgestürzt. Aus dem dichten Punktwolke sind die grobe Merkmale der Objekte zu erkennen. Die Geometrie des Raums ist trotz Fehler vorwiegend gut. Wiederum weisen viele Lücken (Abb. 32) auf nicht ausreichende Punktdichte in allen Bereichen auf.

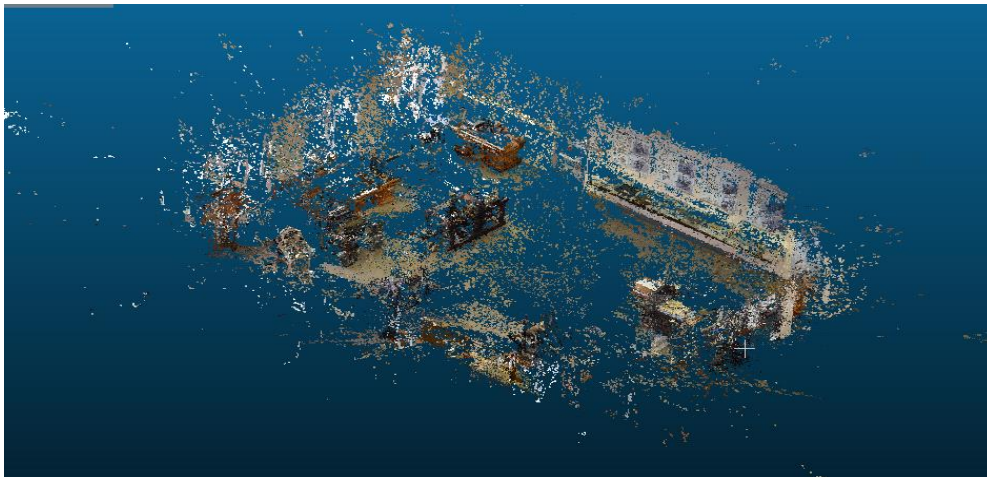


Abb.32 3D-Punktwolke berechnet mit Sure aus ca.885 Fotos

5.1.6 VisualSfM

Es wurden 177 Bilder zum VisualSfM reingeladen, orientiert und berechnet. Als Resultat wurden 28.500 Verknüpfungspunkte und daraus mit 4,7 Mio Punkte dichte 3D-Punktwolke definiert, siehe Abb. 33. Das 3D-Modell weist viele Rekonstruktionslöcher auf und ganz wenige Objekte und Merkmale der Objekte sind überhaupt erfasst. Die Geometrie des Raums ist wenig fehlerhaft.

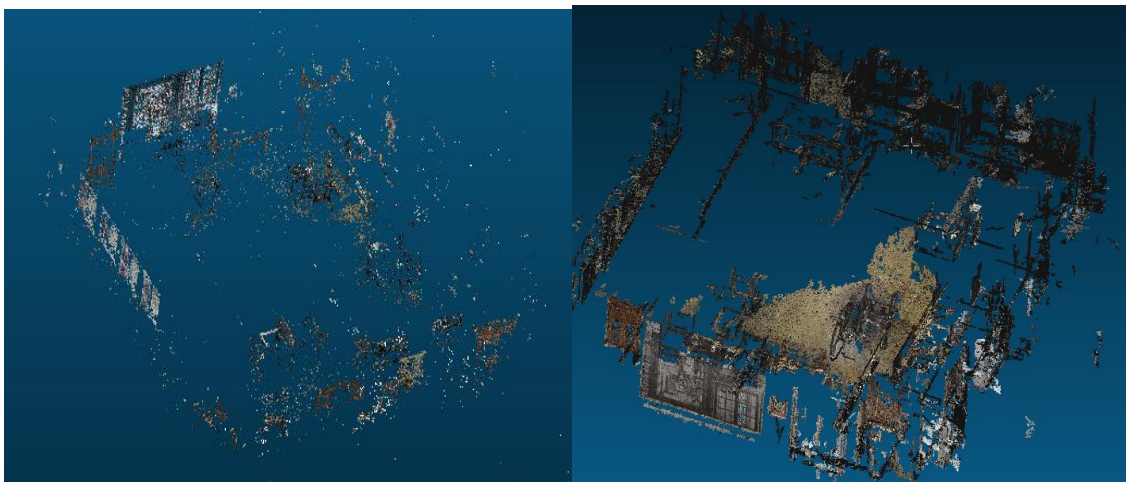


Abb.33 Verknüpfungspunkte (links) und 3D-Modell (rechts) berechnet mit VisualSfM aus 177 Bilder

4.2 Berechnen der Bildpunktswolken und 3D-Modellen von einzelnen Objekten des Raums

In der zweiten Phase wurde der Versuchsraum aufgeteilt und jedes Gerät einzeln von allen Seiten mit der Kamera aufgenommen und anschließend, dieses Mal nur mit drei Programmen - Agisoft PhotoScan, ContextCapture und Autodesk ReCap Photo, berechnet. Grund dafür ist große Verlustinformationen bei der 3D-Modellerstellung in der 1. Phase. Einer gründlichen Recherche nach, ist es unrealistisch einen Raum mit vielen Objekten, die eng zu einander stehen, auf einmal gut mit der Kamera zu erfassen und daraus lückenfreie 3D-Modelle zu erhalten. Gute Erfahrungen im diesen Gebiet wurden nur mit einem einzigen Versuchsobjekt gemacht. Deswegen wurde die Leitung der Druckerei gebeten, die schwere Druckmaschinen in die Mitte des Raums zu bewegen, damit es genügend Platz für die Aufnahme gibt und noch mal aufnehmen lassen. Von jedem Gerät wurden mind. 100 Fotos aufgenommen. Dies sollte eine detaillierte 3D-Modellberechnung ermöglichen. Anschließend sollten alle Objekte in den Raum hinzugefügt werden und auf diese Weise eine sehr gute fotorealistische Darstellung des Raums zulassen.

4.2.1 Agisoft PhotoScan Professional

Für die Berechnung des ersten Gerätes wurden 91 Bilder benutzt, die eine sehr gute Kamerakonstellation und somit eine ausreichende Flächenabdeckung in 3-4 Ringen aufzeigen. Als Resultat berechnete die Software durch 9.479 Verknüpfungspunkte eine dichte mit über 3 Mio. Punkten 3D-Punktswolke, siehe Abb.35 (a).

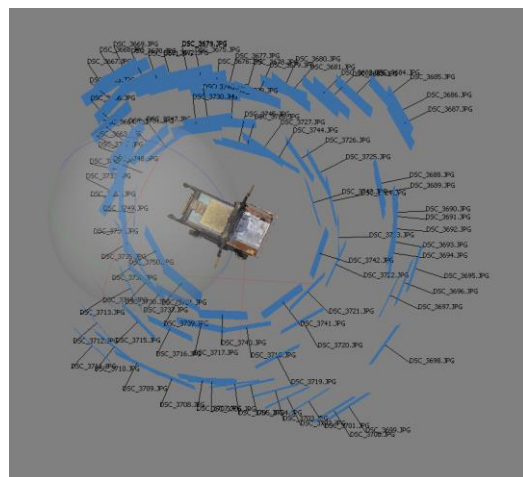


Abb.34 Kamerakonstellationen von 91 Bilder

Das daraus resultierende 3D-Modell (Abb.35.(b)) weist leider Lücken im oberen Teil des Gerätes und keine scharfen Kanten auf. Eine zusätzliche Reihe mit Bildern von oben

könnte vielleicht die Lücken schließen. Der darauf liegende Stein ist mit sehr guten Textur abgebildet. Man sieht alle kleine Details da drauf.

