



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN**

Vienna University of Technology

# **DIPLOMARBEIT**

Master's Thesis

## **Anwendung und Methodik digitaler Photogrammetrie im Arbeitsprozess des Architekten und Bauingenieurs**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
unter der Leitung von

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch**

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

**Dipl.-Ing. Viktor Dunjic**

am

**E206 Institut für Hochbau und Technologie**

**eingereicht an der Technischen Universität Wien**

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

**Nikolai Jerabek**

9526200

Wien, am .....

.....  
Nikolai Jerabek



# Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch und Herrn Dipl. Ing. Viktor Dunjic unter deren Leitung und Betreuung ich diese Arbeit schreiben durfte.

Ich bedanke mich bei Pater Karl Wallner OCist für die Unterstützung und den Zugang zum Stift Heiligenkreuz zum Zweck dieser Arbeit.

Außerdem danke ich den Entwicklern, dem technischen Support und Vertrieb der Anbieter der eingesetzten Software-Lösungen, im Besonderen den Unternehmen PointCab GmbH und Agisoft LLC.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern für die Unterstützung und Motivation zu dieser Arbeit bedanken.



# Kurzfassung

Die Photogrammetrie umfasst Verfahren zur Ableitung geometrischer Größen aus photographischen Aufnahmen. Anhand solcher Aufnahmen eines Objektes können zweidimensionale Bildkoordinaten in räumliche Objektkoordinaten überführt werden, womit Längen und Winkelmaße zwischen beliebigen Punkten abgegriffen, Flächen und Volumina erfasst werden können. Die Photogrammetrie wurde durch Anwendung digitaler Verfahren zur photographischen Aufnahme und Auswertung am Computer zu einem zugänglichen Werkzeug, das sich in den vorherrschenden digitalen Arbeitsprozess in Bauaufnahme, Dokumentation und Planung leicht und kostengünstig integrieren lässt. Die digitale Kamera ist ein weitläufig bekanntes und vertrautes Instrument, das bereits fester Bestandteil in Bauaufnahme, Planung und Dokumentation ist. Dank leistungsfähiger Software lassen sich solche handelsüblichen Kamerasysteme anstelle kostspieliger Messkameras in den meisten Anwendungen der Photogrammetrie einsetzen. Der Fortschritt und die branchenübergreifende Anwendung der Computervision bieten unter dem Begriff „Reality Capture“ eine Vielzahl an Lösungen zur Aufnahme, Verarbeitung und Präsentation dreidimensionaler Daten. Dank dieser Entwicklungen erfolgt ein großer Teil der photogrammetrischen Auswertung mittels leistungsfähiger, benutzerfreundlicher Software weitgehend automatisiert und liefert Daten, die der Architekt und Ingenieur in Form etablierter standardisierter Datenformate in vertraute, digitale Arbeitsumgebungen wie CAD- oder BIM- Anwendungen zur weiteren Verarbeitung übernehmen kann.

Unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte sowie relativ geringer Anschaffungskosten der notwendigen Hard- und Software gegenüber dem Einsatz von alternativen Technologien wie dem Laserscanning, erläutert diese Arbeit die Erfordernisse und Methoden der Architekturphotogrammetrie anhand aktueller Software und handelsüblicher digitaler Kamerasysteme. Abgehandelt wird das Grundwissen zur Fertigung verwertbarer photographischer Aufnahmen im Rahmen einer günstigen Aufnahmeordnung eines Bildverbandes, Messverfahren zur Definition von Größen und Orientierung und die notwendigen Arbeitsschritte zur Auswertung.

Es wird erläutert, unter welchem Aufwand die Photogrammetrie in der Architektur und im Bauingenieurwesen als sinnvolles Instrument in Planung und Dokumentation angewandt und eingesetzt werden kann.



# Abstract

Photogrammetry is the study of methods that derive geometric dimensions from photographic images. Based on images of objects, coordinates of two-dimensional images are transferred into spatial object coordinates. Linear measurements and angles between such spatial points can be derived, and areas as well as volumes can be determined. With the development of digital technologies, such as high-performance computer systems and digital cameras, photogrammetry evolved into an accessible and inexpensive tool. Therefore, it can easily be integrated into prevailing digital workflow of construction, surveys, documentation and the process of creating plans. The digital camera is a widely known and trusted instrument that has already an integral part in these applications.

With the assistance of powerful software systems, commercial camera systems can be utilized in most areas of photogrammetry, rather than using expensive metric cameras. Along the advancement and multiple applications across industries, computer vision offers a variety of solutions for surveys, procedures and presentations of three-dimensional data, known as “reality capture”. As a result of this evolution, a large part of photogrammetric analysis is performed with powerful, user-friendly and highly automated software programs. The software provides data to the architect and project manager in form of established and standardized data formats, that enables further processing of familiar digital working environments, such as CAD or BIM applications.

This thesis explains the methods and requirements of architectural photogrammetry, using current software programs and commercially available digital cameras. Additionally, it takes into account the lower costs of the required software and hardware systems compared to alternative technologies, such as laser scanning. This thesis provides the basic knowledge of the production of proper image mosaics, methods of mensurating the scale and orientation of digital models, and the sequence of operations of photogrammetric analysis. This study elucidates the efforts necessary to apply digital photogrammetry to areas of operation to the architect and civil engineer.



# Erklärung zur geschlechterneutralen Formulierung

Aufgrund der einfacheren Lesbarkeit wird gegebenenfalls auf eine geschlechterneutrale Differenzierung verzichtet. Unabhängig von der inhaltlichen Gestaltung sei vorausgesetzt, dass beide Geschlechter selbstverständlich als gleichwertig erachtet werden.



# INHALSVERZEICHNIS

Erklärung zur geschlechterneutralen Formulierung.....	IX
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Digitale Nahbereichsphotogrammetrie, Determination.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Inhaltliche Eingrenzung.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Aufbau der Arbeit .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Grundlagen und Anwendung der Photogrammetrie.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Geschichte der Photogrammetrie .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Produkte der digitalen Architekturphotogrammetrie .....</b>	<b>9</b>
2.2.1 Die photographische Aufnahme.....	10
2.2.2 Das dreidimensionale Modell als Punktwolke.....	10
2.2.3 Das dreidimensionale Modell als Mesh.....	11
2.2.4 Die entzerrte photographische Aufnahme .....	12
2.2.5 Das Orthophoto .....	14
2.2.6 Die Flächenabwicklung .....	15
2.2.7 Digitales Oberflächen oder Höhenmodell.....	15
<b>2.3 Methoden und Werkzeuge der Vermessung .....</b>	<b>16</b>
2.3.1 Der Fluchtstab.....	17
2.3.2 Der Gliedermaßstab, Messlatte und Nivellierlatte.....	18
2.3.3 Das Messband.....	18
2.3.4 Laser-Distanzmessgeräte.....	19
2.3.5 Nivelliergerät und Rotationslaser .....	20
2.3.6 Theodolit, Tachymeter und Totalstation.....	21
2.3.7 Zusammenfassung der Methoden zur Vermessung .....	23
<b>2.4 Qualitätssicherung durch formale und normative Erfordernisse .....</b>	<b>24</b>
2.4.1 Önorm A 6250-1.....	25
2.4.2 Standards der Baudenkmalpflege .....	27
2.4.3 DIN 18710, Ingenieurvermessung .....	29
<b>2.5 Genauigkeit der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie .....</b>	<b>31</b>
2.5.1 Die Genauigkeit ebener Geometrie .....	34
2.5.2 Die räumliche Genauigkeit.....	37
2.5.3 Angaben über die Genauigkeit der photogrammetrischen Auswertung.....	40
2.5.4 Studie über die Genauigkeit am Objekt.....	41

<b>2.6 Untersuchung der Genauigkeit anhand einer Versuchsanordnung</b> .....	<b>41</b>
2.6.1 Auswertung der Bildverbände der beschriebenen Aufnahmesysteme .....	44
2.6.2 Der Einfluss des kalibrierten Kameraprofiles auf das photogrammetrische Modell anhand einer Gegenüberstellung .....	46
2.6.3 Auswertung unter Anwendung verschiedener Software-Lösungen .....	48
<b>2.7 Grundlagen zur Anwendung, Verarbeitung und Präsentation photogrammetrischer Produkte</b> .....	<b>51</b>
2.7.1 Das dreidimensionale Modell.....	51
2.7.2 Visualisierung und Präsentation von 3D-Modellen .....	52
<b>2.8 Anwendung der Photogrammetrie in Architektur und Bauwesen</b> .....	<b>57</b>
2.8.1 Planungsgrundlage, Bauen im Bestand.....	59
2.8.2 Dokumentation, Überwachung des Baufortschrittes.....	60
2.8.3 Bauhistorische Untersuchung.....	61
2.8.4 Bauschäden und baumechanische Untersuchungen.....	64
2.8.5 Das Geländemodell.....	65
<b>3. Das Photogrammetrische Verfahren</b> .....	<b>69</b>
<b>3.1 Einbildauswertung</b> .....	<b>73</b>
<b>3.2 Stereobildauswertung</b> .....	<b>74</b>
<b>3.3 Mehrbildauswertung</b> .....	<b>75</b>
<b>3.4 Digitale Photogrammetrie und Laserscanning</b> .....	<b>81</b>
<b>4. Die Photographie - Kamera, Aufnahme und Aufnahmeordnung</b> .....	<b>87</b>
<b>4.1 Grundlagen der Photographie</b> .....	<b>88</b>
<b>4.2 Objektiv und Abbildungsfehler</b> .....	<b>91</b>
<b>4.3 Korrektur von Abbildungsfehlern</b> .....	<b>94</b>
4.3.1 Chromatische Aberration .....	94
4.3.2 Sphärische Aberration.....	95
4.3.3 Koma.....	95
4.3.4 Astigmatismus.....	96
4.3.5 Bildfeldwölbung .....	96
4.3.6 Verzeichnung.....	97
4.3.7 Digitale Korrektur chromatischer und geometrischer Abbildungsfehler.....	98
<b>4.4 Die Blende</b> .....	<b>99</b>
<b>4.5 Fokus, Schärfentiefe und hyperfokales Fokussieren</b> .....	<b>101</b>
4.5.1 Fokus .....	102
4.5.2 Schärfentiefe .....	103
4.5.3 Hyperfokale Distanz .....	103

<b>4.6 Lichtempfindlichkeit, ISO .....</b>	<b>104</b>
<b>4.7 Belichtungszeit .....</b>	<b>106</b>
<b>4.8 Belichtungsmessung .....</b>	<b>107</b>
4.8.1 Spotmessung.....	108
4.8.2 Integralmessung.....	109
4.8.3 Matrixmessung oder Mehrfeldmessung.....	109
<b>4.9 Die Aufnahme.....</b>	<b>109</b>
<b>4.10 Kamerasysteme.....</b>	<b>111</b>
4.10.1 Kompaktkamera .....	111
4.10.2 Bridgekamera .....	111
4.10.3 Systemkamera .....	111
4.10.4 Spiegelreflexkamera .....	112
<b>4.11 Der Bildsensor .....</b>	<b>113</b>
4.11.1 CCD und CMOS, Bauarten von Flächensensoren .....	114
4.11.2 Farbwiedergabe, Farbmosaikfilter.....	115
4.11.3 Tiefpassfilter .....	116
<b>4.12 Kontrastumfang und Dateiformate.....</b>	<b>117</b>
<b>4.13 HDR – High Dynamic Range.....</b>	<b>119</b>
<b>4.14 Hilfsmittel zur Aufnahme.....</b>	<b>120</b>
<b>4.15 Aufnahmeordnung des Bildverbandes .....</b>	<b>121</b>
<b>5. Praktische Anwendung der Mehrbildphotogrammetrie am Objekt.....</b>	<b>125</b>
<b>5.1 Das Stift Heiligenkreuz .....</b>	<b>125</b>
<b>5.2 Aufnahmeobjekt, Ostdurchgang und Fraterie .....</b>	<b>127</b>
<b>5.3 Aufnahmebedingungen .....</b>	<b>130</b>
<b>5.4 Maßgaben der Aufnahme und Auswertung .....</b>	<b>132</b>
<b>5.5 Ausrüstung zur Aufnahme und Auswertung .....</b>	<b>133</b>
5.5.1 Kamerasystem und Hilfsmittel zur Aufnahme.....	133
5.5.2 Laser-Distanzmessgerät .....	134
5.5.3 Computersystem zur photogrammetrischen Auswertung.....	134
<b>5.6 Aufnahme und Aufnahmeordnung .....</b>	<b>135</b>
5.6.1 Aufnahmeordnung 1 .....	138
5.6.2 Aufnahmeordnung 2 .....	139
5.6.3 Aufnahmeordnung 3 .....	140
5.6.4 Gegenüberstellung der Aufnahmeordnungen.....	141
<b>5.7 Software zur photogrammetrischen Auswertung .....</b>	<b>142</b>
5.7.1 Agisoft Photoscan Pro.....	142

5.7.2 Autodesk Recap 360 .....	142
5.7.3 VisualSFM .....	144
5.7.4 Gegenüberstellung der Software zur photogrammetrischen Auswertung .....	144
<b>5.8 Prozess der photogrammetrischen Auswertung .....</b>	<b>145</b>
5.8.1 Die photogrammetrische Auswertung mit Photoscan Pro .....	146
5.8.2 Die photogrammetrische Auswertung mit Recap 360 .....	151
5.8.3 Die photogrammetrische Auswertung mit VisualSFM .....	153
<b>5.9 Analyse der photogrammetrischen Produkte.....</b>	<b>155</b>
5.9.1 Darstellung der Aufnahmeordnung 1 als Produkt von Photoscan Pro .....	158
5.9.2 Darstellung der Aufnahmeordnung 1 als Produkt von Recap 360 .....	161
5.9.3 Darstellung der Aufnahmeordnung 1 als Produkt von VisualSFM .....	162
5.9.4 Darstellung der Aufnahmeordnung 2 als Produkt von Photoscan Pro .....	163
5.9.5 Darstellung der Aufnahmeordnung 2 als Produkt von Recap 360 .....	164
5.9.6 Darstellung der Aufnahmeordnung 2 als Produkt von VisualSFM .....	165
5.9.7 Darstellung der Aufnahmeordnung 3 als Produkt von VisualSFM .....	166
<b>5.10 Zusammenfassung der Auswertung.....</b>	<b>167</b>
<b>5.11 Produkte der Auswertung.....</b>	<b>168</b>
<b>6. Zusammenfassung.....</b>	<b>173</b>
<b>7. Aussicht.....</b>	<b>175</b>
<b>8. Empfehlung zur Anwendung der Photogrammetrie im Hochschulwesen .....</b>	<b>177</b>
<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>179</b>
<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>179</b>
<b>Empfohlene Literatur .....</b>	<b>182</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>185</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>189</b>
<b>Anhänge.....</b>	<b>190</b>

## **1. Einleitung**

Die Photogrammetrie ist ein bildgebundenes Verfahren zur Ermittlung geometrischer Größen aus photographischen Aufnahmen. Zur Anwendung der in dieser Arbeit beschriebenen digitalen Mehrbildphotogrammetrie bedarf es der fachgerechten photographischen Aufnahme eines Objektes sowie der Auswertung mittels entsprechender Software.

Die Verarbeitung, Archivierung und Anwendung visuell erfasster Daten ist mittels leistungsfähiger Verfahren der Computervision in vielen Bereichen und Branchen längst etabliert. Das Scannen und Verarbeiten von Codemarken, Dokumenten oder Kennzeichen, Anwendungen wie Navigations- und Leitsysteme, Mess-, Kontroll- und Warnsysteme im Verkehrswesen oder die Qualitätssicherung in der Produktion bis zur interaktiven Steuerung von Gerätschaften wie mobilen Endgeräten oder gar Computerspielen zählen zu gängigen Anwendungen. Neue Technologien wie die „Augmented Reality“ (die Erweiterung und Kombination von Realität und Virtualität) oder 3D-Drucker verlangen nach Methoden zur Erfassung von Geometrie und der „Virtualisierung“ von Objekten mittels photogrammetrischer Methoden und möglichst zugänglicher Hardware wie „Smartphones“ und treiben die Entwicklung nutzerfreundlicher Anwendungen und Systeme weiter voran. Das Internet bietet Schnittstellen zu Hochleistungsrechnern zur schnellen Verarbeitung komplexer Datensätze sowie zahlreiche Plattformen zur Präsentation, den Austausch und Untersuchung dreidimensionaler Daten.

Unter zunehmender Aneignung digitaler Methoden und Verfahren in planerischen Tätigkeiten sowie die etablierte Anwendung digitaler Geräte zur Datenerhebung und Verarbeitung, wie leistungsfähige Computersysteme und Programme, hochauflösende Digitalkameras oder lasergestützte Messgeräte mit Schnittstellen zu einem digitalen Feldbuch, wird in vorliegender Arbeit die Praxis der digitalen Architekturphotogrammetrie und ihre Anwendbarkeit für den Architekten und Planer dargestellt.

Kollaborative optimierte Planungsmethoden wie zum Beispiel das BIM-Modell (Building Information Modeling), ein virtuelles Gebäudemodell, automatisierte Fertigungsprozesse und hochgradig vorgefertigte Bauelemente, verlangen nach präzisen Planungsgrundlagen. Strategien zur Planung am dreidimensionalen Modell erfordern eine möglichst genaue Virtualisierung des Bestandes, der Infrastruktur und des Geländes. Überdies dokumentieren fortlaufend erhobene Daten den Lebenszyklus eines Gebäudes von der Planungsgrundlage

über den Baufortschritt und schließlich der Nutzung, wodurch sich die Photogrammetrie nicht nur als „Messinstrument“, sondern auch als Instrument der Dokumentation, des Controllings und in Folge auch der Liegenschaftsverwaltung (Facility-Management) darstellt.

Der Prozess der photogrammetrischen Auswertung erfolgt weitgehend automatisiert. Einige Anwendungen nutzen das enorme Leistungspotential im Rahmen des Cloud-Computing und lagern den Großteil des Auswertungsverfahrens aus. Dieser hohe Automationsgrad und die eingeschränkte Kontrolle über den Ablauf des Verfahrens können mitunter in unerwünschten Ergebnissen resultieren, die nach der Auswertung nicht weiter zu beeinflussen sind. Produkte der Photogrammetrie werden maßgeblich von der Qualität des Bildmaterials bestimmt. Dem zufolge muss der Bedienungsfreundlichkeit aktueller Software-Lösungen eine gewisse Kenntnis über die Photographie und das photogrammetrische Verfahren vorangestellt werden, um optimale Ergebnisse zu gewährleisten. Das Verfahren der Photogrammetrie soll ausreichend erläutert und beispielhaft veranschaulicht werden. Es wird dargestellt, unter welchem Aufwand die Photogrammetrie als sinnvolles Instrument in Bauaufnahme, Planung und Dokumentation eingesetzt werden kann.

### **1.1 Digitale Nahbereichsphotogrammetrie, Determination**

„Die Photogrammetrie befasst sich mit der Gewinnung und Verarbeitung von Informationen über Objekte und Vorgänge mittels Bildern, schwerpunktmäßig mit Bestimmung der Form, Größe und Lage von Objekten im Raum [...]“ (DIN 18716-1)

Weitläufig bekannt und angewandt in der Disziplin der Geodäsie, der Lehre der Vermessung der Erdoberfläche, ist die Photogrammetrie der Fernerkundung zugehörig.

Die Photogrammetrie erlaubt die Rekonstruktion der Objekte und die Feststellung einiger Objektmerkmale ohne direkte Berührung der Gegenstände. Diese Art der Informationsgewinnung – über die Erdoberfläche – wird heutzutage auch als Fernerkundung (remote sensing) bezeichnet. Fernerkundung ist die Gesamtheit aller Verfahren zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche durch Messung und Interpretation der von ihr reflektierten oder emittierten elektromagnetischen Strahlung. (*Kraus 2004: 2*)

Das Verfahren erfolgt mittels photographischer Aufnahmen berührungslos und liefert, ohne bekannter oder bestimmter Werte, ein größen- und maßstabsloses Modell. Zur Auswertung eines maßstabgetreuen Modells bedarf es daher der Anwendung bekannter Größen oder ermittelter „Referenzmaße“ zur Definition des zu untersuchenden Objekts. Methoden und Werkzeuge zur Aufnahme und der Anwendung solcher Referenzmaße werden im Verlauf dieser Arbeit angeführt.

Die Erstellung und Auswertung erdgebundener photographischer Aufnahmen differenziert die terrestrische Photogrammetrie von der Luftbildphotogrammetrie. Die Maßstäblichkeit und Aufnahmedistanz der zu untersuchenden Objekte definiert im Weiteren die in dieser Arbeit gegenständliche Nahbereichsphotogrammetrie. Über den Bezug des Anwendungsbereiches definiert sich die Architekturphotogrammetrie.

Während die Luftbildphotogrammetrie an Luftfahrzeuge gebunden, üblicherweise von geordneten regelmäßigen Bildverbänden - in sich überlagernden Bildverbände als Streifen - ausgeht, gewährt die Nahbereichsphotogrammetrie im Anwendungsmaßstab der Tätigkeit des Architekten und Bauingenieurs eine, der Geometrie des Untersuchungsobjekts entsprechende, flexible Aufnahmeordnung als Bildverband von handgehaltenen Aufnahmen mittels Stativen, aber auch unter Einsatz von Hilfsmitteln wie unbemannter Fluggeräte.

Die im Verlauf dieser Arbeit dargestellte Mehrbildphotogrammetrie leitet, von einer sich überschneidenden Bildstrecke mittels Mehrbildauswertung, Bündeltriangulation und Anwendung ermittelter Aufmaße, geometrische Modelle und räumliche Messwerte ab.

„[...] multi-image photogrammetry can produce highly detailed and accurate models of [...] discrete objects or monuments. [...] There has been an explosion in the range of multi-image photogrammetry software packages available in the last decade with an attendant improvement in automation and interface.“ (McCarthy 2014: 177)

Digitale Aufnahme und Auswertungssysteme stellen eine wesentliche Erleichterung in der Anwendung der Photogrammetrie dar. Für eine Vielzahl von Anwendungen sind die Anforderungen an die photographische Erfassung durch handelsübliche digitale Kamerasysteme weitgehend erfüllt. Die Methoden der „digitalen Photogrammetrie“ lassen sich einfach und wirtschaftlich in den Arbeitsprozess des Architekten und Planers, zur Erstellung von Grundlagen für Planung und Ausführung wie auch der Dokumentation einbinden. Das Ergebnis umfasst neben den ausgewerteten Objektkoordinaten auch die genaue bildliche Dokumentation zur Interpretation des Zustandes zum Zeitpunkt der Aufnahme. Weiter findet die Photogrammetrie Anwendung in sogenannten online Systemlösungen, die eine hochgradig automatisierte Erfassung und Auswertung von Daten liefern. Solche Systeme erlauben die Visualisierung dreidimensionaler Geometrie durch Einsatz mehrerer Kameras in Echtzeit. Ein Anwendungsgebiet dieser Technologie ist beispielsweise die Untersuchung von Bruch und Verformungseigenschaften von Bauteilen oder Konstruktionen.

## **1.2 Inhaltliche Eingrenzung**

Ein elementares Verständnis mathematischer, geometrischer sowie photographischer Grundlagen ist für die Anwendung der Photogrammetrie unerlässlich, jedoch erfolgt die Verarbeitung und Auswertung von erfassten Daten mittels anwenderfreundlicher Software zum Großteil in automatisierten Prozessen. Die vorliegende Arbeit beschreibt den Einsatz und den Funktionsumfang solcher Applikationen und sieht von der Erläuterung der angewandten mathematischen und geometrischen Prozesse ab, sofern diese zum Verständnis der Fertigung fachgerechter photographischer Aufnahmen und den Arbeitsschritten zur Auswertung mittels entsprechender Software nicht erforderlich sind. Die Architekturphotogrammetrie ist eine Methode der Bauaufnahme. Die Bauaufnahme selbst ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Ziel dieser Arbeit ist, einen Überblick über die Anwendung photogrammetrischer Methoden, im Besonderen der Mehrbildphotogrammetrie, mittels möglichst nutzerfreundlicher Software und kostengünstiger Kamerasysteme zu vermitteln. Der Vollständigkeit halber werden auch andere artverwandte Technologien der Fernerkundung vorgestellt. Es wird jedoch davon abgesehen, deren Handhabung vertiefend zu erläutern.

## **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit gliedert sich inhaltlich in vier Kapitel. Zunächst werden die Grundlagen zur Anwendung der Photogrammetrie erläutert. Produkte photogrammetrischer Auswertung werden beschrieben, formale Erfordernisse zur bildhaften Dokumentation und Genauigkeit werden vorgebracht. Die Genauigkeit der Mehrbildphotogrammetrie wird unter Anwendung verschiedener Kamerasysteme und Softwarelösungen am Beispiel untersucht. Methoden der Darstellung und Präsentation dreidimensionaler Modelle werden beispielhaft angeführt, um den Anwendungsbereich der digitalen Mehrbildphotogrammetrie im Bauwesen darzulegen.

Im folgenden Kapitel werden photogrammetrische Verfahren erläutert. Die digitale Mehrbildphotogrammetrie wird dem Laserscanning, dem jüngsten Verfahren der Fernerkundung, gegenüber gestellt.

Ein weiteres Kapitel widmet sich den photographischen Ansprüchen hinsichtlich des photogrammetrischen Einsatzes. Kamerasysteme und photographische Grundlagen werden vermittelt.

Schließlich wird die digitale Mehrbildphotogrammetrie am Objekt angewandt. Unterschiedliche Aufnahmeordnungen am gleichen Objekt werden mittels verschiedener

Softwarelösungen ausgewertet. Die Produkte werden auf Maßhaltigkeit und Dichte des Datenmodells verglichen. Der Funktionsumfang und der Auswertungsprozess der angewandten Applikationen wird dargestellt, die Dauer der Auswertung gegenüber gestellt. Die verschiedenen Modelle werden verglichen und bewertet.



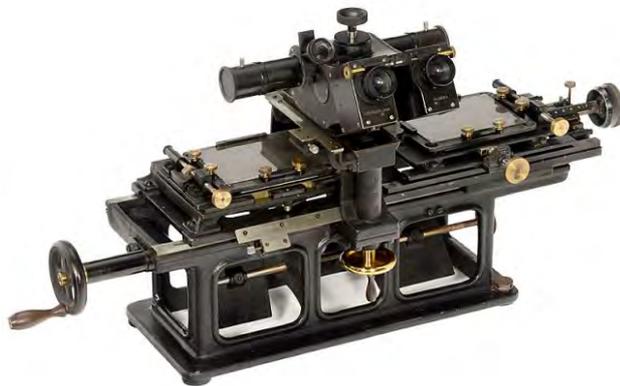
## 2. Grundlagen und Anwendung der Photogrammetrie

### 2.1 Geschichte der Photogrammetrie

Folgender Abschnitt handelt die Entwicklung der Photogrammetrie unter Rückgriff auf Thomas Luhmann, Nahbereichsphotogrammetrie, 2010 ab.

Erste Versuche die Photographie zu Messzwecken einzusetzen wurden bereits um 1850 unternommen. Zur Fertigung topographischer Pläne für den militärischen Einsatz bemühte sich der französische Offizier Aimé Laussedat (1819-1907), während zur gleichen Zeit, der deutsche Architekt Albrecht Meydenbauer (1834-1921) photographische Aufnahmen zur Vermessung von Fassaden und schwer zugänglichen Bauteilen auswertete. Großformatige Aufnahmekameras belichteten Glasplatten, die als dauerhafte und maßhaltige Emulsionsträger Verwendung fanden. Meydenbauer erschuf in Folge ein umfassendes Archiv an Messbildern. Für die Königlich Preußische Messbild-Anstalt, die er mitbegründete, fertigte Meydenbauer etwa 20.000 Messbilder von 2000 Baudenkmalern an. Es folgten technische Entwicklungen der Aufnahmegeräte in Form von Bildmesstheodoliten, die durch Messung der Bildwinkel die Orientierung der Aufnahme (äußere Orientierung) zur photogrammetrischen Auswertung definieren.

Um die Jahrhundertwende etablierten sich erstmals Geräte zur stereoskopischen Bildauswertung. Es folgten weitere Geräte zur Auswertung von Bildpaaren und der Entzerrung von Aufnahmen.



*Abb. 2.1-1 Stereocomparator von Carl Zeiss, 1920*

In den 1950er Jahren löste der Film die Glasplatte als Emulsionsträger ab. Messkameras wurden hinsichtlich der Planlage des dünnen und flexiblen Filmmaterials optimiert. Mit dem Aufkommen elektronischer Rechenmethoden etablierte sich die computergestützte analytische Photogrammetrie. Dieses Verfahren war jedoch noch an sehr kostspielige

Gerätschaften gebunden. Seit den 1980er Jahren wird die Bündelausgleichung mittels Auswertung am Computer realisiert. Teure Spezialgeräte wie der analytische Plotter können durch Computersysteme ersetzt werden.



*Abb. 2.1-2 Analytischer, computergestützter Plotter Leica SD2000, 1994*

Automatisierte Verfahren erleichtern die Anwendung der Photogrammetrie und ermöglichen einen breitbandigen Zugang zur Materie. Computergestützte Verfahren erlauben erstmals die Ermittlung der Kamerakalibrierung (Ermittlung der inneren Orientierung) aufgrund des vorliegenden photographischen Materials, das als freier Bildverband gefertigt werden kann. Diese Entwicklung ermöglicht den Einsatz kompakter, vergleichsweise günstiger Aufnahmesysteme und eine automatisierte Auswertung dreidimensionaler Modelle. Optoelektronische Sensoren ermöglichen das Digitalisieren von photographischen Aufnahmen. Die Errungenschaften der Computervision tragen maßgeblich zur Auswertung des Bildmaterials bei. Objektmerkmale werden automatisiert erfasst und bilden Ausgangspunkte zur photogrammetrischen Auswertung eines Bildverbandes.

Die digitale Photogrammetrie bedient sich der ersten elektronischen Aufnahmegeräte, zunächst noch mit sehr geringer Auflösung. Die Digitalkamera revolutioniert die Aufnahmetechnik und erweitert das Einsatzgebiet der Photogrammetrie.

Zunehmend bedient sich auch die traditionell eher konservative Architekturbildmessung der Methoden der digitalen Photogrammetrie. Neben den aus der Luftbildmessung übernommenen Auswerteverfahren und -programmen werden vor allem Low-cost Systeme

für Anwendung in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie eingesetzt. Neue Strategien für Aufnahme, Auswertung und Darstellung dafür sind in Entwicklung.

*(Hanke & Ebrahim 2004)*

Errungenschaften und laufende Entwicklungen im Bereich der Computervision zur automatisierten Analyse des Bildmaterials mittels zunehmend leistungsfähigeren wie kostengünstigen Computersystemen und entsprechender Software zur photogrammetrischen Auswertung von Bildverbänden, allem voran aber hochauflösende, kompakte und kostengünstige Digitalkameras, ermöglichen einen breitbandigen, interdisziplinären Zugang zur digitalen Photogrammetrie.

„In multi-image photogrammetry, some of the most technically challenging and time-consuming elements of traditional stereo and convergent photogrammetry have now been automated and it is now possible to combine large groups of images rather than pairs, making this a far more cost-effective, user-friendly and powerful approach.

*(McCarthy 2014: 175)*

Zeitgleich erfolgen Entwicklungen anwendungsspezifischer Aufnahme- und Auswertungssysteme wie Projektionsverfahren zur Oberflächenanalyse, Distanzmesskameras, Multisensorsysteme bis hin zur Bild- und Objekterfassung mittels Laserscanner.

## **2.2 Produkte der digitalen Architekturphotogrammetrie**

Zum Verständnis des Inhalts folgender Kapitel ist an dieser Stelle ein Überblick an Produkten der photogrammetrischen Auswertung angeführt. Traditionelle Produkte der Photogrammetrie sind entzerrte Bildpläne oder die Lagebestimmung diskreter Punkte mittels der analytischen Photogrammetrie. Die leichte Verfügbarkeit und unkomplizierte Verarbeitung digitaler Bilder sowie die hochgradig automatisierte Anwendung photogrammetrischer computergestützter Verfahren ermöglichen die Auswertung eines dreidimensionalen Modells hoher Informationsdichte auf Basis eines Bildverbandes.

„Klassische Ergebnisse der Architekturphotogrammetrie sind Risse und Fassadenpläne, Schnitte und Ansichten.“ Räumliche Modelle bieten „[...] den Vorteil der leichten und einfachen 3D-Weiterverarbeitung durch den Auftraggeber sowie eine „blattschnittfreie“ Verwaltung der gelieferten räumlichen Daten.“ *(Hanke & Ebrahim, 2004)*

Vom dreidimensionalen Computermodell eines Bauwerks oder sonstigen Objekts lassen sich bei Bedarf Orthobilder einzelner Fassaden, Schrägansichten, bewegte Animationen oder interaktive Anwendungen generieren. *(vgl. ebd.)*

### 2.2.1 Die photographische Aufnahme

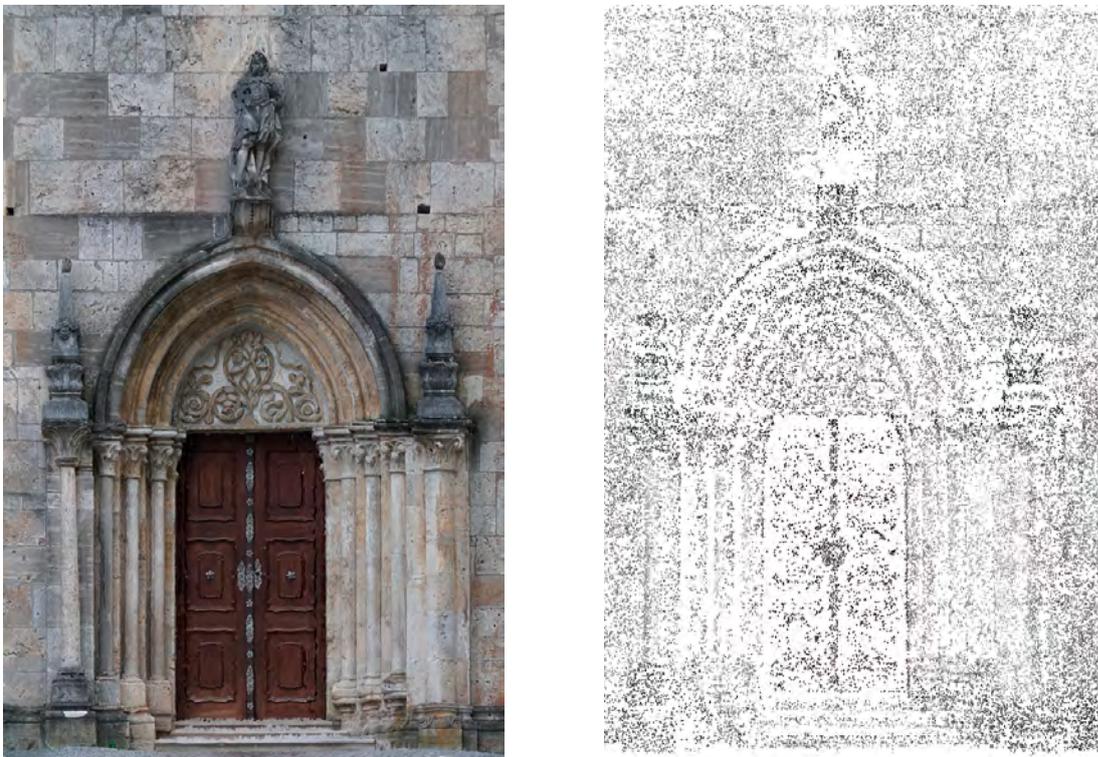
Die photographische Aufnahme ist nicht nur Voraussetzung der photogrammetrischen Auswertung, sie ist bereits Gegenstand der Photodokumentation.

Nach *Luhmann (2010: 12)* ist „[...] das aufgenommene Bild ein objektiver Datenträger und dokumentiert den Zustand des Objektes zum Zeitpunkt der Bildaufnahme.“ Die einzelne photographische Aufnahme kann bereits zur projektiven Entzerrung (*vgl. 2.2.4*) herangezogen werden. Entzerrte Bilder können als Bildverband, beispielsweise als Fassadenplan, zusammengesetzt werden.

### 2.2.2 Das dreidimensionale Modell als Punktwolke

Eine Punktwolke wird „[...] durch eine mehr oder weniger dichte Zahl von 3D-Oberflächenpunkten beschrieben.“ (*Luhmann 2010: 74*)

Eine Punktwolke definiert sich durch eine Menge räumlicher Punkte, die die Oberfläche eines Objekts repräsentieren. Punktwolken können visualisiert werden, indem die Raumpunkte der Farbinformation des zugehörigen Bildpunktes entsprechen.



*Abb. 2.2.2 Orthophoto und Punktwolke, Archivoltportal der Stiftskirche Heiligenkreuz*

Je nach Dichte der Punktwolke und Größe der Darstellung der Punkte kann eine dreidimensionale Struktur aus beliebigen Blickwinkeln visualisiert werden. Aus der Punktwolke sind bereits Längen und Flächenmaße sowie Volumina ableitbar. Zudem lassen

sich im Umfang der Punktwolke Koordinaten beliebiger Objektpunkte und erfasster Bildmarken auslesen. Die Punktwolke mag dem Architekten und Planer gegenüber einem Flächenmodell wie dem „Mesh“ als fragmentarisches Modell erscheinen, da das flächenhafte und volumetrische Modellieren in diesen Disziplinen etabliert ist. Die Ableitung eines Flächenmodells nach einer Punktwolke ist selbst in Form von Teilflächen des Objektes jederzeit möglich. Das flächenhafte Modell wird in den meisten Anwendungen anhand einer reduzierten Anzahl von Objektpunkten erstellt. Dies ist notwendig, da das Flächenmodell mit zunehmender Dichte ein Datenvolumen erreicht, das die Darstellung und weitere Verarbeitung hinsichtlich der Erschöpfung an Rechenleistung erschwert. (vgl. 2.2.3)

Zudem bedeuten Manipulationen am dichten 3D-Flächenmodell einen Mehraufwand. Flächenmodelle mit sehr hoher Anzahl an Polygonen (Teilflächen) werden in der Regel, den Anforderungen entsprechend, weitgehend vereinfacht. Folglich ist es sinnvoll, ein „Mesh“ in einer der Aufgabe entsprechenden Dichte und Topologie aus dem Modell der Punktwolke abzuleiten. Die dichte Punktwolke ist das Modell mit maximaler geometrischer Informationsdichte und sollte im Umfang der Projektdaten archiviert werden.

### 2.2.3 Das dreidimensionale Modell als Mesh

Ein Mesh oder Polygonnetz definiert eine Fläche aus der Summe der Oberflächen, die sich aus der geometrischen Verbindung von Oberflächenpunkten ergeben.

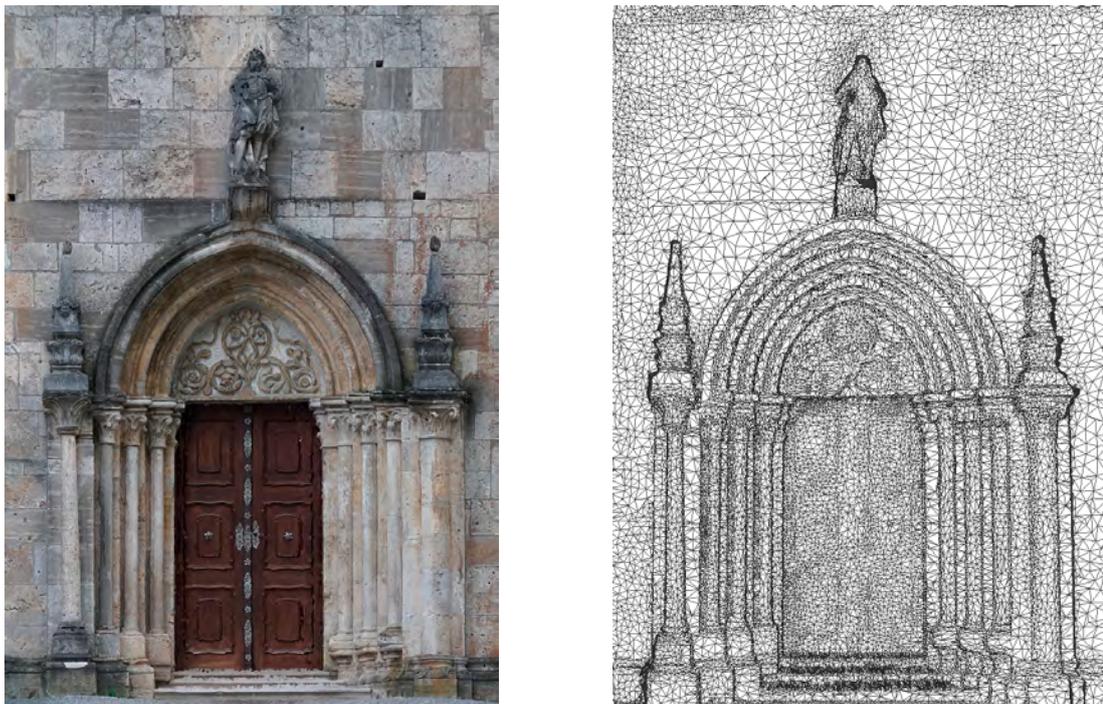


Abb. 2.2.3, Orthophoto und Mesh, Archivoltportal der Stiftskirche Heiligenkreuz

Im vorliegenden Anwendungsfall ergibt sich das sogenannte „Mesh“ aus der Triangulation einer Summe an Netzpunkten<sup>1</sup> und bildet sich somit aus unregelmäßigen Dreiecksflächen. Es ist möglich, nur relevante Bereiche eines Modells in ein Flächenmodell zu überführen. Die Dichte des Mesh wird durch das Verfahren der Filterung von Punkten zur Reduktion der Anzahl der Netz- oder Knotenpunkte bestimmt. Diese werden zunächst aus der Punktwolke übernommen. Zur Ableitung stehen, je nach Softwarelösung, verschiedene Verfahren zur Verfügung. Eine Rekonstruktion kann nach der initialen, spärlichen Punktwolke erfolgen, die im Laufe der Ermittlung der inneren und äußeren Orientierung der Kamera anhand automatisiert registrierter Objektpunkte formuliert wird. Basierend auf dieser sogenannten „Sparse Point Cloud“ wird eine dichte Punktwolke erzeugt. Diese kann ebenfalls zur Ausbildung eines „Mesh“ herangezogen werden. Die enorme Informationsdichte dieses Konstrukts erfordert in den meisten Fällen eine Filterung der „Dense Pointcloud“, um ein Polygonmodell zur weiteren Verarbeitung oder Auswertung zu erhalten. Modelle mit extrem hoher Polygonanzahl erfordern hohe Rechenleistung und erweisen sich in der Nachbearbeitung als ungünstig. Der Softwarehersteller „Agisoft“ empfiehlt im Rahmen der Softwarelösung „Photoscan“ eine Obergrenze von zehn Millionen Polygonen. Filter zur Reduktion der Netzpunkte orientieren sich beispielsweise an der Komplexität der Geometrie, der Flächenglättung und der Elimination von sogenannten „Ausreißern“ – Punkte, die sehr wahrscheinlich keiner Oberfläche angehören. Die Methode der Flächenglättung entspricht der Auswertung eines Höhenfeldmodelles und kann bei Anwendungen in der Architektur zum Verlust an Detail führen. Einfache Verfahren orientieren sich an einem Maximalwert von Polygonen. Ein detailliertes Mesh kann mittels Texturen oder Lichtsimulationen, wie zum Beispiel der Anwendung von Streiflicht, visuell analysiert werden. Die photographische Aufnahme kann auf das dreidimensionale Objekt als Textur angewandt werden. Die Visualisierung solcher Objekte liefert photorealistisches Anschauungsmaterial.

#### **2.2.4 Die entzerrte photographische Aufnahme**

Vom entzerrten Bild lassen sich Koordinaten in zwei Richtungen auslesen. Zur Bildentzerrung wird zwischen dem Verfahren der projektiven Entzerrung und der differentiellen Entzerrung unterscheiden. Letztere dient der Erstellung eines Orthophotos. (vgl. 2.2.5) Die projektive Entzerrung kann anhand einer einzelnen photographischen

---

<sup>1</sup> Eine Menge an Punkten der Punktwolke

Aufnahme und entsprechender geometrischer Information durchgeführt werden. Sie lässt sich jedoch nur auf ebene Objekte anwenden.

„Anhand des Bildes und zuvor aufgenommener Geometrieinformation der Objektebene (sogenannte Entzerrungsebene), erfolgt eine [...] Umwandlung des zentralperspektivisch verzerrten Bildes zu einer maßstäblichen Parallelprojektion auf die Objektebene.“

(Donath 2008: 87)

Das entzerrte Bild entspricht somit lediglich einer definierten Entzerrungsebene. Beispielsweise gilt für die Fertigung eines Fassadenplanes mittels projektiver Entzerrung, dass Bereiche in Vor- oder Rücksprünge (zum Beispiel bei Erkern oder breiten Gesimsen) separat analysiert werden müssen.



Abb. 2.2.4 Photographische Aufnahme und projektive Entzerrung einer Fassade

„Nur Objektbereiche die sich innerhalb der Entzerrungsebene befinden werden in Lage und Größe maßstäblich abgebildet.“ (vgl. *ebd.*: 89)

„Abgebildete Objektbereiche, die nicht durch das Oberflächenmodell beschrieben werden, werden im Ergebnisbild [...] lageversetzt und verzerrt dargestellt.“ (Luhmann 2010: 268)

Die Entzerrungsebene muss durch bekannte Größen definiert werden. Dies kann über die Lagebestimmung bekannte Strecken oder eingemessener Objektpunkte erfolgen.

„Die Verwendung von tachymetrisch gemessenen Passpunkten ist in jedem Fall vorzuziehen, um zu besten Ergebnissen zu gelangen.“ (Donath 2008: 88)

### 2.2.5 Das Orthophoto

Das Orthophoto entspricht einer Normalprojektion eines Objekts auf eine entsprechend orientierte Bezugsfläche. Das Orthophoto bildet, entgegen der projektiven Entzerrung, alle parallelen Ebenen eines Objekts unter einer definierten Richtung entzerrt und orthogonal ab.

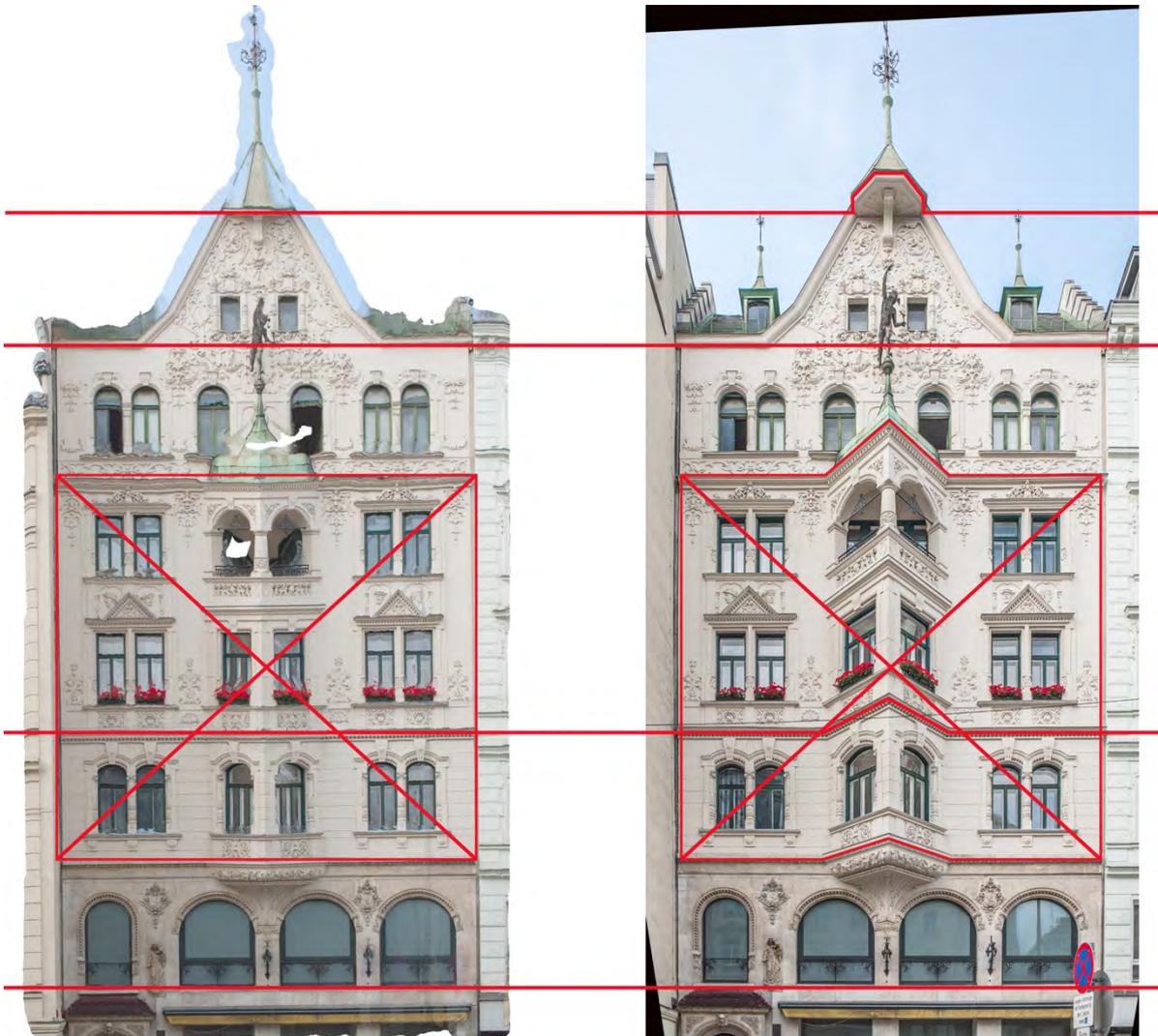


Abb. 2.2.5 vgl. projektive Entzerrung und. Orthophoto einer Fassade

Eine solche Abbildung wird auch als Bildplan bezeichnet. Das Orthophoto ist Ergebnis der differentiellen Entzerrung und findet seine Anwendung vor allem in der Auswertung von Luftbildern im Rahmen der Geodäsie oder als Fassadenplan in der Architektur. Aktuelle computergestützte Verfahren zur Auswertung von Bildverbänden ermöglichen den Aufbau eines dreidimensionalen texturierten Modells und somit die Ausgabe eines Orthophotos als zweidimensionale Ansicht der texturierten Geometrie unter definierter Blickrichtung.

„Ein Orthophoto stellt eine maßstäblich korrekte und verzerrungsfreie Parallelprojektion auf eine Bezugsfläche [...] dar.“ (Donath 2008: 90)

Diese Bezugsfläche muss nicht planar sein. Es können gegebenenfalls auch Zylinder- oder Kugel-Projektionen angewendet werden. (vgl. Luhmann 2010: 268) Diese Anwendung wird als Flächenabwicklung (vgl. 2.2.6) bezeichnet. Bei der differentiellen Entzerrung wird jeder erkannte Objektpunkt eines Bildes in die Bildebene oder -fläche des Orthophotos überführt. Sichttote Bereiche einer einzelnen Aufnahme können um die Bildinformation aus weiteren photographischen Aufnahmen weitgehend vermieden werden.

### 2.2.6 Die Flächenabwicklung

In Folge der Ausarbeitung einer dreidimensionalen Geometrie und Zuordnung entsprechender Textur kann die Bildinformation der Geometrie auf eine Bezugsfläche eines mathematisch beschreibbaren Körpers flächentreu übertragen werden. Beispielhaft ist die Abwicklung eines Zylinders oder die Projektion eines vollsphärischen Panoramas auf eine Kugel.

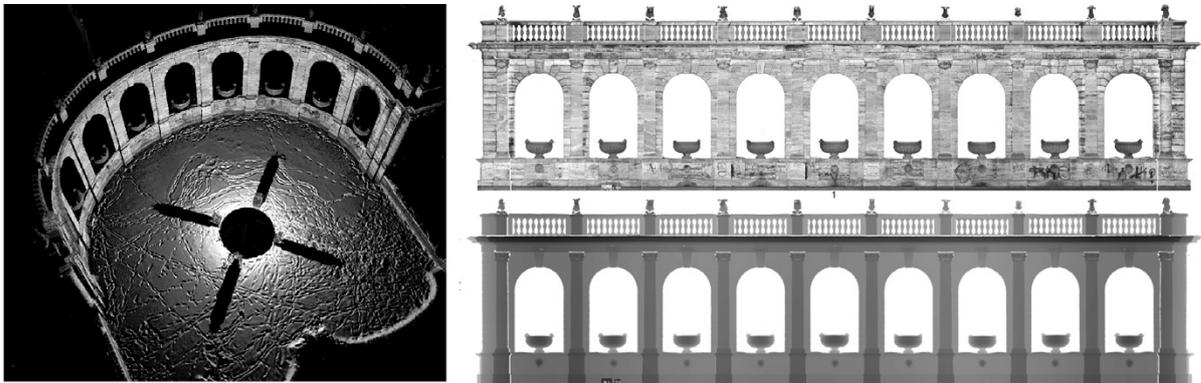


Abb. 2.2.6 Flächenabwicklung einer elliptisch zylindrischen Arkade (Berlin, Märchenbrunnen)

### 2.2.7 Digitales Oberflächen oder Höhenmodell

Ein digitales Oberflächenmodell ist eine zweidimensionale Darstellung der Summe von Raumpunkten und Visualisierung der Höheninformation durch die Lagebeziehung der Punkte mittels linearer oder flächenhafter Verbindungen. Abbildung 2.2.7 zeigt ein, im Rahmen dieser Arbeit erstelltes Geländemodell in einer farblich kodierten Darstellung mit Höhenlinien nach einem Höhenunterschied von einem halben Meter.

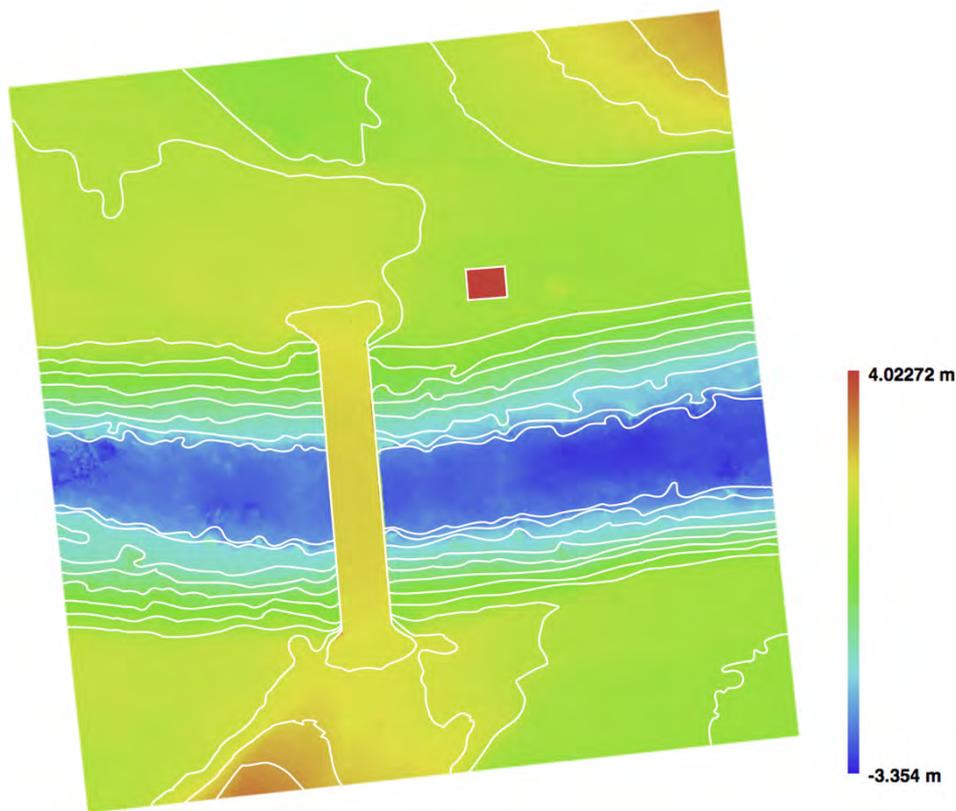


Abb. 2.2.7 Höhenmodell (DEM) Geländemodell Liesingbach, Wien Oberlaa

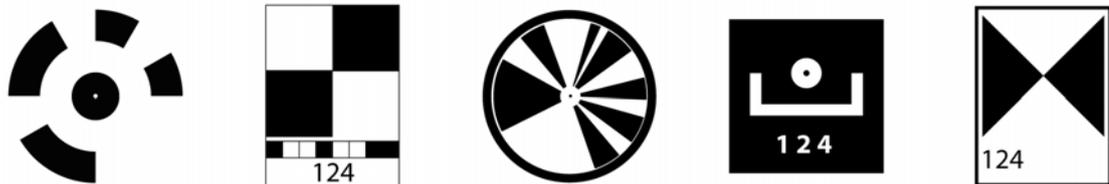
### 2.3 Methoden und Werkzeuge der Vermessung

Die photogrammetrische Auswertung eines Bildverbandes erbringt ein räumliches, aber maßstabsloses Modell. Solange auf das digital generierte Modell keine definierten Größen angewandt werden, ist dieses größen- und maßstabslos. Die Ableitung von „realen Maßen“ von einem dreidimensionalen Modell erfordert die Bestimmung bekannter Größen an diesem Modell. Dies kann durch Angaben über Positionierung und Orientierung der Aufnahmen „mittels Einmessen bekannter Objektkoordinaten von Passpunkten oder Anwendung von Streckenmaßen zwischen definierten Messpunkten erfolgen. Man unterscheidet „Vollpasspunkte“, die sich in Raumkoordinaten definieren, „Lagepasspunkte“ mit zwei bekannten Koordinaten und „Höhenpasspunkte“ mit bekannter Höhenlage.

(vgl. Karl Kraus 2004: 210)

Die Integration von am Objekt, gemessenen Strecken- oder Längenmaßen erscheint als einfachste Methode. Solche Maße werden an diskreten Punkten des Modells eingebracht. Diese Punkte können natürliche Objektpunkte mit eindeutigen Merkmalen oder signalisierte Passpunkte wie bereits verortete Messpunkte sein. Durch das Anbringen von Bild- oder

Messmarken können beliebige Punkte am Objekt signalisiert werden. Es empfiehlt sich, ausgewählte Punkte generell durch kodierte Bildmarken zu kennzeichnen. Diese Marken gestalten sich durch einen eindeutigen Messpunkt, meist im Zentrum der Messtafel platziert, der von einem geordneten Muster aus Punkten, Flächen oder Linien, zur automatisierten Identifikation der jeweiligen Marke, umgeben ist.



*Abb. 2.3 kodierte und nicht kodierte Messmarken*

In der Verarbeitung der photographischen Aufnahmen können solche Marken automatisch erfasst und registriert werden, was das Einpflegen der entsprechenden Maße wesentlich erleichtert. In der Regel handelt es sich bei den abgenommenen Maßen um Längenmaße, die auf Strecken zwischen den registrierten Messmarken angewendet werden. Weiter lassen sich durch entsprechend verortete Messmarken Referenzen zur Orientierung des dreidimensionalen Modells in einem übergeordneten Koordinatensystem gestalten. So können drei nivellierte Marken eine Horizontalebene definieren, die zur Lagebestimmung und Orientierung des digitalen Modells beiträgt.

In Folge sollen Methoden und Werkzeuge der Vermessung im Rahmen der Anwendung der Photogrammetrie vorgestellt werden, um notwendige Aufmaße erfassen zu können. Prinzipiell unterscheidet man zwischen Methoden des Handaufmaßes unter Verwendung eines Maßstabes, Messbandes oder auch dem Laser-Distanzmessgerät und berührungslosen Verfahren, die zum Beispiel moderne Tachymeter und Totalstationen im reflektorlosen Betrieb realisieren.

### **2.3.1 Der Fluchtstab**

Der Fluchtstab ist ein einfaches Hilfsmittel. Er kann bei der photogrammetrischen Aufnahme als Referenzmaß herangezogen werden. Er ist in der Regel zwei Meter lang und in jeweils 50 Zentimeter lange, farblich separierte Abschnitte (Rot, Weiß), gegliedert. Der Fluchtstab kann über seine Spitze auf entsprechendem Untergrund direkt oder unter Zuhilfenahme eines Fluchtstabstatives positioniert werden. Mittels eines „Lattenrichters“, ein Hilfsmittel mit angebrachter Dosenlibelle, lässt er sich lotrecht ausrichten. Neben dem zu erfassenden

Längenmaß lässt sich die lotrechte Ausrichtung auf das Koordinatensystem des dreidimensionalen Modells übertragen.

### 2.3.2 Der Gliedermaßstab, Messlatte und Nivellierlatte

Der ausklappbare und somit kompakte Gliedermaßstab ist in der Regel zwei Meter lang. Er kann zur Längenmessung verwendet oder als Referenzmaß am Ort der photographischen Aufnahme positioniert werden. Zudem kann er auch als Nivellierlatte zur geometrischen Höhenmessung herangezogen werden. Hierzu ist die Zuhilfenahme der breiteren Nivellierlatte (6-9 Zentimeter Breite) besser geeignet. Die Nivellierlatte wie auch die drei



Abb. 2.3.2-1 Gliedermaßstab

bis fünf Meter lange Messlatte können als Referenzmaß am zu untersuchenden Objekt frei aufgelegt oder aufgestellt und in der Auswertung eingemessen werden.

Die Messlatte ist in Meterabschnitten farblich unterteilt und mittels eingeschlagener Nägel bis in den Dezimeterbereich lesbar. Sie eignet sich aufgrund des Transportmaßes und der groben Gliederung wenig zur genauen Maßabnahme.

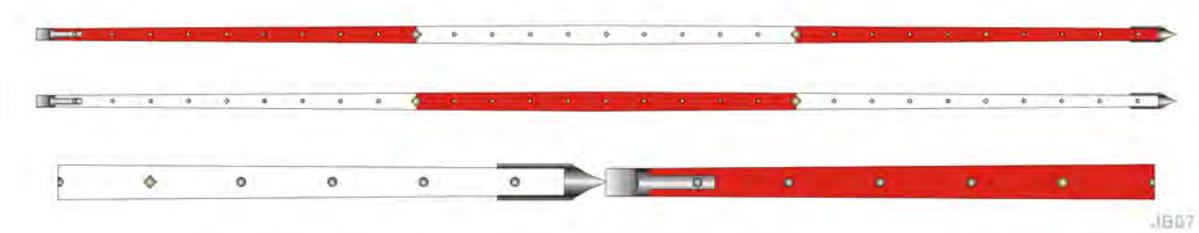


Abb. 2.3.2-2 Messlatte

### 2.3.3 Das Messband

In der Regel aus Bandstahl oder glasfaserverstärktem Kunststoff gefertigt, ermöglicht das Messband die Abnahme von Längenmaßen bis zu 50 Meter oder in Teilmessungen darüber hinaus. Je nach Material unterliegen Messbänder der thermischen Längenänderung. Diese muss berücksichtigt werden, sobald die herrschende Temperatur von einer Soll-Temperatur von 20°C wesentlich abweicht. Zudem ist darauf zu achten, die Elastizitätsgrenze des Materials des Messbandes beim Messeinsatz nicht zu überschreiten, da dies eine Dehnung und somit dauerhafte Längenänderung zur Folge hat. Dies kann unter Verwendung eines Messbandspanners verhindert werden. Hinzukommend unterliegt ein frei hängendes

Messband aufgrund seines Eigengewichtes einer Durchbiegung. Der Durchhang ist weitgehend zu vermeiden oder rechnerisch zu kompensieren.

### 2.3.4 Laser-Distanzmessgeräte

Der Laserentfernungsmesser eröffnet die Gruppe der optoelektronischen<sup>2</sup> Messgeräte. Er ist ein relativ kostengünstiges, sehr präzises und kompaktes Messgerät zur Bestimmung von Längenmaßen. Es ist davon auszugehen, dass ein solches Gerät bereits zum Inventar eines Planungsbüros gehört. Je nach Leistungsklasse messen diese Geräte auf Distanzen von 50 bis 250 Meter mit einer Messgenauigkeit von 1-2 Millimeter. Aktuelle Geräte erleichtern das Anvisieren von Objekten mittels integrierter Zieloptik. Zahlreiche Auswerte- und Zusatzfunktionen, wie die indirekte Höhen und Längenmessung, der Ermittlung von Flächen und Volumen oder der Addition beziehungsweise Subtraktion von Teilmessergebnissen, gehören zum Funktionsumfang. Manche Geräte können auch den Winkel der Messung zu einer Horizontalebene angeben.

Messungen erfolgen unter Anschlag des Gerätes in der Regel aus der Hand. Mittels eines Stativs lassen sich die Geräte gegenüber der handgehaltenen Messung ruhig lagern und exakt ausrichten. So kann auch die indirekte Höhenmessung, vor allem mittels Geräten mit integriertem Neigungssensor, erleichtert ausgeführt werden.

Für ein erleichtertes Messen lassen sich am Gerät verschiedene Bezugsebenen festlegen. Es kann ab Vorder- oder Hinterkante, aber auch unter Zuhilfenahme eines ausklappbaren

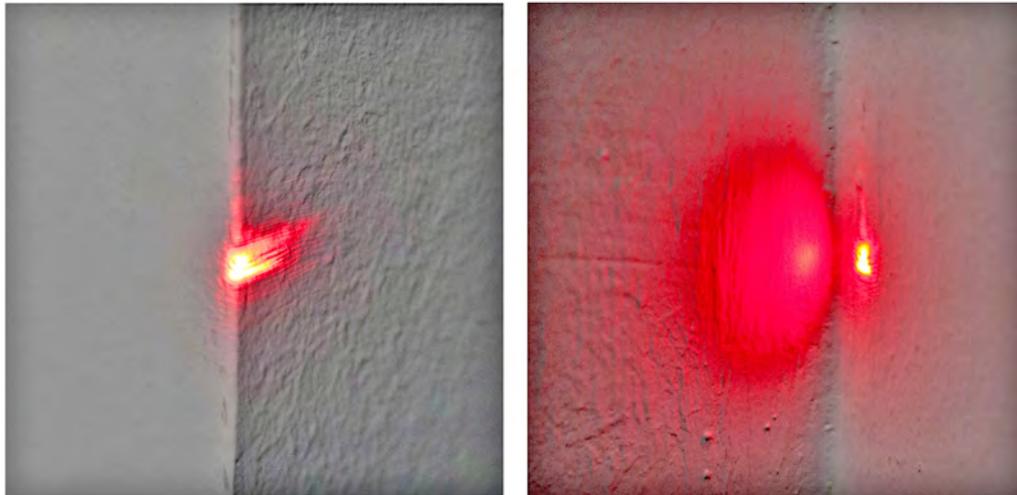


Abb. 2.3.4 Laser-Distanzmessgerät

Anschlagstiftes über die Hinterkante hinaus gemessen werden, um Messungen aus Ecken zu ermöglichen. Aktuelle Geräte erleichtern das Anvisieren mittels integrierter Kamera und realisieren die drahtlose Übermittlung von Bild- und Messdaten an mobile Endgeräte und Computer zur Verarbeitung und Archivierung in entsprechenden Applikationen.

<sup>2</sup> Verfahren zur Erfassung elektronisch erzeugten Daten aus Lichtemission.

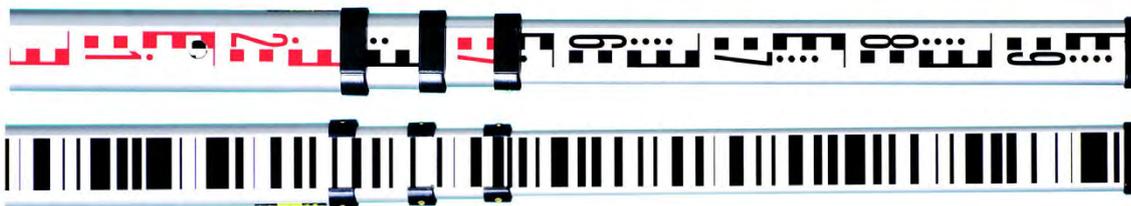
Wie bei allen lasergestützten Messverfahren ist ein positives Messergebnis im hohen Maße vom Reflexionswinkel und dem Reflexionsgrad der angezielten Oberfläche abhängig. Der Durchmesser des Laserstrahls nimmt mit der Entfernung zu. Mehrfache oder gestreute Reflexionen, wie sie beim Anmessen von Kanten und Ecken auftreten, können das Messergebnis verfälschen.



*Abb. 2.3.5 ungünstige Reflexionen*

### **2.3.5 Nivelliergerät und Rotationslaser**

Mit Hilfe des Nivelliergerätes und der Nivellierlatte lassen sich Höhenunterschiede messen und Horizontalebenen festlegen. Geräte, die zusätzlich zum Fadenkreuz des Zielfernrohrs über Distanzfäden verfügen, lassen sich unter Zuhilfenahme der Nivellierlatte zur Bestimmung von Entfernungen einsetzen.

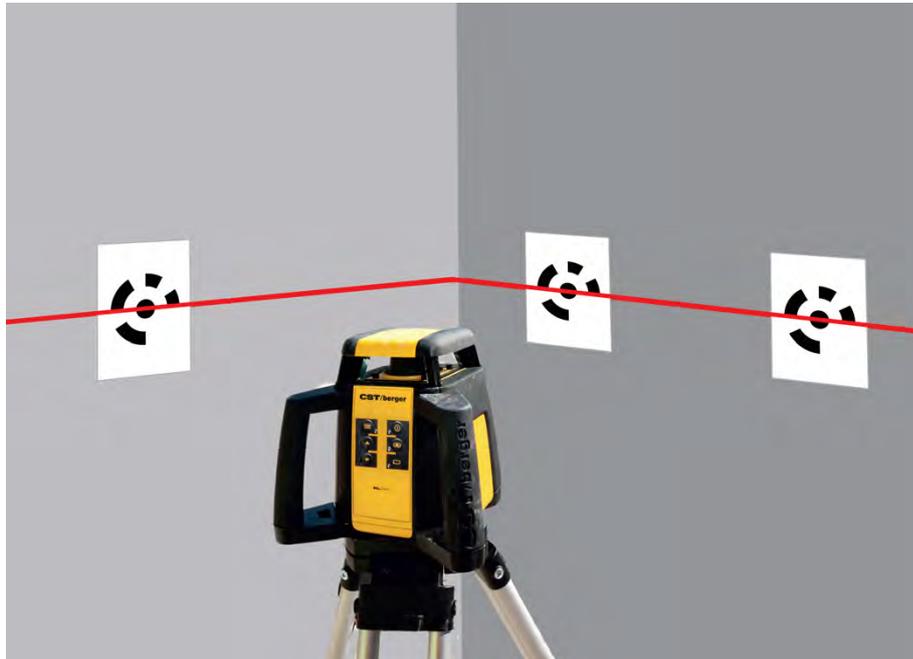


*Abb. 2.3.5-1 Nivellierlatte – Latte mit E-Teilung / Latte mit Strichcode*

Das Gerät wird auf einem Stativ aufgestellt und über eine Dosenlibelle horizontalisiert. Moderne Geräte verfügen meist über einen Neigungskompensator, der das Gerät im Feinbereich automatisch horizontalisiert. Digitale Geräte arbeiten mittels Erfassung einer kodierten Nivellierlatte automatisiert. Die herkömmliche Nivellierlatte lässt sich auf den Zentimeter ablesen. Die Genauigkeit der Erfassung ist vom Gerät und Einsatz abhängig und wird als Standardabweichung in Millimeter pro Doppelnivellement über die Strecke eines

Kilometers angegeben. Das Baunivellier unterliegt der geringsten Genauigkeit gefolgt von Ingenieur- und dem Präzessionsnivellier mit geringster Standardabweichung.

Der selbstnivellierende Rotationslaser projiziert den Schnitt einer Horizontalebene mittels eines über ein rotierendes Prisma oder Spiegel abgelenkten Laserstrahls. Er ist ein sinnvolles Hilfsinstrument, um Referenz- oder Bildmarken in einer Flucht zu positionieren, beispielsweise um das Koordinatensystem eines digitalen Modells nach einer horizontalen Ebene aufgrund eingemessener Bildmarken ausrichten zu können.



*Abb. 2.3.5-2 Rotationslaser und Messmarken, schematisch*

### **2.3.6 Theodolit, Tachymeter und Totalstation**

Diese Geräte werden meist auf einem Stativ über einem definierten Messpunkt aufgestellt. Die exakte Positionierung erfolgt durch Auslotung mittels Senk- oder optischem Lot. In Folge muss das Gerät an der Stativplatte horizontiert werden, um die Stehachse, die vertikale Achse des Messgeräts, auszuloten. Eine genaue Ausrichtung der Stehachse ist Voraussetzung für korrekte Messergebnisse. Zentrierung und Horizontierung müssen zur exakten Ausrichtung einhergehen.

Der Theodolit ist ein Winkelmessinstrument, von dem sich die horizontale Richtung und der Zenitwinkel (Vertikalwinkel) ablesen lassen. Messpunkte werden mit dem integrierten Messfernrohr angepeilt und Messergebnisse von einer Winkelskala abgelesen. Bei elektronischen Geräten werden Ergebnisse optoelektronisch oder elektronisch-magnetisch ermittelt und ausgegeben. Neben dem Standort muss ein weiterer Punkt definiert sein, um die Horizontalrichtung in einem übergeordneten Koordinatensystem festlegen zu können.

Ein Tachymeter ist zusätzlich in der Lage Distanzen zu messen. Moderne Geräte verfügen meist über zwei unterschiedliche Systeme zur Distanzmessung. Der Infrarot-Distanzmesser ist auf Reflektoren zur Ermittlung eines Messergebnisses angewiesen. Ein Laser im sichtbaren Spektrum des Lichts kann zur reflektorlosen Messung sowie bei sehr großen Distanzen unter Zuhilfenahme eines Reflektors eingesetzt werden. Elektronische Geräte dieses Funktionsumfangs werden oft unter der Bezeichnung "Totalstation" geführt. Messergebnisse erfolgen in Form von Polarkoordinaten, Richtungsmessungen werden in Neugrad (Gon)<sup>3</sup> und Längenmaße in Meter ausgegeben und im Feldbuch eingetragen oder in ein digitales Feldbuch übernommen.

Unter Verwendung eines Reflektors lassen sich bei motorisierten Geräten Funktionen wie die automatische Zielerfassung und die Zielverfolgung nutzen. Mittels einer Fernsteuerung kann das Gerät auch von einer einzelnen Person betrieben werden. Ein integriertes elektronisches Feldbuch hilft bei der Auswertung der Messergebnisse. Aktuelle Geräte sind mitunter der Bildverarbeitung mächtig. Eine integrierte Kamera erleichtert das Ausrichten dieser motorisierten Geräte auf bestimmte Bildpunkte einer Aufnahme. Das Bildmaterial dient zugleich als Grundlage für Feldskizzen und als digitales Feldbuch. Gegenüber herkömmlichen Geräten können motorisierte Totalstationen unter anderem eine Menge an Punkten eines Rasters automatisiert ausmessen und realisieren somit eine grobe Flächenaufnahme. Die automatisierte Erfassung von Flächen in hoher Dichte an Messpunkten realisieren sogenannte „Multistationen“ über den Einsatz eines integrierten Laserscanners. Solche Geräte sind in der Anschaffung äußerst kostspielig und erfordern in der Anwendung entsprechende Kompetenz.

---

<sup>3</sup> Ein Vollwinkel von 360° entspricht 400gon.



Abb. 2.3.6-1 Leica Builder Theodolit



Abb. 2.3.6-2 Leica Multistation Nova

Der Einsatz solcher Geräte erfolgt je nach Dichte des Messrasters, Beschaffenheit und Umfang der Bauaufnahme. Die Dichte der erfassten Messpunkte entspricht der Näherung des Aufmaßes an das Original. Aus einem Modell nach photogrammetrischer Ableitung lassen sich selbst nach der Messung weitere Raumpunkte oder Flächenmodelle ermitteln. Soll neben der Ermittlung des Bauaufmaßes der gegenwärtige Zustand dokumentiert werden, bietet sich die Photogrammetrie, nicht zuletzt der umfangreichen Photodokumentation wegen, als nützliches Werkzeug an. Es ist empfohlen, Messungen und Erfordernisse zur photogrammetrischen Auswertung zu koordinieren, um erhobene Daten im ausgewerteten Modell anwenden oder prüfen zu können.

### 2.3.7 Zusammenfassung der Methoden zur Vermessung

Die Kombination der tachymetrischen Vermessung und einhergehende Objektaufnahme durch photogrammetrische Verfahren ist als günstig zu bewerten. Sofern es der Umfang der Bauaufnahme, Maßstab des Objektes und die Genauigkeit erlauben, ist das Laser-Distanzmessgerät als Methode des Handaufmaßes ein kostengünstiges wie leistungsstarkes Werkzeug. Das Gerät kann, in den meisten Anwendungen von einer Person bedient werden und liefert sehr genaue Ergebnisse. Die Schnittstellen moderner Geräte vereinfachen und beschleunigen das Aufnahmeverfahren. Vollständigkeit und Richtigkeit der Daten werden

entsprechend frühzeitig erkannt, Korrekturen folgen bereits vor Ort. Um Messfehler zu vermeiden, empfiehlt sich die Mehrfachmessung und Teilung langer Strecken in Messreihen sowie die Aufnahme von Kontrollmaßen. Mitunter kann sich der ebenfalls kostengünstige Rotationslaser als nützliches Instrument zur Lagebestimmung erweisen. Zur räumlichen Orientierung können aber auch ein Schnurlot oder ein lotrecht justierter Fluchtstab aushelfen.

## **2.4 Qualitätssicherung durch formale und normative Erfordernisse**

Folgender Abschnitt beschreibt, wie sich Normen, Regelwerke und Empfehlungen, als Maßnahmen zur Qualitätssicherung auf die Erstellung photographischer Aufnahmen und deren photogrammetrischer Auswertung anwenden lassen. Es werden Erfordernisse an die Genauigkeit und Qualität von zu ermittelndem Bauaufmaß und Bildmaterial im Rahmen der Photodokumentation aufgezeigt. Während Architekten und Bauingenieure die fachliche Kompetenz zur Beurteilung baulicher Gegebenheiten wie Bausubstanz, Bauschäden oder statischer Kriterien bilden, sind sie in Bezug auf die Erhebung geometrischer Daten mittels moderner Technologien und Verfahren, vor allem jedoch mit dem Umgang entsprechender Geräte, oft nicht ausreichend vertraut. Gleichwohl sind im Zuge der Ermittlung des Bauaufmaßes Ansprüche, im Besonderen hinsichtlich der Genauigkeit, zu erfüllen.

„Eine Bestandsaufnahme hat immer mit größtmöglicher Sorgfalt und damit auch immer genau zu erfolgen. Dennoch ist das Messen auch eine Näherung der vorhandenen Situation. Entscheidend ist die Interpretation der Situation, die der Aufnehmende vorzunehmen hat.“  
(Donath 2008: 33)

Die Photogrammetrie ist im Tätigkeitsbereich des Architekten und Ingenieurs in den meisten Anwendungen als Instrument der Bauaufnahme zu verstehen.

„Die Erfassung und inhaltlichen [*sic*] Aufbereitung der beschreibenden Informationen zur bestehenden Bausubstanz wird als Bauaufnahme bezeichnet.“ (Donath 2008: 2)

“Die Bauaufnahme stellt sich als ein Prozess der Modellbildung dar: Das Original (das Gebäude) wird in eine modellhafte Abbildung überführt.“ (ebd: 7)

Als solche unterliegt die Anwendung photogrammetrischer Methoden hinsichtlich der Erstellung, Nutzung sowie Archivierung der photographischen Aufnahmen und die Genauigkeit der Auswertung der abgeleiteten Geometrie gewissen Richtlinien und Pflichten. Spezifische Erfordernisse der Bauaufnahme, wie zum Beispiel im Rahmen bauhistorischer Untersuchungen und steingetreuer geometrischer Ableitung, definieren die Anwendung der Photogrammetrie in Anforderungen an den Bildmaßstab und Detailauflösung, den Umfang der photographischen Aufnahmen, die Kennzeichnung des Objekts vor Ort oder die

Ermittlung relevanter Aufmaße. Neben der Ermittlung geometrischer Daten wird zur photogrammetrischen Auswertung Bildmaterial mit hoher Informationsdichte erstellt. Die photographischen Aufnahmen können zur Photodokumentation herangezogen werden oder als Produkt der Auswertung in Form von Orthophotos als Bildplan dienen und die Dokumentation ergänzen. Im Zuge der Photodokumentation kann der Architekt und Ingenieur die Fertigung photographischen Materials zur photogrammetrischen Auswertung veranlassen oder eigenständig durchführen. Die Auswertung eines geometrischen Modells muss nicht unmittelbar erfolgen, eine entsprechende Photodokumentation bildet jedenfalls die Grundlage zur photogrammetrischen Auswertung.

#### **2.4.1 Önorm A 6250-1**

Önorm A 6250-1: Aufnahme und Dokumentation von Bauwerken und Außenanlagen.

Die gegenständliche Önorm beschreibt den Umfang der Bauaufnahme, definiert Messgenauigkeit, Toleranz und Bezugssysteme der Bauaufnahme und informiert über Gestaltung und Notwendigkeit einer Photodokumentation.

