



Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft

Masterarbeit

Photogrammetrische Aufnahme und 3D-  
Punktwolken-Prozessierung einer Ortsbrust  
im maschinellen Tunnelvortrieb und deren  
Vergleich mit einem Laserscan

Simone Maria Schachner, BSc

Januar 2024



**MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN**  
www.unileoben.ac.at

**EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 09.01.2024

Unterschrift Verfasser/in  
Simone Maria Schachner

## Danksagung

Zuerst gebührt mein Dank meinem herausragenden Hauptbetreuer Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Ralf Donner der TU Bergakademie Freiberg. Seine anregenden Impulse und konstruktive Kritik haben meine Masterarbeit entscheidend geprägt. Besonders schätze ich die konstante Ermutigung zu meinen Vorschlägen sowie die sorgfältige Bewertung derselben. Das fachliche Engagement und das unterstützende Feedback waren für mich von unschätzbarem Wert.

Ein herzliches Dankeschön geht an meinen Betreuer Herrn Dipl.-Ing- Robert Wenighofer der Montanuniversität Leoben. Er stand nicht nur während der praktischen Umsetzung dieser Masterarbeit am Zugangstollen Nord für den Bau der zweiten Röhre des Gotthard-Straßentunnels stets für Fragen zur Verfügung, sondern bereicherte meine Masterarbeit auch durch tiefgehende Diskussionen und wertvolle Einblicke aus bisherigen Erfahrungen. Diese Gespräche erwiesen sich als äußerst wertvoll für meine Arbeit.

Ebenfalls geht ein aufrichtiges Dankeschön an meinen Mentor Herrn Dr. mont. Roland Schmidt seitens der Firma Geodata MT GmbH, der nicht nur tatkräftige Unterstützung bei der Umsetzung am Zugangstollen Nord für den Bau der zweiten Röhre des Gotthard-Straßentunnels leistete, sondern auch eingehend seine bisherigen praktischen Erfahrungen teilte. Seine Bereitschaft, sein Fachwissen zu teilen sowie seine fortwährende Hilfe, die über die praktische Umsetzung hinausging, schätze ich außerordentlich. Gleichzeitig möchte ich mich herzlich bei der gesamten Firma bedanken, die mir die einzigartige Gelegenheit gab, an einem derartig interdisziplinären Projekt teilzuhaben.

## Abstract

In dieser Arbeit wurde die mit bildverarbeitender Software durchgeführte Bildverknüpfung von photogrammetrisch erfassten ringförmigen Teilabschnitten, den sogenannten Aufnahmespuren einer Ortsbrust im kontinuierlichen Tunnelvortrieb, untersucht. Zur Qualitätskontrolle wurde neben der inneren Genauigkeit besonderes Augenmerk auf die äußere Genauigkeit der rekonstruierten Ortsbrust gelegt. Der Bildverband wurde im nördlichen Zugangsstollen der zweiten Röhre des Gotthard-Straßentunnels mit dem Kamerasystem der Montanuniversität und der Firma Geodata MT GmbH photogrammetrisch aufgenommen. Das Kamerasystem wurde im Rahmen einer Forschungszusammenarbeit entwickelt und dient dem digitalen Ortsbrustmonitoring im maschinellen Tunnelvortrieb. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass durch sorgfältige Einstellung der Aufnahmeparameter qualitativ hochwertige Aufnahmen erzielt wurden, die den Bildverarbeitungsprozess und die Bildverknüpfung nicht beeinträchtigten. Jedoch gestaltete sich die Realisierung einer ausreichenden seitlichen Bildüberlappung aufgrund der festen Kameramontagepositionen, die von der spezifischen Schneid-Diskenanordnung am Bohrkopf abhängig waren, als problematisch. Demzufolge konnten während dem Bildverarbeitungsprozess keine Bildverknüpfungen zwischen den Aufnahmespuren hergestellt werden. Aufgrund dessen resultierten aus der Simultankalibrierung Orientierungsparameter auf Basis eines unvollständig verknüpften Bildverbandes, die zu voneinander unabhängigen Aufnahmespuren mit hoher innerer Genauigkeit führten. Durch Distanzermittlung zu einem Laserscan wurde eine unzureichende äußere Genauigkeit der photogrammetrisch prozessierten Rekonstruktion der Ortsbrust festgestellt. Die Ergebnisse der Evaluierung der äußeren Genauigkeit verdeutlichen, dass die Korrektur der Kameraausrichtung nicht optimal möglich war, wodurch diese zwar mit einer hohen inneren Genauigkeit rekonstruiert werden konnten, jedoch die äußere Genauigkeit negativ beeinflussten. Zur Verbesserung der Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren wurden Lösungsansätze wie die Optimierung der Überlappung der Aufnahmespuren und der Kameraausrichtung vorgeschlagen. Die erzielten Fortschritte ermöglichen nicht nur eine effizientere Nutzung des Kamerasystems, sondern eliminieren auch den zusätzlichen Verarbeitungsschritt der Koregistrierung der Aufnahmespuren.

## **Abstract**

In this work, the image linking of photogrammetrically recorded ring-shaped partial sections, the so-called recorded tracks of a tunnel face in continuous tunnel construction, carried out with image-processing software, was investigated. For quality control purposes particular attention was paid to the external accuracy of the reconstructed tunnel face in addition to internal accuracy. The photogrammetric images were taken in the northern access tunnel of the second tube of the Gotthard Road Tunnel with a photogrammetric system, which was developed by the Montanuniversität and the company Geodata MT GmbH. The photogrammetric system was developed as part of a research collaboration and is used for the digital monitoring of the tunnel face in mechanized tunnel constructions. The results of the scientific work showed that high-quality images were obtained by carefully setting the recording parameters, which didn't impair the image processing and image linking. However, the realization of a sufficient lateral image overlap proved to be problematic due to the fixed camera mounting positions, which were dependent on the specific cutting disk arrangement on the cutting head. As a result, no image links could be established between the recorded tracks during the image processing procedure. As a result, the simultaneous calibration resulted in orientation parameters based on an incompletely linked image array, which led to independent recorded tracks with high internal accuracy. By determining the distance to a laser scan, an insufficient external accuracy of the photogrammetrically processed reconstruction of the tunnel face was determined. The results of the evaluation of the external accuracy made it possible to see that the correction of the camera orientation was not optimally possible, whereby these could be reconstructed with a high internal accuracy, but negatively influenced the external accuracy. To improve the linking of individual recorded tracks, solutions such as optimizing the overlapping of the recorded tracks and the camera alignment were proposed. The progress achieved not only enables more efficient use of the photogrammetric system, but also eliminates the additional processing step of coregistering the recording tracks.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. Problemanalyse und Forschungskontext.....	1
1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	2
1.3. Gliederung der Arbeit .....	3
<b>2. Quellenarbeit</b> .....	<b>4</b>
2.1. Erfordernis der Ortsbrustkartierung im maschinellen Tunnelvortrieb .....	4
2.2. Stand der Technik: Ortsbrustkartierung im maschinellen Tunnelvortrieb.....	4
<b>3. Theoretischer Rahmen der Photogrammetrie</b> .....	<b>6</b>
3.1. Prinzipielle Methoden und Ziele der Photogrammetrie.....	6
3.2. Abbildungsmodell der Photogrammetrie .....	7
3.3. Koordinatensysteme .....	9
3.3.1. Pixelkoordinatensystem (uv).....	9
3.3.2. Bildkoordinatensystem ( $x'y'z'$ ) .....	9
3.3.3. Modellkoordinatensystem (xyz).....	10
3.3.4. Objektkoordinatensystem (XYZ).....	10
3.4. Koordinatentransformation.....	11
3.5. Orientierung eines Bildverbandes .....	12
3.5.1. Allgemeine Orientierungsvorgänge.....	12
3.5.2. Innere Orientierung der Kamera .....	12
3.5.3. Äußere Orientierung einer Aufnahme .....	15
3.5.4. Relative Orientierung eines Stereobildpaares .....	16
3.6. Relevante optische Aufnahmeparameter.....	17
3.6.1. Bildrate und Bildüberlappung in Bewegungsrichtung.....	17
3.6.2. Belichtungszeit und Bewegungsunschärfe.....	17
3.6.3. ISO-Wert .....	18
3.6.4. Blendenöffnung .....	18

3.6.5. Schärfentiefe .....	18
<b>4. Bildverarbeitungsprozess mit Agisoft-Metashape .....</b>	<b>20</b>
4.1. Prozess der Bildzuordnung und Objektrekonstruktion .....	20
4.2. Mehrbildtriangulation durch Bündelausgleichung .....	21
4.2.1. Verfahren der Bündelausgleichung .....	21
4.2.2. Kollinearitätsgleichungen .....	22
<b>5. Genauigkeiten in der Photogrammetrie.....</b>	<b>24</b>
5.1. Erreichbare Objektgenauigkeit .....	24
5.2. Innere Genauigkeit der Bündelausgleichung (Präzision).....	25
5.3. Äußere Genauigkeit der Bündelausgleichung (Richtigkeit) .....	27
<b>6. Kamerasystem zur digitalen Ortsbrustaufnahme .....</b>	<b>30</b>
6.1. Allgemeine Funktionsweise .....	30
6.2. Systemaufbau.....	31
6.2.1. Steuereinheit .....	31
6.2.2. Kameraeinheit .....	31
6.3. Kamerapositionen als Maßstabsinformation .....	32
<b>7. Genauigkeitsvorbetrachtung .....</b>	<b>33</b>
7.1. Genauigkeitsvorbetrachtung des Kamerasystems .....	33
7.1.1. Verwendete Kamera und Objektiv .....	33
7.1.2. Bestimmung der Bildmaßstabszahl .....	33
7.1.3. Abschätzung der erreichbaren Objektgenauigkeit in der Ebene .....	34
7.1.4. Abschätzung der erreichbaren Objektgenauigkeit in Aufnahmerichtung .....	35
7.1.5. Evaluierung der erreichbaren Objektgenauigkeit des Kamerasystems .....	36
7.2. Genauigkeitsvorbetrachtung des Laserscanners .....	36
7.2.1. Verwendeter Laserscanner.....	36
7.2.2. Messgenauigkeit nach Herstellerangaben .....	36
7.2.3. Objektauflösungsvermögen .....	37
7.2.4. Punktedichte.....	37
7.2.5. Evaluierung der zu erreichenden Genauigkeit des Laserscanners.....	37