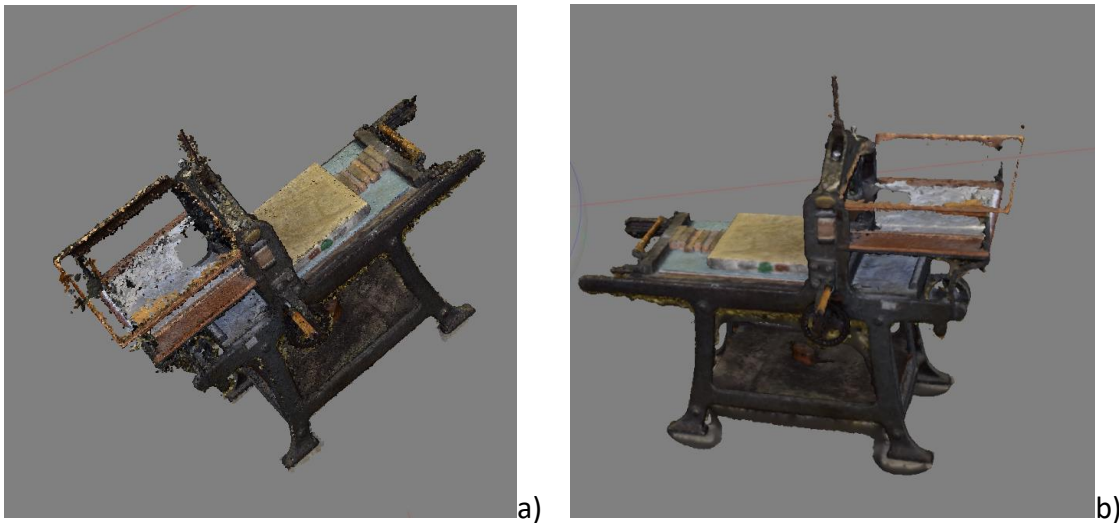


Abb.35 3-D Punktwolke (a) und 3D-Modell(b) gewonnen aus 91 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional

Die Berechnung des zweiten Gerätes wurde mit 84 Bildern durchgeführt. Die Abb. 36 zeigt eine sehr gute Kamerakonstellation an. Das Programm berechnete mit 9.044 Verknüpfungspunkte eine dichte Punktwolke mit über 31 Mio. Punkte (Abb.35 a). Trotz der hohen Punktdichte hat das 3D-Modell Lücken im oben Teil des Objekts. Eine Eiserne Platte ohne Textur ist sehr schwer zu rekonstruieren bei allen Geräten allgemein. Laut Einleitung zur PhotoScan ist es überhaupt nicht möglich. Das riesige Dreh Rad ist dagegen sehr detailreich abgebildet, siehe Abb.37 b., aber es fehlt wie auch immer etwas schärfe an den Kanten.

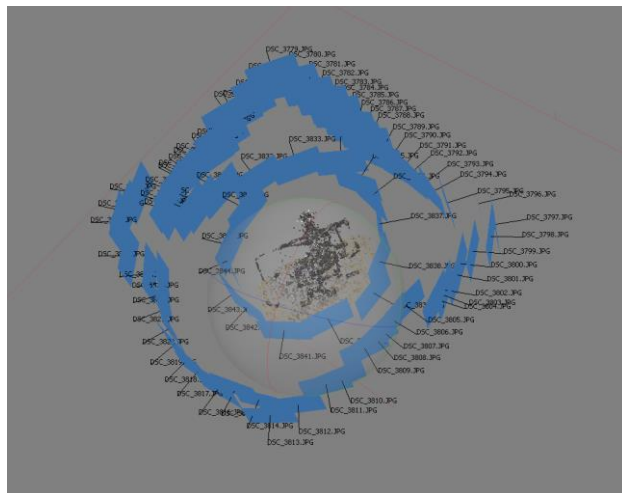


Abb.36 Kamerakonstellation mit 84 Bilder



Abb.37 3-D Punktwolke (a) und 3D-Modell(b) gewonnen aus 84 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional

Das dritte Gerät wurde lediglich nur mit 57 Bildern erfasst. Trotz einer guten Kamerakonstellation hat das PhotoScan ca. 4.000 Verknüpfungspunkte identifiziert und eine dichte 3D-Punktwolke mit über 2,6 mio. Punkte definiert, siehe Abb.38. Das 3D-Modell ist deswegen nicht vollständig und detailliert abgebildet. Es fehlt allgemein an Textur und Schärfe des zu aufgenommenen Objekts. Die Farbgebung ist etwas verschwommen. Trotzdem ist eine Seite der großen flachen eisernen Platte komplett ohne Löcher wiederhergestellt (Abb.39).

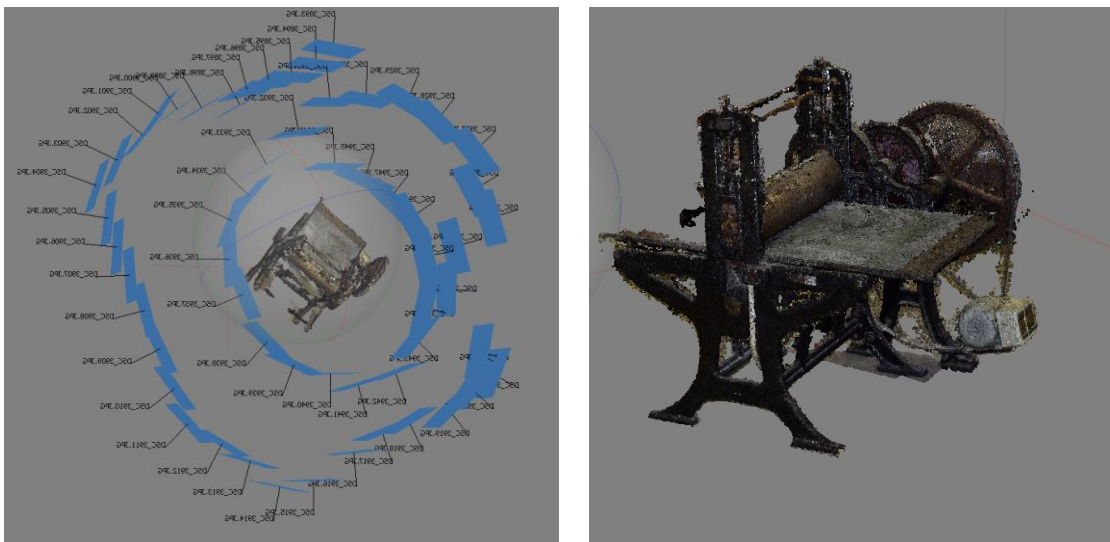


Abb.38 3D-Punktwolke (links) gewonnen aus 57 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional und die Kamerakonstellation (rechts)



Abb.39 3D-Modelle gewonnen aus 57 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional

Das vierte Gerät durfte man leider nicht bewegen und aus diesem Grund wurde das Objekt so gut wie möglich von allen freien Seiten erfasst. Für diese Berechnung mit PhotoScan Professional wurden 61 Bilder ausgewählt, aus denen 15.094 Verknüpfungspunkte ausgefiltert wurden. Dies ermöglichte eine Berechnung von ca. 4 Mio. dichten 3D-Punktwolke, siehe Abb. 40. Das 3D-Modell weist an den flachen texturlosen und schwierig zu erreichenden Stellen Rekonstruktionslöcher (Abb.41) auf. Die abgebildete Fläche des Objekts ist auf meisten Stellen uneben.

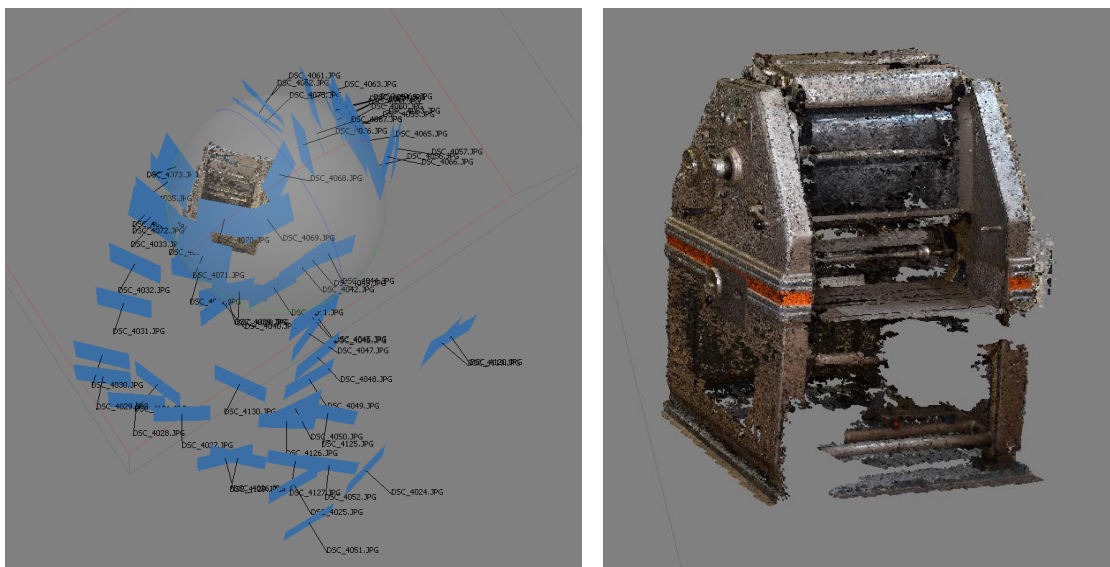


Abb.40 Kamerakonstellation (links) und 3D-Punktwolke (rechts) gewonnen aus 61 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional



Abb.41 3-D Punktwolke (a) und 3D-Modell(b) gewonnen aus 61 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional

Das nächste Gerät durfte auch sein Platz nicht verlassen und wurde mit der Kamera soweit es ging erfasst. Damit gelingt es mit ca. 15.000 Verknüpfungspunkte eine mit 11 Mio. dichte Punktwolke zu berechnen, siehe Abb.41.