„Die Önorm A 6250-1 regelt die erforderlichen Inhalte, Genauigkeiten und Aufnahmedichten der Bestandsaufnahmen von Bauwerken und Außenanlagen in Form von Daten, Aufmaßunterlagen, Skizzen, Listen, Fotos, Scandokumenten u. dgl. entsprechend dem angestrebten Verwendungszweck.“ (Önorm 2013: 3)

Für die Messgenauigkeit der, im Umfang beschriebenen, Aufnahmedichten „[...]sind maximale Messabweichungen von 10 mm zulässig. Für Bestandsdokumentationen mit höheren Genauigkeitsanforderungen als 10 mm sind gesonderte Vereinbarungen zu treffen.“(ebd: 4)

Die Photogrammetrie ist ein exaktes Verfahren. Bei fachgerechter Anwendung und präzisen Messungen zur Anwendung in Folge der Auswertung dreidimensionaler Geometrie ist die von der Önorm A 6250-1 geforderte Genauigkeit von 10 mm, aber auch geringer, realisierbar. „Für natürliche Landschaften bei Außenanlagen gilt es eine Messabweichung von 100 Millimeter einzuhalten.“ (vgl. ebd)

Die Aufnahmedichte beschreibt den „Detailierungsgrad der Aufnahme, wobei die Aufnahmedichte inhaltlich von A bis D aufbauend und ansteigend ist.“(ebd)

Die Aufnahmedichte deklariert den Umfang der Aufnahme von Aufnahmeelementen. Aufnahmeinhalte sind in der Önorm A 6250-1 in drei Bereiche untergliedert. Diese Bereiche umfassen „allgemeine Angaben“, wie den Aufnahmezeitpunkt oder Objektdaten, „Elemente von Außenanlagen“, wie beispielsweise Bäume, befestigte Flächen, Einfriedungen, Fassadengliederung oder Fassadenelemente sowie „Objekte“, wie beispielsweise

Außenwände, nicht tragende Wände, Fenster, Türen oder Treppen. Die Aufnahmedichte gibt an, in welchem Umfang ein Aufnahmeelement beschrieben werden soll.

Aufnahmeelement	Aufnahmedichte			
Aufnahmeelement	A	B	C	D
3.10:  Fenster (öffnbare Elemente, Fixverglasungen, Lichtbänder, unabhängig von der Lage in Außen oder Innenwänden)	Lage (Achse)	Lage (Achse), Architekturlichte, Fertigparapethöhe, Sturzunterkante, Leibungsbreite und -tiefe, Brandklasse	Lage (Achse), Architekturlichte, Fertigparapethöhe, Sturzunterkante, Leibungsbreite und -tiefe, Brandklasse, Lage der Fenster und Fensterunterteilungen, Oberlichte, Öffnungsart (Drehflügel, Kippflügel, Klappflügel u. dgl.), Konstruktionsart (Kastenfenster u. dgl.), Materialien, Glasart	Lage (Achse), Architekturlichte, Fertigparapethöhe, Sturzunterkante, Leibungsbreite und -tiefe, Brandklasse, Lage der Fenster und Fensterunterteilungen, Oberlichte, Öffnungsart (Drehflügel, Kippflügel, Klappflügel u. dgl.), Konstruktionsart (Kastenfenster u. dgl.), Materialien, Glasart, Beschläge inklusive Materialien, Widerstandsklasse bei Einbruch

*Tabelle 1: Auszug über Angaben zur Aufnahmedichte nach Aufnahmeelement laut Önorm A 6250-1*

Das Bundesdenkmalamt empfiehlt in der Publikation „Standards der Baudenkmalpflege“ (vgl. 2.4.2) hinsichtlich bauhistorischer Untersuchungen eine Aufnahmedichte der Klasse C oder D. Aufnahmegegenstand sind „Objekte, Bauwerke und Außenanlagen, die im Zuge einer örtlichen Begehung erhoben werden.“ (ebd: 3)

Im Rahmen einer Photodokumentation empfiehlt die Önorm A 6250-1 (2013: 4), die Bilddateien fortlaufend zu nummerieren und Standort und Aufnahmerichtung der photographischen Aufnahmen in einem zugehörigen Plandokument gemäß der Block und Symbolgrafik nach Önorm A 6240-4 zu definieren.“(vgl. ebd: 4)

In Folge der photogrammetrischen Auswertung eines Mehrbildverbandes werden Position und Orientierung der Aufnahmen ermittelt und im dreidimensionalen Raum verortet. Die Erfordernisse einer Dokumentation der Orientierung der Aufnahmen einer umfangreichen Bildstrecke werden somit über die photogrammetrische Auswertung selbst erfüllt. Sofern erforderlich, können die Aufnahmestandpunkte mit eindeutiger Orientierung auch in ein Plandokument übernommen werden. Wird eine Kamera mit integriertem GPS (Global Positioning System) verwendet, finden sich Informationen zur Position auch in den Exif<sup>4</sup>-

<sup>4</sup> Exchangeable Image File Format, enthält Metadaten (Nutzdaten) zur photographischen Aufnahme

Daten des entsprechenden Bildes und bleiben dort archiviert oder können separat gesichert werden. Zur Überführung des digitalen Modells des Aufnahmeobjekts vom Projekt-Koordinatensystem in ein übergeordnetes Koordinatensystem empfiehlt die gegenständliche Önorm „Ausgangspunkte“ zu definieren.

„Ausgangspunkte können einen Verweis auf Punkte, die in Gauß-Krüger-Koordinaten angegeben sind, oder festgelegte Punkte an geschossübergreifenden Bauteilen sein. Weiteres ist ein Richtungsvektor (Nord) festzulegen. Darüber hinaus ist die Darstellung direkt im Gauß-Krüger-Koordinatensystem<sup>5</sup> optional möglich.“ (ebd)

„Für die spätere planliche Darstellung sind absolute Bezugspunkte als Ausgangspunkte für die weiteren Vermessungen zu definieren.“ (ebd)

Ausgangspunkte können zur Verdeutlichung durch Mess- oder Bildmarken gekennzeichnet werden, zwei Messmarken können einen Richtungsvektor definieren. Verortete Messpunkte bieten sich als Passpunkte zur Aufnahme des Objekts an. In der Regel ist davon auszugehen dass Projekte, die in ein übergeordnetes Koordinatensystem überführt werden, von entsprechendem Maßstab sind und die Vermessungsarbeiten von einem Geodäten ausgeführt oder begleitet werden. Die Önorm A 6250-1 unterscheidet im Rahmen der Photodokumentation zwischen inhaltlichen Anforderungen der photographischen Dokumentation von Außenanlagen und Objekten, Außen- und Innenaufnahmen von Bauwerken, die grundsätzlich zu erbringen sind, und „[...] Anforderungen an die historische und Bauschadensdokumentation [...]“, welche „[...] gesondert beauftragt werden muss.“ (ebd: 20)

Die Aufnahme von Außenanlagen und Außenaufnahmen des Bauwerks umfassen unter anderem Panoramaaufnahmen des Geländes oder Aufnahmen der Ansichtsfronten. Ansichtsfronten und weitläufige Ansichten können nach photogrammetrischer Auswertung als Orthophoto (Bildplan) gefertigt werden.

Formale Kriterien der Photodokumentation wie Dateiformat, Bildauflösung, Exif-Informationen oder GPS-Angaben, sind laut Önorm A 6250-1, mit dem Auftraggeber abzustimmen. (ebd: 5)

#### **2.4.2 Standards der Baudenkmalpflege**

Das Bundesdenkmalamt Österreich hat 2014 in erster Auflage ein „Nachschlagewerk“ mit dem Titel „Standards der Baudenkmalpflege“ veröffentlicht. Abschnitt „A.1“ dieser Publikation handelt die „Bestandsaufnahme und historische Erhebung“ ab.

---

<sup>5</sup> entspricht dem Österreichische Bundesmeldenetz (BMN)

In Bezug auf bauhistorische Dokumentation und Grundlage „für Planung von Erhaltungs- und Veränderungsmaßnahmen am Baudenkmal“ wird die Bauaufnahme als „Bestandteil der Erfassung und Erforschung (Inventarisieren), Grundlage für Maßnahmen zur Erhaltung (Restaurieren) und Ausgangspunkt zur Planung von Veränderungen (Adaptieren) [...]“ verstanden. (BDA 2014: 19)

Die Aufnahme eines „verformungsgerechten Bauaufmaßes“ zur „wirklichkeitsgetreuen Bestandsaufnahme“ wird als Planungsgrundlage empfohlen. (vgl. ebd: 20)

„Eine vollständige Bauaufnahme umfasst ein Bauaufmaß, einen Bericht und eine Fotodokumentation.“ (ebd: 21)

Die Photogrammetrie entspricht den Erfordernissen der bauhistorischen Untersuchung als berührungslose Methode der Bauaufnahme. Das Verfahren lässt ein „verformungsgerechtes Bauaufmaß“ ableiten und kann mit dem hohen Informationsgehalt des umfassenden photographischen Materials auch Ansprüche an die Photodokumentation erfüllen.

„Für Bauaufmäße, deren Genauigkeitsanforderungen historischen Bauten gerecht werden können, haben sich digitale Vermessungsverfahren durchgesetzt (Tachymetrie, Photogrammetrie, Matching-Verfahren, Laserscanning).“ (ebd: 24)

Für bauhistorische Aufgabenstellungen (Bauanalyse, Schadenserhebung, Adaptierungsplanung) haben sich verformungsgerechte Bauaufnahmen als Konturdarstellung in definierten Schnittebenen im Detaillierungsmaßstab 1:50 (Grundrisse, Schnitte, Ansichten) mit einer Genauigkeit von +/- 2,0 cm (Genauigkeitsstufe 2 oder höher; ÖNORM A 6250/2001) und entsprechender Informationsdichte (III oder höher; ÖNORM A 6250/2001 bzw. Aufnahmedichte C-D; ÖNORM A 6250-1/2013) bewährt. (ebd: 25)

Die in der Publikation erwähnte Önorm A 6250/2001 wurde 2013 durch die in Abschnitt 2.4.1 angeführte Önorm A 6250-1 ersetzt. Der Anspruch an die Messgenauigkeit ist nach Önorm A 6250-1 für alle Aufnahmedichten mit 10 Millimeter festgelegt. Genauigkeitsstufen werden nicht mehr deklariert.

„Bei der Verwendung von Bildplänen (Messbild, Entzerrung, Orthofoto) [...]“, die Produkt der photogrammetrischen Auswertung sein können“[...] hat sich für bauhistorische Aufgaben eine entzerrte fotografische Abwicklung mit einer Bildauflösung von 300 bis 400 dpi<sup>6</sup> im Verwendungsmaßstab 1:50 bewährt“. (ebd: 25)

In der Durchführung bauhistorischer Untersuchungen ist die Fertigung entsprechenden photographischen Materials zur photogrammetrischen Auswertung sehr zu empfehlen. Die unmittelbare Verarbeitung der Aufnahmen muss nicht erfolgen, die Anlage eines entsprechenden Archives kann sich zu einem späteren Zeitpunkt als nützlich und wertvoll erweisen. Das Bundesdenkmalamt empfiehlt, bezugnehmend der digitalen Gestaltung und

---

<sup>6</sup> dots per inch, Angabe über die Auflösung in Druck und Wiedergabe auf Anzeigegeräten.

Archivierung, Einzelbildbeilagen in den Dateiformaten „TIFF<sup>7</sup>“ oder „JPEG<sup>8</sup> (2000)“ zu sichern. (vgl. *ebd*: 22)

Hinsichtlich der Gestaltung eines Bildarchives zur photogrammetrischen Auswertung ist zu beachten, die Aufnahmen nicht komprimiert oder mittels verlustfreier Kompression und maximaler Farbtiefe (vgl. *Kapitel 4.12*) zu sichern. Zudem ist zu empfehlen, die Bildauflösung der gefertigten Photographien zugunsten geringer Dateigrößen nicht zu reduzieren. Das Bildmaterial soll möglichst unverändert archiviert werden. Verlustbehaftete Verfahren können zur Ausbildung von Unschärfe und Artefakten im Bild führen. Bildmaterial, welches dieser digitalen Manipulation unterliegt, eignet sich nicht zur photogrammetrischen Auswertung. Hinsichtlich der Kompatibilität und Leistung ist das Rasterbildformat „TIFF“ zu bevorzugen.

### **2.4.3 DIN 18710, Ingenieurvermessung**

Das Regelwerk der DIN 18710, des DIN (Deutsches Institut für Normung), erfasst die Ingenieurvermessung in vier Teilen. Die Normenreihe beschreibt im ersten Teil allgemeine Anforderungen an den Umfang des Messprogramms, die Messgenauigkeit, die Ausführung, Auswertung und Dokumentation der Vermessungsarbeiten. Die Messgenauigkeit wird für Lage sowie Höhenvermessungen in fünf Klassen definiert (*Tabelle 2*). Sie entspricht der „qualitativen Bezeichnung für das Ausmaß der Annäherung eines Messergebnisses an den gesuchten Wert [...]“ (*DIN 18710-1: 2010: 15*)

---

<sup>7</sup> Tagged Image File Format

<sup>8</sup> Dateiformat nach Definition der „Joint Photographic Experts Group

Klasse	Standardabweichung $\sigma_L$ bei Lagevermessungen	Standardabweichung $\sigma_H$ bei Höhenvermessungen	Bemerkung
L1	$50 \text{ mm} < \sigma_L$	$20 \text{ mm} < \sigma_H$	Sehr geringe Genauigkeit
L2	$15 \text{ mm} < \sigma_L \leq 50 \text{ mm}$	$5 \text{ mm} < \sigma_H \leq 20 \text{ mm}$	Geringe Genauigkeit
L3	$5 \text{ mm} < \sigma_L \leq 15 \text{ mm}$	$2 \text{ mm} < \sigma_H \leq 5 \text{ mm}$	Mittlere Genauigkeit
L4	$1 \text{ mm} < \sigma_L \leq 5 \text{ mm}$	$0,5 \text{ mm} < \sigma_H \leq 2 \text{ mm}$	Hohe Genauigkeit
L5	$\sigma_L \leq 1 \text{ mm}$	$\sigma_H \leq 0,5 \text{ mm}$	Sehr hohe Genauigkeit

Tabelle 2: Klassifizierung der Messgenauigkeit nach DIN 18710-1

Dabei gilt nach DIN 18710-1, dass die Standardabweichung  $\sigma_L$  bei Lagevermessungen in Richtung einer Koordinatenachse zu verstehen ist.

„Die Standardabweichungen für Lage- und Höhenvermessungen mittlerer Genauigkeit (Klasse L3 und H3) sind derart festgelegt, dass sie mit den bei Ingenieurvermessungen üblichen Messverfahren zu erreichen sind, sofern das Messobjekt keine ungewöhnlichen Besonderheiten aufweist.“ (ebd: 10)

Neben der Beschreibung des Messobjektes und der Festlegung zur Messgenauigkeit, soll auch ein einheitliches Bezugssystem zur Lagebestimmung von Punkten definiert werden.

Teil zwei der vorliegenden DIN „[...] gilt für Planung, Durchführung, Auswertung und Dokumentation von Aufnahmevermessungen.“ (DIN 18710-2: 2010: 4) Dem Aufnahmepurpose werden an dieser Stelle (Tabelle 3) Genauigkeitsklassen zugeordnet.

Aufnahmepurpose	Genauigkeitsklasse nach DIN 18710-1	
	Lage	Höhe
Topographischer Bestandsplan	L1/L2	H1/H2
Straßenbestandsplan	L2/L3	H2/H3
Aufbau von Gebäudeinformationssystemen	L2	H2
Fassaden-Kartierungen für Stadtgestaltung u. Denkmalschutz	L3	H2
Abrechnung von Bauleistungen und -massen	L2	H2
Prüfung d. Maß- u. Passgenauigkeit von Bauteilen (Qualitätskontrolle)	L4	H4
Beweissicherung	L4	H4
Passgenaue Vorfertigung von maschinen-/anlagetechnischen Bauteilen	L4/L5	H4/H5

Tabelle 3: Genauigkeitsklassen in Abhängigkeit vom Zweck der Aufnahme nach DIN 18710-2

Das Messprogramm soll die Anforderungen an die Durchführung und Auswertung definieren. Das Messobjekt soll in diesem Rahmen im Aufnahmeumfang beschrieben werden. Ein Bezugssystem und die Genauigkeitsklasse müssen festgelegt werden. Zur

Erfüllung der Messgenauigkeit sollen die Messinstrumente und die Qualifikation des Fachpersonals deklariert werden.

## 2.5 Genauigkeit der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie

„[...] Genauigkeit ist ein Qualitätswert, der erst nach Vergleich mit einem übergeordneten und unabhängigen Referenzwert entsteht. In der Photogrammetrie wird Genauigkeit jedoch auch für Präzision oder Messunsicherheit verwendet [...].“ (Luhmann 2010: 538)

Die photographische Aufnahme eines dreidimensionalen Objektes führt zum Verlust der Tiefeninformation über das Objekt. Es gilt, die Lage von Objektpunkten anhand von mindestens zwei Aufnahmen im Rahmen der Stereobildaufnahme (vgl. 3.2) mit bekannter Kameraposition oder drei Aufnahmen im Rahmen der Mehrbildphotogrammetrie (vgl. 3.3) zu rekonstruieren. Adäquat belichtetes und scharfes Bildmaterial sind Voraussetzung der photogrammetrischen Auswertung. Zur Rekonstruktion eines Objektes müssen Objektpunkte eindeutig identifizierbar sein. Der kleinste Teil eines digitalen Abbildes ist das Pixel. Wird ein Objektmerkmal nicht innerhalb mindestens eines Pixels abgebildet, kann es infolge der photogrammetrischen Auswertung nicht rekonstruiert werden. Generell muss ein Objektmerkmal 2 bis 10 Pixel belegen, um einer Auswertung zu genügen (vgl. Luhmann 2010: 532) Kann ein Objektpunkt auf mehreren Abbildungen identifiziert werden, erfolgt seine räumliche Rekonstruktion im Subpixelbereich. In der Regel registrieren aktuelle Anwendungen Objektpunkte mit einer Genauigkeit im Bereich eines Drittels eines Pixels oder genauer. (vgl. Day 2010) Durch kodierte Mess- oder Bildmarken signalisierte Punkte können mit einer Genauigkeit von bis zu  $\frac{1}{50}$  eines Pixels rekonstruiert werden. (vgl. Luhmann 2010: 449)

Die photogrammetrische Auswertung eines Bildverbandes infolge der Bündelausgleichung ist ein iteratives Verfahren und unterliegt somit immer einer Standardabweichung. Je mehr Aufnahmen einen spezifischen Objektpunkt abbilden, umso genauer lässt sich dieser räumlich zuordnen. Der Einsatz von Bild- und Messmarken und die Auswertung solcher signalisierten Punkte mittels Software-Lösungen, die markierte Punkte automatisiert erfassen, steigert die Genauigkeit der geometrischen Rekonstruktion und ist zugleich der „Simultan- oder Selbstkalibrierung“ der Kamera dienlich. Das Bildmaterial kann anhand solcher Passpunkte sehr genau zugeordnet werden. Zudem können erhobene Maße über signalisierte Punkte mit größter Präzision am digitalen Modell gepflegt werden.

„Die Angabe von Subpixelkoordinaten ist dann möglich wenn die Lage eines Objektpunktes über mehrere Pixel interpoliert werden kann.“ (ebd: 379)

Im Aufgabenfeld der SfM<sup>9</sup>-Architekturphotogrammetrie findet die Messkamera<sup>10</sup> kaum noch Anwendung. Solche Gerätschaften finden vor allem in der Luftbildphotogrammetrie oder im Rahmen industrieller Prüfungen wie baumechanischen Untersuchungen (vgl. 2.8.4) Anwendung. Diese Arbeit untersucht den kostengünstigen und möglichst einfachen Zugang zur Mehrbildphotogrammetrie und sieht davon ab, solche Systeme, deren Leistung und den fachgerechten Umgang zu erläutern.



Abb. 2.5-1 Luftbildkamera Leica



Abb. 2.5-2 Industrielles Multikamerasystem

Der Gebrauch verhältnismäßig kostengünstiger handelsüblicher Kameras und die automatisierte Auswertung dieser Technologie machen das Verfahren attraktiv. Die innere Orientierung der Kamera wird nach Analyse des Bildverbandes nach der Bündeltriangulation oder Bündelausgleichung ermittelt. Mittels dieses Verfahrens werden die Strahlenbündel, die vom Augpunkt, dem Projektionszentrum (vgl. 3) einer Aufnahme ausgehen, Bildpunkte der Aufnahme und schließlich korrespondierende Objektpunkte schneiden, über eine Anzahl an Aufnahmen (Strahlenbündel), ausgerichtet, um die räumliche Position und Orientierung der Kamera (äußere Orientierung) zu bestimmen.

Der Genauigkeitsgewinn durch Steigerung der Bildzahl über einen Objektbereich ist in erster Linie der Ermittlung der inneren Orientierung zuträglich. (vgl. Luhmann 2010: 531)

Wird das Kamerasystem kalibriert, stehen zur Auswertung wesentliche bestimmte Größen zur Verfügung. Sofern die Software die Anwendung eines kalibrierten Kameraprofiles des Aufnahmesystems erlaubt, ist dies der Genauigkeit der Auswertung zuträglich. Je genauer

<sup>9</sup> Structure from Motion ... photogrammetrische Auswertung anhand eines Bildverbandes

<sup>10</sup> Photogrammetrische Kamera mit stabilem Aufbau und kalibrierten Kenngrößen

das Objekt (Referenzmaße, Anzahl der Abbildungen) und die Aufnahmen (kalibriertes Kameraprofil) definiert werden können, umso präziser erfolgt die Rekonstruktion. Der Anspruch an die Genauigkeit des photogrammetrischen Verfahrens wird grundsätzlich von den Spezifikationen des Kamerasystems, der Optik sowie Kenngrößen aus der Kalibrierung des Kamerasystems definiert. Wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit nehmen vor allem der gewählte Bildmaßstab und die Anzahl, Orientierung und räumlicher Versatz (Basis) der einzelnen Aufnahmen. Mit zunehmender Anzahl von photographischen Aufnahmen und identifizierter Objektpunkte steigt die Genauigkeit der Bestimmung innerer und äußerer Orientierung der Kamera sowie die Lagebestimmung der Objektpunkte. Die „innere Orientierung“ beschreibt das Kameramodell über die Lage des Augpunktes „O“ (Projektionszentrum) und den Hauptpunkt „H“, dem Lotfußpunkt des Projektionszentrums (vgl. 3), sowie die Brennweite „c“ und die optischen Verzeichnungen (vgl. 4.3.5) der eingesetzten Optik. Die „äußere Orientierung“ definiert die Lage und Orientierung der Kamera im Raum.

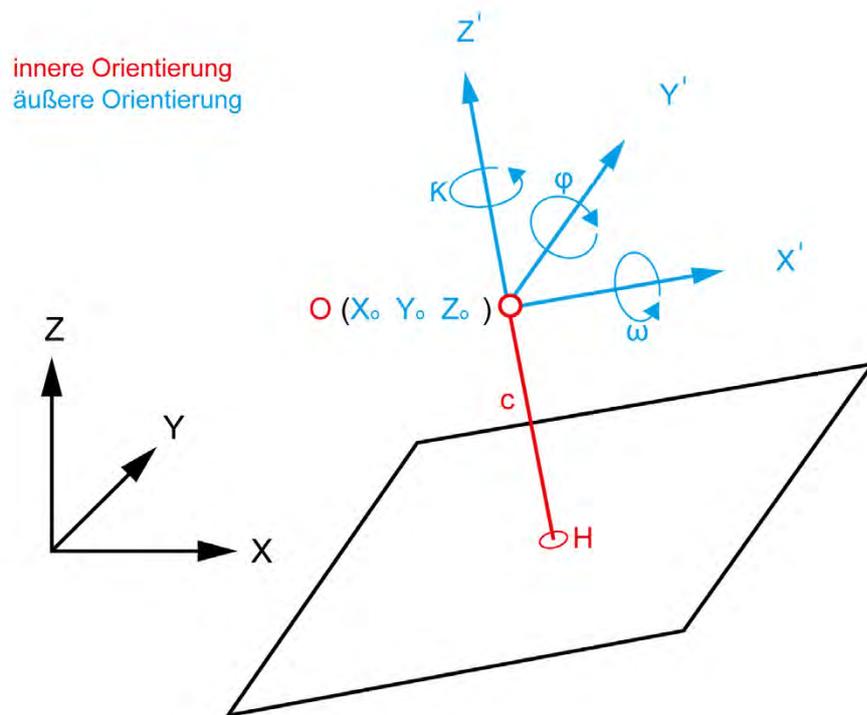


Abb. 2.5-3 innere und äußere Orientierung

Schließlich unterliegt die Genauigkeit auch den Prozessen der Bildverarbeitung und der Auswertung durch entsprechende Software sowie der Messgenauigkeit und Anzahl erhobener Maße zur Definition des zu rekonstruierenden Objektes.

„Besondere Bedeutung kommt in jedem Fall der Aufnahmekamera zu, da mit ihr nicht nur Qualität der Bilderfassung und Bildauswertung, sondern durch Wahl des Objektivs auch Abbildungsmaßstab und Aufnahmeanordnung entscheidend bestimmt werden.“

*(Luhmann 2010: 530)*

Um eine, dem Verwendungszweck angemessene Genauigkeit zu erzielen, muss das Aufnahmesystem, der Bildwinkel des Objektivs und der Bildmaßstab der Aufgabe entsprechen.

„Der Bildmaßstab  $M_b$  ist das Verhältnis von Brennweite (der Kamerakonstante „c“) zur Entfernung des Objekts (h), beziehungsweise das Verhältnis einer Strecke X zur entsprechenden Strecke x' im Bildraum sofern X parallel zu x' ist.“ Die Bildmaßstabszahl ist der Kehrwert des Bildmaßstabes und errechnet sich wie folgt.

*(vgl. Luhmann 2010: 134)*

$$\text{Bildmaßstabszahl } m_b = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'} = \frac{1}{M_b}$$

Je kleiner der Bildmaßstab, desto grösser die Messunsicherheit anhand der Daten der photogrammetrischen Auswertung.

### **2.5.1 Die Genauigkeit ebener Geometrie**

Die Genauigkeit „ebener Geometrie“ entspricht der Genauigkeit gegenüber Objektpunkten auf Flächen, die in möglichst steilem Winkel, bestenfalls normal, zur Aufnahmerichtung stehen. Dies gleicht beispielsweise der Aufnahmeanordnung der Aerophotogrammetrie, der Aufnahme einer Fassade als Stereobildpaar oder einem gleichgerichteten Bildverband. Eine solche Aufnahmeanordnung mit parallelen Aufnahmerichtungen wird als „Normalfall“ bezeichnet (Abb. 2.5.1-1)

Ist der Bildmaßstab ( $M_b$ ) bekannt und die Genauigkeit der Messung am Objekt ( $s_x$ ) definiert, kann die Bildmessgenauigkeit ( $s_{x'}$ ) bestimmt werden.

$$\text{Bildmessgenauigkeit } s_{x'} = \frac{s_x}{m_b}$$

Unter gegebenem Bildmaßstab zeichnet sich die Projektion der Objektmessgenauigkeit auf dem Kamerasensor als Bildmessgenauigkeit ab.

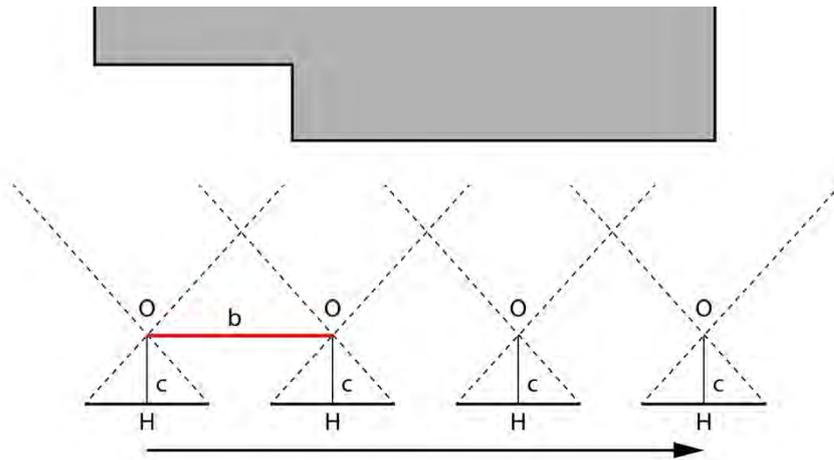


Abb. 2.5.1-1 Normalfall

[Beispiel 1] Aus der Aufnahmedistanz von zehn Meter und dem Einsatz eines Objektivs mit einer Brennweite von 50 Millimeter ergibt sich ein Bildmaßstab  $M_b = \frac{50}{10000}$  von 1:200. Der geforderte Anspruch an Genauigkeit  $s_x$  soll einen Millimeter betragen. Es resultiert eine Bildmessgenauigkeit  $s_x' = \frac{1}{200}$  von fünf Mikrometer. Einem Millimeter am Objekt entsprechen somit 0,005 Millimeter (5 Mikrometer) am Kamerasensor.

Ein Pixel ist der kleinste Teil einer digitalen photographischen Aufnahme. Punkte innerhalb des Abbildungsfeldes eines Pixels können somit nicht mehr eindeutig dargestellt werden. Praktisch muss sich ein Objektpunkt als Merkmal über mehrere Pixel abzeichnen, um nach dem Prozess der Merkmalsanalyse (vgl. 3.3) verarbeitet werden zu können. Über die Bildmessgenauigkeit kann das Kamerasystem nach den Anforderungen an den Bildmaßstab bewertet werden. Gegebenenfalls muss dieser angepasst werden.

Doch lässt sich das Auflösungsvermögen (vgl. 4) einer Kamera nicht über die Größe eines Pixels bestimmen. Die Detailwiedergabe ist von einer Summe von Faktoren abhängig, die die photographische Aufnahme beeinflussen und wird primär nicht über die nominelle Auflösung eines Bildsensors, sondern maßgeblich durch die Optik und Größe des Sensors bestimmt.

„Das Auflösungsvermögen AV wird visuell gemessen und in Anzahl Linien pro Millimeter (L/mm) bzw. Linienpaare pro Millimeter (Lp/mm) oder auch in dots per inch (dpi) angegeben. Es beschreibt die Fähigkeit der Detailwiedergabe eines Sensors [...]. Die am Objekt auflösbare Strukturgröße (Strukturauflösung)  $\Delta X$  wird berechnet aus Bildmaßstab und Auflösungsvermögen nach

$$\Delta X = m_b \cdot \frac{1}{AV}$$

“ (Luhmann 2010: 122)

Die Untersuchung der Auflösungsgrenze eines Kamerasystems erfordert ein Testfeld wie den „ISO 12233 Test Chart“, eine Linientafel oder andere Darstellungen zur Bestimmung der Auflösungsgrenze. Solche Tafeln stellen hohen Anspruch an den Druck und können mit herkömmlichen Druckern kaum reproduziert werden. Die Untersuchung der Auflösungsgrenze des Kamerasystems erscheint im Tätigkeitsfeld des Architekten und Ingenieurs als unrealistisch, kann jedoch über Internetplattformen erhoben werden.

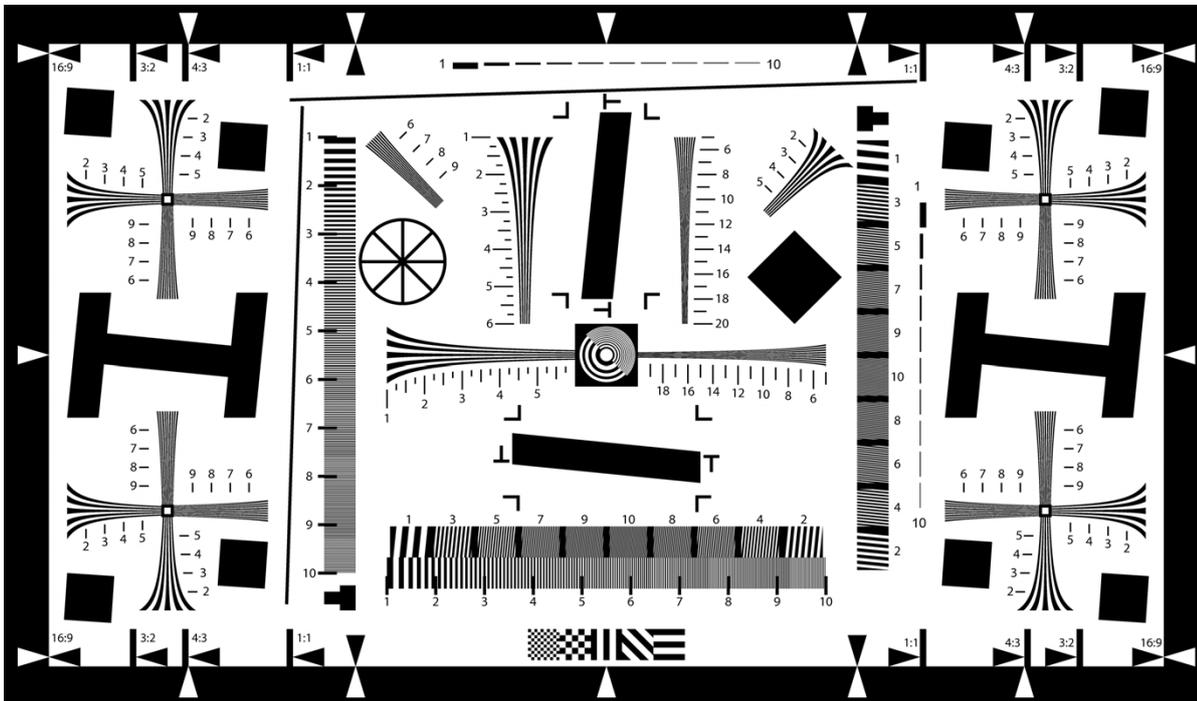


Abb. 2.5.1-2 Target ISO 12233 Test Chart

Die Bildmessgenauigkeit kann durch Platzierung eines Gliedermaßstabes oder Messbandes am Aufnahmeobjekt anhand der Bildvorschau der Kamera beurteilt werden. Gilt es eine Genauigkeit  $s_x$  von einem Millimeter einzuhalten, so sollte dieses Maß am platzierten Messstab oder –band am Bild identifizierbar sein. Unterschreitet die Bildmessgenauigkeit  $s_x'$  das Auflösungsvermögen eines Sensors einer Digitalkamera, kann der Anspruch an die geforderte Genauigkeit nicht erfüllt werden. Aufgrund der ermittelten Bildmessgenauigkeit muss der Bildmaßstab über die Distanz zum Aufnahmeobjekt oder die Wahl einer entsprechenden Brennweite so gewählt werden, dass das kleinste zu erfassende Objektmerkmal deutlich abgebildet ist.

„The choice of focal lengths has a direct influence on the number of acquisition and the resolution of the final point cloud, therefore is [sic] always better to know in advance the final geometric resolution needed for the final 3D product.“ (Pierrot-Deseilligny et al. 2011)

Ein Modell aus photogrammetrischer Auswertung kann in Bereichen mit erhöhten Anforderungen an Detailauflösung um Daten aus Aufnahmen größeren Bildmaßstabes ergänzt werden. Je nach Software-Lösung können diese Daten im Rahmen der Verarbeitung des gesamten Projektes ausgewertet werden oder erfolgen als separate Rekonstruktion. Modellbereiche aus verschiedenen Datensätzen können zu einem Modell zusammengefügt werden. Diese Praxis ist im Bereich des Laserscanning üblich.

### 2.5.2 Die räumliche Genauigkeit

Gegenüber der Luftbild- oder Aerophotogrammetrie erweisen sich Aufnahmeobjekte im Feld der Nahbereichs- oder Architekturphotogrammetrie oft als räumlich komplexe Körper. Der Anspruch an die Genauigkeit muss im gleichem Maß einer weiteren Dimension genügen. In eine Berechnung zur erreichbaren Objektgenauigkeit  $s_x$  fließen folglich auch Faktoren wie der Design-Faktor „q“ (vgl. *Luhmann*) ein. Dieser Faktor beschreibt die Qualität hinsichtlich der Schnittgeometrie der Flächen eines Objektes und den Strahlen einer Aufnahme. Der Design-Faktor geht wie folgt in die Berechnung der erreichbaren Objektgenauigkeit  $s_x$  ein:

$$s_x = q \cdot m_b \cdot s_{x'} = \frac{q_D}{\sqrt{k}} \cdot m_b \cdot s_{x'}$$

„Der Design-Parameter  $q_D$  beschreibt im Wesentlichen die Schnittgeometrie der Aufnahmeordnung;  $k$  definiert die mittlere Bildanzahl pro Aufnahmestandort. Im Standardfall der Praxis ist  $k=1$  und  $q_D = q$ .

Für den Design-Faktor  $q$  können in der Praxis Werte zwischen 0.4-0.8 (sehr gutes Aufnahmenetzwerk, z.B. Rundum-Verband [...]) bis zu 1.5-3.0 und schlechter (schwache Stereokonfiguration [...]) erreicht werden.“ (*Luhmann 2010: 138*)

Je steiler der Schnittwinkel zwischen Objektfläche und Aufnahmerichtung, umso günstiger gestaltet sich das Aufnahmenetzwerk (die Aufnahmeordnung des Bildverbandes) und umso präziser erfolgt die Rekonstruktion. Geht man vom „Normalfall“, einem gleichförmig und normal zur Objektgeometrie orientierten Bildverband oder einem Stereobildpaar (zwei gleichgerichtete Aufnahmen nach dem Normalfall) aus, ist für Flächen in flachem Winkel zur Aufnahmerichtung eine geminderte Genauigkeit zu erwarten.

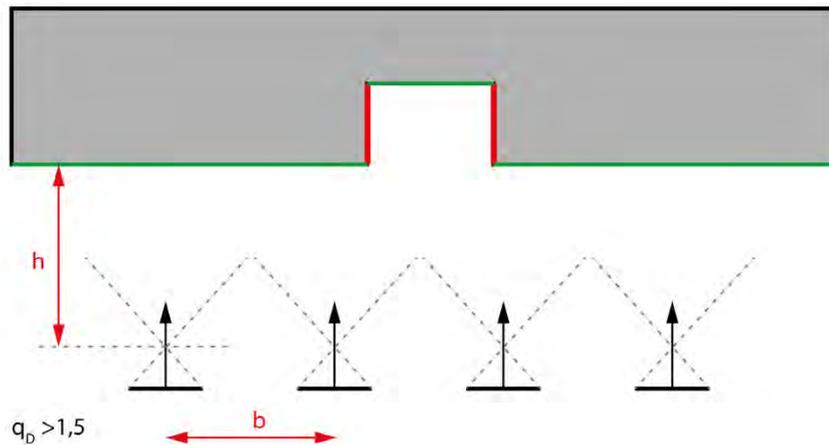


Abb. 2.5.2-1 geminderte Messgenauigkeit in Aufnahme­richtung

„Wenn das Objekt nicht von verschiedenen Seiten her erfasst wird, können sich die Objektgenauigkeiten in Aufnahme­richtung von denen quer dazu deutlich unterscheiden. So wird die erreichbare Genauigkeit in Aufnahme­richtung Z bei einer normalen Stereoaufnahme [...] abgeschätzt mit:

$$s_z = m_b \cdot \frac{h}{b} \cdot s_{px'}$$

„( ebd.)

Wobei „h“ den Aufnahmeabstand und „b“ die Basis, den Versatz der beiden Kamerastandorte der Aufnahmen repräsentieren. Für die Parallaxengenauigkeit<sup>11</sup>  $s_{px'}$  einer stereoskopischen Messung gilt (nach Luhmann) :

$$s_{px'} = s_x \cdot \sqrt{2}$$

[Beispiel 2] Aufbauend auf Beispiel 1 gelten für die Bildmaßstabszahl  $m_b = 200$ , den Aufnahmeabstand  $h = 10\text{m}$  und die geforderte Genauigkeit  $s_x = 1\text{mm}$ . Für die Basis  $b$  werden 3 Meter angenommen.

Nach  $s_z = m_b \cdot \frac{h}{b} \cdot s_{px'}$  ergibt sich eine Messgenauigkeit in Z-Richtung (normal zur Bildebene) von 3,33 Millimeter gegenüber der angestrebten Genauigkeit von einem Millimeter in XY-Richtung (parallel zur Bildebene).

Entsprechend orientierte Aufnahmen beeinflussen den Design-Faktor „q“ und verbessern die Ergebnisse der Rekonstruktion.

Bei einem Anspruch an die Genauigkeit von einem Millimeter muss die Aufnahmeanordnung der Morphologie des Objekts auch in Z-Richtung angepasst werden.

<sup>11</sup> Parallaxe: Verschiebung von Bildkoordinaten homologer Bildpunkte zwischen zwei Aufnahmen im Normalfall.

Optimal gestaltet sich die Aufnahme entsprechend den geometrischen Erfordernissen des Objektes in konvergenten Aufnahmen und zusätzlichen Aufnahmen von Teilflächen der Objektiefe möglichst parallel zur Bildebene. Es gilt, schleifende Strahlenschnitte (flacher Winkel des Strahles optischen Achse zur Objektfläche) zu vermeiden oder durch zusätzliche Aufnahmen geeigneter Orientierung zu ergänzen.

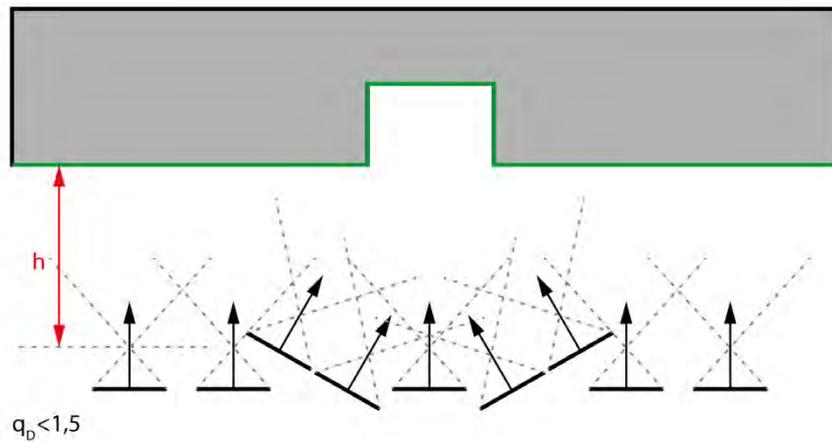


Abb. 2.5.2-2 angepasste Aufnahmeordnung mit günstiger Schnittgeometrie

„Die erreichbare Objektgenauigkeit [...] zeigt zunächst die Maßstabsabhängigkeit der photogrammetrischen Genauigkeit. Darüber hinaus hängt sie vor allem von der Aufnahmegeometrie (Anzahl der beteiligten Bilder, Schnittgeometrie der Abbildungsstrahlen im Raum) und der Identifizierbarkeit der Messpunkte ab.“ (ebd.: 137)

Der größere Bildwinkel eines Weitwinkel-Objektivs ist der Abbildung räumlicher Tiefe förderlich, da er schleifenden Strahlenschnitten entgegen wirkt. Mit zunehmendem Bildwinkel zeichnen sich jedoch störende Effekte wie die Bildverzeichnung, Vignettierung<sup>12</sup> oder chromatische Aberrationen<sup>13</sup> (vgl. 3.3 & 3.4) ab, die der akkuraten Auswertung abträglich sind.

<sup>12</sup> Lichtabfall in Bildecken und entlang der Bildränder

<sup>13</sup> Abbildungsfehler aufgrund unterschiedlicher Lichtbrechung über den Wellenlängenbereich sichtbaren Lichtes

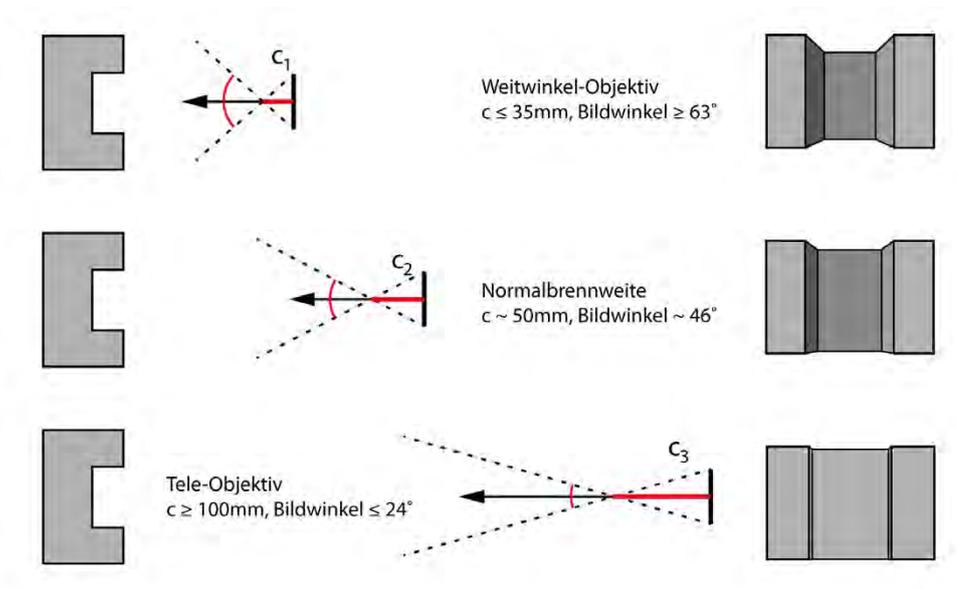


Abb. 2.5.2-3 Abbildung der Perspektive unter verschiedenen Bildwinkeln

### 2.5.3 Angaben über die Genauigkeit der photogrammetrischen Auswertung

Im Rahmen handelsüblicher Kamerasysteme und unter Einsatz der Softwarelösung zur photogrammetrischen Auswertung „ELCOVISION“ (in Version 10) des Unternehmens PMS (Photo Mess Systeme AG) veranschaulicht *Tabelle 4* generalisierte Messgenauigkeiten am Objekt (mit einer Größe von zehn Meter) nach Kamerasystemen mit unterschiedlichen Sensorformaten.

Verwendete Kamera	Genauigkeit am Objekt bei einer Objektgröße von ca. 10 Meter und bildformatfüllenden Aufnahmen	
	Genauigkeit an natürlichen Punkten	Genauigkeit an signalisierten Punkten
Consumerkamera mit einem Sensor kleiner als APS-C <sup>14</sup>	≤ 15mm	≤ 8mm
Semiprofessionelle Kameras mit einem APS-C Sensor	≤ 6mm	≤ 2mm
Professionelle Kameras mit APS-C oder Vollformat / Kleinbild Sensor	≤ 3mm	≤ 0.5mm
Mittelformat Kamera	≤ 1mm	≤ 0.05mm

Tabelle 4: Genauigkeit der photogrammetrischen Auswertung nach Kamerasystem (vgl. Elcovision 2014)

<sup>14</sup> Das APS-C Sensorformat entspricht einem Formatfaktor von ~1,5 bezogen auf das Kleinbildformat

Tabelle 4 verdeutlicht die Abhängigkeit der Qualität der photogrammetrischen Rekonstruktion von der Qualität und dem Format des Kamerasystems.

Nach Luhmann sind „[...] große Bild- und Sensorformate vorteilhaft für die photogrammetrische Genauigkeit. Grundsätzlich gilt ebenso, dass eine höhere Anzahl von Pixeln im Bildsensor zunächst das Auflösungsvermögen verbessert und indirekt damit auch die Bildmessgenauigkeit. Die erreichbare Objektgenauigkeit wird durch höhere Pixelzahlen jedoch nur dann gesteigert, wenn gleichzeitig die Qualität der optischen Abbildung (Auflösungsvermögen des Objektivs), Bildrauschen und mechanische Stabilität auf den Bildsensor abgestimmt sind.“ (*Luhmann 2010: 531*)

#### **2.5.4 Studie über die Genauigkeit am Objekt**

Im Rahmen einer Untersuchung der Genauigkeit des photogrammetrischen Verfahrens stellt Pierrot-Deseilligny entsprechende Messwerte einem dreidimensionalen Modell einer Aufnahme eines Laserscanner gegenüber. (*Pierrot-Deseilligny et al. 2011*) Objekt der Untersuchung war ein Relief von etwa drei mal zwei Meter. Das Objekt wurde mittels Laserscanner (Leica ScanStation 2) in einer Rasterweite von fünf Millimeter und zur photogrammetrischen Auswertung über einen Bildverband von acht Aufnahmen mit einer Spiegelreflexkamera (Kodak DSC Pro SRL/n) im Kleinbildformat und einem Objektiv mit einer Brennweite von 35 Millimeter erfasst. Die Kamera lieferte Bildmaterial mit einer Auflösung von 13,7 Megapixel. Laut Herstellerangaben realisiert die Scanstation eine Genauigkeit von 4 Millimeter auf eine Distanz von 50 Meter. Der Vergleich der dreidimensionalen Modelle aus beiden Verfahren ergab eine durchschnittliche Abweichung von fünf Millimeter. Diese Abweichung ist hinsichtlich der geringen Anzahl an photographischen Aufnahmen im dargestellten Anwendungsfall durchaus akzeptabel. Ein größerer Bildmaßstab ist der Genauigkeit zuträglich, erfordert jedoch eine höhere Anzahl an photographischen Aufnahmen, um das Objekt zu erfassen. (*vgl. 2.5.1*)

#### **2.6 Untersuchung der Genauigkeit anhand einer Versuchsanordnung**

Zur Untersuchung der Genauigkeit wurde im Rahmen dieser Arbeit folgender Versuch durchgeführt: Es sollte festgestellt werden, wie sich verschiedene Kamerasysteme und Software-Lösungen auf die Genauigkeit auswirken. Versuchsobjekt war ein Abschnitt eines Ziegelmauerwerkes.

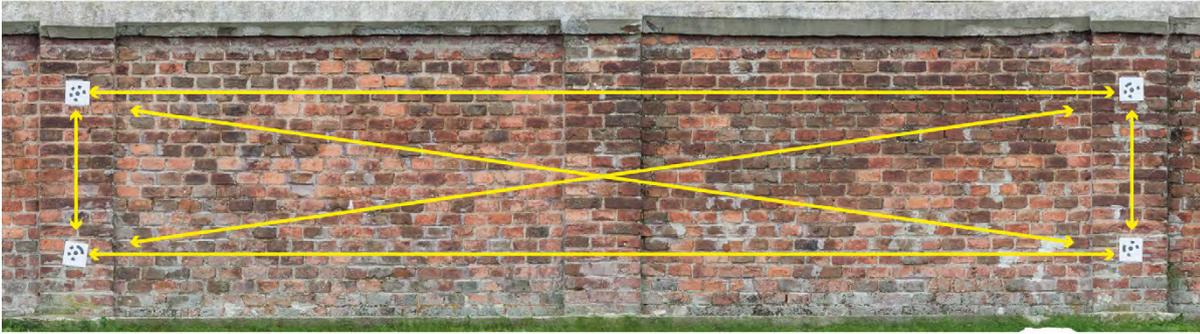


Abb. 2.6-1 Orthophoto Versuchsobjekt

Am Objekt wurden vier Bildmarken (12bit kodiert) so angebracht, dass diese ein Rechteck von 6,5 Meter Länge und einem Meter Höhe umfassen. Die Maße der Seiten und Diagonalen wurden mit einem Laser-Distanzmessgerät (Bosch PLR50) abgenommen. Das arithmetische Mittel aus jeweils drei Messungen gegen eine Reflektor-Karte wurde als Messwert angenommen. Der Objektabschnitt wurde aus einer Entfernung von etwa 3,5 Meter mit drei Kamerasystemen, jeweils als Bildverband, im Normalfall mit einer Bildüberlappung von etwa 80% erfasst. Zum Einsatz kamen eine Kleinbild-/Vollformat-Spiegelreflexkamera mit einer Festbrennweite (1), ein kompaktes Kamerasystem im APS-C Sensorformat mit einem Weitwinkel-Vario-Objektiv (2) und die Kamera eines Smartphones (3).

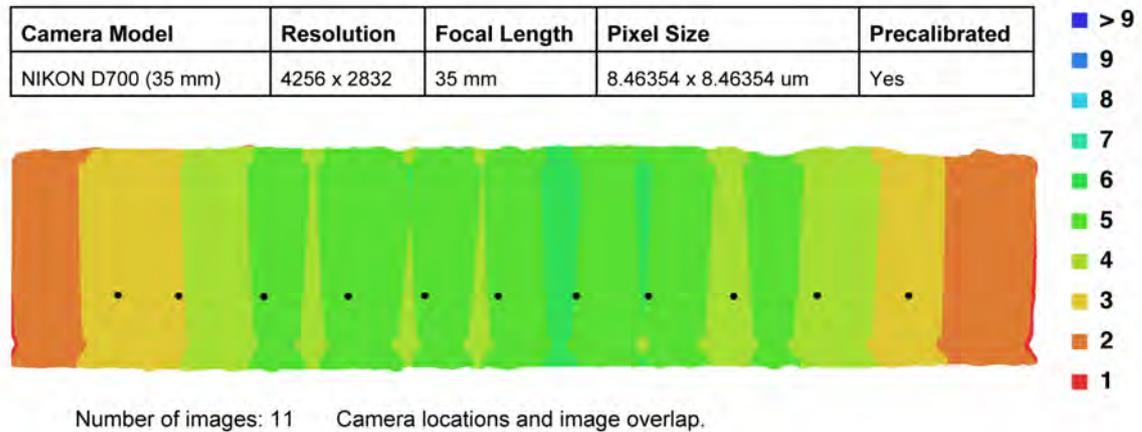
Bildverband Nr.	Kamera	Sensor	Auflösung	Optik	Äquivalente Brennweite
Bildverband (1)	Nikon D700	FX: 36x23.9mm	12,1MP	Nikkor 35 35mm Festbrennweite	35mm
Bildverband (2)	Sony a6000	APS 23.5x15.6mm	24,3MP	Sony E 16-70mm F4 Vario-Objektiv	24mm
Bildverband (3)	iPhone 4	$\frac{1}{3,2}$ " 4.54x3.39mm	5MP	Äquivalent KB 35mm Festbrennweite	35mm

Tabelle 5: Beschreibung der Kamerasysteme zur Genauigkeitsuntersuchung

Das Kamerasystem „Sony“ verfügt über eine Vario-Optik<sup>15</sup> mit integrierter Bildstabilisierung. Diese wurde im Rahmen des Versuches deaktiviert, da die innere Orientierung der Kamera durch die mechanischen Einflüsse eines solchen Systems nicht eindeutig zu bestimmen ist. Das Objektiv wurde auf die geringste Brennweite von 16 Millimeter eingestellt. Diese Brennweite wurde über die Aufnahmen des Bildverbandes nicht verändert. Je nach System wurden, dem Bildwinkel der Kameraoptik entsprechend,

<sup>15</sup> Zoom-Objektiv

neun bis elf Aufnahmen nach dem Normalfall erstellt um den vermarkten Bereich mit einer Überlappung von 80-85% zu erfassen. *Abbildung 2.6-2* zeigt die Anzahl sich überlagernder Aufnahmen in einer farbig kodierten Darstellung.



*Abb. 2.6-2 Bildüberlappung der Aufnahmeserie (1) aus Photoscan-Pro survey-data*

Die erste Phase des Versuches bewertet die Genauigkeit der drei Aufnahmesysteme infolge der Verarbeitung mit der Softwarelösung „Photoscan“ des Herstellers „Agisoft“ in Version 1.0.4. Das Verfahren der Auswertung wird in *Abschnitt 5.8.1* erläutert.

In Phase zwei wurde der Bildverband des Kamerasystems, das die zuverlässigsten Messergebnisse lieferte, mittels drei weiterer Software-Lösungen verarbeitet, um Abweichungen der Messergebnisse anhand unterschiedlicher Software zu vergleichen.

Vor der Auswertung der Aufnahmen wurde für jedes Kamerasystem mittels der Softwarelösung „Agisoft Lens“ ein kalibriertes Kameraprofil erstellt. Dieses Profil beschreibt die innere Orientierung einer Kamera sowie deren optische Verzeichnungen. In Folge der Auswertung eines Bildverbandes mittels Bündelausgleichung werden auch Größen der inneren Orientierung ermittelt. Das Verfahren wird als „Simultan- oder Selbstkalibrierung“ bezeichnet. Genaue Angaben über die innere Orientierung mittels der Angabe eines kalibrierten Kameraprofiles präzisieren das Verfahren der Bündelausgleichung, da von diesen Werten ausgegangen werden kann, statt sie infolge der Näherungsrechnung bestimmen zu müssen. Handelsübliche Kamerasysteme entsprechen der soliden Verarbeitung einer Messkamera nicht. Aufgrund ihrer Bauweise können mechanische Einflüsse die innere Orientierung beeinflussen. Sofern die Software-Lösung eine solche Funktion unterstützt, ist es ratsam, das kalibrierte Kameramodell anhand der Abweichungen aus den Daten der Rekonstruktion zu optimieren.

### 2.6.1 Auswertung der Bildverbände der beschriebenen Aufnahmesysteme

Die Software „Photoscan“ erkennt die in der Versuchsanordnung versetzten Bildmarken automatisch und ermöglicht es, die entsprechenden Messergebnisse der Vermessung am Objekt über diese identifizierten Punkte als Strecken, am Modell einzupflegen. Die Werte werden am Modell geprüft und etwaige Abweichungen zu den Messstrecken werden angezeigt. Die Angabe „Punkte aus Sparse Cloud“ (aus Tabelle 6) gibt Aufschluss über die Summe an Bildpunkten, die innerhalb des Bildverbandes identifiziert werden konnten und Grundlage der Bündeltriangulation sind.

Kamerasystem	Aufnahmen	Punkte aus Sparse Pointcloud	Durchschnittliche Abweichung $\bar{d}$	Maximale Abweichung $d_{max}$
(1) Nikon D700	11	119.414	0,53mm	1,004mm
(2) Sony a6000	9	96.962	1,66mm	3,401mm
(3) iPhone 4	10	40.849	11,46mm	21,52mm

*Tabelle 6: Auswertung nach Kamerasystem unter der Anwendung Photoscan*

Obwohl das Kamerasystem Nikon (1), gegenüber dem System Sony (2), eine deutlich geringere nominelle Auflösung bietet (12MP vs. 24MP), konnten für die Bildserie 1 mehr Bildpunkte ermittelt werden. Da der Bildwinkel des Objektivs des Systems Nikon (1) mit einer Brennweite von 35 Millimeter geringer als der des 24 Millimeter Objektivs des Systems Sony (2) ist, erstreckt sich der Bildverband des Systems (1) über zwei zusätzliche Aufnahmen. Der größere Abbildungsmaßstab und die hohe Abbildungsqualität des Kamerasystems Nikon erklären die höhere Anzahl rekonstruierter Objektpunkte. Die durchschnittliche Abweichung „ $\bar{d}$ “ resultiert aus dem arithmetischen Mittel der Abweichung der sechs Messergebnisse am Modell gegenüber der Messstrecken, die am Objekt erhoben wurden. Die maximale Abweichung „ $d_{max}$ “ beschreibt die größte Differenz aus den korrespondierenden Messwerten. Basierend auf dem Bildverband 1 des kalibrierten Kamerasystems „Nikon D700“ mit der Festbrennweite von 35 Millimeter wurde mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von 0,53 Millimeter und einer maximalen Abweichung von einem Millimeter das getreulichste Modell rekonstruiert. Der Bildverband 2 des Kamerasystems „Sony a6000“ konnte diesen Ansprüchen nicht gerecht werden. Die äquivalente Brennweite von 24 Millimeter deckt gegenüber einer Brennweite von 35 Millimeter mit dem spezifischen Bildwinkel von 54° einen größeren Bildwinkel von 74°

ab. Im Gegenzug verfügt dieses System über eine höhere Bildauflösung<sup>16</sup>, jedoch bei einem kleineren Sensorformat. Der Vergleich der Daten (Abb. 2.6.1) der Kalibrierung des Systems Nikon(1) mit Sony(2) zeigt eine Verdopplung radialer Verzeichnung bei gleichen Bildkoordinaten.

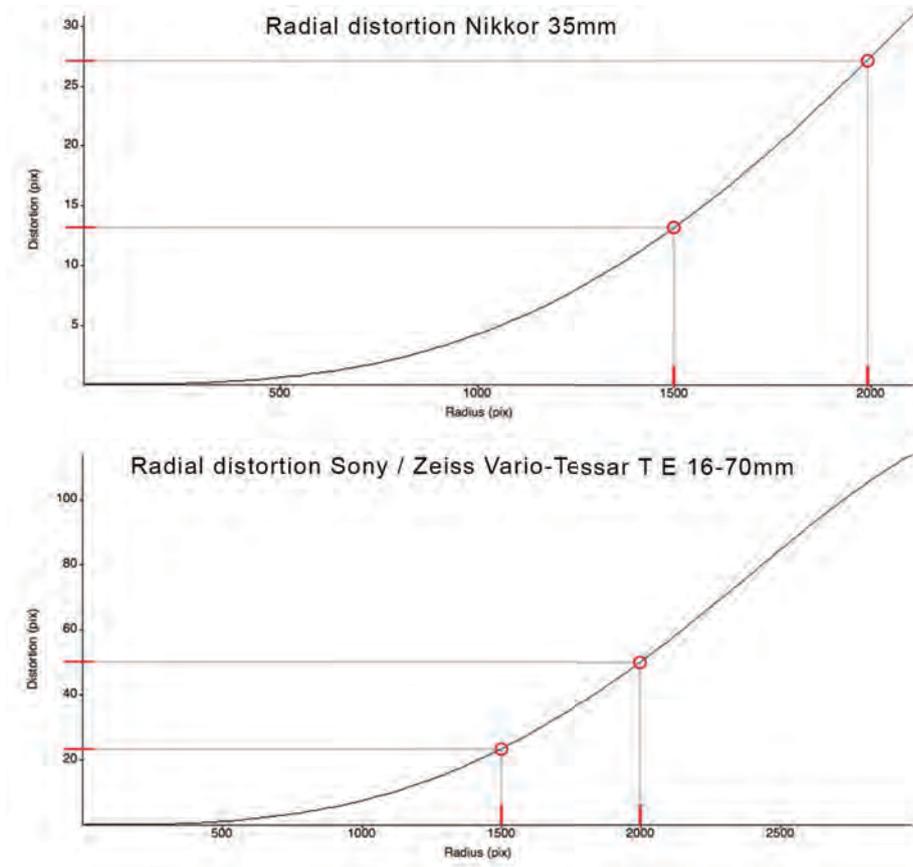


Abb. 2.6.1 Befund aus Kalibration der Kamerasysteme Nikon(1) und Sony(2)

Die durchschnittliche Abweichung des Modells beträgt 1,66 Millimeter. Die Messergebnisse auf Basis der Aufnahmen der Kamera des Smartphones (Bildverband 3) weichen bis zu 21 Millimeter ab. Dieser Wert wird weder der Önorm A 6250-1 (vgl. 2.4.1) noch den Standards der Baudenkmalpflege des BDA (vgl. 2.4.2) gerecht und wird nach DIN 18710 (vgl. 2.4.3) als „L2 – geringe Genauigkeit“ klassifiziert. Die Messergebnisse des Bildverbandes 1 und 2 entsprechen nach DIN 18710 den Ansprüchen „hoher Genauigkeit“. Beide Bildverbände erfüllen den Anspruch der Önorm A 6250-1. Das Kamerasystem „Nikon“ verfügt über hohe mechanische und optische Stabilität. Das basiert auf Faktoren wie dem soliden Magnesiumgehäuse, einem großen Sensor mit hohem Pixel-Pitch<sup>17</sup> von 8,4 Mikrometer und dem verhältnismäßig einfachen Aufbau des Objektivs in 6 Gruppen und

<sup>16</sup> nicht gleich zu setzen mit der Detailauflösung eines Kamerasystems

<sup>17</sup> der Abstand der Mittelpunkte zweier Photodioden auf dem Kamerasensor.

8 Elementen. Das technisch aktuelle Kameramodell „Sony“ mit Vario-Objektiv wird den meisten Ansprüchen gerecht. Die schlechteren Messergebnisse lassen sich auf die deutlich höheren Verzeichnungen des Superweitwinkel-Zoom-Objektives, das sich aus 12 Linsengruppen bei 16 Elementen zusammensetzt, zurückführen. Das Gehäuse der Kamera ist größtenteils aus Kunststoff gefertigt und weniger solide als das System „Nikon“. Das System mit kleinerem Sensor, bei höherer Auflösung und einem Pixel-pitch von 3,8 Mikrometer, reagiert gegenüber mechanischen Einflüssen deutlicher. Die Kleibild-Vollformatkamera (1) mit Festbrennweite erweist sich demnach als mechanisch und optisch stabilstes Kameramodell. Die Kamera des Smartphones erfüllt mit geringer Auflösung, sehr kleinem Sensorformat und geringer Güte der Optik die Ansprüche an photogrammetrische Untersuchungen nicht.

### 2.6.2 Der Einfluss des kalibrierten Kameraprofiles auf das photogrammetrische Modell anhand einer Gegenüberstellung

Diese Gegenüberstellung verdeutlicht den Einfluss eines kalibrierten Kamera-Profiles der Aufnahmekamera auf die Genauigkeit der Auswertung eines Bildverbandes.

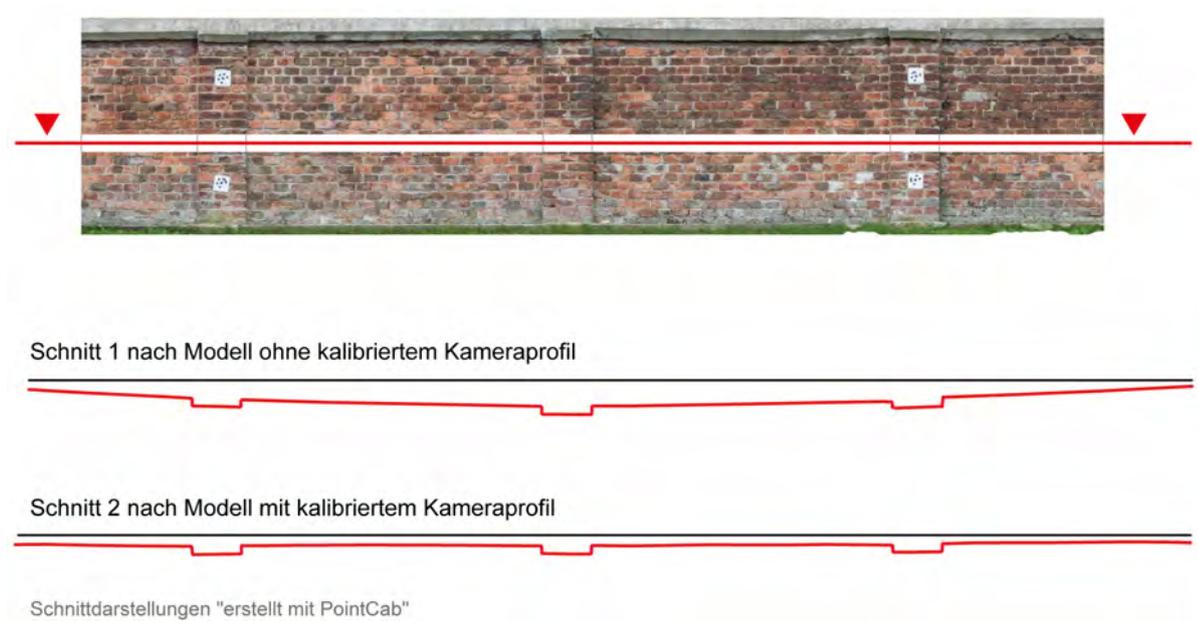


Abb. 2.6.2-1 Schnittdarstellung des Objektes mit und ohne Daten der Kalibrierung

Abbildung 2.6.2-1 stellt die Rekonstruktion zweier 3D-Modelle des Aufnahmeobjektes gegenüber. Beiden Modellen liegen die gleichen Aufnahmen des Bildverbandes 2, des Kamerasystems (Sony a6000 / Sony E 16-70 Millimeter F4), zu Grunde. Ein Modell wurde

unter Anwendung eines kalibrierten Kameraprofils erstellt. Die Rekonstruktion des zweiten Modells basiert auf den Werten der inneren Orientierung infolge der „Simultan- oder Selbstkalibrierung“ im Zuge der Bündelausgleichung. Diese Rekonstruktion weist eine sphärische Krümmung auf, die sich auf die deutliche radiale Verzeichnung des Kamerasystems zurückführen lässt. Abbildung 2.6.2-2 visualisiert die dreidimensionale Abweichung beider Modelle.

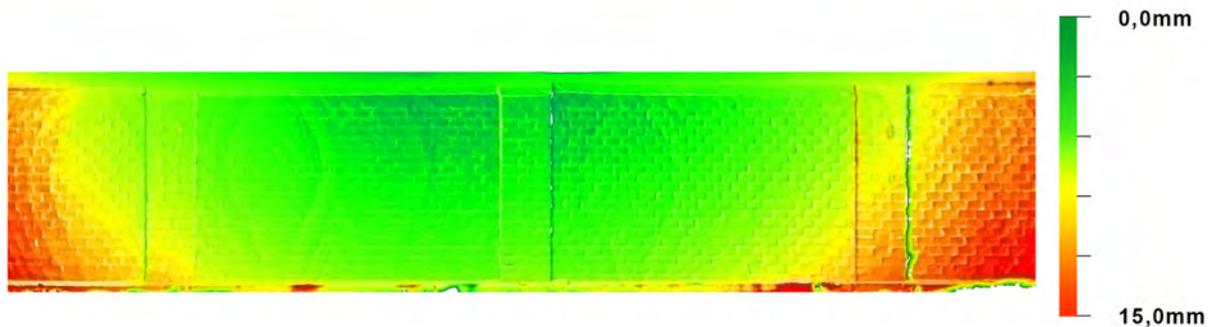


Abb. 2.6.2-2 dreidimensionale Abweichung der rekonstruierten Modelle

Die radiale Verzeichnung (vgl. 3.4.5) ist, im Rahmen photogrammetrischer Anwendung, ein kritischer Abbildungsfehler. Changchang Wu der Entwickler der für den nicht kommerziellen Einsatz kostenfreien Software „Visual SFM“, erklärt, dass das Verfahren der „Selbstkalibrierung“ im Rahmen aktueller SfM (Structure from Motion) Applikationen grundsätzlich als zuverlässig gilt. In seiner Arbeit „Critical Configurations for Radial Distortion Self-Calibration (2014)“ untersucht er fehlerhafte Rekonstruktionen aufgrund radialer Verzeichnungen und schlussfolgert wie folgt:

„[...] we find for certain captures that the SfM softwares produce incorrectly distorted 3D models along with incorrect estimation of radial distortions [...]“ (Wu 2014)

Im Rahmen der Untersuchung „Low-cost und open-source Lösungen für die automatisierte Generierung von 3D-Punktwolken - ein kritischer Überblick“ (Remondino et al.) wird die Anwendung eines kalibrierten Profils empfohlen.

„Eine Kamerakalibrierung sollte mit einem photogrammetrischen Bildverband (ideale Schnittgeometrie) berechnet werden, da ein typischer Bilddatensatz für eine 3D-Rekonstruktion oft keine signifikante Bestimmung aller Parameter der inneren Orientierung erlaubt.“ (Remondino et al. 2012: 65)

Die Entsprechung eines rekonstruierten Modells gegenüber dem Aufnahmeobjekt muss überprüft werden. Die Gegenüberstellung zweier nicht korrespondierender dreidimensionaler Modelle, die anhand desselben Bildverbandes unter Anwendung der

gleichen Software-Lösung generiert wurden, verdeutlicht, dass ein hochgradig automatisierter Prozess kein Garant für exakte Ergebnisse ist.

### 2.6.3 Auswertung unter Anwendung verschiedener Software-Lösungen

Basierend auf den Ergebnissen vorangegangener Untersuchung wurde die Bildserie 1 des Kamerasystems (1) „Nikon D700/Nikkor 35mm“ zur Verarbeitung unter weiteren Software-Lösungen herangezogen. Es wurde untersucht, wie weit die Ergebnisse der dreidimensionalen Rekonstruktion, basierend auf dem gleichen Bildmaterial, mittels unterschiedlicher Software-Lösungen voneinander abweichen. Die Abweichung der bekannten Strecken zwischen den Bildmarken sollte anhand weiterer 3D-Modelle aus alternativen Software-Lösungen geprüft werden. Neben der kostenpflichtigen Software „Photoscan“ (in vorangegangener Untersuchung 2.6.1 angewandt) wurden die kostenlose<sup>18</sup> Applikation „VisualSfm“<sup>19</sup> sowie der Webservice „ReCap360“<sup>20</sup> (subskriptionsbasierendes Lizenzmodell) des etablierten Entwicklers Autodesk zur Auswertung des selben Bildmaterials (Bildserie 1) eingesetzt. Die Software „Photoscan“ identifiziert die versetzten Messmarken automatisch und platziert den entsprechenden Messpunkt im Raum mit höchster Präzision anhand der errechneten Punktwolke. Die Anwendung „VisualSfm“ ermöglicht die Angabe von Kamerapositionen mittels GPS<sup>21</sup>-Daten oder die Verortung von „Ground Control Points (gcp)“. Diese Punkte können anhand des Bildmaterials oder am Model der berechneten Punktwolke definiert werden. Den Punkten werden entsprechende Koordinaten aus der Vermessung am Objekt zugeordnet. Von der Angabe von „Z-Koordinaten“ (Koordinaten in Richtung der optischen Achse / Aufnahmerichtung) wurde abgesehen, da die Punkte Vorort nicht dreidimensional eingemessen wurden. Die Angaben zur Transformation sollen lediglich etwaige kritische Maßabweichungen des Modells aus „VisualSfm“ veranschaulichen. Die Abweichung der von „VisualSfm“ errechneten Positionen zu den deklarierten Messpunkten wird nach Abschluss der Transformation in einem Protokoll ausgegeben (*Tabelle 7*).

---

<sup>18</sup> VisualSFM is free for personal, non-profit or academic use

<sup>19</sup>[1] Changchang Wu, "Towards Linear-time Incremental Structure From Motion", 3DV 2013

[2]Bundle Adjustment: Changchang Wu, Sameer Agarwal, Brian Curless, and Steven M. Seitz, "Multicore Bundle Adjustment", CVPR 2011

<sup>20</sup> Autodesk© Recap360™ <https://recap360.autodesk.com>

<sup>21</sup> Global Positioning System

<b>Transformed points</b>	<b>User coordinates</b>
Punkt 1: 0.1462, 0.0000, 0.0134	0, 0, 0
Punkt 2: 0.0261, 99.9192, -0.2820	0, 100, 0
Punkt 3: 653.4741, -0.4250, 0.0393	653.534, 0, 0
Punkt 4: 653.7298, 100.3058, -0.4471	653.539, 100, 0

*Tabelle 7: Protokoll der Transformation aus VisualSfm*

Die maximale Abweichung des Modells gegenüber den vor Ort abgenommenen Maßen beläuft sich auf 3,058 Millimeter. Die Software „VisualSfm“ ermöglicht wie die Anwendung „Photoscan“ die Angabe von Größen zu einem kalibrierten Kamerasystem. Diese Werte wurden zur photogrammetrischen Auswertung angegeben. Das Webservice „ReCap 360“ lässt keine Angaben zu einem kalibrierten Kameraprofil zu. Anhand der an das Webservice übertragenen Aufnahmen können Messpunkte am Bildmaterial gesetzt werden. Zwischen den Messpunkten wurden die Längenmaße aus der Vermessung am Objekt angegeben.

Alternativ können den Punkten auch Raumkoordinaten zugeschrieben werden. Das Ergebnis der Auswertung wurde mittels der Software „Recap“ und dessen Messwerkzeug auf Maßhaltigkeit geprüft. Die maximale Abweichung über die Objektlänge von 6,5 Meter wurde am Modell mit 3,97 Millimeter registriert. Die Anwendung Recap360 arbeitet ausschließlich nach dem Verfahren der „Selbst-Kalibrierung“ anhand der Größen aus der Bild-Metainformation (Exif) und der Analyse des Bildmaterials. Die Anwendung konnte das Objekt ohne kalibrierten Kameraprofil formtreu rekonstruieren. Die Angaben zur maximalen Abweichung „ $d_{max}$ “ resultieren aus der Differenz der Vorort abgenommenen Maße und den korrespondierenden Maßen des rekonstruierten Modells.

<b>Software</b>	<b>PhotoScan</b>	<b>VisualSfm</b>	<b>ReCap 360</b>
<b>Identifikation von Messmarken</b>	automatisiert	keine	keine
<b>Anwendung von Referenzmaßen</b>	automatisiert	Ground Control Points	manuell
<b>Anwendung eines kalibrierten Kameraprofiles</b>	angewendet	angewendet	nicht möglich
<b>Abweichung <math>d_{max}</math></b>	1,004mm	3,058mm	3,97mm

*Tabelle 8: Abweichung der Auswertung nach untersuchten Software-Lösung*

Die Abweichungen aller Modelle sind nicht weit gestreut. Alle Werte entsprechen den Anforderungen der Önorm A 6250-1, da die Abweichungen 10 Millimeter nicht überschreiten. Zusammenfassend entsprechen alle Modelle angeführter Software-Lösungen den meisten Anforderungen an Genauigkeit in Anwendungen der Architektur und des Bauingenieurwesens.

Die Anwendung „Photoscan“ ist im Rahmen der angeführten Software-Lösungen die einzige, die Bildmarken automatisiert erkennt und das Einpflegen von Referenzmaßen erlaubt. Diese Funktionen ermöglicht die direkte Kontrolle über die Entsprechung und Genauigkeit der rekonstruierten Geometrie anhand korrespondierender, erhobener Maße.

„Eine schnelle aber oft akzeptable Analyse der Ausgleichungsergebnisse ist eine visuelle Betrachtung der berechneten Kamerastandpunkte und der 3D-Objektpunktkoordinaten.“  
(Remondino et al. 2012: 71)

Der Vergleich der Kamerasysteme und Software-Lösungen verdeutlicht, dass die Genauigkeit wesentlich vom Aufnahmesystem, dessen Kalibrierung und dem Bildmaßstab bestimmt wird.

„Die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Bildorientierung und der Kamerakalibrierung beeinflussen erheblich die Qualität aller folgenden Prozesse wie die Bestimmung des 3D-Punktes und die nachfolgende 3D-Modellierung.“ (ebd: 64)

Sind diese Voraussetzungen erfüllt und liegt ein „[...] robuster Bildverband mit guter Geometrie vor, dann liefern SfM Software-Lösungen ähnliche Ergebnisse im Hinblick auf die theoretische Genauigkeit berechneter Objektpunktkoordinaten.“  
(vgl. Remondino et al. 2012: 77)

Folgende Maßnahmen sollten getroffen und eingehalten werden, um die Genauigkeit der Mehrbildauswertung günstig zu beeinflussen:

- Gute, konstante Lichtverhältnisse zur photographischen Aufnahme
- Kontrastreiche Textur des Aufnahmeobjektes
- Optimale Bildschärfe und Schärfentiefe
- Konstanter Fokus über eine Bildserie
- Signalisierung durch Mess- und Bildmarken
- Referenzmaße in angemessener Dimension und unterschiedlicher Raumlage
- Kamerasystem mit hoher Detailauflösung bei möglichst großem Sensorformat
- Einsatz eines Festbrennweiten-Objektives mit möglichst geringer optischer Verzeichnung
- Anwendung eines kalibrierten Kamera-systems /-profiles
- Der Aufgabe entsprechender Bildmaßstab.
- Möglichst konsistenter Bildmaßstab
- Hohe Anzahl photographischer Aufnahmen
- Hoher Grad der Überlappung des Bildverbandes 60-80%
- Hohe Anzahl an Abbildungen eines Objektpunktes
- Steiler Strahlen-Winkel kohärenter Objektpunkte auf entsprechenden Aufnahmen
- Günstige Aufnahmewinkel, Teilflächen möglichst normal zur Aufnahmerichtung

## **2.7 Grundlagen zur Anwendung, Verarbeitung und Präsentation photogrammetrischer Produkte**

Um den Anwendungsbereich der Photogrammetrie (*vgl. 2.6*) im Aufgabenbereich des Architekten und Bauingenieurs darstellen zu können, ist es notwendig, die Vorteile des 3D-Modells als Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung, dessen Möglichkeiten der Visualisierung und Präsentation sowie der Ableitung zweidimensionaler Darstellungen, aufzuzeigen. Die Präsentation und der Austausch dreidimensionaler Daten über standardisierte Formate und offene, zugängliche Plattformen erleichtern kollaborative Planungsprozesse und bedeuten Zeit- und Kostenersparnis.

### **2.7.1 Das dreidimensionale Modell**

Der digitale Arbeitsprozess in der Architektur um im Bauingenieurwesen erfordert die Aufbereitung erhobener Größen aus der Bauaufnahme in verständlicher, lesbarer und standardisierter Form, um diese zur weiteren Verarbeitung zu übermitteln oder zu präsentieren. Dreidimensionale Datenbestände können in Bildform oder als Plandarstellung, als Druck oder digital, als Video, aber auch interaktiv, visualisiert werden. Die räumlichen Qualitäten eines dreidimensionalen Objekts können mittels interaktiver Medien im größten Umfang vermittelt werden. (*vgl. 2.5.3*) Das 3D-Modell als Produkt photogrammetrischer Auswertung bietet eine hohe Informationsdichte anhand eines blattschnittfreien Informationsmodells. Von diesen Daten lassen sich unter Zuhilfenahme entsprechender Software unkompliziert zweidimensionale Darstellungen in beliebigen Abbildungsebenen ableiten.