---

<b>8. Methodik und Ablauf der Arbeit.....</b>	<b>38</b>
8.1. Projektbeschreibung .....	38
8.2. Planung der photogrammetrischen Aufnahme .....	39
8.2.1. Analyse der vordefinierten Montagedisken.....	39
8.2.2. Ermittlung der optischen Aufnahmeparameter.....	42
8.3. Bildaufnahme und Rekonstruktion der 3D-Punktwolke .....	43
8.3.1. Aufnahme des Bildverbandes.....	43
8.3.2. Ermittlung der Kamerapositionen während der Bildaufnahme.....	44
8.3.3. Photogrammetrische Prozessierung .....	45
8.4. Evaluierung der Genauigkeit und Qualität der rekonstruierten Ortsbrust .....	47
8.4.1. Ermittlung der inneren Genauigkeit.....	47
8.4.2. Koordinatentransformation des Laserscans vor der Distanzermittlung.....	47
8.4.3. Aufbereitung der Punktwolken zur Distanzermittlung .....	50
8.4.4. Ermittlung der äußeren Genauigkeit durch Distanzermittlung .....	50
<b>9. Ergebnisse.....</b>	<b>52</b>
9.1. Evaluierung der Überlappung der Aufnahmespuren.....	52
9.2. Festgelegte optische Aufnahmeparameter .....	53
9.2.1. Bildrate und Überlappung in Bewegungsrichtung .....	53
9.2.2. Belichtungszeit und Bewegungsunschärfe.....	55
9.2.3. ISO-Wert, Blendenöffnung, Fokus und Schärfentiefe .....	55
9.3. Bildaufnahme und Rekonstruktion der 3D-Punktwolke .....	56
9.3.1. Genauigkeitsanalyse der Kamerakalibrierung aus der Selbstkalibrierung.....	57
9.3.2. Kamerakalibrierung aus der Simultankalibrierung.....	58
9.3.3. Höhenmodell der Simultankalibrierung .....	59
9.3.4. Prozess der Bildzuordnung der Simultankalibrierung.....	61
9.4. Evaluierung der Genauigkeit und Qualität der rekonstruierten Ortsbrust .....	62
9.4.1. RMS-Werte zur Betrachtung der inneren Genauigkeit .....	62
9.4.2. Distanzermittlung zur Betrachtung der äußeren Genauigkeit.....	63
<b>10. Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>74</b>
10.1. Planung der photogrammetrischen Aufnahme .....	74
10.1.1. Auswahl der Montagedisken.....	74
10.1.2. Optische Aufnahmeparameter.....	74
10.2. Bildaufnahme und Rekonstruktion der 3D-Punktwolke .....	76



10.2.1. Genauigkeitsanalyse der Selbstkalibrierung .....	76
10.2.2. Prozess der Bildzuordnung durch Simultankalibrierung.....	76
10.1. Evaluierung der Genauigkeit und Qualität der rekonstruierten Ortsbrust .....	77
10.1.1. Innere Genauigkeit der Simultankalibrierung .....	77
10.1.2. Äußere Genauigkeit der Simultankalibrierung.....	77
<b>11. Zusammenfassung der Ergebnisse .....</b>	<b>79</b>
<b>12. Schlussfolgerung .....</b>	<b>80</b>
<b>13. Fazit.....</b>	<b>81</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>82</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ICP	Iterative-Closest-Point-Algorithmus
ÖGG	Österreichische Gesellschaft für Geomechanik
TBM	Tunnelbohrmaschine
C2C	Cloud-to-Cloud-Algorithmus
C2M	Cloud-to-Mesh-Algorithmus
M3C2	Multiscale-Model-to-Model-Algorithmus

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Prinzip der Mehrbildphotogrammetrie; [Luhmann 2010b, S. 7].....	7
Abbildung 3.2: Modell der Lochkamera; [Luhmann 2010, S. 8] .....	8
Abbildung 3.3: Pixelkoordinatensystem; modifiziert nach [Luhmann 2010b, S. 24].....	9
Abbildung 3.4: Räumliches Bildkoordinatensystem; [Luhmann 2010b, S. 25] .....	9
Abbildung 3.5: Modellkoordinatensystem; [Luhmann 2010b, S. 25] .....	10
Abbildung 3.6: Beispiele für Objektkoordinatensysteme; [Luhmann 2010b, S. 26].....	10
Abbildung 3.7: Parameter der inneren Orientierung; idealer Bildstrahl (blau) und Bildstrahl mit Verzeichnung (rot); [Luhmann 2010b, S. 144] .....	13
Abbildung 3.8: Parameter der äußeren Orientierung; [Luhmann 2010b, S. 237] .....	15
Abbildung 3.9: Modellkoordinatensystem und relative Orientierung; Folgebildanschluss (links); unabhängige Bildpaare (rechts); [Luhmann 2010b, S. 276] .....	16
Abbildung 3.10: Schärfentiefe $t$ bei definiertem Unschärfekreis $u'$ ; [Luhmann 2010b, S. 112]...	19
Abbildung 4.1: Strahlenbündel der Mehrbildtriangulation; [Luhmann 2010b, S. 302].....	22
Abbildung 5.1: C2C-Algorithmus; Vergleichs- (hellgrau) und Referenzpunktewolke (dunkelgrau) mit Punkterauschen; C2C-Distanz zum nächstgelegenen Punkt; [Lague et al. 2013].....	27
Abbildung 5.2: C2M-Algorithmus; Vergleichs- (hellgrau) und Referenzpunktewolke (dunkelgrau) mit Punkterauschen; C2M-Distanz entlang der Flächennormalen; modifiziert nach [Lague et al. 2013] .....	28
Abbildung 5.3: M3C2-Algorithmus; Vergleichs- (hellgrau) und Referenzpunktewolke (dunkelgrau) mit Punkterauschen; Schritt 1: Kalkulation der Regressionsfläche im Bereich des Durchmessers $D$ ; Schritt 2: Projektion des Zylinders mit dem Durchmesser $d$ entlang dem Normalvektor; [Lague et al. 2013] .....	28
Abbildung 5.4: M3C2-Algorithmus; Vergleichs- (hellgrau) und Referenzpunktewolke (dunkelgrau) mit Punkterauschen; Überschätzung der Distanz bei rauen Oberflächen aufgrund der Orientierung der Flächennormalen; [Lague et al. 2013].....	29
Abbildung 8.1: Standpunkt der Ortsbrust bei TBM-Vortriebsstart der Zweiten Röhre Gotthard-Straßentunnel in Göschenen; [Google Earth Pro].....	39
Abbildung 8.2: Bohrkopfplan der Firma Herrenknecht AG mit den Montagedisken (rot) und Objektkoordinatensystem (blau) bei Blick gegen Vortriebsrichtung; modifiziert nach Herrenknecht AG .....	40
Abbildung 8.3: Montierte Kameraeinheit im Gehäuse der Einfachdiske (links); montierte Steuereinheit im Gehäuse der Doppeldiske (rechts); Foto: Simone Schachner .....	44
Abbildung 8.4: Originaler Laserscan; CloudCompare .....	48
Abbildung 8.5: Originaler Laserscan rotiert um -90 Grad um die X-Achse; CloudCompare.....	48
Abbildung 8.6: Originaler Laserscan rotiert um -90 Grad um die X-Achse und 4,933 Grad um die Y-Achse; CloudCompare .....	49
Abbildung 9.1: Grafische Lösung der seitlichen Bildüberlappung; Maße in mm; Maße ohne Toleranz: Toleranz innerhalb annehmbarer Grenzen; Civil3D .....	52

Abbildung 9.2: Höhenmodell mit 2 mm/Pixel bei Sicht in Vortriebsrichtung entlang der positiven z-Achse des Objektkoordinatensystems; Bildmessgenauigkeit 0,565 mm/Pixel; Agisoft-Metashape..... 59

Abbildung 9.3: Höhenmodell und Bohrkopfplan mit den Kameramontagepositionen (rot) und der Steuereinheit (rot) im Objektkoordinatensystem (blau); Sicht entgegen Vortriebsrichtung entlang der negativen z-Richtung; Höhenmodell aus Agisoft-Metashape in Civil3D ..... 60

Abbildung 9.4: Verknüpfungspunkte zweier Aufnahmen der Spur 4; Cam2\_35\_185.91#30 (oben) und Cam2\_38\_187.75#30 (unten); 553 gültige Verknüpfungen (blau); 188 ungültige Verknüpfungen (rot); Agisoft-Metashape ..... 61

Abbildung 9.5: Distanzermittlung C2C-Algorithmus in x-Richtung; Referenzpunktewolke: Laserscan; Werte in m; CloudCompare ..... 64

Abbildung 9.6: Distanzermittlung C2C-Algorithmus in y-Richtung; Referenzpunktewolke: Laserscan; Werte in m; CloudCompare ..... 65

Abbildung 9.7: Distanzermittlung C2C-Algorithmus in z-Richtung; Referenzpunktewolke: Laserscan; Werte in m; (A) Distanzwerte; (B) Histogramm und Häufigkeitsverteilung; CloudCompare ..... 66

Abbildung 9.8: Distanzermittlung C2M-Algorithmus; Referenzpunktewolke: Laserscan; Werte in m; (A) Distanzwerte; (B) Histogramm und Häufigkeitsverteilung; CloudCompare ..... 68

Abbildung 9.9: Distanzermittlung M3C2-Algorithmus; Referenzpunktewolke: Laserscan; Werte in m; (A) Distanzwerte; (B) Histogramm und Häufigkeitsverteilung; CloudCompare..... 70

Abbildung 9.10: Distanzermittlung C2C-Algorithmus in z-Richtung; Referenzpunktewolke: Laserscan; auffällige Teilbereiche (schwarz); Schnitt A-A: in Abbildung 9.11; Werte in m; modifiziert nach CloudCompare..... 71

Abbildung 9.11: Schnitt A-A aus Abbildung 9.10; Distanzermittlung C2C-Algorithmus in z-Richtung; Referenzpunktewolke: Laserscan; Distanzwerte photogrammetrisch prozessierte Objektpunkte (Farbskala); Laserscan (braun); Werte in m; modifiziert CloudCompare ..... 72