Das 3D-Modell verfügt über eine detailreiche Textur, besonders scharf ist der hintere Teil des Objekts (Abb. 43-44). Vorne ist die Textur wegen Unebenheiten nur grob erkennbar. Es sind in der 3D-Abbildung kaum Lücken vorhanden.

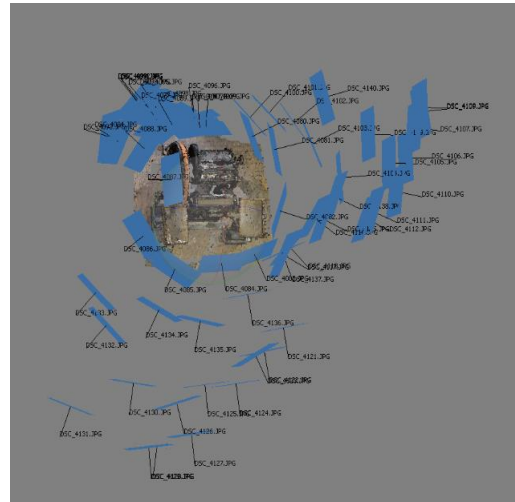


Abb.42 Kamerakonstellation mit 60 Bilder

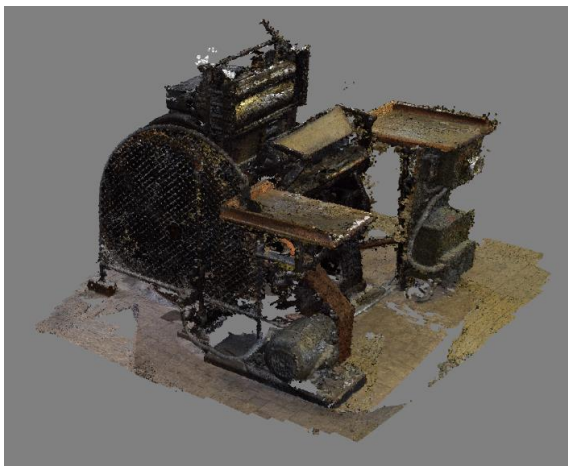


Abb.43 3-D Punktwolke gewonnen aus 60 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional



Abb.44 3D-Modelle gewonnen aus 60 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional

Das sechste Gerät wurde mit 81 Bilder erfasst. Sehr gute Kamerakonstellation. Das Objekt wurde einmal aus der Ferne und zwei Mal nah aufgenommen. Das PhotoScan hat mit 22.641 Verknüpfungspunkte eine ca.21,5 Mio. dichte 3D-Punktwolke berechnet, siehe Abb.44.

Das 3D-Modell zeigt überraschenderweise keine gute Textur und keine scharfen Kanten. Wie erwartet gibt es Rekonstruktionslöcher auf der homogenen Oberfläche des Objektes (Abb.45-46).

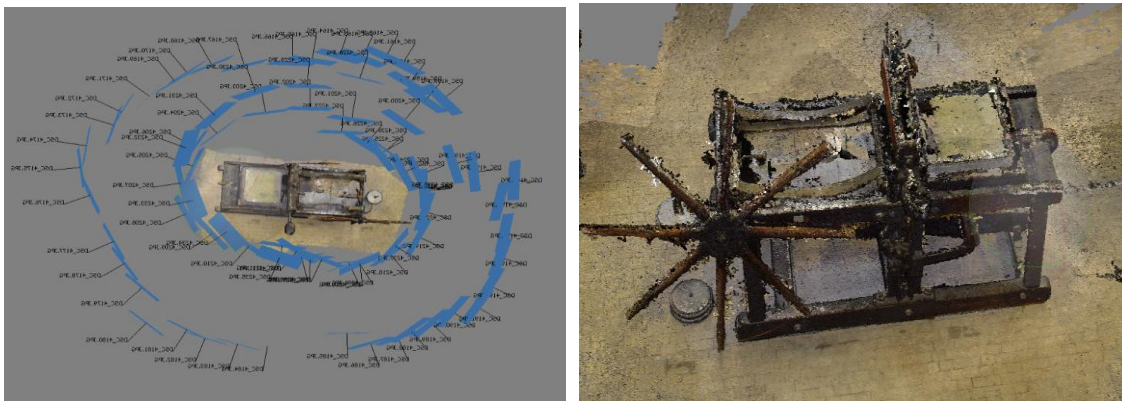


Abb.45 Kamerakonstellation (links) und 3D-Punktwolke (rechts) gewonnen aus 81 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional

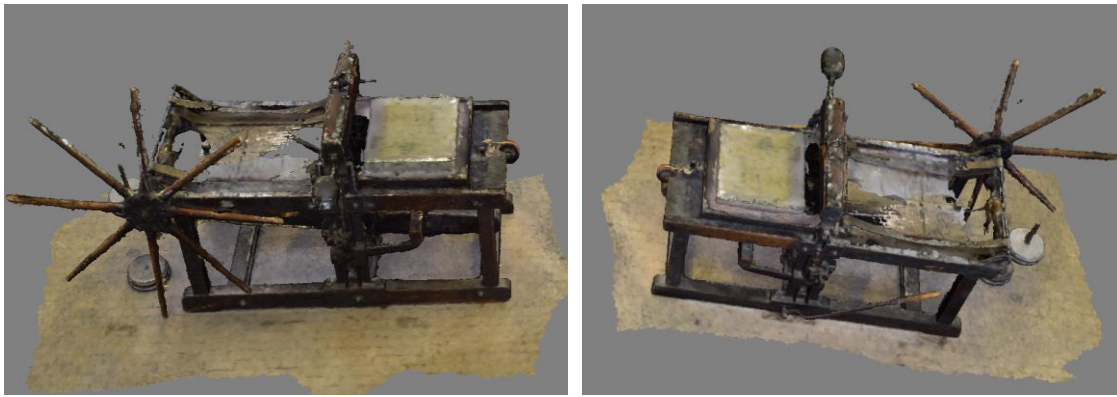


Abb.46 3D-Modelle gewonnen aus 81 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional

4.2.2 Autodesk ReCap Photo

Autodesk ReCap Photo lieferte bei den gleichen Bedingungen (derselbe Anzahl der Bilder pro Objekt und gleiche Kamerakonstellation) ganz unterschiedliche im Vergleich zum PhotoScan Ergebnisse. Allgemein für alle die mit dem Autodesk ReCap Photo berechnete 3D-Modelle gilt: detailtreue Erfassung und farbechte Textur, sehr scharfe Kanten und realistische Farbwiedergabe, Abb. 47-53. Manche 3D-Abbildungen wie auch bei PhotoScan 3D-Modellen haben Rekonstruktionslöcher bei schwer zu erreichenden Stellen und auf den homogenen Oberflächen.