„Eine weitreichende Veränderung in der Betrachtung der Ergebnisse einer Vermessung beginnt sich abzuzeichnen. Dieser ist es zu verdanken, daß nicht mehr unabhängige Einzelpläne entstehen, sondern die erfaßten Daten im Sinne blattschnittfreier Datenstrukturen von Informationssystemen, ohne einschränkende Vorwegnahme der Datennutzung, verwaltet werden. Diesem Gedanken folgend werden auch in der Architekturbildmessung nicht mehr einzelnen Fassaden erfaßt und ausgewertet, sondern das Gesamtobjekt steht im Zentrum aller Aktivitäten. Fassadenpläne, Ansichten, Abwicklungen oder Profile sind in der Folge des Produktionsprozesses nur abgeleitete Visualisierungen eines global ausgewerteten und verwalteten Datenbestandes.“ (*Hanke & Ebrahim 2004*)

Ergebnisse können in Form geometrischer Ableitung als Plandarstellung oder als Bildplan (Orthophoto *vgl. 2.2.5*) erfolgen. Das dreidimensionale digitale Modell kann als nachhaltiges Informationsmodell der Ausarbeitung von Planungsgrundlagen verstanden werden. Gegenüber der Fertigung entsprechenden Planmaterials auf Grundlage eines „konventionell“ ermittelten Bauaufmaßes kann das detaillierte, dreidimensionale Modell der

photogrammetrischen Auswertung mitunter zur Darstellung eines verformungsgetreuen Maßstabes herangezogen werden.

„Sehr häufig erfolgt [...] eine zweidimensionale Modellierung im dreidimensionalen Raum. Dabei werden 2D-Schnittdarstellungen auf einer Bezugsebene erzeugt, welche im dreidimensionalen Raum angeordnet ist.“ (Donath 2008 : 17)

Einen weiteren Vorteil des dreidimensionalen Modells realisieren 3D-Drucker. Zur Anwendung dieser Technologie muss eine Punktwolke in ein „Mesh“ überführt und auf Lücken und isolierte Geometriefragmente geprüft werden. Für die Verarbeitung dreidimensionaler Daten stehen zu diesem Zweck teils kostenlose Applikationen mit hohem Automationsgrad zur Verfügung (Bsp. Project Memento des Herstellers Autodesk). Das dreidimensionale Objekt wird mittels solcher Software in ein Schichten-Modell überführt. Dieser Prozess wird als „slicing“ bezeichnet. Die Pfade der Schichten und der errechnete Materialbedarf werden an den Drucker übermittelt. Der 3D-Druck von Architekturmodellen erfolgt mit hoher Qualität und Genauigkeit (0,1 mm) in kurzer Zeit. Das Modell ist, je nach Gerätschaft, auf eine gewisse Größe beschränkt. Aus einzelnen Bauteilen lässt sich jedoch auch ein Modell in großem Maßstab zusammensetzen. Aktuelle Verfahren realisieren mitunter bereits kolorierte Modelle. Texturen lassen sich somit in Haptik und Farbgebung reproduzieren. Objekte aus Produktdatenbanken lassen sich zusammen mit erhobenen Daten modellhaft materialisieren.



Abb. 2.7.1-1 3D-Druck, Kathedrale  
Notre-Dame von Reims



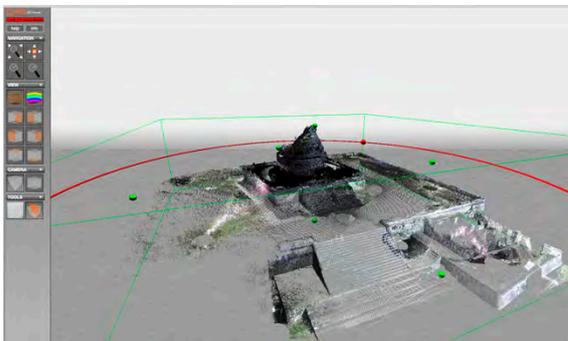
Abb. 2.7.1-2 3D-Druck, Digital Grotesque  
Project, Printing Architecture

## 2.7.2 Visualisierung und Präsentation von 3D-Modellen

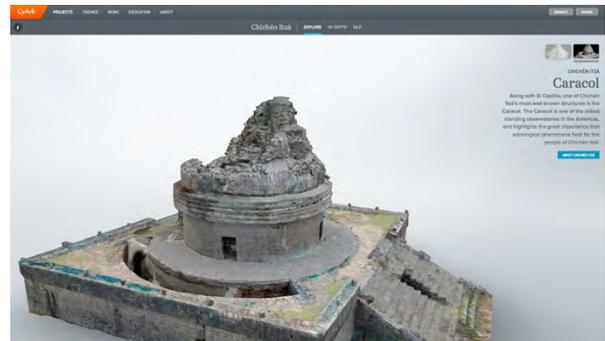
Um die Anwendung der Photogrammetrie in Architektur und Bauwesen (vgl. 2.6) zu beschreiben, werden an dieser Stelle Möglichkeiten der Präsentation von Produkten der photogrammetrischen Auswertung, im Besonderen Punktwolken, (vgl. 2.2.2) erläutert. Das dreidimensionale Modell steht Planungsbeteiligten zeit- und ortsunabhängig zur Verfügung.

Das erfasste und ausgewertete dreidimensionale Objekt ist längst nicht mehr an die Arbeitsumgebung des „Desktop“ gebunden. Zahlreiche etablierte Dateiformate, Technologien und Plattformen, ermöglichen einen einfachen Datenaustausch oder die virtuelle, interaktive Visualisierung und Präsentation eines Objektes über das Internet.

Beispielhaft hinsichtlich des Angebotes und der Präsentation erhobener Daten ist das Projekt „CyArk“. Die gemeinnützige Organisation wurde 2003 mit dem Ziel gegründet, bauhistorisches Weltkulturerbe in Form einer umfassenden Digitalisierung und öffentlicher Präsentation dieser Daten zu bewahren. Partner des Programms operieren weltweit, um Daten mittels Laserscanner oder Photogrammetrie zu erheben. Erhobene Daten werden ausgewertet, entsprechend aufbereitet und veröffentlicht. Das Online-Portal bietet freien Zugang zu Plan- und Bildmaterial, aber auch dreidimensionalen Modellen in Form von Punktwolken, die mittels eines Web-Browsers interaktiv betrachtet werden können. Modelle lassen sich aus freien oder vordefinierten Ansichten betrachten. Nach den drei Raumebenen lassen sich sogar beliebige Schnittansichten ableiten.



*Abb. 2.7.2-1 CyArk – Punktwolke: Chichén Itzá, El Caracol (Observatorium) 900n.Chr*



*Abb. 2.7.2-2 CyArk – VR-Modell: Chichén Itzá, El Caracol*

Mit modernster Präsentationstechnologie glänzt das Online-Projekt „Smithsonian x3D Explorer“ der gleichnamigen Institution, die zahlreiche Museen sowie Forschungs- und Bildungseinrichtungen vereint. Autodesk, ein in Architektur und Bauwesen weitläufig bekanntes Software-Unternehmen, hat eine auf dem x3d-Webstandard<sup>22</sup> basierende Web-Applikation geschaffen, die es dem Internetnutzer erlaubt, digitalisierte Exponate aus dem Bestand der Smithsonian Institution in einer virtuellen dreidimensionalen Umgebung zu betrachten und untersuchen.

<sup>22</sup> Extensible 3D, Auszeichnungssprache zur Visualisierung von 3D-Objekten in einem Webbrowser

Hat man einen Virtual Reality (VR) Datensatz eines Objektes zur Verfügung, kann man das Objekt von verschiedenen Standpunkten aus betrachten. Im Gegensatz zur Animation sind die Standpunkte nicht vorgegeben, d.h. sie können vom Nutzer frei gewählt werden. (Wiedemann 2004: 60)

Dabei lassen sich Lichtquellen und Texturen anpassen und für Untersuchungen wie Streiflichtanalysen manipulieren. Die Exponate lassen sich mittels entsprechender Werkzeuge der Plattform sogar vermessen. Dieses Projekt bedeutet weit mehr als den virtuellen Museumsbesuch. Exponate lassen sich hingegen den Originalen in Museen und Archiven orts- und zeitunabhängig genau betrachten und analysieren. Sie stehen somit auch wissenschaftlichen Untersuchungen bedingt zur Verfügung.

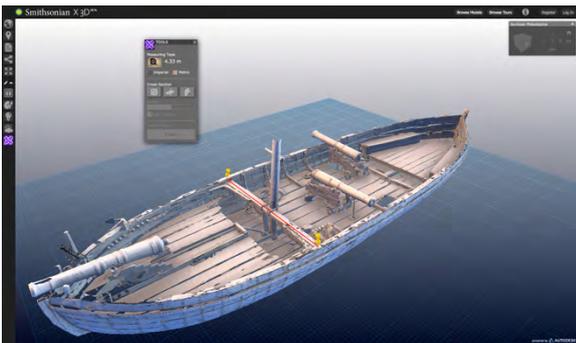


Abb. 2.7.2-3 Smithsonian x3D explorer,



Abb. 2.7.2-4 potree, Pompei

Portale wie CyArk und Smithsonian x3D basieren auf Webstandards wie x3D oder WebGL, die eine virtuelle Ansicht dreidimensionaler Daten mittels aktueller Webbrowser realisieren. Zusätzliche Software zur Visualisierung der Daten wird nicht benötigt.

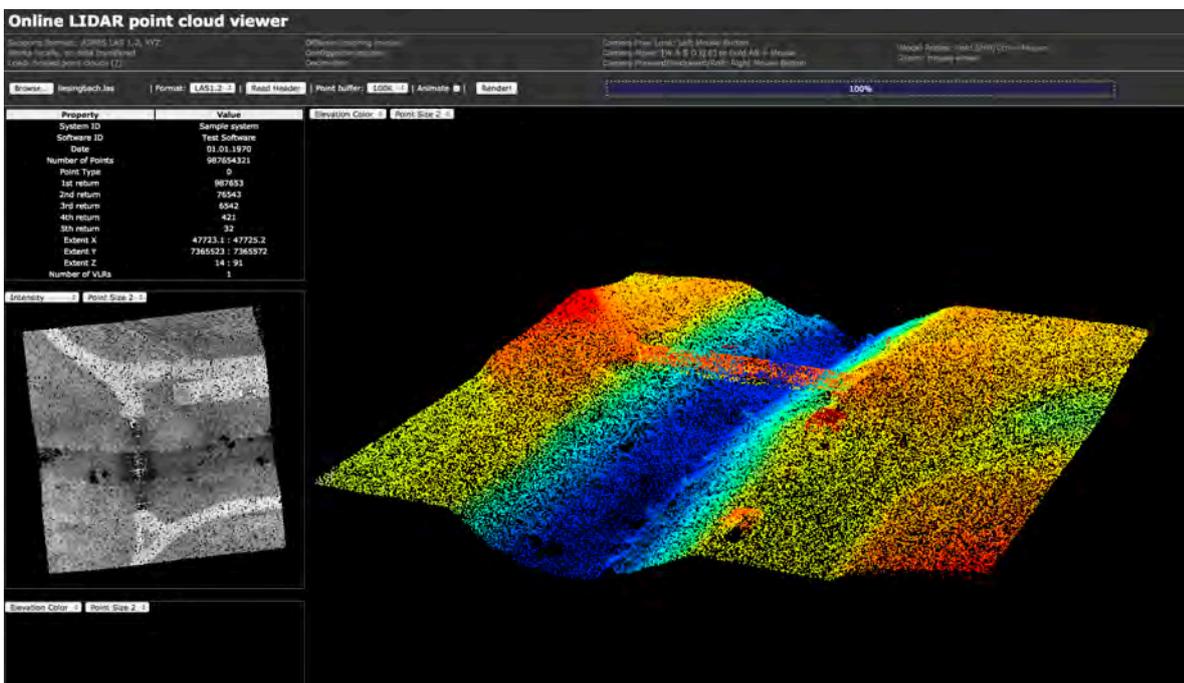


Abb. 2.7.2-5 Lidarview, Geländemodell Liesingbach

Kostenlose, webbasierte „Viewer“ zur Visualisierung stehen zum Beispiel unter „lidarview.com“ oder „potree.org“ zur Verfügung. Beide Portale ermöglichen die angepasste Darstellung und freie Navigation um das dreidimensionale Objekt. Zudem gibt es zahlreiche Plattformen unterschiedlichen Funktionsumfangs, die die webbasierte Visualisierung dreidimensionaler Flächen und Volumenmodelle verschiedener Formate ermöglichen. Software-Entwickler von Anwendungen im Bereich des 3D-Modeling oder der photogrammetrischen Auswertung bieten, teils über Plugins, den direkten „Upload“ des ausgearbeiteten Projekts auf Web-Plattform zur Darstellung dreidimensionaler Modelle an. Portale wie „sketchfab.com“, „verold.com“ oder „3dfile.io“ bieten die Technologie an, um dreidimensionale Modelle zu veröffentlichen und plattformübergreifend mittels eines Webbrowsers interaktiv zu visualisieren.

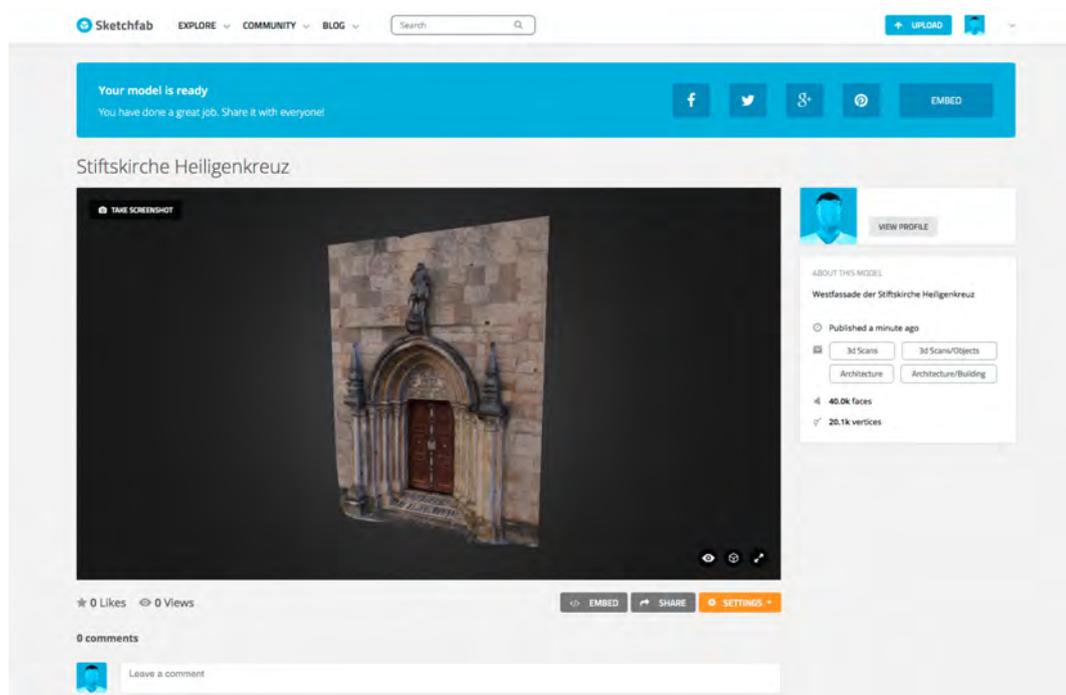


Abb. 2.7.2-6 sketchfab, Archivoltentportal der Westfassade der Stiftskirche Heiligenkreuz

Ein Trend in der Visualisierung dreidimensionaler Geometrie ist die „Augmented Reality“. Sie vereint das visualisierte digitale Modell mit Videobildern realer Objekte. Mittels Tablet oder Smartphone lassen sich Modelle vor Ort in die reale Umgebung integrieren.

„Praktischen Sinn machen solche Anwendungen [...] bei der Diskussion vom Baumaßnahmen oder bei der Simulation von Prozessen oder Vorgehensweisen.“  
(Wiedemann 2004: 61)



Abb. 2.7.2-7 Augmented Reality

Der Softwarehersteller Autodesk hat ein „Cloud-Service“ im Rahmen seiner Produkte etabliert. Daten aus Anwendungen des Herstellers können mittels leistungsstarker Rechner über das Angebot des Services „Recap360“ weiter verarbeitet, aber auch präsentiert und zur Kollaboration freigegeben werden. Mit einem kostenlosen Benutzerkonto kann man bereits auf entsprechende, freigegebene Daten zugreifen. In diesem Rahmen finden sich auch Applikationen wie „Autodesk Recap360“ zur Verarbeitung und Präsentation von Punktwolken, die mittels Photogrammetrie oder Laserscanner erstellt wurden.

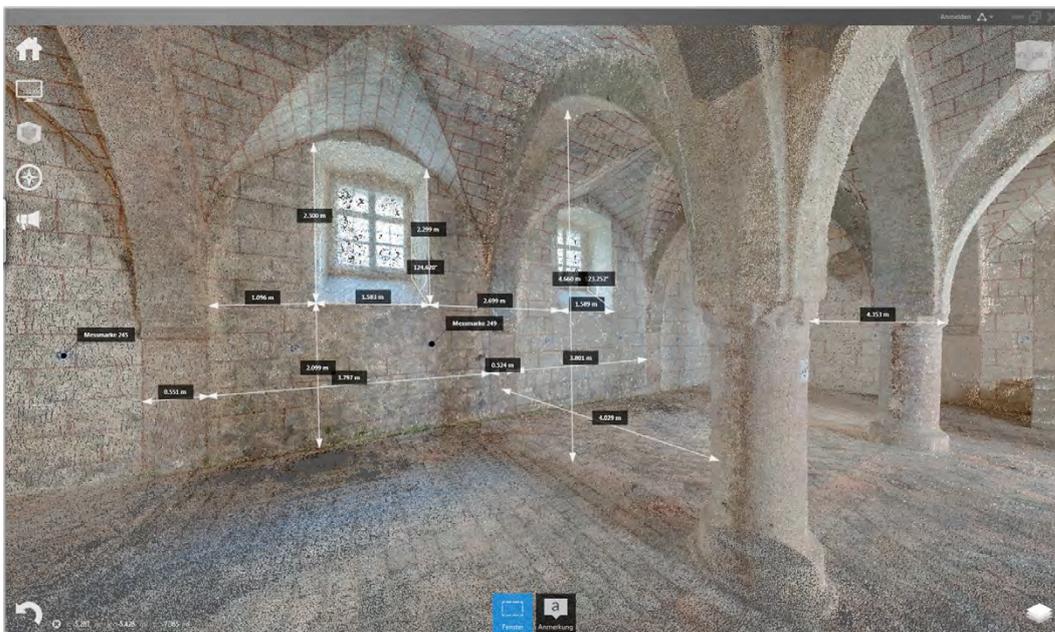


Abb. 2.7.2-8 Autodesk ReCap, Fraterie, Stift Heiligenkreuz

Kostenpflichtige Portale wie „GTeam“ ermöglichen die Präsentation und Datenaustausch vielfältiger Formate und Medien, unter anderem gängige CAD und 3D-Datenformate. Die Plattform wartet zudem mit Werkzeugen des Projektmanagements auf und bietet eine ausreichende Grundlage der webbasierenden Kollaboration projektbeteiligter Partner.

## **2.8 Anwendung der Photogrammetrie in Architektur und Bauwesen**

Die Anwendung der Photogrammetrie gilt vorrangig der Ermittlung geometrischer Eigenschaften von Objekten sowie der Information weiterer Qualitätsmerkmale wie Material, Beschaffenheit und Zustand durch bildhafte Darstellung eines Untersuchungsobjektes. Aus dem gewonnenen dreidimensionalen Objekt lassen sich Plandarstellungen wie Grundrisse, Schnitte oder steingerechte Fassadenpläne aber auch dreidimensionale texturierte Modelle ableiten. Punktwolken dienen in CAD und BIM Applikationen als dreidimensionale Vorlage zur Formulierung parametrischer Geometrie (Grundprimitive oder definierte Bauteile). Die Bauaufnahme nach herkömmlichen Methoden kann sich unvollständig oder fehlerhaft gestalten. Die Punktwolke stellt hingegen ein umfassendes Informationsmodell dar, fehlende Maße behindern die „dreidimensionale Reinzeichnung“ nach Vorlage einer Punktwolke nicht. Die detaillierte Punktwolke kann nach geforderter Genauigkeit ausgewertet werden. Im Zuge der Auswertung und Darstellung kann komplexe Geometrie der detaillierten Punktwolke nach geforderter Genauigkeit entnommen oder einer gewissen Generalisierung unterworfen werden. Geometrisch bestimmte und entsprechend definierte Objekte wie Flächen oder Volumenmodelle repräsentieren in vielen Applikationen zur Gebäudeplanung virtuelle Bauteilmodelle mit entsprechenden Eigenschaften (Material, Aufbau oder spezifische Kenngrößen). Solche Modelle ermöglichen schnelle und präzise Massenermittlungen und lassen sich statischen oder bauphysikalischen Untersuchungen unterziehen. In Anwendungen der bauhistorischen Untersuchung, der Aufnahme von Bauschäden oder dem Facility Management ist die Punktwolke oder das vermaschte dreidimensionale und texturierte Modell (Mesh) Gegenstand der photorealistischen Objektvisualisierung zur Ansicht und Untersuchung. (vgl. 2.5.3)

Die photographische Aufnahme im Bildverband erlaubt gegenüber den festen Aufnahmestandpunkten von Theodolit, Totalstationen oder Technologien wie dem Laserscanner, eine gewisse Freiheit in der Gestaltung der Aufnahmeordnung, um sichttote Bereiche zu überwinden oder komplexe geometrische Körper in Abschnitten detaillierter zu erfassen. Die Aufnahme eines Bildverbandes lässt sich an geometrische Erfordernisse

anpassen und ermöglicht eine Bestandaufnahme in kurzer Zeit. Die standortgebundene Objekterfassung mittels Totalstation oder Laserscanner erfordert gegebenenfalls die mehrfache Positionierung und Ausrichtung von Geräten und Hilfsmitteln, um sichttote Bereiche zu minimieren oder Teilbereiche übergeordneten Interesses mit erhöhter Genauigkeit zu erfassen.

Eine Gegenüberstellung (*Georgantas et al. 2012*) beider Technologien anhand der Aufnahme der komplexen geometrischen Struktur eines Stiegenhauses über vier Geschosse verdeutlicht den Mehraufwand der Objektaufnahme mittels standortgebundener Geräte. Das Objekt misst eine Höhe von zwölf Metern und gliedert sich pro Geschoss in zwei Treppenhänge mit einem Zwischenpodest und einem Podest je Vollgeschoss. Der enge Raum wurde photographisch unter Einsatz einer Fisheye-Optik erfasst, die einen Bildwinkel von 180° abdeckt. Dies ist der enormen Verzeichnung wegen eine unübliche Konfiguration, von der im Regelfall abzuraten ist und deren Auswertung nur von wenigen Software-Lösungen unterstützt wird. Die photographische Aufnahme des Objekts erfolgte mittels eines Bildverbandes, der 111 Abbildungen umfasst. Die Aufnahme der gesamten Bildserie erfolgte in nur einer Stunde. Hingegen bedurfte die Objektdigitalisierung mittels Laserscanner 20 Stationen, wobei der Scanvorgang pro Standort innerhalb einer Stunde realisiert wurde. Der Zeitaufwand der Aufnahme mittels Laserscanner vor Ort betrug somit 20 Stunden.<sup>23</sup>

Die Objektaufnahme mittels Laserscanner erfordert gegebenenfalls eine umfassende Planung der Messarbeiten, um Referenzpunkte und Standorte der Messgeräte festlegen zu können.

„In multi-image photogrammetry each camera location acts like a survey station but requires with far less effort to set up.“ (*McCarthy 2014: 183*)

Die flexible Gestaltung eines Bildverbandes ermöglicht eine rasche Objektaufnahme bei geringen Anschaffungskosten der notwendigen Hardware. Die Gestaltung eines sich überlappenden Bildverbandes ist unkompliziert und kann von jeder Person ausgeführt werden, die über das grundlegende Wissen verfügt, eine Digitalkamera fachgerecht zu bedienen. Die Auswertung am Computer erfolgt zeitversetzt und gegebenenfalls durch geschulte Fachkräfte. Gegenüber aktiven Aufnahme- und Messverfahren wie beispielsweise dem Laserscanner ist eine Ableitung von Raumpunkten anhand eines Bildverbandes nur

---

<sup>23</sup> Es soll hinsichtlich dieses Versuches erwähnt sein, dass die Objektaufnahme mittels 20 Stationen und die Dauer pro Scan-Vorgang unangemessen hoch erscheint. Zudem ist die photogrammetrische Aufnahme mittels Fisheye-Optik aufgrund der enormen Verzeichnung unüblich. Ein Bildverband mittels entsprechender Weitwinkeloptik würde in einer höheren Anzahl an Aufnahmen resultieren. Ein deutlicher Mehraufwand der Aufnahme unter Einsatz eines Laserscanners ist anhand dieses Beispiels jedenfalls nachvollziehbar.

möglich, wenn ein spezifischer Punkt auf mindestens drei Aufnahmen (zwei Aufnahmen im Fall der Stereobildauswertung) registriert werden kann. Photographische Aufnahmen entsprechender korrekter Belichtung mit ausreichender Bildschärfe und Schärfentiefe mittels eines Kamerasystems, dessen innere Orientierung als stabil und bestimmt gilt, bilden die Voraussetzung für verwertbares Bildmaterial.

Homogene, kontrastarme, sehr dunkle, transparente und reflektierende Oberflächen bedeuten die Grenzen der Photogrammetrie. Sind einer Oberfläche keine eindeutigen, identifizierbaren Merkmale in entsprechender Dichte zu entnehmen, können in angemessenen Umfang Mess- oder Bildmarken als Hilfsmittel versetzt werden. Überwiegen solche Flächen oder sind sie zu groß, um Marken in ausreichender Dichte zu platzieren, kann das Verfahren nicht angewandt werden.

Thomas Luhmann stellt die Vorteile der Photogrammetrie gegenüber der klassischen Bauaufnahme mit dem sogenannten Handaufmaß wie folgt dar. (vgl. *Luhmann 2010: 566*)

- berührungslose Messung ohne Einrüstung der Fassaden
- geringe Unfallgefahr
- kurze Aufnahmezeit am Objekt
- hohe Genauigkeit
- dreidimensionale Koordinatenbestimmung
- Bestimmung von Freiformlinien (Konturen) und Freiformflächen (Ornamenten)
- Kombination von Strichdarstellung und entzerrten Originalbildern (Bildpläne)
- Nachträgliche Messung aus archivierten Messbildern oder historischen Aufnahmen

### **2.8.1 Planungsgrundlage, Bauen im Bestand**

Das Bauen im Bestand als Maßnahme der Sanierung, Modernisierung oder räumlichen und funktionalen Umwidmung, setzt eine verbindliche Planungsgrundlage voraus. Detailliertes Planmaterial im Rahmen solcher Maßnahmen ist im erforderlichen Umfang oft nicht vorhanden. Vorliegende Planungsunterlagen zum Bestand müssen auf Vollständigkeit und Gültigkeit geprüft werden. Ergebnisse der Photogrammetrie ermöglichen einen Soll-Ist Vergleich anhand bestehender Planungsunterlagen. Die ermittelten Daten der photogrammetrischen Auswertung ermöglichen die Ableitung eines sehr genauen Bauaufmaßes und sind zugleich Methode der photographischen Dokumentation. Stehen die Planungsunterlagen in keiner digitalen Form zur Verfügung, ist die Digitalisierung für den folgenden Planungsprozess unumgänglich. Planungsgrundlagen können einem dreidimensionalen Modell in Folge photogrammetrischer Auswertung in entsprechendem Umfang und planungsrelevanten Bezug abgeleitet werden. Zur Neugestaltung von Fassaden

bieten sich bereits einfache Fassaden-Bildpläne in Form von Orthophotos oder entzerrten Aufnahmen an. Die Produkte der Photogrammetrie ermöglichen die permanente Kontrolle vorliegender Planungsunterlagen. Dieser Abgleich ist nach Vorlage entsprechender Datensätze nicht ortsgebunden. Die Daten stehen zudem der Rechtssicherheit im Umfang des Bauvorhabens und dem Lebenszyklus eines Gebäudes als Datenmodell nachhaltig zur Verfügung. Auf Basis des dreidimensionalen Modells lässt sich auch ein Gebäudeinformationsmodell (GebIS) realisieren. Eine bedeutende Anwendung der Photogrammetrie ergeht in der Ermittlung sehr genauer Maße zur Montage passgenauer vorgefertigter Bauteile wie Tragwerkselemente für Dachtragwerke oder den Austausch statischer Elemente.

### **2.8.2 Dokumentation, Überwachung des Baufortschrittes**

Die fortwährende Dokumentation des Baufortschrittes unter Anwendung photogrammetrischer Methoden liefert einen wertvollen Datenbestand einer vierdimensionalen Dokumentation. Den dreidimensionalen Raumpunkten wird eine weitere Ordnung, die Zeit, zugewiesen. Über den Vergleich eines Geländemodells des Bauplatzes mit dem Stand der abgeschlossenen Erdarbeiten lassen sich bereits exakte Werte zur Abrechnung der Baumaßnahmen ermitteln. Die Photogrammetrie wird somit auch zum Werkzeug des „Baucontrollings“. Die laufende Dokumentation dient nicht nur der Ermittlung von exakten Aufmaßen zur Abrechnung, sondern auch der Analyse und Rechtssicherheit im Fall von Bauschäden. Beispielsweise können Setzungsprozesse sehr genau erfasst werden. Das Gebäude kann dem Baufortschritt entsprechend in Abschnitten erfasst werden. Eine erneute umfassende Erhebung und Auswertung des Bestandes ist nicht erforderlich. Daten des aktuellen Standes können auf dem Bestand des Datenmodells aufbauen oder in ein bestehendes dreidimensionales Modell integriert werden.

Systemlösungen wie die Plattform „SceneWorks“ (Abbildung 2.8.2) des Unternehmens „Spheron-VR AG“ realisieren diese Anwendung hochgradig automatisiert. Ein Kamerasystem, das als „Mobile Reality Capture Camera Device“ bezeichnet wird, erfasst ein sphärisches Panorama. Die Daten werden vom Gerät ausgewertet und speisen eine Datenbank. Eine entsprechende Anwendung ermöglicht den Zugriff auf diese Daten über den Zugang zu einem zentralen Server. Somit ist Planungsmitgliedern die virtuelle, ortsunabhängige Besichtigung möglich.

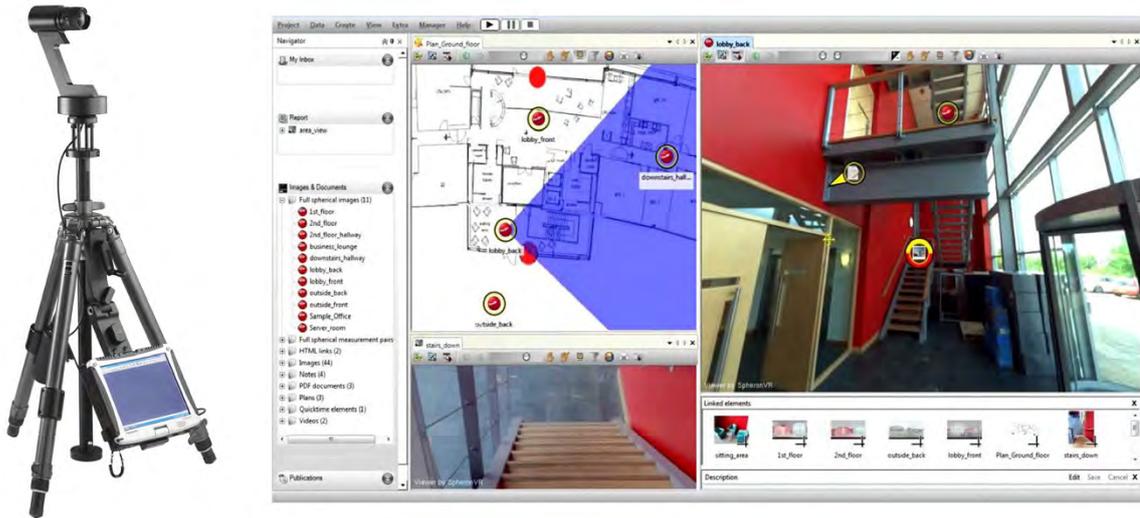


Abb. 2.8.2 Spheron Scenecam VR und Sceneworks

Ein wesentlicher Vorteil der virtuellen Besichtigung ist der uneingeschränkte und zeitunabhängige Zugang der Planungsbeteiligten zu Orten, wie Industrieanlagen, Kraftwerke, Laboratorien oder Einrichtungen, im steten Betrieb, deren Besichtigung oft schlecht möglich wäre oder gefährlich ist. Diese Technologie ermöglicht eine umfassende Kollaboration und die Dokumentation über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes.

Gegenüber solchen hochgradig automatisierten Systemlösungen erscheint die entsprechende Aufnahme eines Mehrbildverbandes und der photogrammetrischen Auswertung zunächst als deutlicher Mehraufwand. Es darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass im Zuge der Baudurchführung bereits Aufwand zur bildhaften Dokumentation betrieben wird und die Fertigung entsprechenden Bildmaterials zur Ableitung photogrammetrischer Modelle keinen wesentlichen Mehraufwand bedeuten muss. Die Aufnahmen bilden die Grundlage der weiteren Verarbeitung. Diese Ausarbeitung kann selektiv erfolgen. Das Bildmaterial stellt jedenfalls eine profunde Photodokumentation und nachhaltiges Informationsmodell zur späteren Auswertung dar.

### 2.8.3 Bauhistorische Untersuchung

Die Photogrammetrie hat in der bauhistorischen Untersuchung Tradition. Albrecht Meydenbauer, der Begründer der Architekturphotogrammetrie, erfasste bereits im 19. Jahrhundert etwa 2000 Baudenkmäler. (vgl. 2.1) Alle Vorteile des photogrammetrischen Verfahrens lassen sich auf dem Gebiet der bauhistorischen Untersuchung anwenden. Die Untersuchung und Aufnahme in diesem Forschungsgebiet verlangen nach hoher Detailtreue. Erfordernisse wie ein verformungsgerechtes, steingetreues Aufmaß und eine detaillierte

Photodokumentation werden erfüllt. Zudem bietet die Substanz der Bauwerke und Monumente zumeist ausreichende Struktur, was die eindeutige Identifikation von Objektpunkten in hoher Dichte und damit die detaillierte Auswertung in Form geometrischer Daten ermöglicht. Photographische Aufnahmen lassen sich unter Zuhilfenahme einer Graukarte oder Farbtafel zudem sehr farbtreu reproduzieren. Die photographische Dokumentation gilt der Bestandsaufnahme des Zustandes und Inventars sowie der Ermittlung geometrischer Größen. Im Kontext der bauhistorischen Untersuchung und Dokumentation von Kulturgütern ist das Projekt „Photo Tourism“ beispielhaft zu erwähnen. Die Zielsetzung dieses Projektes war, photographische Aufnahmen bestimmter Örtlichkeiten aus dem Angebot webbasierender Plattformen wie der „Google-Bildersuche“ oder dem Portal „flickr“<sup>24</sup> zu entnehmen, um diese nach einem Verfahren der räumlichen Zuordnung photogrammetrisch auszuwerten. Der technologische Hintergrund dieses Projektes erlaubt die Auswertung von Aufnahmen, die mit unterschiedlichen Kamerasystemen, somit uneinheitlicher innerer Orientierung, gefertigt wurden. Die Publikation „Building Rome in a Day“ im Rahmen des Projektes „Photo Tourism“ beschreibt diese Technologie wie folgt:

„We present a system that can match and reconstruct 3D scenes from extremely large collections of photographs such as those found by searching for a given city (e.g., Rome) on Internet photo sharing sites. [...] Our experimental results demonstrate that it is now possible to reconstruct cities consisting of 150K images in less than a day on a cluster with 500 compute cores.“ (Agarwal, Snavely, Simon, Seitz, & Szeliski, 2011)

Auf Basis von 150.000, vornehmlich touristischer Aufnahmen, konnten in nur 21 Stunden, Bauwerke wie das Kolosseum, der Petersdom oder der Pantheon anteilig, als „sparse Pointcloud“ rekonstruiert werden.

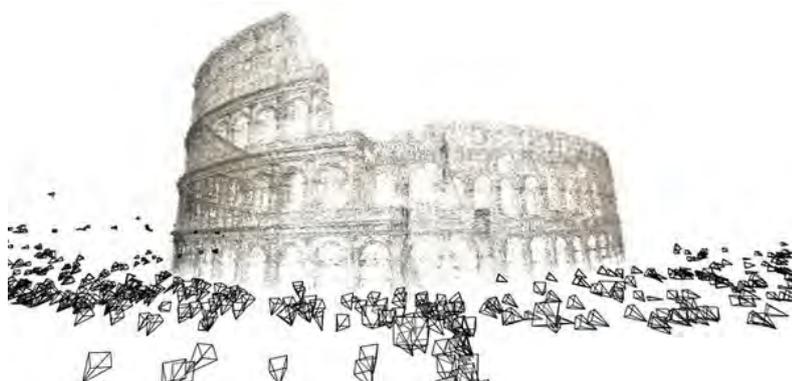


Abb. 2.8.3-1 Building Rome in a Day, Pointcloud Kolosseum

---

<sup>24</sup> Webbaserende Plattform zum Präsentieren und Sichten Photographischer Aufnahmen.

Dieses Beispiel verdeutlicht den nachhaltigen Wert entsprechender photographischer Aufnahmen zur digitalen Rekonstruktion wertvoller Kulturgüter.

So konnten auch die im Jahr 2001 durch Taliban vollständig zerstörten Buddha-Statuen von Bamiyan (Afghanistan) auf Basis photographischen Materiales aus dem Internet, einer analogen Aufnahmeserie aus dem Jahr 1960 sowie photogrammetrischer Aufnahmen einer analogen Theodolit-Messkamera aus dem Jahr 1970 digital rekonstruiert werden. (vgl. Grün, Remondino, & Zhang, 2004)



Abb. 2.8.3-1 Buddha Statuen Bamiyan vor und nach der Zerstörung



Abb. 2.8.3-2 Buddha Statuen Bamiyan Rekonstruktion mittels Recap 360

Im August 2014 veröffentlichte Autodesk einen Bericht zur Rekonstruktion der Monumente auf Basis von Bildmaterial aus dem Web (crowd source photos) mittels des Services Recap 360.

„Unfortunately this precious monument got damaged and does not exist today, but not the case with its photographs. Thanks to the internet and this technology, these sites can now be digitally preserved and maybe at some point used for restoration exactly as they once were.

Another note worth mentioning is that the algorithms that are used for generating these meshes are constantly.“ (*Recap Product News, 2014*)

#### **2.8.4 Bauschäden und baumechanische Untersuchungen**

Die Photogrammetrie erweist sich auch in der Aufnahme von Bauschäden als nützliches Werkzeug. Die detaillierte Photodokumentation von Bauschäden wie Verformungen, Risse oder Feuchteschäden kann um räumliche Information ergänzt werden. Schäden oder Verformungen können über einen Zeitraum dokumentiert und anhand geometrischer Daten analysiert werden. Zudem eignet sich die Photogrammetrie unter Einsatz mehrerer synchroner Kamerasysteme für den Laborversuch im Rahmen von Belastungsversuchen von Probekörpern oder konstruktiven Bauelementen. Photogrammetrische Aufnahmen für den Laborversuch bedingen jedoch zumeist Systemlösungen geeigneter Kamerasysteme (Spektrum, Hochgeschwindigkeitsaufnahmen) für den industriellen und wissenschaftlichen Gebrauch.

Die Anwendung photogrammetrischer Verfahren „[...] bietet bei einer Vielzahl baumechanischer Untersuchungen die Voraussetzung für eine kontinuierliche, zeit-synchrone Objektoberflächenerfassung bei kurz- und langzeitigen Belastungsversuchen im Labor und in situ.“ (*Hampel, 2008, S. 2*)

Der Bauschaden am Objekt oder Prüfkörper muss zur photogrammetrischen Aufnahme ausreichend signalisiert werden. Es gilt stabile, diskrete Messpunkte außerhalb des schadhaften Bereiches zu definieren, anhand derer die rekonstruierten Modelle des Schadens orientiert und zur Auswertung verglichen werden können. Zudem können Merkmale auch im unmittelbaren Schadensbereich punktuell definiert werden, um Verformungen verfolgen zu können. Die Art und Dichte der Signalisierung ist vom Schadensfall und dessen Maßstab abhängig. Es ist darauf zu achten, möglichst dauerhafte Marken geeigneter Größe zu versetzen. In Laborversuchen kann die Aufnahmeordnung über den Versuch gegebenenfalls einfach reproduziert werden. Aufnahmesequenzen im Labor erfordern eine günstige Ausleuchtung des Versuchsobjektes.



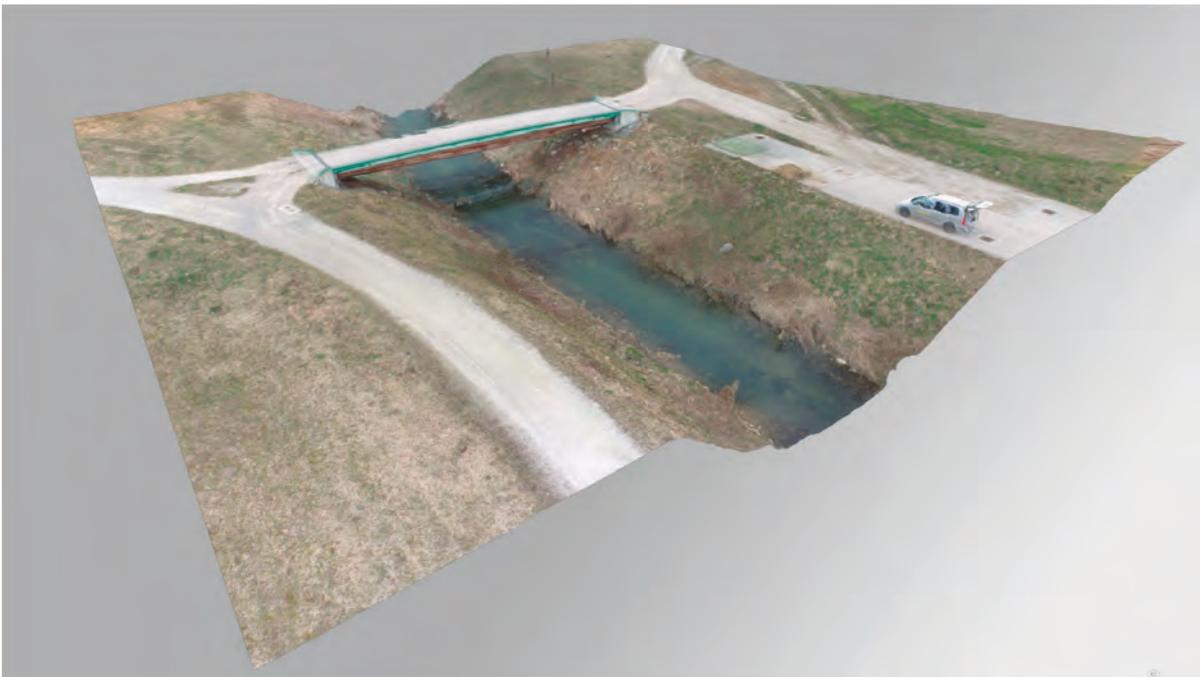
*Abb. 2.8.4 Signalisierter Probekörper, Stahlbetonbauteil unter Schubbeanspruchung*

Die Zuhilfenahme künstlicher Lichtquellen ist oft unverzichtbar. Auch am Objekt vor Ort sollten die wiederholten Aufnahmen des Schadens unter möglichst gleicher Aufnahmekonfiguration erfolgen. Werden künstliche Lichtquellen gesetzt, sind diffuse stationäre Lichtquellen zu bevorzugen. Wird der Bauschaden von Feuchteschäden begleitet, ist im besonderen Maße darauf zu achten, Reflexionen zu vermeiden, da solche Bildstellen nicht rekonstruiert werden können.

### **2.8.5 Das Geländemodell**

Digitale Geländemodelle sind eine wertvolle Planungsgrundlage. Photogrammetrische Methoden zur Landvermessung sind in der Geodäsie etabliert. Die Methodik der Luftbildphotogrammetrie kann in angepasstem Maßstab auch für Geländemodelle im Rahmen von Baumaßnahmen angewandt werden. Unbemannte, ferngesteuerte Flugfahrzeuge, UAVs (unmanned aerial vehicle) oder Drohnen tragen kompakte Kamerasysteme, um ein Gelände zur photogrammetrischen Auswertung zu erfassen. Aufgrund der Erfordernisse der Flugkontrolle, der Aufnahme, des Signalisierens und Vermessens von Lagepasspunkten (GCP – Ground Control Points) und der Kompetenz ein solches Modell auszuwerten, frei von Vegetation darzustellen, zu orientieren und gegebenenfalls in ein lokales Koordinatensystem zu überführen, empfiehlt sich die Ausführung durch eine Fachkraft aus dem Tätigkeitsfeld der Geodäsie.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein geringer Geländebereich unter Einsatz einer Drohne photographisch erfasst. Aus diesen Aufnahmen konnte ein detailliertes Modell eines Abschnittes des Liesingbachufers mitsamt einer Fussgängerbrücke erfasst werden. Anhand der GPS-Daten der Aufzeichnung des Fluges konnte das Geländemodell im geodätischen Referenzsystem WGS 84 (World Geodetic System 1984) verortet werden. Die photogrammetrische Auswertung erfolgte mittels der Software Photoscan Pro. Die Punktwolke wurde typologisch klassifiziert (Gelände, mittlere und hohe Vegetation, Wasser, Objekte) wodurch das Modell von einem Großteil an Vegetation bereinigt werden konnte. Die weitere Verarbeitung des DEM (Digital Elevation Model) erfolgte mittels der open source Software QGIS.



*Abb. 2.8.5-1 3D Modell des Geländeabschnittes Liesingbachufer*



Abb. 2.8.5-2 Orthophoto mit Überblendung eines Höhenlinienmodells zu 0,5 Meter

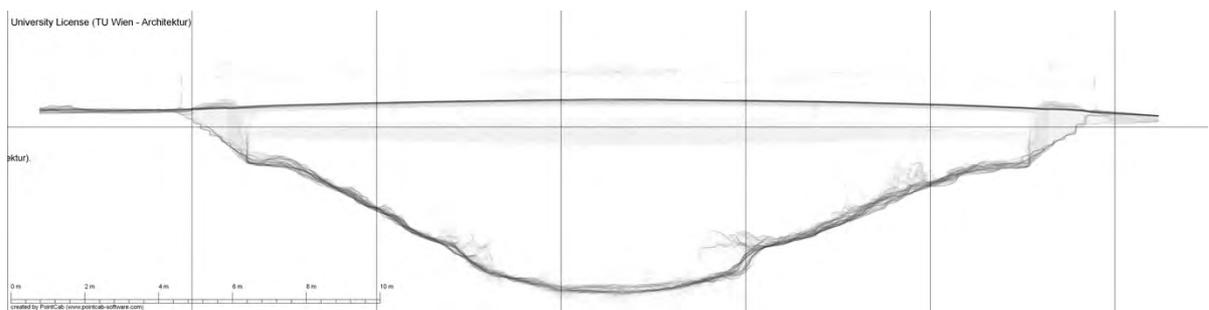


Abb. 2.8.5-3 Schnitt durch das Bachbett und die Brücke



### 3. Das Photogrammetrische Verfahren

Die Photogrammetrie ist ein Aufnahme- und Messverfahren. Gegenüber anderen berührungslosen Messverfahren erfolgt die Vermessung nicht am Objekt, sondern anhand der erstellten Photographien oder den Produkten der Photogrammetrie zeitlich versetzt am digitalen Arbeitsplatz. Der Rekonstruktion einer Aufnahme liegt das mathematische Modell der zentralprojektiven Abbildung zugrunde. Dieses Modell beschreibt die Abbildung einer Menge von Objektpunkten als Schnittpunkte von Strahlen mit einer Projektionsebene, wobei alle Strahlen durch einen einzigen Punkt, das Projektionszentrum „O“, auch Augpunkt genannt, verlaufen.

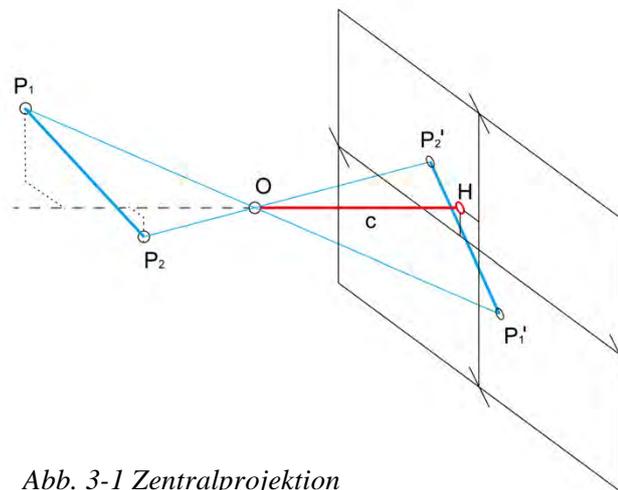


Abb. 3-1 Zentralprojektion

Der Bildhauptpunkt „H“ ist der Lotfußpunkt des Projektionszentrums „O“ auf der Projektionsebene. Dieser Punkt weicht bei handelsüblichen Kamerasystemen aus fertigungstechnischen Gründen vom „Bildmittelpunkt“ ab und muss durch Kalibrierung des Kamerasystems ermittelt werden. Der Richtungsvektor  $\overline{HO}$  beschreibt die optische Achse. Die optische Achse entspricht der Aufnahme­richtung. Der Abstand  $\overline{HO}$  entspricht der Kamerakonstanten „c“, der Brennweite. Die Lochkamera, das einfachste Kameramodell, bei dem das Licht durch eine sehr kleine Öffnung auf eine Projektionsebene fällt, kommt dem idealen geometrischen Kameramodell gleich. Der „Augpunkt“ ist gleich dem Zentrum der Eintrittspupille, die Projektionsebene entspricht der Film- oder Sensorebene.

Nach diesem Model lässt sich anhand „[...] von mindestens zwei korrespondierenden (homologen), räumlich verschiedenen Bildstrahlen [...] ein Objektpunkt dreidimensional bestimmen.“ (Luhmann 2010: 7)

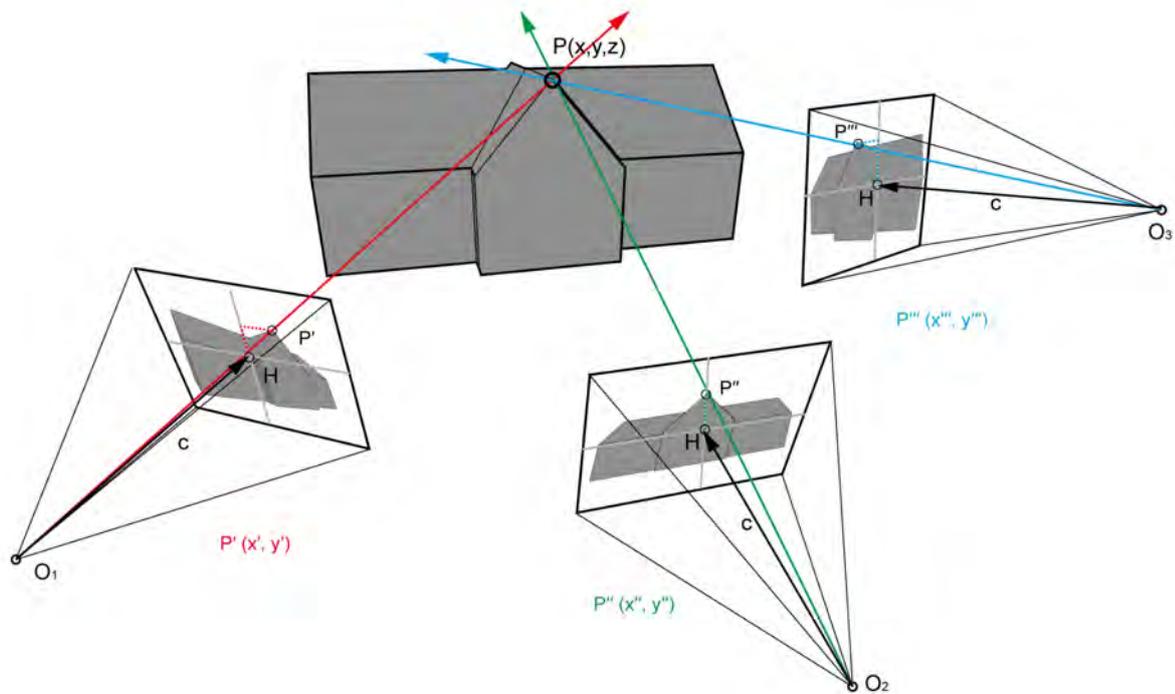


Abb. 3-2 Photogrammetrisches Messprinzip

Das photographische Kameramodell weicht jedoch vom idealen Modell der Lochkamera ab. Eine Summe an Bauteilen von den Linsen eines Objektivs, dessen Spiel und Ausrichtung infolge der Befestigung am Gehäuse der Kamera oder die Lage und Beschaffenheit des Bildsensors, bedingen eine Abweichung vom idealen Kameramodell. Ein Kameramodell mit definierter innerer Orientierung wird als „metrische Kamera“ bezeichnet. Die Messkamera ist ein solches Kameramodell. Ihre innere Orientierung gilt aufgrund konstruktiver Merkmale als größtmöglich bestimmt und stabil. Folglich ist auch das Bildkoordinatensystem der Aufnahme einer Messkamera bekannt und weitgehend stabil.

„Close range photogrammetry uses digital cameras. These are generally non-metric digital cameras.“ (Temiz et al. : 2008)

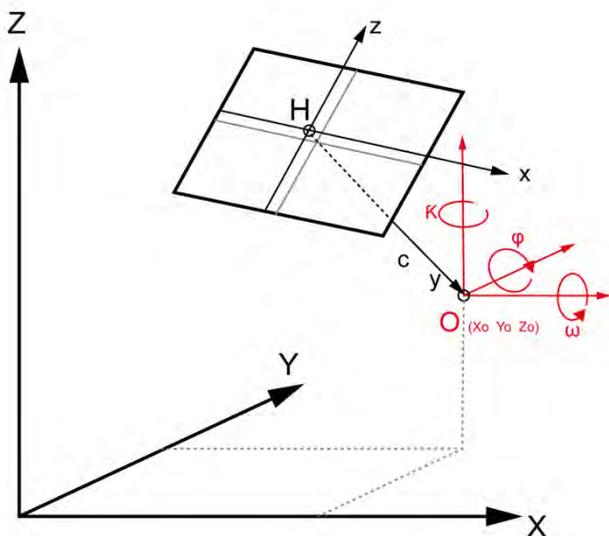
Die Aufnahme einer Kamera muss immer unter Berücksichtigung der spezifischen Abbildungsfehler (vgl. 3.3) ausgewertet werden. Daten der Kamerakalibrierung beschreiben die innere Orientierung eines Kamerasystems über die Koordinaten des Hauptpunktes, die Kamerakonstante (Brennweite) sowie radiale und tangential Verzeichnungen. Nach dem kalibrierten Kameramodell wird die photographische Aufnahme in ein entsprechend definiertes Bildkoordinatensystem überführt und kann nach dem Prinzip der zentralprojektiven Abbildung ausgewertet werden. Die genaue Beschreibung

kameraspezifischer Werte wie der Brennweite des Objektivs, die Lage des Hauptpunktes oder radiale wie tangentielle Verzeichnungen, definieren die innere Orientierung.

„Die innere Orientierung eines Aufnahmesystems umfasst alle instrumentellen und mathematischen Ansätze zur Beschreibung des vollständigen geometrischen Abbildungsmodells innerhalb einer Kamera.“ (Luhmann 2010: 138)

In der SfM-Photogrammetrie können diese Werte infolge iterativer Rechenprozesse im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung ermittelt werden. Die Möglichkeit der Kalibrierung anhand des Photomaterials wird als „Selbst- oder Simultankalibrierung“ bezeichnet. Werte nach diesem Verfahren können von den tatsächlichen Daten der Kamerakalibrierung jedoch abweichen (vgl. 2.5.5). Es ist ratsam, von einer durch Kalibrierung ermittelten inneren Orientierung auszugehen. Da diese Werte, vor allem die Kamerakonstante „c“ und der Hauptpunkt, über eine Bildserie variieren können, bietet manche Software-Lösung die „Optimierung“ der inneren Orientierung der einzelnen Aufnahmen eines Bildverbandes hinsichtlich der Annäherung an Werte aus der Selbstkalibrierung. Die räumliche Lage und Orientierung der Kamera beziehungsweise des Bildkoordinatensystems in einem übergeordneten Projekt-Koordinatensystem gilt als äußere Orientierung.

„Die äußere Orientierung (auch extrinsische Orientierung) beschreibt durch sechs Parameter die Lage und Ausrichtung des räumlichen Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem.“ (ebd: 236)



Diese sechs Parameter umfassen die drei Raumkoordinaten (X,Y,Z) der Lage des Projektionszentrums sowie die Drehwinkel der optischen Achse ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) gegenüber den entsprechenden Ordinaten des Projektkoordinatensystems.

Abb. 3-3 Äußere Orientierung einer Aufnahme

Die Orientierung der Kamera erfolgt unter Annahme einer bekannten inneren Orientierung anhand von mindestens drei identifizierten Objekt-, Pass- oder Verknüpfungspunkten einer Aufnahme.

„Das durch die Passpunkte und das Projektionszentrum aufgespannte Strahlenbündel lässt sich in nur einer eindeutigen Lage und Orientierung auf die in der Bildebene verteilten Bildpunkte P einpassen.“ (Luhmann 2010: 243)

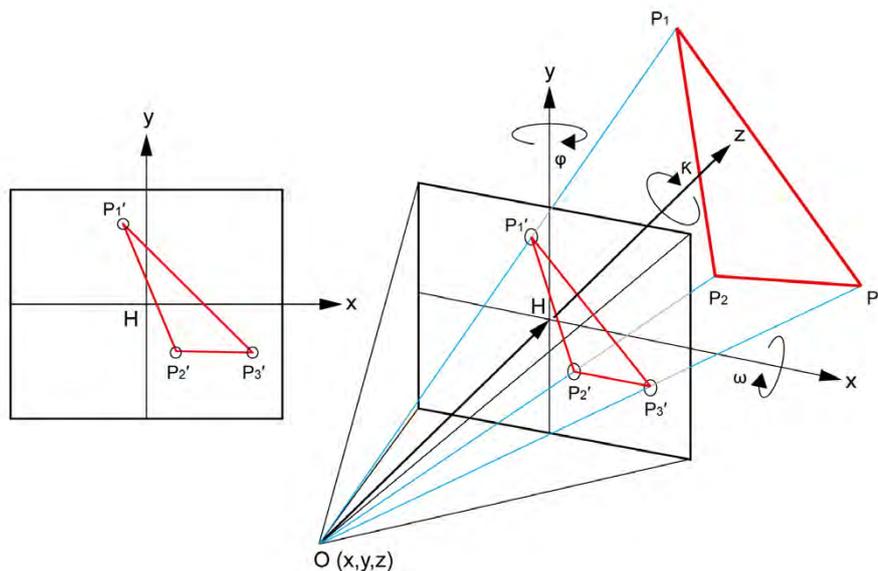


Abb. 3-4 Ermittlung der äußeren Orientierung nach drei bekannten Punkten

Der Prozess der Kameraorientierung anhand der photographischen Aufnahmen wird als „räumlicher Rückwärtsschritt“ bezeichnet. Sind innere und äußere Orientierung bekannt kann die Lage weiterer identifizierter Objektpunkte anhand der photographischen Aufnahmen bestimmt werden. Die Lagebestimmung solcher Punkte wird als „räumlicher Vorwärtsschritt“ bezeichnet.

„Beim allgemeinen räumlichen Vorwärtsschritt werden die Bildkoordinaten des Punktes in beliebig vielen beteiligten Bildern gemessen und zusammen mit den bekannten Parametern der inneren und äußeren Orientierung zur Punktberechnung verwendet.“ (ebd: 344)

Soll die Lagebestimmung von Punkten innerhalb einer Ebene erfolgen, lassen sich diese Koordinaten aus nur einer Aufnahme ableiten (Einbildphotogrammetrie), sofern diese Fläche durch bekannte Größen definiert werden kann. Man unterscheidet grundsätzlich die Auswertung von Einzelbildern, dem Bildpaar als Stereobild und der Auswertung eines Bildverbandes.

### 3.1 Einbildauswertung

Die Einbildauswertung stellt die einfachste photogrammetrische Aufgabe dar. Im Anwendungsfall der Architekturphotogrammetrie gilt es, eine ebene Bezugsfläche einer perspektiven photographischen Abbildung frei von Verzerrungen in eine orthogonale Ansicht zu überführen, um diese als Bildplan verwenden zu können. Eine solche „Entzerrung“ erfolgt anhand eines einzelnen Bildes nach der ebenen Projektivtransformation (vgl. 2.2.4). Das Verfahren erfordert Kenntnis über die zu entzerrende Ebene, um ein entsprechendes Projektionszentrum definieren zu können. Die Lage dreier Punkte oder der Schnittwinkel und die Länge zweier Geraden genügen, um die Projektionsebene zu bestimmen. Den günstigsten Fall beschreibt ein bekanntes Rechteck.

„Ziel ist die Umbildung des fotografischen oder digitalen Bildes in eine neue Projektion, im Allgemeinen in eine Parallelprojektion.“ (Luhmann 2010: 262)

Alle Bildpunkte einer photographischen Aufnahme werden unter Beschreibung eines alternativen Projektionszentrums unter gleichen Bedingungen transformiert. Punkte, die nicht in der Bezugsebene liegen, werden nicht lagerichtig dargestellt.

„[...] projective rectification methods can not correct relief displacements, since no information concerning ground points (GCP) is used.“ (Temiz et al.: 2008)



Abb. 3.1-1 Photographische Aufnahme und ebene Projektivtransformation

Um alle Punkte der Ansicht eines Objekts in eine Parallelprojektion zu überführen, müsste deren räumliche Lage bekannt sein. Das Verfahren der differentiellen Entzerrung bildet jeden Objektpunkt nach seiner räumlichen Lage auf einer Projektionsebene ab. Nach diesem Verfahren wird das Orthophoto erstellt.

Wird die Bezugsebene entzerrt dargestellt, können Maße und Winkel abgenommen werden. Dieses Verfahren eignet sich beispielsweise zur Fertigung einfacher Fassadenpläne.

„Die Einbildauswertung stellt geringe Anforderungen an Hard- und Software und den damit verbundenen Arbeitsaufwand.“ (Donath 2008: 86)

Die projektive Transformation kann über zahlreiche Software-Lösungen, CAD-Erweiterungen, sogar mittels Applikationen zur Bildbearbeitung angewendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Anwendung „Perspective Rectifier“ verwendet.

### 3.2 Stereobildauswertung

Die Stereobildauswertung entspricht dem Prinzip des menschlichen Sehvermögens und der Raumwahrnehmung. Sie war das traditionelle Verfahren der analytischen Luftbildphotogrammetrie. Das Verfahren beschreibt die einfachste Methode der Auswertung dreidimensionaler Daten aus zwei korrespondierenden Aufnahmen. Die Ausrichtung der Aufnahmen erfolgt nach dem „Stereo-Normalfall“.

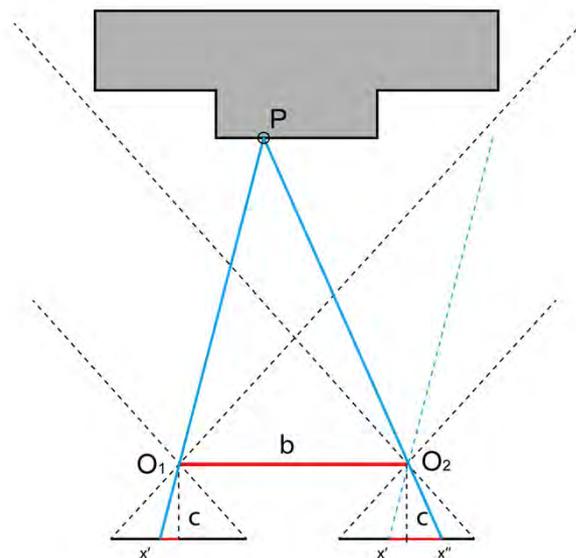


Abb. 3.2-1 Stereonormalfall

Das photogrammetrische Modell ist durch die definierte Aufnahmeordnung, der bekannten Orientierung und Basis (Versatz) der Aufnahmen, ausreichend beschrieben. Gegenüber der Einbildauswertung wird die Lage eines Objektpunktes über drei Koordinaten bestimmt, der

Punkt muss somit auf zwei Aufnahmen abgebildet sein. Solche Punkte können natürliche Merkmale oder signalisierte Punkte sein. Sie sind die Grundlage der Bestimmung der Orientierung der Aufnahmen über den räumlichen Rückwärtsschritt. Das Stereobildpaar wird traditionell unter Einsatz von Stereoauswertgeräten (vgl. 2.1) oder infolge computergestützter Verfahren ausgewertet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Stereobildauswertung nicht angewendet, da diese aufgrund der Entwicklungen im Bereich der Mehrbildphotogrammetrie im Anwendungsbereich der Architektur- und Nahbereichsphotogrammetrie kaum noch Anwendung findet.

„In multi-image photogrammetry, some of the most technically challenging and time-consuming elements of traditional stereo and convergent photogrammetry have now been automated and it is now possible to combine large groups of images rather than pair, making this a far more cost-effective, user-friendly and powerful approach.“ (McCarthy 2014: 175)

Das Verfahren eignet sich vor allem für „Online-Anwendungen“, die räumliche Ergebnisse in Echtzeit liefern. Solche Anwendungen sind beispielsweise baumechanische Untersuchungen oder Simulationen. Die Aufnahme über Stereokameras oder stationäre Systemlösungen finden aber vor allem in der industriellen Fertigung oder dem Feld der Computervision Anwendung.

### **3.3 Mehrbildauswertung**

Die Mehrbildauswertung ist das jüngste Verfahren photogrammetrischer Auswertung. Anhand eines Bildverbandes bestimmter Ordnung können Objektpunkte dreidimensional rekonstruiert werden. Die Aufnahmeordnung ist bei diesem Verfahren relativ flexibel. Gegenüber dem Stereobildpaar können Basis und Aufnahmemaßstab in gewissem Rahmen variieren. Das Verfahren der Mehrbildauswertung ist weder an Angaben über die Kamera (innere Orientierung) noch deren Position und Ausrichtung gebunden. Alle Parameter werden infolge der Auswertung ermittelt. Das Verfahren beruht auf der Bündeltriangulation und wird bereits seit den 1950er Jahren angewendet. Das Bildmaterial muss zunächst über korrespondierende Bildmerkmale, sogenannte Verknüpfungs- oder Passpunkte, orientiert werden. Bildstrahlen entsprechender Aufnahmen schneiden sich in diesen Punkten. Die Summe solcher Merkmale und Anzahl an Photographien, die korrespondierende Punkte abbilden, sind ein wesentliches Kriterium der zu erwartenden Genauigkeit (vgl. 2.5) der photogrammetrischen Rekonstruktion.

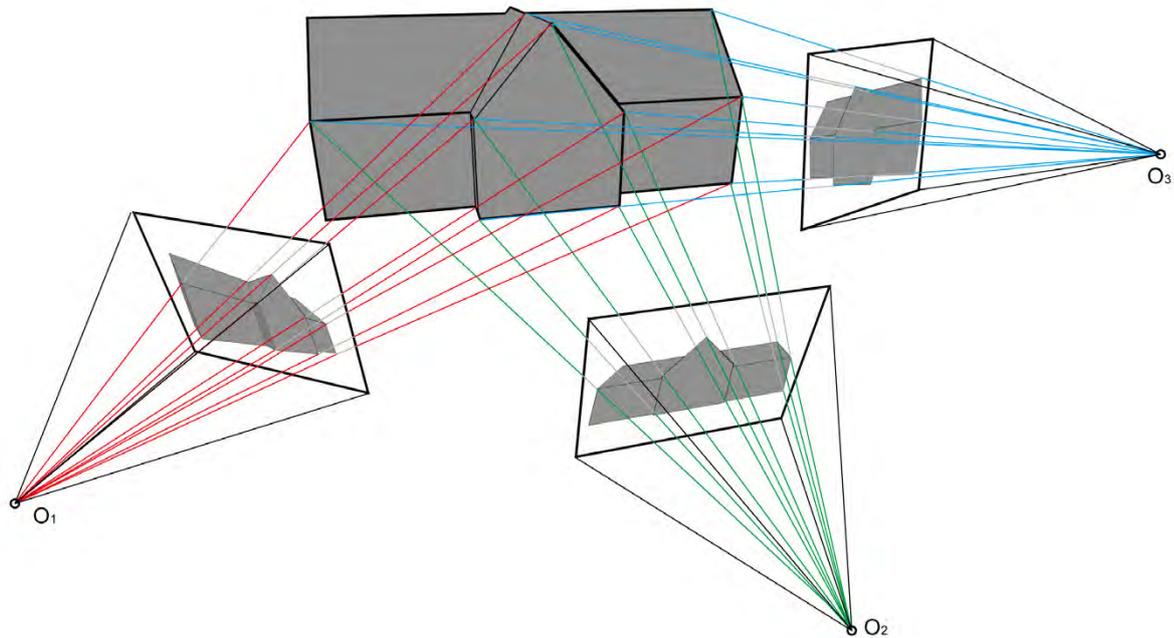


Abb. 3.3-1 Mehrbildtriangulation – Strahlenbündel dreier Aufnahmen

Die Lage und Orientierung des Bildes sowie die Raumlage der identifizierten Objektpunkte werden unter Berücksichtigung der inneren Orientierung der Aufnahmekamera in einem iterativen Rechenverfahren mit einer Vielzahl an Unbekannten ermittelt. Mit dem Umfang des Bildmaterials steigt die Zahl an Unbekannten. Das bedeutet einerseits eine gesteigerte Dauer des Auswertungsprozesses, resultiert jedoch in einem dichteren Informationsmodell mit erhöhter Genauigkeit.

„In einem überbestimmten Gleichungssystem werden 3D-Objektpunktkoordinaten, Orientierungsparameter der Bilder und weitere Modellparameter zusammen mit ihren statistischen Angaben zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit durch Ausgleichung berechnet. Alle beobachteten (gemessenen) Größen und alle unbekannt Parameter eines photogrammetrischen Bildverbandes werden in einem simultanen Berechnungsvorgang berücksichtigt und letztlich so optimiert, dass sich homologe Strahlen an Objektpunkten bestmöglichst schneiden.“ (Luhmann 2010: 302)

Zur Rekonstruktion müssen infolge der Bündelblockausgleichung für jede Aufnahme zehn Parameter der inneren Orientierung und sechs Parameter der äußeren Orientierung bestimmt werden. Dieser Prozess definiert den „räumlichen Rückwärtsschritt“. Besteht ein stabiles Modell aus definierten Kamerapositionen und bestimmten Verknüpfungspunkten, können infolge des „räumlichen Vorwärtsschrittes“ weitere Objektpunkte ermittelt werden. Die zunehmende Leistungsfähigkeit der Computersysteme und Errungenschaften der „Computervision“ haben dieses Verfahren und dessen breitbandige Anwendung maßgeblich bestimmt. Voraussetzung für einen hochgradig automatisierten Prozess der Auswertung ist

die Analyse eines Bildverbandes, um homologe Objektpunkte im Umfang des Bildmaterials zu identifizieren. Nach Durchsicht der Aufnahmen werden ungeeignete Aufnahmen, etwa unscharfe Abbildungen, dem Bildverband entnommen. Eine Gliederung eines umfangreichen Bildverbandes in Teilbereiche kann der Bildanalyse vorausgehen und reduziert die Dauer der folgenden Bündeltriangulation. Auch diese Funktion ist von der angewandten Software abhängig. Die Analyse des Bildmaterials auf Verknüpfungspunkte erfolgt unter Anwendung von Algorithmen zur Identifikation von invarianten Merkmalen einer photographischen Aufnahme. Inkonsistente Lichtverhältnisse, abweichende Abbildungsmaßstäbe, unterschiedliche Orientierung und Perspektiven erschweren die Identifikation eindeutiger Merkmale innerhalb der photographischen Abbildungen eines Bildverbandes. Invariante Merkmale lassen sich auf korrespondierenden Abbildungen unterschiedlichen Maßstabes, Richtung oder Lage identifizieren. Das Wissen über Prozesse der Bildanalyse ist für den Anwender der SfM-Photogrammetrie nicht unwesentlich, sofern es erklärt, warum Manipulationen am Bild (Bildschärfung, Mikrokontrast, Skalierung) möglicherweise einen Gewinn perzeptiver Qualität bedeuten, dem Prozess der Analyse jedoch abträglich sind. Algorithmen wie „SIFT“ (Scale Invariant Feature Transform) oder „SURF“ (Speeded Up Robust Features) identifizieren solche Merkmale als Verknüpfungspunkte. Das Verfahren glättet und skaliert das Bild in mehreren Graden und identifiziert minimale und maximale Werte von Bildpunkten (Pixeln) aufgrund von Differenzbildern der Teilergebnisse des Prozesses.

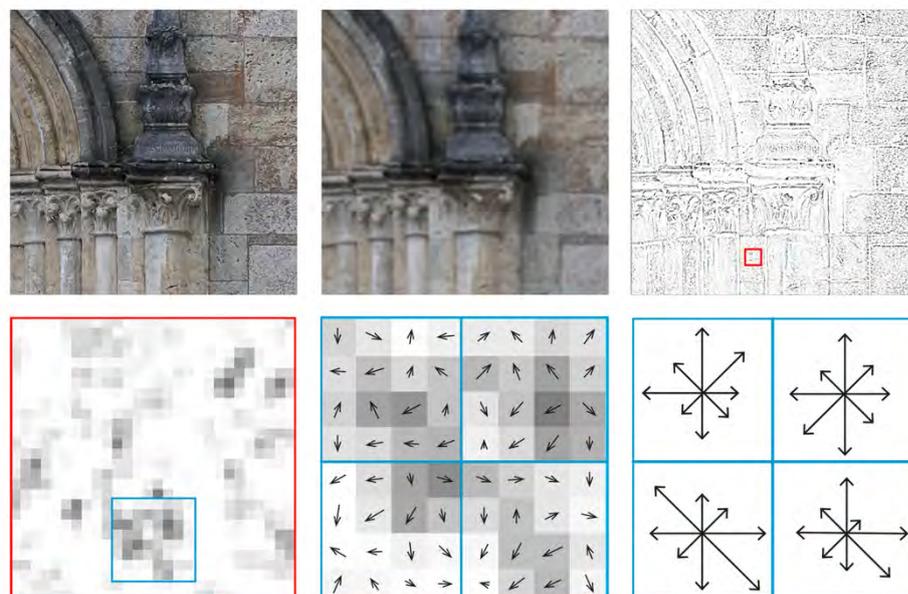


Abb. 3.3-2 Merkmalsanalyse, schematische Darstellung vom Differenzbild zum Deskriptor

Die ermittelten Punkte werden gegenüber den Werten der angrenzenden Pixel als multidimensionale Vektoren beschrieben. Diese „Deskriptoren“ oder „Merkmalsvektoren“ sind gegenüber unterschiedlichen Belichtungsverhältnissen, Lage- und Größenänderungen weitgehend invariant. Sind solche Bildmerkmale bestimmt, werden die Aufnahmen des Bildverbandes aufgrund korrespondierender Deskriptoren zugeordnet.



Abb. 3.3-3 Korrespondierende Merkmalspunkte (Feature Points) zweier Aufnahmen

„Der SIFT-Operator eignet sich vor allem zur Zuordnung von Bildern, die sich hinsichtlich Maßstab, Rotation oder Perspektive stark unterscheiden. Typischerweise ermittelt der Operator weniger visuell prägnante Punkte, sondern Merkmale, die in ähnlicher Form auch im Nachbarbild auftauchen.“ (Luhmann 2010: 460)

Durch Mess- oder Bildmarken signalisierte Punkte werden eindeutig und mit höchster Präzision erfasst. Die Lagebestimmung solcher Punkte kann gegenüber natürlichen Merkmalen wesentlich präziser erfolgen (vgl. 2.5). Zudem ermöglicht eine Menge an eindeutig kodierten Bildmarken die Zuordnung photographischer Aufnahmen, die Objektbereiche abbilden, die wenig Kontrast oder Textur aufweisen. Ist die räumliche Lage dieser signalisierten Punkte durch Vermessung am Objekt bekannt, können diese als lagebestimmte Passpunkte (GCP – Ground Control Points) im Prozess der geometrischen Auswertung berücksichtigt werden. Die Lage solcher Punkte bestimmt jedenfalls den Maßstab und die Orientierung des Modells in einem übergeordneten Koordinatensystem. Können photographische Abbildungen eines Verbandes nicht eindeutig zugeordnet werden,

bieten manche Software-Lösungen die Option, solche Aufnahmen über manuell platzierte Verknüpfungspunkte in den Verband zu integrieren.

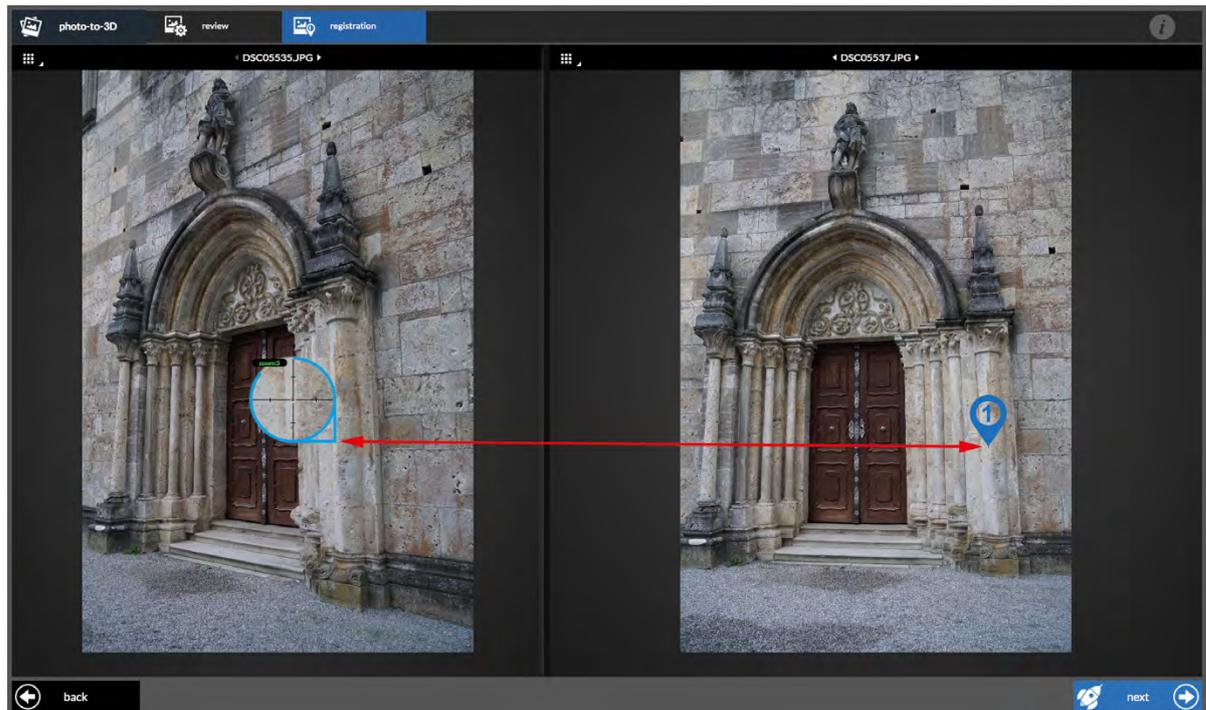


Abb. 3.3-4 Verknüpfungspunkte zweier Aufnahmen - Recap360

Ist die Bildserie analysiert, beginnt der Prozess der Bündelausgleichung. Die ermittelten Raumpunkte werden aufgrund der Rückprojektion anhand der korrespondierenden Aufnahmen bewertet und nach einem Grenzwert (Residuen) verworfen oder übernommen.

Im Allgemeinen wird eine Bündelausgleichung als nicht-lineares Kleinste-Quadrate-Problem mit einer Kostenfunktion formuliert, dessen Fehler für die Merkmals-Rückprojektion quadratisch ist (d.h die Summe der quadratischen Differenz zwischen gemessenen und zurück-projizierten Bildpunkten).“ (Remondino et al. 2012: 68)

Das Ergebnis dieses Prozesses ist die „Sparse Pointcloud“, eine „spärliche“ Punktwolke, die sich aus der Summe der primären Verknüpfungspunkte gestaltet. Die rekonstruierten Raumpunkte erhalten den Farbwert korrespondierender Bildpunkte (Pixel) der einzelnen Aufnahmen. Die Punktwolke erfährt durch diese farbliche Darstellung weitere Qualität der visuellen Wahrnehmung. Anhand dieser Punktwolke lässt sich die Geometrie bereits prüfen. Der Informationsgehalt ist zur Ableitung von Rissen oder zur Visualisierung jedoch oft nicht ausreichend.



*Abb. 3.3-5 Sparse Pointcloud mit Kamerapositionen*

Lassen sich Referenzmaße über signalisierte Punkte einpflegen, kann die Geometrie anhand der Abweichungen von diesen Werten bereits beurteilt werden. Die Positionen der Aufnahmen werden dargestellt und können visuell geprüft werden. Weichen die Aufnahmestandpunkte oder deren Orientierung von der Aufnahmeordnung des Bildverbandes deutlich ab, können entsprechende Aufnahmen je nach Software neu orientiert werden. Die Ergebnisse der „Sparse Pointcloud“ lassen sogenannte „Ausreißer“ (Punkte die offensichtlich nicht der Menge korrekter Objektpunkte entsprechen) erkennen.