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Internationale Blendenreihe; [Luhmann 2010b, S. 184].....	18
Tabelle 7.1: Berechnung der Bildmaßstabszahl $m_b$ .....	34
Tabelle 7.2: Berechnung zu erreichendes mittleres Objektauflösungsvermögen.....	34
Tabelle 7.3: Berechnung der mittleren Objektgenauigkeit in Aufnahme- richtung für 80% Bildüberlappung .....	35
Tabelle 7.4: Messgenauigkeit Faro Focus Premium 70 bei 25 m Entfernung.....	36
Tabelle 7.5: Betrachtung der Leistungsspezifikation des Lasers und Berechnung des Strahldurchmessers in einer Entfernung von 25 m.....	37
Tabelle 7.6: Betrachtung der Ablenkeinheit und Berechnung des minimalen Punkteabstandes in einer Entfernung von 25 m.....	37
Tabelle 8.1: Vordefinierte Montagedisken der Kamera- und der Steuereinheit am Bohrkopf....	40
Tabelle 8.2: Montagedisken und -radien in Bezug auf den Bohrkopfmittelpunkt .....	41
Tabelle 8.3: 2D-Kamerapositionen; Einzelmessung aus Civil3D; Messgenauigkeit 10 mm.....	44
Tabelle 9.1: Überlappung der Aufnahmespuren .....	53
Tabelle 9.2: Berechnung der Bildrate für 80% Bildüberlappung in Bewegungsrichtung der Spur 4; gewählte Bildrate; tatsächliche Bildüberlappung in Bewegungsrichtung sowie Bildanzahl und Bilddichte.....	54
Tabelle 9.3: Bildüberlappung und Bilddichte in Bewegungsrichtung Spur 1 bis 3; Objekthöhe am Bild 712,6 mm; Bildrate 1 1/s; Zeit für 360 Grad Rotation 225 s/U .....	54
Tabelle 9.4: Berechnung der maximalen Belichtungszeit für die maximale Bewegungsunschärfe von 1 Pixel; gewählte Belichtungszeit; tatsächliche Bewegungsunschärfe bei gewählter Belichtungszeit.....	55
Tabelle 9.5: Berechnung der Schärfentiefe.....	56
Tabelle 9.6: Innere Orientierungsparameter aus der Selbstkalibrierung mit Standardabweichung (Error) und Varianz-Kovarianz-Matrix; Agisoft-Metashape .....	58
Tabelle 9.7: Innere Orientierungsparameter aus der simultankalibrierung mit Standardabweichung (Error) und Varianz-Kovarianz-Matrix; Agisoft-Metashape .....	58
Tabelle 9.8: RMS-Werte der Kamerapositionen im Objektkoordinatensystem; Agisoft- Metashape.....	62

## 1. Einleitung

### 1.1. Problemanalyse und Forschungskontext

Die moderne Tunnelbauindustrie ist zunehmend auf hochentwickelte Technologien angewiesen, um die Genauigkeit und Effizienz der Bauprojekte zu steigern. Im Zuge dieser Fortschritte hat die Montanuniversität in Zusammenarbeit mit der Firma Geodata MT GmbH ein innovatives photogrammetrisches Messsystem entwickelt. Dieses System ermöglicht die digitale Kartierung der Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb. Dieser technologische Fortschritt erweist sich als äußerst bedeutsam, da, auf Grund der eingeschränkten Zugänglichkeit des Bohrkopfs der Tunnelbohrmaschine (TBM) und der davor liegenden Ortsbrust, keine klassischen Vermessungsmethoden an der Ortsbrust eingesetzt werden können. Eine geologische Erfassung und Interpretation der Ortsbrust ist ebenfalls nur bedingt möglich, wodurch die Verwendung des Kamerasystems eine digitale Dokumentation der Ortsbrust bietet, die deren Beurteilung objektiver gestaltet und für Auftraggeber und -nehmer eine höhere Transparenz schafft [Wenighofer et al. 2017a].

Mithilfe dieses bildgebenden Systems ist es möglich, eine umfassende digitale 3D-Rekonstruktion sowie maßstabstreue Ortho-Fotos der Ortsbrust zu erstellen. Diese Rekonstruktion ist eine präzise positionierte Punktwolke in einem lokalen Koordinatensystem, die eine direkte Messung geometrischer Eigenschaften und geologischer Parameter ermöglicht. Zudem ist eine genaue volumetrische Bestimmung von Ausbrüchen, Felsnasen und die Lokalisierung verschiedener Merkmale, wie Wasserzutritte oder Klüfte, umsetzbar. Infolgedessen kann das photogrammetrische System dazu dienen, eine vollständige baugelogeische Dokumentation während des Bauprozesses zu erstellen.

Trotz dieser beeindruckenden technologischen Fortschritte traten in der Vergangenheit praktische Herausforderungen bei der Bildverknüpfung ringförmiger Teilabschnitte, den sogenannten Aufnahmespuren einer Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb, auf. Diese sind in der Regel darauf zurückzuführen, dass in der Praxis ein enges Zeitfenster zur Ortsbrustaufnahme gewährt wird, wodurch die Anzahl der möglichen Aufnahmespuren auf ein Minimum zu reduzieren ist. Dies führt insbesondere bei der Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren mithilfe bildverarbeitender Software zu Herausforderungen, die im ungünstigsten Fall Bildverarbeitungsfehler ergeben, die die geologische Beurteilung der Ortsbrust erschweren. Zur Bewältigung dieses Problems muss ein zusätzlicher Verarbeitungsschritt unter Verwendung eines Iterative-Closest-Point-Algorithmus (ICP) zur Koregistrierung der Aufnahmespuren durchgeführt werden, um das Risiko einer Verwechslung mit geometrischen Eigenschaften oder geotechnisch relevantem Bruchverhalten zu minimieren. [Wenighofer et al. 2020]

Die vorliegende Arbeit baut auf früheren Erkenntnissen und technologischen Fortschritten auf und trägt dazu bei, bestehende Herausforderungen in Bezug auf die Verknüpfung von photogrammetrisch erfassten Aufnahmespuren und die Qualität dessen räumlicher Rekonstruktion zu bewältigen. Die Arbeit ist in den breiteren Kontext der Photogrammetrie und der Tunnelbauindustrie in Bezug auf die digitale Ortsbrustkartierung im maschinellen Tunnelvortrieb eingebettet. Sie zielt darauf ab, einen Beitrag zur Verbesserung der Objektivität und Transparenz der Ortsbrustdokumentation in dieser speziellen Domäne zu leisten. Der Forschungskontext bietet eine Grundlage für die Festlegung der Zielsetzung und die Arbeit besitzt Relevanz in Hinblick auf die Tunnelbauindustrie und die geotechnische Planung untertägiger Bauvorhaben.

## 1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das Hauptziel dieser Arbeit umfasst die Identifikation potenzieller Herausforderungen bei der mit Agisoft-Metashape durchgeführten Bildverknüpfung photogrammetrisch erfasster Aufnahmespuren einer Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb. Zur Umsetzung soll die innere Genauigkeit berücksichtigt werden sowie die Planung der Bildaufnahme als auch die Analyse des Bildverarbeitungsprozesses durchgeführt werden. Zur Qualitätskontrolle ist besonderes Augenmerk auf die äußere Genauigkeit der rekonstruierten Ortsbrust zu legen. Das langfristige Ziel besteht darin, die Aufnahmespuren mithilfe von Bildverarbeitungssoftware so zu verknüpfen, dass idealerweise kein zusätzlicher Verarbeitungsschritt erforderlich ist.

Um das Ziel zu erreichen, wird ein akribischer Ansatz verfolgt, der mit der sorgfältigen Planung der photogrammetrischen Bildaufnahme beginnt. Diese beinhaltet eine eingehende Untersuchung der bereits vordefinierten Kameramontagepositionen und den daraus resultierenden Überlappungen der Aufnahmespuren. Um einen qualitativ hochwertigen Bildverband zu gewährleisten, folgt eine präzise Festlegung der projektspezifischen optischen Aufnahmeparameter. Dadurch soll vorausgesetzt werden, dass potenzielle Herausforderungen bei der Verknüpfung der Aufnahmespuren nicht auf Qualitätsverluste im Bildverband beruhen.

Anschließend erfolgt die Erfassung eines umfassenden Bildverbandes der Ortsbrust mithilfe des Kamerasystems der Montanuniversität und der Firma Geodata MT GmbH. Durch die Verwendung von bildverarbeitender Software wird schließlich eine präzise 3D-Punktwolke durch photogrammetrische Verarbeitung erzeugt. Zur Identifikation möglicher Herausforderungen bei der Verknüpfung der Aufnahmespuren wird der Bildverarbeitungsprozess mit besonderem Augenmerk auf die Bildzuordnung analysiert.

Nach der Datenerfassung folgt die eingehende Evaluierung der Genauigkeit und Qualität der räumlichen Rekonstruktion. Dies umfasst die detaillierte Analyse der inneren Genauigkeit der Bündelausgleichung und die umfassende Bewertung der äußeren Genauigkeit der erstellten 3D-Punktwolke durch einen Vergleich mit einem Laserscan. Dieser Prozess dient der Qualitätskontrolle und der Identifikation potenzieller Folgen einer unvollständigen Bildverknüpfung zwischen den Aufnahmespuren.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit werden dazu beitragen, die Genauigkeit und Qualität der digitalen Erfassung der Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb signifikant zu steigern. Dies hat erhebliche Bedeutung für die geotechnische Planung und die Sicherheit untertägiger Bauvorhaben. Zudem wird die wirtschaftliche Effizienz durch die Optimierung von Bau- und Maschinenmaßnahmen erheblich gesteigert. Insgesamt wird diese Arbeit dazu beitragen, die Digitalisierung und Präzision im Tunnelbau voranzutreiben und einen positiven Beitrag zur Zukunft der Tunnelbauindustrie leisten.

### **1.3. Gliederung der Arbeit**

Das zweite Kapitel umfasst die Quellenarbeit in Bezug auf das Thema der digitalen Ortsbrustkartierung im maschinellen Tunnelvortrieb. Im dritten Kapitel folgt der theoretische Rahmen der Photogrammetrie, der grundlegende theoretische Konzepte beinhaltet. Der Bildverarbeitungsprozess mit Agisoft-Metashape wird im vierten Kapitel erläutert, gefolgt von den Möglichkeiten zur Evaluierung der inneren und der äußeren Genauigkeit einer photogrammetrisch prozessierten Rekonstruktion im fünften Kapitel.