Abb.47 3D-Modelle gewonnen aus 91 Fotos mit Autodesk ReCap Photo



Abb.48 3D-Modelle gewonnen aus 84 Fotos mit Autodesk ReCap Photo

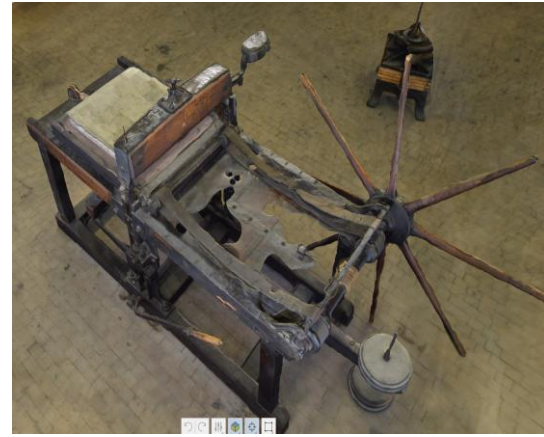


Abb.49 3D-Modelle gewonnen aus 81 Fotos mit Autodesk ReCap Photo

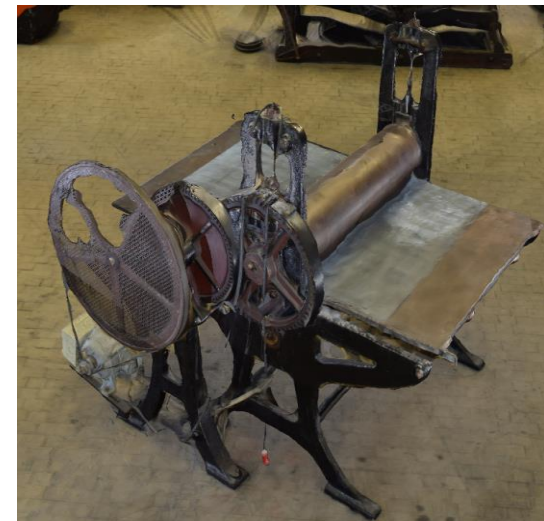


Abb.50 3D-Modelle gewonnen aus 57 Fotos mit Autodesk ReCap Photo



Abb.51 3D-Modelle gewonnen aus 121 Fotos mit Autodesk ReCap Photo



Abb. 52 Ein Teil des Raums berechnet mit Autodesk ReCap Photo

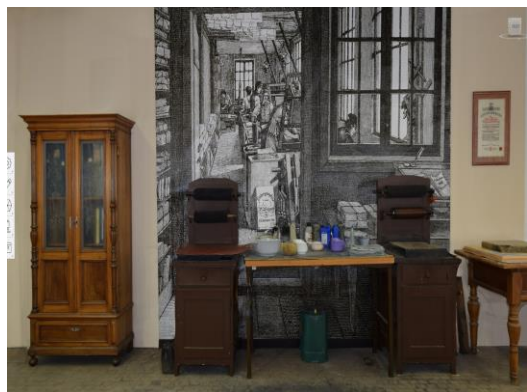


Abb. 53 Ein Teil des Raums berechnet mit Autodesk ReCap Photo



Abb. 54 Ein Teil des Raums berechnet mit Autodesk ReCap Photo

4.2.3 ContextCapture

Erstellung der 3D-Modelle mit ContextCapture erfolgte auch bei den gleichen Bedingungen (derselbe Anzahl der Bilder pro Objekt und gleiche Kamerakonstellation) wie mit Agisoft PhotoScan Professional und Autodesk ReCap Photo. Diese Software hat auch im Vergleich zu Agisoft PhotoScan viel bessere Ergebnisse gebracht.

ContextCapture lieferte eine geometrietreue und detaillierte Objektdarstellung, siehe Abb. 55-58. Die 3D-Modelle wirken realistisch und die Objekte besitzen scharfe Kanten. Die Farbwiedergabe dagegen hat einen künstlichen Effekt, da alle Objekte eine etwas glänzende Oberfläche aufzeigen.



Abb.55 3D-Modelle gewonnen aus 91 Fotos mit ContextCapture



Abb.56 3D-Modelle gewonnen aus 84 Fotos mit ContextCapture



Abb.57 3D-Modelle gewonnen aus 81 Fotos mit ContextCapture



Abb.58 3D-Modelle gewonnen aus 81 Fotos mit ContextCapture

4.3 Umsetzung des virtuellen Spazierganges

Um ein virtuelles Besuch in die 3D-Welt zu ermöglichen, wird eine 3D-Modell benötigt. Dadurch dass es sich im Laufe den Experimenten keine lückenfreie vollständige 3D-Modell des Raums ergab, sollte jetzt eine „gebastelt“ werden. Dafür wurden drei verschiedene Teile des Raums ohne Geräte über manuell erstellte Passpunkte im CloudCompare orientiert, skaliert und zusammengefügt. Somit entstand eine zusammengesetzte 3D-Modell von Raum. Es wurde im CloudCompare Schrittweise durgegangen, siehe Abb. 57. Es konnten auf einmal nur zwei Punktwolken zu orientiert und als eine zusammengesetzte Punktwolke gespeichert. Deswegen mussten diese Schritte zwei Mal durchgeführt sein bis eine Endpunktwolke entstand. Es wurden die mit dem Autodesk ReCap Photo berechneten am besten texturierten 3D-Puntwolken benutzt.

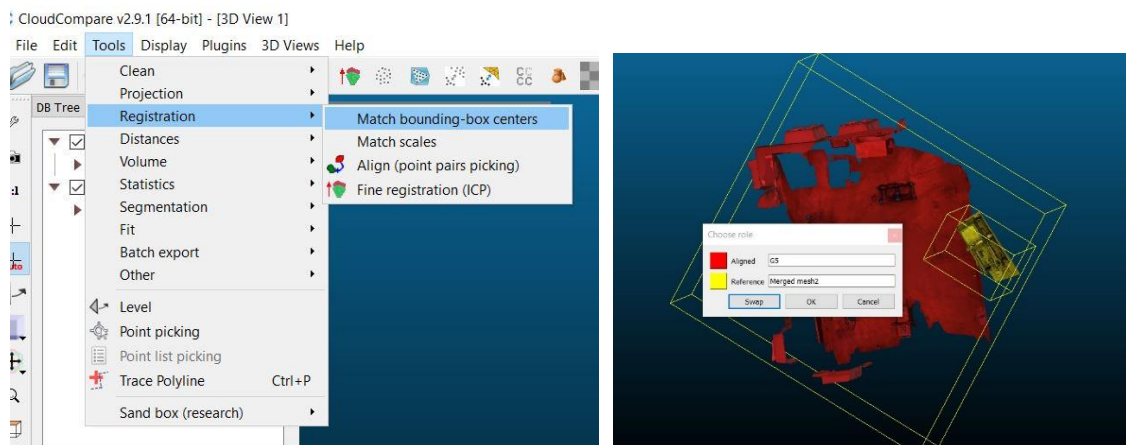


Abb. 59 Registrierung von 3D-Punktwolken mit CloudCompare

Als nächstes wurden zum 3D-Modell des Raums nach einander alle Geräte auf die gleiche Weise hinzugefügt. Nachdem zwei Geräte im 3D-Modell orientiert waren, wurde festgestellt, dass es weiter nicht mehr geht. Das Programm ist abgestürzt. Die Bildpunktwolke war wegen der Größe schwer zu bearbeiten. Deswegen wurde entschieden die Größe aller benutzten 3D-Modellen bis zu 80% zu reduzieren. Die 3D-Modelle wurden nacheinander im ReCap Photo eingeladen und auf 60-80 % der Größe verringert. Danach wurden wieder die drei Schritte der Bilderregistrierung mit CloudCompare neun Mal gemacht, bis eine vollständige 3D-Modell inklusive Geräte zur Stande kam.

Das fertige 3D-Modell wurde anschließend im geeigneten für Unity Programm – fbx Format ausgegeben.

3D-Reality Kontinuum wurde im den Entwicklungsumgebung von Game-Engine Unity realisiert. Dafür eignet sich ganz gut eine studentische Lizenz. Man startet einen neuen 3D Projekt und landet zum Unity Editor. Über den Asset Store von Unity sollten zuerst zwei wichtige Tools geladen werden: das kostenlose Plug-in „SteamVR“ und das „Virtual Reality Toolkit“ (VRTK). Das erste Tool ermöglicht eine die Betrachtung der Szene mit VR-Brillen. Alle Bewegungen wurden verfolgt und auf dem Bildschirm wiedergegeben. Mit dem VRTK konnte die Funktionalität der „Steam Vr“ Plug-in verbessert werden, in dem neue Funktionen an Controller übertragen werden. Dieses Tool enthält solche Funktionen wie Objektinteraktion, Teleportieren, Laufen mittels Pointer oder Touchpad und andere Steuerungsmöglichkeiten.

Es wurde einen Ordner mit dem 3D-Modell hinterlegt. Das Modell war erstmals texturlos, da die Texturen manuell über Editor extrahiert wurden. Danach wurden wichtige für die Bewegung im Raum Funktion mit Hilfe VRTK zugewiesen. Somit konnte man sich im Raum durch das Drücken des Touchpads in alle Richtungen bewegen.

5 DISKUSSION UND BEWERTUNG

5.1 Vergleich der 3D-Modelle des gesamten Raums

In diesem Kapitel werden die Größen der Punktwolke und die Anzahl der Verknüpfungspunkte unter Berechnung mit verschiedenen Programmen verglichen. Anhand der Verknüpfungspunkte kann man die Qualität der Aufnahmeconfiguration beurteilen, da sie eine feste Verbindung der Bilder untereinander gewährleisten. Die Dichte der Punktwolke ist für die Modellberechnung wichtig.

Tabelle 2: Vergleich der Verknüpfungspunkte und dichten Punktwolke des Gesamttraums

Programm	Anzahl der Bilder	Verknüpfungspunkte	Dichte der Punktwolke	Zeitlicher Aufwand
ContextCapture	177	21.555	1.385.030	09st:21m
ContextCapture	373	94.099	2.580.473	02t:08st:36m
PhotoScan Professional	177	72.716	37.149.172	12st:35m
PhotoScan Professional	875	635.586	498.783.334	6t:22st:13m
Pix4D	177	616.251	11.197.479	01st:39m
Pix4D	990	5.337.923	44.506.844	03st:34m
Sure	177	nb*	4.182.322	2t:5st:23m
Sure	875	nb	12.559.739	1t:13st:3m
ReCap Pro Photo	100	nb	3.992.342	4st:15m
VisualSfM	177	28.558	4.781.700	8st:10m

nb*= nicht bekannt

In der Tabelle 2 sind Ergebnisse der Punktwolkenberechnung aufgelistet. Für die Berechnung z.B. 177 Bilder hat jede Software unterschiedliche Anzahl an Verknüpfungspunkte und 3D-Punktwolke gebracht. Die Visuelle Qualität geht völlig auseinander trotz der tollen Werten. Zudem ist die große dichte der Punktwolke immer mit den großen Mengen an Daten verbunden, was die benötigte Weiterbearbeitung komplizierter oder sogar unmöglich macht. Zeitaufwand spielte auch eine enorme Rolle bei der Auswertung. Je mehr Bilder, desto mehr Datenvolumen und desto länger dauerte es.