*Abb. 3.3-6 Parametrische Bereinigung der Sparse Pointcloud nach der Rekonstruktionsunsicherheit*

Es gilt die Punktwolke von solchen Punkten zu bereinigen. Dies kann durch manuelle Auswahl diskreter Punkte, Gruppen aus Punkten oder durch parametrische Selektion nach Grenzwerten der „Rekonstruktionsunsicherheit“ oder Rückprojektion erfolgen. Ist die Punktwolke von solchen „Ausreißern“ bereinigt und scheint sie nach visueller Prüfung oder anhand integrierter Referenzmaße stabil, kann auf Grundlage dieses Modells eine dichte Punktwolke im Zuge des räumlichen Vorwärtsschrittes erstellt werden. Die dichte

Punktwolke umfasst ein Vielfaches an Raumpunkten und eignet sich zur weiteren Verarbeitung und Visualisierung. Sofern die Option besteht, sollte die Dichte der Punktwolke dem Verwendungszweck angepasst werden. Mit dem Umfang des Informationsmodelles steigt auch die Datengröße. Das kann der Ausarbeitung in anderen Applikationen hinderlich sein. Es ist angeraten, die „Auflösung“ der dichten Punktwolke vor der weiteren Verarbeitung der Aufgabe entsprechend anzupassen.

### 3.4 Digitale Photogrammetrie und Laserscanning

Der Laserscanner ist ein modernes Instrument der Fernerkundung. Das Verfahren ist in vielen Anwendungsgebieten bereits etabliert. Wie auch die Mehrbildphotogrammetrie liefert der Laserscanner dreidimensionale Punktwolken. Im Rahmen dieser Arbeit kann die Technologie des „Terrestrischen Laserscanning“ (TLS) im vollen Umfang nicht dargestellt werden. Der Vollständigkeit halber wird der Laserscanner im Kontext der Fernerkundung und Nähe zu den Produkten und Anwendungen der Photogrammetrie, wie folgt, beschrieben.



Abb. 3.4-1 Laserscanner

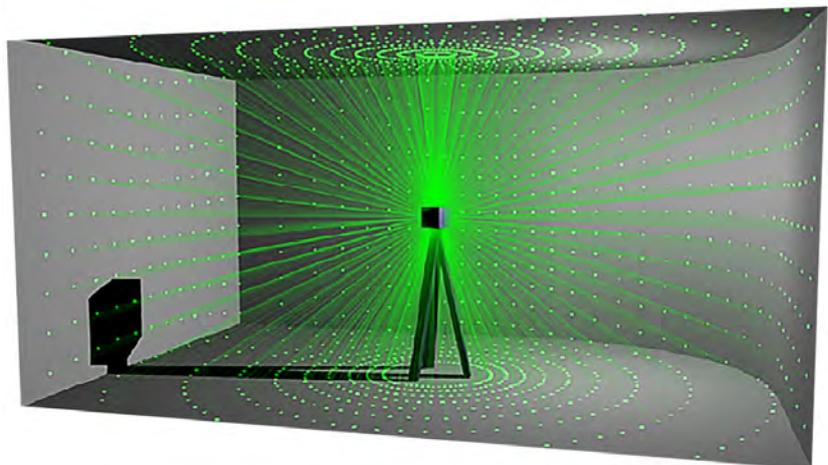


Abb. 3.4-2 Schematische Darstellung eines Messvorgangs

Der Laserscanner beschreibt ein aktives, berührungsloses, automatisiertes Aufnahme- und Messverfahren. Das aktive Verfahren erfasst Messwerte absoluter Größe und bestimmter Orientierung flächig und in hoher Dichte. Die aus den Messwerten resultierende Punktwolke ist maßstabsgetreu, ohne Referenzmaße anwenden zu müssen. In dieser Hinsicht unterscheidet sich der Laserscanner maßgeblich von der photogrammetrischen Auswertung. Die hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messwerte und der automatisierte Prozess des Scan-Vorganges sowie die direkte Ausgabe einer räumlichen Punktwolke haben diese Geräte seit den 1990er Jahren in vielen Anwendungen gegenüber der „klassischen“

Nahbereichsphotogrammetrie etabliert. In Anwendungsgebieten wie dem Anlagenbau gilt der Laserscanner bereits als unentbehrlich.

„Laserscanning hat sich im Bereich der Anlagenplanung und des Anlagenbaus in den letzten Jahren als effiziente Erfassungsmethode des Bestands etabliert und verdrängt zunehmend konventionelle Messmethoden. Aus jetziger Sicht ist zu erwarten, dass Laserscanning der zukünftige Industriestandard für die Bestandserfassung von komplexen Industrieanlagen sein wird.“ (*Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF 2013*)

Dies beruht zudem auf spezifischen Softwarelösungen, die eine semantische Verarbeitung standardisierter Bauteile auf Basis entsprechender Datenbanken anhand der erhobenen Punktwolke ermöglichen. Beispiele solcher Anwendungen sind etwa Lösungen des Unternehmens „ClearEdge“. Der Produktbeschreibung der Softwarelösung „Edgewise Structure“, die eine automatisierte Verarbeitung standardisierter Bauelemente aus Stahl, Beton und Holz realisieren soll, ist Folgendes zu entnehmen:

The software's extensive library of steel members and our proprietary pattern matching algorithms mean a precise mathematical best-fit to the point cloud without having to tediously clean, clip or manipulate points. (*ClearEdge 3D, 2014*)

Der Laserscanner wird im terrestrischen Anwendungsbereich zumeist standortgebunden auf einem stabilen Stativ positioniert. Ein über einen beweglichen Spiegel abgelenkter Laserstrahl erfasst über das um die Standachse rotierende Gerät den umgebenden Messraum. Ausgehend vom Zentrum des Gerätes werden die erfassten Messpunkte in Form von Polarkoordinaten gespeichert und in ein kartesisches Koordinatensystem überführt. Laserscanner können aber auch mobil, beispielsweise unter Einsatz von Luftfahrzeugen oder Fahrzeugen, betrieben werden. Aktuelle Geräte sind in der Lage, eine Million Messpunkte pro Sekunde aufzunehmen. Gegenüber der Photogrammetrie liefern Messpunkte, die über einen Laserstrahl erfasst werden, weitere Qualitäten wie die Intensität des Messpunktes anhand des Reflexionsgrades. Somit erkennen diese Systeme hochreflektive Messmarken, aber auch kritische Oberflächen. Die Grenzen des Aufnahmeverfahrens liegen ähnlich dem photogrammetrischen Verfahren bei sehr dunklen oder stark reflektierenden Oberflächen. (*vgl. Kern 2007: 3*) Der Laserscanner ist gegenüber dem photogrammetrischen Verfahren nicht an eine günstige Beleuchtung des Aufnahmeobjektes gebunden. Das bedeutet gegenüber der Photogrammetrie einen wesentlichen Vorteil. Aktuelle Systeme verfügen zudem über integrierte digitale Kamerasysteme zur photographischen Aufnahme des Messbereiches. Korrespondierende Messpunkte übernehmen den von der Kamera aufgezeichneten Farbwert. Somit liefern diese Geräte in Folge eines Scan-Vorganges ohne weitere Auswertung dreidimensionale Modelle in Form von sehr dichten Punktwolken mit

Farbwerten. Gegenüber der Photogrammetrie entsprechen diese Punktwolken einem verfahrensbedingten Raster und gelten als geordnete Punktwolken. Dieses Raster bestimmt die Objektauflösung. Mit zunehmender Distanz steigt die Rasterweite bei zunehmendem Durchmesser der Projektion des Laserstrahles. Die Genauigkeit wird mit zunehmender Distanz und flachem Aufnahme- oder Messwinkel deutlich gemindert.

„Eine nicht unerhebliche Rolle spielt bei der Beurteilung der möglichen Genauigkeit an einem Objekt der Abstand der einzelnen erfassten Punkte sowie die Größe des Laserflecks auf dem Objekt. Aus Messungen eines angenommenen 3D-Scanners, der eine Streckenmessgenauigkeit von 0.1 mm und eine Winkelmessgenauigkeit von 0.1 mgon besitzt, der aber in 60 m Entfernung nur alle 20 cm einen bierdeckelgroßen Laserfleck auf ein Objekt wirft, wird es nicht möglich sein, die Geometrie kleiner Objekte auch nur mit Dezimetergenauigkeit zu modellieren.“ (Böhler & Marbs 2004: 83)

Auch die akkurate Abbildung von Ecken und Kanten gestaltet sich mitunter kritisch, da diese über die zunehmende Rasterweite nicht eindeutig erfasst werden können. Obwohl diese Geräte über beträchtliche Reichweiten (durchschnittlich 150 Meter, Maximalwerte bis zu 1000 Meter) verfügen, kann es erforderlich sein, ein ausreichend dichtes Informationsmodell ohne der Unsicherheit schleifender Strahlen, grober Messraster oder großer Messpunkte (Projektion des Strahles) über mehrere Scanstationen zu generieren.

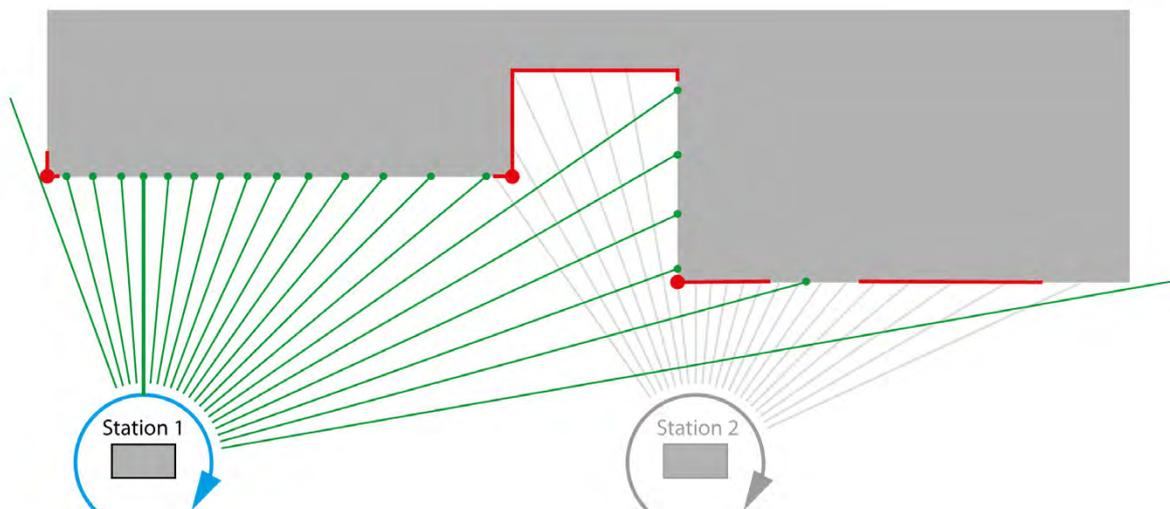


Abb. 3.4-3 Laserscanner, sichttote Bereiche, Ecken und zunehmende Rasterweite

Zudem resultieren aus dem standortgebundenen Messverfahren, der Geometrie entsprechende sichttote Bereiche, die wiederum über zusätzliche Aufnahmestandorte erfasst werden müssen, um eine möglichst vollständige Objektaufnahme zu realisieren. Anstelle der Mindestanzahl an Aufnahmen für einen geschlossenen Bildverband unter Überwindung sichttoter Bereiche im photogrammetrischen Verfahren fordert der Laserscanner die Fusion

von Messdaten aus mehreren Scanner-Standorten, um ein Objekt ganzheitlich darstellen zu können. Zur Aufnahme müssen Standorte des Laserscanners nach Kriterien wie der Genauigkeit und Dichte sowie geometrischen Erfordernissen bestimmt werden. Gegenüber der Freiheit des Bildverbandes der Photogrammetrie gestaltet sich die Planung zur Aufnahme über die Bestimmung der Standorte des Scanners und etwaiger Hilfsmittel (Zielmarken/Referenzkörper) vor allem bei komplexen geometrischen Körpern oft kompliziert. Zudem stören bewegte Objekte den Scanvorgang. Die Photogrammetrie erweist sich in dieser Hinsicht flexibler. Das Aufnahmeverfahren kann jederzeit unterbrochen, wiederholt oder fortgesetzt werden. Für den Laserscanner bedeuten solche Unterbrechungen im ungünstigsten Fall die Wiederholung der gesamten Messung. Die rechenintensive Analyse und geometrische Auswertung von Bildmaterial entfällt bei dieser Technologie. Das Verfahren liefert jedoch sehr dichte Informationsmodelle mit entsprechendem Datenvolumen. Müssen mehrere Modelle aus verschiedenen Standorten vereint werden, sind hohe Ansprüche an Soft- und Hardware sowie die ausführende Fachkraft gestellt. Die orientierten Modelle der einzelnen Scan-Standorte werden über Referenzpunkte oder Objektmerkmale in entsprechender Software registriert und zu einem Modell zusammen geführt und weiter bearbeitet.

„Die Beschleunigung der Arbeit im Außendienst führt jedoch aufgrund der riesigen Datenmengen zu einer zunehmenden Verschiebung des Arbeitsaufwandes in den Innendienst. Das hat nicht selten – je nach Aufgabenstellung – zur Folge, dass das Verhältnis der Arbeitszeit im Außendienst zum *Zeitaufwand im Innendienst zwischen 1:5 und 1:30* liegt. Die Auswertetechniken bestehen dabei überwiegend aus manuellen, interaktiven Tätigkeiten. Dazu gehören das Löschen von unnötigen Bereichen, das Navigieren in der komplexen Punktwolke, das Selektieren von Teilbereichen und das Extrahieren bzw. Modellieren von Geometrien.“ (Marbs et al. 2012: 1)

Die Anschaffungskosten solcher Geräte sinken zwar zunehmend, sind jedoch immer noch sehr hoch. Wie bei anderen Präzisionsgeräten der Vermessungstechnik (Theodolit, Totalstation) werden die Kosten von Laserscannern gegenüber der Investition in Hard- und Software zur photogrammetrischen Auswertung weiterhin einen deutlichen Kostenaufwand bedeuten. Aus wirtschaftlicher Sicht lohnt die Anschaffung solcher Geräte für den Architekten und Planer in der Regel nicht. Entsprechende Leistungen können zugekauft werden.

„On one hand TLS<sup>25</sup> offers high automation on the procedure of acquiring dense 3D models of high geometric accuracy but the cost of acquiring a laser scanner and the software needed to manipulate the scanner and the captured data remains still very high.“(*Georgantas et al. 2012*)

Die digitale Photogrammetrie erschließt sich dem Anwender jedenfalls wesentlich kostengünstiger und liefert in vielen Anwendungen vergleichbare Ergebnisse. John McCarthy beschreibt die Entwicklung photogrammetrischer Anwendungen der letzten Jahre gegenüber alternativer Verfahren wie dem Laserscanning im Kontext archäologischer Forschungen wie folgt:

„[...] due to subsequent improvements in software, the technique has undergone a rapid evolution, making it much more useful and accessible than ever before. As a result of these developments it can now be said with confidence that under certain conditions, multi-image photogrammetry offers [...] a viable alternative in terms of technical complexity, accuracy, cost and flexibility to established techniques such as manual survey and laser scanning.“ (*McCarthy 2014: 176*)

---

<sup>25</sup> Terrestrial Laser Scanning



#### **4. Die Photographie - Kamera, Aufnahme und Aufnahmeordnung**

Die Photogrammetrie basiert auf der Auswertung photographischer Aufnahmen. Im hochgradig automatisierten Auswertungsprozess definieren sich die Ergebnisse der Photogrammetrie maßgeblich über die photographische Leistung. Der Prozess der Auswertung bedeutet eine gewisse Qualitätsminderung aufgrund der gegebenen Rekonstruktionsunsicherheit der Bündelausgleichung. Die Qualität der Aufnahmen zur photogrammetrischen Auswertung wird maßgeblich vom Kamerasystem (*vgl. 2.5*) und der fachgerechten Ausführung der einzelnen Aufnahme sowie der Ordnung eines robusten Bildverbandes bestimmt. Obwohl aktuelle Kamerasysteme auch im automatischen Betrieb gute Ergebnisse liefern, sind die Grenzen der automatischen Bildgestaltung bald erreicht. Zudem erfordern schlechte Belichtungsverhältnisse und komplexe geometrische Formen die Einflussnahme des Photographen, um taugliches Bildmaterial zu fertigen. Je höher die Ansprüche an Genauigkeit sind, umso höher sind auch Ansprüche an Gerätschaft und Aufnahmeverfahren. Um die Photogrammetrie auch unter ungünstigen Aufnahmebedingungen erfolgreich anwenden zu können, ist das Wissen über photographische Grundlagen unentbehrlich. Gegenüber dem dokumentarischen oder „gestalterischen“ photographischen Einsatz muss die Kamera als „Messinstrument“ verstanden und entsprechend bedient werden. Bildausschnitt, Perspektive oder selektive Schärfentiefe sind Faktoren, die den räumlichen Eindruck einer zweidimensionalen photographischen Aufnahme transportieren können. Im Rahmen der Photogrammetrie gilt es jedoch photographische Abbildungen zu fertigen, die die Rekonstruktion des dreidimensionalen Raumes ermöglichen. Die Ansprüche an Aufnahmen eines entsprechenden Bildverbandes stehen der Bildkomposition und Ausführung einer einzelnen photographischen Aufnahme oft diametral gegenüber. Die einzelne Aufnahme muss als Teil des Bildverbandes verstanden werden und diesem in allen photographischen Ansprüchen gerecht werden. Für den Bildverband gelten übergeordnete Anforderungen wie ein möglichst einheitlicher Abbildungsmaßstab, eine ausreichende Bildüberschneidung oder die homogene Belichtung der Aufnahmen über den Verband. Diese Voraussetzungen müssen den Ansprüchen der Photographie gerecht werden. Beispielsweise muss die Bildschärfe (*vgl. 4.6*) über die gesamte räumliche Tiefe des Aufnahmeobjektes gewährleistet sein. Die Belichtung (*vgl. 4.8*) sollte möglichst konstant bleiben, um die Bildanalyse und die resultierende Textur der dreidimensionalen Geometrie günstig zu beeinflussen und zu gestalten. Zur Rekonstruktion müssen Objektmerkmale in Lichtern und Schatten erhalten bleiben. Es gilt,

den Motivkontrast des gesamten Objektes vorab zu beurteilen, um eine gewisse Konsistenz in der Belichtung des gesamten Bildverbandes zu bewahren (vgl. 4.9). Der photographische Prozess will jedenfalls kontrolliert sein. Die vollautomatische Aufnahme mag der einzelnen Photographie gerecht werden, im Rahmen eines Bildverbandes können solche Aufnahmen im Schärfebereich und Belichtung deutlich differieren und ungewünschte Ergebnisse liefern. Folgend werden Grundkenntnisse der Kamertechnik sowie Aufnahmetechniken zur Fertigung fachgerechter Aufnahmen zur photogrammetrischen Auswertung beschrieben.

#### 4.1 Grundlagen der Photographie

Im Bestreben, ein möglichst deutliches Abbild zu schaffen, erfuhr die „Camera Obscura“ bereits vor ihrem Debüt in der Photographie wesentliche Verbesserung. Sammellinsen sollten mehr Licht einfangen, eine Blende soll im Gegenzug ein schärferes Abbild realisieren. Eine Sammellinse erzeugt, nach einem idealisierten Modell, ein reelles<sup>26</sup>, scharfes Abbild, wenn das Verhältnis der Entfernung des Objektes zur Linse (Gegenstandsweite:  $g$ ), sowie der Distanz von der Linse zur Bildebene (Bildweite:  $b$ ) und die Brennweite ( $f$ ) der Linse nach der Abbildungsgleichung als bestimmt gilt.

Abbildungsgleichung:  $\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$

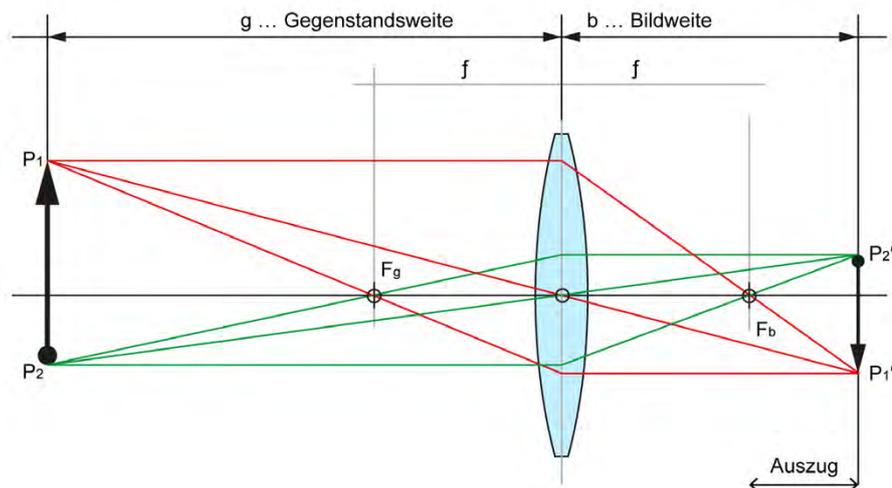


Abb. 4.1-1 Brennweite – Gegenstandsweite – Bildweite

Im Brennpunkt einer Sammellinse (plan-, bi- oder konkav-konvexe Linse) schneiden sich alle parallel zu deren optischen Achse einfallende Strahlen. Nach der Abbildungsgleichung werden alle unendlich entfernten Objektpunkte auf einer Bildebene im Brennpunkt der Linse

<sup>26</sup> ein reelles Abbild kann auf einer Projektionsebene betrachtet werden.

scharf abgebildet. Bei einem Objektiv ist dieser Punkt als „unendlicher Fernpunkt ( $\infty$ )“ gekennzeichnet. Die Distanz zwischen dem Mittelpunkt einer Linse und ihrem Brennpunkt wird in Millimeter als Brennweite angegeben. Die Brennweite einer Linse oder eines Objektivs gibt Aufschluss über den an der Diagonalen bemessenen Bildwinkel der Projektion in Abhängigkeit des Formates des Bildträgers. Je größer der Bildwinkel, desto geringer die Brennweite. Je größer das Aufnahmeformat, desto größer der Bildwinkel bei konstanter Brennweite. Der Markt für Digitalkameras wartet mit einer Vielzahl an Sensorformaten auf. Äquivalente Angaben über Brennweiten orientieren sich am etablierten Kleinbild- oder Vollformat.

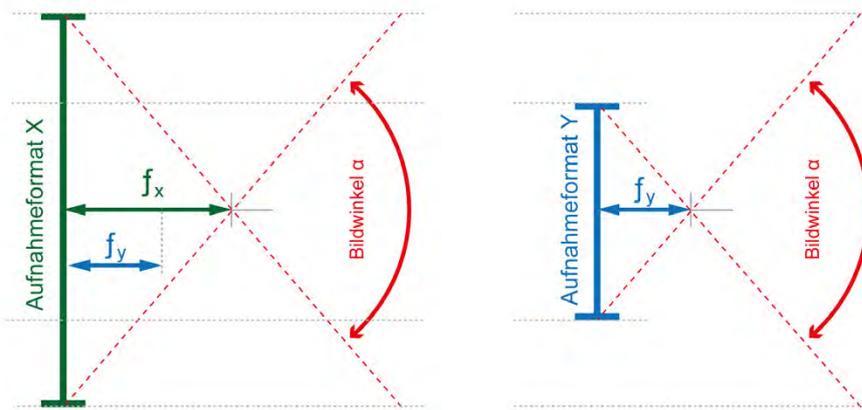


Abb. 4.1-2 Bildwinkel und Aufnahmeformat

Je größer der Bildwinkel, umso stärker zeichnen sich radiale Verzeichnungen ab. In der photogrammetrischen Auswertung werden diese Verzeichnungen auf Grund der Daten der Kalibrierung eines Kamerasystems oder der „Simultan- oder Selbstkalibrierung“ infolge der Bündelausgleichung berücksichtigt.

Die Summe der Strahlen die von einem Objektpunkt ausgehen und durch die Linse fallen bestimmt die Helligkeit des projizierten Bildpunktes. Die Menge an Bildpunkten definiert das Abbild. Die Annahme des fokussierten Bild-Punktes entspricht einem Idealfall. Tatsächlich ist dieser Punkt als Schnittfläche des Lichtkegels aus der Bündelung durch die Linse mit der Bildebene zu verstehen.

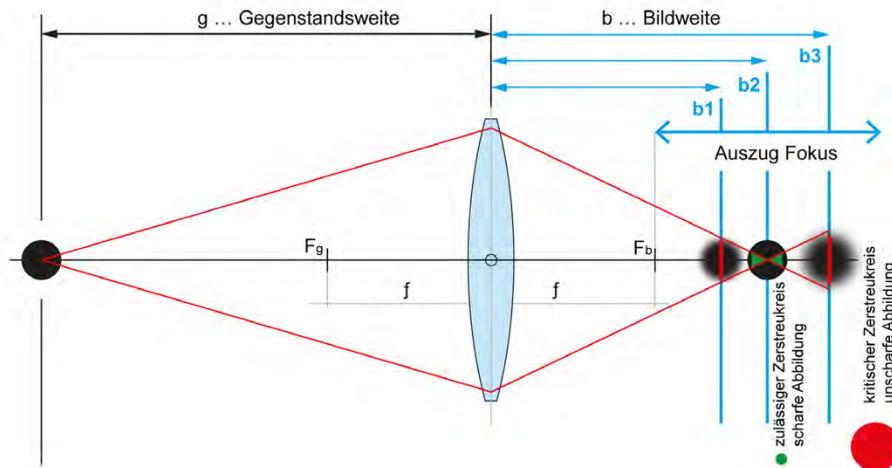


Abb. 4.1-3 Objektebene – Bildebene – Strahlenschnitt-> Steukreis

Theoretisch kann nur eine zur Bildebene parallele Objektebene scharf abgebildet werden, sofern diese im endlichen Bereich, das bedeutet außerhalb der Brennweite, liegt. Entspricht die Bildweite der Brennweite, so erstreckt sich der Bereich der Schärfentiefe über alle Ebenen jenseits der korrespondierenden Objektweite. Objektpunkte außerhalb dieser Objektebene verschneiden sich mit der Bildebene mit zunehmendem Radius. Nimmt der Radius der entstehenden „Zerstreukreise“ zu, verschneiden sich diese Flächen. Das Abbild wird zunehmend unscharf. Durch Begrenzung der Strahlenbündel mittels der Blende eines Objektivs kann diese Ebene in Richtung der Flächennormale räumlich „ausgedehnt“ werden. Der Bereich, der sich folglich scharf abbilden lässt wird als Schärfentiefe bezeichnet.

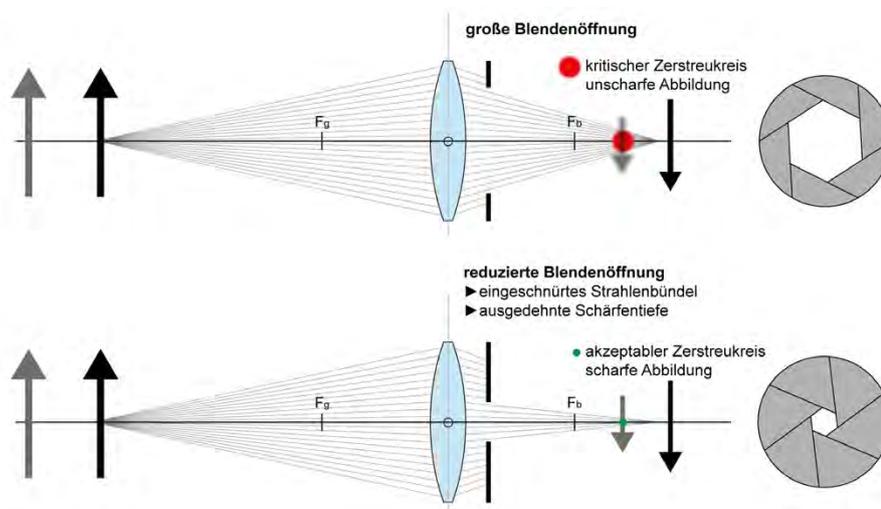


Abb. 4.1-4 Schärfentiefe

Sind Brennweite und Gegenstandsweite gegeben, kann die Bildweite angepasst werden, um ein scharfes Abbild einer bestimmten Objektebene zu gestalten. Diese Angleichung der

Bildweite entspricht dem Vorgang des „Fokussierens“. Das Auge erbringt die Schärfelistung infolge der Adaption der Brennweite der elastischen Linse. Das Auflösungsvermögen eines optischen Systems wird anhand des Kontrastverhältnisses der Auflösung von Linienpaaren pro Millimeter bestimmt. Während das menschliche Sehvermögen nicht mehr als sechs Linienpaare pro Millimeter auflösen kann, erreichen photographische Systeme deutlich höhere Werte. Der computergestützten photogrammetrischen Auswertung ist ein möglichst hohes Auflösungsvermögen des Kamerasystems dienlich. Das Auflösungsvermögen eines digitalen Kamerasystems ist jedoch nicht direkt an der nominellen Auflösung eines Bildsensors zu bemessen. Vielmehr wird es von der Optik und der physischen Größe des Sensors, in Abhängigkeit der Bildauflösung, bestimmt.

#### 4.2 Objektiv und Abbildungsfehler

Um eine möglichst scharfe und wenig verzerrte Abbildung zu realisieren, setzen sich Objektive aus mehreren Linsen in Linsengruppen zusammen.

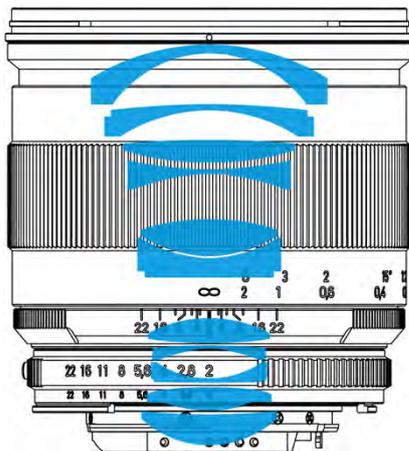


Abb. 4.2-1 Schnittdarstellung  
Objektiv: Zeiss 25mm f/2

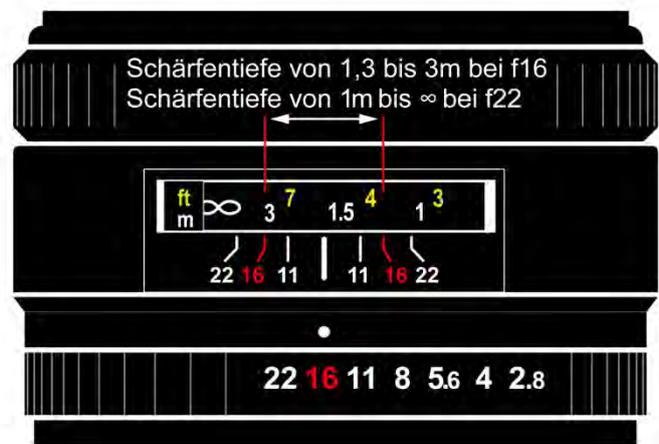


Abb. 4.2-2 Skala Schärfentiefe bei gestelltem  
Blendenwert

Diese sind von einem licht- und bestenfalls staub- und spritzwasserdichten Gehäuse umgeben, das die Linsen entlang der optischen Achse zentriert. Das Objektiv verfügt zumindest über eine bewegliche Linse oder Linsengruppe, um das Fokussieren über den Fokusring zu ermöglichen. Der Fokusring weist eine Skala der Entfernung zum Objekt auf.

Diese Skala ist gegebenenfalls mit einem Index an Blendenwerten ergänzt, um die Schärfentiefe (räumliche Ausdehnung des Bereiches der scharfen Abbildung) in

Abhängigkeit des Blendenwertes ablesen zu können. Vario-Objektive besitzen einen weiteren Stellring, um die Brennweite zu beeinflussen. Die Blende ist ein zentraler Bauteil des Objektivs. Einige Objektive verfügen über einen Stellring, um die Blende am Objektiv zu stellen. Diese Bauweise ist gegenwärtig jedoch selten, da die Blende bei elektronischen, analogen wie digitalen Kamerasystemen über die Kamera gestellt werden kann. System-Objektive herkömmlicher Kamerasysteme werden mittels eines systemeigenen Bajonett-Verschlusses mit der Kamera verbunden. Diese Verschlussysteme sind herstellerspezifisch und systemübergreifend nicht kompatibel. Abhilfe verschaffen Bajonett-Adapter. Die Verwendung solcher Adapter schränkt die Funktion des Objektivs zumeist ein, da die elektronische Schnittstelle zur Kamera bei den meisten Bauarten unterbrochen wird. Nur wenige Adapter ermöglichen einen erweiterten Funktionsumfang (Stellen der Blende) zwischen spezifischen Systemen. Einige Bauarten digitaler Kameras, wie Kompakt- oder Bridge-Kameras, verfügen über eine fest verbaute Optik. Bei Kompaktkameras lassen sich Zoom und Fokus in der Regel nur über elektronisch angesteuerte Motoren beeinflussen. Die Einflussnahme auf den Fokus bleibt zudem oft verwehrt. Der Photograph ist dem Autofokus und dessen Grenzen, beispielsweise bei ungünstigen Lichtverhältnissen, ausgeliefert.

Der Aufbau eines Objektivs soll einen angestrebten Bildwinkel oder Abbildungsmaßstab bei entsprechender Brennweite und möglichst kompakter Bauweise realisieren. Diese Anforderungen bedeuten zugleich eine optimierte Konfiguration der Linsen und Linsengruppen, um Abbildungsfehler zu minimieren sowie den Einsatz hochwertiger optischer Gläser und Beschichtungen.

„Abberations are the phenomenon where rays of light coming from a single point in the world do not converge to a single focal point in the image, even when the lens is focused as well as possible. This failure to converge is a natural consequence of using refraction (or reflection) to bend rays of light to where we want them to go [...]“ (Ng 2006: 3)

Der Anwender setzt eine gewisse Qualität eines optischen Systems voraus. Spezifische Bauarten zur Regulation von Abbildungsfehlern bedeuten für die Herstellung jedoch einen deutlichen technischen und somit finanziellen Mehraufwand. Zudem verfügen einige Objektive über mechanische Bildstabilisatoren, die längere Belichtungszeiten bei Aufnahmen aus der Hand ermöglichen. Diese Systeme erfüllen ihren Zweck im herkömmlichen Einsatz, beeinflussen jedoch, wie alle mechanischen, kamerainternen Stabilisatoren, die innere Orientierung und sind bei Aufnahmen zur photogrammetrischen Ausarbeitung zu deaktivieren.

Da einigen Abbildungsfehlern bereits durch Abblenden entgegenzuwirken ist, erscheint das Wissen über den konstruktiven Aufwand und die Güte der Optik zur Entscheidungsfindung im Rahmen des Einsatzes sowie der Anschaffung hinsichtlich der Leistung und Kosten relevant.

„Es ist wesentlich schwieriger, die Lichtstrahlen, die durch die Außenbezirke eines Objektivs gehen, im Brennpunkt zu vereinigen als diejenigen, die nahe an der optischen Achse liegen. [...] Abblenden des Objektivs schneidet die äußeren Strahlen ab, die die Schärfe am stärksten stören.“ (*Feininger 2001: 64*)

Bei Zoom-Objektiven gestaltet sich die Brennweite über einen bestimmten Bereich variabel. Dies erfordert gegenüber der Festbrennweite die Beweglichkeit einer Vielzahl an Linsengruppen. Abbildungsfehlern muss demnach über ein wesentlich komplexeres, optisches System begegnet werden. Die Anschaffungskosten eines hochwertigen Vario-Objektivs können gegenüber der Festbrennweite mit einfacherem Aufbau beträchtlich sein. Die Korrektur der Abbildungsfehler beinhaltet im Fall des Zoom-Objektivs einen von der Brennweite abhängigen Kompromiss. Zudem bedingt die Anzahl beweglicher Komponenten eine weniger stabile innere Orientierung über die Aufnahme eines Bildverbandes. Wird die Brennweite während der Aufnahmen eines Bildverbandes verändert, ist diese nur an den jeweiligen Grenzwerten exakt reproduzierbar. Die Abbildungsleistung eines Objektivs begründet sich auf der Korrektur der Abbildungsfehler über konstruktive Maßnahmen und der Transmission des Lichtes über die Güte der verbauten Linsen.

„Dieser Lichtverlust kommt durch Absorption (Abschwächung) in den Gläsern und durch Reflexion an den Luft/Gas Oberflächen zustande und ist abhängig von der Farbe (Wellenlänge) des eintretenden Lichtes. Gute Lichtdurchlässigkeit (spektrale Transmission) erhält man nur mit hochwertigen optischen Gläsern und sehr guter Vergütung (Entspiegelung) der Glasoberflächen durch zahlreiche aufgedampfte hauchdünne Schichtsysteme.“ (*Lenhardt 2013*)

Der „Entspiegelung“ kommt bei digitalen Aufnahmesystemen besondere Bedeutung zu. Der Bildsensor einer Digitalkamera ist ein hochreflektives Bauteil und kann Lichtreflexe starker Lichtquellen verursachen. Objektive für die Verwendung mit digitalen Kamerasystemen müssen auch diesen Anforderungen gerecht werden. Zudem ist der Sensor einer digitalen Kamera auf möglichst steil einfallendes Licht angewiesen. Objektive für digitale Aufnahmesysteme sind auf eine bildseitig telezentrische<sup>27</sup> Abbildung optimiert.

„Allgemein gilt eine Abweichung von maximal 6° gegenüber der Senkrechten als akzeptabel für eine gute Abbildungsleistung mit einer Digitalkamera.“ (*Walter 2005: 65*)

---

<sup>27</sup> Strahlen verlassen das Objektiv möglichst parallel zur optischen Achse

### 4.3 Korrektur von Abbildungsfehlern

„Eine vollständige Korrektur aller Linsenfehler gleichzeitig ist nicht möglich. Entsprechend der Aufgabe eines optischen Systems wird man daher jeweils einen günstigen Kompromiss anstreben.“ (Kraus & Pieper 2014)

Es wird zwischen den fünf Seidelschen (monochromatischen) Aberrationen und der chromatischen Aberration unterschieden.

#### 4.3.1 Chromatische Aberration

Die Schnittweite, der Abstand des Schnittpunktes eines gebeugten Strahles mit der optischen Achse vom Scheitelpunkt der Linse, einer einfachen Sammellinse, variiert mit der Frequenz des Lichtspektrums. Dieses Phänomen ist anhand der Dispersion weißen Lichtes an einem Prisma und dessen Streuung als Farbspektrum bekannt. Die Brechung nimmt mit kurzer Wellenlänge zu, demnach wird violettes Licht am stärksten gebrochen. Die Streuung infolge unterschiedlicher Brechung resultiert im Fall der Sammellinse in Farblängs- und -querfehlern, die als „chromatische Aberration“ bezeichnet werden.

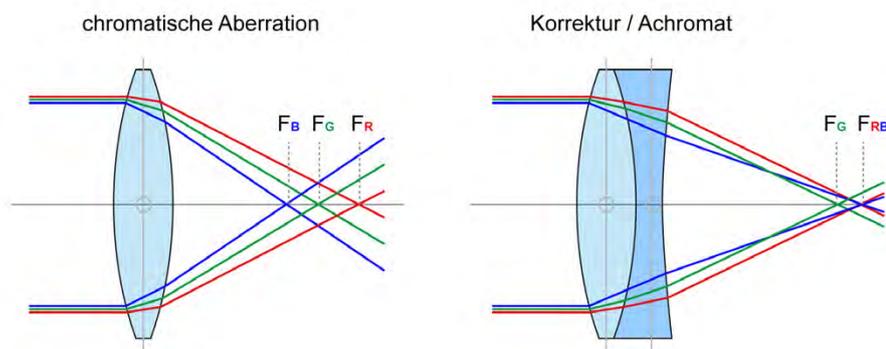


Abb. 4.3.1 Schematische Darstellung, chromatische Aberration und Korrektur

Die Kombination zweier Linsen unterschiedlichen Brechungsindex<sup>28</sup> (Brechzahl) behebt Abbildungsfehler gegenüber einem Spektralbereich. Brechzahlen von Glas variieren zwischen 1,45 und 1,95. Solche korrigierten Linsensysteme werden als „Achromat“ bezeichnet und gelten als Standard.

„Die chromatische Aberration läßt sich durch die Kombination einer positiven und einer negativen Linse, deren entgegengesetzt wirkende Fehler sich aufheben und den symmetrischen Aufbau eines Objektivs für zwei Wellenlängen (Blau und Rot) beheben. Die Korrektur für zwei Spektralbereiche wird als achromatisch, die aller drei Spektralbereiche als apochromatisch bezeichnet.“ (Weber, 1986: 50)

<sup>28</sup> Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit in einem Medium gegenüber der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

„Für die grünen Strahlen, das sogenannte sekundäre Spektrum, besteht eine Fokussdifferenz von  $\frac{1}{1000}$  Brennweite.“ (ebd.: 67)

Objektive großer Brennweite (Teleobjektive) sind demnach gegenüber zwei Frequenzen (Farben) mittels der Kombination dreier Linsen zu korrigieren. Ein solcher Aufbau wird als Achromat bezeichnet, entsprechende Objektive tragen oft die Bezeichnung „APO“.

„Digitalbilder reagieren kritischer auf chromatische Aberration. Entsprechend sollten spezifische Objektive besonders auf diesen Abbildungsfehler korrigiert sein. (Walter 2005: 52)

### 4.3.2 Sphärische Aberration

Darüber hinaus variiert auch die Schnittlänge achsnaher (nahe der optischen Achse) und achsferner Strahlen. Achsferne Strahlen schneiden einander eher als achsnahe (paraxiale) Strahlen. Die „sphärische Aberration“ bewirkt ein unscharfes Abbild und kann über die Kombination zweier Linsen, Linsen mit heterogener Dispersion oder teurer, asphärischer Linsenelemente korrigiert werden. Solche Bauarten werden mit der Bezeichnung „ASPH“ gekennzeichnet.

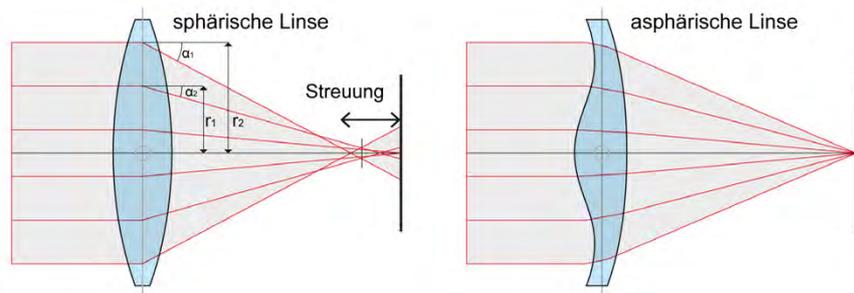


Abb. 4.3.2 Schematische Darstellung, sphärische Aberration und Korrektur

### 4.3.3 Koma

Die stärkere Brechung achsferner Strahlen resultiert bei schräg zur optischen Achse einfallenden Strahlen in der „tropfenförmigen“ Abbildung eines „Punktes“. Dieser Abbildungsfehler wird als „Koma“ bezeichnet und durch entgegenwirkender Linsenkonfiguration und einem symmetrischen Aufbau korrigiert.

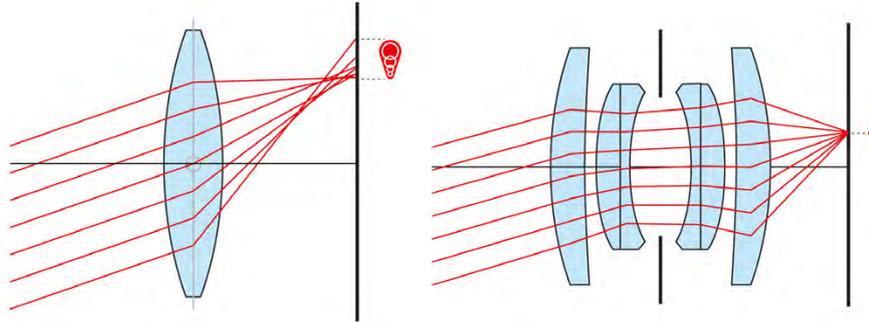


Abb. 4.3.3 Schematische Darstellung, Koma und Korrektur

Diesem Abbildungsfehler kann durch Ablenden wirksam entgegnet werden, wenngleich der Aufbau moderner Objektive diesen Abbildungsfehler weitgehend ausschließt.

#### 4.3.4 Astigmatismus

Das Strahlenbündel eines schräg zur optischen Achse eintretenden Lichtbündels formt nach Beugung der Linse ein Strahlenbündel, das einem Konoid gleicht. Aus einem Konoid kann keine punktförmige Schnittebene abgeleitet werden. In unterschiedlichen Brennweiten zeichnen sich senkrecht zueinander linienförmige Abbilder ab.

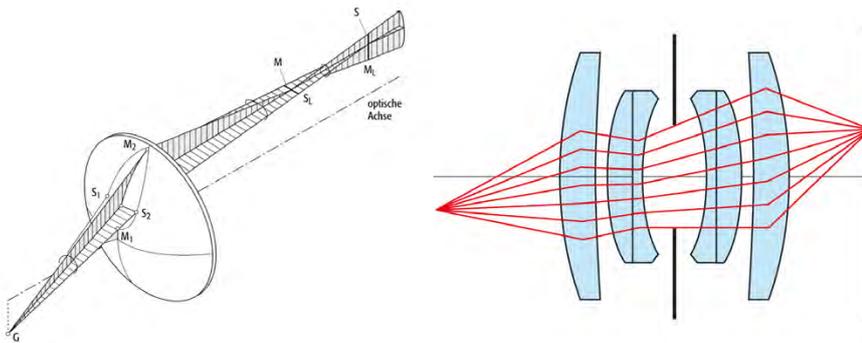


Abb. 4.3.4 Schematische Darstellung, Astigmatismus und Korrektur

Dieser Abbildungsfehler wird als „Astigmatismus“ bezeichnet. Der Astigmatismus muss durch die Anordnung von Linsen unterschiedlicher Krümmung, sogenannter Anastigmaten, korrigiert werden. Diesem Abbildungsfehler ist durch Ablenden nicht zu begegnen. Aus dem Astigmatismus resultiert zudem der Abbildungsfehler der Bildfeldwölbung.

#### 4.3.5 Bildfeldwölbung

„Durch Astigmatismus verursacht, werden achsentfernte und achsennahe Objektpunkte von einer Linse nicht in einer Bildebene, sondern auf einer kugelförmigen gekrümmten Fläche abgebildet. Als Folge dessen wird entweder nur die Randzone oder das Bildzentrum scharf

abgebildet. Die Bildfeldwölbung lässt sich durch die Korrektur des Astigmatismus und die Wahl mehrerer entsprechend gekrümmter Linsen beheben.“ (Weber 1986: 49)

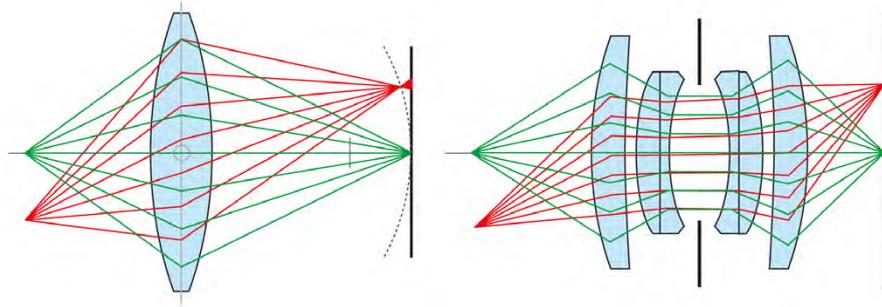


Abb. 4.3.5 Schematische Darstellung, Bildfeldwölbung und Korrektur

### 4.3.6 Verzeichnung

Die Verzeichnung ist hinsichtlich der Aufnahme zur photogrammetrischen Auswertung als kritischster Abbildungsfehler zu verstehen.

„Die radial-symmetrische Verzeichnung stellt den größten Einfluss unter den [...] Abbildungsfehlern dar. Sie entsteht durch Brechungsänderungen an den Linsen des Objektivs und ist von der Wellenlänge, der Blendeneinstellung, der aktuellen Fokussierung und der Objektentfernung bei konstanter Fokussierung abhängig.“ (Luhmann 2010: 148)

Die Verzeichnung beeinflusst das Bildkoordinatensystem, da Bildpunkte nicht lagerichtig projiziert werden.

„Da der Idealfall einer symmetrischen und linsenzentrischen Abbildung [...] in der Praxis nie erfüllt ist, werden abgebildete Punkte aufgrund der Abweichung zwischen Einfallswinkel  $\tau$  und Ausfallswinkel  $\tau'$  im Bildraum um den Betrag  $\Delta r'$  verschoben. Dieser Effekt wird als Verzeichnung bezeichnet [...].“ (ebd.: 115)

Die erforderliche Korrektur erfolgt über die Angabe eines kalibrierten Kameraprofiles oder die Simultankalibrierung (vgl. 3) infolge der Bündelausgleichung.

Je nach Aufbau des Linsensystems und Lage der Blende in einem optischen System resultiert aufgrund unterschiedlicher Ein- und Ausfallswinkel der Strahlen eine geometrische Verzeichnung des Abbildes. Ausschlaggebend ist die Konstruktion des Objektivs, im Besonderen die Lage der Blende. Das Objektiv sollte für photogrammetrische Aufnahmen gegenüber der Verzeichnung möglichst korrigiert sein. Ein symmetrischer Aufbau eines Objektivs erweist sich diesbezüglich als günstig.

„In der Praxis weist jedes Objektiv Verzeichnungen auf. Die [...] beschriebene radial symmetrische Verzeichnung lässt sich konstruktiv bei symmetrisch aufgebauten Hochleistungsobjektiven [...] reduzieren.“ (ebd.: 142)

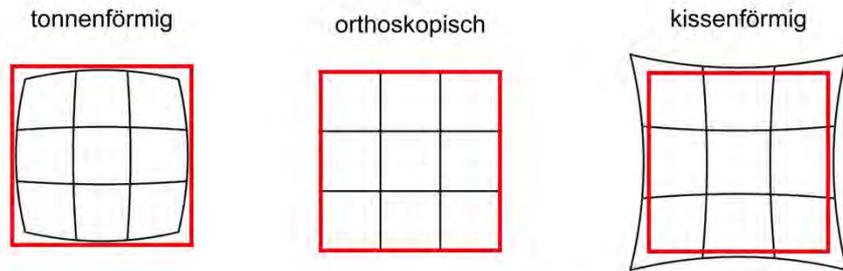


Abb. 4.3.6 Abbildungsfehler Verzeichnung

„Radial-symmetrische Verzeichnung kann als radiusabhängige Maßstabsänderung im Bild interpretiert werden.“ (ebd.: 116)

Je nachdem ob der Abbildungsmaßstab zum Bildrand zu oder ab nimmt wird zwischen kissen- und tonnenförmiger Verzeichnung unterschieden. Im Weitwinkelbereich treten vor allem tonnenförmige, aber auch wellenförmige Verzeichnungen auf. Teleobjektive neigen zu kissenförmigen Verzeichnungen. (vgl. Hönlinger & Nasse 2009)

Diese Verzeichnung muss zur Bestimmung der inneren Orientierung als radial-symmetrische Verzeichnung ermittelt werden. Sie steht der perspektiven Verzeichnung gegenüber, die bei Weitwinkelobjektiven zur ungewohnten Abbildung von Objekten führen kann, jedoch kein Abbildungsfehler ist.

„Unnatürliche Verbreiterung von kugelförmigen oder zylindrischen Objekten, die bei Aufnahme mit extremen Weitwinkelobjektiven nahe an den Bildrändern oder Ecken erscheinen, sind zwar auch eine Art »Verzeichnung«, aber keineswegs ein Fehler des Objektivs, sondern die natürliche Folge der Projektion dreidimensionaler Dinge in schräger Richtung auf eine ebene Fläche: den Film [oder Bildsensor].“ (Feininger 2001: 69)

#### 4.3.7 Digitale Korrektur chromatischer und geometrischer Abbildungsfehler

Die „Vignettierung“ beschreibt den Lichtabfall eines Bildes gegen dessen Ränder und Ecken, ist jedoch kein Abbildungsfehler. Sie resultiert aus der Minderung der einfallenden Lichtmenge in den Randbereichen des Bildkreises<sup>29</sup> infolge der Bauweise eines Objektivs und offener Blende. Dieser Effekt wird bei Weitwinkelobjektiven aufgrund konstruktiver Erfordernisse (Retrofokusbauweise) deutlich. Einigen Abbildungsfehlern, wie Farbfehlern oder geometrische Verzeichnungen, aber auch der Vignettierung kann infolge von Verarbeitungsprozessen eines digitalen Bildes bereits „kamera-intern“ begegnet werden. Solche Verfahren sind im Besonderen bei kompakten Digitalkameras mit fest verbauter Optik üblich. Im Rahmen der Bildverarbeitung zur photogrammetrischen Auswertung sind

<sup>29</sup> Abbild der kreisrunden Projektion um den Bildträger eines Aufnahmeformates

Prozesse der digitalen geometrischen Bildtransformation zur Korrektur von Abbildungsfehlern weitgehend zu deaktivieren. Radialen und tangentialen Verzeichnungen wird im Rahmen der Bestimmung der inneren Orientierung begegnet.

„Geometrische“ Verzeichnungen mögen dem menschlichen Sehempfinden „verstörend“ begegnen, der computergestützten Verarbeitung sind solche Aufnahmen bei bestimmter inneren Orientierung jedoch nicht abträglich, wenngleich die Bildinformation in betreffenden Bildregionen geringer sein kann. Digitale „Korrekturen“ bedeuten mögliche Fehlerquellen gegenüber dem photogrammetrischen Prozess. Das Bildmaterial sollte demnach möglichst frei von digitaler Bildmanipulation sein, um exakte Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung zu gewährleisten. In dieser Hinsicht ist das Kamerasystem auf die Leistung der Optik sowie Bildverarbeitung zu prüfen.

#### **4.4 Die Blende**

Die Blende (auch Irisblende) ist ein mechanischer Bauteil aus sich überschneidenden Lamellen, die eine variable, je nach Anzahl der Lamellen mehr oder weniger kreisrunde Öffnung ausbilden. Die Blende gilt der Definition der Schärfelistung und Schärfentiefe eines Objektivs.

„Objekte die verschieden weit von der Filmebene [Bild- oder Sensor-ebene] entfernt liegen, werden auf dem Film [Sensor] nicht ausnahmslos als scharfe Punkte, sondern teilweise als kleinere oder größere Kreise wiedergegeben. Die kreisförmig abgebildeten Objektpunkte bezeichnet man als Zerstreuungs- oder Unschärfekreis. [...] Bis zu einer gewissen Durchmessergröße werden Zerstreuungskreise wegen des physiologisch bedingten Auflösungsvermögens des Auges noch als punktförmig angesehen. Die zulässige Größe der Zerstreuungskreise ist vom Aufnahmeformat abhängig.“ (Weber 1986: 22)

Wird die Öffnung der Blende reduziert, so wird das einfallende Lichtbündel begrenzt. Dies resultiert in einem regulierten Strahlenbündel oder Lichtkegel mit kleinerem Streukreis. Der reduzierte Streukreis bewirkt einen „ausgedehnten“ Schärfebereich.

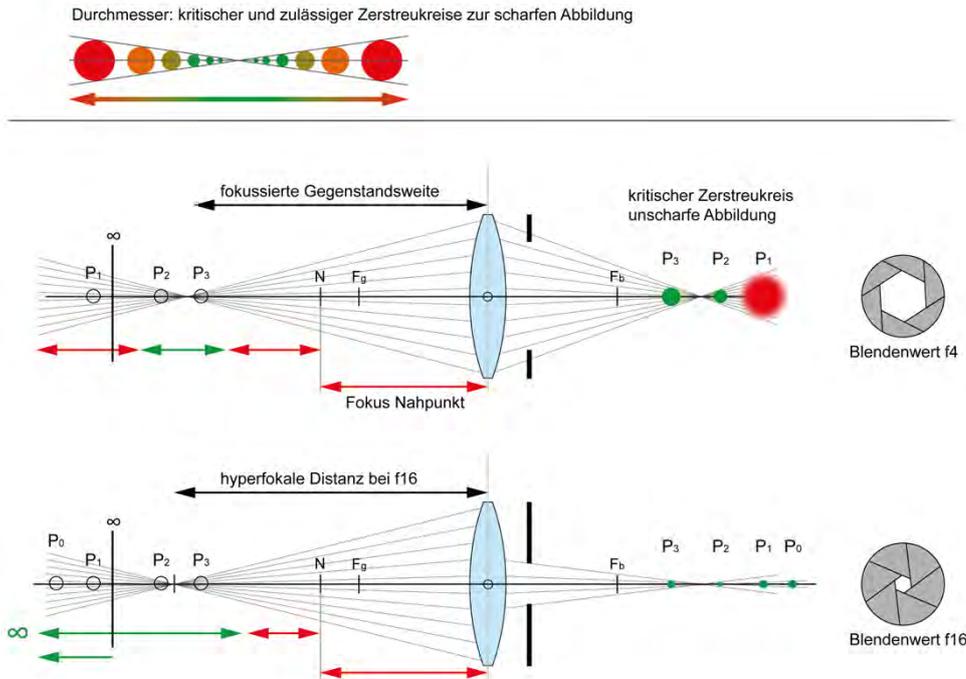


Abb. 4.4-1 Schematische Darstellung, Schärfentiefe und hyperfokale Distanz

Die Regulation des einfallenden Lichtes hat wiederum Einfluss auf die Helligkeit der Abbildung. Die Blende ist demnach auch Instrument über die Belichtung einer Aufnahme.

„Blenden reduzieren das einfallende Strahlenbündel und tragen somit unter anderem zur Regulierung von Lichtmenge und Schärfentiefe bei.“ (Luhmann 2010: 107)

Zur ausgewogenen Belichtung einer Aufnahme unter gegebener Lichtempfindlichkeit des Filmmaterials oder Bildsensors müssen Belichtungszeit und Öffnung der Blende korrespondieren. Die größte Öffnung der Blende, auch als „Offenblende“ bezeichnet, ist das Maß der Lichtstärke eines Objektivs in Abhängigkeit dessen Brennweite. Der Blendenwert oder Blendenzahl „k“ beschreibt das Verhältnis der jeweiligen Blendenöffnung zur Brennweite (wobei „f“ der Brennweite und „D“ dem Durchmesser der Öffnung in Millimeter entspricht).

$$k = \frac{f}{D}$$

„Bei Reduzierung des Durchmessers der relativen Öffnung verringert sich die Lichtstärke, und zwar im Quadrat hierzu. [...] Um diese Gesetzmäßigkeit genau zu definieren, hat man sich international auf eine Reihe von Blendenwerten geeinigt. Beginnend bei 1 erhält man den nächsten Blendenwert [reduzierte Öffnung der Blende] indem man ihn mit dem Faktor  $\sqrt{2} = 1,4$  multipliziert. Das Öffnen oder Schließen um einen Blendenwert verdoppelt oder halbiert die durchgelassene Lichtmenge. Die internationale Blendenreihe lautet:

1,0 - 1,4 - 2,0 - 2,8 - 4 - 5,6 - 8 - 11 - 16 - 22 - 32 - 45“ (Weber 1986: 17)

Die größte Öffnung der Blende kann auch kleiner sein. Solche Objektive sind jedoch sehr teuer und entsprechend selten. Bei modernen Kamerasystemen können Blende wie Belichtungszeit auch in Halb- oder Drittelschritten gestellt werden.

Aufgrund der Welleneigenschaften des Lichtes breitet sich dieses infolge der Beugung an der Blende auch im geometrischen Schatten aus. Nach dem Huygensschen Prinzip<sup>30</sup> bildet die aus der Beugung an der Blende resultierende Wellenfront Beugungsscheiben in Form konzentrischer Ringe um den Bildpunkt auf der Bildebene ab.

„Beugung tritt auf, wenn die geradlinige Ausbreitung der kugelförmigen Wellenfront des Lichtes gestört wird, z.B. beim Durchgang durch einen Spalt oder eine Lochblende. In der Öffnung breiten sich Elementarwellen kugelförmig aus, die sich gegenseitig überlagern und dabei Intensitätsminima und –maxima bilden. (Luhmann 2010: 107)

Der Grad der Beugung wird von der Größe der Öffnung der Blende bestimmt. Mit abnehmender Blendenöffnung (steigender Blendenzahl) resultiert die Beugung des Lichtes an der Blende in zunehmender Unschärfe. Je kleiner der Bildsensor bei konstanter Auflösung, umso größer ist der Einfluss der Beugung auf die Abbildungsschärfe. Kompaktkamerasysteme mit verhältnismäßig kleinen Bildsensoren lassen oft nur Blendenwerte bis „8“ oder geringer zu. Der kleine Bildsensor bedingt aufgrund der geringen Bilddiagonale sehr kurzer Brennweiten, die einen erforderlichen, kleinen Abbildungsmaßstab realisieren können. Der geringe Abbildungsmaßstab resultiert wiederum in gesteigerter Schärfentiefe. Somit erbringen Kamerasysteme mit kleinen Sensoren gegenüber dem Referenzmaß, dem Kleinbildsensor, bereits bei großen Blendenwerten eine gesteigerte Schärfentiefe. Während eine reduzierte Blendenöffnung der Schärfeleistung einer Optik durch Reduktion der Abbildungsfehler förderlich ist, resultieren sehr hohe Blendenwerte wiederum in einem „unscharfen“ Abbild. Eine „förderliche Blende“ muss der Aufnahmesituation sowie den Spezifikationen des Kamerasystems, wie Sensorgröße und Auflösung, entsprechen. Die Schärfeleistung ist gegebenenfalls empirisch zu prüfen.

#### **4.5 Fokus, Schärfentiefe und hyperfokales Fokussieren**

Eine scharfe Abbildung ist Voraussetzung der photogrammetrischen Auswertung. Die scharfe photographische Abbildung muss demnach über die gesamte räumliche Tiefe des Aufnahmeobjektes gegeben sein.

---

<sup>30</sup> Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt einer sphärischen Elementarwelle

### 4.5.1 Fokus

Das Objektiv bildet am Sensor einen durch die Blende geformten Lichtkreis ab. Je kleiner dieser Zerstreuungs- oder Unschärfekreis erscheint, desto schärfer ist die Abbildung. Der Durchmesser des Zerstreuungskreises wird bei digitalen Kamerasystemen mit etwa 1-3 Pixel angenommen. Die tolerierbare Unschärfe wird mit zunehmend kleinerem Sensorformat geringer. Damit steigen die Qualitätsanforderungen an das Objektiv. (vgl. Luhmann 2010: 111)

Ein reelles, scharfes Abbild entsteht, wenn das Verhältnis der Entfernung der Gegenstandsweite zur Bildweite und der Brennweite einer Linse oder eines Objektivs nach der Abbildungsgleichung als bestimmt gilt. (vgl. 3.2)

$$\text{Abbildungsgleichung: } \frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$

Mit zunehmender Objektweite verringert sich bei konstanter Brennweite der Abbildungsmaßstab. Der Abbildungsmaßstab ist das Verhältnis der Größe der Projektion eines Objektes auf der Bildebene zu dessen realer Größe, beziehungsweise das Verhältnis der Bildweite zur Objektweite. Der Kehrwert der Gegenstandsweite ( $g$ ) nähert sich mit zunehmender Distanz Null. Für eine „unendliche“ Objektweite gilt:  $f = b$ , die Bildweite entspricht demnach der Brennweite.

Eine Ausnahme bildet das Objektiv nach Retrofokus-Bauweise. Hierbei ist die Schnittweite, die Baulänge von der Hinterlinse zur Bildebene, für den „unendlichen“ Bereich länger als die Brennweite. Diese Bauweise wird vor allem bei Objektiven für Spiegelreflexkameras geringer Brennweite angewendet, da ausreichender Raum zwischen Objektiv und Bildebene für den Schwingspiegel der Kamera bestehen muss. (vgl. Marchesi 2011: o.S.)

Objekte jenseits einer gewissen Objektdistanz (etwa ein zwanzigfaches der Brennweite eines Objektivs) werden unter geringem Abbildungsmaßstab und resultierendem geringem Zerstreuungskreis generell scharf abgebildet. Diese Distanz wird als „unendlich“ bezeichnet und ist auf der Entfernungsskala eines Objektivs mit dem Symbol „ $\infty$ “ gekennzeichnet. Um den Zerstreuungskreis eines Objektpunktes in einer endlichen Entfernung (kleiner „ $\infty$ “) hinsichtlich einer scharfen Abbildung zu reduzieren, muss bei konstanter Brennweite die Bildweite angepasst werden. Diese Angleichung am Objektiv beschreibt das Fokussieren. Die maximale Bildweite definiert die Nahgrenze eines Objektivs. Dieser bezeichnet die minimale Objektdistanz, unter der ein scharfes Abbild realisiert werden kann. Wird das Objektiv auf eine gewisse Objektdistanz (zwischen „ $\infty$ “ und dem absoluten Nahpunkt) eingestellt, werden alle Punkte dieser zur Bildebene parallelen Ebene scharf abgebildet.

### 4.5.2 Schärfentiefe

Wird die Blendenöffnung verkleinert, kann eine fokussierte Schärfenebene räumlich ausgedehnt werden, da die einfallenden Strahlenbündel naher Objektpunkte begrenzt werden, wodurch der Zerstreue- oder Unschärfekreis verkleinert wird. Der Bereich der sich ausbildenden Schärfentiefe verhält sich in der Regel im Verhältnis 1:2 um den fokussierten Bereich. (ein Drittel vor und zwei Drittel nach dem „Fokus“) (vgl. *Abbildung 4.4.1*)

Dabei ist zu berücksichtigen dass der Übergang von unscharfer zu scharfer Abbildung fließend verläuft.

„Die Schärfentiefe ist [...] abhängig von Blendenzahl  $k$  und Abbildungsmaßstab  $\beta$ , d.h. wiederum von Aufnahmeabstand und Brennweite. Die Schärfentiefe kann erhöht werden, wenn abgeblendet, der Aufnahmeabstand vergrößert oder die Brennweite verkürzt wird.“  
(*Luhmann 2010: 112*)

### 4.5.3 Hyperfokale Distanz

In der Regel befinden sich Objekte der photogrammetrischen Aufnahme in „unendlicher Objektweite“. Da architektonische Objekte und Baukörper jedoch komplexe geometrische Formen aufweisen können, müssen Teile dieser Geometrie gegebenenfalls auch in endlicher Entfernung scharf abgebildet werden. Jedenfalls sollen alle Bereiche eines Objektes ungeachtet der Objektweite scharf abgebildet sein. Demzufolge soll der Bereich der Schärfentiefe von einem gewissen Nahbereich aus über die gesamte räumliche Tiefe eines Objektes gegeben sein.

„Der Schärfentiefebereich kann optimiert werden, indem die Entfernung nicht auf unendlich, sondern auf die Hyperfokale Distanz  $b$  eingestellt wird. Dann reicht die Schärfentiefe vom Nahpunkt  $a$  bis unendlich.“ (*Luhmann 2010: 113*)

Wird ein Objekt in endlicher Gegenstandsweite fokussiert, ergibt sich je nach Arbeitsblende (gewählte Blende zur Aufnahme) ein Schärfebereich, der von einem Nah- und Fernpunkt begrenzt wird. Werden Blende oder Distanz so gewählt, dass sich der Nahpunkt im endlichen Bereich, der Fernpunkt des Schärfebereiches jedoch im unendlichen Bereich findet, spricht man vom „hyperfokalen Fokussieren“. (vgl. *Abbildung 4.4.1*)

Die hyperfokale Distanz „ $b$ “ errechnet sich nach:  $b = \frac{f^2}{u \cdot k}$  in Abhängigkeit der Brennweite ( $f$ ), des Blendenwertes ( $k$ ) und des erforderlichen, maximalen Zerstreukreisdurchmessers ( $u$ ). Für den Zerstreukreisdurchmesser kann bei digitalen Kamerasystemen das ein- bis dreifache eines Pixels, einer Photodiode, gesetzt werden. Dieser Wert lässt sich über Herstellerangaben über den Pixelpitch ermitteln. Die hyperfokale Distanz nimmt mit der Brennweite zu und mit hohem Blendenwert ab. Bei Spiegelreflexkameras kann die

Schärfentiefe durch die Abblendfunktion vor der Aufnahme geprüft werden. Der Blick durch den Sucher entspricht der Ansicht bei Offenblende. Dies gewährt ein helles Abbild bei geringer Schärfentiefe der größten Blendenöffnung. Mittels der Abblendfunktion lässt sich die Blende auf die gestellte Arbeitsblende reduzieren. Das Abbild des Suchers wird entsprechend dunkler, weist den Bereich der Schärfentiefe jedoch aus. Kamerasysteme mit elektronischem Sucher oder Anzeige über ein Display weisen den Bereich der Schärfentiefe gegebenenfalls über Indikation scharfer Bereiche des Bildes aus.

#### **4.6 Lichtempfindlichkeit, ISO**

Die Empfindlichkeit des Filmmaterials oder Bildsensors gegenüber Lichteinwirkung ist nach ISO genormt. Je geringer die Empfindlichkeit, desto kleiner der korrespondierende Wert. Die Verdoppelung des Wertes über die Angabe der Lichtempfindlichkeit nach ISO entspricht der doppelten Lichtempfindlichkeit. Wird die Lichtempfindlichkeit um eine Stufe gesteigert, kann die Belichtung in halber Belichtungszeit oder unter doppeltem Blendenwert erfolgen. Eine Steigerung der Lichtempfindlichkeit bedeutet jedoch Einbußen in der Qualität der Abbildung. Dies wird am Beispiel des analogen Films besonders deutlich. Beim Filmmaterial bedeutet die gesteigerte Lichtempfindlichkeit ein größeres, folglich größeres „Korn“<sup>31</sup>.

„Die durchschnittliche Größe der lichtempfindlichen Kristalle liegt zwischen 0,2 und 2µm. Bei einem durchschnittlichen Film liegen ungefähr 20 Kornlagen übereinander [...].“  
(*Marchesi 1980: 15*)

Je größer die Kristalle, umso mehr Fläche wird dem Licht geboten, umso eher tritt die Schwärzung des Silbers ein. Feines Korn ist demnach weniger lichtempfindlich, bietet jedoch hohe Detailauflösung. Dieses Prinzip lässt sich auch auf den Bildsensor einer Digitalkamera übertragen. Mit der Größe der Photodioden (Pixel) nimmt die Lichtempfindlichkeit zu. Auf kleinere „Pixel“ bei geringerem Sensorformat wirkt bei gleicher Belichtung weniger Licht ein. Die abgenommene Ladung des Halbleiters muss entsprechend verstärkt werden. Dieser Prozess resultiert vor allem bei sehr geringen Ladungen (dunklen Bildbereichen) in einer Abweichung vom ursprünglichen Signal der sich als „Dunkelstromrauschen“ abzeichnet.

---

<sup>31</sup> Bezeichnung für die lichtempfindlichen Kristalle von Filmmaterial



*Abb. 4.6 Stilisierte Darstellung Dunkelbildrauschen*

„Betrachtet man einen lichtempfindlichen Sensor gleich welcher Bauart, der letztlich auf einer Anregung von Elektronen durch Licht beruht, stellt sich sofort das Problem des Rauschens: Die Elektronen werden nicht nur durch das Licht, sondern ebenfalls durch thermische Prozesse angeregt, was zu ungewollten Aufzeichnungen führt.“  
 (Walter 2005: 92)

Die Verstärkung des Signales entspricht der Lichtempfindlichkeit. Das Bildrauschen wird umso deutlicher, je schwächer das Signal (dunkle Bildbereiche und kleine Sensoren) und je höher der Grad der Signalverstärkung. Gegenüber dem analogen Film wird die Bildauflösung (aufgrund des größeren Korns) nicht geringer, die Bildinformation leidet jedoch am Bildrauschen, welches eine Unstimmigkeit gegenüber dem ursprünglichen Signal bedeutet. Einige Kamerasysteme bieten eine Funktion der Reduktion des Bildrauschens über ein „Dunkelbild“. Dabei wird eine Aufnahme unter gleicher Belichtungszeit erstellt, jedoch ohne den Sensor dem Licht auszusetzen. Das Bildrauschen des „Dunkelbildes“ wird infolge von der korrespondierenden Belichtung subtrahiert und das Rauschen reduziert. Das Bildrauschen steigt zudem mit zunehmender Belichtungszeit, da die angelegte Spannung Abwärme verursacht. Zudem wird der spezifische Dynamikbereich eines Bildsensors über die Signalverstärkung kontinuierlich geschwächt.

„Erfolgt die Verstärkung des Signals während oder nach dem Sampling [der analog-digital Wandlung] wird der Tonwertumfang reduziert, wie das auch beim Film der Fall ist.“  
 (Marchesi 2011: o.S.)

Demzufolge kann die Aufnahme dem Motivkontrast nur in geringerem Umfang entsprechen. Die Lichtempfindlichkeit sollte lediglich erhöht werden, wenn eine erforderliche

Langzeitbelichtung deutlich reduziert werden kann oder kurze Belichtungszeiten zur Abbildung beweglicher Objekte erforderlich sind. Lange Belichtungszeiten resultieren aufgrund der Unmöglichkeit, eine Kamera handgehalten entsprechend lange zu stabilisieren in unscharfen Abbildern. Der Einsatz eines Statives ist einer deutlichen Erhöhung der Lichtempfindlichkeit vorzuziehen. Im Rahmen dieser Arbeit entstanden Aufnahmen (vgl. 5.3) eines teilweise spärlich beleuchteten Innenraumes. Die Belichtungszeiten betragen in gewissen Raumabschnitten mehrere Sekunden. Im Rahmen des Bildverbandes mussten zahlreiche Aufnahmen in kurzer Zeit realisiert werden. Um den Bildsensor vor thermischer Belastung zu bewahren und die Aufnahmedauer des Bildverbandes deutlich zu reduzieren, wurde bei gesetzter Arbeitsblende eine Lichtempfindlichkeit von ISO 400 gewählt (vgl. 5.6). Die Aufnahmedauer konnte in schlecht beleuchteten Objektbereichen von 30 (bei ISO 100) auf 8 Sekunden reduziert werden. Die Aufnahmen entstanden unter Zuhilfenahme eines Statives.

#### **4.7 Belichtungszeit**

Aus der standardisierten Reihe der Blendenwerte (3.2.3) ergibt sich eine korrespondierende Angabe über Belichtungszeiten. Zwischen den Werten der Blende und der Belichtungszeiten besteht reziproke Proportionalität. Bei analogem Filmmaterial ist die Reziprozität aufgrund photochemischer Prozesse bei langen Belichtungszeiten nicht gegeben. Der Schwarzschild-Effekt beschreibt das Phänomen der un stetigen Schwärzung. Dieses Phänomen tritt in der Digitalphotographie nicht auf, wenngleich lange Belichtungszeiten Bildrauschen und eine Abnahme der Bildqualität bedeuten können. Wird die Blende um einen Wert erhöht, verringert sich ihr lichter Durchmesser und bietet dem Durchgang des Lichtes nur noch die halbe Fläche. Das Abbild einer ursprünglich gewichteten Belichtung würde entsprechend dunkler ausfallen. Wird die Belichtungszeit infolgedessen um einen Wert verlängert, tritt durch die verkleinerte Blende in doppelter Belichtungszeit die gleiche Menge an Licht ein, wodurch die resultierende Belichtung wieder entspricht. Ausgehend von einer Sekunde ergeben sich die Werte für Belichtungszeiten aus Verdoppelung beziehungsweise Halbierung der Zeitspanne. Werte kleiner eins werden üblicherweise nach dem Nenner bezeichnet ( $\frac{1}{4}$  einer Sekunde als 4), Werte ab einer Sekunde werden als Winkelsekunde dargestellt (2sec als 2"). Die Belichtungszeit ist zur scharfen Abbildung bewegter Objekte maßgebend. Um bewegte Objekte für photogrammetrische Zwecke zu erfassen, bedarf es jedoch einem Multi-Kamerasystem. Dabei erfassen mehrere synchronisierte Kameras ein Objekt. Solche Konfigurationen werden beispielsweise für Untersuchungen von

Deformationen von Bauelementen oder Konstruktionen eingesetzt. Für die herkömmliche Anwendung der Architekturphotogrammetrie mit nur einer Kamera ist die Aufnahme bewegter Objekte im Rahmen eines Bildverbandes zu vermeiden. Solche Objekte können, sofern die angewandte Software dies unterstützt, maskiert (Ausschluss eines markierten Bildbereiches) und von der Bildanalyse ausgenommen werden. Der Anspruch an die Belichtungszeit muss bei Aufnahmen aus der Hand (ohne Zuhilfenahme eines Statives) lediglich der scharfen Abbildung genügen, die bei längeren Belichtungszeiten durch die instabile Lage der Kamera nicht gewährleistet ist. Zur Annahme einer maximalen Belichtungszeit für Aufnahmen aus der Hand ist der Richtwert  $t_{max} \approx \frac{1}{f}$  dienlich. („t“ entspricht der Belichtungszeit und „f“ der, dem Kleinbildformat äquivalenten Brennweite)

#### **4.8 Belichtungsmessung**

Eine Belichtungsmessung ist erforderlich, um ein möglichst gewichtetes Abbild eines gegebenen Motivkontrastes zu fertigen. Der Belichtungsumfang einer Aufnahme soll Details in Lichtern (hellen Bereichen) als auch Schatten (dunklen Bereichen) wiedergeben, um eine möglichst hohe Informationsdichte zu gewährleisten. Aktuelle Kamerasysteme verfügen in der Regel über einen integrierten TTL<sup>32</sup>-Belichtungsmesser zur Objektmessung. Bei der Objektmessung wird gegenüber der Lichtmessung das vom Objekt reflektierte Licht gemessen. Je nach Kameramodell stehen verschiedene Modi der Belichtungsmessung zur Verfügung, die bestimmten Bereichen eines Bildausschnittes entsprechen. Der ermittelte Lichtwert einer Messung wird der Helligkeit eines mittleren oder Neutralgrau gleich gesetzt. Dies erfordert einen entsprechenden Objektbereich mittlerer Helligkeit zu messen. Neutralgrau reflektiert das einfallende Licht zu 18%.

„Alle Belichtungsmesser für Objektmessung sind stets auf einen Durchschnittswert geeicht, und dies ist die Reflexion eines Grauwertes von 18 % des einfallenden Lichts. Man misst also anstelle des tatsächlichen Objekts das Licht, welches eine Graukarte am Ort des Objekts reflektiert.“ (Walter 2005: 64)

Das menschliche Empfinden der „Helligkeit“ ist nicht linear, sondern logarithmisch. Demnach wird ein geringer Reflexionsgrad von 18% bereits als mittleres Grau bewertet. Der gemessene Objektbereich wird mit einer, dem Neutralgrau entsprechenden Helligkeit wiedergegeben. Werden sehr helle oder dunkle Bereiche gemessen, resultieren unter- oder überbelichtete Aufnahmen.

---

<sup>32</sup> Through The Lens - Messverfahren anhand des Abbildes durch das Objektiv eines Kamerasystems

„Wird mit einem Reflexionsbelichtungsmesser ein durchschnittliches Motiv gemessen, sind viele der ermittelten Belichtungswerte falsch. Je stärker das Motiv vom mittleren Grau abweicht, desto größer ist der Fehler.“ (*Präkel 2010: 107*)

Zur Messung stehen, je nach Kamerasystem verschiedene Verfahren zur Verfügung. Das Ergebnis der Belichtungsmessung ist ein Lichtwert LW (Englisch Exposure Value – EV). Der Lichtwert ist ein logarithmisches Maß über die Helligkeit. Abhängig von der Lichtempfindlichkeit definiert ein Lichtwert das Verhältnis von Blendenwert und Belichtungszeit. Bei einer Lichtempfindlichkeit von ISO 100 ergibt sich ein LW von Null, bei einer Belichtungszeit von 1sec und einem Blendenwert  $k=1$ . Werden Belichtungszeit oder Blendenöffnung um einen Wert reduziert, nimmt der Lichtwert um „1“ zu. Wird die Lichtempfindlichkeit gesteigert, muss der LW in gleichem Verhältnis reduziert werden. Die meisten Kamerasysteme verfügen über einen Indikator über den Lichtwert zur Anpassung der Belichtungszeit oder des Blendenwertes. Auf einer um Null gewichteten Skala wird die Abweichung der an der Kamera gestellten Werte vom Messergebnis angezeigt. Werden Zeit oder Blende korrigiert, sodass keine Abweichung besteht, entspricht die Belichtung dem Messwert der Belichtungsmessung.

„Korrektur +1 EV: Blende um eine Stufe öffnen, Verschlusszeit eine Stufe länger, +1 EV mit Belichtungskorrektur [Exposure Compensation], ISO-Empfindlichkeit halbieren.“ (*Präkel 2010: 106*)

Zudem ist es möglich, die Referenz, das Neutralgrau, über eine Korrektur des Lichtwertes zu beeinflussen. Diese Funktion wird als „Exposure Compensation“ bezeichnet. Einige Kompaktkamerasysteme arbeiten lediglich vollautomatisch. Um die Belichtung in automatisierten Aufnahmemodi zu beeinflussen, kann die Funktion der „Exposure Compensation“ genutzt werden. Gemessene Werte können bei einigen Kamerasystemen gespeichert werden und bleiben somit auch unter Einsatz eines automatischen Belichtungsprogrammes bei veränderter Ausrichtung des Bildausschnittes erhalten.

#### **4.8.1 Spotmessung**

Die Spotmessung erfasst zur Ermittlung des Lichtwertes einen sehr kleinen Bereich des Bildausschnittes. Zumeist liegt der Messpunkt zentral, manche Systeme erlauben jedoch auch die Einflussnahme auf die Lage des Messpunktes. In der Regel deckt der Messbereich 2-5% des Bildausschnittes ab. Diese Methode eignet sich, um spezifische Bereiche zu messen oder um den Motivkontrast zu ermitteln, indem helle und dunkle Bereiche explizit gemessen werden.