Im sechsten Kapitel wird das Kamerasystem der Montanuniversität und der Firma Geodata MT GmbH präsentiert. Dieses wurde zur Umsetzung der vorliegenden Arbeit verwendet und spielt eine zentrale Rolle. Im siebten Kapitel wird eine Genauigkeitsvorbetrachtung des Kamerasystems und des Laserscanners vorgenommen, um deren zu erreichende Genauigkeit abzuschätzen.

Das achte Kapitel beginnt mit einer Projektbeschreibung, um einen Eindruck des Einsatzortes und der Beschaffenheit der Ortsbrust zu vermitteln. Darauf folgt der methodische Ablauf, der in drei Abschnitte unterteilt ist. Diese sind die Planung der photogrammetrischen Aufnahme, die Aufnahme des Bildverbandes und dessen Rekonstruktion zu einer räumlichen 3D-Punktwolke durch photogrammetrische Prozessierung sowie die abschließende Evaluierung der Genauigkeit und Qualität jener.

Schließlich werden im neunten Kapitel die Ergebnisse der Arbeit präsentiert und im Kapitel zehn diskutiert. Die abschließenden Kapitel beinhalten eine Zusammenfassung der Ergebnisse, eine Schlussfolgerung und ein Fazit. Dieser Gliederungsplan dient dazu, einen klaren Einblick in den Aufbau und die Struktur der vorliegenden Forschungsarbeit zu bieten.



## 2. Quellenarbeit

In diesem Abschnitt erfolgt eine detaillierte Analyse des prinzipiellen Erfordernisses der Ortsbrustkartierung im maschinellen Tunnelvortrieb und dessen aktuellen Forschungsstandes. Die Berücksichtigung namhafter Literatur spielt hierbei eine zentrale Rolle.

### 2.1. Erfordernis der Ortsbrustkartierung im maschinellen Tunnelvortrieb

Die Notwendigkeit der bildgebenden Darstellung der Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb ergibt sich aus den Anforderungen der Werksvertragsnorm ÖNORM B 2203-2:2023-03, welche eine regelmäßige baugelogische Dokumentation für Untertagebauarbeiten vorsieht. Diese Dokumentation bildet die Grundlage für die geotechnische Planung von untertägigen Bauwerken und ermöglicht eine laufende Anpassung während der Bauphase, um die Sicherheit, Umweltverträglichkeit und Langzeitstabilität zu gewährleisten.

Da eine vollständige Bestimmung der Gebirgseigenschaften eines untertägigen Bauwerkes während der Planungsphase in der Regel unmöglich ist, entstehen Unsicherheiten im Baugrundmodell, die die Risikoerschätzung erschweren. Daher ist das Ziel der geotechnischen Planung die kontinuierliche wirtschaftliche Optimierung der Bau- und Maschinenmaßnahmen, einschließlich der Festlegung der erforderlichen Sicherungsmaßnahmen und Vortriebsparameter der TBM. Die Arbeitsabläufe der geotechnischen Planung sind in der ÖNORM B2203-2:2023-03 und der Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb [ÖGG 2014] geregelt.

Im Rahmen dieser Planung verlangt die ÖNORM B 2203-2:2023-03 eine baugelogische Dokumentation der Ausbruchflächen, insbesondere der Ortsbrust, zu bestimmten Zeitpunkten während der Bauausführung. Dabei werden verschiedene Methoden zur Charakterisierung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften empfohlen, darunter auch die Photo- und Videogrammetrie zur digitalen Erfassung der Ortsbrust. Dies ermöglicht eine präzise und umfassende Dokumentation, um die geotechnische Planung zu unterstützen und die Langzeitstabilität sowie die wirtschaftliche Effizienz untertägiger Bauvorhaben zu gewährleisten.

### 2.2. Stand der Technik: Ortsbrustkartierung im maschinellen Tunnelvortrieb

Im kontinuierlichen Tunnelvortrieb mit einer TBM wird die geologische Dokumentation der Ortsbrust während des Vortriebs traditionell von einem Geologen durchgeführt. Bisher war aufgrund der beschränkten Sichtverhältnisse durch den Bohrkopf die Kartierung der gesamten Ortsbrust stark von den vorhandenen Öffnungen wie Mannlöcher, Räumer und Diskengehäuse abhängig. Um mögliche Unstimmigkeiten zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer aufgrund dieses Vorgehens zu minimieren und eine einheitliche Bewertung der Gebirgsverhältnisse zu fördern, ist eine klare digitale Dokumentation der Ortsbrust während des Bauprozesses von entscheidender Bedeutung. [Wenighofer et al. 2020]

Ursprünglich wurde dies durch den Einsatz von Zeilenkameras realisiert, die zu einer vollflächigen 2D-Abbildung der Ortsbrust führten [Yamamoto et al. 1999]. Der Einsatz dieser Technologie ist in Europa in der Branche nicht bekannt. Der Nachteil dieses Systems bestand in der fehlenden metrischen Auflösung [Wenighofer et al. 2020].

Die Maßstabstreue ist von entscheidender Bedeutung, um das digitale Modell der Ortsbrust zur Messung geometrischer Eigenschaften und zur Kartierung von Gebirgseigenschaften effektiv zu nutzen. Hierzu gehören die räumliche Orientierung von Gebirgsstrukturen, Mächtigkeiten, Versätze, Felsnasen, 3D-Positionen verschiedener Punkte sowie die Kartierung von Eigenschaften wie Trennflächen, Ausbisse und andere geologische Merkmale. [ÖGG 2022]

Um die digitale Kartierung der Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb voranzutreiben, entwickelte die Montanuniversität ein digitales Aufnahmesystem, das erfolgreich im Rahmen einer Masterarbeit im Koralmtunnel eingesetzt wurde. Dieses Kamerasystem erzeugte jedoch Teilabbildungen, die aus einzelnen Videoframes zusammengesetzt wurden. Es gestaltete sich als anspruchsvoll, diese Teilabbildungen zu einer vollständigen Abbildung der Ortsbrust zusammenzuführen. [Henzinger 2013]

Parallel dazu meldete die Montanuniversität im Jahr 2013 ein Patent für ein System zur Erfassung von Ortsbrustbildern an, das 2015 veröffentlicht wurde [Galler et al. 2015]. Dabei handelt es sich um ein photogrammetrisches Kamerasystem zur vollflächigen und geometrisch richtigen Erfassung von Ortsbrustabbildern mittels Industriekameras. Das System wurde in einem gemeinsamen Forschungsprojekt zwischen der Montanuniversität und der Geodata MT GmbH entwickelt [Wenighofer et al. 2017a; Wenighofer et al. 2020]. Zur vollständigen Abbildung der Ortsbrust werden ringförmige Teilabschnitte erfasst und im Anschluss zu einer umfassenden Abbildung der Ortsbrust zusammengeführt [Wenighofer et al. 2017a; Wenighofer et al. 2020]. Das photogrammetrische System wurde erfolgreich im Brenner-Basistunnel getestet und zur direkten Ableitung geometrischer und geologischer Informationen verwendet [Six 2017].

In ähnlicher Weise wurden bildgebende Systeme basierend auf Videoaufnahmen zur dreidimensionalen Rekonstruktion der Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb entwickelt. Nach der Verarbeitung sind diese Systeme in der Lage, vergleichbare Ergebnisse aus einer photogrammetrischen Prozessierung bereitzustellen. [Wenighofer et al. 2017b; Gaich et al. 2019]

Die Fortschritte bei der Erfassung und digitalen Rekonstruktion der Ortsbrust haben dazu beigetragen, die geotechnische Charakterisierung des Gesteins zu optimieren und zu vereinfachen. Dies ermöglicht die genaue Bestimmung von geometrischen Eigenschaften der Ortsbrust, die zuvor nur ungenau möglich war. Volumetrische Ausbrüche und Felsnasen müssen nicht mehr geschätzt, sondern können in der dreidimensionalen Rekonstruktion genau vermessen werden. Zudem liegen sie digital und objektiv für Auftraggeber und Auftragnehmer auf der Baustelle vor. [Wenighofer et al. 2017a; Wenighofer et al. 2020]

Die Methoden der digitalen Ortsbrusterfassung bilden heute die Grundlage für die baugeologische Dokumentation und die kontinuierliche Entwicklung der geotechnischen Planung, um die Sicherheit und die wirtschaftliche Optimierung der Bauprojekte zu gewährleisten. In kontinuierlichen Vortrieben wird hauptsächlich die Photo- und Videogrammetrie eingesetzt, während im konventionellen Vortrieb zusätzlich das Laserscanning verwendet wird, da die Ortsbrust hier gut zugänglich ist. [ÖGG 2022]

### 3. Theoretischer Rahmen der Photogrammetrie

In diesem Abschnitt werden die essenziellen theoretischen Grundlagen der Photogrammetrie präsentiert, die von entscheidender Bedeutung sind, um einen photogrammetrischen Prozess zur Generierung von 3D-Modellen aus realen Objekten durchzuführen. Der erste Teil des theoretischen Rahmens beinhaltet die prinzipiellen Methoden sowie die Ziele der Photogrammetrie und gibt einen Überblick über den Prozess der photogrammetrischen Bildaufnahme und -auswertung. Anschließend wird das Abbildungsmodell vorgestellt, das grundlegend ist, um den Strahlengang in der Photogrammetrie zu verstehen. Darauf folgt die Beschreibung verschiedener Koordinatensysteme und die Erläuterung der räumlichen Rotation, die in dieser Arbeit relevant ist. Der theoretische Rahmen der Photogrammetrie wird durch das Thema der Orientierung eines Bildverbandes und die Betrachtung relevanter optischer Aufnahmeparameter abgerundet.