Auf der Stelle soll es auch bemerkt sein, dass kein Programm den Raum komplett richtig zu 100% berechnet hat. Wenn aber die Vollständigkeit der Objekte, Richtigkeit der Geometrie und Zeitaufwand verglichen werden, dann steht das Berechnungsprogramm ContextCapture weiter vorne. Das Programm hat am wenigsten Verknüpfungspunkte gehabt, aber trotz dessen mit nur 1,4 Mio. dichter Punktwolke sehr gute Raumrekonstruktion geleistet hat, siehe Abb.57.

PhotoScan Professional ist dagegen der Sieger was das Berechnen der dichten Bildpunktwolke und Zeitaufwand angeht. Für die Auswertung der 177 Bilder mit 37 Mio. Punkte hat das Programm 12 Stunden gebraucht und für die 875 Bilder mit 498 Mio. Punkte – 6 Tage und 22 Stunden. Die 498 Mio. dichte Punktwolke war 4 GB schwer und könnte deswegen kaum gebraucht werden.

Das Berechnungsprogramm ReCap Pro Photo wurde auf Grund des studentischen Liezens nur auf 100 Bilder eingeschränkt und konnte deswegen nicht voll genutzt werden, da für so einen komplizierten Raum mit vielen Objekten mehr als 100 Bilder benötigt werden. Trotzdem hat es auch mit nur 100 Bilder gut funktioniert und es wurde ca. 4 Mio. dichte Punktwolke geschafft. Selbstverständlich hat die 3D-Abbildung in dem Fall Lücken und keine vollständige Geometrie der Objekte.

Pix4D, Sure und VisualsFM haben im Vergleich zu den ersten drei Programmen keine gute Raumrekonstruktion geleistet. Die Dichte der Punktwolke lag zw. 4 -11 Mio. Punkte, aber die 3D-Modellen leiden an fehlerhafte Geometrie und Rekonstruktionslöcher.



a)



b)



c)

Abb.60 Visueller Vergleich der 3D-Modelle gewonnen aus Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional (a), ContextCapture (b) und Autodesk ReCap Photo (c)

Zum quantitativen Vergleich der dichten Bildpunktswolken wurden die aus 177 Bildern berechnete Punktwolke von Photoscan und ContextCapture mittels CloudCompare verglichen. Die beiden Punktwolken wurden zuerst über manuell gesetzte Passpunkte mit Hilfe ICP-Algorithmus iterativ aneinander angepasst. Nachdem die Punktwolken angepasst wurden, berechnete das Cloudcompare die approximierte Distanzen zum Referenzpunktwolke. Es wurde die max. 7 cm Abweichung festgestellt, siehe die Abb.61. Es liegt daran, dass die Punktwolken wegen der Rekonstruktionslöcher eine größere Distanz in diesen Bereichen zeigten.

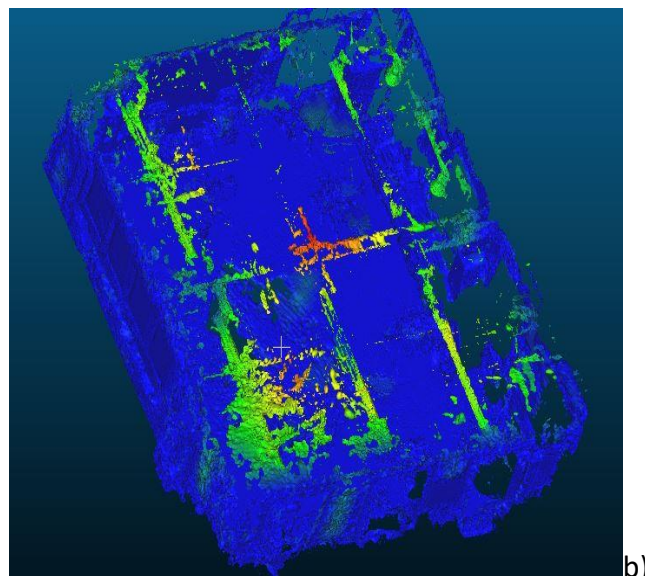
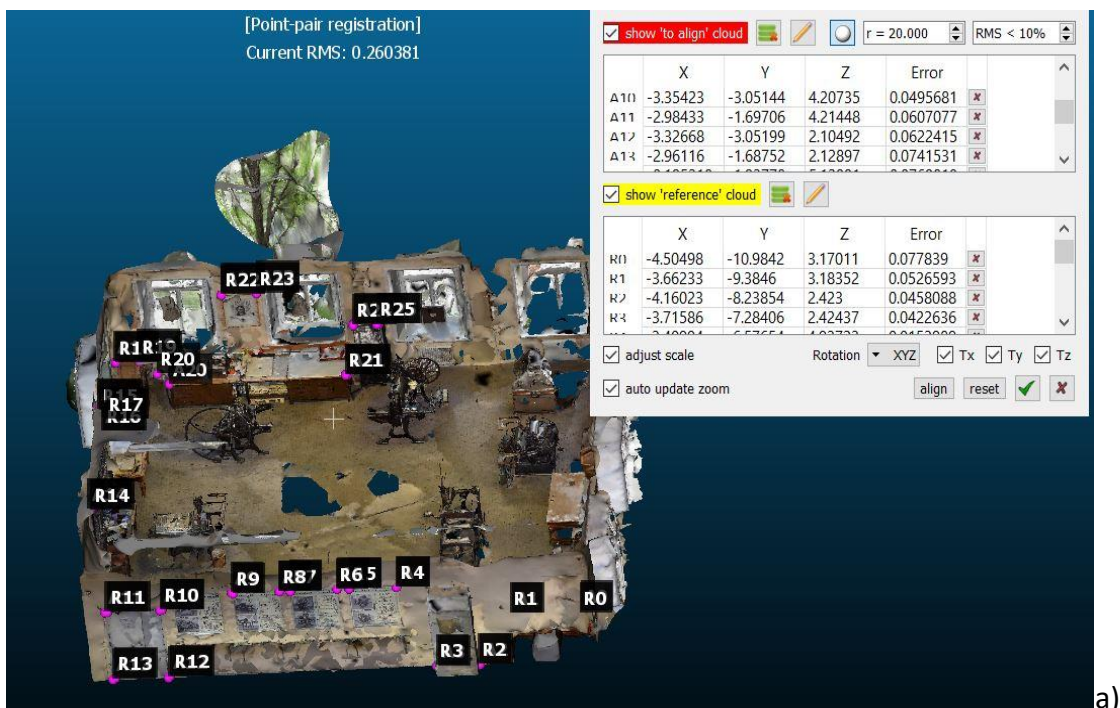


Abb.61 Vergleich der Bildpunktswolken a) und b) von PhotoScan und CloudCompare

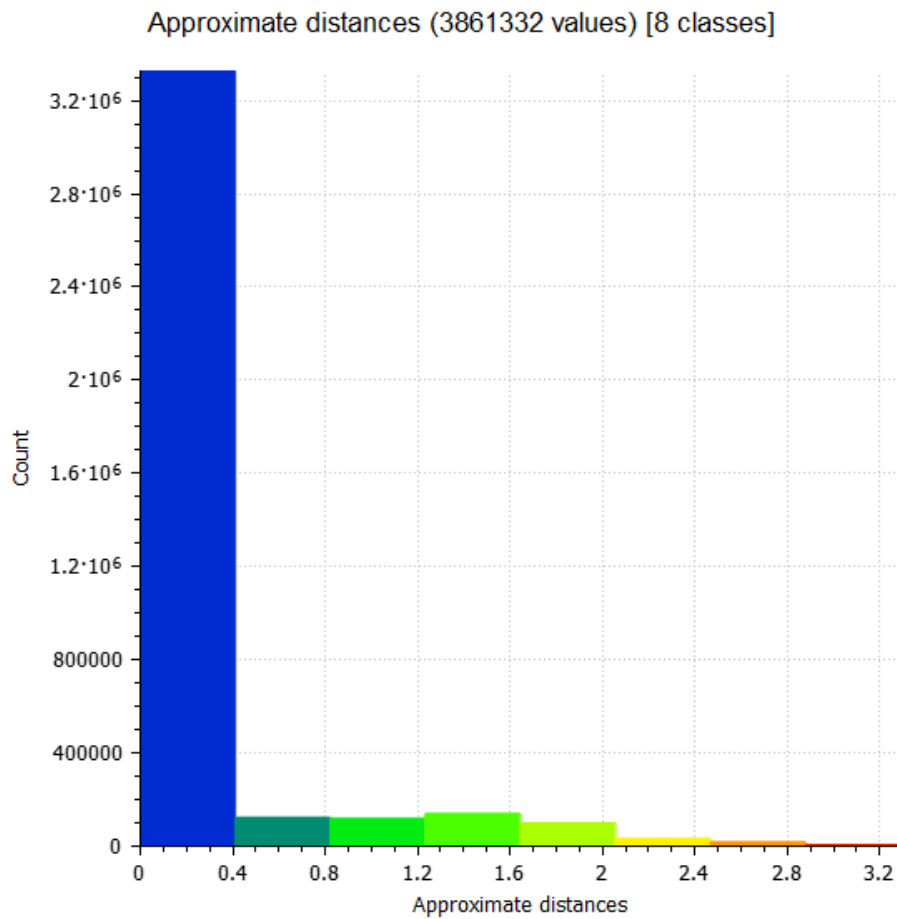


Abb.62 Histogram: Vergleich der der Bildpunktswolken von PhotoScan und CloudCompare