„Bei Aufnahme von Objekten, deren bildwichtige Teile einen sehr hohen Motivkontrast (Helligkeitsunterschied zwischen der hellsten und der dunkelsten Stelle eines Bildes) aufweisen, werden die hellsten und dunkelsten Stellen getrennt gemessen und das Resultat wird gemittelt.“ (Weber 1986: 37)

Da das aufzunehmende Objekt im Rahmen der photogrammetrischen Mehrbildauswertung über einen Bildverband erfasst wird und selten ganzheitlich abgebildet wird, ist die Spotmessung ein nützliches Werkzeug, um den Motivkontrast des gesamten Objektes vorab zu ermitteln. Bleibt die Belichtung über den Bildverband möglichst konstant, ist dies dem Prozess der Auswertung und der Ausgabe einer möglichst homogenen Textur des Objektes zuträglich.

#### **4.8.2 Integralmessung**

Die Integralmessung kann auf Basis des gesamten Bildausschnittes oder einer Gewichtung gegen das Zentrum des Bildausschnittes erfolgen. Nach der Gewichtung wird ein Mittelwert der Bereiche errechnet. Für den Bildverband kann dieses Messverfahren sehr unterschiedlich belichtete Aufnahmen bedeuten.

#### **4.8.3 Matrixmessung oder Mehrfeldmessung**

Die Matrixmessung ist das modernste Messverfahren. Messwerte aus einer Vielzahl an Messfeldern werden in Abhängigkeit der Brennweite, des Kontrastes und der Farbwerte des Bildausschnittes beurteilt. Das System analysiert anhand der erhobenen Werte das Motiv und gestaltet die Belichtung entsprechend.

„Mehrfeldmessung: Moderne Kameras bieten häufig eine Mehrfeldmessung; hier wird der Bildbereich in mehrere (von fünf bis hin zu über 1.000) Bereiche unterteilt, welche einzeln ausgewertet werden. Mit speziellen Algorithmen wird dann eine für die jeweilige Situation optimierte Belichtung ermittelt.“ (Walter 2005: 65)

Kamerasysteme, die eine Bildvorschau in Echtzeit bieten, sind meist in der Lage ein „Histogramm“ an zu zeigen. Das „Histogramm“ visualisiert die Tonwertverteilung des aktuellen Bildausschnittes. Anhand der Gewichtung kann die Belichtung der Aufnahme bereits vorab beurteilt werden.

Für Aufnahmen eines Bildverbandes zur photogrammetrischen Auswertung bieten die Messergebnisse der Spotmessung die bestmögliche Grundlage zur Fertigung eines homogen belichteten Bildverbandes.

### **4.9 Die Aufnahme**

Je nach Kamerasystem und Aufnahmemodus ist ein gewisser Grad der Einflussnahme über die Aufnahme gegeben. Kompakte Kamerasysteme erlauben aufgrund des hohen

Automationsgrades in der Regel das geringste Einwirken auf die Gestaltung der photographischen Abbildung. Viele dieser Systeme verfügen lediglich über einen Autofokus und eine Voll- oder Programmautomatik zur Belichtung der Aufnahme. Der Autofokus ist der Abbildung einer maximalen Schärfentiefe oft abträglich. Zudem stößt der Autofokus bei ungünstigen Lichtverhältnissen trotz Hilfsbeleuchtung an seine Grenzen. Das manuelle Fokussieren garantiert im Umfang eines beeinflussbaren Blendenwertes eine maximale Schärfentiefe (vgl. 3.2.4). Die Zeitautomatik (AV Aperture Priority) ermöglicht die Einflussnahme des Photographen auf den Blendenwert. Die Belichtungszeit wird auf Basis der Belichtungsmessung jedoch automatisch gestellt. Ergebnisse können aufgrund der Eigenschaften der angewandten Methode der Belichtungsmessung variieren. Ein manueller Betrieb ermöglicht die Einflussnahme auf alle Faktoren zur Gestaltung der photographischen Abbildung. Aus der selektiven Belichtungsmessung kann eine der erforderlichen Arbeitsblende entsprechende Belichtungszeit ermittelt werden, die über weite Bereiche des Bildverbandes angewandt werden kann. Der Einsatz einer Graukarte ist der Ermittlung einer ausgewogenen Belichtung dienlich. Zudem kann anhand der Aufnahme der Graukarte der Weißabgleich erfolgen. Jede Lichtquelle hat eine spezifische Farbtemperatur. Wird die Farbtemperatur für eine Aufnahme nicht korrekt gesetzt, ist die Farbwiedergabe der Aufnahme verfälscht. Im Rahmen der Photogrammetrie ist eine farbtreue Wiedergabe in mancher Anwendung erforderlich und zu dokumentarischen Zwecken zumindest wünschenswert. Die Graukarte ist ein einfaches Hilfsmittel, um diese zu gewährleisten. Die Anwendung von Blitzlicht bei ungünstigen Lichtverhältnissen kann sich hinsichtlich der photogrammetrischen Auswertung als kritisch erweisen. Ein kameragebundenes Blitzgerät verursacht je nach Aufnahmeposition gegenüber dem Objekt einen unregelmäßigen Licht und Schattenwurf. Zudem nimmt das Licht mit der Entfernung quadratisch ab, wodurch die Aufnahmen eines Bildverbandes im Tonwert stark variieren können, sofern die Leistung des Blitzgerätes nicht weiter zu beeinflussen ist. Wird das Blitzlicht zudem reflektiert, entstehen Lichtreflexe, die eine Verarbeitung der Aufnahme verunmöglichen. Künstliche Lichtquellen sollten dem Aufnahmeobjekt und der Aufnahmeordnung entsprechend stationär positioniert werden. Künstliche Lichtquellen können als Streiflicht genutzt werden, um Strukturen homogener Oberflächen zu verdeutlichen. Ungünstigen Lichtverhältnissen ist jedenfalls mit einer stabilen Lagerung der Kamera mittels eines Statives zu begegnen. Von der Wahl hoher Lichtempfindlichkeiten ist aufgrund der wesentlichen Minderung der Abbildungsqualität abzuraten.

## **4.10 Kamerasysteme**

Die digitale Photographie bietet einen einfachen und kostengünstigen Zugang zur Photographie. Die Anwendungen sind vielfältig und reichen von Kommunikationstechnologien bis zur automatisierten Qualitäts- oder Sicherheitskontrolle. Das Spektrum an Kamerasystemen reicht vom Einsatz in „Smartphones“ und Computersystemen hin bis zu Spektalkamerasystemen in Hochleistungsteleskopen. Entsprechend gestaltet sich auch das Angebot an „handelsüblichen Kamerasystemen“. Grundsätzlich lassen sich drei Bauarten unterscheiden.

### **4.10.1 Kompaktkamera**

Kompaktkameras definieren sich aufgrund ihrer äußerst kompakten Maße. Sie bauen zumeist auf kleinformatigen Bildsensoren auf und verfügen über eine fest verbaute Vario-Optik mit begrenztem Brennweitenbereich. In der Regel verfügen solche Kameras über einen Autofokus und werden „vollautomatisch“ betrieben. Der Bildausschnitt kann über einen optischen oder elektronischen Sucher, zumeist aber lediglich über das Display der Kamera betrachtet werden. Jedoch bietet auch dieses Segment hochwertigere Kamerasysteme mit größeren Sensoren, wertigeren Objektiven und erweiterten Aufnahmemodi bis hin zur manuellen Aufnahmegestaltung. Sofern sich Fokus und Belichtung beeinflussen lassen, entsprechen solche Systeme mit möglichst großem Bildsensor den Anforderungen der Architekturphotogrammetrie.

### **4.10.2 Bridgekamera**

Bridgekameras sind weniger kompakt und ermöglichen somit den Einsatz größerer Sensoren. Die Optik ist fest verbaut, aufgrund der größeren Bauart zumeist hochwertiger und deckt in der Regel einen weiten Brennweitenbereich ab. Diese Kamerasysteme ermöglichen zumeist die direkte Einflussnahme auf Fokus und Belichtung. Gegenüber dem Segment der Kompaktkameras sind diese Systeme in einem höheren Preissegment vertreten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die variable Optik dieser Kamerasysteme großen Einfluss auf die Preisgestaltung hat, im Anwendungsbereich der Architekturphotogrammetrie jedoch im Umfang nicht genutzt wird.

### **4.10.3 Systemkamera**

Systemkameras basieren auf herstellerspezifischen Komponenten. Kameragehäuse und Objektive einer Systemgruppe lassen sich kombinieren und durch vielfältiges Zubehör erweitern. Diese Kameramodelle begründen sich traditionell auf der Basis „kleinerer“

Sensorformate. Zunehmend etablieren sich auch große Formate, bis zu Vollformat-Sensoren. Gegenüber der Spiegelreflexkamera verfügen diese Systeme über keinen Spiegel und ermöglichen recht kompakte Bauweisen. Als Sucher haben sich elektronische Sucher und Displays etabliert. Letztere sind meist schwenkbar, was sich bei ungewöhnlichen Aufnahmepositionen (z.B über Kopf) als äußerst nützlich erweist. Im Gegenzug ist das Abbild eines Displays recht klein und wird durch Reflexionen beeinträchtigt. Viele dieser Systeme verfügen über WLAN Schnittstellen, sodass die Kamera auch aus der Entfernung komfortabel steuern lässt. Dies erweist sich bei der Verwendung von Stativmasten als hilfreich, da die Aufnahme zudem sofort übertragen und geprüft werden kann. Aufgrund der kompakten Maße auch bei größeren Sensorformaten, der Möglichkeit der manuellen Bedienung und des Angebotes geeigneter Objektive sind solche Kamerasysteme für photogrammetrische Zwecke bei geringem Budget zu empfehlen.

#### **4.10.4 Spiegelreflexkamera**

Die Spiegelreflexkamera (SLR – single lens reflex) ist das anpassungsfähigste, handelsübliche Kamerasystem. Etablierte Systeme verfügen über ein großes Angebot an Kameras, Objektiven und Zubehör. In der Regel wird das Angebot über Dritthersteller ergänzt. Das deutlich voluminösere Gehäuse beherbergt einen teiltransparenten Spiegel der das, durch die Linse einfallende Licht auf eine Mattscheibe lenkt. Über ein Pentaprisma, oder bei günstigen Modellen ein Spiegelsystem, kann das Abbild der Mattscheibe durch den Sucher betrachtet werden. Das Pentaprisma bedingt die typische Bauform der Spiegelreflexkamera. Bei der Aufnahme wird der Schwingspiegel gegen die Mattscheibe geklappt, um die Bildfläche belichten zu können. Im Zuge des Belichtungsvorganges wird der Sensor über einen Schlitzverschluss für die Dauer der Belichtungszeit freigegeben. Dieses Verschlussystem umfasst zwei „Verschlussvorhänge“, wobei der erste den Sensor frei gibt und der zweite die Bildebene zeitversetzt schließt. Bis zu einer gewissen Belichtungszeit (in der Regel  $\frac{1}{60}$  sec) wird die gesamte Oberfläche des Sensors frei gelegt. Bei reduzierten Belichtungszeiten schließt der zwei Verschlussvorhang, bevor der Erste zur Gänze geöffnet ist. Es resultiert ein „Schlitz“, durch den das einfallende Licht den Sensor partiell belichtet. Die minimale Verschlusszeit, unter der der Sensor vollflächig belichtet wird, entspricht der Blitzsynchronisationszeit. Wird ein Blitz bei kürzerer Belichtungszeit gezündet, ist der von den Verschlussvorhängen geschlossene Bereich dem Licht nicht ausgesetzt. Spiegelreflexkameras verfügen über großflächigere Sensoren, hin bis zum Vollformat. Diese Kamerasysteme vereinen Funktionen von der vollautomatischen

Bilderfassung bis zum manuellen Betrieb. Aus der Vielzahl an Objektiven bieten sich in Bezug auf photogrammetrische Anwendungen Festbrennweiten-Objektive an. Diese lassen sich gegenüber Abbildungsfehlern (3.2.2) verhältnismäßig einfach korrigieren und bieten das beste Preis-Leistungs-Verhältnis. Spiegelreflexkameras sind vor allem im höheren Preissegment zu empfehlen. Kameragehäuse sind unter Verarbeitung hochwertiger Materialien, meist Leichtmetallen, äußerst robust. Dies gewährt eine hohe Stabilität der inneren Orientierung. Zu empfehlen sind Kameratypen mit Vollformatsensor, da diese, gegenüber kleineren Formaten, höhere Bildqualität, vor allem bei ungünstigen Lichtverhältnissen, gewähren.

#### 4.11 Der Bildsensor

Neben der Güte der Optik ist der Bildsensor maßgebendes Kriterium über die Qualität des digitalen, photographischen Abbildes. Die Bildauflösung scheint für die meisten Konsumenten ausschlaggebend zu sein. Diese kann jedoch nur unter Berücksichtigung der Sensorgröße beurteilt werden. Je kleiner der Sensor bei höherer Auflösung, umso weniger Fläche bietet die einzelne Photozelle. Je weniger Fläche dem Licht geboten wird, umso geringer ist dessen Wirkungsgrad.

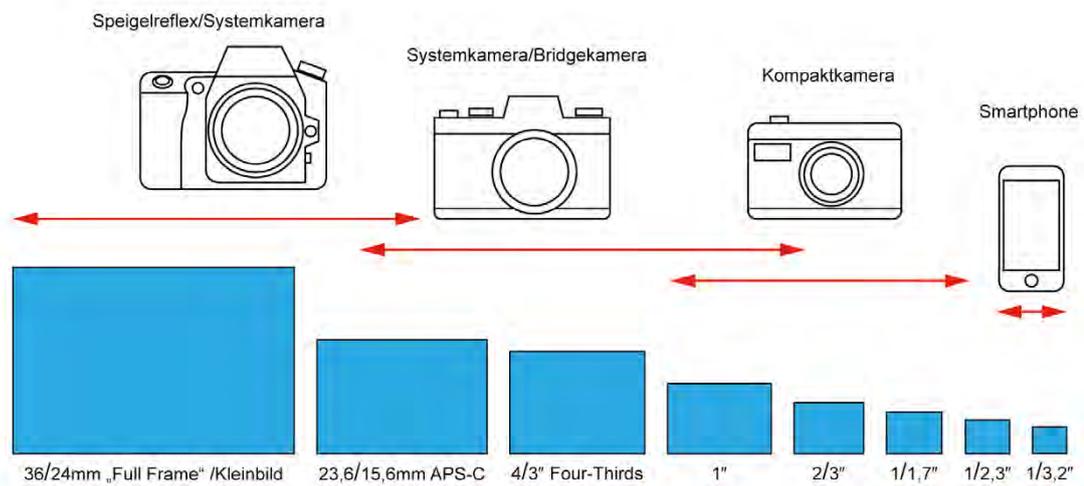


Abb. 4.11 Schematische Darstellung von Sensorformaten und Kamerasystemen

Aufgrund der geringeren Lichtempfindlichkeit muss das resultierende Signal deutlich verstärkt werden, was sich in geringerem Dynamikumfang und höherem Bildrauschen äußert. Zudem verdeutlichen sich Abbildungsfehler bei abnehmender Sensorgröße. Der Abbildungsqualität sind große Sensorformate zuträglich.

„In digitalen Aufnahmesystemen werden ausschließlich Festkörper-Bildsensoren (solid state sensors) eingesetzt. Festkörper-Bildsensoren besitzen eine Vielzahl kleiner lichtempfindlicher Detektorelemente, die zeilen- oder matrixförmig in einem Halbleiterbaustein angeordnet sind (Zeilen- bzw. Flächensensoren). Jedes Detektorelement (Sensorelement) erzeugt proportional zur einfallenden Lichtmenge elektrische Ladung, die anschließend elektronisch ausgelesen, aufbereitet und digitalisiert werden kann.“  
(Luhmann 2010: 166)

Für die photogrammetrische Bildaufnahme werden fast ausschließlich Flächensensoren eingesetzt, die matrixförmig angeordnete Sensorelemente besitzen. (ebd: 168)

#### 4.11.1 CCD und CMOS, Bauarten von Flächensensoren

Ein Bildsensor ist ein Element, das die Belichtung (Belichtung  $H = \text{Beleuchtungsstärke } E \times \text{Zeit } t$ ) messen und einem A/D<sup>33</sup> Wandler überträgt. Aus der Lichteinwirkung entsteht eine elektrische Ladung, die proportional zur Belichtung ist. (vgl. Marchesi 2011: o.S.)

Grundsätzlich haben sich in der Digitalphotographie zwei Bauarten von Flächen-Bildsensoren etabliert. Beide Technologien überführen das einwirkende Licht in eine elektrische Ladung. Diese Ladung wird je nach Technologie ausgelesen und verstärkt.

„CCD- und CMOS-Sensoren unterscheiden sich in der Methode, wie die Bilddaten vom Chip ausgelesen werden.“ (Marchesi 2011: o.S.)

CCD (Charged Coupling Devices) Bildsensoren werden seit den Anfängen der Digitalphotographie verbaut. Dementsprechend ausgereift gestaltet sich diese Technologie. Die aufgrund der Belichtung resultierende Ladung wird aus einem Halbleiterelement Zeile für Zeile in ein Ausleseregister verschoben, abgenommen und verstärkt.

„After exposure, each charge packet within the matrix is physically transported to a common output structure that converts the charge to a voltage. The architecture of CCD sensors thus leads to a sequential read-out of the image data with a high uniformity.“ (Blanc 2001: 131)

Beim CMOS-APS (Complementary Metal Oxide Semi-Conductor – Active Pixel Sensor) Bildsensor wird die Ladung direkt an der Photodiode abgenommen, verstärkt und dem Analog-Digital-Wandler zugeführt. Letzterer ist integraler Bestandteil des CMOS oder „Active Pixel Sensors“ (APS).

„Die CMOS-Technologie (complementary metal oxide semi-conductor) ist eine bewährte Technik zur Herstellung von Rechnerprozessoren und Speicherbausteinen.“ (ebd: 171)

Diese Bildsensoren sind demnach kostengünstiger zu produzieren und lassen sich aufgrund ihrer kompakten Bauart gegenüber weiteren Ansprüchen leicht adaptieren. Sie benötigen

---

<sup>33</sup> Analog / Digital

eine geringere Betriebsspannung und realisieren gegenüber dem CCD Bildsensor eine schnelle Bildverarbeitung. Diese Eigenschaften und die unkomplizierte Fertigung dieses Bauteiles erklären den verbreiteten Einsatz im Bereich kleiner Sensoren und Video-Anwendungen.

„Allerdings ergeben sich neben [...] offensichtlichen Vorteilen auch gewichtige Nachteile. Sie betreffen vor allem die deutlich geringere Lichtempfindlichkeit, ein gegenüber den CCDs reduzierter Dynamikumfang sowie die ausgeprägte Anfälligkeit für Rauschen.“ (*Marchesi 2011: o.S.*)

Die Entwicklung beider Technologien ist ein fortwährender Prozess. Die Qualität eines Bildsensors kann nicht direkt anhand seiner Bauart beurteilt werden.

#### **4.11.2 Farbwiedergabe, Farbmosaikfilter**

Bildsensoren wandeln die Intensität des Lichtes eines bis in den infraroten Bereich ausgedehnten Spektralbereich in elektrische Ladung. Das gewandelte Signal beschreibt lediglich den monochromen Wert der Helligkeit. Der Bildsensor ist an sich nicht in der Lage, Farbwerte wiederzugeben. Ähnlich dem analogen Farbfilm muss das Licht nach Primärfarben (RGB) gefiltert den Sensor erreichen, um Farbwerte reproduzieren zu können. In der Regel wird dem Bildsensor hierzu ein Mosaikfilter vorgesetzt.

„Der Mosaikfilter ist unmittelbar auf dem Schutzglas des CCD- oder CMOS-APS-Flächenchips aufgedampft und zwar so, dass abwechselnd je ein Pixel hinter einem Rot-, Grün- und Blaufilter liegt. [...] Es liegt auf der Hand, dass sich bei dieser Methode die Auflösung erheblich verringert und die Informationslücken durch Software-Interpolation gefüllt werden müssen.“ (*ebd.: o.S.*)

Der „Bayer Farbfilter“ gilt in dieser Anwendung als Standard. Er definiert sich in zwei verschiedenen, sich wiederholenden Zeilen alternierender Farbfeldern. Eine Zeile besteht aus grünen und blauen Feldern, die zweite, um ein Pixel versetzt aus grünen und roten Feldern. Die Mehrzahl aus grünen Feldern resultiert aus der Sensibilisierung des menschlichen Farbsehvermögens gegenüber dem grünen Farbraum. Demnach richtet sich auch das Empfinden der Helligkeit maßgeblich nach dem grünen Farbraum. Die aus dem „Bayer-Muster“ interpolierten Farbwerte werden in ihrer Helligkeit gegenüber den grünen Farbfeldern maßgeblich beeinflusst.

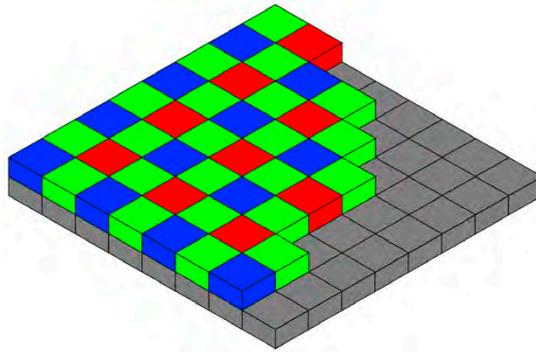


Abb. 4.11.2 Bayer-Mosaikfilter

Das Verfahren der Interpolation wird als „Demosaiicing“ bezeichnet. Eine Ausnahme gegenüber einem mosaik-artigen Farbfilter stellt der „Foveon Sensor“ dar, der gleich der analogen Farbphotographie über drei vollflächige Farbfilter verfügt. Je nach Wellenlänge dringt das Licht unterschiedlich tief in den Halbleiter ein und kann entsprechend ausgelesen werden. Der „Farbfilter“ ist jedoch nicht der einzige Filter, der einem Bildsensor vorgesetzt ist. Da der Bildsensor gegenüber infrarotem Licht sensibel ist, muss er diesem gegenüber gesperrt werden. Die Einwirkung infraroten Lichtes kann in Farbverfälschungen und Belichtungsfehlern resultieren. Die „Desensibilisierung“ erfolgt über einen Infrarot-Sperrfilter, der den Spektralbereich mit 700 Nanometer begrenzt.

#### 4.11.3 Tiefpassfilter

Der Bildsensor gestaltet sich aus einer regelmäßigen Anordnung an Photodioden oder Pixeln. Weist ein Aufnahmeobjekt sehr feine Strukturen auf, können diese mit der Ordnung der Pixel interferieren. Dies zeichnet sich in Form von Interferenzmustern (Moiré-Effekte) und Farbfehlern ab.

„Die Methoden die man zur Reduktion bzw. Beseitigung dieser Störungen einsetzt, werden üblicherweise als Antialiasing bezeichnet“ (Marchesi 2011: o.S.)

In der Regel werden solche Interferenzen mittels eines optischen Tiefpassfilters (OLPF) in mehrschichtigem Aufbau eliminiert. Der Tiefpassfilter ist auf den Sensor abgestimmt und filtert hochfrequente Signale, indem Strahlen auf benachbarte Pixel übertragen werden. Dies resultiert in einer gewissen „Weichzeichnung“ des Bildes. Das Auflösungsvermögen wird durch den Tiefpass- oder AA (antialiasing)-Filter weiter reduziert. Viele Hersteller verzichten bei hochwertigen Modellen zugunsten der Detailauflösung bereits auf solche Filter. Dies resultiert aus der zunehmenden Auflösung aktueller Bildsensoren und der resultierenden, kleinen Photodioden im Verhältnis zu der Strukturgröße natürlicher Muster. Obwohl in der Architektur regelmäßige Muster und Strukturen häufig vorzufinden sind, fällt

deren maßstäbliche Abbildung im Bereich der Architekturphotogrammetrie selten in den kritischen Bereich. Der Einsatz einer Kamera ohne Tiefpassfilter bedeutet jedenfalls ein höheres Auflösungsvermögen.

#### 4.12 Kontrastumfang und Dateiformate

Der Kontrastumfang eines Motives beschreibt den Tonwertumfang von minimaler zu maximaler Helligkeit. Der A/D (Analog/Digital) Wandler einer Digitalkamera bestimmt den maximalen Dynamikumfang einer digitalen Aufnahme.

„Dynamic Range is a measure of the sensitivity of a camera. It defines how many different levels of signal a camera can quantitatively detect. A higher dynamic range corresponds to a better ability of the camera to differentiate between levels of light.“ (Photometrics 2011)

Ist der Motivkontrast kleiner als der Dynamikumfang des Kamerasystems, kann das Abbild in vollem Umfang wiedergegeben werden. Unterliegt der Dynamikumfang dem Motivkontrast, werden Schatten und/oder Lichter beschnitten.

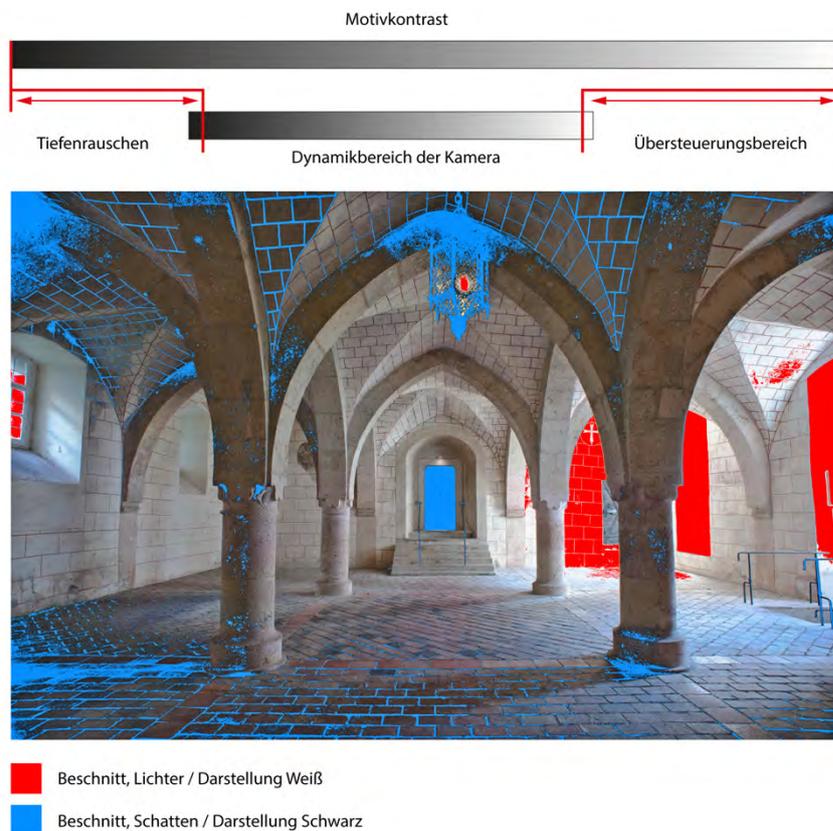
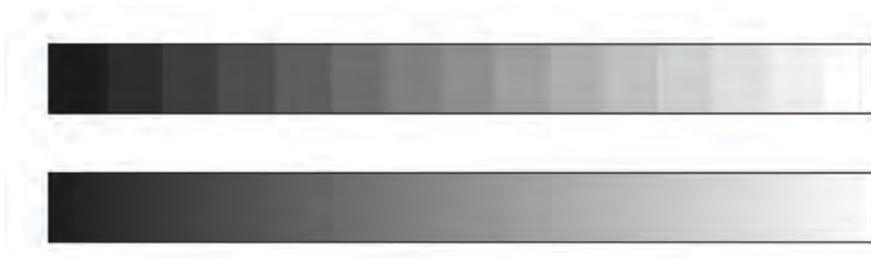


Abb. 4.12-1 Motivkontrast vs. Dynamikumfang

Die Grenze im Bereich der Schatten ist bereits erreicht, wenn Dunkelbildrauschen einsetzt. Diese Partien sind hinsichtlich photogrammetrischer Verarbeitung kritisch zu beurteilen. Aus dem Bildrauschen können Fehler in der Merkmal-Punktermittlung ergehen.

Der Dynamikumfang wird in Lichtwerten (LW oder EV) oder korrespondierenden Blendenwerten angegeben. Ein Dynamikumfang von 10+ EV gilt bei herkömmlichen Kamerasystemen (Kompaktkameras) als Standard. Aktuelle, hochwertige Kamerasysteme (System- und Spiegelreflexkameras) erfassen einen Umfang von 12-14 EV. Der Dynamikbereich steigt mit der Größe der Photodioden und wird mit zunehmender Lichtempfindlichkeit (Signalverstärkung) gemindert. Der Kontrastumfang beschreibt eine graduelle Abstufung von Grauwerten mit Schwarz und Weiß als Extremwert. Die Anzahl der Abstufungen der Werte wird als Farbtiefe, als „Bit“, angegeben. Ein Bit kann lediglich Schwarz oder Weiß wiedergeben. Aus dem Exponent der Basis 2 (ein Bit) ergeht die Anzahl reproduzierbarer Grauwerte. Eine Aufnahme aus der Verarbeitung eines 10 Bit A/D Wandlers ergibt einen Tonwertumfang von 1024 Graustufen, 14Bit entsprechen bereits 16384 Tonwerten. Um diesen Bereich in möglichst großem Umfang übernehmen zu können, muss das Dateiformat, in dem die Bilddatei gespeichert wird den Anforderungen gerecht werden. Der weit verbreitete Dateistandard „JPG“ (Joint Photographic Experts Group) lässt eine „Farbtiefe“ von lediglich 8Bit zu. Dies entspricht 256 Graustufen. Der Bildprozessor einer Digitalkamera verarbeitet das Bild unter bestimmten Systemprofilen und komprimiert den Tonwertumfang hinsichtlich einer Kontraststeigerung, um das Bild als JPG-Datei zu speichern. Das resultierende kontrastreiche Bild genügt der photographischen Abbildung in vielen Anwendungen. Der Informationsverlust gegenüber der computergestützten Auswertung ist jedoch drastisch. Zur individuellen Bildgestaltung bieten hochwertigere Kamerasysteme alternative Dateiformate, um den Tonwertumfang im vollen Umfang zu speichern. Solche Dateiformate sind beispielsweise das Format TIFF (Tagged Image File Format), das einen Tonwertumfang von 16Bit umfasst.



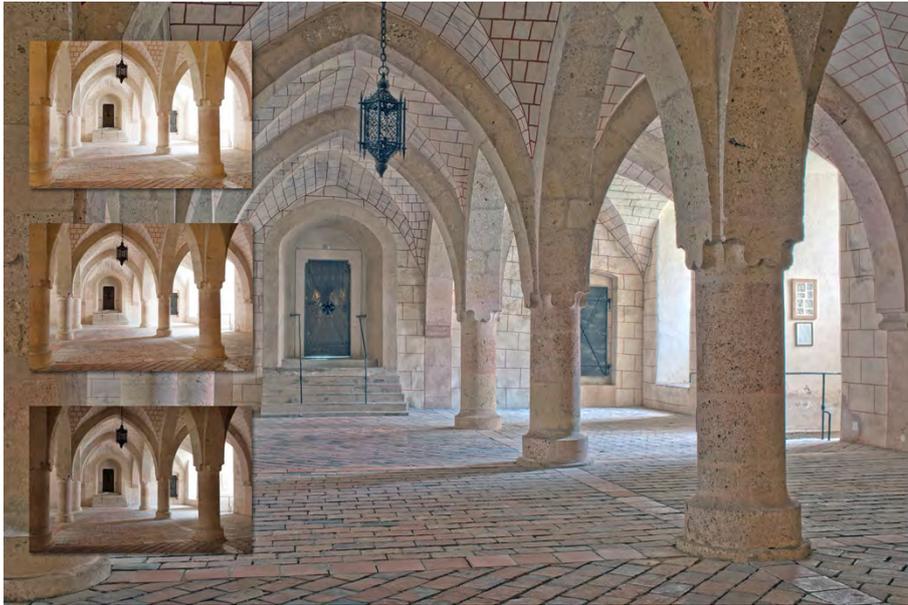
*Abb. 4.12-2 Schematische Darstellung, Tonwertumfang 8bit und 16bit Grafik*

Maximale Flexibilität gewähren sogenannte RAW-Datenformate. Diese proprietären Formate speichern die Bildinformation, ohne diese weiter zu verarbeiten. Die Ausarbeitung erfolgt mittels entsprechender Software. Diese realisiert das Demosaicing, die

Rekonstruktion des Bildes aufgrund des Mosaik-Farbfilters, (vgl. 4.11.2) und erlaubt eine individuelle Bildausarbeitung. So kann der Weißabgleich, Kontrast und das Farbprofil bestimmt werden, Tonwerte, Bildschärfe und Bildrauschen können manipuliert werden. Die ausgearbeitete Bilddatei wird zur weiteren Verwendung in einem entsprechenden Bild-Datenformat ausgegeben. Das RAW-Dateiformat kann nicht direkt bearbeitet und gespeichert werden. Einstellungen werden zumeist in Form von Metadaten oder einer Datenbank als Referenz zur Datei hinterlegt. Hinsichtlich photogrammetrischer Verarbeitung sollten keine transformativen Operationen (Korrektur von Verzerrungen oder Perspektive) ausgeführt werden. Das Bild sollte keine wesentliche Kontraststeigerung erfahren, im Gegenteil kann durch Senken der Lichter und Heben der Schatten Bilddetail für eine ausgewogene Textur rückgewonnen werden. Auch diese Operationen sind maßvoll anzuwenden. Es gilt nicht, ein den Sehgewohnheiten entsprechendes Bild zu gestalten, sondern eine maximale Informationsdichte abzuleiten. Das Dateiformat TIFF eignet sich zur weiteren Verarbeitung und Archivierung. Dieses Datenformat entspricht den Empfehlungen der „Standards der Baudenkmalpflege“ (vgl. 2.4.2).

#### **4.13 HDR – High Dynamic Range**

Reicht der Dynamikumfang eines Kamerasystems nicht aus, um dem Kontrastumfang einer Szene zu entsprechen, kann dieser über die Fertigung und Verarbeitung einer Aufnahmesequenz erweitert werden. Hierzu wird eine Bildsequenz des Motives von mindestens drei Aufnahmen gefertigt und in entsprechender Software verarbeitet. Die einzelnen Aufnahmen entsprechen dabei einer adäquaten Belichtung der Schatten bis zu den Lichtern eines Motives über unterschiedliche Belichtungszeiten in gleichen Belichtungsschritten. Lichter und Schatten werden nach der Spotmessung bewertet und in einer entsprechenden Belichtungsreihe erfasst. Zur Aufnahme einer solchen Belichtungsreihe ist ein Stativ empfohlen. Die Schatten der nach den Lichtern gewichteten und somit dunkelsten Aufnahme müssen jedoch frei von Dunkelrauschen bleiben. Aus den Aufnahmen ungerader Anzahl wird ein erweiterter Tonwertumfang ermittelt.



*Abb. 4.13 HDR Bildsequenz und Ergebnis*

Bildrauschen wird als „Textur“ falsch interpretiert und bedeutet eine Störung im Rahmen der resultierenden HDR (High Dynamic Range) Datei. Zur Zeit (2014) ermöglichen wenige Anwendungen wie die Software „Photoscan“ die Verarbeitung von HDR-Dateien. Die Aufnahmen und Ausarbeitung sowie die photogrammetrische Auswertung dergleichen bedeuten jedenfalls einen deutlichen zeitlichen Mehraufwand.

#### **4.14 Hilfsmittel zur Aufnahme**

Bei entsprechenden Lichtverhältnissen ermöglichen Aufnahmen „aus der Hand“ ein schnelles und flexibles Aufnahmeverfahren. Im Anwendungsbereich der Architekturphotographie erweist sich ein Stativ jedoch als nützlich. Dieses erlaubt eine exakte Positionierung, längere Belichtungszeiten durch die stabile Lagerung und gegebenenfalls außergewöhnliche Kamerastandorte. Stativmaste, Galgenstative und mobile Kamerakransysteme ermöglichen erhöhte Aufnahmepositionen, um sichttote Bereiche und Perspektive günstig zu beeinflussen. Ein Stativ sollte jedenfalls möglichst stabil sein, um das Auspendeln der Masse der Kamera bei stetem Standortwechsel zu begünstigen. Die Kamera kann gegebenenfalls mittels USB-Anschluss oder WLAN angesteuert und betrieben werden, selbst Bilddateien lassen sich vor Ort übertragen und begutachten. Bei längeren Belichtungszeiten mittels eines Statives ist ein Fernauslöser von Vorteil, um die Kamera beim Auslösen nicht zu bewegen. Solche Auslöser können kabelgebunden sein oder die Kamera über Infrarot oder Funk auslösen. Sollten Stative, Hebebühnen oder ähnliche Behelfe einem probaten Bildverband nicht genügen, können sich UAVs (Unmanned Aerial

Vehicle) beweisen. Diese Drohnen tragen in Abhängigkeit ihrer Leistungsklasse das Gewicht unterschiedlicher Kamerasysteme und lassen sich dank automatisierter Stabilisierung und GPS-gestützter Steuerung relativ einfach und exakt kontrollieren. Die Kamera ist an einer über mehrere Achsen stabilisierten Aufhängung angebracht und kann über mindestens eine Achse ferngesteuert verschwenkt werden. Die Bedienung erfordert trotz des hohen Automationsgrades jedoch gewisse Erfahrung. Da sich diese Aufnahmeverfahren in der Filmproduktion, der Photographie und dem Vermessungswesen etabliert haben, sind Dienstleister auf diesem Gebiet bereits weit verbreitet.

#### **4.15 Aufnahmeordnung des Bildverbandes**

Der zu erfassende Raum oder das Objekt müssen geometrisch verstanden werden, um eine günstige Aufnahmeordnung für einen robusten Bildverband zu entwickeln. Die Aufnahmeordnung muss ein stabiles Netzwerk ergeben, welches das Objekt unter bestmöglichen Bedingungen ganzheitlich erfasst.

„Die geometrische Konfiguration einer photogrammetrischen Aufnahmeanordnung liegt mit Ausnahme fest montierter Kameras nicht pauschal fest, da sie stets von objektspezifischen Gegebenheiten und anwendungsorientierten Spezifikationen abhängt. Im Allgemeinen muss ein Kompromiss unter verschiedenen, sich teilweise widersprechenden Restriktionen gefunden werden.“ (*Luhmann 2010: 531*)

Die Ordnung eines Bildverbandes über ein Aufnahmeobjekt ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Die erforderliche Genauigkeit bestimmt den Aufnahmemaßstab und somit auch den Umfang des Bildverbandes. Sind Teile des Objektes genauer zu erfassen, muss der Aufnahmemaßstab der Situation angepasst werden. Die Verarbeitung kann von mancher Software innerhalb eines Berechnungsvorganges realisiert werden, sonst gilt es die Teilobjekte separat zu rekonstruieren und gegebenenfalls in einem Modell zusammenzuführen. Die Software „Photoscan“ von Agisoft ermöglicht die Verwaltung von Aufnahmen eines Bildverbandes in Gruppen. Diese Gruppen können einzeln verarbeitet und infolge kombiniert werden. Bei umfangreichen Bildverbänden ermöglicht diese Vorgehensweise reduzierte Rechenzeiten. Eine zunehmende Anzahl an Aufnahmen ist der Genauigkeit und der Dichte der rekonstruierten Punktwolke förderlich. Wird ein Projekt in Gruppen zur Auswertung unterteilt, kann dies einer möglichst dichten und genauen Rekonstruktion abträglich sein. Die Aufnahmen einer Gruppe können jedoch mit unterschiedlicher Optik oder gar unterschiedlichen Kamerasystemen erfolgen, da die innere Orientierung der Kamera für jede Gruppe separat ermittelt wird. Die Gestaltung solcher Gruppen will wohl durchdacht und bereits bei der Planung des Bildverbandes berücksichtigt

sein. Bei webbasierenden Lösungen (SaaS – Software as a Service) ist die Anzahl und Auflösung der Aufnahmen pro Projekt zudem oft limitiert, was die Gestaltung des Bildverbandes ebenfalls beeinflusst. Das Service „Recap360“ von Autodesk ist auf eine mit 250 Bilddateien begrenzte Stückzahl limitiert. Demnach ist die Planung eines Bildverbandes mitunter von der Wahl der Software zur Auswertung abhängig. Umfangreiche Aufnahmeobjekte müssten bei der Wahl einer Software mit begrenztem Verarbeitungsvolumen entsprechend gegliedert und aus den Ergebnissen mehrerer Projekte rekonstruiert werden. Messmarken bieten eindeutige Merkmale, um digitale Modelle zu kombinieren. Grundsätzlich sollte das Objekt, oder ein Teil davon, die photographische Aufnahme nach gegebenem Bildmaßstab größtmöglich ausfüllen. Flächen des Objektes sollten unter möglichst steilem Aufnahmewinkel abgebildet werden. Schleifende Strahlengänge sind weitgehend zu vermeiden, jedenfalls durch günstige Aufnahmen zu ergänzen. Problematisch stellen sich in dieser Hinsicht schmale Räume wie Flure oder Stiegenhäuser dar. Die sogenannte „Korridor-Aufnahmeordnung“, ein der optischen Achse folgender Bildverband, ist möglichst zu vermeiden. Jedenfalls müssen geeignete Aufnahmen den Bildverband ergänzen. Die Verwendung eines Weitwinkelobjektives kurzer Brennweite ist in solchen Situationen vorteilhaft. Konvergente Aufnahmepaare erscheinen günstig. Wenn möglich, sollte der Raum aus beiden Richtungen erfasst werden.

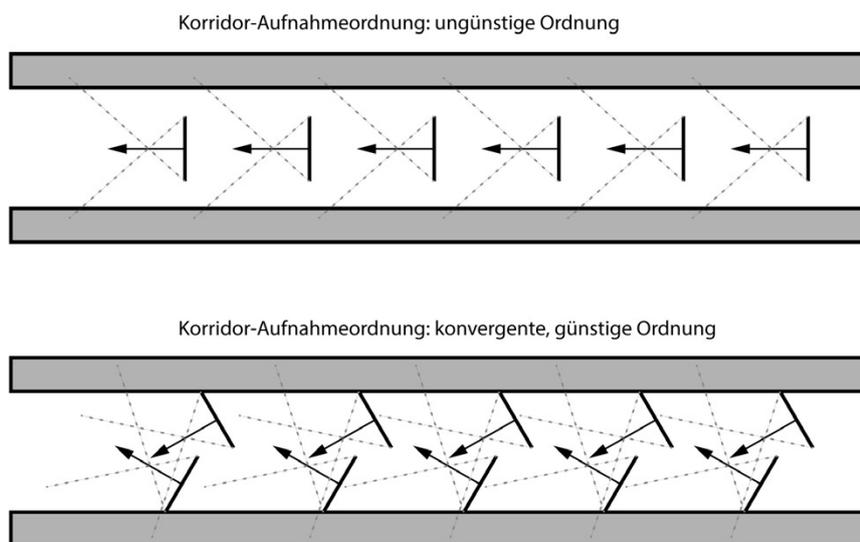


Abb. 4.15-1 Korridor – und konvergente Aufnahmeordnung

Objektmerkmale sollten auf mindestens drei Aufnahmen zu identifizieren sein, eine Bildüberschneidung von 60-80% ist anzustreben. Alle Objektteile sind scharf abzubilden. Aufnahmen mit begrenzter Schärfentiefe sind zu vermeiden. Große ebene Flächen sind

gegebenenfalls über konvergente Aufnahmepeare zu ergänzen, da die Genauigkeit der Rekonstruktion mit der Größe des Winkels der Aufnahmepositionen mit einem Objektpunkt steigt. (vgl. 2.6.2)

„Optimale Schnittkonfigurationen liegen vor, wenn sich alle Bildstrahlen unter einem Winkel von ca.  $90^\circ - 100^\circ$  schneiden. Für praktische Anwendungen genügen in der Regel Schnittwinkel zwischen  $45^\circ$  und  $120^\circ$ , wenn mindestens vier bis sechs Bilder beteiligt sind.“  
(Luhmann 2010: 533)

Vereinzelte konvergente oder divergente Aufnahmepeare können zudem der Stabilität des Netzwerkes dienlich sein. Im Bereich von Gebäudeecken kann die Geometrie über die Integration einer dritten Ebene, beispielsweise dem Boden, weiter stabilisiert werden.

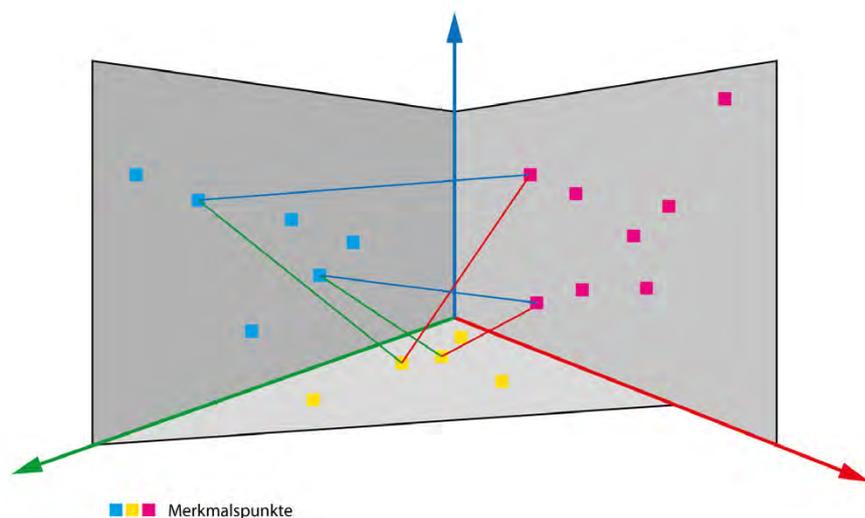


Abb. 4.15-3 Stabilisierung der Geometrie durch Abbildung zusätzlicher räumlicher Ebenen

Sichttote Bereiche müssen durch geeignete Aufnahmen ergänzt werden, sofern dies realisierbar ist. Bei solchen Aufnahmen ist darauf zu achten, an Objektmerkmale oder Bildmarken anzuknüpfen, um diese Bereiche dem übrigen Bildverband zuordnen zu können. Werden Bildmarken verwendet, sollten diese der Aufnahmeordnung und den Erfordernissen des Objektes entsprechend gesetzt werden. Ein vermehrter, flächiger Einsatz von Bildmarken ist hilfreich, um ungünstige (homogene, transparente, reflektierende) Flächen mit geringem Kontrast (Textur oder Detail) zu überbrücken. Zudem sind Bildmarken der Bestimmung der Kamerakalibrierung infolge der Simultankalibrierung dienlich.



## 5. Praktische Anwendung der Mehrbildphotogrammetrie am Objekt

Um die Anwendung der Mehrbildphotogrammetrie am Bauwerk zu demonstrieren, wurde ein Objekt gewählt, das an die Gestaltung der Aufnahmeordnung sowie die photographische Aufnahme hohe Ansprüche stellt und von der photographischen Dokumentation profitiert. Gegenstand ist ein romanischer Raum der Zisterzienserabtei Heiligenkreuz. In folgenden Abschnitten wird die Aufnahme, Aufnahmeordnung sowie Auswertung mittels entsprechender Software und weitere Verarbeitung der photogrammetrischen Produkte beschrieben. Zur photogrammetrischen Auswertung wurden die Software-Lösungen Photoscan Pro, ReCap360 und VisualSFM herangezogen, die zur Genauigkeitsuntersuchung am Objekt bereits in Abschnitt 2.6.3 eingesetzt wurden.

### 5.1 Das Stift Heiligenkreuz

Das Stift Heiligenkreuz und zugehörige Ländereien wurde dem Zisterzienserorden 1133 von Leopold III. (der fromme Markgraf), aus der Dynastie der Babenberger gestiftet. Der Orden der Zisterzienser ist ein „Reformorden“ der Benediktiner, der sich konsequent nach einem einfachen Leben nach dem Regelwerk des heiligen Benedikt orientiert. (vgl. Henckel o. J.: 5)

Der wachsende Reichtum der Klöster, insbesondere von Cluny, und die zunehmend luxuriösere Lebensführung, die Äbte und Prioren sich angewöhnt hatten, führten erneut zu dem Ruf nach klösterlicher Reform. Im Jahr 1098 wurde Cîteaux, ungefähr 24km südlich von Dijon, der strengere Orden der Zisterzienser gegründet.“ (Fleming & Honour, 2000: 346)

Der Name des Ordens leitet sich von der Gründung des Klosters „Cîteaux (lat. Cistercium)“ ab. Unter Bernard de Fontaine, der „heilige Bernhard von Clairvaux“, erfuhr der Orden deutlichen Zuwachs und sollte sich fortan ausbreiten.

„[...] bis zum Tode des hl. Bernhard im Jahre 1153, entstanden in Europa über 400 Cistercienserklöster; eines davon ist Heiligenkreuz.“ (vgl. Henckel o. J.: 5)

Das Stift ist um eine romanisch bis frühgotische Anlage gewachsen und erfuhr bis in das 20. Jhd. mehrfache Veränderungen, Renovierungen und Erweiterungen. Die frühe Anlage umfasst im Wesentlichen die gegen Osten orientierte Stiftkirche mit romanischem, dreischiffigen Langhaus, dessen Chor wenig später einem gotischem Hallenchor weichen sollte, den südlich angrenzenden Kreuzgang mit gotischem Brunnenhaus sowie die über den Kreuzgang erschlossenen Räumlichkeiten.

Neben dem Kreuzgang mit im Süden vorgelagertem Brunnenhaus haben nur die Räume im Klausurostflügel weitgehend ihren mittelalterlichen Zustand bewahrt. (Thome, 2007: 133)

Das Refektorium (Speisesaal) entlang des Westtraktes des Kreuzganges wurde im 17. Jhd. durch einen Anbau, dem Wohngebäude des Abtes, ersetzt.

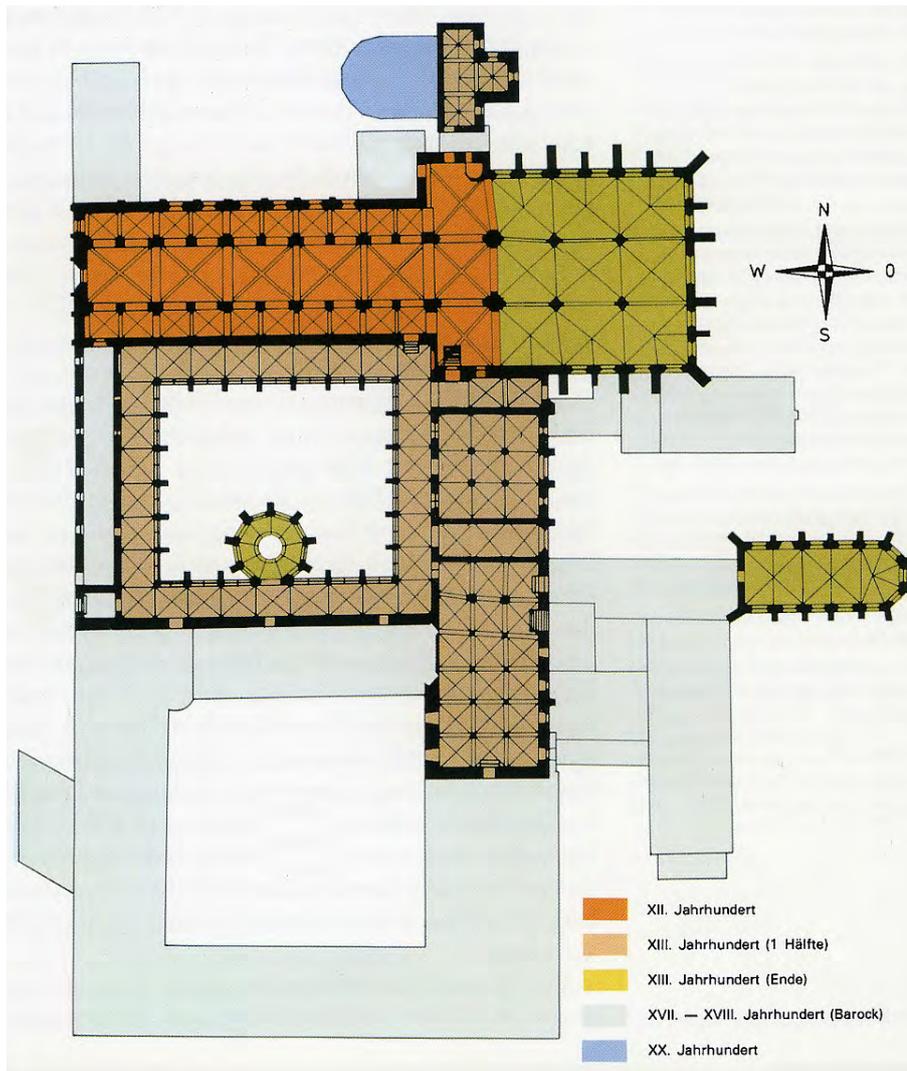


Abb. 5.1-1 Grundriss: Stift Heiligenkreuz – Kreuzgang & Klausurostflügel

Einige Räume des Osttraktes erfuhren eine Umwidmung oder barocke Ausgestaltung. Eine Sakristei im Norden des Osttraktes findet sich heute als barocke „Annakapelle“. Der südlich anschließende quadratische Kapitelsaal ist in neun Joche als Vierstützenraum untergliedert. Der Raum in gotischer Bauweise „[...] ersetzt einen ursprünglich schmalen, vermutlich zweischiffigen Raum“. (*ebd.*: 163) Er ist von Kreuzrippengewölben überspannt, die in spitzen Bögen zusammenlaufen. Der Raum war und ist ein Versammlungsort der Mönche, um Kapitel der Benediktusregeln vorzutragen. Zudem ist er die Grablege der Dynastie der Babenberger mit dem Hochgrab Friedrich II. Im 18. Jhd. wurden Wände und Gewölbe in barocker Manier prunkvoll bemalt.

Südlich des Kapitelsaals schließt das ehemalige Parlatorium an. Als das Schweigegebot reformiert wurde, verlor der Raum seine Funktion und wurde einer Totenkapelle gewidmet, die Anfang des 18. Jhd. nach dem Sinnbild des „Totentanzes“ barock ausgestaltet wurde. Es wird vermutet, dass vom Parlatorium ehemals eine Treppe in das Dormitorium im Obergeschoss führte. (vgl. *ebd.*: 174) Ein Ausgang zum Dormitorium ist nunmehr in barocker Ausgestaltung der Fraterie angeschlossen. Ostdurchgang und Fraterie bilden den Abschluss der über den östlichen Trakt des Kreuzganges erschlossenen Räumlichkeiten. Das Dormitorium ruht auf den Wänden und Säulen der beschriebenen Räume.

## 5.2 Aufnahmeobjekt, Ostdurchgang und Fraterie

Der Ostdurchgang verbindet den Kreuzgang mit den östlichen Klausurbauten. Der Durchgang ist in drei Jochen gegliedert, die von zwei breiten, spitz zulaufenden Gurten begrenzt werden.

Die Nordwand ist heute bis auf eine kleine, mit einer Türe versehene Rundbogennische im mittleren Joch geschlossen. (*ebd.*: 174)

Gegen Süden öffnet sich der Ostdurchgang über drei breite Scheidbögen der Fraterie.



Abb. 5.2-1 Panorama Ostdurchgang und Fraterie

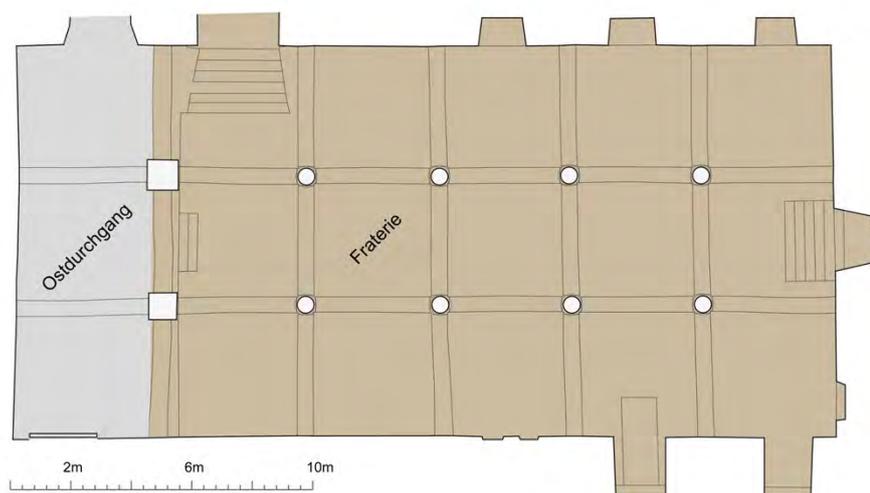
Gurte und Bögen tragen, für die romanische Architektur und die Zisterzienser typische, Kreuzgratgewölbe.

Im Vergleich mit Kreuzgang und Kapitelsaal kennzeichnet die beiden südlichen Räume des Klausurostflügels eine deutliche Reduktion des architektonischen Aufwands. Anstelle der Rippengewölbe mit plastischen Profilformen erscheinen einfache Kreuzgratgewölbe mit schweren, bandartigen Gurt- und Scheidbögen. [...] In der unterschiedlichen Gestaltung macht sich [...] keine zeitliche Differenz, sondern eine bewusste hierarchische Abstufung der Räume innerhalb der Klosteranlage bemerkbar. (*ebd.*: 177)

Die Scheidbögen des Ostdurchganges werden von zwei massiven, quadratischen Pfeilern aufgenommen. Sie sind die einzigen Bögen, die aus Ziegel gemauert und verputzt sind und legen einhergehend mit den beiden quadratischen Pfeilern die Vermutung nahe, dass der Ostdurchgang einst ein vermauerter Verbindungsgang war. *vgl. ebd.: 176)*

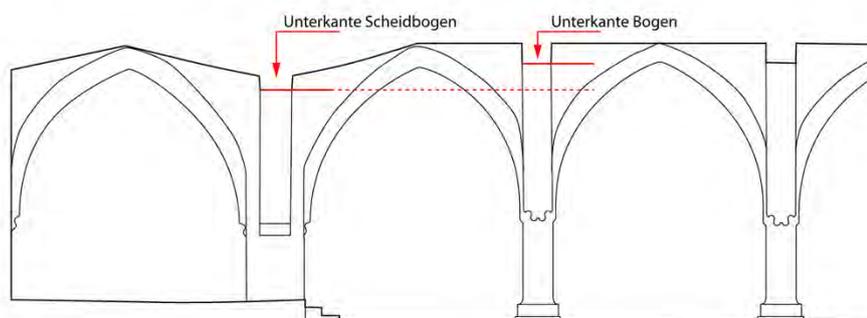
Die Fraterie war wahrscheinlich nicht unmittelbar vom Kreuzgang aus zugänglich. Stattdessen ist eine Türe auf der Nordseite sowie im Bereich des ehemaligen Süddurchganges zu vermuten. *(ebd.: 178)*

Die Ordnung des Ostdurchganges setzt sich in gleicher Gewölbehöhe gegen Süden in drei Reihen über acht Rundpfeiler und fünf Joche in der Fraterie fort.



*Abb. 5.2-2 Grundriss: Ostdurchgang und Fraterie*

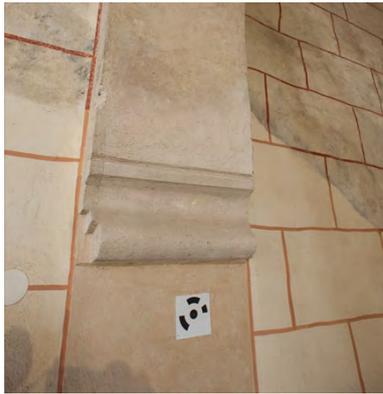
Die Scheidbögen des Ostdurchganges liegen tiefer und bedingen eine asymmetrische Gewölbeform der angrenzenden Joche.



*Abb. 5.2-3 Schnitt: an Scheidbögen und angrenzenden Jochen*

Auf den Rundpfeilern der Fraterie ruhen die Bögen mit einfachem, geschwungenem Abschluss. Lediglich zwei Pfeiler (im Südosten) deuten über einen Halsring eine Kapitellzone an. Einer dieser beiden Rundpfeiler weist zudem einfache Ornamente in

Blattform auf. An den Wänden setzen die Bögen an einfachen mit der Wand bündigen Konsolen mit einem Abschluss aus Wulst und Kehle, an.



*Abb. 5.2-4 Konsolen*



*Abb.5.2-5 Rundpfeiler*



*Abb. 5.2-6 Rundpfeiler mit Halsring*

Über das mittlere Joch des Ostdurchganges wird die Fraterie über zwei Stufen erschlossen. Der Raum liegt etwa 40 Zentimeter tiefer als der Ostdurchgang. Im östlichen Joch südlich des Ostdurchganges laufen die Stufen des barocken Treppenhauses vom Dormitorium in die Fraterie aus. Im Osten öffnet sich die Fraterie in den drei südlichen Jochen mit jeweils einem hoch versetztem Fenster in tiefer, abgeschrägter Laibung. Im Westen finden sich zwei Fensteröffnungen in Nischen. In der nordwestlichen Nische wurde in den 1980er Jahren ein einfacher Treppenabgang zu einem Heizraum, dem Kalefaktorium, frei gelegt. Das Kalefaktorium sollte das Skriptorium beheizen, welches in den westlichen Klausurbauten an die Fraterie grenzt. Die Fraterie diente den Mönchen als Werkstatt und war einst vermutlich durch Holzverschläge in entsprechende Bereiche gegliedert. Im mittleren südlichsten Joch werden die anschließenden Klausurbauten über einen Treppenaufgang mit fünf Stiegen erschlossen. Wände und Gewölbe der Fraterie und des Ostdurchganges sind verputzt. Der strukturlose weiße Putz des Ostdurchganges sollte die photogrammetrische Rekonstruktion dieses Abschnittes erschweren. Im Bereich der Fraterie sind diese Flächen in Form stilisierter Quader bemalt. Diese Fugenmalerei ist ein für die Zisterzienser typisches Stilmittel. In den 1950er Jahren wurde die Fraterie renoviert. Im Zuge dieser Arbeiten wurden insbesondere die Wände und Teile der Gewölbe erneut verputzt und ausgemalt. Folglich mussten weite Bereiche der Fugenmalerei wieder hergestellt werden. Anteilig ist die Fugenmalerei der Gewölbe und vereinzelte Bereiche der Wände jedoch erhalten geblieben. Der ursprüngliche Putz ist aufgrund des Gebrauches von Öllampen verrußt, somit dunkler und grenzt sich deutlich ab. Im südwestlichsten Joch besteht das älteste erhaltene Abbild eines Kreuzes des Stiftes.



*Abb. 5.2-7 Fugenmalerei Kreuz –  
Bereich Origina und saniert*



*Abb. 5.2-8 Variationen im Bodenbelag*

Die Malerei betont zudem die Grate der Gewölbe und veranschaulicht deren ungleichmäßige Ausformung. Im Zuge von Sanierungsmaßnahmen in den 1980er Jahren wurde der Boden erneuert. Die neu verlegten vier Zentimeter starken Ziegel wurden aus Altbeständen aus dem Abbruch von Gebäuden zugekauft. Die Beschaffenheit und der Zustand der Ziegel variieren deutlich. So finden sich engobierte<sup>34</sup> Ziegel mit dunkelbrauner bis schwarzer seidigmatter Oberfläche hin bis zu unversehrtem hellem Material mit scharfen, ungebrochenen Kanten.

### **5.3 Aufnahmebedingungen**

Die Fraterie und der Ostdurchgang bilden einen 26 Meter tiefen Raum, der von 18 Kreuzgratgewölben überspannt wird. Die Gewölbeform, die breiten Gurte und zehn Pfeiler, bedingen viele sichttote Bereiche, die es über einen geschlossenen Bildverband zu überwinden gilt. Die natürliche Belichtung des Raumes erfolgt überwiegend über die fünf Fenster im Süden der Fraterie. Über das Treppenhaus zum Dormitorium und die Ostöffnung des Ostdurchganges fällt schwaches diffuses Licht ein. Eine künstliche Beleuchtung der Gewölbe kann in den nördlichen Jochen der Fraterie zugeschaltet werden, diese ist jedoch

---

<sup>34</sup> Auftrag mineralhaltiger Schlämmen vor dem Brennen

sehr schwach und bedingt aufgrund der komplexen Geometrie etliche Schattenflächen. Zudem zeichnen sich bei der photographischen Aufnahme gegen diese Beleuchtung störende Lichtreflexe ab. Im mittleren Joch des Ostdurchganges und im Zentrum der Fraterie sind zwei Laternen mit gelben Buntglaseinlagen abgehängt. Aufgrund widriger Lichtverhältnisse wurden die Laternen für die Aufnahmen einer (Aufnahmeordnung 1) von drei unterschiedlichen Aufnahmeordnungen zugeschaltet. Die räumliche Tiefe und zahlreichen Bögen und Pfeiler würden bei Einsatz eines Kamerablitzgerätes in von Aufnahme zu Aufnahme unterschiedlichen Licht- und Schattenformationen resultieren, die in diesem Umfang der photogrammetrischen Auswertung und der Ausgabe von möglichst homogen beleuchteten Orthophotos abträglich sind. Die Positionierung entfesselter, freistehender Blitzgeräte oder Dauerlichter hätte sich in entsprechendem Umfang als aufwändig und kostspielig erwiesen. Zudem würden diese Lichter bei Aufnahmen im oder gegen diesen beleuchteten Bereich störende Lichtreflexe verursachen. Um den Aufwand und Kosten zur Aufnahme zu minimieren, wurden die photographischen Aufnahmen somit weitgehend ohne künstliche Beleuchtung gefertigt.

Störenden Einfluss auf die Auswertung sollten die Engoben des Bodenbelages der Fraterie und die Natursteinplatten des Bodens des Ostdurchganges bedeuten. Gegen das Licht (Aufnahmerichtung Süden) reflektieren die seidenmatten Ziegel der Fraterie und die teilweise glatten Steinplatten des Ostdurchganges das Licht und stellen sich somit hell dar, mit dem Licht erscheinen die Steinplatten in ihrer Naturfarbe und die Ziegel als dunkelbraun bis schwarz. Auch der kontrastarme weiße Putz der Gewölbe und Scheidbögen des Ostdurchganges sollte die Qualität der Ergebnisse der Auswertung dieser Bereiche mindern.

### *5.3-1[ABBILDUNG Reflexionen Boden Fraterie]*

Die Photogrammetrie bietet sich zur Erfassung der Räumlichkeiten trotz der widrigen Lichtverhältnisse und komplexen Geometrie des Raumes an, wenngleich diese Bedingungen sehr hohe Ansprüche an Aufnahmeordnung, Kamera und Aufnahme sowie Software zur Auswertung stellen. Alternative Technologien wie der Laserscanner würden aufgrund der Kreuzgratgewölbe zur vollständigen, flächenhaften Aufnahme des Raumes 18 Scan-Stationen beanspruchen. Die Aufnahmedauer aktueller Geräte kann mit etwa zehn bis fünfzehn Minuten veranschlagt werden. Dies schließt den Aufwand des Positionierens des Gerätes und eventueller Referenzkörper nicht mit ein. Zudem konnte der Raum im Rahmen der Aufnahmen zur photogrammetrischen Auswertung in laufendem Betrieb aufgenommen werden. Touristische Besichtigungen und Angehörige des Konvents, die den Raum während der Aufnahmen betreten, bedeuteten keine wesentliche Verzögerung für die Fertigung des

Bildverbandes, können für den Scanvorgang eines Laserscanners jedoch den Abbruch der Aufnahme bedeuten. Das Registrieren, respektive das Zusammenfügen der jeweiligen Aufnahmen aus den Scan-Durchläufen, beansprucht in der Regel weniger Rechenzeit als die photogrammetrische Auswertung, wenngleich der hohe Informationsgehalt eines solchen Modells einen Mehraufwand hinsichtlich der Bereinigung des Selben bedeutet. Die Aufnahme mittels Laserscanner hätte jedenfalls einen deutlichen Mehrkostenaufwand bedeutet.

#### **5.4 Maßgaben der Aufnahme und Auswertung**

Die Aufnahme des Objektes sollte unter möglichst geringem technischen und finanziellen Aufwand in kurzer Zeit, realisiert werden. Die Ergebnisse der Auswertung sollten ein dreidimensionales, ausreichend detailliertes Modell als Vorlage zur weiteren Verarbeitung, wie der Ableitung von Grundrissen und Schnitten, erbringen. Neben der geometrischen Erfassung des Raumes sollte der Bestand der Fugenmalerei dokumentiert werden, was grundsätzlich der Fertigung photographischen Materials bedarf. Die photographische Aufnahme und photogrammetrische Ausarbeitung von Bildplänen (Orthophotos) ist hinsichtlich dieser Aufgabe die zweckmäßigste Methode.

Der Anspruch an die Genauigkeit soll der Önorm A 6250-1 (vgl. 2.4.1) sowie den Empfehlungen des Bundesdenkmalamtes, „Standards der Baudenkmalpflege“ (vgl. 2.4.1) unter Einhaltung einer Abweichung von maximal 10mm entsprechen.

Zur Auswertung der Aufnahmen wurden drei typologisch unterschiedliche Softwarelösungen herangezogen. Eine der Anwendungen ist die webbasierte Lösung Recap360 des Anbieters Autodesk. Diese Anwendung erlaubt die Verarbeitung von maximal 250 Aufnahmen pro Projekt. Um den Aufwand und die Resultate der zur Auswertung angewandten Softwarelösungen auf Basis der selben Photostrecken beurteilen zu können, sind diese auf 250 Aufnahmen begrenzt (vgl. 5.6). Die begrenzte Anzahl der Aufnahmen ist für eine generalisierte Aufnahme des beschriebenen Objektes unter Einhaltung der geforderten Genauigkeit ausreichend, erlaubt die detaillierte Aufnahme und Darstellung von geometrischen Elementen größeren Aufnahmemaßstabes wie etwa den Kapitellzonen der südöstlichen Rundpfeiler, jedoch nicht. Die Kapitellzone des südöstlichen Rundpfeilers wurde beispielhaft als eigenständiges Modell mit größerem Abbildungsmaßstab aufgenommen.



*Abb. 5.4-1 Kapitellzone Rundpfeiler,  
Aufnahmemaßstab Objekt Fraterie*



*Abb. 5.4-2 Kapitellzone Rundpfeiler,  
Aufnahmemaßstab Objekt*

## **5.5 Ausrüstung zur Aufnahme und Auswertung**

Folgender Abschnitt beschreibt die, für die Aufnahme und Auswertung genutzten Gerätschaften.

### **5.5.1 Kamerasystem und Hilfsmittel zur Aufnahme**

Zur photographischen Aufnahme kam die in *Abschnitt 2.6* ausführlich beschriebene Digitalkamera Nikon D700 (im Kleinbildformat) und ein Weitwinkelobjektiv mit fester Brennweite von 20 Millimeter (Nikkor AF 20mm 1:2,8D) und einem diagonalen Bildwinkel von etwa 94 Grad zum Einsatz. Die Kamera wurde auf einem massiven Stativ (Manfrotto 028b) mit einem drei Wege Neiger (Stativkopf, der über drei Achsen justiert werden kann) gelagert. Das Stativ verfügt über eine Dosenlibelle und lässt sich mittels eines einfachen Mechanismus leicht horizontieren. Der Stativkopf verfügt über zwei Libellen und ermöglicht ein genaues Ausrichten der Kamera über eine Winkelskala pro Achse. Zudem kann die Arbeitshöhe mittels einer Kurbelmittelsäule um 47 Zentimeter verstellt werden. Die Aufnahmen bedurften langer Belichtungszeiten (bis zu acht Sekunden). Ein solides schweres Stativ ermöglicht einen raschen Standortwechsel bei schneller Stabilisierung der Kamera. Die Kamera wurde aufgrund der langen Belichtungszeiten per Fernauslöser bedient. Das Auslösen der Kamera über den kameraeigenen Auslöser verursacht Bewegung, welche bei langen Belichtungszeiten in unscharfen Aufnahmen resultiert.



*Abb. 5.5-1 Kamera und Stativ Vorort*

### **5.5.2 Laser-Distanzmessgerät**

Um die verorteten Messmarken ein zu messen, wurde ein Laser-Distanzmessgerätes (vgl. 2.3.4) des Herstellers Bosch, Typ PLR50, und eine Reflektorkarte eingesetzt. Die Messarbeiten wurden unter Assistenz einer zweiten Person wesentlich erleichtert und der zeitliche Aufwand deutlich reduziert.

### **5.5.3 Computersystem zur photogrammetrischen Auswertung**

Die Leistungsangaben des Computersystems zur photogrammetrischen Auswertung sind in Bezug auf die Angaben zu den Rechenzeiten der Auswertung mittels dreier unterschiedlicher Software-Lösungen (vgl. 5.7) relevant. Die Auswertung erfolgte auf einem Mac Pro 4.1 Computersystem. Das System verfügt über 12 Gigabyte Arbeitsspeicher, zwei Intel Xeon E5520 Prozessoren mit je vier Prozessorkernen mit einer Taktfrequenz von 2,26GHz sowie eine ATI Radeon HD 5870 Grafikkarte mit einem Gigabyte Grafikspeicher. Das System entspricht nicht dem Stand der Technik, lässt sich in Multiprozessor-Anwendungen (die untersuchten Software-Lösungen entsprechen solchen Anwendungen) jedoch mit aktuellen (Stand Ende 2014) günstigen bis mittelpreisigen Workstations oder leistungsstarken Laptops

vergleichen<sup>35</sup>. Das System läuft nativ unter dem Betriebssystem Mac OSX 10.9.5 sowie Windows 7 Professional 64bit (Version 6.1 Service Pack1) unter Bootcamp<sup>36</sup>.

## 5.6 Aufnahme und Aufnahmeordnung

Die Fraterie erweist sich aufgrund der widrigen Lichtverhältnisse, der räumlichen Tiefe und der vielen sichttoten Bereiche, die aus den Pfeilern, Bögen sowie der Kreuzgratgewölben resultieren, als kompliziertes Aufnahmeobjekt. Die Aufnahmen müssen im Umfang und Qualität der photogrammetrischen Auswertung genügen. Der Umfang wird maßgeblich über die Aufnahmeordnung bestimmt. Die photographische Aufnahme muss den Lichtverhältnissen und der räumlichen Tiefe hinsichtlich der Bildschärfe gerecht werden. Der südliche Teil der Fraterie wird über drei Fenster im Osten und zwei im Westen beleuchtet. Im Norden dringt durch den Ostdurchgang und das Stiegenhaus zum Dormitorium nur wenig, diffuses Licht ein. Abbildung 5.6-1 stellt die Lichtverteilung des Raumes anhand der Untersicht der Gewölbe dar.

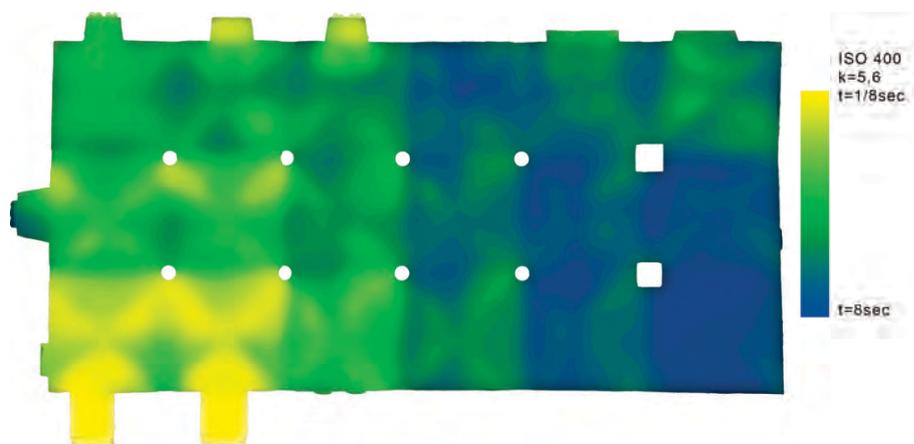


Abb. 5.6-1 Lichtverteilung Fraterie, Gewölbeuntersicht

Der Motivkontrast ist bei Aufnahmen in Nord-Süd-Richtung somit sehr hoch. Um sehr lange Belichtungszeiten zu vermeiden, wurde die Kamera auf eine Lichtempfindlichkeit von ISO 400 gestellt. Das Kameramodell Nikon D700 ist aufgrund seiner großen Photodioden (Pixel) für Aufnahmen unter den angeführten Bedingungen sehr gut geeignet. Ein ISO-Wert von 400 bedeutet keinen wesentlichen Qualitätsverlust und ist hinsichtlich des Bildrauschens durch Abwärme aus Langzeitbelichtungen ein guter Kompromiss. Die Optik wurde auf eine Arbeitsblende mit einem Blendenwert von 5,6 gestellt. Der Fokus wurde auf die hyperfokale

<sup>35</sup> Ein Benchmark Test mittels der Anwendung Geekbench ergab einen „Multi-Core Score“ von 14137

<sup>36</sup> Bootcamp ist eine Software des Herstellers Apple und ermöglicht die Installation von MS Windows auf einem Mac-Computersystem mit Intel Prozessor

Distanz (vgl. 4.5.3) von 2,4 Meter gestellt. Aus dieser Einstellung ergibt sich ein Schärfebereich mit einem Nahpunkt von 1,2 Meter bis „unendlich“. Aus dieser Einstellung folgt, dass die Kamera keine Objekte näher als 1,2 Meter ablichten sollte. Der Autofokus wurde deaktiviert, um diese Einstellung über die gesamte Photostrecke beizubehalten. Je nach Orientierung und Position der Kamera ergaben sich Belichtungszeiten zwischen  $\frac{1}{8}$  bis 8 Sekunden. Der Dynamikumfang der Kamera reicht aus, um die Aufnahmen mit gewisser Gewichtung an den nächst gelegenen baulichen Elementen entsprechend auszuführen. Die HDR-Technologie (vgl. 4.13) böte sich bei einem solchen Motivkontrast bereits an, würde jedoch einen deutlichen Mehraufwand bedeuten. Dem Architekten und Bauingenieur ist diese Methode nur zu empfehlen, wenn der Motivkontrast dies unbedingt erfordert. Bei langen Belichtungszeiten ist das Okular einer Spiegelreflexkamera zu verschließen, um zu verhindern, dass Licht auf diesem Weg durch den teiltransparenten Spiegel auf den Sensor einfällt. Die Kamera Nikon D700 verfügt hierzu über einen mechanischen Verschluss des Okulars. Die Aufnahmen wurden über die Anzeige des Histogramms beurteilt und gegebenenfalls korrigiert.

Die günstigste Aufnahmeordnung, um einen leeren geschlossenen Raum rechteckigen Grundrisses zu erfassen, ergibt sich, indem der räumlichen Begrenzung (den Wänden) gefolgt wird, um die gegenüberliegende Fläche mit einer dem Aufnahmemaßstab entsprechenden Versatz nach dem Normalfall zu erfassen. Im Bereich der Ecken eines solchen Raumes können die Aufnahmen auch gegen das Zentrum des Raumes näherungsweise diagonal orientiert werden.

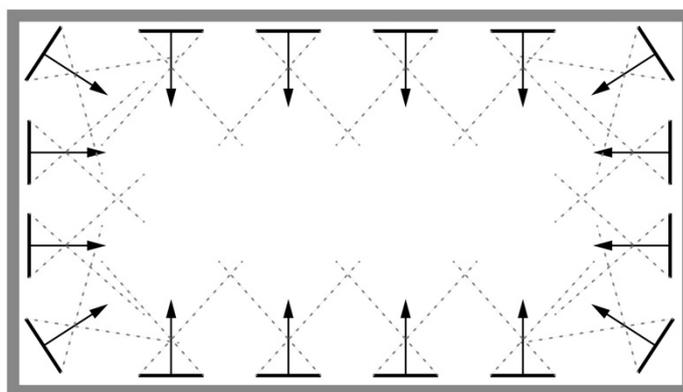


Abb. 5.6-2 Aufnahmeordnung Innenraum Allgemein

Reicht die Bilddiagonale der verwendeten Optik nicht aus, um Boden und Decke mit der gegenüberliegenden vertikalen Fläche zu erfassen, sofern dies erwünscht oder erforderlich

ist, sollten die Aufnahmen im Hochformat erfolgen. Um eine Bildüberschneidung von 60-80% zu realisieren, steigt die Anzahl der Aufnahmen bei dieser Kameraorientierung.



*Abb. 5.6-3 Vergleich Raum Quer und Hochformat*

Die zehn Pfeiler des Aufnahmeobjektes, der Fraterie, stören eine solche einfache Ordnung, da sich aufgrund der Pfeiler für jede Aufnahme sichttote Bereiche ergeben. Zudem muss jeder Pfeiler selbst aus mindestens vier Richtungen über mehrere Aufnahmen erfasst werden, um rekonstruiert werden zu können. Nicht zuletzt galt es, die Kreuzgratgewölbe sowie die Flanken und Untersicht der Bögen zu erfassen. Um die Anzahl an Aufnahmen möglichst gering zu halten, wurde zur Aufnahme eine Weitwinkel-Optik mit einer Brennweite von 20 Millimeter gewählt. Die Aufnahmen erfolgten im Hochformat, um auch den Boden und die Gewölbe anteilig erfassen zu können. Das Objekt wurde schließlich über drei unterschiedliche Aufnahmeordnungen erfasst. Vor der photographischen Aufnahme wurden Messmarken versetzt und eingemessen. Die Marken wurden als 12-Bit kodierte Marken mit einem Durchmesser von zehn Zentimeter mit der Software Photoscan Pro erstellt, auf starkem Papier gedruckt, beschnitten und Vorort mit doppelseitigem Klebeband befestigt. Die Marken wurden verhältnismäßig groß gefertigt, um sie auch auf Aufnahmen aus größerer Entfernung erkenntlich darstellen zu können. Die Software Photoscan Pro registriert kodierte Marken automatisiert und sehr präzise und nutzt diese zudem zur Analyse des Bildverbandes. Je mehr Marken auf einer Aufnahme identifiziert werden können, umso genauer erfolgt die äußere Orientierung der Kamerastandorte. Die Position der Marken wurde auf einer Arbeitsskizze vermerkt und die Strecken zwischen den Messmarken mit einem Laser-Distanzmessgerät abgenommen und in die Arbeitsskizze übertragen. Unter





Abb. 5.6.1-1 Aufnahmeordnung 1

In den Achsen der Pfeiler wurde diese Ordnung in beide Richtungen des Raumes fortgesetzt. Dabei musste darauf geachtet werden, die Kamera in der Nähe der Pfeiler derart zu positionieren, dass die Bögen, die an den Pfeilern ansetzten, nicht in das Bildfeld der Aufnahme gerieten. Die Bögen wären in einer kritisch nahen Aufnahmeentfernung unscharf erfasst worden und hätten die Abbildung der räumlichen Tiefe beschnitten. Die gleiche Vorgangsweise wurde über die Breite des Raumes fortgesetzt. Aus dieser Ordnung ergeben sich sechs Achsen in der Länge (Norden-Süden) des Raumes und zwölf Achsen über die Breite (Westen-Osten). Zusätzliche Aufnahmen wurden im Bereich der westlichen Nischen gefertigt.