#### 3.1. Prinzipielle Methoden und Ziele der Photogrammetrie

Die Photogrammetrie umfasst disziplinübergreifende Methoden, die aus einem oder mehreren Bildverbänden eines beliebigen Objekts dessen Form und Lage indirekt durch Bildmessung und Bildinterpretation bestimmen. Sie kann in jeglichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, wo fotografische Aufnahmen des betreffenden Objekts umgesetzt werden können. Das Hauptziel des photogrammetrischen Prozesses besteht darin, eine präzise geometrische Rekonstruktion des in den Aufnahmen abgebildeten Messobjekts in drei Dimensionen zu erzielen. [Luhmann 2010b, S. 2]

Im Allgemeinen gliedert sich der photogrammetrische Aufnahme- und Auswerteprozess bei der Anwendung einer kalibrierten Kamera in folgende Schritte [Luhmann 2010a, S. 24]:

- 1) Vorkalibrierung der Kamera (Ermittlung der inneren Kameraorientierung)
- 2) Aufnahme des Objekts mit kalibrierter Kamera
- 3) Bildmessung (Pass- und Verknüpfungspunkte)
- 4) Orientierung der Aufnahmen und Objektrekonstruktion

Hingegen ist der Ablauf des Prozesses vom Objekt zum Modell mittels unkalibrierter Kamera wie folgt zusammenzufassen [Luhmann 2010a, S. 25]:

- 1) Aufnahme des Objekts mit unkalibrierter Kamera
- 2) Bildmessung (Pass- und Verknüpfungspunkte)
- 3) Kalibrierung, Orientierung und Objektrekonstruktion

Grundsätzlich führt die Bildaufnahme durch die Projektion eines dreidimensionalen Objekts in ein zweidimensionales Bild zu einem Informationsverlust. Dies betrifft nicht nur Bereiche, die nicht im Bild sichtbar oder verdeckt sind, sondern auch Stellen mit geometrischen Verzerrungen aufgrund der räumlichen Anordnung von Kamera und Objekt. Darüber hinaus können radiometrische (farbliche) Veränderungen durch Eigenschaften der Medien (Luft, Gas) und des Sensors auftreten. [Luhmann 2010b, S. 3]

Im nächsten Schritt werden geometrische und radiometrische Informationen eines abgebildeten Objektpunktes durch Bildmessung und -interpretation gewonnen. Hierzu sind Methoden der Bildinterpretation und

Bildzuordnung notwendig, die die radiometrische Punktinformation (Grauwert, Farbwert, Intensität) in Kombination mit der geometrischen Information der Punktlage im Bild kombinieren. Aus diesem Grund ist für ein Bildmesssystem eine geeignete geometrische und optische Qualität erforderlich, die besonders durch optische Aufnahmeparameter zu beeinflussen ist. [Luhmann 2010b, S. 3]

Aus den vorgenommenen Messungen werden auf Grundlage von physikalischen und mathematischen Modellen Bild- in Objektkoordinaten transformiert. Hierfür ist die Bündelgleichung Grundlage, die auf den Kollinearitätsgleichungen basiert und zu einer exakten dreidimensionalen geometrischen Rekonstruktion des Objekts führt. Wird das Objekt mit einer unkalibrierten Kamera aufgenommen, kann die Kamera im Rahmen der Objektrekonstruktion kalibriert werden. In der Praxis werden hierzu diverse bildverarbeitende Softwareanwendungen genutzt, die eine breite Palette an Möglichkeiten bieten. [Luhmann 2010b, S. 2–3]

### 3.2. Abbildungsmodell der Photogrammetrie

Die Photogrammetrie ist ein Messverfahren, das zur Beschreibung von Form und Lage des Objekts auf dem mathematischen Modell der Zentralprojektion basiert. Es wird zur Rekonstruktion eines sogenannten Strahlenbündels angewendet, wobei jeder Bildpunkt  $P'$  mit dem Projektionszentrum  $O'$  eine Raumrichtung des Strahls zum Objektpunkt  $P$  bildet. Dies führt zunächst zu einer räumlichen Richtung, jedoch ist die Länge des jeweiligen Strahls vorerst noch unbekannt. Wird dies für einen Objektpunkt auf mehreren Bildern durchgeführt, kommt es zum Schnitt von mindestens zwei korrespondierenden (homologen), räumlich verschiedenen Bildstrahlen, die einen Objektpunkt dreidimensional bestimmen. [Luhmann 2010b, S. 7–9]

In der Stereophotogrammetrie sind lediglich zwei Bilder an der Bestimmung der Lage und der Form des Objekts beteiligt, während in der Mehrbildphotogrammetrie die Bildanzahl unbegrenzt ist. Zur absoluten Beschreibung der Bildstrahlen im Raum, ist es erforderlich die Abbildungsgeometrie der Aufnahmekamera (innere Orientierung der Kamera) sowie die Lage der Aufnahmekameras im Raum (äußere Kameraorientierung) zu kennen. Das Prinzip der räumlichen Positionierung eines Objektpunktes durch Schnitt korrespondierender Bildstrahlen ist in Abbildung 3.1 dargestellt. [Luhmann 2010b, S. 7–8]

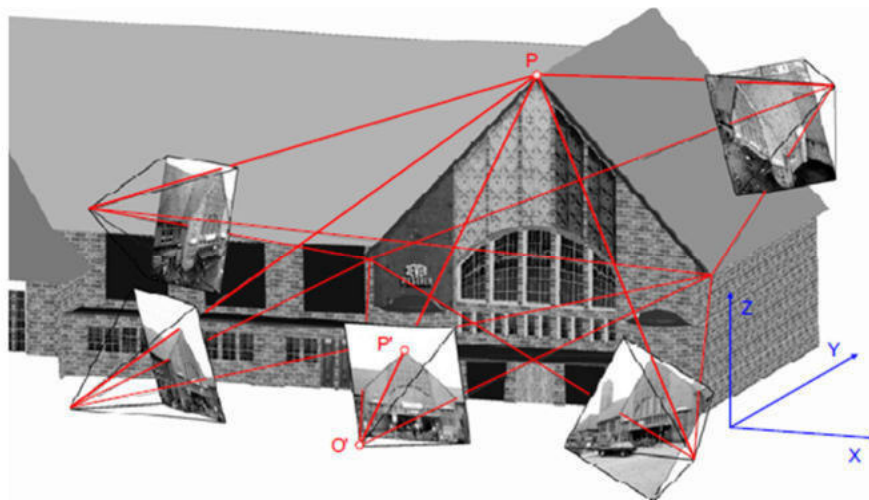


Abbildung 3.1: Prinzip der Mehrbildphotogrammetrie; [Luhmann 2010b, S. 7]

Die Geometrie der Strahlen im Raum wird durch das Modell der Lochkamera (Abbildung 3.2) beschrieben. Es stellt eine vereinfachte und ideale Abbildungsgeometrie der Aufnahmekamera dar. Als Bezugspunkt dient das Projektionszentrum  $O'$ , durch das alle Bildstrahlen vom Objektpunkt  $P$  zum Bildpunkt  $P'$  verlaufen. Eine derartige ideale zentralperspektivische Abbildung, sowie eine scharfe Abbildung des gesamten Objekts, ist im Normalfall mit einem realen Kamerasystem nicht zu erreichen. [Luhmann 2010b, S. 7–8]

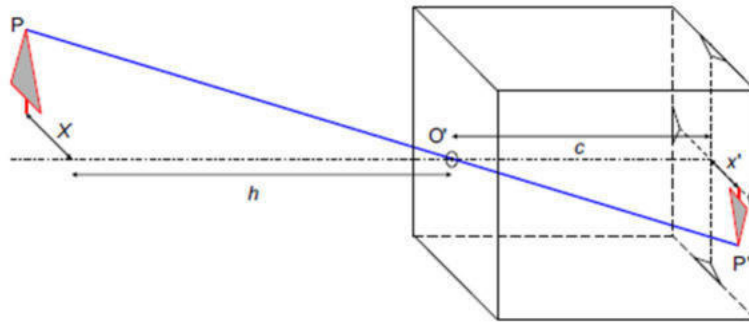


Abbildung 3.2: Modell der Lochkamera; [Luhmann 2010, S. 8]

In der Photogrammetrie wird aus diesem Modell die Bildmaßstabszahl  $m_b$  hergeleitet, die als wesentliche Kenngröße einer photogrammetrischen Abbildung dient und nach Formel (3.1) ermittelt wird. Sie zeigt das Verhältnis von Aufnahmeabstand  $h$  zur Kamerakonstanten  $c$  und kann auch durch eine Objektstrecke  $X$  zu der entsprechenden Strecke im Bildraum  $x'$  oder als Kehrwert des Abbildungsmaßstabs  $M_b$  ausgedrückt werden. [Luhmann 2010b, S. 134].

$$m_b = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'} = \frac{1}{M_b} \quad (3.1)$$

Es ist zu erwähnen, dass im Normalfall die Bildmaßstabszahl  $m_b$  bei der Zentralprojektion aufgrund des variierenden Objektabstandes für jeden Bildpunkt variieren würde [Kraus 1996, S. 20]. Weiters ist ein einheitlicher Bildmaßstab nur gegeben, wenn eine strenge Senkrechtaufnahme eines ebenen Objekts vorliegt [Luhmann 2010b, S. 135]. Liegen die Abweichungen von einer Senkrechtaufnahme innerhalb annehmbarer Grenzen, kann zur Abschätzung ein mittlerer Aufnahmeabstand angenommen und eine mittlere Bildmaßstabszahl errechnet werden [Luhmann 2010b, S. 136].

### 3.3. Koordinatensysteme

In der Photogrammetrie kommen unterschiedliche Koordinatensysteme zum Einsatz, die nötig sind, um Bildpunkte in Objektpunkte zu transformieren. Genauer sind dies das Pixel-, Bild-, Modell- und Objektkoordinatensystem, die sich im Groben in ebene und räumliche Koordinatensysteme mit unterschiedlichen Bezugspunkten unterteilen. Im Folgenden werden diese Koordinatensysteme kurz erläutert.