In der Abb. 62 ist es deutlich zu sehen, dass 90% der Punkte eine max 4 cm Abweichung aufweisen. Alle andere Punkte, die in grünen und roten Bereichen liegen, sind höchstwahrscheinlich die Punkte, die in der Referenzpunktswolke nicht vorhanden waren und konnten somit nicht vergleichbar sein.

5.2 Vergleich der 3D-Modelle von einzelnen Objekten des Raums

Der zu rekonstruierende Raum ist zu kompliziert, um ihn im Ganzen mit der Kamera zu erfassen und dann mit den verschiedenen Softwarepaketen zu bearbeiten. Deswegen wurden die Hauptobjekte noch mal einzeln mit der Kamera aufgenommen und mit drei Programmen (ContextCapture, ReCap Pro Photo und PhotoScan Professional) berechnet und anhand der Ergebnisse miteinander verglichen. In diesem Fall wurden nur 50 - 100 Bilder benutzt. Berechnung der 3D-Modellen erfolgte bei den gleichen Bedingungen (derselbe Anzahl der Bilder pro Objekt und gleiche Kamerakonstellation) für alle Programme. Zeitaufwand pro Programm lag im Durchschnitt 3-6 Stunden, je nach Objekt.

Als Resultat wurden sehr gute 3D-Modelle von fünf Objekten entworfen. In den Tabellen 3 bis 8 sind die Ergebnisse mit dem dazu gehörigen 3D-Modellenvergleich veranschaulicht.

Anzahl der benutzten im Berechnungsprozess Bilder ist gleich, die Dichte der Punktwolken dagegen schwankt sehr stark. Am wenigsten dichte Punktwolken hat das Programm ContextCapture produziert, am meisten dichte Bildpunktwolken lieferte, wie auch erwartet, PhotoScan Professional. Wenn wir aber die visuelle Qualität der 3D-Modellen miteinander vergleichen, dann steigt das Programm ReCap Pro Photo auf den ersten Platz und ContextCapture auf den Platz Nummer zwei. PhotoScan Professional liefert sehr dichte Punktwolken, aber etwas verschwommene oder unebene Textur und Kanten, wie bei Gesamtraumberechnung als auch bei der Einzelobjektberechnung.

Das Programm ContextCapture hat auch bei der Einzelobjektberechnung sehr gute 3D-Abbildungen der Objekte abgeliefert. Alle mit ContextCapture erfassten Objekte besitzen deutliche Textur, scharfe Kanten und einen realistischen Farbton. Jedoch hat das cloudbasierte Programm ReCap Pro Photo noch bessere Ergebnisse gezeigt. Die mit ReCap Pro Photo berechnete 3D-Modelle haben eine detailtreue Erfassung, ganz wenige Rekonstruktionslücken, farbechte Textur und sehr scharfe Kanten.

Grundsätzlich haben alle drei Programmen Probleme mit der Erfassung der flachen homogenen Oberflächen der zu rekonstruierenden Objekte.

Tabelle 3. Vergleich der 3D-Modelle des 1. Gerätes

Programm	Anzahl der Bilder	Dichte Punktwolke
ContextCapture	91	222.591
ReCap Pro Photo	91	2.861.265
PhotoScan Professional	91	3.258.803



Abb.63 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan Professional (rechts)

Tabelle 4. Vergleich der 3D-Modelle des 2. Gerätes

Programm	Anzahl der Bilder	Dichte Punktwolke
ContextCapture	84	485.446
ReCap Pro Photo	84	2.731.575
PhotoScan Professional	84	31.286.540



Abb. 64 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan Professional (rechts)

Tabelle 5. Vergleich der 3D-Modelle des 3. Gerätes

Programm	Anzahl der Bilder	Dichte Punktwolke
ContextCapture	57	278.567
ReCap Pro Photo	57	2.560.232
PhotoScan Professional	57	2.699.730



Abb. 65 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan Professional (rechts)

Tabelle 6. Vergleich der 3D-Modelle des 4. Gerätes

Programm	Anzahl der Bilder	Dichte Punktwolke
ContextCapture	61	380.567
ReCap Pro Photo	61	2.793.572
PhotoScan Professional	61	3.859.714



Abb. 66 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan Professional (rechts)

Tabelle 7. Vergleich der 3D-Modelle des 5. Gerätes

Programm	Anzahl der Bilder	Dichte Punktwolke
ContextCapture	60	480.700
ReCap Pro Photo	60	2.792.998
PhotoScan Professional	60	10.806.267

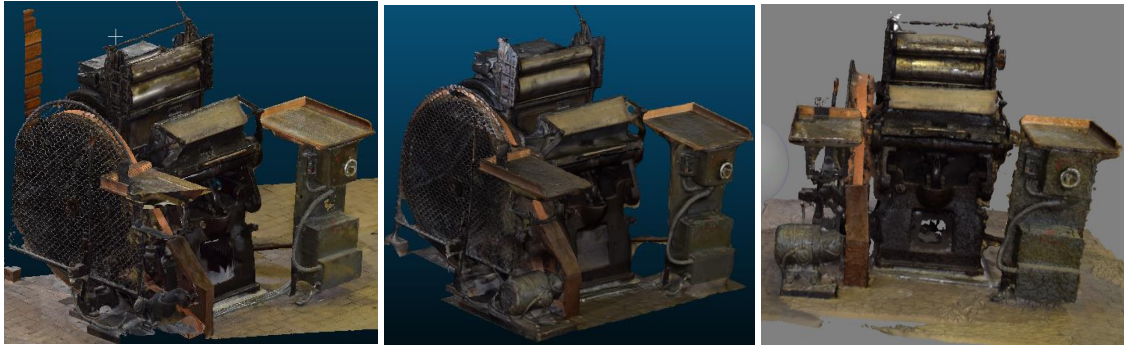


Abb. 67 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan Professional (rechts)

Tabelle 8. Vergleich der 3D-Modelle des 6. Gerätes

Programm	Anzahl der Bilder	Dichte Punktwolke
ContextCapture	81	356.934
ReCap Pro Photo	81	3.325.789
PhotoScan Professional	81	21.480.557



Abb. 68 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan Professional (rechts)

5.3 Virtuelle Realität

Sich in einer virtuellen Welt zu bewegen und den Raum virtuell zu betrachten ist gefühlsmäßig was ganz Anderes als in der realen Welt. Die betrachteten Objekte, in dem Fall Druckgeräte, sehen ein bisschen künstlich im Vergleich zur Wirklichkeit aus. Man konnte alle kleine Macken der Oberfläche ganz deutlich sehen. Es fällt auf, dass die Objekte sehr statisch da herumstehen.

Für die 3D-Verwicklichung des Raums in der virtuellen Welt wurden die mit dem Autodesk ReCap Pro Photo berechnete 3D-Abbildungen benutzt, da diese Software möglichst lückenfreie Darstellung der Oberfläche gewährleistet hat. Das Berechnen und auch Datenreduzierung verlief schnell ohne zusätzlichen Eingriffen bei dem Ablauf.

Für die Umsetzung der 3D-Modelle in Unity sollte das Modell extra zu einem fbx Format umgewandelt werden, da mit obj-Format Schwierigkeiten gab. Das Programmieren von Bewegungsfunktionen konnte U-Tub Tutorials entnommen werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit verschafft einen Überblick über das Verfahren des Computer Vision wie Structure-from-Motion (SfM). Im Gegensatz zu 3D-Laserscanning, bietet die Entwicklung von Computervision - Methoden eine kostengünstige und voll automatisierte dreidimensionale Datenerfassung und Datenverarbeitung ohne speziellen Vorkenntnissen. Das Potenzial der SfM-Photogrammetrie liegt in der Kombination photogrammetrischer Verfahren mit Verfahren der digitalen Bildverarbeitung und Bildanalyse.