Die Dauer der photographischen Abbildung der Photostrecke über diese Aufnahmeordnung betrug 92 Minuten.

Es ist vorweg zu nehmen, dass diese Aufnahmeordnung die besten Ergebnisse erbracht hat.

### 5.6.2 Aufnahmeordnung 2

Die Aufnahmeordnung 2 gleicht der Aufnahmeordnung 1 zumal der Raum über dieselben sechs Achsen in Längsrichtung (Norden-Süden) erfasst wurde. Über die Querachse (Westen-Osten) wurden nur die nördlichsten und südlichsten Jochen aufgenommen. Die Aufnahmen über die zehn Querachsen des Raumes (vgl. Aufnahmeordnung 1) wurden durch eine „Korridor Aufnahmeordnung“ ersetzt.

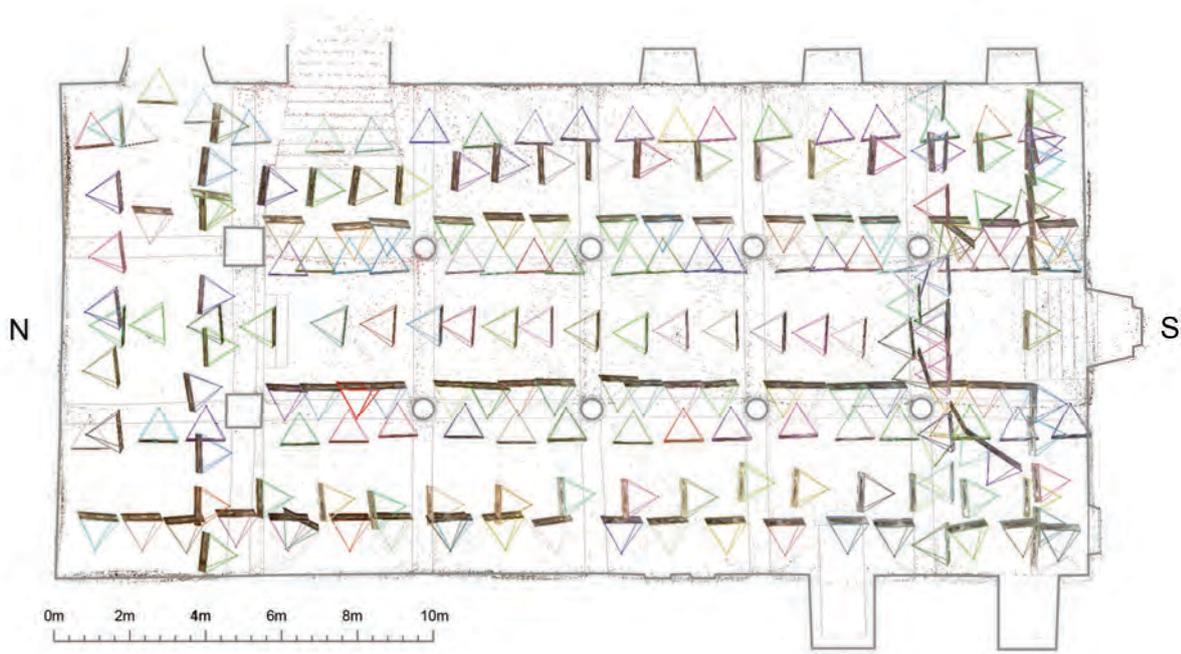


Abb. 5.6.2 Aufnahmeordnung 2

Diese Ordnung ist im Regelfall zu vermeiden (vgl. 4.15), da sich aus Ebenen in Aufnahme­richtung schleifende Strahlenschnitte ergeben, sofern diese Ebenen je nach Aufnahmewinkel (Brennweite) nahe dem Augpunkt der Aufnahme liegen. Überdies verändern sich die Winkel zwischen Objektpunkten auf Ebenen parallel zur Bildebene von Aufnahme zu Aufnahme nur geringfügig. Da im Rahmen dieser Objektaufnahme ein Weitwinkelobjektiv Verwendung fand und der Raum verhältnismäßig breit ist, wurde diese Ordnung dennoch untersucht. Dies ist damit zu begründen, dass die Ordnung günstig erschien, um die Flächen der Gewölbe abzubilden, da sich, aufgrund des breiten Blickfeldes, mehrere Joche über die räumliche Tiefe ablichten lassen. Zudem erlaubt diese einfache Aufnahmeordnung ein beschleunigtes Arbeiten. Die Aufnahmen dieses Bildverbandes beanspruchten 50 Minuten.

### 5.6.3 Aufnahmeordnung 3

Die dritte Aufnahmeordnung umfasst 400 Aufnahmen und sollte einer möglichst dichten Rekonstruktion des Raumes gerecht werden. Jedes Joch wird dabei wie ein geschlossener Raum über Aufnahmen, die sich gegen den Mittelpunkt des Joches orientieren aufgenommen.



Abb. 5.6.3 Aufnahmeordnung 3

Diese Aufnahmen erfolgten pro Standort über zwei höhenversetzte und über den Horizont verschwenkte Aufnahmepaare. Eine Aufnahme ist gegen das Gewölbe gerichtet, die zweite Aufnahme aus erhöhter Position gegen den Boden. Daraus ergeben sich bereits 16 Aufnahmen pro Joch. Um die Begrenzung der nördlichen und südlichen Jochen zu erfassen, wurde diese Ordnung durch Aufnahmen der Aufnahmeordnung 1 entsprechend ergänzt. Zudem wurden die Gewölbe nach dem Normalfall mit horizontaler Bildebene mit je drei Aufnahmen je Joch erfasst. Die übrigen Aufnahmen ergeben sich aus detaillierten Aufnahmen der Nischen im Westen und Osten sowie der Treppen. Der Übersicht halber sind diese zusätzlichen Aufnahmen in *Abbildung 5.6.3* ausgeblendet. Die Aufnahme dieses Bildverbandes beanspruchte 119 Minuten.

#### 5.6.4 Gegenüberstellung der Aufnahmeordnungen

	Anzahl der Aufnahmen	Dauer der Aufnahme	Mesmarken
<b>Aufnahmeordnung 1</b>	250	92 Minuten	56
<b>Aufnahmeordnung 2</b>	250	50 Minuten	52
<b>Aufnahmeordnung 3</b>	400	119 Minuten	52

Tabelle 9: Gegenüberstellung der Aufnahmeordnungen, Aufnahmeobjekt Fraterie

## **5.7 Software zur photogrammetrischen Auswertung**

Zur Auswertung der Bildverbände wurden drei unterschiedliche Applikationen eingesetzt. Diese unterscheiden sich im Funktionsumfang, Produkten der Auswertung, Lizenzmodell, Plattform und Kosten.

### **5.7.1 Agisoft Photoscan Pro**

Die Software Photoscan Pro des Entwicklers Agisoft bietet den größten Funktionsumfang (vgl. *Tabelle 10*) bei den höchsten Anschaffungskosten unter den drei angewandten Software-Lösungen. Die Software ist überdies im Stande, Aufnahmen von Multispektral-Kamerasystemen zu verarbeiten sowie Modelle aus Aufnahmesequenzen über eine Zeitleiste zu rekonstruieren und somit vermarktete Objekte in Bewegung zu verfolgen. Diese Funktion ermöglicht die vierdimensionale Auswertung von Simulationen und Prozessen. Aufnahmeobjekte können als georeferenzierte<sup>37</sup> Modelle in Form von Punktwolken oder als texturierten Flächenmodellen ausgegeben werden. Die Software erlaubt die Ausarbeitung beliebig orientierter Orthophotos. Das Ermitteln von Längen- und Flächenmaßen sowie Volumina ist im Rahmen dieser Anwendung möglich. Die Applikation wird für die Betriebssysteme Mac OSX und Microsoft Windows angeboten und wurde im Rahmen dieser Arbeit in der Version 1.0.4 unter Mac OSX 10.9.5 eingesetzt.

### **5.7.2 Autodesk Recap 360**

Das Webservice / SaaS (Software as a Service) Recap 360 des renommierten Entwicklers Autodesk basiert auf einem monatlich kündbaren Lizenzmodell. Autodesk bietet zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit drei Applikationen zur photogrammetrischen Auswertung und Generierung von texturierten Flächenmodellen an, wobei sich die Anwendung Memento noch im Entwicklungsstadium befindet und im Frühjahr 2015 offiziell angeboten werden soll. Alle Anwendungen übermitteln das photographische Material zur Rekonstruktion an einen Server des Entwicklers. Recap 360 positioniert sich nahe dem Produkt Recap, einer professionellen Lösung zur Verarbeitung von Modellen aus Laserscans und Rekonstruktionen aus photogrammetrischer Auswertung. Der Funktionsumfang ist deutlich begrenzt (vgl. *Tabelle 9*), das Service arbeitet hochgradig automatisiert. Die Auswertung erfolgt nicht lokal, sondern auf Servern des Anbieters und erschließt die photogrammetrische Auswertung plattformübergreifend auch für Anwender mit leistungsschwachen oder mobilen Geräten. Das Projekt wird über einen Webbrowser

---

<sup>37</sup> Angabe zur Transformation in übergeordnete Koordinatensystemen

angelegt, die photographischen Aufnahmen auf einen Server übertragen und gegebenenfalls weiter bearbeitet. Autodesk empfiehlt hierzu den Webbrowser „Chrome“ oder andere WebGL<sup>38</sup> kompatible Browser. Microsoft Internet Explorer unterstützt diese Technologie mit Einschränkungen ab Version IE11. Die Ergebnisse können nach Abschluss der Auswertung über ein in geometrischer Auflösung vereinfachtes Modell mittels einer dreidimensionalen, interaktiven Voransicht geprüft werden. Entsprechen die Ergebnisse, können die hochaufgelösten Modelle der Auswertung in *proprietären* Dateiformaten oder dem offenen Dateiformat „obj“ geladen werden. Autodesk bietet seine Anwendungen für Studenten einschlägiger Fachrichtungen zum Gebrauch im Rahmen des Studiums kostenlos an.

---

<sup>38</sup> Web Graphics Library, ermöglicht kompatiblen Webbrowsern eine beschleunigte, grafische Darstellung dreidimensionaler Objekte

### 5.7.3 VisualSFM

Die Software VisualSFM des Softwareentwicklers Changchang Wu ist für den nicht kommerziellen, privaten und akademischen Gebrauch kostenlos. Im Rahmen einer kommerziellen Anwendung ist der Entwickler zu kontaktieren. Das Programm beschränkt sich im Umfang auf die Merkmalsanalyse (vgl. 3.3) und Bündelausgleichung zur Orientierung der Kamerapositionen. Die Ergebnisse umfassen eine „Sparse Pointcloud“, die Koordinaten der Kamerapositionen und die Ausgabe entzerrter Aufnahmen. Um eine dichte Punktwolke zu rekonstruieren, kann das Programm CMVS von Yasutaka Furukawa modular integriert werden. Alternativ kann auf kompatible Anwendungen wie CMP-MVS von Michal Jancosek oder SURE von Konrad Wenzel zurück gegriffen werden. Letztere Anwendungen können aus den Ergebnissen aus VisualSFM zudem texturierte Flächenmodelle generieren. Diese beiden Applikationen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht angewendet. Die Software CMP-MVS nutzt eine hardwareabhängige Technologie (CUDA)<sup>39</sup>, die das zur Auswertung eingesetzte System nicht unterstützt. Eine weitere Alternative, um Flächenmodelle aus den Ergebnissen von VisualSFM und CMVS zu generieren, ist die „open source“ Anwendung „Meshlab“. Auch für diesen Verarbeitungsweg stellt VisualSFM und CMVS kompatible Datenformate bereit. Diese Software wurde bereits zur Auswertung des Modells zur Untersuchung der Genauigkeit (vgl. 2.6.3) angewandt. Die Software VisualSFM kann auf Linux, Mac OSX und Windows Systemen installiert werden. Es ist anzumerken, dass die Anwendung auf dem in Abschnitt 5.5.3, beschriebenen System unter OSX nicht erfolgreich installiert werden konnte. Das Programm wurde infolgedessen unter Windows 7 installiert und ausgeführt.

### 5.7.4 Gegenüberstellung der Software zur photogrammetrischen Auswertung

Tabelle 10 stellt die beschriebenen Applikationen im Funktionsumfang gegenüber (Stand Ende 2014). Der Vergleich erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und umfasst nur Funktionen, die im Rahmen dieser Arbeit genutzt oder geprüft wurden.

---

<sup>39</sup> CUDA (Compute Unified Device Architecture) ermöglicht Prozesse auf den GPU (Grafikprozessor) einer Grafikkarte auszulagern. Diese Technologie erfordert eine Grafikkarte des Herstellers Nvidia

<b>Funktion</b>	<b>Photoscan Pro v 1.0.4</b>	<b>Recap360 v 2014</b>	<b>VisualSfm v 0.5.25</b>
Meßmarken erstellen	✓	–	–
Aufnahmen Import, Bildformate	jpg,png,tif,bmp, exr,pgm,mpo,seq	jpg	jpg
Kamera Kalibration	Agisoft Lens	–	–
Angabe / Import eines kalibrierten Kameraprofiles	✓	–	✓
Automatisiertes Registrieren von Marken	✓	–	–
Manuelles setzen von Markern	✓	✓	✓
Angabe von Passpunkten / GCP	✓	✓	✓
Angabe von Distanzen / Streckenmaßen	✓	✓	–
Sparse Pointcloud	✓	–	✓
Dichte der Punktwolke bestimmen	✓	–	–
Sparse Pointcloud exportieren	✓	–	✓
Korrektur ausgewählter Kamerapositionen	✓	–	✓
Kameraausrichtung optimieren	✓	–	–
Dense Pointcloud	✓	–	✓
Dichte der Punktwolke bestimmen	✓	–	–
Dense Pointcloud exportieren	✓	als Punkte des Mesh	✓
Dichte Punktwolke reduzieren	✓	–	–
Parametrisches Bereinigen der Punktwolke	✓	–	–
Bereinigen der Punktwolke durch Selektion	✓	–	nur dichte Punktwolke
Modellbereiche zur weiteren Verarbeitung definieren	✓	–	–
Punktwolke, Klassen definieren	✓	–	–
Flächenmodell / Mesh	✓	automatisiert	–
Dichte des Flächenmodells bestimmen	✓	–	–
Mesh exportieren	✓	✓	–
Mesh reduzieren	✓	–	–
Textur generieren	✓	automatisiert	–
Orthophoto erstellen	✓	automatisiert	–
Entzerrte Aufnahmen exportieren	✓	–	✓
Vordefinierte Ansichten	✓	–	–
Stereoskopische Ansicht	✓	–	–
Feature Points anhand Aufnahmen anzeigen	✓	–	✓
Direkter Upload Link	sketchfab, verold	Autodesk360, Recap Gallery	–

*Tabelle 10: Funktionsumfanges der Anwendungen Photoscan Pro, Recap 360 und VisualSFM*

## **5.8 Prozess der photogrammetrischen Auswertung**

Die photographischen Aufnahmen des Objektes der Fraterie (vgl. 5.6) wurden in einem RAW-Bildformat (vgl. 4.12) erstellt. Dieses Format speichert die digitale Aufnahme, ohne weiterer Verarbeitung durch die Kamera-Software, mit der maximalen Sampling- oder Bittiefe des Analog-Digital-Wandlers und garantiert somit die Wiedergabe des

größtmöglichen Tonwertumfang (Darstellung von Schwarz bis Weiß), den die Kamera erfassen kann. Um dieses Dateiformat in standardisierte Bildformate zu überführen, bedarf es der Bearbeitung durch ein Bildbearbeitungsprogramm, zumeist durch sogenannte RAW-Konverter. Solche Applikationen erlauben diverse Korrekturen am photographischen Material. Im Rahmen der Aufbereitung des Bildmaterials zur photogrammetrischen Auswertung der Fraterie wurden folgende Maßnahmen ergriffen: Durch die Fensteröffnungen im Süden der Fraterie fällt verhältnismäßig kaltes (Lichttemperatur) natürliches Licht ein. Wände und Boden der Fraterie sind in warmen Farben ausgestaltet. Das an den Oberflächen reflektierte Licht dringt zunehmend diffus und warm in den Raum ein. Die Farbtemperatur des Lichtes verändert sich folglich über die Tiefe des Raumes. Somit ist es erforderlich, die Farbtemperatur über den Weißabgleich über den Bildverband anzugleichen. Weiteres wurden die Schatten (dunkle Bildbereiche) geringfügig angehoben und Lichter (sehr helle Bildbereiche) gesenkt. Aus dieser Praxis resultiert ein gewisser Verlust an Kontrast über den gesamten Tonwertumfang, die lokale Zeichnung von hellen und dunklen Flächen wird jedoch deutlicher. Schließlich wurde die Aufnahme moderat geschärft. Das digitale Schärfen eines Bildes ist erforderlich und erfolgt generell über die Bildverarbeitung der Kamera. Aufnahmen im RAW-Format erfahren diesen Prozess über die Bildverarbeitung der Kamera nicht, das Schärfen erfolgt erst über die Ausarbeitung durch entsprechende Software. Auf eine Reduktion des Bildrauschens wurde zugunsten der detaillierten Darstellung verzichtet, zumal das Bildmaterial keine deutlichen Störungen aufwies.

Die Software-Lösungen Recap360 und VisualSFM ermöglichen lediglich den Import von 8 Bit Grafiken (Tonwertumfang von  $2^8 = 256$  Stufen) im Dateiformat „jpg“. Die Anwendung Photoscan Pro erlaubt den Import von Dateiformaten mit einer Bittiefe (vgl. 4.12) von 16 Bit (Tonwertumfang von 65.536 Stufen) oder mehr (32 bit, Open exr). Um die Produkte der drei Software-Lösungen gerecht gegenüber stellen zu können, sollten sich alle Auswertungsverfahren auf dasselbe Bildmaterial stützen. Die Aufnahmen wurden somit in voller Auflösung mit bestmöglicher Qualität im Dateiformat „jpg“ ausgegeben.

### **5.8.1 Die photogrammetrische Auswertung mit Photoscan Pro**

Die Anwendung Photoscan Pro ermöglicht das Erstellen und automatisierte registrieren von Messmarken. Je nach Anzahl erforderlicher Marken generiert das Programm Druckbögen von 12 oder 16 Bit kodierten Marken. Diese werden Vorort am Objekt platziert und eingemessen.

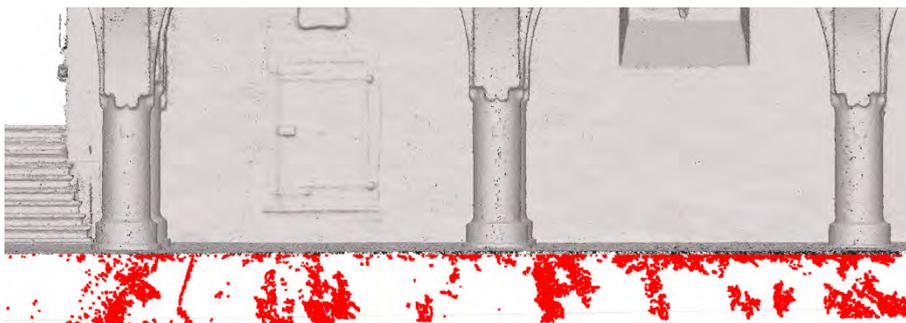


*Abb. 5.8.1-1 Verortete Messmarken*

Nach dem Laden der Aufnahmen kann das Bildmaterial auf seine Qualität geprüft werden, um unscharfe Aufnahmen aus dem Verband zu entfernen. Sind Bereiche der photographischen Aufnahme von der Rekonstruktion auszugrenzen, können diese vorab maskiert werden.

Eine weitere Analyse des Bildmaterials dient der Registrierung der Messmarken. Diese werden nach Abschluss der Analyse gelistet. Wurden die Marken beispielsweise mittels eines Tachymeters (*vgl. 2.3.6*) als Passpunkte oder GCP (Ground Control Points) eingemessen, können die ermittelten Koordinaten auf die registrierten Punkte übertragen werden. In diesem Fall kann dem Projekt auch ein übergeordnetes Koordinatensystem zugeschrieben werden. Alternativ können zwischen beliebigen Punkten Strecken definiert und korrespondierende Längenmaße eingepflegt werden. Diese Praxis wurde im Rahmen dieses Projektes ausgeführt (*vgl. 5.6*). Im Umfang des Software-Paketes ist die Applikation Agisoft Lens enthalten. Mithilfe dieser Anwendung wurde ein kalibriertes Kameraprofil für das eingesetzte Kamerasystem erstellt. Dieses Profil wurde im weiteren Verlauf in der Software Photoscan Pro geladen. Alternativ können die zehn Parameter der inneren Orientierung auch aus anderen Programmen wie PhotoModeler, CalibCam oder CalCam importiert oder manuell eingetragen werden. Optional können diese Daten als verbindlich definiert und „fixiert“ werden, andernfalls dienen sie als Ausgangswert der Bestimmung der inneren Orientierung und werden im Rahmen der Simultankalibrierung infolge eines „Optimierungsprozesses“ angepasst. Bei umfangreichen Projekten oder Objekten, die mit unterschiedlichen Kamerasystemen oder unterschiedlichem Aufnahmemaßstab erfasst wurden, können diese Aufnahmen in Gruppen sortiert und gesondert ausgewertet werden. Jeder Gruppe kann ein eigenes kalibriertes Profil zugeschrieben werden. Die Ergebnisse aus

der Rekonstruktion der Objekte der Gruppen können schließlich kombiniert und zu einem Objekt zusammengeführt werden. Die photogrammetrische Auswertung beginnt mit der Merkmalsanalyse und der „Ausrichtung der Aufnahmen“. Je nach Aufnahmeordnung und Objekt können zur Analyse des Bildmaterials Filter gesetzt werden. So können mehrere Aufnahmen infolge einer der Aufnahmeordnung und des Objekts gerechten Vorauswahl zur Analyse bestimmt werden oder eine automatisierte generische Auswahl von Bildpaaren ausgeführt werden. Letztere Option gibt einen in der Bildauflösung reduzierten Satz der importierten Aufnahmen aus, der anschließend auf Zusammengehörigkeit der einzelnen Aufnahmen analysiert wird. Hierbei werden die Aufnahmen über den sich überschneidenden Bildanteil gruppiert. Merkmalspunkte werden infolge im Umfang dieser generischen Gruppen am Original, dem nicht skalierten Bildmaterial, analysiert. Im Rahmen der Auswertung der Aufnahmen der Fraterie wurde auf die Anwendung dieser Filter verzichtet, um ein möglichst dichtes räumliches Netzwerk an Strahlen zu realisieren. Resultat der „Ausrichtung der Aufnahmen“ sind die ermittelten Kamerapositionen sowie deren Orientierung (äussere Orientierung), die Daten zur inneren Orientierung aus der Simultankalibrierung und eine „Sparse Pointcloud“, eine Punktwolke mit geringer Dichte. Entsprechen einzelne Kamerapositionen augenscheinlich nicht, können diese zurückgesetzt und neu berechnet werden. Merkmalspunkte lassen sich anhand des Bildmaterials visualisieren. Diese Funktion ist nützlich, um kritische Bereiche, wie homogene oder reflektive Oberflächen, zu prüfen und gegebenenfalls Maßnahmen, wie das manuelle setzen von Markern, für eine verbesserte Verarbeitung zu ergreifen. Die Genauigkeit des Modelles aus diesem Arbeitsschritt kann vor der Operation gewählt werden. Je genauer das Ergebnis, umso länger dauert die Rekonstruktion an. Es ist zu empfehlen, diesen Prozess mit möglichst hoher Genauigkeit auszuführen, da folgende Arbeitsschritte und Produkte auf diesem Datenmodell aufbauen. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Einstellung „hohe Genauigkeit“ gewählt. Die Punktwolke muss gegebenenfalls bereinigt werden.



*Abb. 5.8.1-2 Bereinigung von Ausreißern*

Hierzu bietet die Anwendung zwei Kriterien zur „sukzessiven Auswahl“. Punkte können nach einem Grenzwert über Reprojektionsfehler, Rekonstruktionsfehler oder eine Mindestanzahl an Aufnahmen, auf denen sie registriert wurden, gefiltert werden. Um Ausreißer (Punkte, die offensichtlich fehlerhaft rekonstruiert wurden) oder Objektpunkte außerhalb des zu untersuchenden Objektes zu löschen, stehen Werkzeuge zur manuellen Selektion zur Verfügung. Wurden zur Rekonstruktion keine Passpunkte definiert und unterscheiden sich die Kamerapositionen in allen Achsen deutlich voneinander, ist es sinnvoll, das Modell mittels einfacher Transformations-Werkzeuge zu orientieren. Diese Transformation ist nach jedem Arbeitsschritt der Auswertung möglich. Eine präzise Transformation eines nicht orientierten Objektes kann in anderen Applikationen, beispielsweise Meshlab, ausgeführt werden. Auf Basis der „Sparse Pointcloud“ wird im folgenden Verfahren eine dichte Punktwolke konstruiert. Dieser Prozess wird über Angaben zur Qualität des Produktes definiert. Die höchste Stufe (Ultra High Quality) bedeutet die Verarbeitung des Bildmaterials in originaler Auflösung. Jede Minderung des Wertes dieses Verarbeitungsprozesses bedeutet eine Reduktion des Bildmaterials um den Faktor vier (vgl. Agisoft LLC, 2014). Der Ablauf der Rekonstruktion einer dichten Punktwolke bedeutet gegenüber den vorangegangenen Prozessen in der Regel einen deutlichen zeitlichen Mehraufwand. Zur Rekonstruktion der dichten Punktwolke wurde die zweithöchste Qualitätsstufe gewählt. Je nach Verwendungszweck ist es sinnvoll, diesen Verarbeitungsschritt über die Angabe zur Dichte der Punktwolke zu regulieren. Die dichte Punktwolke muss nach der Rekonstruktion gegebenenfalls abermals bereinigt werden. Eine an Parameter gebundene Bereinigung kann an dieser Stelle nicht erfolgen. Die Punkte müssen unter Zuhilfenahme der Auswahlwerkzeuge selektiert und gelöscht werden. Im darauffolgenden Arbeitsschritt wird ein Mesh oder Flächenmodell rekonstruiert.

## Arbeitsablauf PhotoscanPro

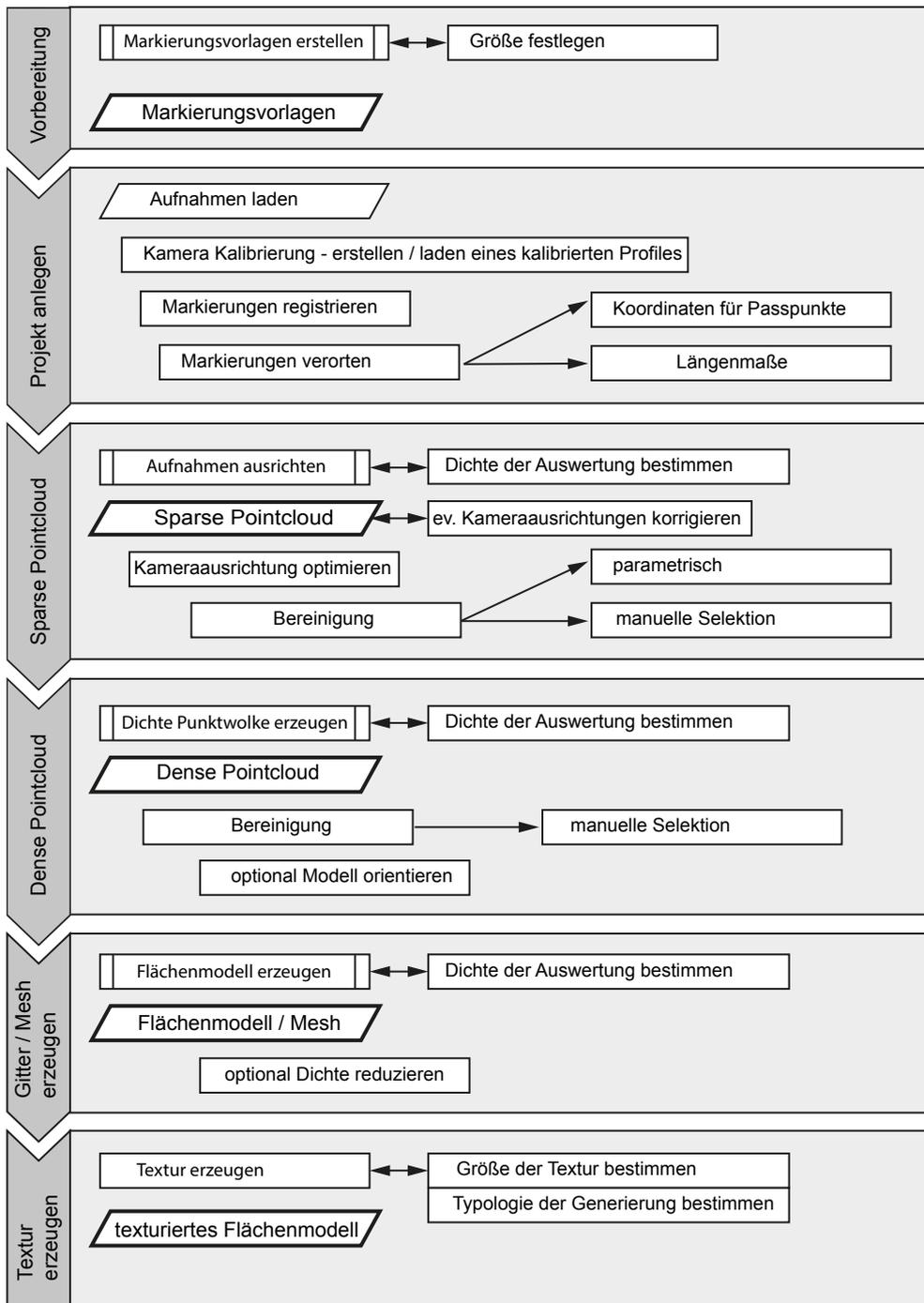


Abb. 5.8.1-3 Organigramm zur Auswertung unter Photoscan Pro

Die Dichte der Auswertung wurde hierbei auf ein Mittelmaß reduziert. Anschließend muss die Textur des Modells generiert werden. Diese Arbeitsschritte können auch in Folge einer automatisierten Stapelverarbeitung erfolgen. Dies erscheint nützlich, sofern das Projekt in Gruppen gegliedert wurde oder eindeutige Ergebnisse zu erwarten sind, die keiner

Bereinigung oder erneuten Ausrichtung von einzelnen Kamerapositionen bedürfen. Die Produkte umfassen eine „Sparse Pointcloud“, eine dichte Punktwolke und ein texturiertes Flächenmodell. Optional können die importierten Aufnahmen entzerrt ausgegeben und Orthophotos generiert werden. Um ein Orthophoto einer Ansicht der Fraterie zu erstellen, musste das Modell über die „Bounding-Box“, einen räumlichen Begrenzungsrahmen, für die jeweilige Ansicht angepasst werden. Die Anwendung unterstützt die dreidimensionale Darstellung als Anaglyphbild unter Einsatz von Shutterbrillen (bei kompatiblen Systemen). Diese Art der Objektvisualisierung kann sich zur Beurteilung der rekonstruierten Modelle als nützlich erweisen.

### 5.8.2 Die photogrammetrische Auswertung mit Recap 360

Die Anwendung des webbasierten Services Recap 360 erschließt sich dem Anwender in deutlich reduziertem Umfang. Nach erfolgreichem Login zum Service kann ein neues Projekt erstellt werden. Hierzu muss lediglich ein Projektname vergeben und die Art der Auswertung sowie die erwünschten Dateiformate der Ausgabe festgelegt werden. Recap 360 bietet an, ein Modell mit geringer geometrischer Auflösung zur Ansicht auszuwerten. Diese Option wird als „Preview“ bezeichnet. Wird ein Modell unter dieser Einstellung rekonstruiert, ist die Auswahl der Dateiformate zum Download des Projektes begrenzt (obj, rcm). Die Rekonstruktion erfolgt sehr schnell und erlaubt eine Vorschau auf das zu erwartende Ergebnis. Im Rekonstruktionsmodus „Ultra“ erfolgt die Rekonstruktion im maximalen Umfang. Zwei weitere Optionen werden zur Auswertung angeboten. Die Funktion „smart cropping“ verhindert die Rekonstruktion von Objekten, die außerhalb des Umfanges der Aufnahmeordnung liegen. Dies ist beispielsweise für die Rekonstruktion solitärer Objekte, die zur Aufnahme umschritten wurden, hilfreich. Die Option „smart texturing“ soll die Ausgabe der Textur positiv beeinflussen, befindet sich jedoch noch im Entwicklungsstadium (Stand Ende 2014). Keine dieser Optionen wurde zur Rekonstruktion der Fraterie aktiviert. Ist das Projekt angelegt, müssen die Aufnahmen zur Auswertung übertragen werden. Recap 360 akzeptiert ausschließlich das Dateiformat „jpg“. Die Dauer dieses Prozesses ist von der

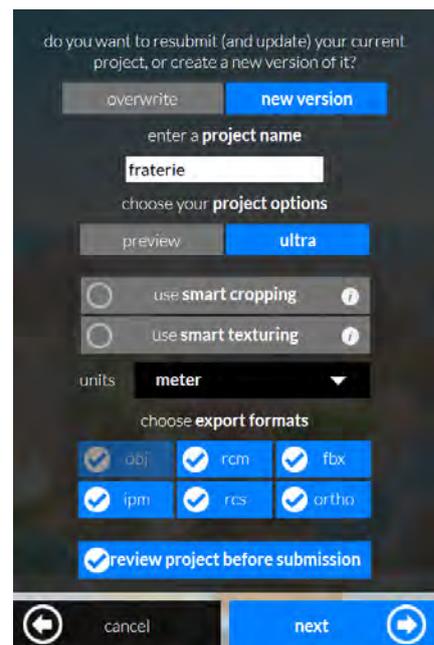
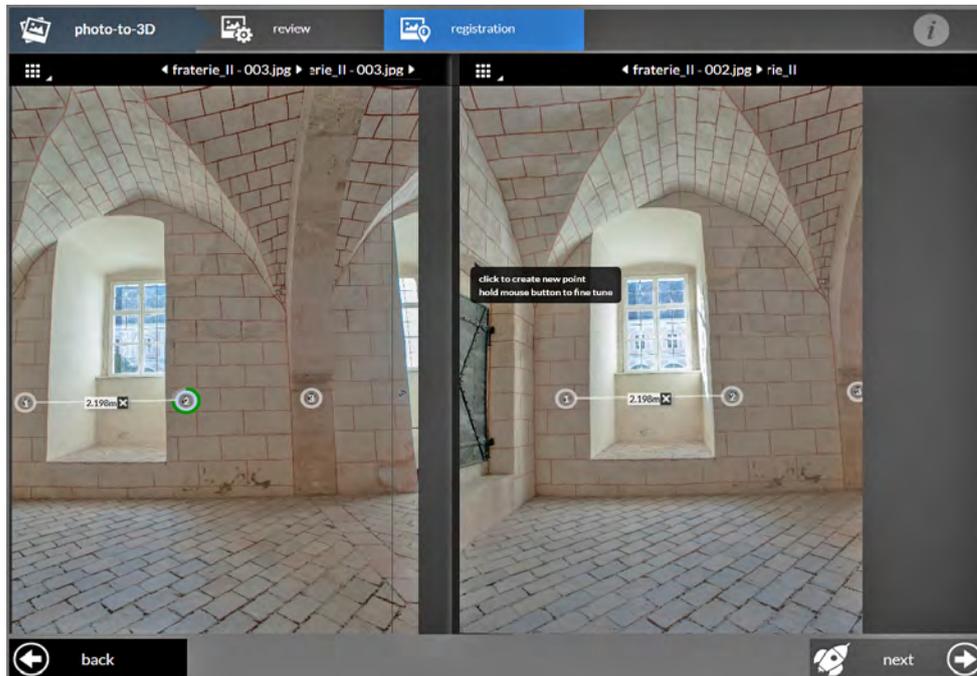


Abb. 5.8.2-1 Projektoptionen  
Recap 360

Internetverbindung abhängig. Sind die Aufnahmen übertragen, werden diese als Vorschaubilder angezeigt.

Wird die Option „advanced tools“ aktiviert, können auf den Abbildungen Marker gesetzt werden. Diese Marker fungieren als Merkmalspunkte zur eindeutigen Orientierung der Aufnahmen, aber auch als Passpunkte. Diesen Markern können Koordinaten als Passpunkte zugeschrieben werden. Sofern auf einer Abbildung mindestens zwei Marker versetzt sind, können entsprechende Längenmaße eingepflegt werden.



Abb, 5.8.2-2 Marker Recap 360

Das Bildmaterial zeigt die Messmarken, die mit der Anwendung Photoscan Pro erstellt und vorort versetzt wurden. Diese Messmarken wurden mit Markern manuell signalisiert und korrespondierende Längenmaße angegeben. Dieser Prozess erfordert die Positionierung eines Markers auf mindestens drei Aufnahmen. Das manuelle Registrieren der Messmarken bedeutet einen wesentlichen zeitlichen Mehraufwand. Ist diese Aufgabe erfüllt, wird das Projekt zur Auswertung übermittelt. Die Rechenzeit ist vom Umfang des Projektes und der Auslastung der Server abhängig.

## Arbeitsablauf Recap360

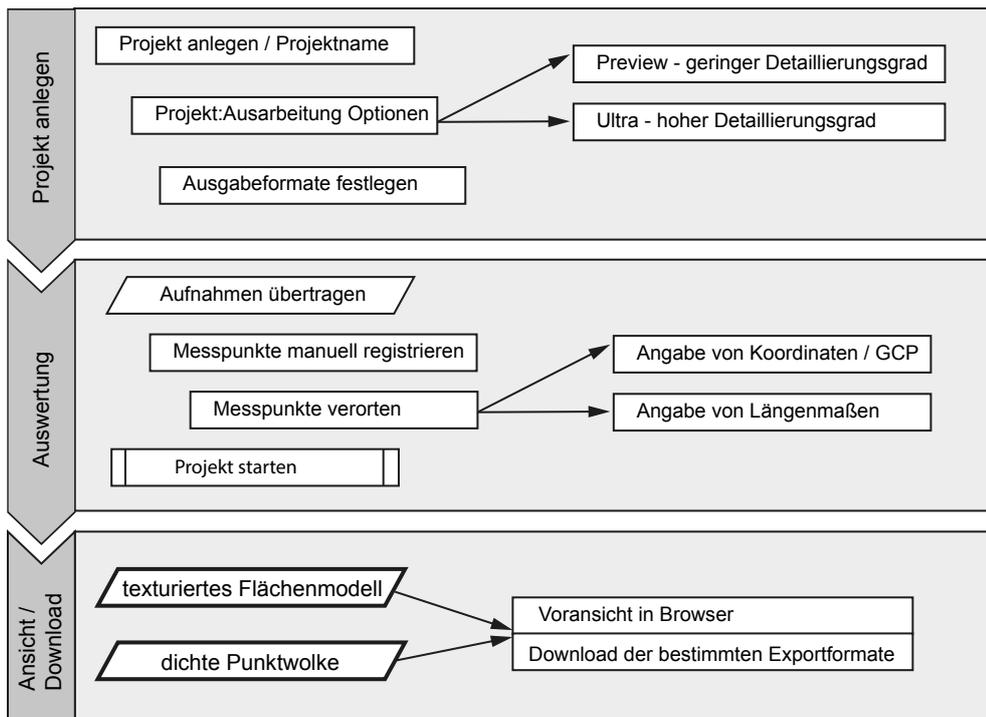


Abb. 5.8.2-3 Organigramm zur Auswertung unter Recap 360

### 5.8.3 Die photogrammetrische Auswertung mit VisualSFM

Die Software VisualSFM ist im Funktionsumfang deutlich eingeschränkt und muss, um an den Funktionsumfang der alternativ untersuchten Anwendungen (vgl. 5.8.1 & 5.8.2) anschließen zu können um zusätzliche Software ergänzt werden. Zur Rekonstruktion einer dichten Punktwolke wurde die Software CMVS (vgl. 5.7.3) modular integriert. Diese Anwendung kann über die Benutzeroberflächen von VisualSFM ausgeführt werden. Einige Funktionen von VisualSFM sind ausschließlich über eine Befehlseingabe auszuführen. Zur Rekonstruktion wurde dasselbe photographische Material verwertet, auf das auch zur Untersuchung der Applikationen Photoscan Pro und Recap 360 zurückgegriffen wurde (vgl. 5.6). Analog zu Photoscan Pro und Recap360 erfordert der erste Arbeitsschritt das Laden der Aufnahmen. VisualSFM akzeptiert, wie Recap 360, lediglich das Bildformat „jpg“. Im folgenden Arbeitsschritt wird das Bildmaterial auf Merkmalspunkte (features) analysiert. Optional können Angaben zu korrespondierenden Bildpaaren oder Gruppen erfolgen, um den Prozess der Bildanalyse im Umfang einzuschränken und die Laufzeit der Analyse somit zu reduzieren. Ist das Bildmaterial analysiert, kann die Bündelausgleichung zur Rekonstruktion der „Sparse Pointcloud“ erfolgen. Ein Bereinigen der Punktwolke ist nach Abschluss dieses Prozesses nicht möglich. Die Rekonstruktion der dichten Punktwolke

erfolgt über die Software CMVS, die über die Benutzeroberfläche von VisualSFM gestartet werden kann. VisualSFM ermöglicht die Deklaration von Passpunkten. Diese können am Modell der Punktwolke oder anhand der Ansicht des Bildmaterials definiert werden. Die Angabe der korrespondierenden Koordinaten erfolgt nach Selektion dieser Punkte über eine Eingabemaske oder ein entsprechend formatiertes Textdokument. Das Einpflegen von Längenmaßen zwischen diesen Passpunkten ist nicht möglich.

#### Arbeitsablauf VisualSFM + CMVS

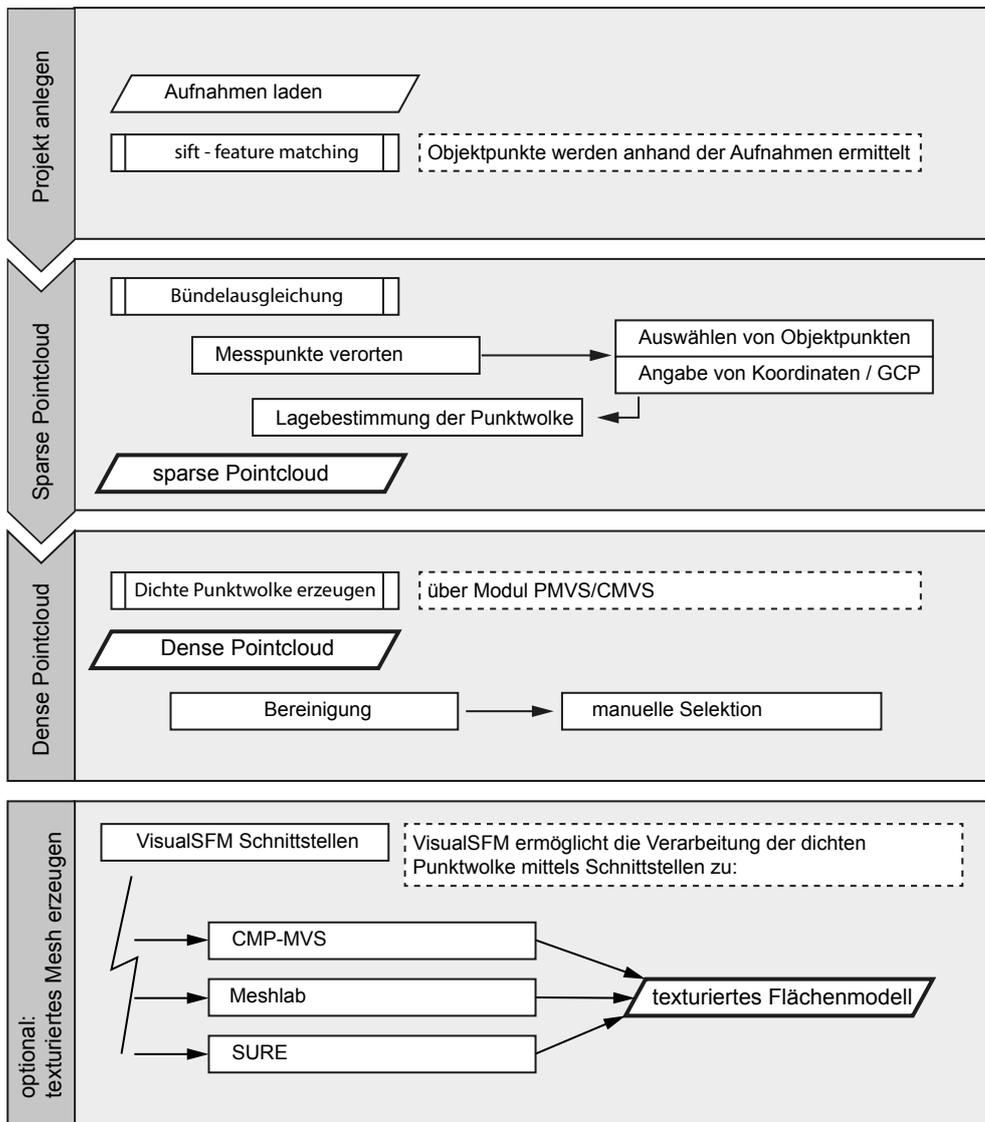


Abb. 5.8.3 Organigramm zur Auswertung unter VisualSFM

Da die Messmarken räumlich nicht eingemessen wurden, jedoch abgelotet versetzt wurden, konnte das Modell im Maßstab über die Angabe des relativen Bezuges zweier Messpunkte bestimmt werden. Das Modell der dichten Punktwolke wurde in Meshlab orientiert sowie auf Maßhaltigkeit überprüft und entsprechend transformiert. Meshlab stellt für diese Zwecke

zahlreiche Werkzeuge zur Verfügung. Beispielsweise kann das Modell an einem Referenzobjekt oder über die Selektion mehrerer Punkte und deren Affinität zu einer Bezugsebene, aber auch über einfache Werkzeuge zur Transformation orientiert und skaliert werden. Meshlab ermöglicht überdies, die Rekonstruktion eines texturierten Flächenmodells anhand der dichten Punktwolke aus der Verarbeitung durch CMVS. Es ist der Analyse der Ergebnisse vorwegzunehmen, dass die rekonstruierten Modelle aus VisualSFM und CMVS einer erfolgreichen Rekonstruktion eines Flächenmodelles aufgrund mangelnder Dichte nicht gerecht wurden.

### **5.9 Analyse der photogrammetrischen Produkte**

Die Aufnahmen der Aufnahmeordnungen 1 und 2 (vgl. 5.6) wurden jeweils unter Anwendung der drei Applikationen Photoscan Pro, Recap 360 und VisualSFM (vgl. 5.7), nach dem in *Abschnitt 5.8* erläuterten Verfahren zur photogrammetrischen Auswertung genutzt. Die dichten Punktwolken der jeweiligen Auswertung werden in diesem Abschnitt gegenüber gestellt und bewertet. Es ist vorwegzunehmen, dass aus der Auswertung der Aufnahmeordnung 1 unter Anwendung der Software Photoscan Pro die zuverlässigste Rekonstruktion und im Rahmen des Produktes der dichten Punktwolke das geometrisch dichteste Modell rekonstruiert wurde. Das Modell der photogrammetrischen Auswertung der Aufnahmeordnung 1 gilt im Rahmen folgender Gegenüberstellung somit als Referenz. Da sich dieses Referenzmodell als günstiges und zufriedenstellendes Produkt der photogrammetrischen Auswertung erwiesen hat, wurde der umfangreiche Bildverband der Aufnahmeordnung 3 lediglich unter Anwendung der Software VisualSFM ausgewertet. Es sollte untersucht werden, ob die Ergebnisse der Rekonstruktion unter Anwendung dieser Applikation auf Basis eines deutlich umfangreicheren Bildverbandes bessere Modelle erbringen würde. Tabelle 11 dokumentiert den geometrischen Umfang der rekonstruierten Modelle und die benötigte Zeit zur Auswertung der jeweiligen Arbeitsschritte auf dem in *Abschnitt 5.5.3* deklarierten System.

		Software	Punktwolke Sparse Punktanzahl/Zeit	Punktwolke Dense Punktanzahl/Zeit	Mesh <sup>1</sup> Polygone/Zeit	Textur <sup>2</sup> Auflösung/Zeit	
<b>Aufnahmeordnung</b>	<b>1</b>	Photoscan	734.765 / 3:37h	76.234.383 / 10:26h	3.921.884 / 8:32h	4096px × 4 / 2:28h	
		Recap360 <sup>3</sup>	-	5.285.559	10.570.826	8192px × 10 / 14h	
		VisualSfm	58.557 / 0:21h	12.248.849 / 2:42h	-	-	
	<b>2</b>	Photoscan	627.887 / 3:56h	64.317.175 / 11:48h	3.902.764 / 7:48h	4096px × 4 / 2:18h	
		Recap360 <sup>3</sup>	-	5.749.135	11.496.992	8192px × 10 / 16h	
		VisualSfm	42.986 / 0:18	8.577.868 / 2:36	-	-	
	<b>3</b>	VisualSfm	63274 / 0:29	16.691.439 / 4:17	-	-	
	<sup>1</sup> Photoscan errechnet ein nach entsprechender Angabe beliebig reduziertes Mesh <sup>2</sup> Texturen wurden in mehreren Dateien in definierter Bildauflösung in Pixel ausgegeben <sup>3</sup> Recap360 errechnet ein texturiertes Flächenmodell. Der Auswertungsprozess erfolgt ohne Zwischenergebnisse, die gesamte Dauer der Berechnung ist somit mit dem letzten Arbeitsschritt, der Berechnung der Textur angegeben.						

*Tabelle 11: Angaben zur photogrammetrischen Auswertung nach Software und Aufnahmeordnung*

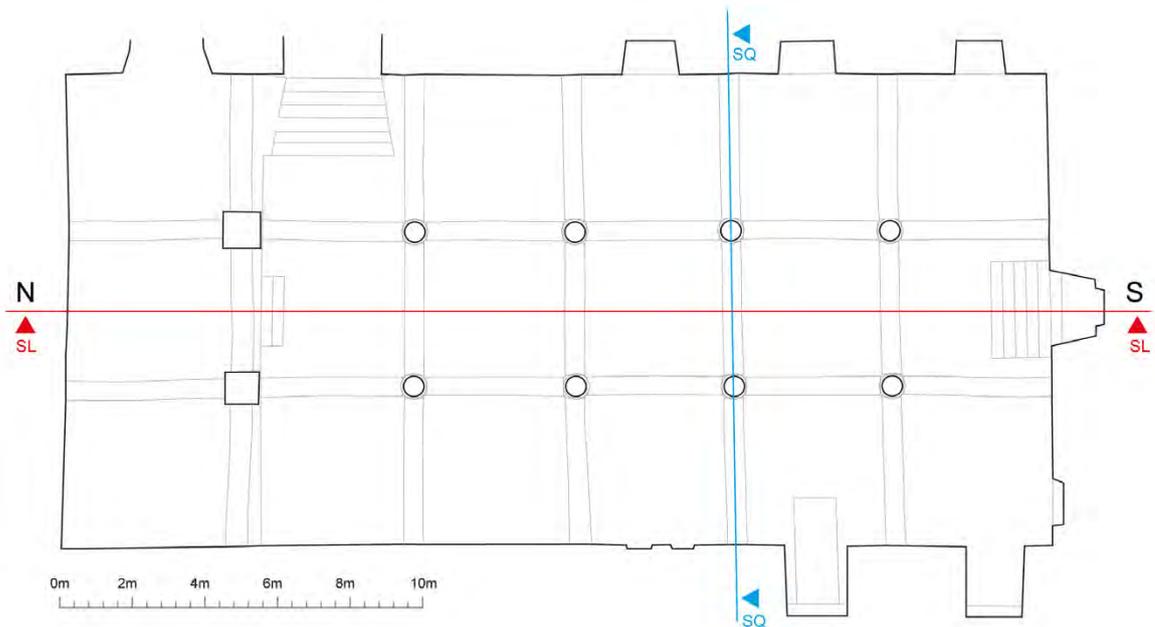
		Software	Produkte der Auswertung	Zeit Total
<b>Aufnahmeordnung</b>	<b>1</b>	Photoscan	Dichte Punktwolke und texturiertes Flächenmodell	25:03h
		Recap360	Dichte Punktwolke und texturiertes Flächenmodell	14:00h
		VisualSfm	Dichte Punktwolke	3:03h
	<b>2</b>	Photoscan	Dichte Punktwolke und texturiertes Flächenmodell	25:50h
		Recap360	Dichte Punktwolke und texturiertes Flächenmodell	16:00h
		VisualSfm	Dichte Punktwolke	2:54h
	<b>3</b>	VisualSfm	Dichte Punktwolke	4:46h

*Tabelle 12: Angaben zur Dauer der photogrammetrischen Rekonstruktion*

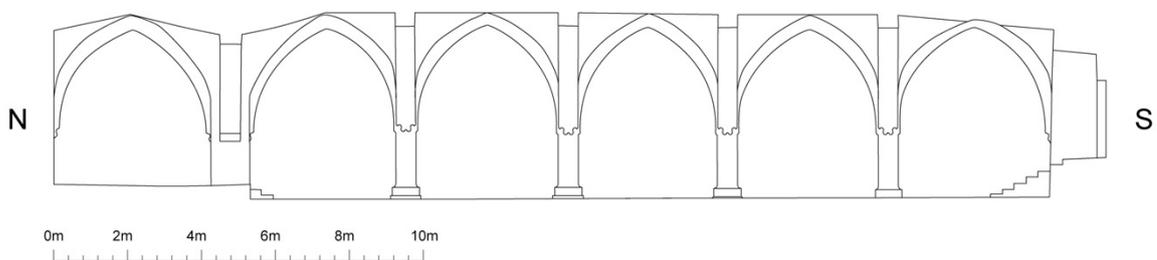
Zur Gegenüberstellung wurden die dichten Punktwolken der Rekonstruktion aus den genannten Aufnahmeordnungen und Applikationen in der Anwendung Pointcab Pro in Version 3.3 visualisiert. Diese Software dient der Verarbeitung von Punktwolken aus der Aufnahme von Laserscannern oder aus photogrammetrischer Auswertung. Anhand definierter Schnittebenen kann die Software Zeichnungen als Vektorgrafik generieren. Diese können in gängigen CAD-Anwendungen weiter verarbeitet werden. Zur Gegenüberstellung wurden die Punktwolken in Aufsicht und als Schnitte dargestellt. Eine horizontale Schnittebene in der Höhe von einem Meter ermöglicht die Darstellung der Punktwolke unterhalb und über dieser Schnittebene. Diese Ansichten veranschaulichen die Aufnahmedichte des Bodens beziehungsweise der Gewölbe. Zudem wurden Schnittdarstellungen in Längsrichtung (Schnittachse „SL“ Norden-Süden, über sechs Joche) und Querrichtung (Schnittachse „SQ“ Westen-Osten, über drei Joche) gefertigt.

Die beschriebenen Riss- und Schnittdarstellungen (Schnitt SQ) sind, der Übersicht halber, in folgender Analyse nicht abgebildet. Die Darstellungen sind dem Anhang dieser Arbeit beigelegt.

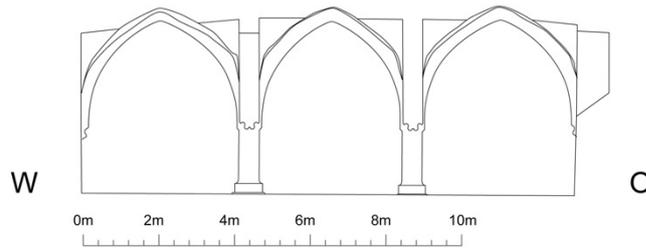
Abbildung 5.9-1 zeigt das Aufnahmeobjekt im Grundriss sowie die gekennzeichneten Schnitte auf Basis der Produkte aus Pointcab Pro unter weiterer Verarbeitung mittels Autocad 2015.



*Abb. 5.9-1 Grundriss und Schnittebenen*



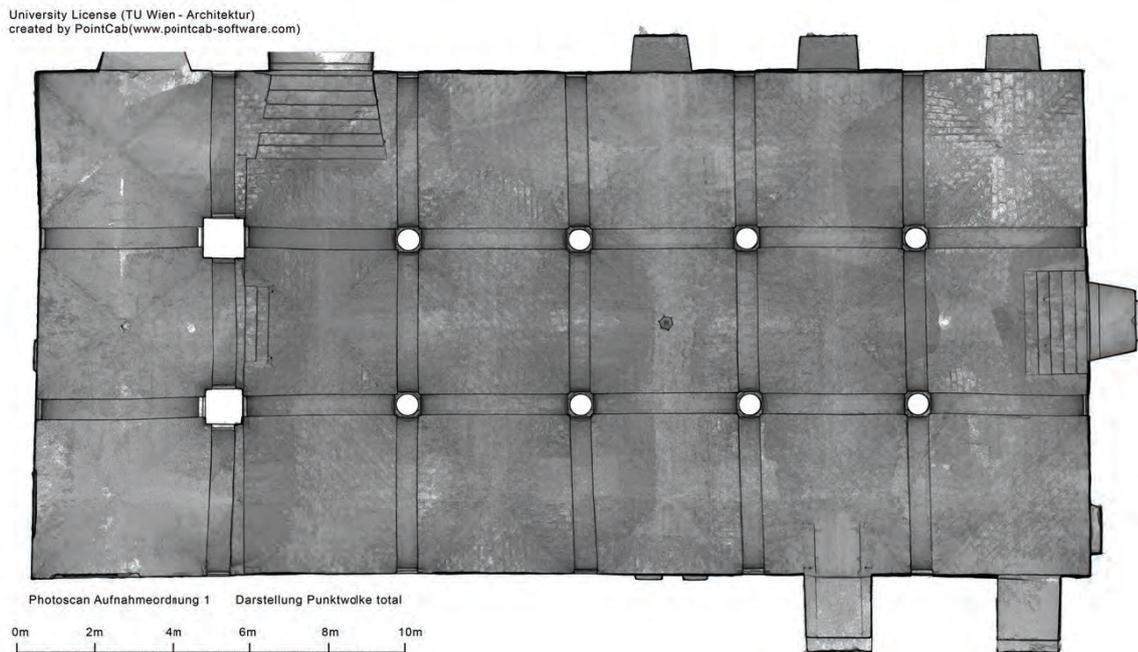
*Abb. 5.9-2 Schnitt SL Nord-Süd*



*Abb.5.9-3 Schnitt SQ West-Ost*

Folgende analytischen Abbildungen visualisieren den Umfang der rekonstruierten dichten Punktwolken gegenüber einem Referenzmodell aus der Auswertung der Aufnahmeordnung 1 unter der Software Photoscan Pro. Diese Abbildungen zeigen die Punktwolke des Referenzmodelles in blauer Färbung, in Überlagerung des jeweiligen zu vergleichenden Modelles in roter Färbung. Aus der exakten Überlagerung der Konturen ergibt sich eine schwarze Darstellung, andernfalls stellen sich die Konturen in jeweiliger Objektfarbe dar und verdeutlichen geometrische Abweichungen oder unvollständige Rekonstruktionen. Angaben zur „Aufnahmeordnung“ erfolgen, der Leserlichkeit der Angaben zur Abbildung halber, als „Ordnung“. Je flächenhafter ein Modell erscheint, umso dichter ist es. Flächen normal zur Ansicht zeichnen sich als Konturen ab. Je deutlicher diese Konturen ersichtlich sind, umso genauer lassen sich Plandarstellungen ableiten.

### 5.9.1 Darstellung der Aufnahmeordnung 1 als Produkt von Photoscan Pro



*Abb. 5.9.1-1 Aufsicht Punktwolke - Ordnung 1 – Photoscan*

University License (TU Wien - Architektur)  
 created by PointCab(www.pointcab-software.com)

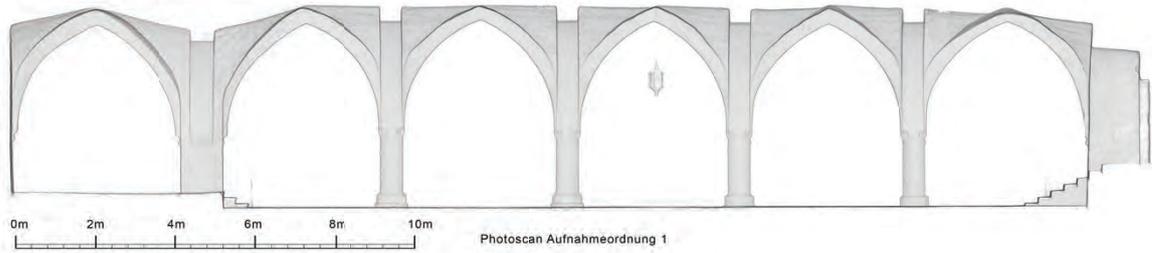


Abb. 5.9.1-2 Schnitt SL Ordnung 1 – Photoscan Pro

### Bewertung des Modells

Die dichte Punktwolke aus Photoscan Pro, nach Auswertung der Aufnahmeordnung 1, stellt mit 76.234.383 Punkten ein ausreichend detailliertes Modell dar. Die Gewölbeflächen sind ausreichend dicht, lediglich das südöstlichste Kreuzgratgewölbe stellt sich weniger dicht dar. Die Grate sind jedoch deutlich ausgebildet. Wände, Pfeiler, Fensternischen und Treppen zeichnen sich deutlich ab. Der Boden des Ostdurchganges konnte nur anteilig rekonstruiert werden. *Tabelle 13* gibt die durchschnittliche und maximale Abweichung der eingepflegten Längenmaße wieder.

Eingemessene Längenmaße	Punkte aus sparse pointcloud	Abweichung $\bar{d}$	Abweichung $d_{max}$
35	76.234.383	1,61 mm	6.56 mm

*Tabelle 13: Genauigkeit des Modells aus Aufnahmeordnung 1 unter Photoscan Pro*

Das Modell wurde anhand ergänzender Maßabnahmen am Objekt (vgl. *Abbildung 5.9.1-5*) geprüft (vgl. *Abbildung 5.9.1-5*). Die Abweichungen entsprechen den Anforderungen der Önorm A 6250-1 und überschreiten 10 Millimeter nicht. Das Modell ist eine profunde Grundlage und bestätigt sich im Anspruch als Referenzmodell.

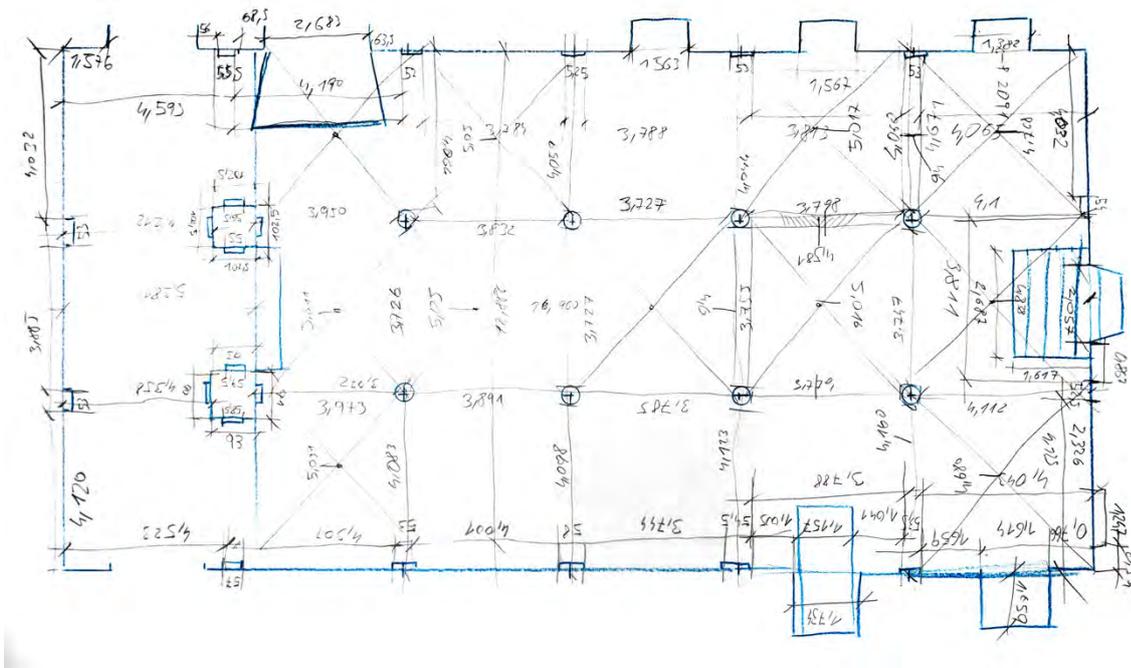


Abb. 5.9.1-3 Arbeitsskizze Vermessung am Vorort

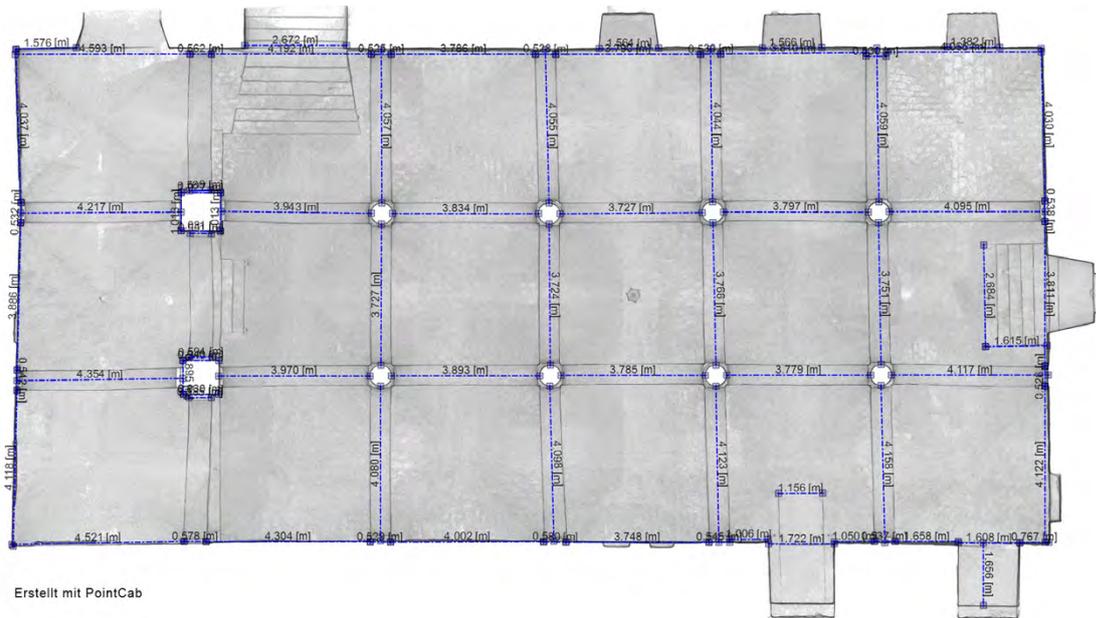


Abb. 5.9.1-4 Vermessung am Modell

## 5.9.2 Darstellung der Aufnahmeordnung 1 als Produkt von Recap 360

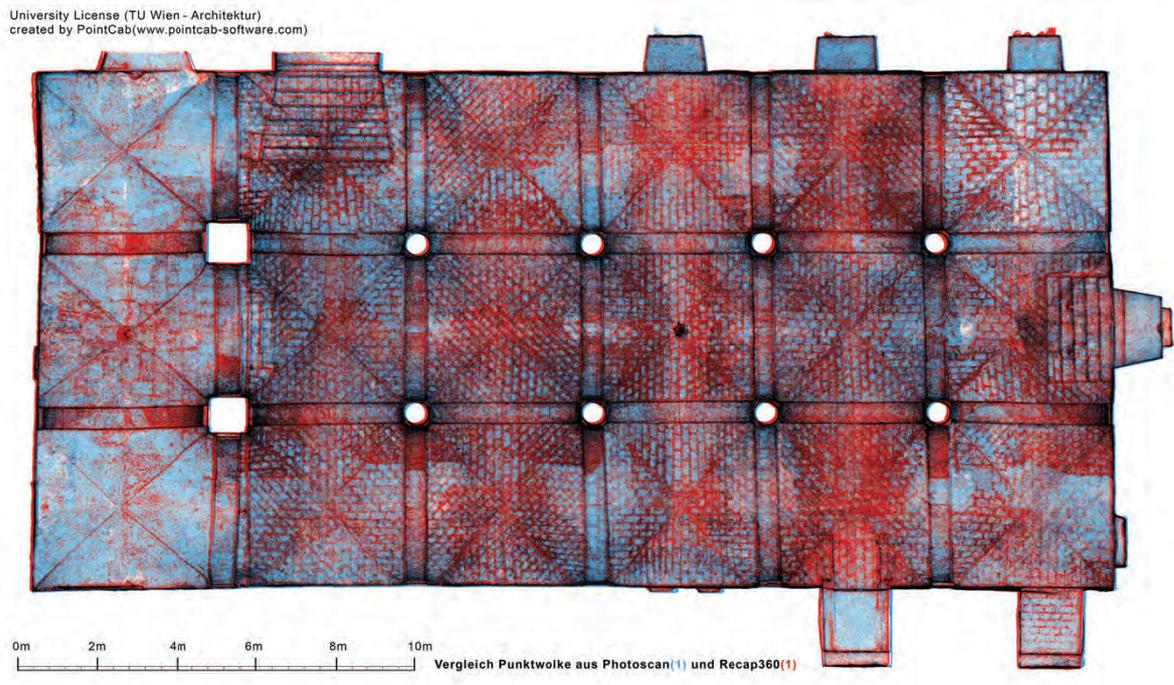


Abb. 5.9.2-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 1, Recap 360

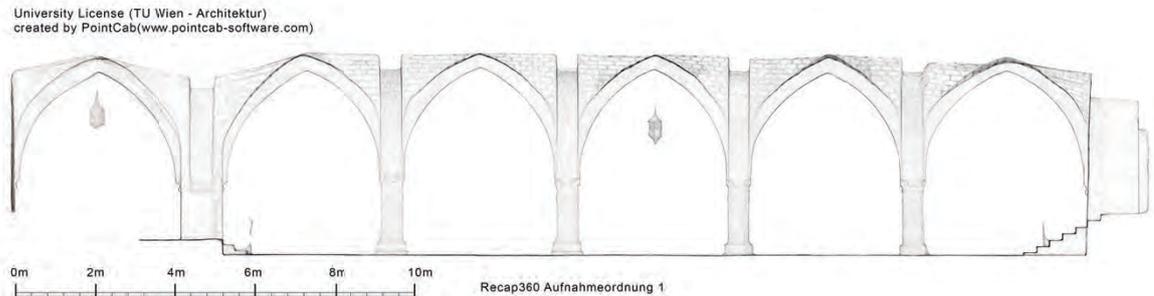


Abb. 5.9.2-2 Schnitt SL Ordnung 1 – Recap 360

### Bewertung des Modells

Das Modell ist im Umfang von 5.285.559 Punkten deutlich gelichtet. Die Rundpfeiler zeichnen sich deformiert ab. Der Vergleich zeugt über eine Abweichung entlang der Nord-Süd-Achse.

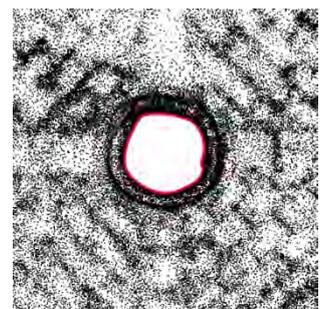


Abb. 5.9.2-3 Deformation der Rundpfeiler aus Ordnung 1, Recap 360

### 5.9.3 Darstellung der Aufnahmeordnung 1 als Produkt von VisualSFM

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

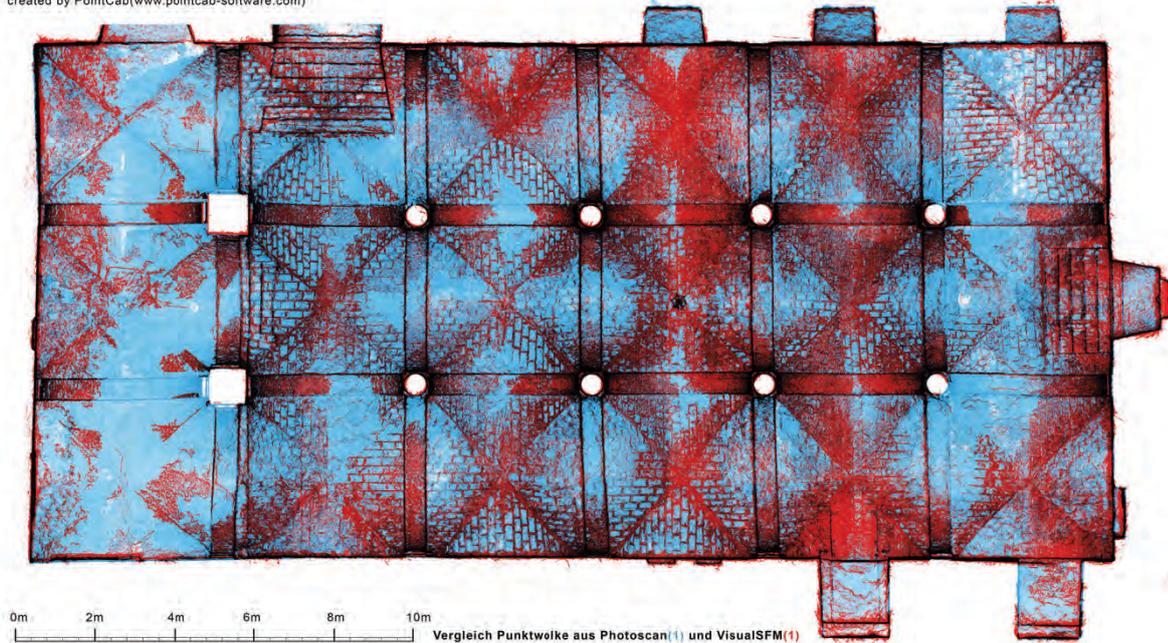


Abb. 5.9.3-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 1, VisualSFM]

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

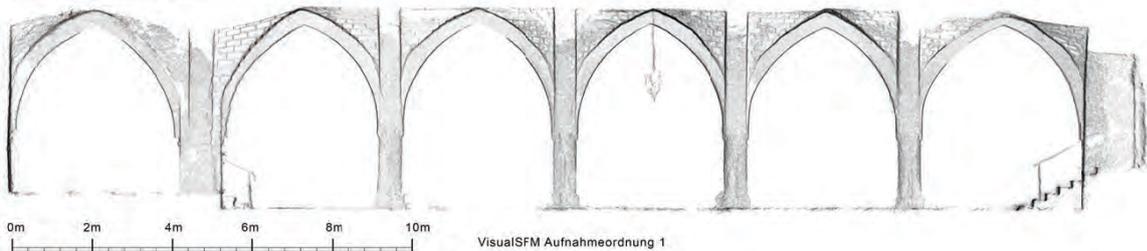


Abb. 5.9.3-2 Schnitt SL Ordnung 1 – VisualSFM]

#### **Bewertung des Modells**

Das Modell umfasst 12.248.849 Punkte. Die Gewölbe und Pfeiler des Ostdurchganges wurden nur anteilig rekonstruiert. In den südlichen Jochen konnten auch die Rundpfeiler und Bögen nur teilweise rekonstruiert werden. Der Vergleich mit dem Referenzmodell zeigt eine grundsätzliche Entsprechung und Maßhaltigkeit, wenngleich erkenntlich ist, dass die Punktwolke einer gewissen Streuung unterliegt, aus der sich keine exakten Ergebnisse ableiten lassen.

## 5.9.4 Darstellung der Aufnahmeordnung 2 als Produkt von Photoscan Pro

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

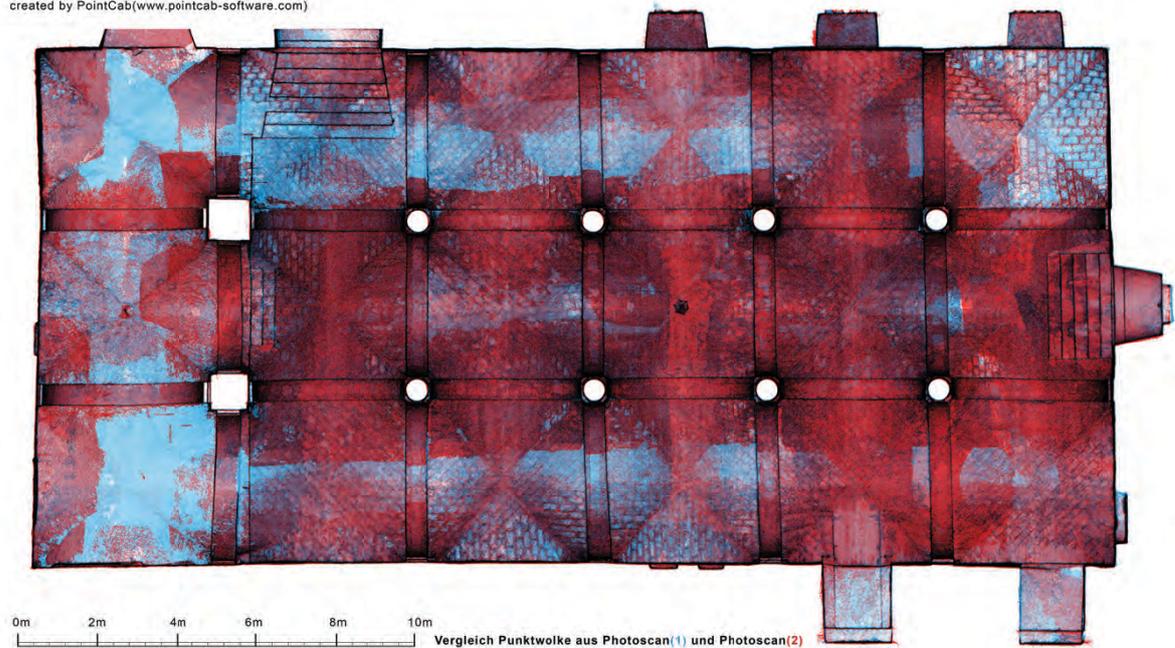


Abb. 5.9.4-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 2, Photoscan Pro

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

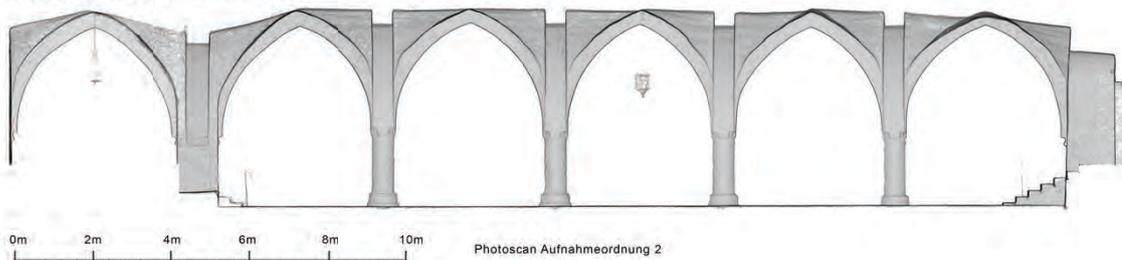


Abb. 5.9.4-2 Schnitt SL Ordnung 2 – Photoscan Pro

### Bewertung des Modells

Das Modell umfasst 64.317.175 Punkte. Die Dichte nimmt in der Darstellung der Gewölbe der westlichen und östlichen Joche deutlich ab. Die Gewölbe des Ostdurchganges wurden nur anteilig rekonstruiert, gleiches gilt für den Boden. Wände und Pfeiler zeichnen sich deutlich ab. Auch die Schnittdarstellungen sind als gute Ergebnisse zu bewerten. Der Vergleich mit dem Referenzmodell bestätigt die Maßhaltigkeit dieses Modells. Gegenüber der Punktwolke aus der Aufnahmeordnung 1 unter Auswertung mittels der gleichen Software präsentiert sich diese Rekonstruktion in geringerem geometrischen Umfang. Die Korridor-Aufnahmeordnung erbrachte aufgrund der Überschneidung der drei gestaffelten

Verbände eine ausreichend dichte Rekonstruktion der mittleren Joche, genüge der Rekonstruktion der westlichen und östlichen Joche jedoch nicht. Die Korridoraufnahmeordnung bestätigt sich gegenüber der Aufnahmeordnung 1 (vgl. 5.6.1) als ungünstig.