#### 3.3.1. Pixelkoordinatensystem (uv)

Das Pixelkoordinatensystem (Abbildung 3.3) besteht aus Spalten (u) und Zeilen (v). Es hat seinen Ursprung im oberen linken Eck und ist das Koordinatensystem eines digitalen Bildes. [Luhmann 2010b, S. 24]

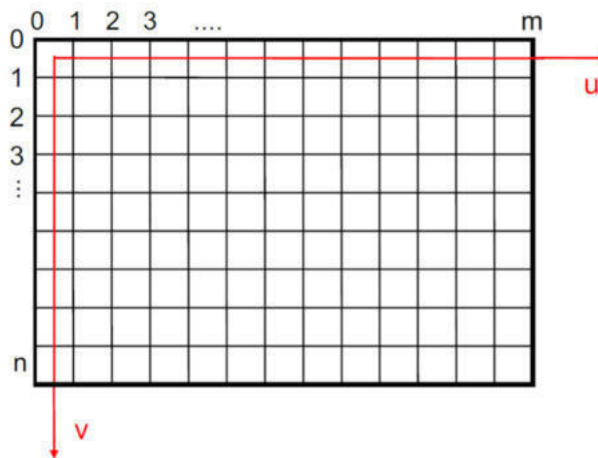


Abbildung 3.3: Pixelkoordinatensystem; modifiziert nach [Luhmann 2010b, S. 24]

#### 3.3.2. Bildkoordinatensystem (x'y'z')

Der Ursprung des kartesischen Bildkoordinatensystems ist das Projektionszentrum  $O'$ . Die  $z'$ -Achse zeigt näherungsweise in Richtung der optischen Achse und stellt den Bezug zwischen Bildebene und der Kameraposition her. Die Abbildung 3.4 zeigt das Bildkoordinatensystem in der sogenannten Positiv- und Negativlage. [Luhmann 2010b, S. 25 i.V.m. 236]

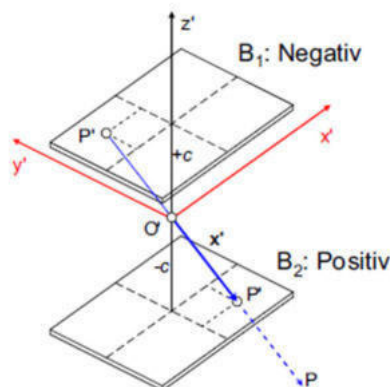


Abbildung 3.4: Räumliches Bildkoordinatensystem; [Luhmann 2010b, S. 25]

Beim Bildkoordinatensystem ist die Positivlage von der Negativlage zu unterscheiden. Bei Positivlage zeigt der Bildvektor  $\mathbf{x}'$  in Richtung des Objektpunktes P und ist für den Bildpunkt P' durch die Formel (3.2) zu beschreiben. [Luhmann 2010b, S. 24–25]

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

### 3.3.3. Modellkoordinatensystem (xyz)

Im räumlichen kartesischen Modellkoordinatensystem (Abbildung 3.5) wird die relative Lage der Bildkoordinatensysteme von zwei oder mehreren Bildern zueinander beschrieben, wobei der Ursprung im Projektionszentrum eines Bildes liegt. Diese relative Lage der Bildkoordinatensysteme zueinander wird als relative äußere Kameraorientierung bezeichnet. [Luhmann 2010b, S. 25 i.V.m. 275]

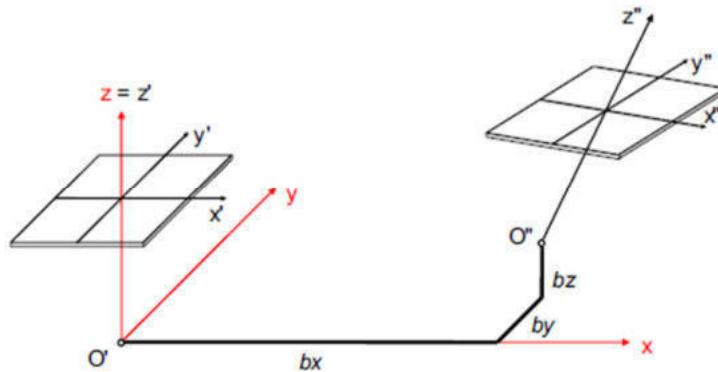


Abbildung 3.5: Modellkoordinatensystem; [Luhmann 2010b, S. 25]

### 3.3.4. Objektkoordinatensystem (XYZ)

Unter Objektkoordinatensystem (Abbildung 3.6) ist ein räumliches kartesisches Koordinatensystem zu verstehen. Es handelt sich entweder um ein übergeordnetes Koordinatensystem, wie das Landeskoordinatensystem, oder um ein unabhängig definiertes Koordinatensystem mit einem divers festgelegten Ursprung. [Luhmann 2010b, S. 26]

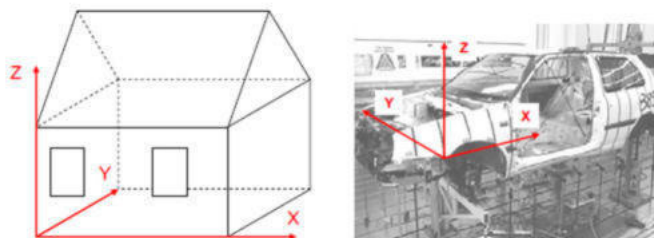


Abbildung 3.6: Beispiele für Objektkoordinatensysteme; [Luhmann 2010b, S. 26]

### 3.4. Koordinatentransformation

Um Punktkoordinaten eines Ausgangssystem in ein anderes Zielsystem zu transformieren, bedarf es einer Koordinatentransformation. In der Photogrammetrie wird diese zur Darstellung der Beziehung zwischen den Objekt- und Bildkoordinaten genutzt. Die erforderliche Transformationsmatrix wird im Regelfall aus Punkten mit bekannten Objekt- und Bildkoordinaten (Passpunkte) ermittelt. [Kraus 1996, S. 13]

Zur Umsetzung der Koordinatentransformation werden je nach Anwendungsfall ebene oder räumliche Transformationen eingesetzt [Luhmann 2010b, S. 42]. Für die vorliegende Arbeit wurden räumliche Drehungen genutzt, um die Koordinaten der Punkte des Laserscans vom Landeskoordinatensystem in das lokale Koordinatensystem des photogrammetrisch rekonstruierten Modells zu transformieren. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt die räumlichen Drehungen näher erläutert.

#### Räumliche Drehungen

Die räumlichen Drehwinkel  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  beschreiben eine Rotation um die Koordinatenachsen X, Y, Z des Zielsystems. Die Rotation wird bei Sicht von der Spitze der positiven Achse zum Ursprung gegen den Uhrzeigersinn ausgeführt. Die räumlichen Rotationen werden durch eine Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  ausgedrückt, die gemäß Formel (3.3), (3.4) und (3.5) formuliert werden. [Luhmann 2010b, S. 35–36]

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_{\kappa} * \mathbf{x} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_{\varphi} * \mathbf{x} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_{\omega} * \mathbf{x} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Der Drehwinkel kann aus Messungen bekannt sein oder ist durch Berechnung zu ermitteln. Da in der vorliegenden Arbeit der zur Rotation notwendige Winkel aus zwei Vektoren berechnet wurde, zeigt die folgende Formel (3.6) den Zusammenhang zweier Vektoren und dessen Winkel zueinander.

$$\cos \lambda = \frac{\vec{A} * \vec{B}}{|\vec{A}| * |\vec{B}|} \quad (3.6)$$

Sind die Vektoren nicht bekannt, können diese mit der Formel (3.7) aus den Punktkoordinaten der Vektorspitze und des Vektorschafes berechnet werden.

$$\vec{AB} = \begin{pmatrix} Bx - Ax \\ By - Ay \\ Bz - Az \end{pmatrix} \quad (3.7)$$



### 3.5. Orientierung eines Bildverbandes

Dieser Abschnitt des theoretischen Rahmens beschreibt zunächst die allgemeinen Orientierungsvorgänge zur Orientierung eines Bildverbandes. Anschließend wird auf die Parameter der inneren Orientierung der Kamera, der äußeren Orientierung einer Aufnahme und auf die relative Orientierung eines Stereobildpaares eingegangen. Zudem werden Kalibrierungsverfahren zur Ermittlung der inneren Orientierungsparameter erläutert und der daraus zu bestimmenden Bildvektor vorgestellt.

#### 3.5.1. Allgemeine Orientierungsvorgänge

Zunächst muss die innere Orientierung einer Kamera durch ein geeignetes Kalibrierverfahren ermittelt werden. Im Anschluss erfolgt die Bestimmung der äußeren Orientierung durch eine der folgenden Varianten: [Luhmann 2010b, S. 143 i.V.m. 483]

- Zweistufige Orientierung:

Klassischerweise erfolgt die Ermittlung der äußeren Orientierung in getrennten Schritten der relativen und der absoluten Orientierung im Rahmen der Bündelausgleichung. Nach der relativen Orientierung kann bereits im Modellkoordinatensystem ausgewertet werden.

- Übernahme bekannter Orientierungsparameter:

Sind die Parameter der äußeren Orientierung aus vorhergehenden Berechnungen bekannt, liegt das System direkt im Objektkoordinatensystem vor (übergeordnet oder lokal) und ist nach der inneren Orientierung direkt einsetzbar.

In der vorliegenden Arbeit kommen beide Varianten zum Einsatz. Bei Anwendung der zweistufigen Orientierung wird das Modell direkt nach der relativen Orientierung genutzt, wodurch die absolute Orientierung zur Umsetzung der Arbeit nicht erforderlich ist.

#### 3.5.2. Innere Orientierung der Kamera

Durch die inneren Orientierungsparameter wird die Geometrie des realen Aufnahmesystems in das Modell der Lochkamera rückgeführt. Die Parameter umfassen die Lage und den Abstand des Projektionszentrums  $O'$  zur Bildebene sowie Abweichungen von der Zentralprojektion. [Luhmann 2010b, S. 143]

Das Projektionszentrum  $O'$  des Objektivs dient hierbei als Bezugspunkt, durch den alle Bildstrahlen geradlinig verlaufen. Weichen die Strahlen von einer idealen Zentralprojektion ab, sind Abbildungsfehler (Verzeichnungen) vorhanden. Verzeichnungen werden bereits durch die Verwendung eines Objektivs erzeugt, wodurch eine reale Kamera bereits von der Lochkamera abweicht. Aus diesem Grund werden in der Praxis die Parameter der inneren Orientierung durch eine individuelle Kalibrierung des Systems bestimmt. Die Abbildung 3.7 zeigt die Parameter der inneren Orientierung. [Luhmann 2010b, S. 143]