SfM-Photogrammetrie liefert hochaufgelöste und genaue räumliche Daten erfasst mit einfachen Digitalkameras im Offline Verfahren. Es wird eine unbegrenzte Anzahl von Bilder aufgenommen und zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet. Die Aufnahme könnte mit unkalibrierter Kamera erfolgen, da die Kamerakalibrierung und Objektauswertung simultan und mit höher Redundanz während der photogrammetrischen Objektrekonstruktion durch Bündelausgleichung berechnet werden. Dadurch wird die höchste Messgenauigkeit erreicht. Auf die Kameraeigenschaften sowie wichtige Hinweise zur Erfassung von Objekten mit der Kamera inklusive günstige Aufnahmekonfigurationen für die bessere Erfassung der Objekte und die Auswahl des Aufnahmeobjekts sowie deren Vorbereitung und Aufnahme werden in Kapitel 2 eingegangen.

Der gesamte photogrammetrische Auswerteprozess inklusive das Wissen über die üblichen Koordinatensysteme wie Pixel-, Bild-, Objekt- und Modelkoordinatensystem, Kenntnisse der Inneren und Äußeren Orientierungen, Kamerakalibrierung, Bildorientierung und Oberflächenrekonstruktion und Erklärung der Aufnahmetechnik sowie wichtigsten Komponenten der photogrammetrischen Gesamtsystems werden in Kapitel 3 deutlich erklärt.

Der zu rekonstruierende Raum wurde mit sechs verschiedenen Auswerteprogrammen (Pix4D, VisualSfM, Autodesk ReCap, ContextCapture, Sure und Agisoft PhotoScan) berechnet und visualisiert. Die Aufnahme der druckhistorischen Werkstätte wurde in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Phase wurde der Raum mit allen Möbelstücken

und Geräten zusammen aufgenommen und danach mit verschiedenen Programmen berechnet. Der Raum wurde in diese Weise mit wenig Erfolg erfasst, da die 3D-Modellen viele Rekonstruktionlöcher sowie fehlerhafte Geometrie beinhalten. In der zweiten Phase wurde der Versuchsraum aufgeteilt und jedes Gerät einzeln von allen Seiten mit der Kamera aufgenommen und anschließend, mit drei Programmen, die gute 3D-Darstellung in der ersten Phase ablieferten (Agisoft PhotoScan, ContextCapture und Autodesk ReCap Photo), berechnet. Sehr gute 3D-Abbildungen der Objekte und damit die besten Ergebnisse bei Einzelobjektberechnung zeigten die Programme ContextCapture und Autodesk ReCap Photo. Die berechneten 3D-Modelle haben über detailtreue Erfassung, ganz wenige Rekonstruktionlücken, farbechte Textur und sehr scharfe Kanten verfügt. Anschließend wurde die 3D-Modell des Raums in die 3D-Modellierungsprogramm Unity eingeladen und durch die VR-Verbindung anschaulich mit VR-Brille gemacht. Die Ergebnisse und Vergleiche der 3D-Modellenberechnung werden in Kapitel 4 zusammengefasst und in Kapitel 5 bewertet und ausdiskutiert. Dabei werden die zur Verfügung gestellte Softwareprogramme durch die Berechnung der Punktwolken und 3D-Modellen der Objekte visuell und quantitative geprüft.

In Kapitel 6 werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsgebieten und Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

Auf dem neuesten Stand der Forschung werden die Methoden der Computer Vision und des maschinellen Lernens bei der Modellierung von Verkehrsinfrastrukturen, insbesondere für die autonome Fahrsysteme eingesetzt. Es sollte eine Methode entwickelt werden, die eine automatisierte Detektion und Verfolgung mehrerer Zielobjekte in Videoaufnahmen von Verkehrsszenen ermöglicht (<https://www.lmf.bgu.tum.de/research/traffic-modelling/>).

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Nikolaieva Anna, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Realisierung eines virtuellen 3D-Spaziergangs durch eine historische Werkstatt mittels Computer Vision“ selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

München, den _____ Unterschrift

LITERATURVERZEICHNIS

Agisoft LL C (Hrsg.) (2016): Agisoft Photoscan User Manual: Professional Edition, Version 1.2.

Ausgleichung. Wikipedia. In

<https://de.wikipedia.org/wiki/Kollinearit%C3%A4tsgleichung>. Letzter Zugriff am 18.07.2018

Äußere Orientierung. Lexikon der Geowissenschaften.

In: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/aeussere-orientierung/1241>
Letzter Zugriff am 15.07.2018

Autodesk. Wikipedia. In: <https://de.wikipedia.org/wiki/Autodesk> Letzter Zugriff am 25.07.18

Autodesk Blog. Introducing ReCap Photo (2017). In:

<http://blogs.autodesk.com/recap/introducing-recap-photo/> Letzter Zugriff am 23.05.2018

Bildkoordinatensystem. Geoinformatik. Lexikon. In: <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=-1556489543> Letzter Zugriff am 15.07.2018

ContextCapture. User Guide. (2016).

ContextCapture. Guide for photo acquisition. (2015).

Empowering Photogrammetry with SURE Software. In: <https://www.nframes.com>
Letzter Zugriff am 23.05.2018

Fonstad MA, Dietrich JT, Courville BC, Carbonneau PE. (2013): Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurements. Earth Surface Processes and Landforms.

Greb.J. (2015): Erstellung eines digitalen 3D-Modells des Felssturzes unterhalb der Teufelsbrücke in der UNESCO-Weltkulturerbestätte Bergpark Wilhelmshöhe. Bachelor-Thesis.

Innere Orientierung. Lexikon der Geowissenschaften. In:

<https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/innere-orientierung/7537>

Letzter Zugriff am 15.07.2018

Institut für Photogrammetrie. Dissertationen. In:

Fehler! Linkreferenz ungültig. Letzter Zugriff am 23.05.2018

Kraus. K (1994): Photogrammetrie. 6. Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag, Bd. 1.

Kraus. K. (2004): Photogrammetrie. Band 1. Walter de Gruyter GmbH&Co Verlag. Berlin
Kleinste-Quadrate-Bildzuordnung. Das Lexikon der Erde. In:

<http://www.geodz.com/deu/d/Kleinste-Quadrate-Bildzuordnung> Letzter Zugriff am
15.07.2018

Kollinearitätsgleichung. Wikipedia. In:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Kollinearit%C3%A4tsgleichung> Letzter Zugriff am
15.07.2018

Leica Geosystems AG. (2008): Leica FlexLine TS02/TS06/TS09 User Manual.

Switzerland: Leica Geosystems.

LDBV. Druckhistorische Werkstätte. In:

<https://www.ldbv.bayern.de/aktuell/galerie/werkstaette.html> Letzter Zugriff am
23.05.2018

Linder W. (2012): Digitale Photogrammetrie am PC. Aktuelle Entwicklungen und
Anwendungen in den Geowissenschaften. Habilitationsschrift.

Luhmann, T. (2010): Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen Methoden und
Anwendungen. 3., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Wichmann-
Verlag, ISBN 978-3-87907- 479-2.

Luhmann.T.(2010): Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der
Nahbereichsphotogrammetrie. Dissertation. Heft Nr.645. München: C.H.Beck Verlag.
ISBN 978-3-7696-5057-0.

Micheletti N., Chandler J.H., Lane S.N (2015): Structure from Motion (SfM)

Photogrammetry. British Society for Geomorphology Geomorphological Techniques,

Modellierung von Verkehrsinfrastrukturen.

<https://www.lmf.bgu.tum.de/research/traffic-modelling/>

Nikon D333. Technische Daten. In: https://www.nikon.de/de_DE/product/digital-cameras/slr/consumer/d3300#tech_specs Letzter Zugriff am 23.05.2018

Pix4D. In: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pix4D> Letzter Zugriff am 23.05.15

Photogrammetrie mit Photoscan. Vom Foto zum 3D Model. In:

<http://vrjump.de/photogrammetrie-photoscan> Letzter Zugriff am 23.05.18

Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. In: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/sure/index.en.html> Letzter Zugriff am 23.05.2018

Pomaska G. (2016): Bildbasierte 3D-Modellierung. Wichmann

Photogrammetrie (2006): Vorlesung: Photogrammetrie-II. 4. Semester.

Aufnahmetechnik. Nahbereich.

Przybilla. H.-J. (2005): Photogrammetrie. Vertiefung.5-Semester

Reinfeld.P. (2018): Image-Based Architecture: Fotografie und Entwerfen. Wilhelm Fink Verlag.

Richwien.B. (2007): Structure from Motion. Am Beispiel: Bentley ContextCapture. Wissenschaftliche Arbeit.

Rothermel, M., Wenzel, K., Fritsch, D., Haala, N. (2012). Sicher: Photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion von Bildern. Tagungsband LC3D Workshop, Berlin.