### 5.9.5 Darstellung der Aufnahmeordnung 2 als Produkt von Recap 360

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

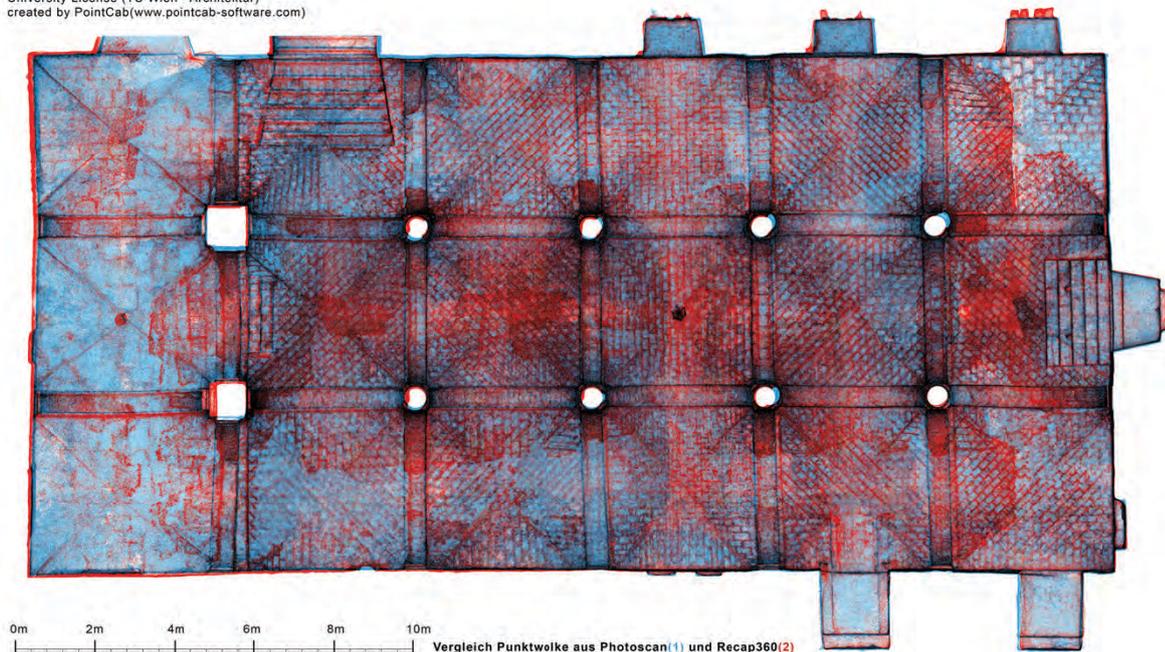


Abb. 5.9.5-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 2, Recap 360

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

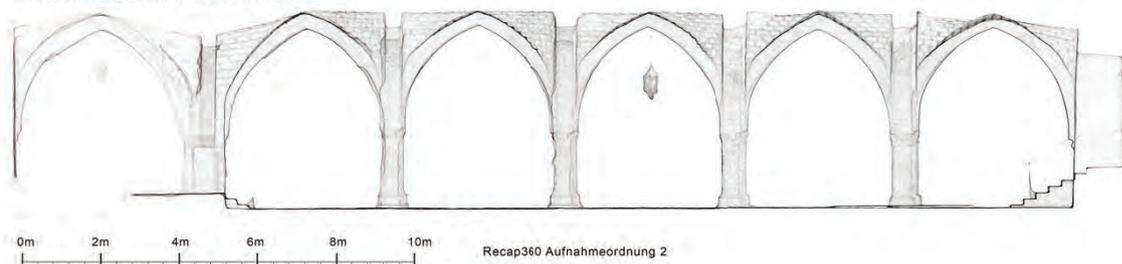


Abb. 5.9.5-2 Schnitt SL Ordnung 2 – Recap 360

## Bewertung des Modells

Die Rekonstruktion ist mit 5.749.135 Punkten zwar geringfügig dichter als das Modell auf Basis der Bildstrecke der Aufnahmeordnung 1, weist jedoch deutliche geometrische Fehler auf. Die Pfeiler des Ostdurchganges entsprechen augenscheinlich nicht und die Rundpfeiler der Fraterie erscheinen erheblich deformiert. Das Modell entspricht dem Aufnahmeobjekt nicht und ist zu verwerfen.

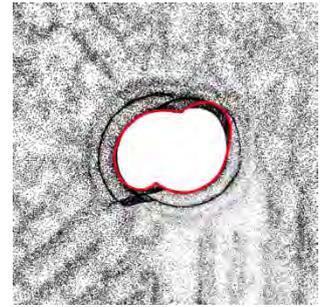


Abb. 5.9.5-3 Deformation der Rundpfeiler aus Ordnung 2 und Recap 360

## 5.9.6 Darstellung der Aufnahmeordnung 2 als Produkt von VisualSFM

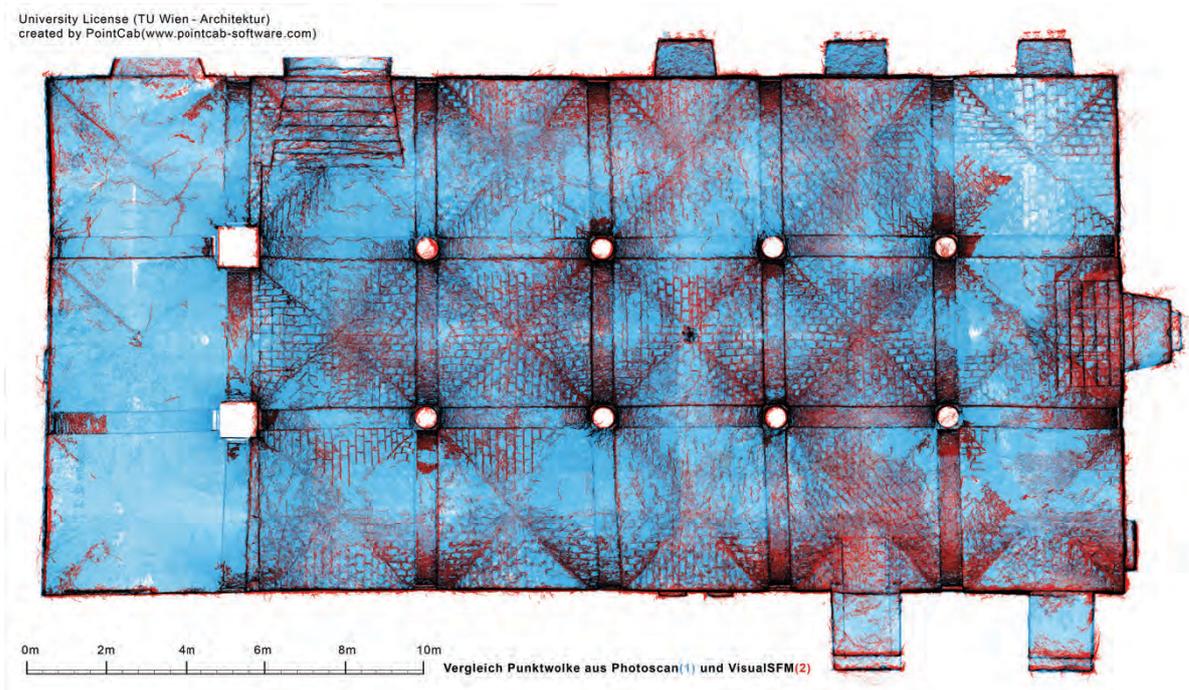


Abb. 5.9.6-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 2, VisualSFM

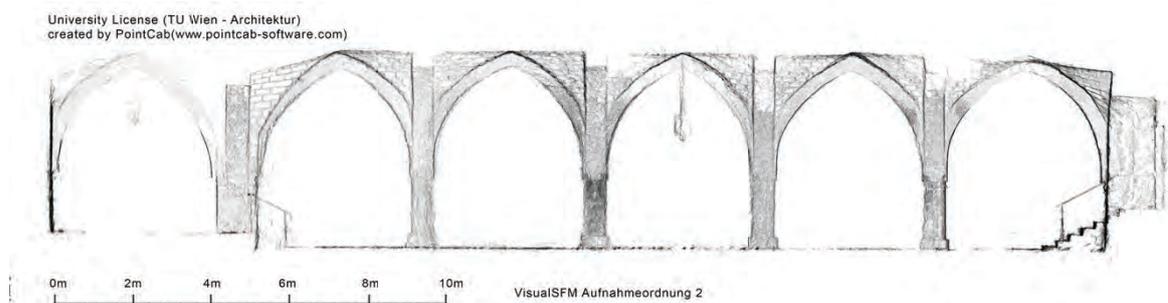


Abb. 5.9.6-2 Schnitt SL Ordnung 2 – VisualSFM

## Bewertung des Modells

Die Dichte der Rekonstruktion ist gegenüber dem Modell aus der Auswertung des Bildmaterials der Aufnahmeordnung 1 mit 8.577.868 Punkten deutlich geringer. Die Rekonstruktion des Objekts ist mangelhaft und zur weiteren Verarbeitung nicht tauglich. Soweit rekonstruiert ist das Modell maßhaltig. Analog zum Modell der Aufnahmeordnung 1 ist die Streuung der rekonstruierten Objektpunkte deutlich.

### 5.9.7 Darstellung der Aufnahmeordnung 3 als Produkt von VisualSFM

Die Anwendung VisualSFM und CMVS erbrachten maßhaltige, jedoch lückenhafte Rekonstruktionen. Die Aufnahmeordnung 3 erfasst die Fraterie mit 400 photographischen Aufnahmen in erweitertem Umfang. Die Software sollte auf Basis dieses Bildverbandes auf die Rekonstruktion eines dichteren Punktwolkenmodells geprüft werden

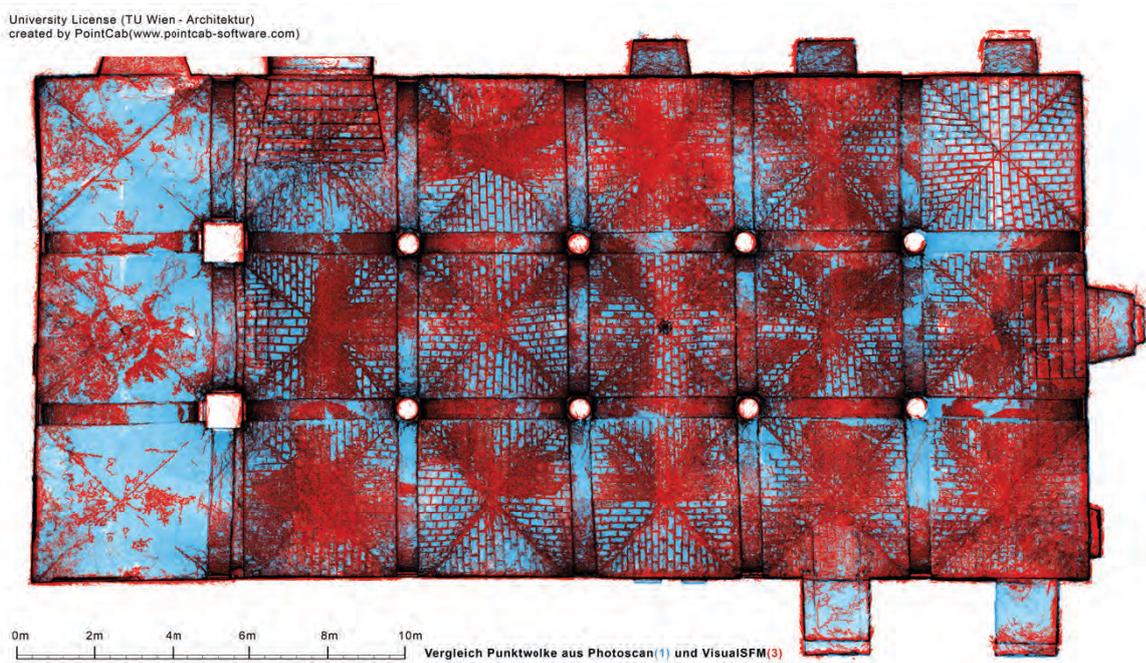


Abb. 5.9.7-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 3, VisualSFM

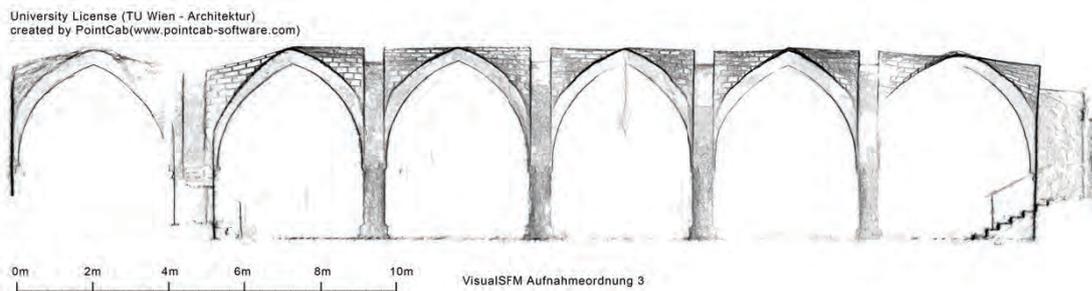


Abb. 5.9.7-2 Schnitt SL Ordnung 3 – VisualSFM

## **Bewertung des Modells**

Das Modell dieser Rekonstruktion umfasst 16.691.439 Punkte. Dies bedeutet eine mit der Anzahl an Aufnahmen proportionale Steigerung des Umfangs des Modells um 95%. Die Gewölbeflächen wurden dichter rekonstruiert, die Pfeiler des Ostdurchganges zeichnen sich deutlicher, wenngleich nicht lückenlos, ab. Die südlichen Rundpfeiler der Fraterie bleiben jedoch unvollkommen. Das Modell erweist sich im Vergleich als maßhaltig, wobei die Streuung der Punkte der Wände und Pfeiler mit dem Umfang des Datenmodells weiter zunimmt.

## **5.10 Zusammenfassung der Auswertung**

Produkte photogrammetrischer SFM-Applikationen sind Punktwolken, Flächenmodelle, Orthophotos und gegebenenfalls digitale Höhenmodelle (DEM – Digital Elevation Model). Photoscan Pro ist, im Rahmen der Auswertung der Fraterie angewendeten Software-Lösungen, die einzige Applikation, die all diese Produkte auszugeben vermag. VisualSFM ist bereits zur Rekonstruktion einer dichten Punktwolke an die Integration zusätzlicher Software angewiesen. Diese Punktwolke kann über weitere Anwendungen zu einem Flächenmodell verarbeitet werden, von dem sich schließlich Orthophotos ableiten lassen. Die Software ist auf wesentliche Funktionen beschränkt und relativ benutzerfreundlich. Die Anleitung zur Software sollte gründlich studiert werden, um die Anwendung in vollem Umfang nutzen zu können. Die Benutzeroberfläche bietet eingeschränkten Zugang zum Funktionsumfang. Über die Eingabeaufforderung können Funktionen spezifiziert werden. Das Service Recap 360 liefert Punktwolken in geringer Auflösung als Teil des texturierten Flächenmodells. Ein Orthophoto kann generiert werden, wenn das Modell über Passpunkte verortet wird. Alternative Bildpläne müssen aus kompatiblen Anwendungen abgeleitet werden. Die Produkte aus dem Service lassen sich in kompatiblen Anwendungen des Entwicklers mühelos und unkompliziert integrieren. Die Auswertung auf externen Servern ist sinnvoll, da keine lokale Recheneinheit ausgelastet und belegt wird. Das Service erfordert einen Mindestaufwand an administrativem und operativem Aufwand, wenngleich gerade der hohe Automationsgrad die Qualität der Produkte negativ beeinflussen kann.

Es muss abermals aufgezeigt werden, dass das Aufnahmeobjekt (Fraterie und Ostdurchgang) und die Bedingungen zur Aufnahme sowie deren Umfang ein sehr aufwändiges Projekt formulieren. Alle Applikationen haben sich bei einfacheren Aufnahmeobjekten, beispielsweise im Rahmen der Untersuchung der Genauigkeit am Objekt (*vgl. 2.6.3*) oder der Rekonstruktion des Portales der Westfassade der Stiftskirche Heiligenkreuz, als qualifiziert

erwiesen. Der photogrammetrischen Rekonstruktion der Fraterie, unter Entsprechung der Anforderungen an die Genauigkeit nach Önorm A 6250-1 (vgl. 2.4.1) sowie dem Anspruch auf Vollständigkeit des Modells, konnten nur die Produkte der Anwendung Photoscan Pro gerecht werden.

### 5.11 Produkte der Auswertung

Produkte der Auswertung der Fraterie sind dichte Punktwolken, texturierte Flächenmodelle, die in angemessener geometrischer Auflösung auch auf mobilen Endgeräten oder Internetplattformen präsentiert werden können, Orthophotos, Plandarstellungen und Visualisierungen.

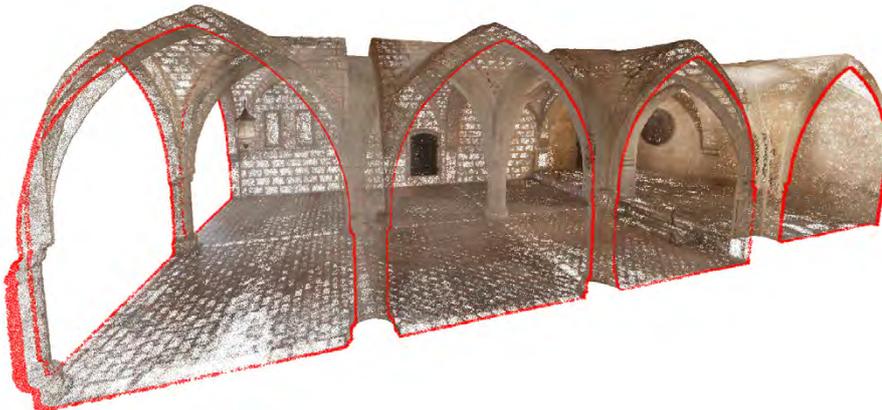


Abb. 5.11-1 Schnittdarstellung dichte Punktwolke – Darstellung Recap

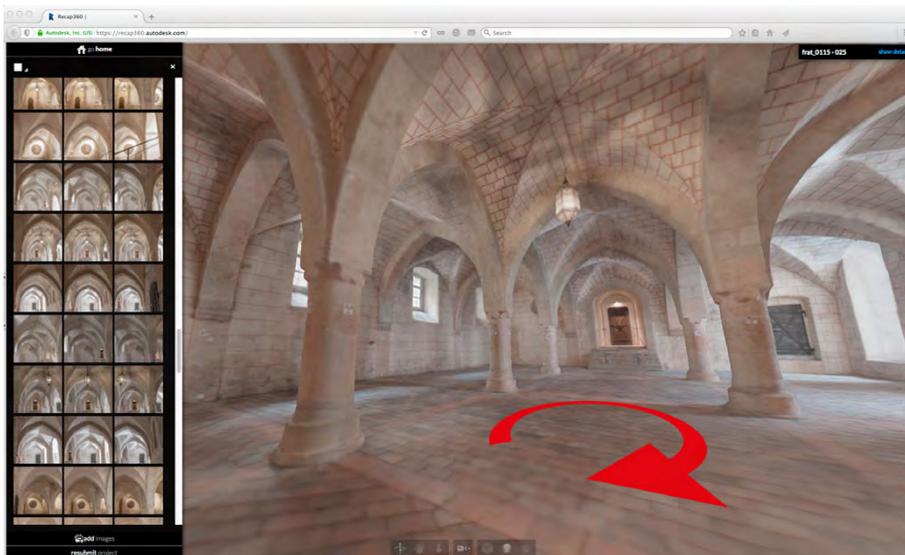


Abb. 5.11-2 Flächenmodell in webbasierender, interaktiver 3D Darstellung



*Abb. 5.11-3 interaktive Präsentation des Flächenmodells auf einem mobilen Endgerät*



*Abb. 5.11-4 Visualisierung eines Torusknoten im Umfeld des Flächenmodells*



*Abb. 5.11-5 Orthophoto Ansicht Nord*



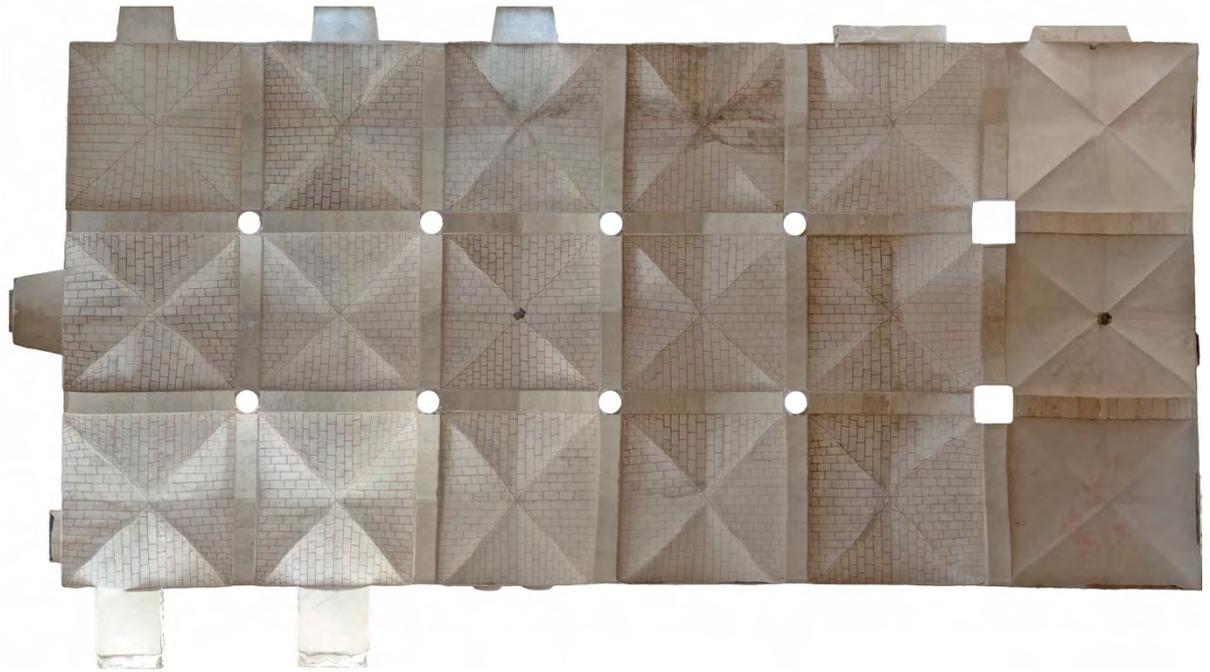
*Abb. 5.11-6 Orthophoto Ansicht Süd*



*Abb. 5.11-7 Orthophoto Ansicht West*



*Abb. 5.11-8 Orthophoto Ansicht Ost*



*Abb. 5.11-9 Orthophoto Ansicht Untersicht Gewölbe*



## 6. Zusammenfassung

Die computergestützte Mehrbildphotogrammetrie erschließt sich dem Anwender über ein weites Angebot unterschiedlicher Software generell als einfaches Werkzeug zur Bauaufnahme und Dokumentation. Grundkenntnisse der Methodik der Photogrammetrie sind jedoch Voraussetzung, um diese Technologie erfolgreich anwenden zu können. Das Aufnahmeobjekt muss sich zur photogrammetrischen Auswertung eignen. Homogene, reflektierende oder transparente Oberflächen sind mittels dieser Technologie nicht zu erfassen. Eine uneingeschränkte Sichtbeziehung ist Voraussetzung. Eine günstige Aufnahmeordnung eines Bildverbandes ist eine weitere Bedingung zur erfolgreichen Rekonstruktion eines dreidimensionalen Modells. Über die Aufnahmeordnung und den entsprechenden Bildmaßstab definiert sich zudem die zu erwartende Genauigkeit der photogrammetrischen Produkte. Mit dem Anspruch an Genauigkeit steigt auch der Anspruch an das Kamerasystem. Die im Rahmen dieser Arbeit ausgeführte Untersuchung dreier verschiedener Kamerasysteme bestätigt dies. Die Genauigkeit kann über spezifische Angaben zum Kamerasystem, einem kalibrierten Kameraprofil, weiter gesteigert werden. Diese Praxis ist zu empfehlen, jedoch nicht zwingend erforderlich. Mit der geometrischen Komplexität des Aufnahmeobjektes steigt der Anspruch an Aufnahmeordnung und Software. Applikationen mit hohem Automationsgrad empfehlen sich für einfache Anwendungen wie die Auswertung von Geländeaufnahmen oder etwa die Auswertung von Fassaden-Bildplänen. Komplexe geometrische Aufnahmeobjekte wie der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Raum des Stiftes Heiligenkreuz, der sich in 18 Joche untergliedert, erfordern zur möglichst genauen photogrammetrischen Auswertung einen erweiterten Funktionsumfang der Software. Diese Funktionen umfassen beispielsweise das automatisierte Registrieren von Messmarken, die Rekonstruktion sehr dichter geometrischer Modelle oder die prozedurale oder manuelle Bereinigung dieser Punktwolken. Das gegenständliche Aufnahmeobjekt konnte unter Anwendung nur einer Software-Lösung erfolgreich rekonstruiert werden. Zu beanstanden ist, dass keine der untersuchten Software-Lösungen qualifizierte Werkzeuge bietet, um das rekonstruierte, dreidimensionale Modell exakt zu orientieren, sofern keine Angaben zu Passpunkten oder Koordinaten zur Kameraposition erfolgen. Dieser wesentliche Arbeitsschritt muss gegebenenfalls in weiteren Applikationen ausgeführt werden. Die Verarbeitung und Visualisierung von Punktwolken erweist sich derweilen als unkompliziert, wenngleich zu diesem Zweck wiederum weitere Software erforderlich ist.



## 7. Aussicht

Die Photogrammetrie hat in den letzten Jahren ihre Neuinszenierung unter der Begrifflichkeit des „Reality Capture“ erlebt. Als Werkzeug der Fernerkundung im Bereich der Geodäsie und der Bauwerksdokumentation hat sich diese Technologie neuen Disziplinen und Märkten erschlossen, die sich dem Thema der „Virtualisierung“ von Gegenständlichem annehmen. In Form einfacher Anwendungen und mobiler Gerätschaften präsentiert sich die bildbasierende dreidimensionale Objekterfassung einer breiten Masse. Gerätschaften wie 3D-Drucker oder Technologien wie die Augmented-Reality verlangen nach möglichst fassbaren und intuitiven Verfahren zur Aufnahme und Auswertung dreidimensionaler Objekte. Reality Capture ist zum professionellen Werkzeug der autonomen Steuerungstechnik der Film- und Computerspiele-Industrie geworden und wird zu medizinischen Zwecken oder im Bereich der Forensik eingesetzt.

Alternative professionelle Verfahren der Fernerkundung wie das Laser-Scanning haben die Entwicklung der Verarbeitung und Auswertung von komplexen Datenbeständen, wie Punktwolken, wesentlich vorangetrieben. Auf dieser Entwicklung gründet sich eine Synergie, von der forthin beide Technologien der Fernerkundung profitieren werden. Wesentliches Entwicklungspotential der Verarbeitung von Punktwolken aus Daten von Laserscans bedeutet die semantische Verarbeitung der erfassten Geometrie. Es bleibt jedoch abzuwarten, ob solche Lösungen auch auf die Produkte photogrammetrischer Auswertungen anzuwenden sind, da das Modell aus einem Laserscann zusätzliche Informationen wie den Reflexionsgrad liefert, die zur Klassifizierung und letztendlich der semantischen Verarbeitung von Punktwolken dienlich sind. Neue Technologien wie kostengünstige und im Betrieb hochgradig autonome Drohnen bedeuten einen einfachen Zugang zur Luftbildphotogrammetrie. Das digitale Geländemodell ist eine bedeutsame Planungsgrundlage und kann mittels dieser Technologien auch für Projekte mit geringerem Umfang kostengünstig erstellt werden.

Von einer steten Entwicklung von Hardware und resultierender Leistungssteigerung ist auszugehen. Die Entwicklung kleinformatiger Bildsensoren wird aufgrund derer vielfältigen Anwendung und des resultierenden, hohen Absatzes leistungsstarke, kompakte Kamerasysteme erbringen. Einen wesentlichen Schritt zur verbesserten Abbildungsqualität für Systeme dieser Klasse werden sphärisch gekrümmte Sensoren bedeuten. Geräte wie Smartphones könnten unter Erfüllung einer qualitativ hochwertigen Abbildungsleistung zum idealen Werkzeug der Nahbereichsphotogrammetrie werden. Die Fusion von Technologien

wie einem tauglichen Kamerasystem, GPS und WI-FI zur Positionsbestimmung sowie Inertialsensoren zur Lagebestimmung des Gerätes selbst und letztendlich leistungsstarke Prozessoren, standardisierte Betriebssysteme und der direkte Zugang zu Internet, prädestinieren solche Geräte für eine Vielzahl photogrammetrischer Anwendungen. Die „mobile Applikation“ 123D Catch oder eine Applikation des Institutes für Visual Computing der ETH<sup>40</sup> Zürich, die aktuell (Ende 2014) noch nicht öffentlich zugänglich ist, verdeutlichen das Potential solcher mobilen Geräte. Das größte Potential liegt jedoch in der Entwicklung entsprechender Software. Webbasierende Lösungen ermöglichen den einfachsten, da plattformübergreifenden, Zugang für eine breite Masse von Anwendern verschiedener Fachbereiche sowie interessierter Amateure. Zudem ermöglicht diese Form des Software-Angebotes die bestmögliche Rückmeldung und Kooperation des Entwicklers mit dem Anwender, was den Lauf der Besserung solcher Systeme deutlich beschleunigt.

---

<sup>40</sup> Eidgenössische Technische Hochschule

## **8. Empfehlung zur Anwendung der Photogrammetrie im Hochschulwesen**

Im Rahmen eines Artikels im Tätigkeitsfeld der ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Arbeitsgruppe 5 (Close-Range Imaging, Analysis and Applications) erfolgte 1992 ein Aufruf durch Peter Waldhäusl (TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung), die Architekturphotogrammetrie umfassend zu etablieren, um Kulturgüter unter Anwendung dieser Technologie ausreichend zu dokumentieren und zu bewahren. Neben kriegerischer Zerstörung und Naturkatastrophen kritisiert er auch die Folgen eines zuweilen destruktiven Städtebaus.

„In Vienna, Austria, and the same in many European towns, the passion for the modern as well as pure pursuit of profit destroyed more than the Second World War did.“ (*Waldhäusl, 1992: 767*)

Des weiteren klagt er Architekten pauschal an, einem solchen Auftrag nicht Folge zu leisten.

„[...] we must admit that photogrammetry has failed. Or the responsible ones. Who are the responsible ones? In our opinion the architects. But we hear from them the contrary, of course.“ (*ebd.: 768*)

Dieser Vorwurf sollte als Aufruf für technische Hochschulen einschlägiger Studienrichtungen verstanden werden. Institutionen wie die Technische Universität Wien verfügen über interdisziplinäre Kompetenzen in den Bereichen Fernerkundung, Informatik und Architektur. Es wäre wünschenswert, diese Kapazitäten zu nutzen. Angehende Architekten sollen frühzeitig mit der Photogrammetrie vertraut werden. Das Lehrangebot kann die Praxis der Photogrammetrie im Sinne eines Auftrages zur Dokumentation fördern. Studenten, Architekten und Interessenten sollte eine Plattform geboten werden, um fachgerechtes Bildmaterial oder rekonstruierte Modelle zu archivieren und auf nationaler Ebene in einer Datenbank zu indizieren. Auf internationaler Ebene können solche Projekte beispielsweise über Datenbanken der ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) verwaltet werden.

„The minimum we photogrammetrists can do, ist to help to collect metric knowledge and image-documents of any monument, which might be used to restore or rebuild in case of damage or to remind others of ist excellence.“ (*ebd.: 768*)



# Verzeichnisse

## Quellenverzeichnis

- A6250-1, Ö. (2013). Aufnahme und Dokumentation von Bauwerken und Außenanlagen. Österreichisches Normungsinstitut.
- Agarwal, S., Snavely, N., Simon, I., Seitz, S., & Szeliski, R. (2011). Building Rome in a Day. (a. -a. machinery, Hrsg.) Communications of the ACM 54.10 , 54 (10), 105-112.
- Agisoft LLC. (2014). Agisoft Photoscan User Manual, Professional Edition, Version 1.0. Abgerufen am 2014 von Agisoft - Photoscan: <http://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>
- Böhler, W., & Marbs, A. (2004). Vergleichende Untersuchung zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Scanner. In T. Luhmann, & T. Luhmann (Hrsg.), Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004). Heidelberg: Wichmann Verlag.
- Blanc, N. (2001). CCD versus CMOS - has CCd imaging come to an end? Photogrammetric Week . Bundesdenkmalamt Österreich (BDA). (11. Juni 2014). Standards der Baudenkmalpflege. (1. Auflage). Wien.
- ClearEdge 3D. (2014). ClearEdge 3D. Abgerufen am 10 2014 von <http://www.clearedge3d.com>
- Day, N. (2010). The American Surveyor. Abgerufen am 5. Juni 2014 von [http://www.amerisurv.com/PDF/LaserScanningVsPhotogrammetryUpdate\(100615\).pdf](http://www.amerisurv.com/PDF/LaserScanningVsPhotogrammetryUpdate(100615).pdf)
- DIN 18710 (2012) Ingenieurvermessung, DIN - Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- Donath, D. (2008). Bauaufnahme und Planung im Bestand (1. Auflage Ausg.). Weimar: Vieweg + Teubner.
- Feininger, A. (2001). Grosse Fotolehre - The Complete Photographer, revised edition (8. Auflage Ausg.). München: Wilhelm Heyne Verlag.
- Fleming, J., & Honour, H. (2000). Weltgeschichte der Kunst (6. Auflage Ausg.). München: Prestel Verlag.
- Foster, S., & David, H. (2014). Integrating 3D Modeling, Photogrammetry and Design (1. Auflage Ausg.). New York, USA: Springer London Heidelberg New York Dordrecht.
- Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF. (2013). Leitfaden Laserscanning im Anlagenbau Vorbereitung und Durchführung von Laserscanningprojekten für die Planung und Dokumentation von industriellen Anlagen. Fraunhofer-Informationszentrum, Raum und Bau IRB. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Georgantas, A., Mathieu, B., & Pierrot-Desseilligny, M. (2012). An accuracy assessment of automated photogrammetric techniques for 3D modeling of complex interiors. XXII ISPRS Congress. Melbourne.
- Grün, A., Remondino, F., & Zhang, L. (2004). Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. The Photogrammetric Record (107), 177-199.
- Hönlinger , B., & Nasse, H. (2009). Verzeichnung. (Z. -C. Lenses, Hrsg.) Abgerufen am 2014 von [http://www.zeiss.com/content/dam/Photography/new/pdf/de/cln\\_archiv/cln33\\_de\\_web\\_special\\_distortion.pdf](http://www.zeiss.com/content/dam/Photography/new/pdf/de/cln_archiv/cln33_de_web_special_distortion.pdf)
- Hampel, U. (2008). Photogrammetrische Erfassung der Verformungs- und Rissentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen. Fakultät Bauingenieurwesen TU Dresden. Dresden: Technische Universität Dresden.
- Hanke, K., & Ebrahim, M. A.-B. (2004). Architekturdokumentation mittels digitaler Photogrammetrie. Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Vermessung und GEOinformation. Innsbruck: Universität Innsbruck.

- Kern, F. (2007). Terrestrisches Laserscanning, kurz und bündig. Fachhochschule Mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, Mainz.
- Kersten, T., & Lindstaedt, M. (2012). Generierung von 3D-Punktwolken durch kamera-basierende low-cost systeme-Workflow und praktische Beispiele. Beiträge zum 121. DVW-Seminar, 69, S. 25-46. Augsburg: Wißner-Verlag.
- Kraus, D., & Pieper, W. (2014). Abbildungsfehler. (H. B.-L. Physik, Hrsg.)
- Lenhardt, K. (2013). Die Bildqualität von Objektiven für die digitale Fotografie . (S. Kreuznach, Hrsg.) Bad Kreuznach.
- Lenhardt, K. (2013). Optik für die digitale Fotografie. (S. Kreuznach, Hrsg.) Bad Kreuznach. Abgerufen am September 2014 von Schneider Kreuznach: [http://www.schneiderkreuznach.com/fileadmin/user\\_upload/bu\\_photo\\_imaging/Foto-Objektive/know\\_how/Die\\_Bildqualitaet\\_von\\_Objektiven\\_fuer\\_die\\_digitale\\_Fotografie.pdf](http://www.schneiderkreuznach.com/fileadmin/user_upload/bu_photo_imaging/Foto-Objektive/know_how/Die_Bildqualitaet_von_Objektiven_fuer_die_digitale_Fotografie.pdf)
- Luhmann, T. (2010). Nahbereichsphotogrammetrie (3. Auflage Ausg.). Berlin: Wichmann.
- Marbs, A., Boochs, F., Hmida, H. B., & Truong, H. Q. (2012). Wissensbasierte Detektion von Objekten in Punktwolken für Anwendungen im Ingenieurbereich. Messtechnik, i3mainz – Institut für Raumbezogene Informations- und, Mainz.
- Marchesi, J. J. (1980). Ilford Negativtechnik (1. Auflage Ausg.). Genf: Verlag Jean Spinatsch.
- Marchesi, J. J. (2011). PHOTOKOLLEGIUM 4: Theorie und Grundlagen der digitalen Fotografie (1. Auflage Ausg., Bd. 4). Gilching: Verlag Photographie.
- McCarthy, J. (2014). Multi-Image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement. Journal of Archeological Science (43).
- Ng, R. (2006). DIGITAL LIGHT FIELD PHOTOGRAPHY. Stanford, USA.
- OCist, P. G. (o. J.). Das Cistercienserkloster Heiligenkreuz. baden: Meixner Verlags GmbH.
- Pastorelli, R. (Juni 1983). Die Fotogrammetrie - ein modernes Aufnahmesystem. Schweizer Ingenieur und Architekt , 101.
- Peträhn, G. (2010). Grundlagen der Vermessungstechnik (5. Auflage Ausg.). Berlin: Cornelsen.
- Photometrics - High Performance EMCCD & CCD Cameras for Life Sciences. (2011). Abgerufen am 2014 von <http://www.photometrics.com/resources/whitepapers/pdfs/dynamic-range-calculator.pdf>
- Pierrot-Deseilligny, M., De Luca, L., & Remondino, F. (2011). Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation. Geoinformatics FCE CTU Journal (6).
- Präkel, D. (2010). Belichtung (1. Auflage Ausg.). München: Addison Wesley Verlag.
- Recap Product News. (26. August 2014). (Autodesk, Produzent) Abgerufen am 2. Oktober 2014 von Use crowd source photos to generate 3D models: <http://www.recapproduct.com/blog/2014/08/use-crowd-source-photos-to-generate-3d-models.html>
- Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T., & Troisi, S. (2012). Low-cost und open-source Lösungen für die automatisierte Generierung von 3D-Punktwolken - ein kritischer Überblick. Terrestrisches Laserscanning 2012 , 69, 63-80.
- Romer, B., & Ostermann, M. (2007). The Technical Evolution of Photography in the 19th Century. In M. R. Peres (Hrsg.), Focal Encyclopedia of Photography (4. Auflage Ausg.). Oxford: Elsevier.
- Scherer, M. (2010). Vermessung in den Bereichen Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. (C. K. Ingenieurvermessung, Hrsg.) Bochum.
- Temiz, M. S., & Külür, S. (2008). Rectification of Digital Close Range Images: Sensor Models, Geometric ImageTransformations and Resampling. ISPRS - The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences , XXXVII.

- Thöniß, T. (2004). *Abbildungsfehler und Abbildungsleistung optischer Systeme*. (L. P. Co.KG, Hrsg.)
- Thome, M. (2007). *Kirche und Klosteranlage der Zisterzienserabtei Heiligenkreuz*. Petersberg: Michael Imhof Verlag.
- Waldhäusl, P. (1992). Defining the future of architectural photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29B5, 767-770.
- Walter, T. (2005). *MediaFotografie - analog und digital* (1. Auflage Ausg.). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Weber, E. (1986). *Fotopraktikum*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Wiedemann, A. (2004). *Handbuch Bauwerksvermessung*. Basel: Springer Basel AG.
- Wu, C., (2014). Critical configurations for radial distortion self-calibration, in: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014 IEEE Conference on. IEEE, pp. 25–32.

## Weiterführende Literatur

- Abdel-Wahab, M., Wenzel, K., Fritsch, D., 2012. Efficient reconstruction of large unordered image datasets for high accuracy photogrammetric applications, in: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Melbourne, Australia. XXII ISPRS Congress. pp. 1–6.
- Agostini, S., n.d. Architectural photogrammetry: software and methods. Agostini.
- Alsadik, B., Remondino, F., Menna, F., Gerke, M., Vosselman, G., 2013. Robust extraction of image correspondences exploiting the image scene geometry and approximate camera orientation. *Int. Arch. of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40, 5.
- Baltsavias, E.P., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing* 54, 83–94.
- Boehler, W., Vicent, M.B., Marbs, A., 2003. Investigating laser scanner accuracy. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34, 696–701.
- Bothe, T., Gesierich, A., Li, W., Kopylow, C.V., Kopp, N., Juptner, W., 2007. 3D-Camera for scene capturing and augmented reality applications, in: *3DTV Conference, 2007*. IEEE, pp. 1–4.
- Clarke, T.A., Fryer, J.G., 1998. The development of camera calibration methods and models. *The Photogrammetric Record* 16, 51–66.
- D' Annibale, E., 2011. *Image Based Modeling from Spherical Photogrammetry and Structure For Motion. The case of the Treasury, Nabatean Architecture in Petra*, in: XXIIIrd International CIPA Symposium, Prague (Czech Republic).
- Falkingham, P.L., 2013. Generating a photogrammetric model using Visual SFM, and post-processing with meshlab. Brown University, Tech. Rep.
- Falkingham, P.L., 2012. Acquisition of high resolution three-dimensional models using free, open-source, photogrammetric software. *Palaeontologia Electronica* 15, 15.
- Furukawa, Y., Ponce, J., 2010. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 32, 1362–1376.
- Godding, D.-I.R., 2002. Geometrische Kalibrierung und Orientierung digitaler Bildaufnahmesysteme. AICON 3D Systems GmbH.
- Goesele, M., Snavely, N., Curless, B., Hoppe, H., Seitz, S.M., 2007. Multi-view stereo for community photo collections, in: *Computer Vision, 2007. ICCV 2007*. IEEE 11th International Conference on. IEEE, pp. 1–8.
- Golparvar-Fard, M., Bohn, J., Teizer, J., Savarese, S., Peña-Mora, F., 2011. Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. *Automation in Construction* 20, 1143–1155.
- Gruen, A., Remondino, F., Zhang, L., 2003. Image-based Reconstruction and Modeling of the Great Buddha Statue in Bamiyan, Afghanistan. *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES* 34, 173–175.
- Grün, A., Remondino, F., Zhang, L., 2004. Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *The Photogrammetric Record* 19, 177–199.
- Hanke, K., n.d. Architekturphotogrammetrie–vom Fassadenplan zu Visual Reality. na.
- Hendrickson, W.A., Ward, K.B., 1975. Atomic models for the polypeptide backbones of myohemerythrin and hemerythrin. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 66, 1349–1356.
- Hugemann, W., 2010. Correcting lens distortions in digital photographs. Ingenieurbüro Morawski+Hugemann: Leverkusen, Germany.

- Kersten, T., Acevedo Pardo, C., 2002. 3D-Objektaufnahme von historischen Gebäuden durch digitale Architekturphotogrammetrie für Visualisierungsaufgaben und Facility Management. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- KERSTEN, T., MECHELKE, K., LINDSTAEDT, M., TSCHIRSCHWITZ, F., SCHREYER, K., MAZIULL, L., n.d. Bildbasierte Low-Cost-Systeme zur automatischen Generierung von 3D-Modellen archäologischer Fundstücke in Äthiopien und Katar.
- Kersten, T.P., Lindstaedt, M., 2012. Automatic 3D object reconstruction from multiple images for architectural, cultural heritage and archaeological applications using open-source software and web services. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation* 2012, 727–740.
- Li, Y., Snavely, N., Huttenlocher, D.P., 2010. Location recognition using prioritized feature matching, in: *Computer Vision–ECCV 2010*. Springer, pp. 791–804.
- Luhmann, T., 2010. Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 558–569.
- Ma, L., Chen, Y., Moore, K.L., 2004. Rational radial distortion models of camera lenses with analytical solution for distortion correction. *International Journal of Information Acquisition* 1, 135–147.
- Maneksha, S., Harry, T.V., 1975. Lorazepam in sexual disorders. *Br J Clin Pract* 29, 175–176.
- Marbs, A., Boochs, F., Hmida, H.B., Truong, H., 2010. Wissensbasierte Objekterkennung in 3D-Punktwolken und Bildern, in: *DGPF-Tagungsband, 3-Ländertagung DACH Conference Wien*. pp. 220–227.
- Nister, D., 2004. Automatic passive recovery of 3D from images and video, in: *3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004. Proceedings. 2nd International Symposium on. IEEE*, pp. 438–445.
- Pollefeys, M., Van Gool, L., Vergauwen, M., Verbiest, F., Cornelis, K., Tops, J., Koch, R., 2004. Visual modeling with a hand-held camera. *International Journal of Computer Vision* 59, 207–232.
- Portalés, C., Lerma, J.L., Navarro, S., 2010. Augmented reality and photogrammetry: A synergy to visualize physical and virtual city environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 134–142.
- Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T.P., Troisi, S., 2012a. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation—A critical overview, in: *Progress in Cultural Heritage Preservation*. Springer, pp. 40–54.
- Remondino, F., Kersten, T., Hebebrandstrasse, L., 2012b. Low-cost-und open-source-Lösungen für die automatisierte Generierung von 3D Punktwolken—ein kritischer Überblick. *Terrestrisches Laserscanning* 63–80.
- Rhodes, E., 2000. Guides to Quality in Visual Resource Imaging. *Microform & Imaging Review* 29, 143–146.
- Richter, K., Mader, D., Seidl, K., Maas, H.-G., 2013. Development of a geometric model for an all-reflective camera system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 86, 41–51.
- Rieke-Zapp, D.H., Bommer-Denss, B., Ernst, D., 2010. Small format digital photogrammetry for applications in the earth sciences. *Proceedings, ISPRS Commission 1501*, 516–519.
- Scheidegger, C.E., Fleishman, S., Silva, C.T., 2005. Triangulating Point Set Surfaces with Bounded Error., in: *Symposium on Geometry Processing*. Citeseer, pp. 63–72.
- Schwartz, M., Fodor, O., 1975. [Therapeutic possibilities and risks in hepatic cirrhosis with water-electrolyte metabolism disorders]. *Rev Med Interna Neurol Psihiatr Neurochir Dermatovenerol Med Interna* 27, 219–225.
- Sensors integration for smartphone navigation: performances and future challenges - *Articolo\_definitivo.pdf*, n.d.

- Simon, I., Seitz, S.M., 2008. Scene segmentation using the wisdom of crowds, in: *Computer Vision–ECCV 2008*. Springer, pp. 541–553.
- Snaveley, N., Garg, R., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008a. Finding paths through the world’s photos, in: *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. ACM, p. 15.
- Snaveley, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008b. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80, 189–210.
- Snaveley, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2006. Photo tourism: exploring photo collections in 3D, in: *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. ACM, pp. 835–846.
- Spírchez, T., 1975. [Treatment of ulcerative colitis]. *Rev Med Interna Neurol Psihiatr Neurochir Dermatovenerol Med Interna* 27, 189–200.
- Strecha, C., von Hansen, W., Van Gool, L., Fua, P., Thoennessen, U., 2008. On benchmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery, in: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on*. IEEE, pp. 1–8.
- Szeliski, R., 2006. Image alignment and stitching: A tutorial. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision* 2, 1–104.
- Torres, J.C., Arroyo, G., Romo, C., De Haro, J., 2012. 3D Digitization using Structure from Motion, in: *CEIG-Spanish Computer Graphics Conference*.
- Tschirschwitz, F., KERSTEN, T.P., ZOBEL, K., n.d. *Interaktive Visualisierung und Steuerung von 3D-Modellen und Punktwolken mit Low-Cost-Systemen*.
- Uffenkamp, V., 1993. State of the art of high precision industrial photogrammetry, in: *Third International Workshop on Accelerator Alignment*.
- Valença, J., Dias-da-Costa, D., Júlio, E., Araújo, H., Costa, H., 2013. Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing. *Measurement* 46, 433–441.
- VOLGGER, M., 2008. *Lichtmikroskopie-Theorie und Anwendung*. Skriptum, Universität Wien, Wien.
- Wenzel, K., Rothermel, M., Fritsch, D., Haala, N., 2013. Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci* 251–258.
- Werner, T., Schaffalitzky, F., Zisserman, A., 2002. Automated architecture reconstruction from close-range photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial* 34, 352–359.
- Wu, C., 2014. Critical configurations for radial distortion self-calibration, in: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2014 IEEE Conference on*. IEEE, pp. 25–32.
- Xiao, Z., Liang, J., Yu, D., Asundi, A., 2011. Large field-of-view deformation measurement for transmission tower based on close-range photogrammetry. *Measurement* 44, 1705–1712

## Abbildungsverzeichnis

Für Abbildungen ohne Quellenverweis gilt der Autor dieser Arbeit als Urheber der Illustrationen, Aufnahmen und Darstellungen.

Abb. 2.1-1 Stereocomparator von Carl Zeiss, 1920.....	7
Quelle: <a href="http://www.liveauctioneers.com">http://www.liveauctioneers.com</a>	
Abb. 2.1-2 Analytischer, computergestützter Plotter Leica SD2000, 1994.....	8
Quelle: <a href="http://www.isprs.org">www.isprs.org</a>	
Abb. 2.2.2 Orthophoto und Punktwolke, Archivoltenportal der Stiftskirche Heiligenkreuz.....	10
Abb. 2.2.3 Orthophoto und Mesh, Archivoltenportal der Stiftskirche Heiligenkreuz.....	11
Abb. 2.2.4 Photographische Aufnahme und projektive Entzerrung einer Fassade.....	13
Abb. 2.2.5 vgl. projektive Entzerrung und. Orthophoto einer Fassade.....	14
Abb. 2.2.6 Flächenabwicklung einer elliptisch zylindrischen Arkade (Berlin, Märchenbrunnen).....	15
Quelle: <a href="http://www.b-f-k.de">http://www.b-f-k.de</a> / Olaf Prümm	
Abb. 2.2.7 Höhenmodell (DEM) Geländemodell Liesingbach, Wien Oberlaa.....	16
Abb. 2.3 kodierte und nicht kodierte Messmarken.....	17
Abb. 2.3.2-1 Gliedermaßstab.....	18
Quelle: <a href="http://commons.wikimedia.org">http://commons.wikimedia.org</a> Photograph Isabelle Grosjean	
Abb. 2.3.2-2 Messlatte.....	18
Quelle: <a href="http://commons.wikimedia.org">http://commons.wikimedia.org</a> Illustration Joachim Bäcker	
Abb. 2.3.4 Laser Distanzmessgerät.....	19
Quelle: <a href="http://www.leica-geosystems.at">http://www.leica-geosystems.at</a>	
Abb. 2.3.5 ungünstige Reflexionen.....	20
Abb. 2.3.5-1 Nivellierlatte – Latte mit E-Teilung / Latte mit Strichcode.....	20
Quelle: <a href="http://www.vermex.de">vermex.de</a>	
Abb. 2.3.5-2 Rotationslaser und Messmarken, schematisch.....	21
Abb. 2.3.6-1 Leica Builder Theodolit.....	23
Quelle: Leica Geosystems	
Abb. 2.3.6-1 Leica Multistation Nova.....	23
Quelle: Leica Geosystems	
Abb. 2.5-1 Luftbildkamera Leica.....	32
Quelle: Leica Geosystems	
Abb. 2.5-2 Industrielles Multikamerasystem.....	32
Quelle: Teledyne Dalsa	
Abb. 2.5-3 innere und äußere Orientierung.....	33
Abb. 2.5.1-1 Normalfall.....	35
Abb. 2.5.1-2 Target ISO 12233 Test Chart.....	36
Quelle: Illustration von Stephen H. Westin, Cornell University	
Abb. 2.5.2-1 geminderte Messgenauigkeit in Aufnahme­richtung.....	38
Abb. 2.5.2-2 angepasste Aufnahmeordnung mit günstiger Schnittgeometrie.....	39
Abb. 2.5.2-3 Abbildung der Perspektive unter verschiedenen Bildwinkeln.....	40
Abb. 2.6-1 Orthophoto Versuchsobjekt.....	42
Abb. 2.6-2 Bildüberlappung der Aufnahmeserie (1) aus Photoscan-Pro survey-data.....	43
Abb. 2.6.1 Befund aus Kalibration der Kamerasysteme Nikon(1) und Sony(2).....	45
Abb. 2.6.2-1 Schnittdarstellung des Objektes mit und ohne Daten der Kalibrierung.....	46
Abb. 2.6.2-2 dreidimensionale Abweichung der rekonstruierten Modelle.....	47

Abb. 2.7.1-1 3D-Druck, Kathedrale Notre-Dame von Reims .....	52
Quelle: Dale Nicholls, 3dprintingsystems.com	
Abb. 2.7.1-1 3D-Druck, Digital Grottesque Project, Printing Architecture .....	52
Quelle: Michael Hansmeyer und Benjamin Dillenburger, digital-grottesque.com	
Abb. 2.7.2-1 CyArc - Punktwolke: Chichén Itzá, El Caracol (Observatorium) 900n.Chr.....	53
Quelle: Screenshot 3D-Modell, cyark.org (11.2014)	
Abb. 2.7.2-2 CyArc - VR-Modell: Chichén Itzá, El Caracol .....	53
Quelle: Screenshot 3D-Modell, cyark.org (11.2014)	
Abb. 2.7.2-3 Smithsonian x3D explorer.....	54
Quelle: Screenshot Smithsonian x3D, 3d.si.edu (11.2014)	
Abb. 2.7.2-4 potree, Pompei.....	54
Quelle: Screenshot potree.org (11.2014) / Pointcloud by CNRS-MAP-Gamsau Laboratory	
Abb. 2.7.2-5 Lidarview, Geländemodell Liesingbach.....	54
Quelle: Projekt des Autors, Screenshot: lidarview.com (11.2014)	
Abb. 2.7.2-6 sketchfab, Archivoltentportal der Westfassade der Stiftskirche Heiligenkreuz.....	55
Quelle: Projekt des Autors, Screenshot: sketchfab.com (11.2014)	
Abb. 2.7.2-7 Augmented Reality.....	56
Quelle: urbasee.com	
Abb. 2.7.2-8 Autodesk ReCap, Fraterie, Stift Heiligenkreuz.....	56
Abb. 2.8.2 Spheron Scenecam VR und Sceneworks.....	61
Quelle: spheron.com	
Abb. 2.8.3-1 Building Rome in a Day, Pointcloud Kolosseum.....	62
Quelle: University of Washington	
Abb. 2.8.3-1 Buddha Statuen Bamiyan vor und nach der Zerstörung.....	63
Quelle: wikipedia.org	
Abb. 2.8.3-2 Buddha Statuen Bamiyan Rekonstruktion mittels Recap 360.....	63
Quelle: recapprodukt.com	
Abb. 2.8.4 Signalisierter Probekörper, Stahlbetonbauteil unter Schubbeanspruchung.....	65
Quelle: Probelastung von Massivbaukonstruktionen, Gregor Schacht, tudresden.de	
Abb. 2.8.5-1 3D Modell des Geländeabschnittes Liesingbachufer .....	66
Abb. 2.8.5-2 Orthophoto mit Überblendung eines Höhenlinienmodells zu 0,5 Meter .....	67
Abb. 2.8.5-3 Schnitt durch das Bachbett und die Brücke.....	67
Abb. 3-2 Photogrammetrisches Messprinzip.....	70
Abb. 3-3 Äußere Orientierung einer Aufnahme .....	71
Abb. 3-4 Ermittlung der äußeren Orientierung nach drei bekannten Punkten .....	72
Abb. 3.1-1 Photographische Aufnahme und ebene Projektivtransformation.....	73
Abb. 3.2-1 Stereonormalfall .....	74
Abb. 3.3-1 Mehrbildtriangulation – Strahlenbündel dreier Aufnahmen .....	76
Abb. 3.3-2 Merkmalsanalyse, schematische Darstellung vom Differenzbild zum Deskriptor .....	77
Abb. 3.3-3 Korrespondierende Merkmalspunkte (Feature Points) zweier Aufnahmen .....	78
Abb. 3.3-4 Verknüpfungspunkte zweier Aufnahmen - Recap360 .....	79
Abb. 3.3-5 Sparse Pointcloud mit Kamerapositionen .....	80
Abb. 3.3-6 Parametrische Bereinigung der Sparse Pointcloud nach der Rekonstruktionsunsicherheit ....	80
Abb. 3.4-1 Laserscanner .....	81
Quelle: Leica Geosystems	
Abb. 3.4-2 Schematische Darstellung eines Messvorganges .....	81
Quelle: TU München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, gug.bgu.tum.de	

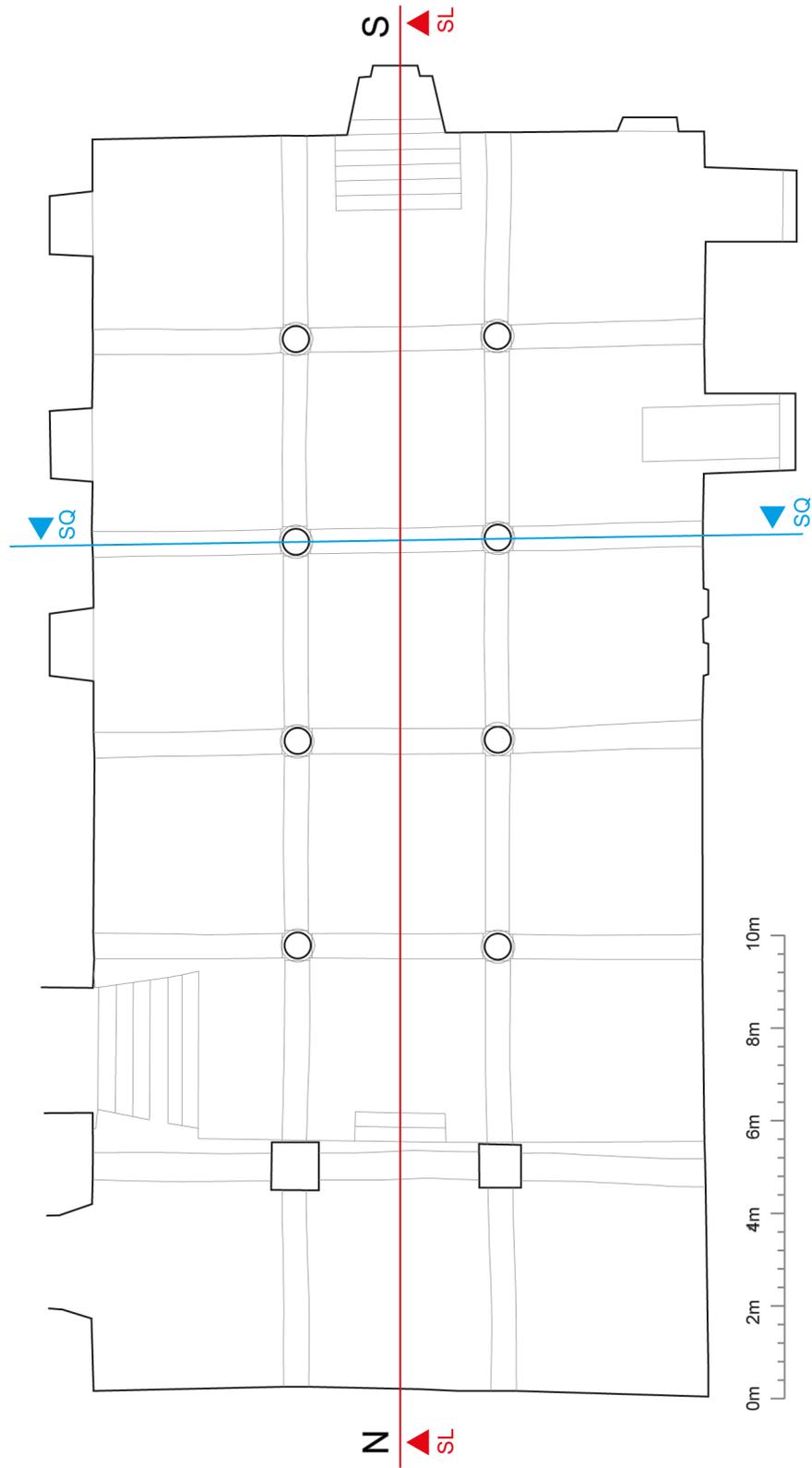
Abb. 3.4-3 Laserscanner, sichttote Bereiche, Ecken und zunehmende Rasterweite.....	83
Abb. 4.1-1 Brennweite – Gegenstandsweite – Bildweite.....	88
Abb. 4.1-2 Bildwinkel und Aufnahmeformat .....	89
Abb. 4.1-3 Objektebene – Bildebene – Strahlenschnitt-> Steukreis.....	90
Abb. 4.1-4 Schärfentiefe .....	90
Abb. 4.2-1 Schnittdarstellung Objektiv: Zeiss 25mm f/2 .....	91
Quelle: zeiss.de, Überarbeitung des Autors	
Abb. 4.2-2 Skala Schärfentiefe bei gestelltem Blendenwert.....	91
Abb. 4.3.1 Schematische Darstellung, chromatische Aberration und Korrektur.....	94
Abb. 4.3.2 Schematische Darstellung, sphärische Aberration und Korrektur .....	95
Abb. 4.3.3 Schematische Darstellung, Koma und Korrektur.....	96
Abb. 4.3.4 Schematische Darstellung, Astigmatismus und Korrektur.....	96
Quelle: Astigmatismus, spektrum.de (10.2014) Lexikon der Physik	
Abb. 4.3.5 Schematische Darstellung, Bildfeldwölbung und Korrektur .....	97
Abb. 4.3.6 Abbildungsfehler Verzeichnung.....	98
Abb. 4.4-1 Schematische Darstellung, Schärfentiefe und hyperfokale Distanz .....	100
Abb. 4.6 Stilisierte Darstellung Dunkelbildrauschen.....	105
Abb. 4.11 Schematische Darstellung von Sensorformaten und Kamerasystemen .....	113
Abb. 4.11.2 Bayer-Mosaikfilter .....	116
Quelle: wikipedia.org, Illustration von Cburnett	
Abb. 4.12-1 Motivkontrast vs. Dynamikumfang .....	117
Abb. 4.12-2 Schematische Darstellung, Tonwertumfang 8bit und 16bit Grafik .....	118
Abb. 4.13 HDR Bildsequenz und Ergebnis.....	120
Abb. 4.15-1 Korridor – und konvergente Aufnahmeordnung.....	122
Abb. 4.15-3 Stabilisierung der Geometrie durch Abbildung zusätzlicher räumlicher Ebenen.....	123
Abb. 5.1-1 Grundriss: Stift Heiligenkreuz – Kreuzgang & Klausurostflügel.....	126
Quelle: Brigitta Lauro, Karl Habsburg-Lothringen: Die Grabstätten der Habsburger - Kunstdenkmäler einer europäischen Dynastie. Wien: Brandstätter Verlag , 2007	
Abb. 5.2-1 Panorama Ostdurchgang und Fraterie.....	127
Abb. 5.2-2 Grundriss: Ostdurchgang und Fraterie.....	128
Abb. 5.2-3 Schnitt: an Scheidbögen und angrenzenden Jochen .....	128
Abb. 5.2-4 Konsolen .....	129
Abb.5.2-5 Rundpfeiler .....	129
Abb. 5.2-6 Rundpfeiler mit Halsring .....	129
Abb. 5.2-7 Fugenmalerei Kreuz – Bereich Original und saniert .....	130
Abb. 5.2-8 Variationen im Bodenbelag .....	130
Abb. 5.4-1 Kapitellzone Rundpfeiler Aufnahmemaßstab Objekt Fraterie.....	133
Abb. 5.4-2 Kapitellzone Rundpfeiler Aufnahmemaßstab Objekt.....	133
Abb. 5.5-1 Kamera und Stativ Vorort.....	134
Abb. 5.6-1 Lichtverteilung Fraterie, Gewölbeuntersicht .....	135
Abb. 5.6-2 Aufnahmeordnung Innenraum Allgemein .....	136
Abb. 5.6-3 Vergleich Raum Quer und Hochformat .....	137
Abb. 5.6-4 Arbeitsskizze Messmarken und Distanzen .....	138
Abb. 5.6.1-1 Aufnahmeordnung 1 .....	139
Abb. 5.6.2 Aufnahmeordnung 2.....	140
Abb. 5.6.3 Aufnahmeordnung 3.....	141
Abb. 5.8.1-1 Verortete Messmarken .....	147
Abb. 5.8.1-2 Bereinigung von Ausreißern .....	148

Abb. 5.8.1-3 Organigramm zur Auswertung unter Photoscan Pro.....	150
Abb. 5.8.2-2 Marker Recap 360 .....	152
Abb. 5.8.2-3 Organigramm zur Auswertung unter Recap 360.....	153
Abb. 5.8.3 Organigramm zur Auswertung unter VisualSFM.....	154
Abb. 5.9-1 Grundriss und Schnittebenen.....	157
Abb. 5.9-2 Schnitt SL Nord-Süd .....	157
Abb.5.9-3 Schnitt SQ West-Ost .....	158
Abb. 5.9.1-1 Aufsicht Punktwolke - Ordnung 1 – Photoscan .....	158
Abb. 5.9.1-2 Schnitt SL Ordnung 1 – Photoscan Pro.....	159
Abb. 5.9.1-3 Arbeitsskizze Vermessung am Vorort.....	160
Abb. 5.9.1-4 Vermessung am Modell.....	160
Abb. 5.9.2-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 1, Recap 360 .....	161
Abb. 5.9.2-2 Schnitt SL Ordnung 1 – Recap 360.....	161
Abb. 5.9.2-3 Deformation der Rundpfeiler aus Ordnung 1, Recap 360.....	161
Abb. 5.9.3-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 1, VisualSFM].....	162
Abb. 5.9.3-2 Schnitt SL Ordnung 1 – VisualSFM] .....	162
Abb. 5.9.4-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 2, Photoscan Pro.....	163
Abb. 5.9.4-2 Schnitt SL Ordnung 2 – Photoscan Pro.....	163
Abb. 5.9.5-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 2, Recap 360 .....	164
Abb. 5.9.5-2 Schnitt SL Ordnung 2 – Recap 360.....	164
Abb. 5.9.5-2 Deformation der Rundpfeiler aus Ordnung 2 und Recap 360.....	165
Abb. 5.9.6-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 2, VisualSFM .....	165
Abb. 5.9.6-2 Schnitt SL Ordnung 2 – VisualSFM .....	165
Abb. 5.9.7-1 Vergleich Referenzmodell und Modell aus Ordnung 3, VisualSFM .....	166
Abb. 5.9.7-2 Schnitt SL Ordnung 3 – VisualSFM .....	166
Abb. 5.11-1 Schnittdarstellung dichte Punktwolke – Darstellung Recap .....	168
Abb. 5.11-2 Flächenmodell in webbasierender, interaktiver 3D Darstellung .....	168
Abb. 5.11-3 interaktive Präsentation des Flächenmodells auf einem mobilen Endgerät.....	169
Abb. 5.11-4 Visualisierung eines Torusknoten im Umfeld des Flächenmodells .....	169
Abb. 5.11-5 Orthophoto Ansicht Nord.....	170
Abb. 5.11-6 Orthophoto Ansicht Süd.....	170
Abb. 5.11-7 Orthophoto Ansicht West.....	170
Abb. 5.11-8 Orthophoto Ansicht Ost.....	170
Abb. 5.11-9 Orthophoto Ansicht Untersicht Gewölbe .....	171

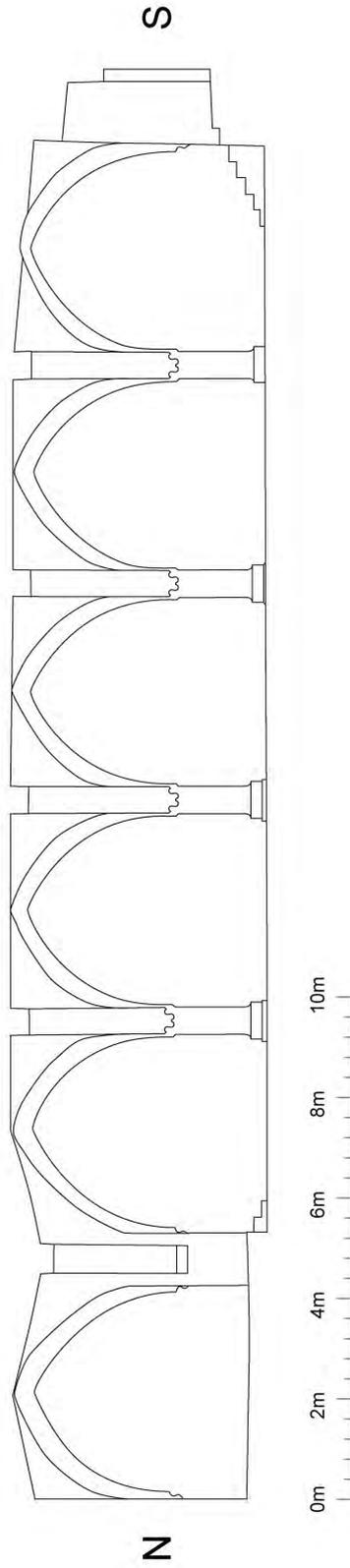
## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 Auszug über Angaben zur Aufnahmedichte nach Aufnahmeelement laut Önorm A 6250-1 .....	26
Tabelle 2 Klassifizierung der Messgenauigkeit nach DIN 18710-1 .....	30
Tabelle 3 Genauigkeitsklassen in Abhängigkeit vom Zweck der Aufnahme nach DIN 18710-2 .....	30
Tabelle 4 Genauigkeit der photogrammetrischen Auswertung nach Kamerasystem (vgl. Elcovision 2014) .....	40
Tabelle 5 Beschreibung der Kamerasysteme zur Genauigkeitsuntersuchung .....	42
Tabelle 6 Auswertung nach Kamerasystem unter der Anwendung Photoscan.....	44
Tabelle 7 Protokoll der Transformation aus VisualSfm.....	49
Tabelle 8 Abweichung der Auswertung nach untersuchten Software-Lösung .....	49
Tabelle 9 Gegenüberstellung der Aufnahmeordnungen, Aufnahmeobjekt Fraterie .....	141
Tabelle 10 Funktionsumfanges der Anwendungen Photoscan Pro, Recap 360 und VisualSFM .....	145
Tabelle 11 Angaben zur photogrammetrischen Auswertung nach Software und Aufnahmeordnung .....	156
Tabelle 12 Angaben zur Dauer der photogrammetrischen Rekonstruktion .....	156
Tabelle 13 Genauigkeit des Modells aus Aufnahmeordnung 1 unter Photoscan Pro .....	159

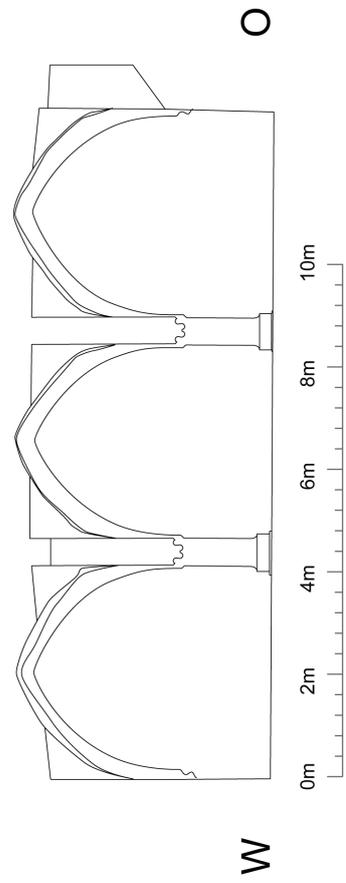
Grundriss Fraterie



Schnitt SL



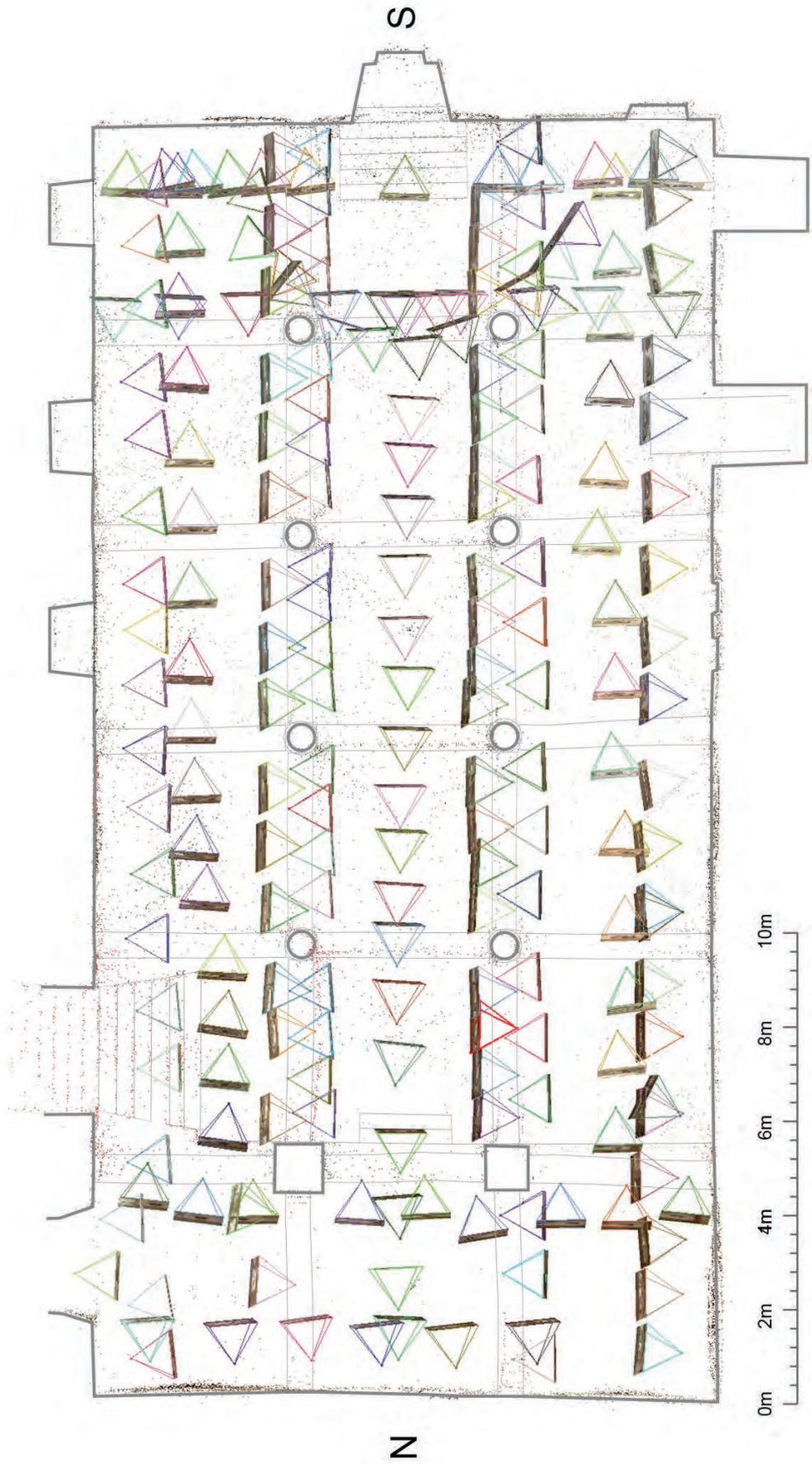
Schnitt SQ



Aufnahmeordnung 1



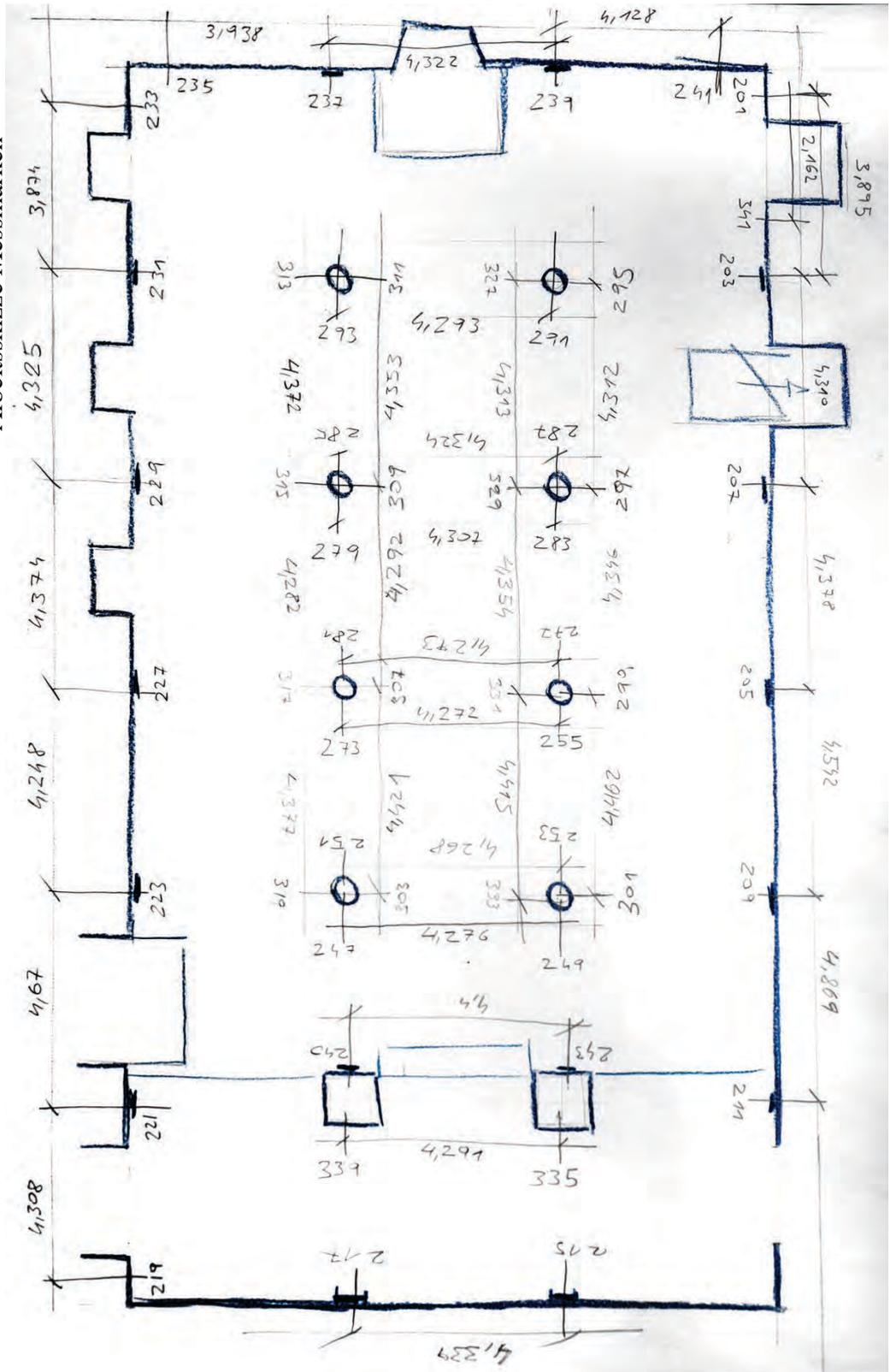
Aufnahmeordnung 2



Aufnahmeordnung 3

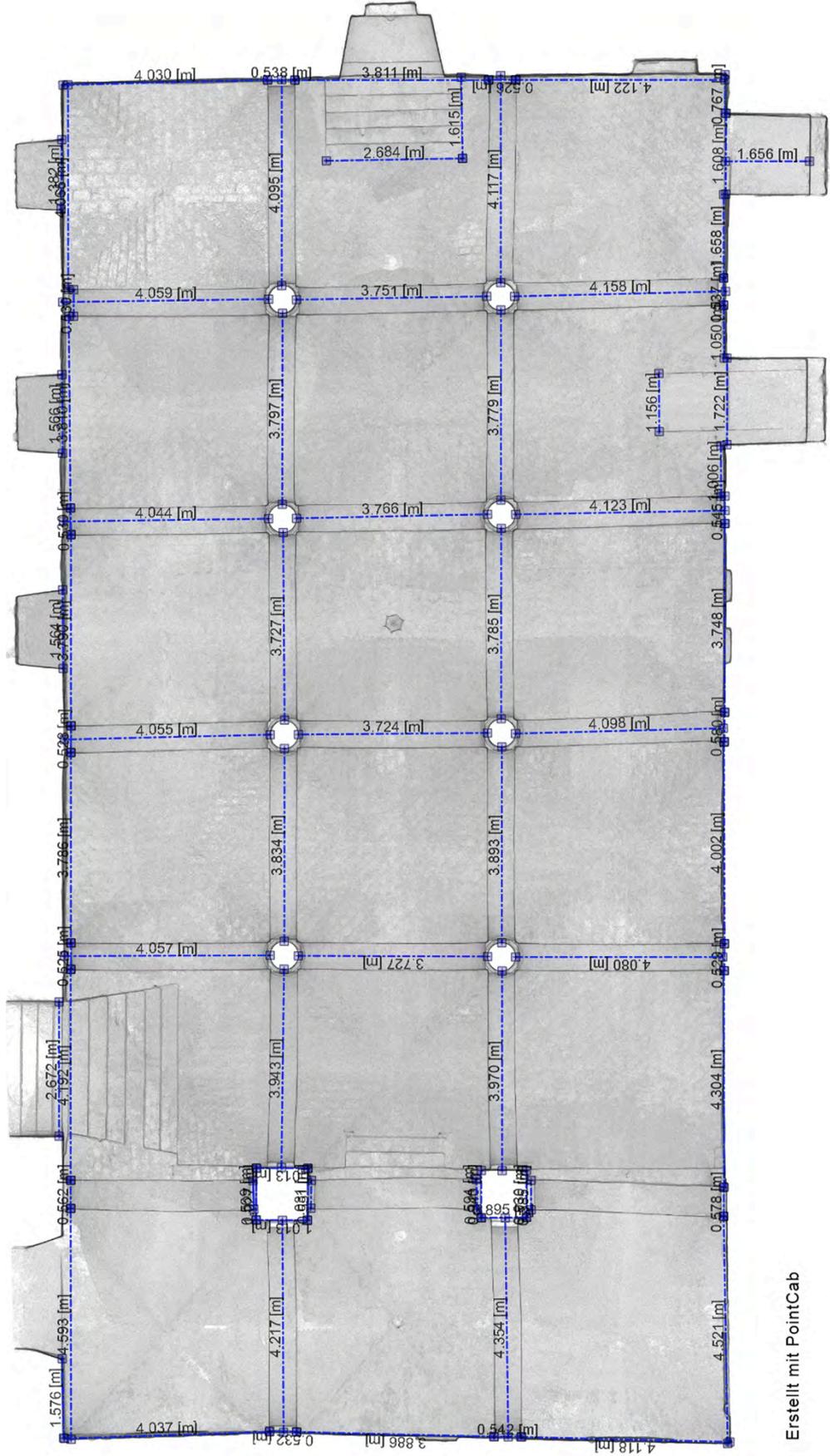


Arbeitsskizze Messmarken



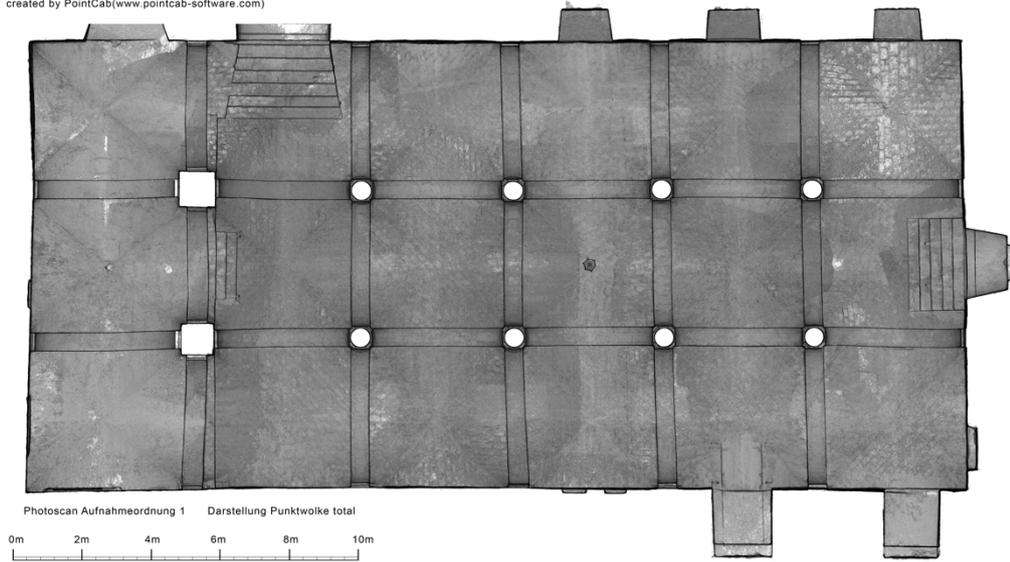


# Überprüfung auf Maßhaltigkeit

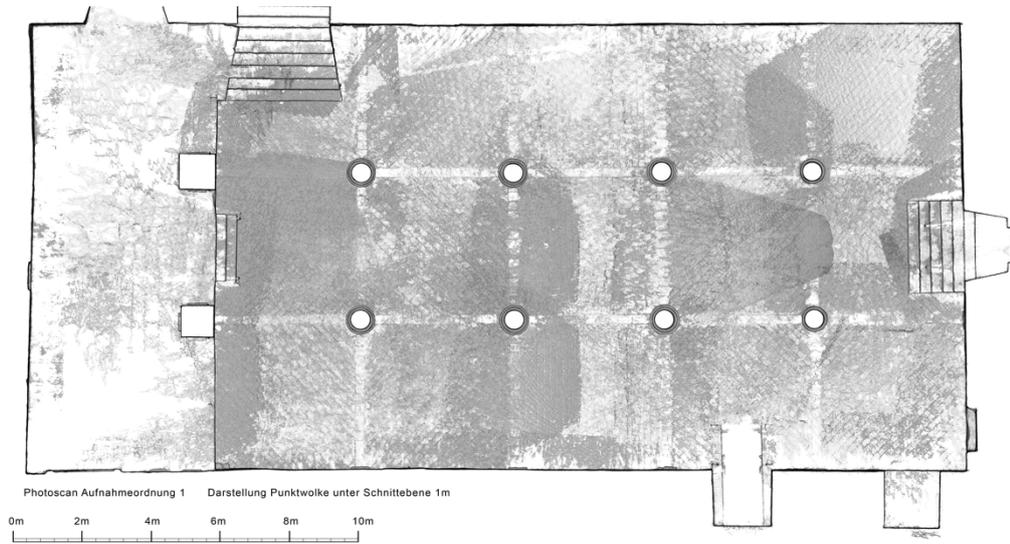


Erstellt mit PointCab

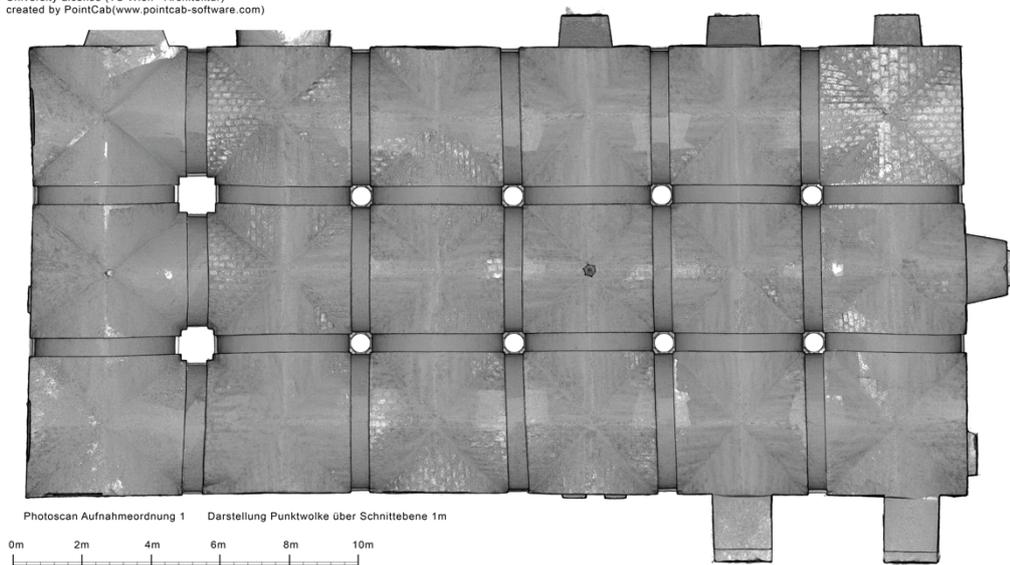
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