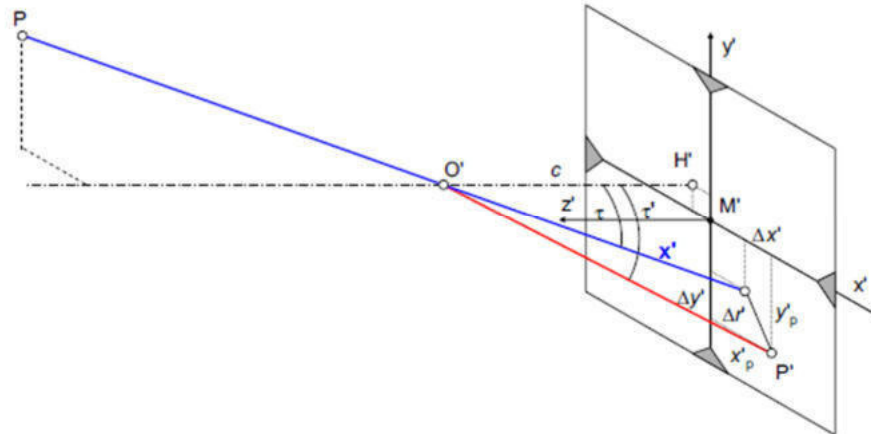


Abbildung 3.7: Parameter der inneren Orientierung; idealer Bildstrahl (blau) und Bildstrahl mit Verzeichnung (rot); [Luhmann 2010b, S. 144]

Die inneren Orientierungsparameter setzen sich wie folgt zusammen [Luhmann 2010b, S. 143]:

- Bildhauptpunkt  $H'$  ( $x'_0, y'_0$ ):  
Lotfußpunkt des Projektionszentrums  $O'$  im Bildkoordinatensystem;  $H' \sim M'$
- Kamerakonstante  $c$ :  
Lotrechter Abstand des Projektionszentrums  $O'$  von der Bildebene in negative  $z'$ -Richtung;  
 $c \sim f$  bei Fokussierung auf unendlich
- Verzeichnungsparameter:  
Beschreibung der Abweichung vom zentralperspektivischen Modell

Die Verzeichnungsparameter sind in folgende Parameter zu unterteilen [Luhmann 2010a, S. 44–47]:

- Radialsymmetrische Verzeichnung  $\Delta r'$ : Brechungsänderungen an den Linsen
- Tangential-asymmetrische Verzeichnung: Dezentrierung der Linsen
- Affinität: nicht quadratische Pixel oder ungleichmäßige Anordnung auf dem Sensor
- Scherung: Sensorschiefe durch einen nicht orthogonalen Einbau der Linse

Bei Kenntnis der Parameter der inneren Orientierung kann der bereits in Formel (3.2) beschriebene Bildvektor  $\mathbf{x}'$  gemäß Formel (3.8) für die Positivlage bestimmt werden. [Luhmann 2010b, S. 144 i.V.m. 25]

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_p - x'_0 - \Delta x' \\ y'_p - y'_0 - \Delta y' \\ -c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Hierbei gehen die gemessenen Koordinaten des Bildpunktes  $P'$  ( $x'_p, y'_p$ ) sowie die Koordinaten des Bildhauptpunktes  $H'$  ( $x'_0, y'_0$ ) und die achsenbezogenen Korrekturwerte der Abbildungsfehler  $\Delta x'$  und  $\Delta y'$  in die Berechnung ein. Zudem ist die  $z'$ -Koordinate des Bildvektors  $\mathbf{x}'$  durch den Wert der Kamerakonstante  $c$  definiert. [Luhmann 2010b, S. 144]

Die Parameter der inneren Orientierung einer Kamera werden durch die Kalibrierung der Kamera ermittelt. Die Kalibrierungsverfahren unterscheiden sich hinsichtlich des Referenzobjektes sowie dem Ort und Zeitpunkt der Kalibrierung. Sie lassen sich in Laborkalibrierung, Testfeldkalibrierung, Simultankalibrierung und Selbstkalibrierung unterteilen. [Luhmann 2010b, S. 483 i.V.m. 555]

### **Laborkalibrierung**

Durch die Laborkalibrierung werden die Parameter der inneren Orientierung mithilfe eines Goniometers oder eines Kollimators bestimmt. Diese speziellen Geräte werden verwendet, um die Richtungen und Winkel der Bildstrahlen durch das Objektiv zu messen. Die Laborkalibrierung kann vom Anwender nicht selbst durchgeführt werden und hat somit wenig praktische Relevanz. [Luhmann 2010b, S. 555]

### **Testfeldkalibrierung**

Zur Umsetzung der Testfeldkalibrierung wird ein geeignetes Objektpunktfeld mit Passpunkten oder bekannten Strecken, von mehreren Standpunkten aus formatfüllend und mit ausreichender Strahlenschnittgeometrie aufgenommen. Im Idealfall wird die Kamera frontal und schräg auf das räumliche Testfeld gerichtet, wobei sie jeweils um 90 Grad um die Aufnahmeachse gedreht wird. Die Parameter der inneren Orientierung der Kamera werden im Zuge der Bündelausgleichung ermittelt. Es ist daher darauf zu achten, dass die Aufnahmekonfiguration der Testfeldkalibrierung weitgehend der späteren Objektaufnahme entspricht. Für die Maßstabsinformation kann das Testfeld zusätzlich einen kalibrierten Systemmaßstab enthalten. [Luhmann 2010b, S. 555–556, 2010a, S. 21]

### **Simultankalibrierung**

In der Praxis findet die Simultankalibrierung vermehrten Einsatz und ist eine Erweiterung der Testfeldkalibrierung, wobei das Testfeld durch das eigene Messobjekt ersetzt wird. Die Kamera wird dann simultan mit der Objektpunktbestimmung während der Bündelausgleichung kalibriert. Dies hat den wesentlichen Vorteil, dass die innere Orientierung exakt für den Aufnahmezeitpunkt bestimmt wird und somit höchste Genauigkeiten bei der Objektpunktauswertung erlaubt. [Luhmann 2010b, S. 558–559, 2010a, S. 21–22]

### **Selbstkalibrierung**

Von Selbstkalibrierung wird gesprochen, wenn die Simultankalibrierung nur mit photogrammetrischen Beobachtungen, aber dennoch simultan mit der Objektpunktbestimmung durchgeführt wird. Da hierzu lediglich mit Bildkoordinaten von Objektpunkten gerechnet wird, führt dies im Sinne der kleinsten Quadrate zu minimalen Restklaffungen an den ermittelten Objektpunkten. [Luhmann 2010a, S. 22 i.V.m. 26]

Die Selbstkalibrierung wird durch eine zwangsfreie Einpassung auf ein beliebiges Objektkoordinatensystem durch freie Netzausgleichung umgesetzt. Die Parameter der inneren Orientierung ergeben sich in Bezug auf das beliebig skalierte Bildkoordinatensystem so, dass sie optimal zu den rekonstruierten Strahlenbündeln passen, die lediglich in ihrer Form bestimmt werden. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung werden bisher von keinem anderen mathematischen Ansatz übertroffen. [Luhmann 2010a, S. 62 i.V.m. 65]

### 3.5.3. Äußere Orientierung einer Aufnahme

Die äußere Orientierung einer photogrammetrischen Aufnahme beschreibt die räumliche Lage des Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem, dessen Ursprung im Projektionszentrum  $O'$  liegt. Die Abbildung 3.8 zeigt die äußere Orientierung einer Aufnahme zur Transformation eines Punktes vom Bild- in ein Objektkoordinatensystem. [Luhmann 2010b, S. 236–237]

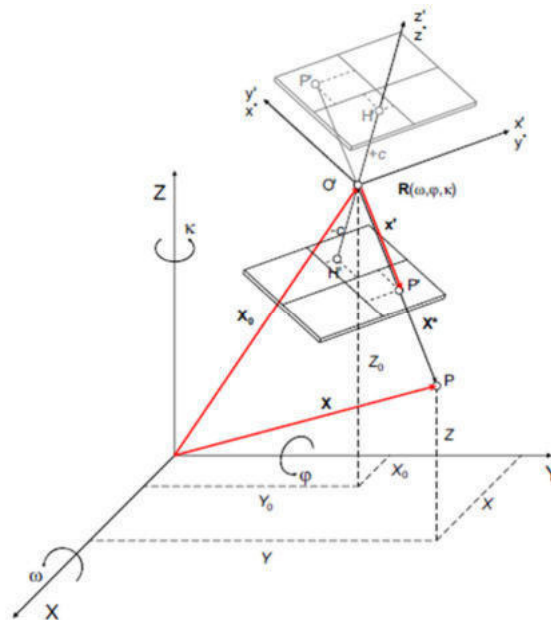


Abbildung 3.8: Parameter der äußeren Orientierung; [Luhmann 2010b, S. 237]

Die äußere Orientierung einer Aufnahme setzt sich aus den folgenden drei Translationen und drei Rotationen zusammen [Luhmann 2010b, S. 237]:

- Lage des Projektionszentrums  $\mathbf{X}_0$  ( $X_0, Y_0, Z_0$ )
- Drehmatrix  $\mathbf{R}$  ( $\omega, \varphi, \kappa$ )

Die räumliche Lage des Bildkoordinatensystems wird durch den Translationsvektor  $\mathbf{X}_0$  gemäß Formel (3.9) vom Ursprung des Objektkoordinatensystems zum Projektionszentrum  $O'$  definiert. Die räumliche Ausrichtung des Bildkoordinatensystems zum Objektkoordinatensystem wird durch die Drehmatrix  $\mathbf{R}$  beschrieben, die aus drei Rotationen der Drehwinkel  $\omega, \varphi, \kappa$  um die Koordinatenachsen  $X, Y, Z$  besteht und in Formel (3.10) zusammengefasst abgebildet ist. [Luhmann 2010b, S. 237]

$$\mathbf{X}_0 = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\omega * \mathbf{R}_\varphi * \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Durch Anwendung der Parameter der äußeren Orientierung ist es nun möglich, die definierte Richtung des Bildvektors  $\mathbf{x}'$  aus Formel (3.8) vom Projektionszentrum  $O'$  zum Bildpunkt  $P'$  in einen absolut im Raum definierten räumlichen Strahl vom Projektionszentrum  $O'$  zum Objektpunkt  $P$  zur transformieren. Hierzu ist ein zusätzlicher Vektor  $\mathbf{X}^*$  erforderlich, der in Punkt 4.2.2. erläutert wird. [Luhmann 2010b, S. 238]

### 3.5.4. Relative Orientierung eines Stereobildpaares

Die Parameter der relativen Orientierung beschreiben die räumliche Lage eines Bildes relativ zum Stereopartner in einem gemeinsamen lokalen Modellkoordinatensystem und bestehen aus drei Translationen ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) und drei Rotationen ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ). Die Grundlage der rechnerischen Lösung bildet die sogenannte Koplana-ritätsbedingung, wobei ein Objektpunkt  $P$  in der gleichen Ebene wie die zugehörigen Projektionszentren  $O'$  und  $O''$  liegen müssen. In der durch die Vektoren  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{r}'$  und  $\mathbf{r}''$  gebildeten Epipolarebene liegen dann die Bildpunkte  $P$  und  $P''$ . Die Koplana-ritätsbedingung ist dann erfüllt, wenn sich die Raumstrahlen  $\mathbf{r}'$  und  $\mathbf{r}''$  streng im Objektpunkte  $P$  schneiden. [Luhmann 2010b, S. 275–278]