SFM. In: [https://apps.gi.hs-](https://apps.gi.hs-mainz.de/abschlussarbeiten/dokumente/B0109/website/SFM.htm)

[mainz.de/abschlussarbeiten/dokumente/B0109/website/SFM.htm](https://apps.gi.hs-mainz.de/abschlussarbeiten/dokumente/B0109/website/SFM.htm) Letzter Zugriff am 23.05.2018

Snavely N, Seitz SN, Szeliski R. (2008): Modeling the world from internet photo collections. International Journal of Computer Vision.

Spetsakis ME, Aloimonos Y. (1991): A multiframe approach to visual motion perception. International Journal of Computer Vision.

Steinbach. E. (2009): Bildbasierte 3D Welten. EIKON e.V. Jahresversammlung.

Support.Pix4D. In: <https://support.pix4d.com> Letzter Zugriff am 23.05.18

Virtuelle Realität. Gabler Wirtschaftslexikon.

In: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/virtuelle-realitaet-54243> Letzter Zugriff am 17.07.2018

Virtuelle Realität IT.Wissen.Info 2. In: <https://www.itwissen.info/Virtuelle-Realitaet-virtual-reality-VR.html> Letzter Zugriff am 17.07.2018

Westoby M, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds MJ. (2012): Structure from Motion. Photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, Volume 179.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb.1 Benutzte für die Aufnahme digitale Spiegelreflexkamera Nikon D3300 (Nikon: www.nikon.de)	4
Abb.2 Das korrekte Aufnahmemuster von Innenraum (ContextCapture.2015: S.5).....	6
Abb. 3 Aufnahmekonfigurationen (Agisoft PhotoScan.2016: S.5-6).....	7
Abb. 4 Aufnahmekonfiguration mit geringerer Bildanzahl (Luhmann (2010): S.25).....	12
Abb.5 Aufnahmekonfiguration mit höherer Bildanzahl (Luhmann (2010): S.26).....	13
Abb.6 Onlinekonfiguration mit zwei synchronen Kameras (Luhmann (2010): S.27).....	14
Abb.7 Komponente eines photogrammetrischen Gesamtsystems (Luhmann (2010): S.30).....	15
Abb. 8 Pixelkoordinatensystem (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.24)	17
Abb.9 Ebenes und räumliches Bildkoordinatensystem (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.25).....	17
Abb.10 Objektkoordinatensystem (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.26)	18
Abb.11 Photogrammetrische Koordinatensysteme und Transformationen (Luhmann (2010): S.49).....	19
Abb. 12 Innere Orientierung (Luhmann 2010, 3.Auflage, S.144).....	20
Abb.13 Äußere Orientierung (Lexikon der Geowissenschaften (2018): www.spektrum.de).....	21
Abb.14 Relative Orientierung (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.276).....	22
Abb. 15 Absolute Orientierung (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.289).....	23
Abb.16 Epipolargeometrie (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.274).....	24
Abb. 17 Bündelblockausgleichung (Kraus (1994): S.269).....	27
Abb.18 Radial-symmetrischen Verzeichnung in Abhängigkeit vom Bildradius (Luhmann (2010): 3.Auflage, S.148).....	29
Abb.19 Verzeichnung in Abhängigkeit der Blendelage (Luhmann (2010): S.40)	30

Abb. 20. 3D-Modell berechnet mit ContextCapture aus 177 Bildern	38
Abb.21 3D-Modell berechnet mit ContextCapture aus 177 Bildern mit PP.....	39
Abb.22 3D-Modell berechnet mit ContextCapture aus 373 Bildern mit PP	39
Abb. 24 3D-Modell berechnet mit ContextCapture aus 373 Fotos mit PP	40
Abb. 25 3D-Modell berechnet mit Agisoft PhotoScan Professional aus 177 Fotos	40
Abb. 26 Dünne Punktwolke berechnet mit Agisoft PhotoScan Professional aus 834 Fotos	41
Abb. 27 a) &b) Dichte 3D-Punktwolke berechnet mit Agisoft PhotoScan Professional aus 834 Bildern	42
Abb. 28 3D-Modell eines gesamten Raums berechnet aus 100 Bildern mit Recap Pro Photo.....	43
Abb. 29 3D-Modell berechnet mit Pix4D aus 177 Bilder mit PP.....	44
Abb. 30 3D-Modell berechnet mit Pix4D aus 177 Bilder ohne PP.....	45
Abb. 31 3D-Punktwolke berechnet mit Sure aus 177 Bilder.....	45
Abb. 32 3D-Modelle (oben und unten) berechnet mit Sure aus 177 Fotos.....	46
Abb.33 3D-Punktwolke berechnet mit Sure aus ca.885 Fotos	47
Abb.34 Verknüpfungspunkte (links) und 3D-Modell (rechts) berechnet mit VisualSfM aus 177 Bilder.....	47
Abb.35 Kamerakonstellationen von 91 Bilder.....	48
Abb.36 3-D Punktwolke (a) und 3D-Modell(b) gewonnen aus 91 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional	49
Abb.37 Kamerakonstellation mit 84 Bilder	49
Abb.38 3-D Punktwolke (a) und 3D-Modell(b) gewonnen aus 84 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional	50
Abb.39 3D-Punktwolke (links) gewonnen aus 57 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional und die Kamerakonstellation (rechts).....	50

Abb.40 3D-Modelle gewonnen aus 57 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional	51
Abb.41 Kamerakonstellation (links) und 3D-Punktwolke (rechts) gewonnen aus 61 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional.....	51
Abb.42 3-D Punktwolke (a) und 3D-Modell(b) gewonnen aus 61 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional	52
Abb.43 3-D Punktwolke gewonnen aus 60 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional...	52
Abb.44 3D-Modelle gewonnen aus 60 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional.....	53
Abb.45 Kamerakonstellation (links) und 3D-Punktwolke (rechts) gewonnen aus 81 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional	53
Abb.46 3D-Modelle gewonnen aus 81 Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional	54
Abb.47 3D-Modelle gewonnen aus 91 Fotos mit Autodesk ReCap Photo.....	54
Abb.48 3D-Modelle gewonnen aus 84 Fotos mit Autodesk ReCap Photo.....	55
Abb.49 3D-Modelle gewonnen aus 81 Fotos mit Autodesk ReCap Photo.....	55
Abb.50 3D-Modelle gewonnen aus 57 Fotos mit Autodesk ReCap Photo.....	55
Abb.51 3D-Modelle gewonnen aus 121 Fotos mit Autodesk ReCap Photo.....	56
Abb. 52 Ein Teil des Raums berechnet mit Autodesk ReCap Photo.....	56
Abb. 53 Ein Teil des Raums berechnet mit Autodesk ReCap Photo.....	56
Abb. 54 Ein Teil des Raums berechnet mit Autodesk ReCap Photo.....	57
Abb.55 3D-Modelle gewonnen aus 91 Fotos mit ContextCapture.....	57
Abb.56 3D-Modelle gewonnen aus 84 Fotos mit ContextCapture.....	58
Abb.57 3D-Modelle gewonnen aus 81 Fotos mit ContextCapture.....	58
Abb.58 3D-Modelle gewonnen aus 81 Fotos mit ContextCapture.....	58
Abb.59 Registrierung von 3D-Punktwolken mit CloudCompare	59
Abb.60 Visueller Vergleich der 3D-Modelle gewonnen aus Fotos mit Agisoft PhotoScan Professional (a), ContextCapture (b) und Autodesk ReCap Photo (c).....	63
Abb. 61 Vergleich der Bildpunktwolken(a) und b) von PhotoScan und CloudCompare...	64
Abb.62 Histogramm: Vergleich der der Bildpunktwolken von PhotoScan und Cloud Compare.....	65
Abb.63 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan ...Professional(rechts).....	67
Abb. 64 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und	

PhotoScan Professional (rechts).....	67
Abb. 65 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan Professional (rechts).....	68
Abb. 66 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan Professional (rechts).....	68
Abb. 67 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan Professional (rechts)	69
Abb. 68 3D-Modelle erfasst mit ContextCapture (links), ReCap Pro Photo (mitte) und PhotoScan Professional (rechts).....	69

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Technische Daten der Kamera Nikon D3300 (Nikon: www.nikon.de).....	5
Tabelle 2: Vergleich der Verknüpfungspunkte und dichten Punktwolke des Gesamtraums	61
Tabelle 3. Vergleich der 3D-Modelle des 1. Gerätes	67
Tabelle 4. Vergleich der 3D-Modelle des 2. Gerätes	67
Tabelle 5. Vergleich der 3D-Modelle des 3. Gerätes.....	68
Tabelle 6. Vergleich der 3D-Modelle des 4. Gerätes	68
Tabelle 7. Vergleich der 3D-Modelle des 5. Gerätes.....	69
Tabelle 8. Vergleich der 3D-Modelle des 6. Gerätes.....	69