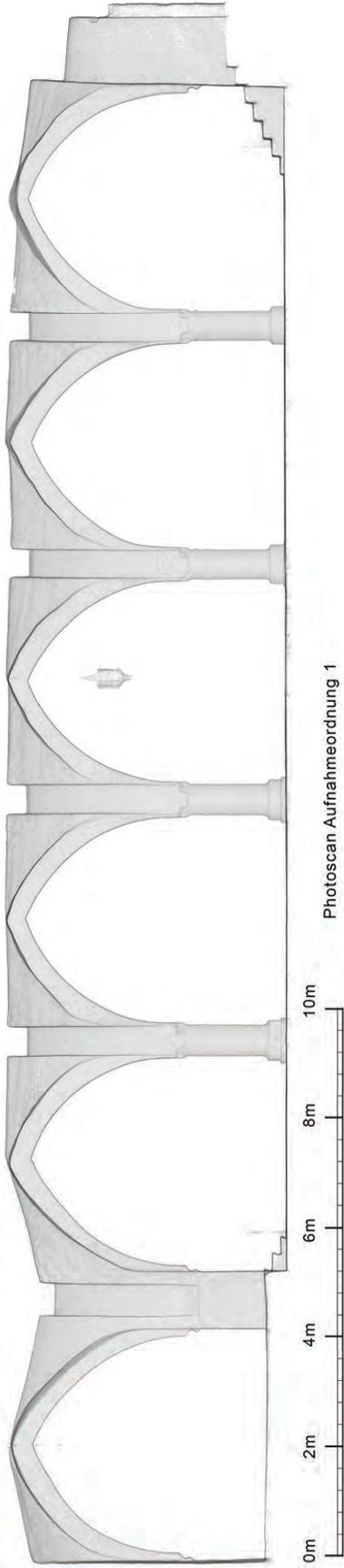
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



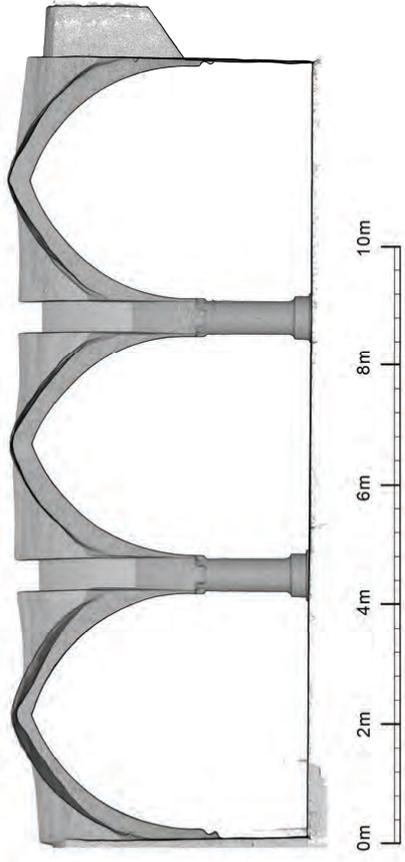
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



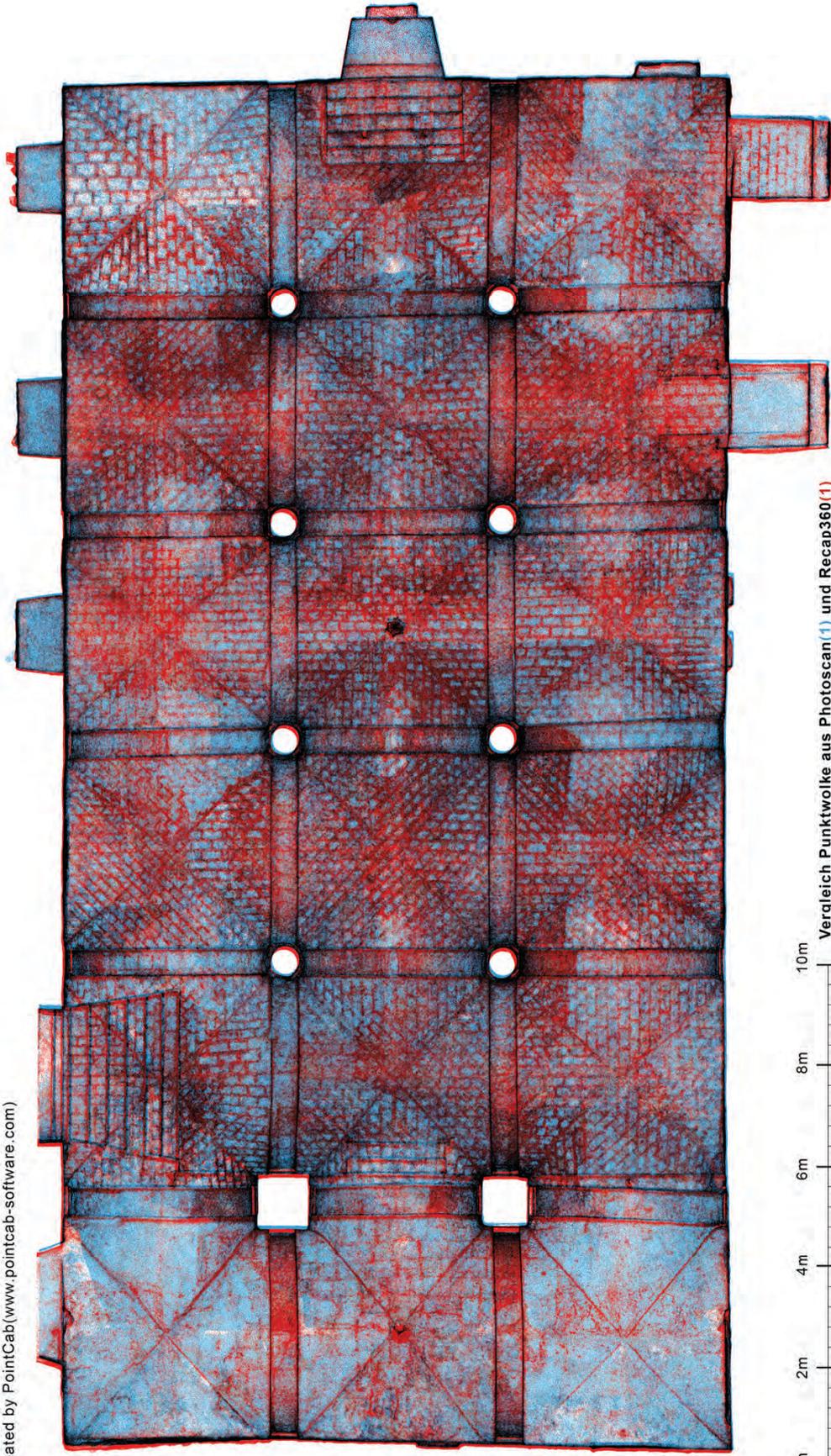
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

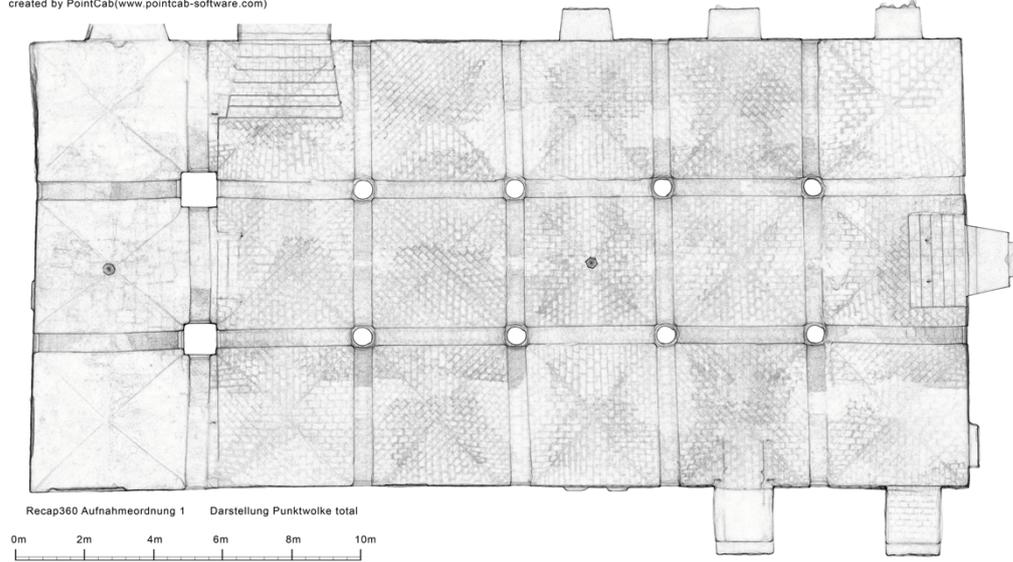


University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

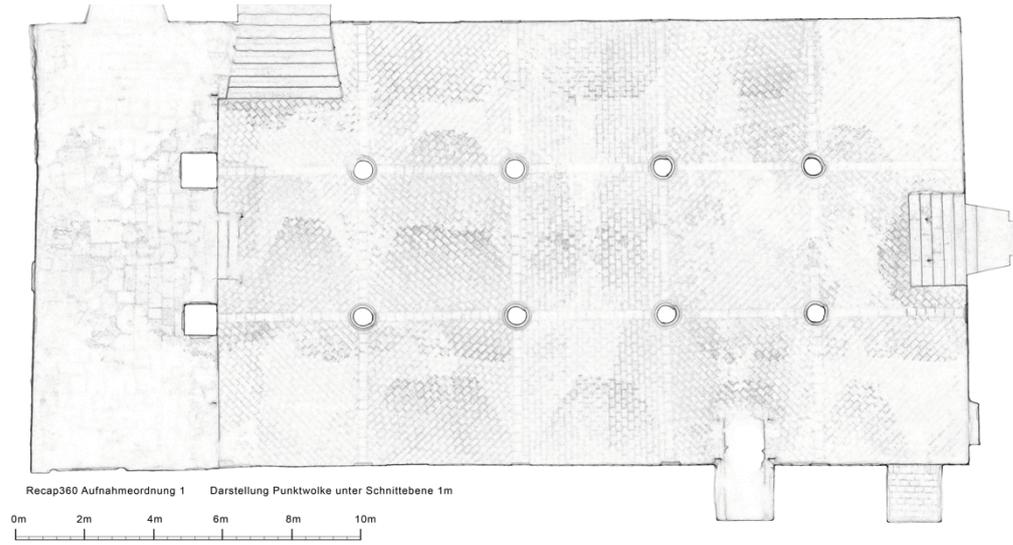


Vergleich Punktwolke aus Photoscan(1) und Recap360(1)

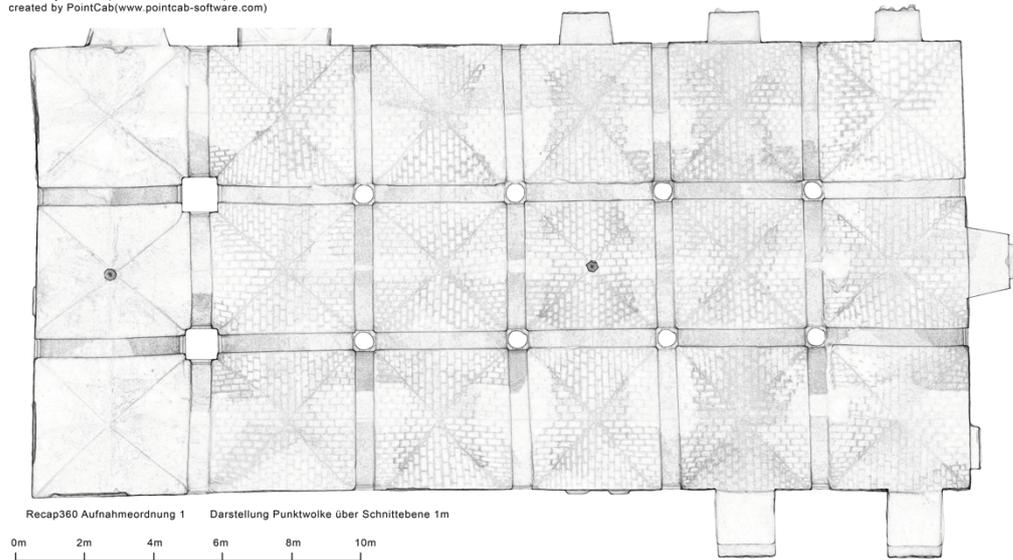
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



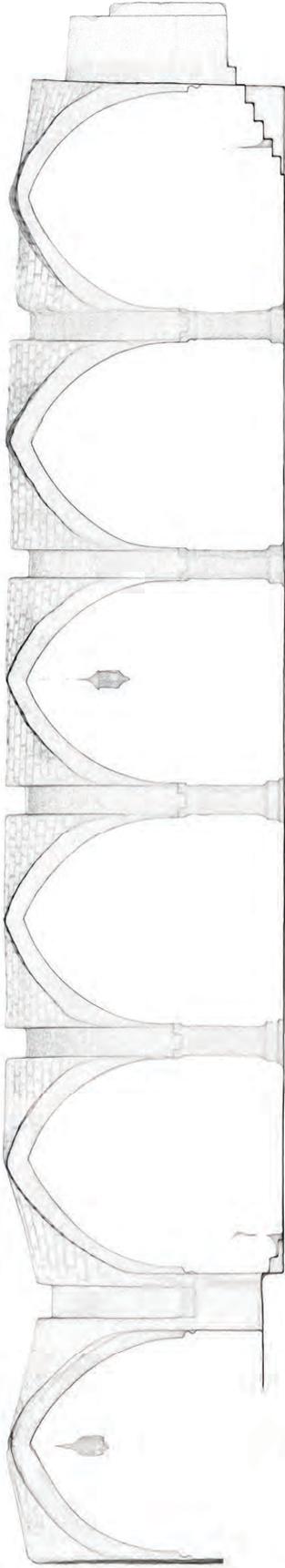
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

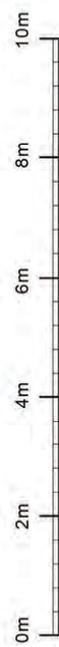
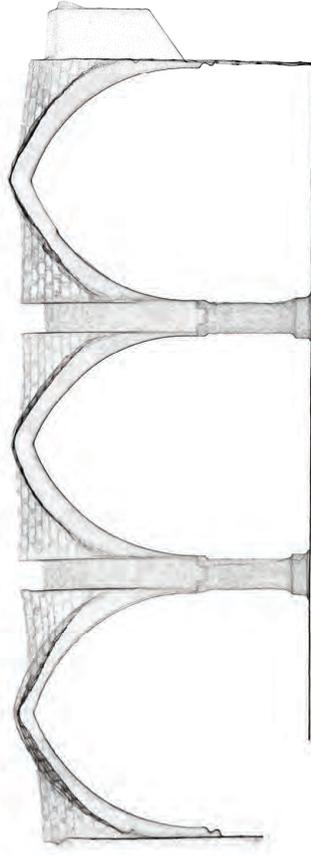


University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



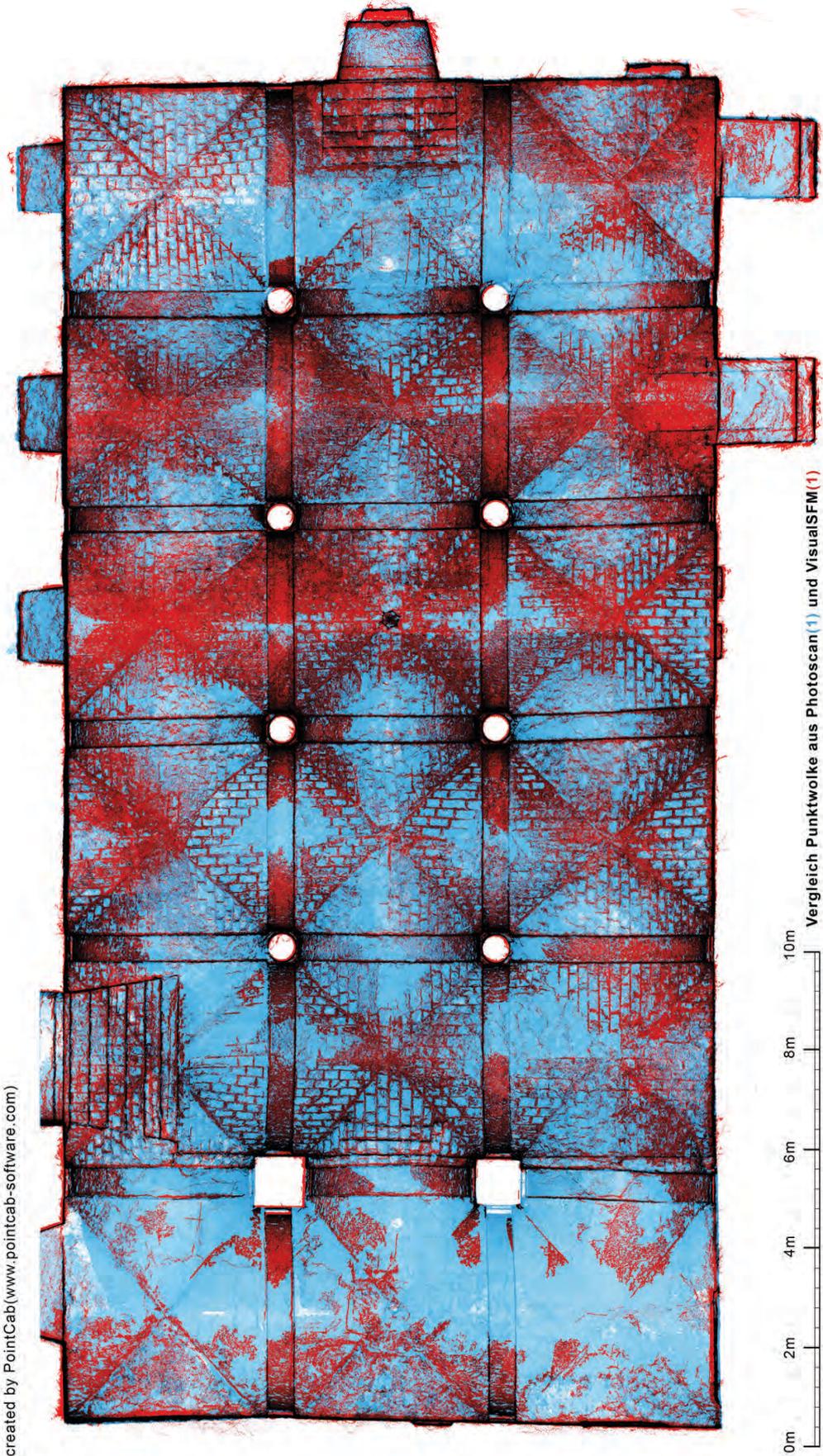
Recap360 Aufnahmeordnung 1

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

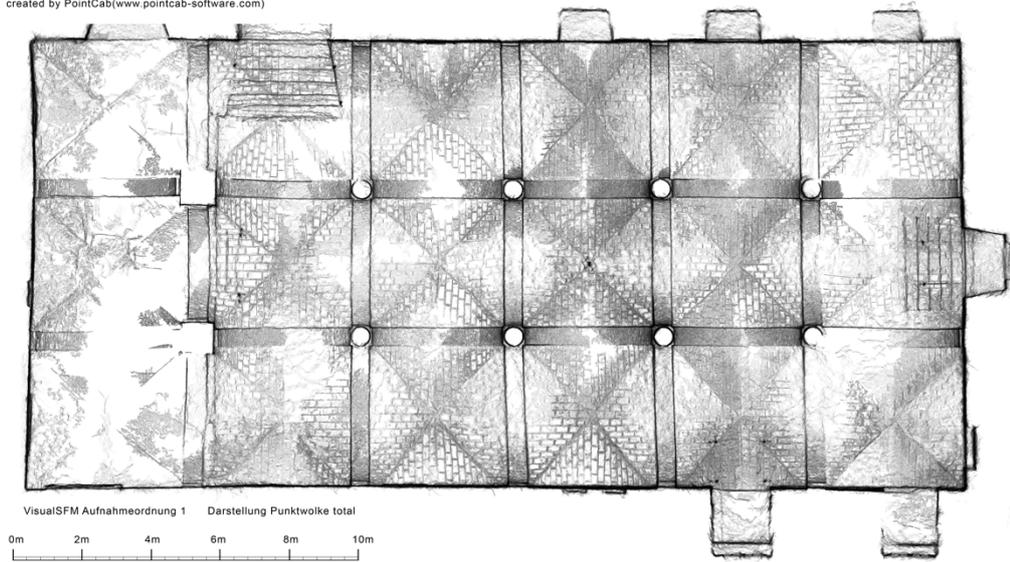


Recap360 Aufnahmeordnung 1

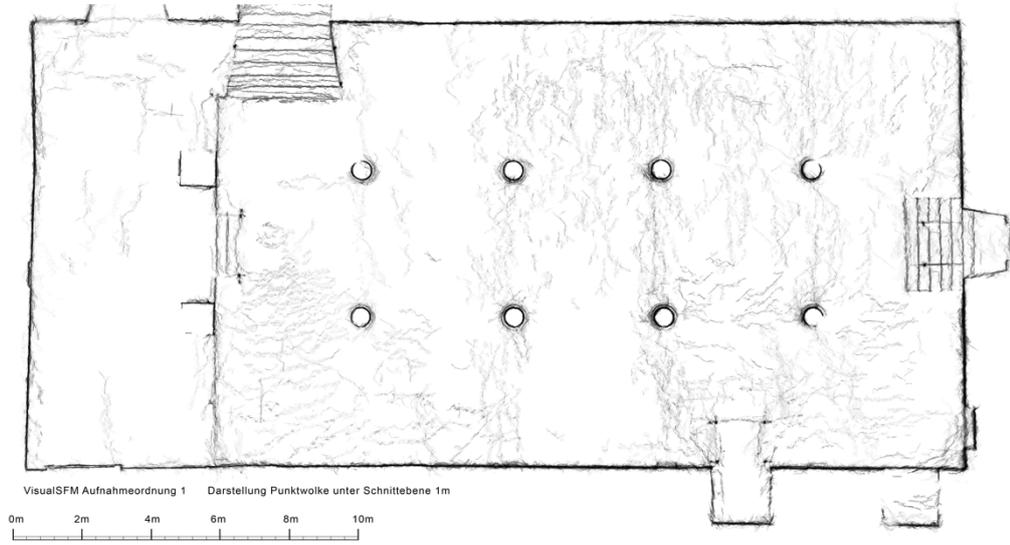
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



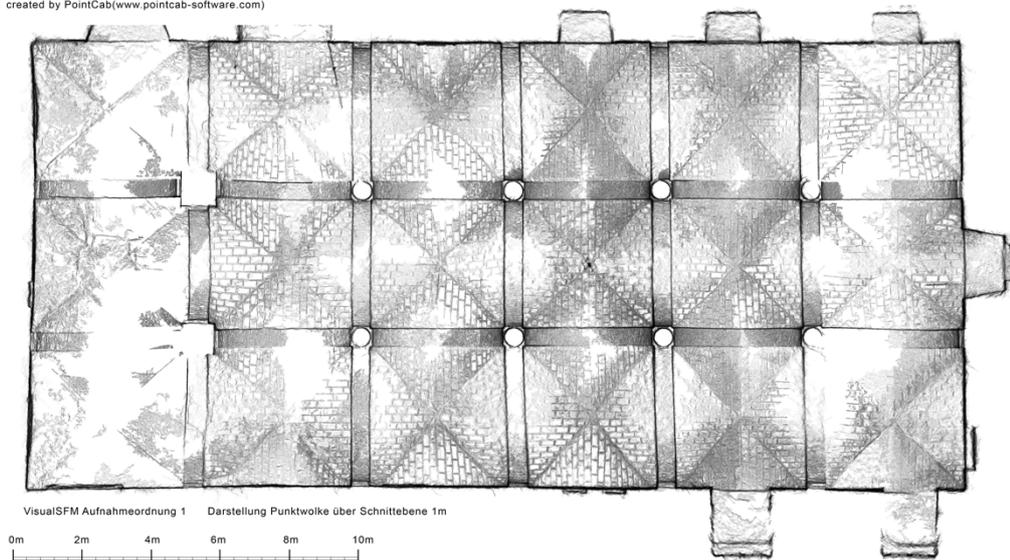
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



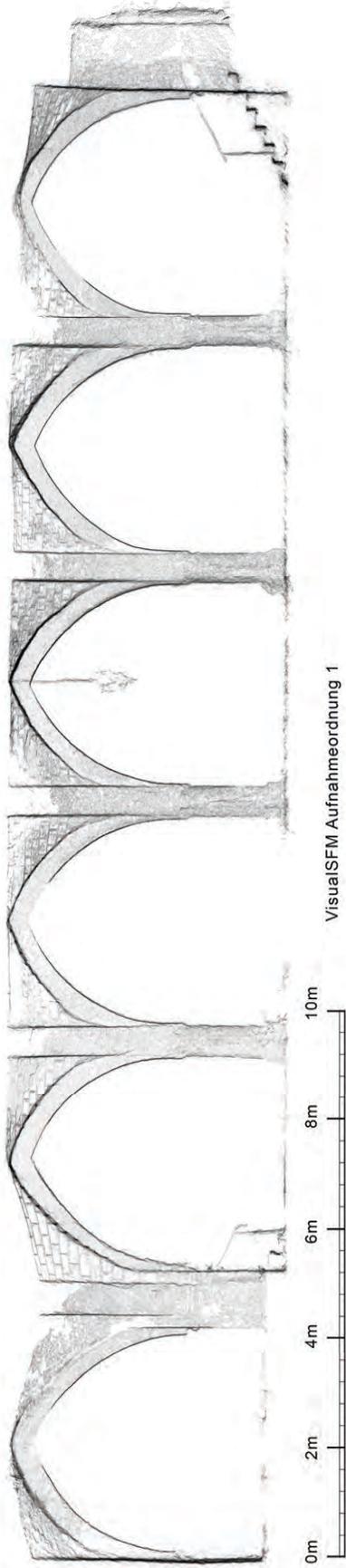
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



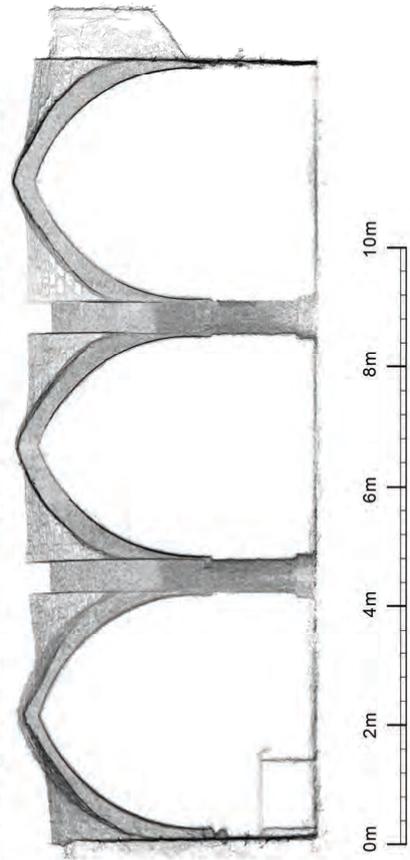
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



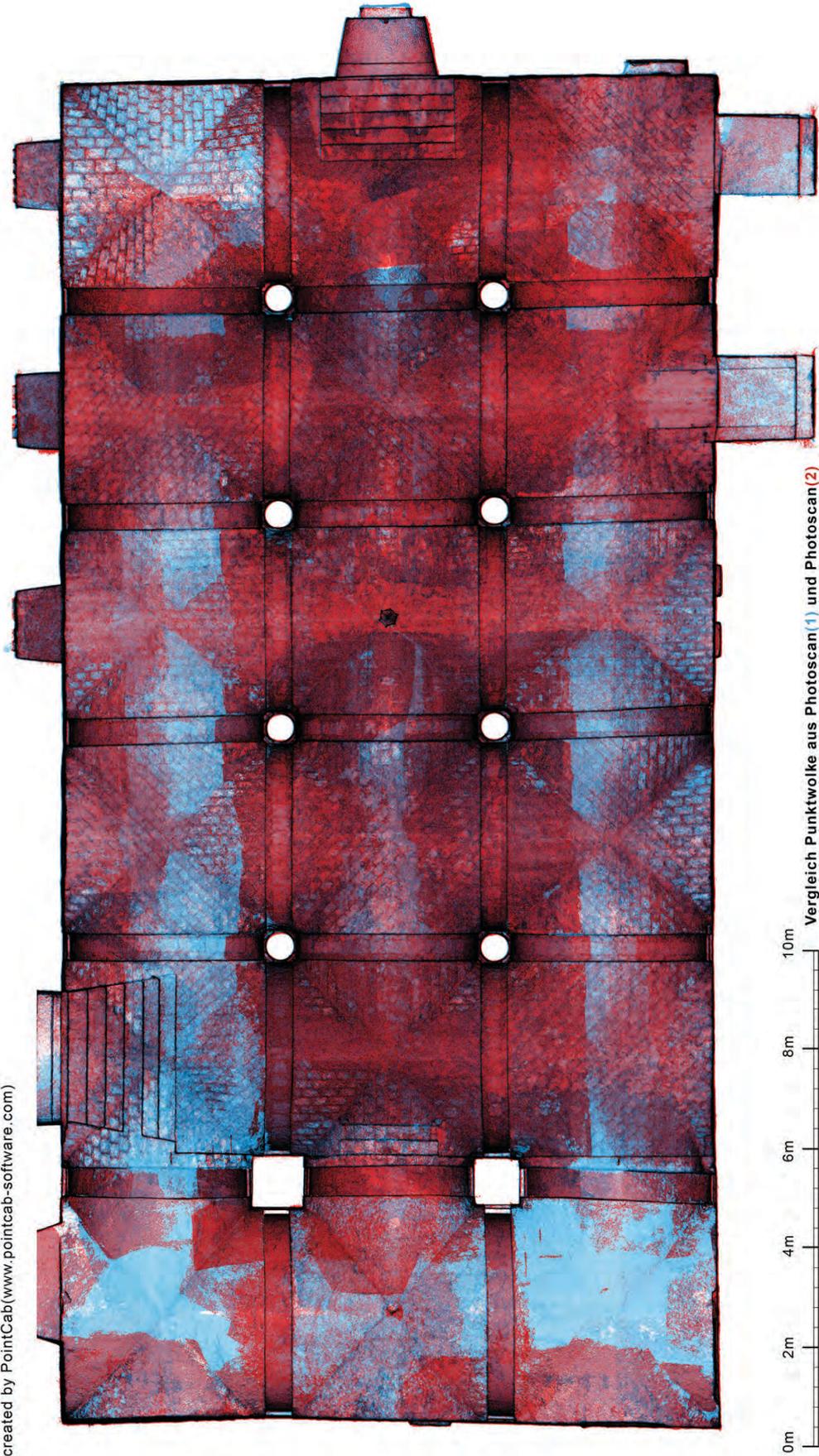
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



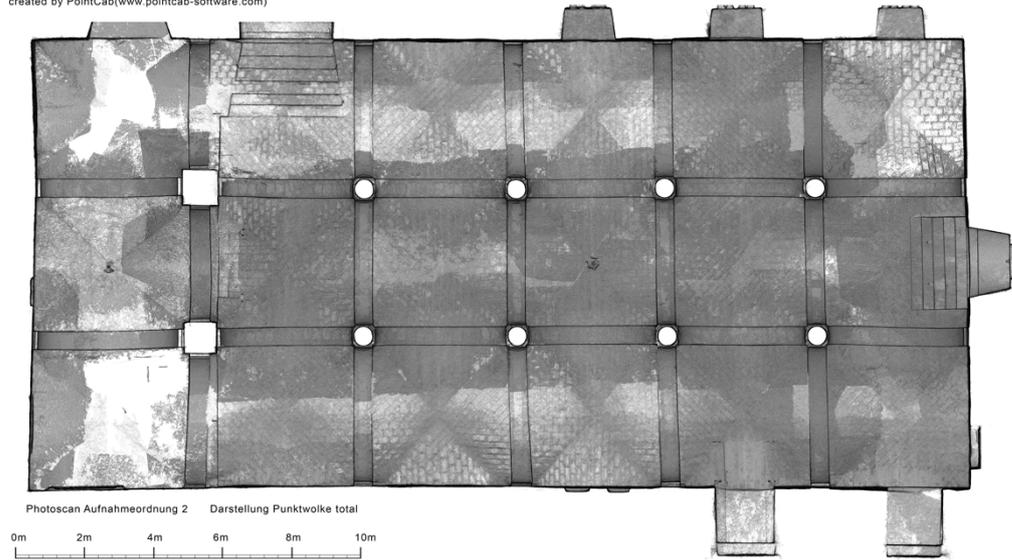
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



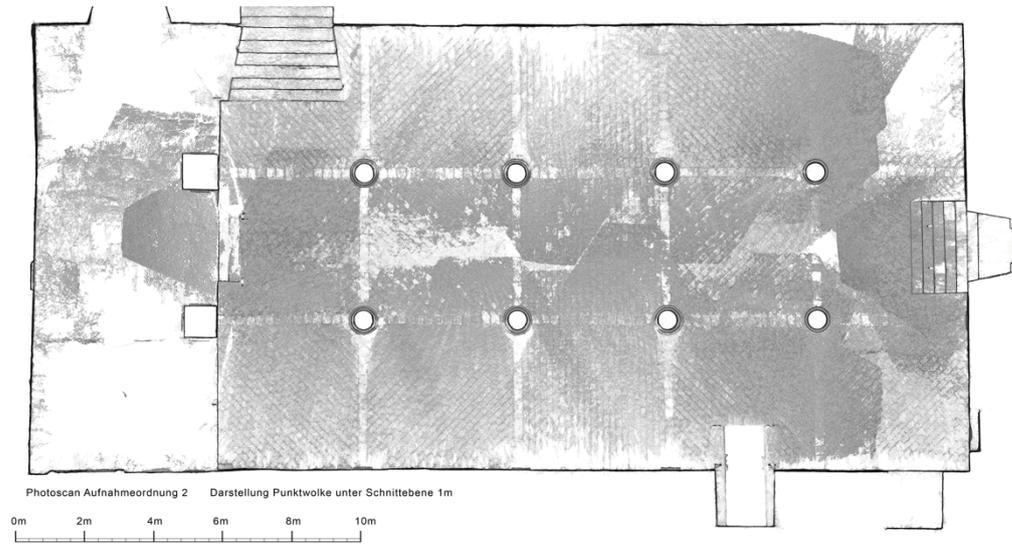
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



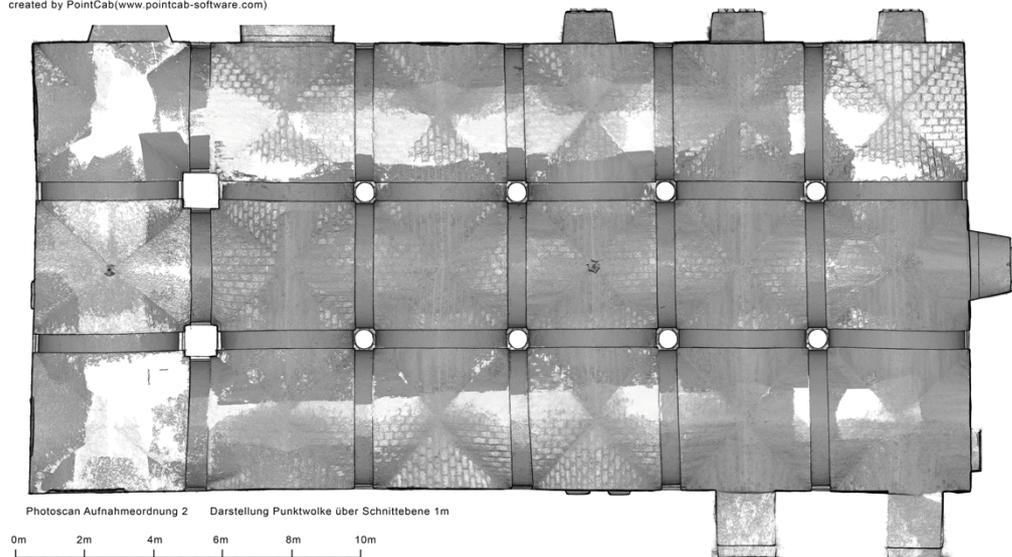
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



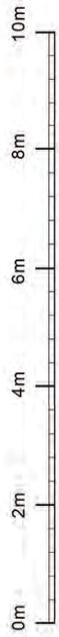
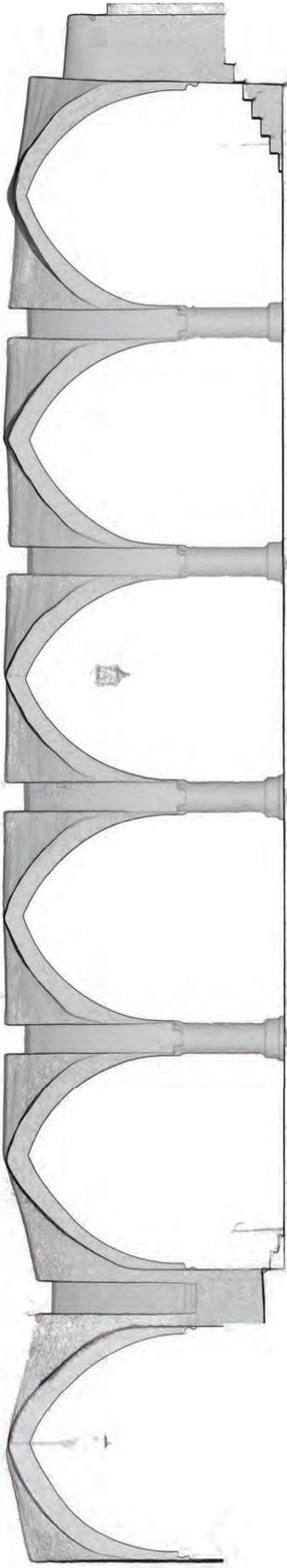
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

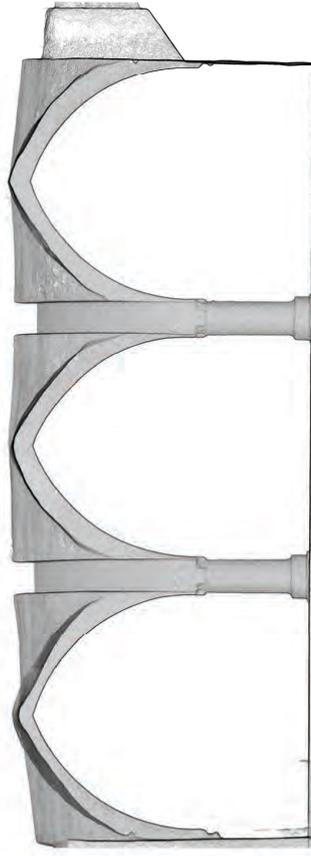


University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



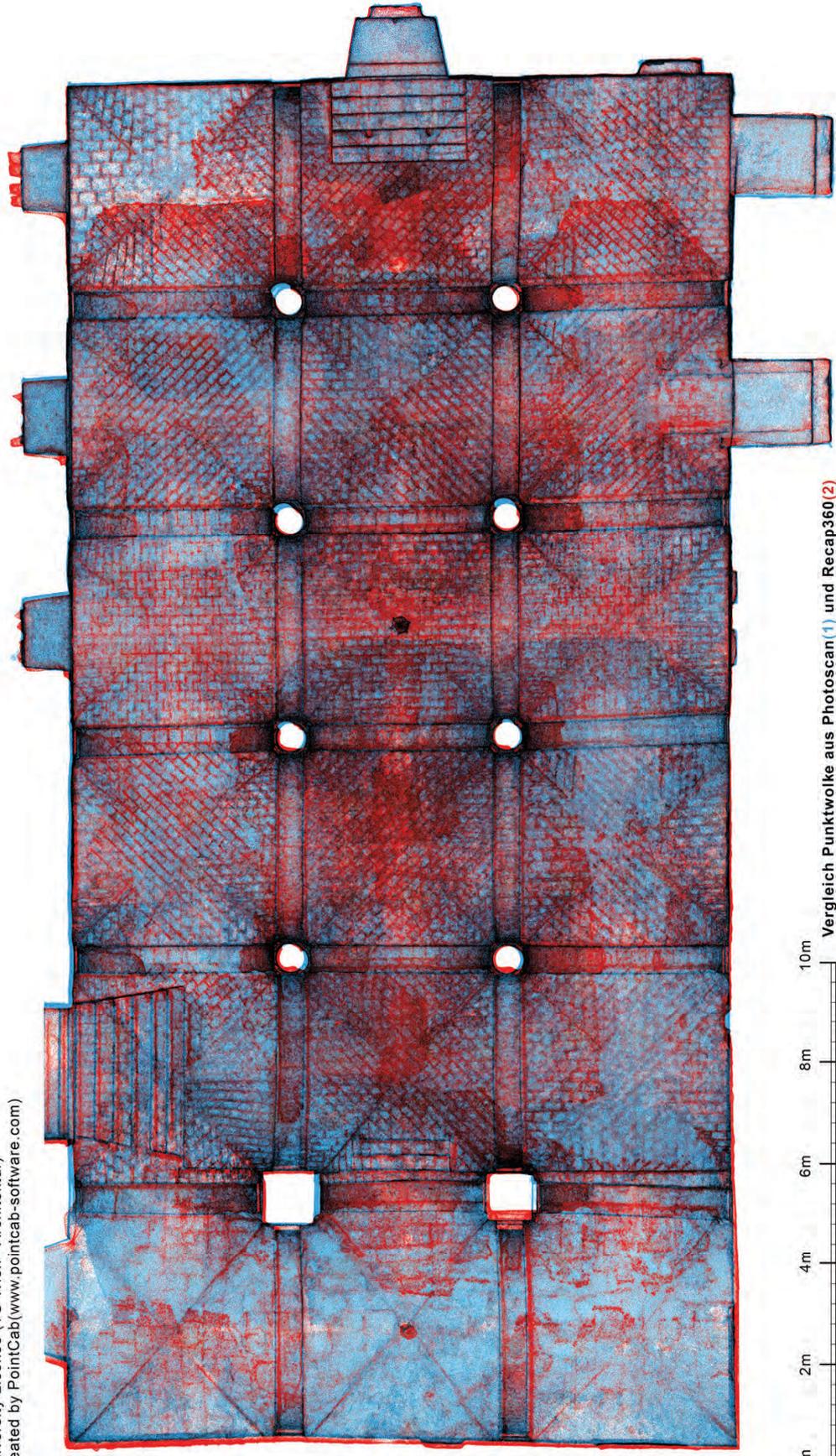
Photoscan Aufnahmeordnung 2

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



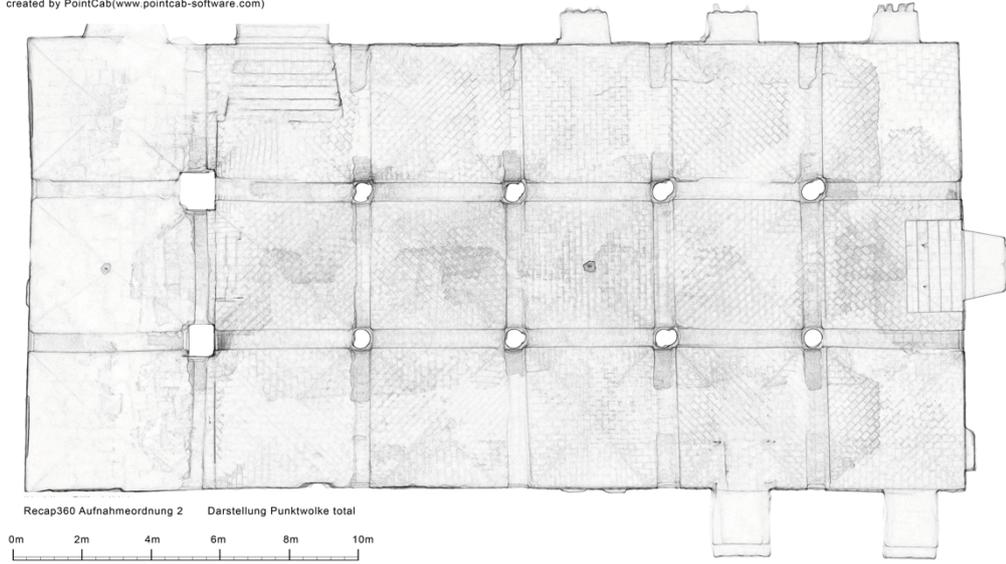
Photoscan Aufnahmeordnung 2

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

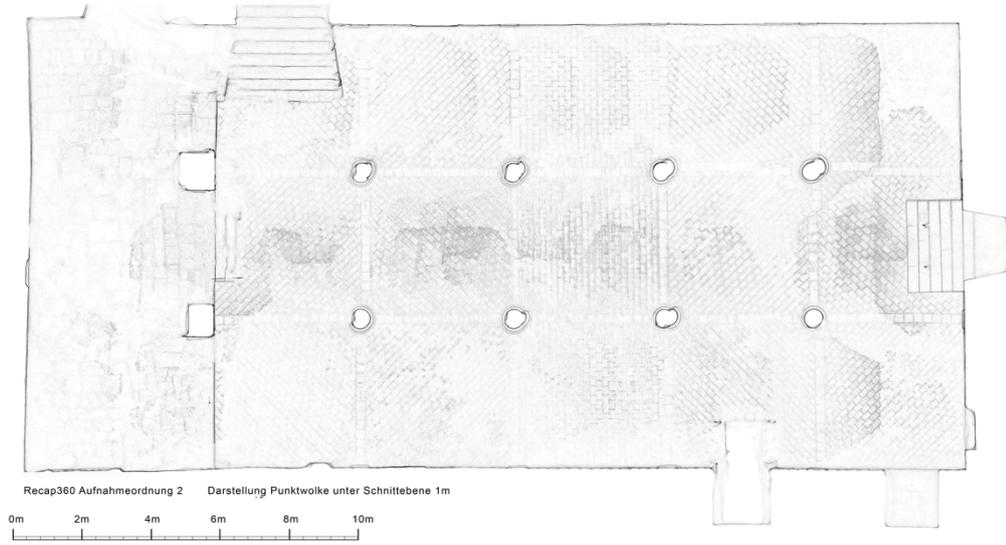


0m 2m 4m 6m 8m 10m  
Vergleich Punktwolke aus Photoscan(1) und Recap360(2)

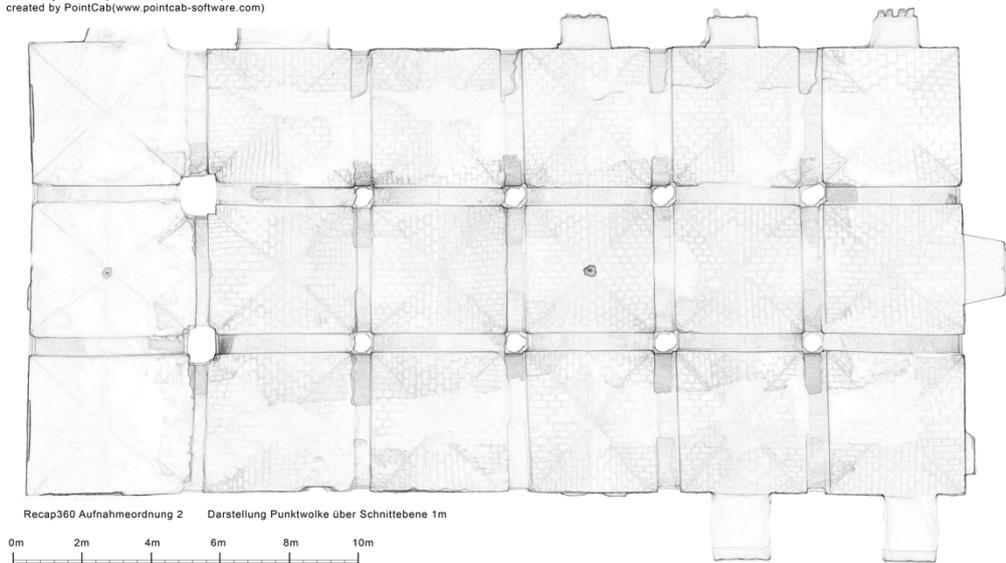
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



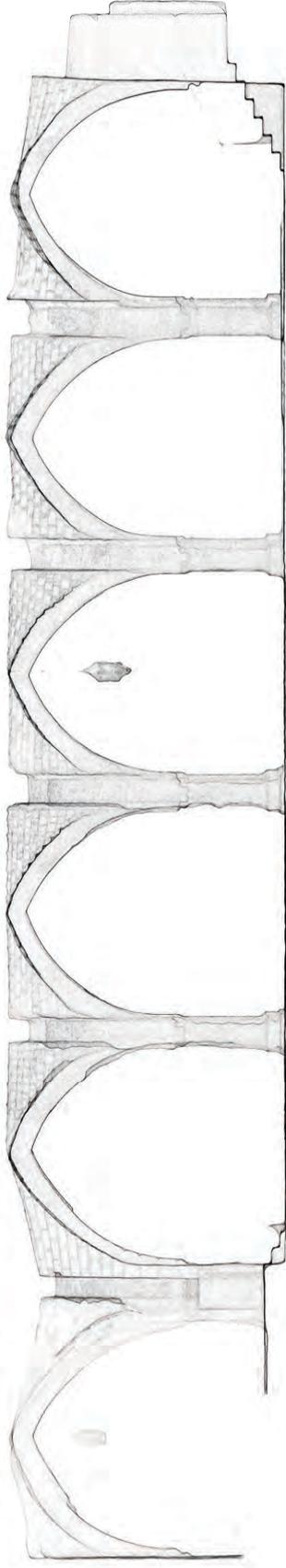
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

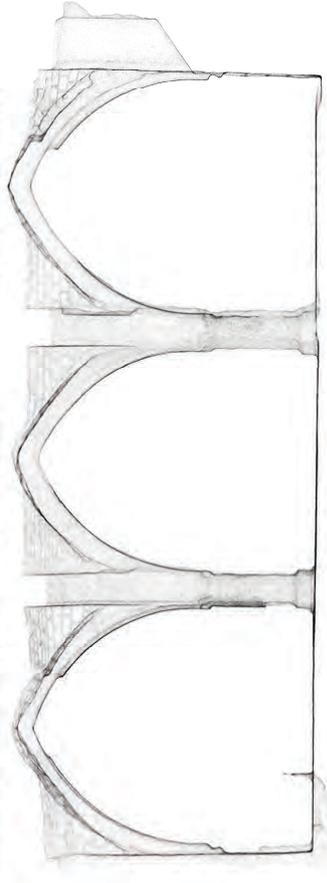


University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



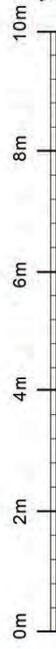
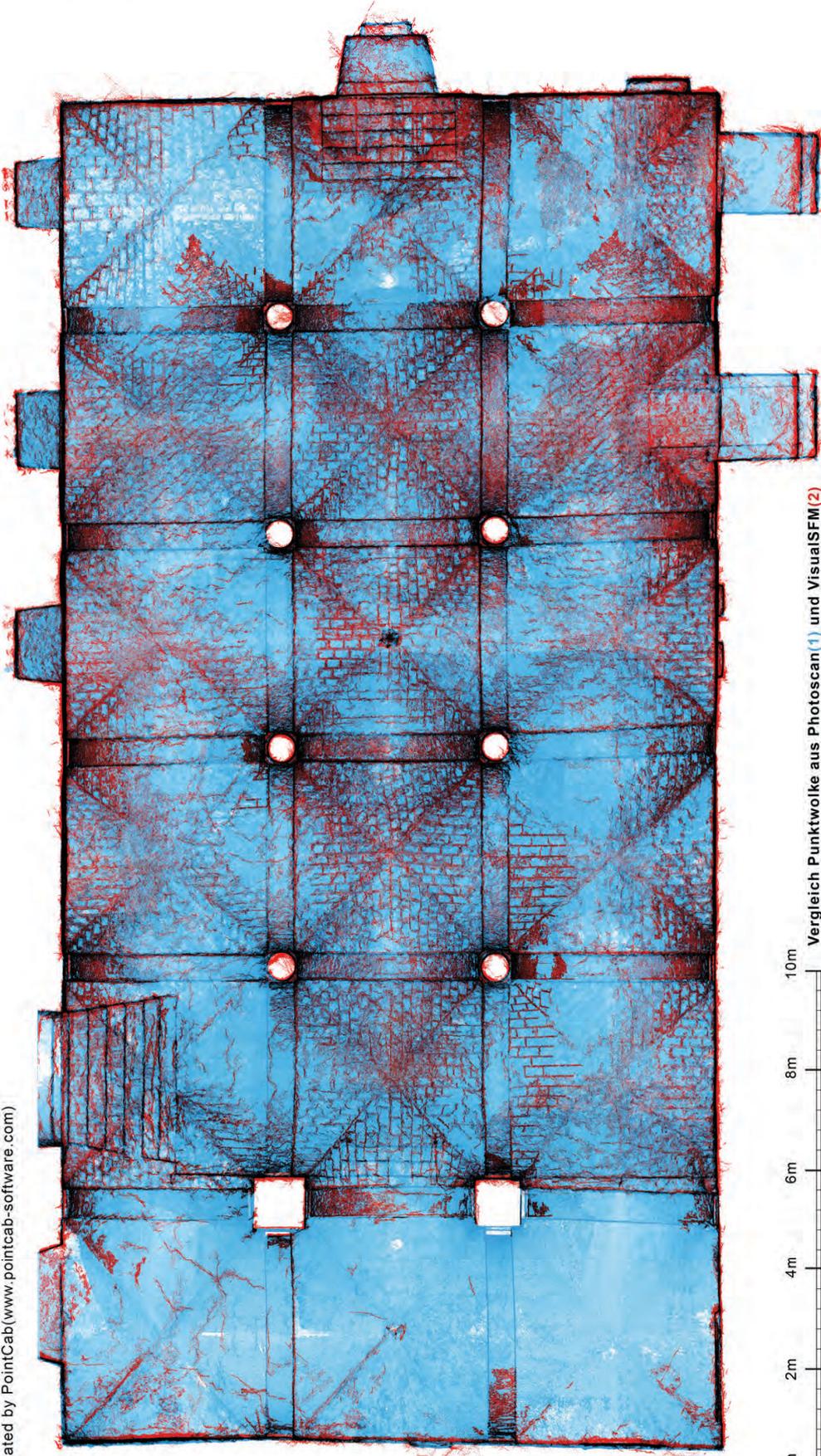
Recap360 Aufnahmeordnung 2

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



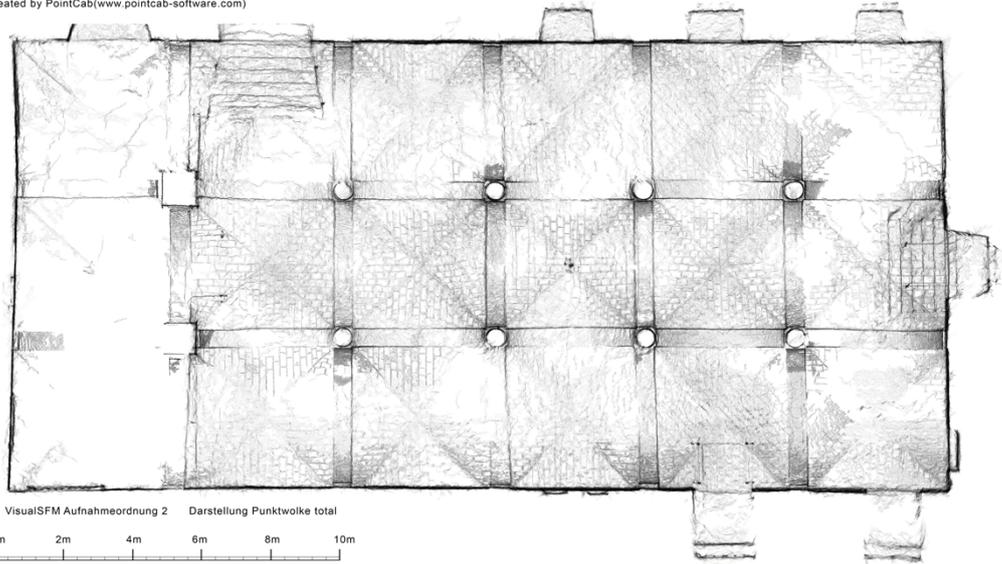
Recap360 Aufnahmeordnung 2

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

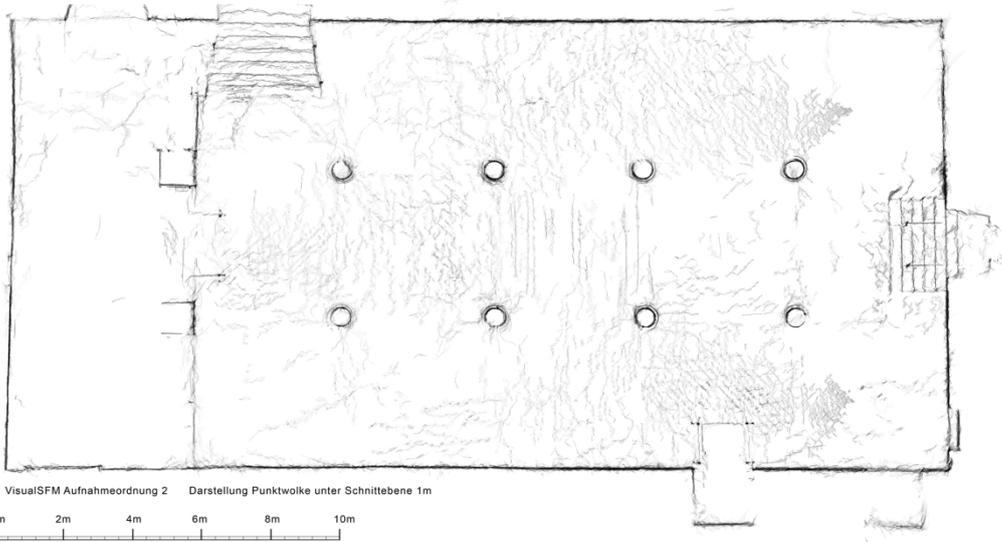


Vergleich Punktwolke aus Photoscan(1) und VisualSFM(2)

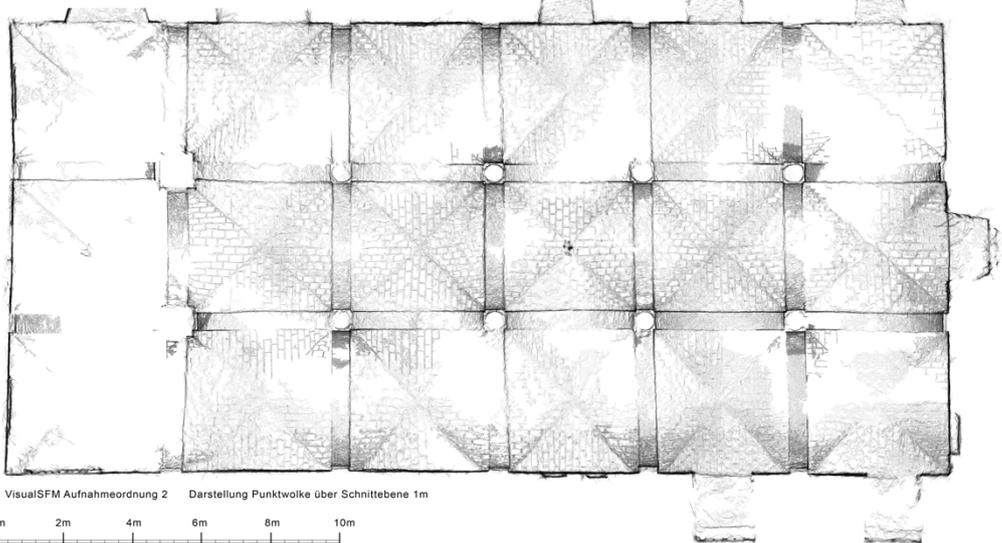
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



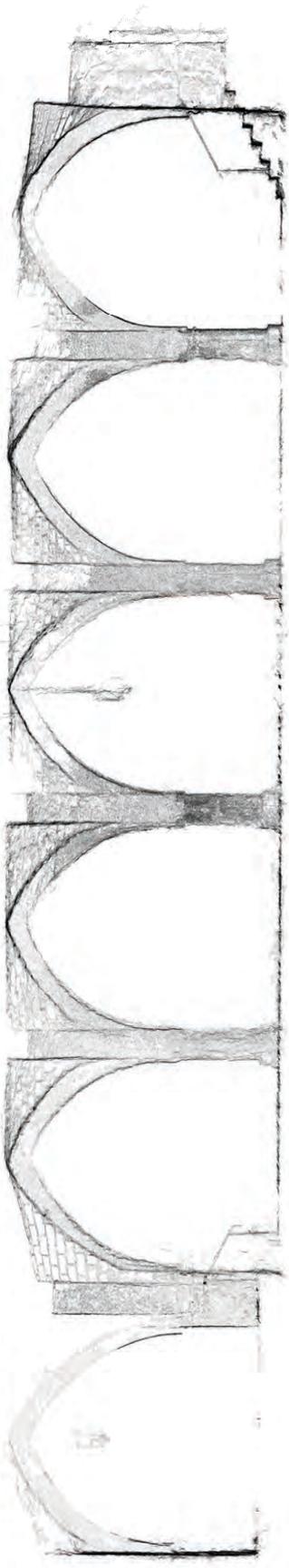
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

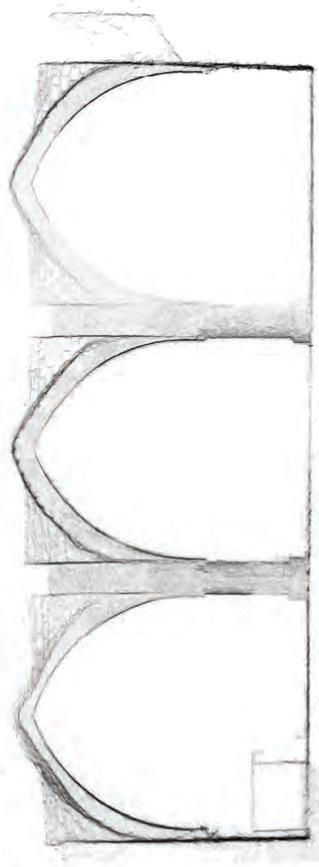


University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



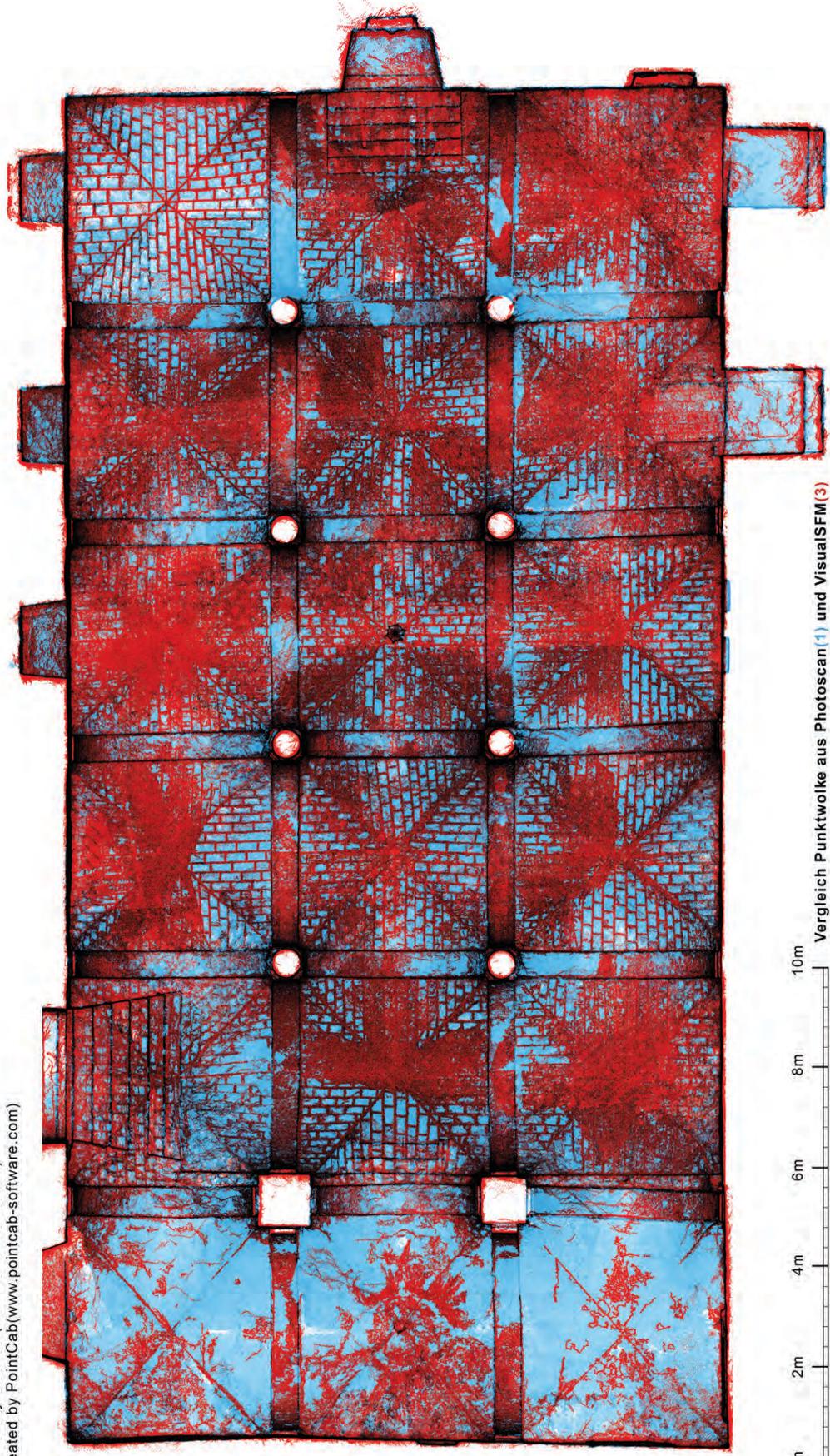
VisualSFM Aufnahmeordnung 2

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



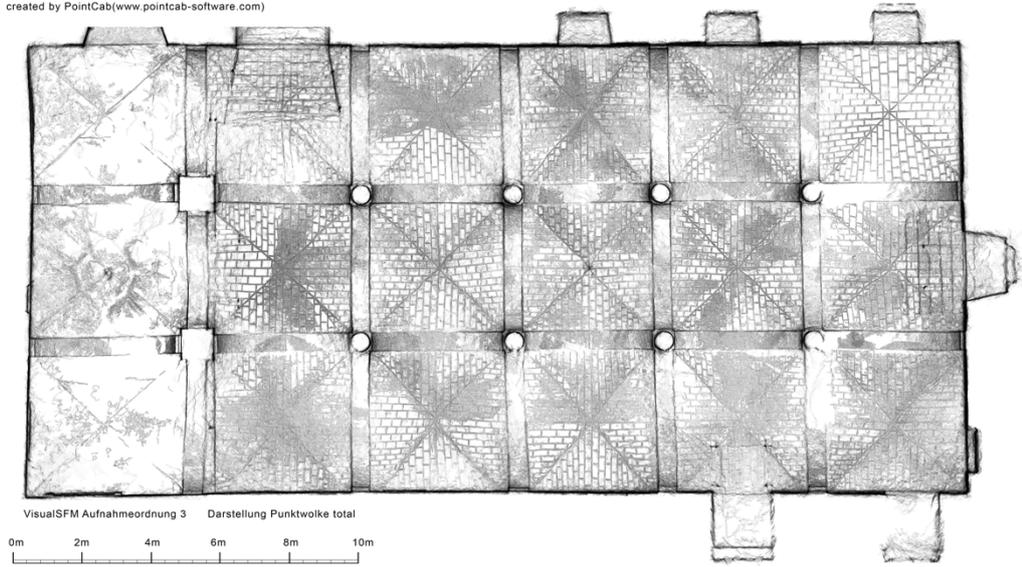
VisualSFM Aufnahmeordnung 2

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

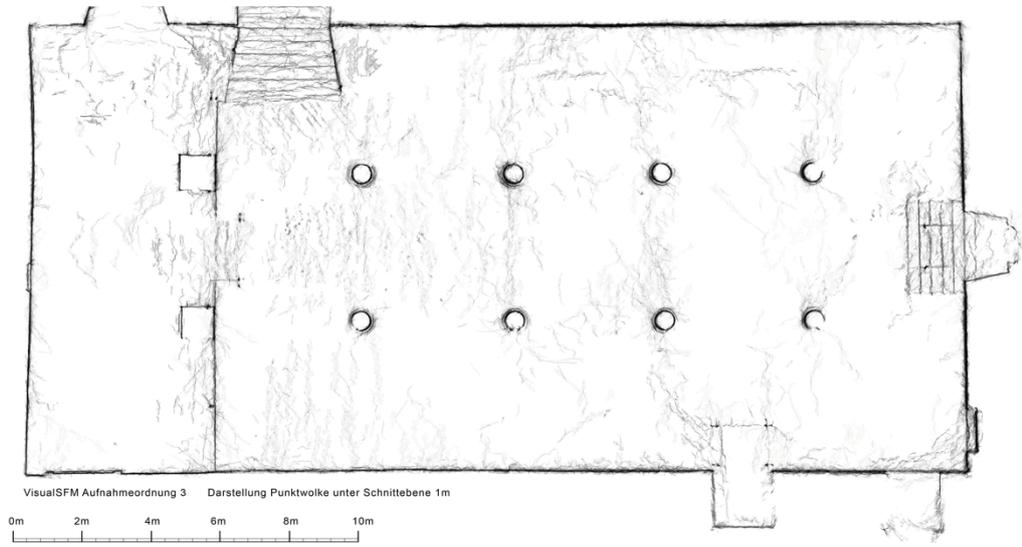


0m 2m 4m 6m 8m 10m  
Vergleich Punktwolke aus Photoscan(1) und VisualSFM(3)

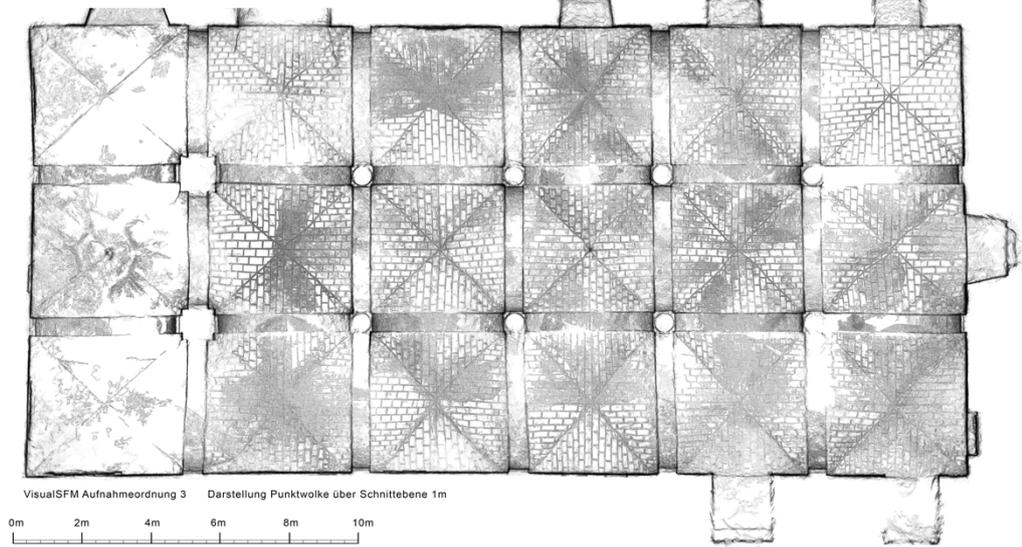
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



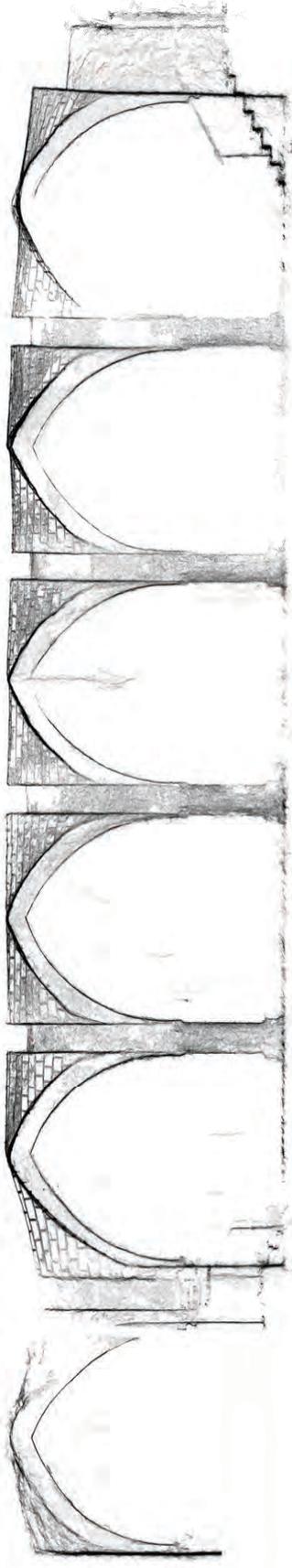
University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)

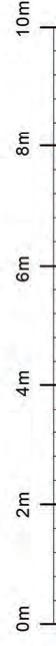
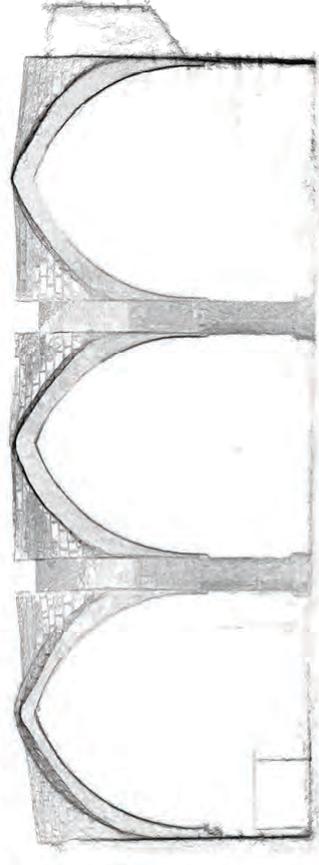


University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



VisualSFM Aufnahmeordnung 3

University License (TU Wien - Architektur)  
created by PointCab(www.pointcab-software.com)



VisualSFM Aufnahmeordnung 3

Orthophoto Ansicht West



Orthophoto Ansicht Ost



Orthophoto Ansicht Nord



Orthophoto Ansicht Süd



Orthophoto Gewölbeuntersicht