Die Berechnung der relativen Orientierung kann mittels Folgebildanschluss oder mit unabhängigen Bildpaaren durchgeführt werden (Abbildung 3.9). In beiden Fällen hat das Modellkoordinatensystem seinen Ursprung im Bildkoordinatensystem des ersten Bildes. Beim Folgebildanschluss wird das zweite Bild relativ zum ersten Bild durch den Basisvektor  $\mathbf{b}$  ( $b_x$ ,  $b_y$ ,  $b_z$ ) zwischen den Projektionszentren  $O'$  und  $O''$  und den drei Rotationen  $\omega_2$ ,  $\varphi_2$ ,  $\kappa_2$  orientiert. Hingegen wird bei der Orientierung mit unabhängigen Bildpaaren die Richtung der  $x$ -Achse des Modellkoordinatensystems in Richtung des Basisvektors  $\mathbf{b}$  definiert und die übrigen unabhängigen Drehwinkel  $\omega_1$  ( $=\omega_2$ ),  $\varphi_1$ ,  $\kappa_1$  und  $\varphi_2$ ,  $\kappa_2$  bestimmt. In beiden Fällen kann der Maßstab des Modellkoordinatensystems im Allgemeinen beliebig festgelegt werden, wird aber in der Regel durch die Definition von  $b_x = 1$  bestimmt, wodurch die Anzahl der unbekannt Parameter auf fünf reduziert wird. [Luhmann 2010b, S. 276–277]

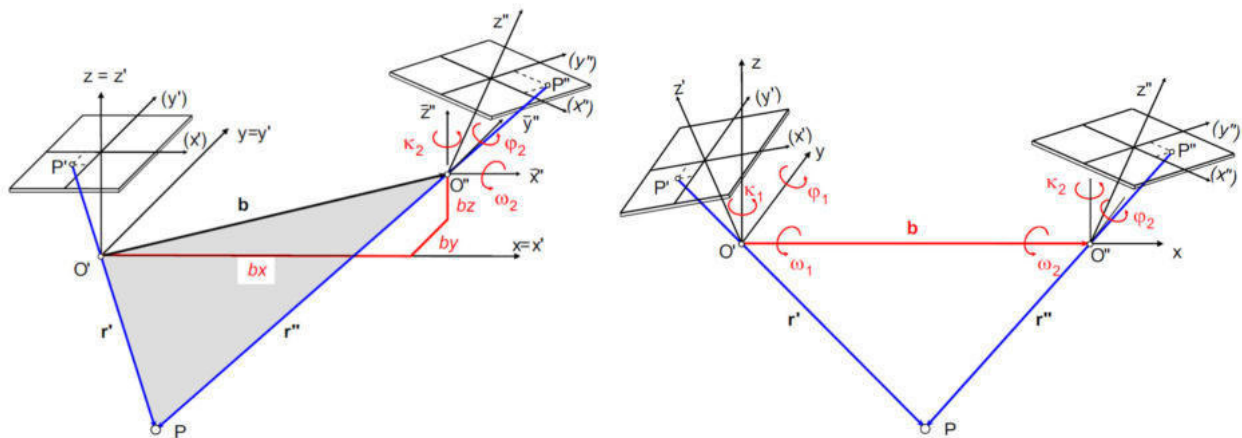


Abbildung 3.9: Modellkoordinatensystem und relative Orientierung; Folgebildanschluss (links); unabhängige Bildpaare (rechts); [Luhmann 2010b, S. 276]

### 3.6. Relevante optische Aufnahmeparameter

Im Folgenden werden wesentliche Aufnahmeparameter zusammengefasst, die im Vorfeld der photogrammetrischen Erfassung eines Objekts abgeschätzt und festgelegt werden müssen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit umfassen diese die Bildrate auf Basis der geforderten Bildüberlappung in Bewegungsrichtung, die Blendenöffnung für eine an die Umgebung angepasste Lichtmenge in Kombination mit dem ISO-Wert, als Maß für die Lichtempfindlichkeit des Sensors, sowie die Belichtungszeit des Sensors, die an die maximal tolerierbare Bewegungsunschärfe der Aufnahmen anzupassen ist. Zudem wurde der Fokus und die Schärfentiefe betrachtet, die sich aus dem tolerierbaren Unschärfekreis, der gewählten Blendenzahl, dem verwendeten Objektiv und dem Aufnahmeabstand ergibt.

#### 3.6.1. Bildrate und Bildüberlappung in Bewegungsrichtung

Im Allgemeinen ist die seitliche Bildüberlappung von jener in Bewegungsrichtung zu unterscheiden. Die jeweilige empfohlene Mindestüberlappung der Aufnahmen ist zur qualitativ hochwertigen photogrammetrischen Verarbeitung des Bildverbandes an die Empfehlung der angewandten bildverarbeitenden Software anzupassen. Für das Programm Agisoft-Metashape ist dem Benutzerhandbuch [Agisoft LLC 2022] eine Empfehlung von 80% in Bewegungsrichtung zu entnehmen.

Aus der empfohlenen Bildüberlappung in Bewegungsrichtung ist die erforderliche Bildrate in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit der Kamera und der Objektgröße am Bild zu ermitteln. Bei kreisförmigen Bahnen ist zu beachten, dass sich eine Bildüberlappung ergibt, die nicht über das gesamte Bild konstant ist. Je nach Projektanforderung reicht die Annahme einer mittleren Bildüberlappung zur Abschätzung aus.

#### 3.6.2. Belichtungszeit und Bewegungsunschärfe

Zur Belichtung des Sensors wird der Strahlengang mittels Verschlusses der Kamera für die Dauer der Belichtungszeit geöffnet [Luhmann 2010b, S. 182]. Dadurch entsteht bei Relativbewegungen zwischen dem Objekt und dem Aufnahmesystem eine Bewegungsunschärfe am Bild, die für die Nahbereichsphotogrammetrie mit 1 Pixel angesetzt werden kann [Luhmann 2010b, S. 512].

Zur Erfüllung einer geforderten maximal zulässigen Bewegungsunschärfe am Bild ist die Belichtungszeit über die Bildmaßstabszahl  $m_b$  mit der Geschwindigkeit der Relativbewegung abzustimmen. Folgende Formel (3.11) zeigt den Zusammenhang der maximalen Belichtungszeit  $\Delta t_{max}$  mit der maximal zulässigen Bewegungsunschärfe im Bild  $\Delta s'_{max}$ , der Bildmaßstabszahl  $m_b$  sowie der Geschwindigkeit der Relativbewegung  $v$  und der Bewegungsunschärfe am Objekt  $\Delta s$ . [Luhmann 2010b, S. 511–512]

$$\Delta t_{max} = \frac{\Delta s'_{max} \cdot m_b}{v} = \frac{\Delta s}{v} \quad (3.11)$$

Im Idealfall wird die maximale Belichtungszeit  $\Delta t_{max}$  ergänzend in Abhängigkeit der Lichtverhältnisse, der benötigten Schärfentiefe und dem ISO-Wert abgestimmt. Dennoch führt die Formel (3.11) zu einer in der Praxis anwendbaren Abschätzung der Belichtungszeit. [Luhmann 2010b, S. 511–512]

### 3.6.3. ISO-Wert

Die Sensorempfindlichkeit wird in der Optik anhand der Lichtempfindlichkeit des Sensors gemessen, die über den ISO-Wert einstellbar ist [Luhmann 2010b, S. 512]. Außer dem ISO-System sind für Vergleichszwecke auch das GHOST-, ASA- und DIN-System in Verwendung [Riat 2006].

### 3.6.4. Blendenöffnung

Eine Blende wirkt als bündelbegrenzendes Element, welches das einfallende Strahlenbündel begrenzt und dadurch die einfallende Lichtmenge auf den Sensor regelt. Die Blendenzahl  $k$  ist gemäß Formel (3.12) als das Verhältnis der Brennweite  $f$  zu dem Durchmesser der Eintrittspupille  $d'$  definiert. Sie ist der Kehrwert der relativen Öffnung der Blende und Grundlage für die Betrachtung der Schärfentiefe im Objektraum. [Luhmann 2010b, S. 110–113 i.V.m. 184-185]

$$k = \frac{f}{d'} = \frac{1}{\text{relative Öffnung}} \quad (3.12)$$

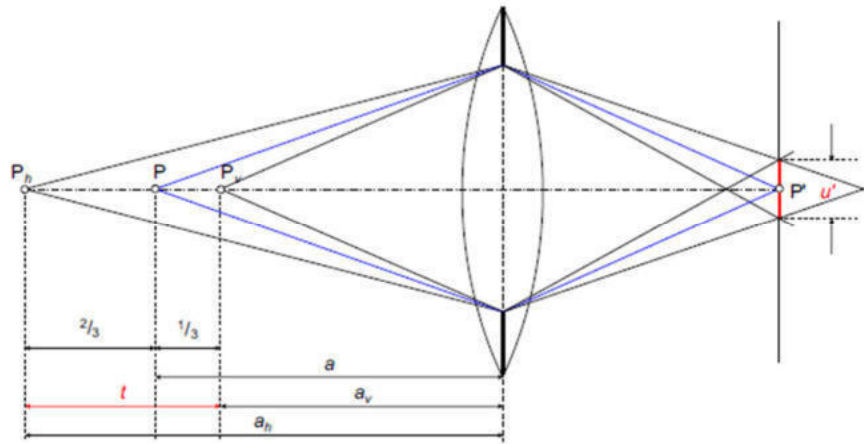
Die maximal mögliche Blendenöffnung wird als Lichtstärke des Objektivs bezeichnet. Die Blendenzahl folgt einer internationalen Blendenreihe, die mit der kleinsten Blendenzahl beginnt und in Tabelle 3.1 dargestellt ist. [Luhmann 2010b, S. 184]

Tabelle 3.1: Internationale Blendenreihe; [Luhmann 2010b, S. 184]

1	1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22	...
---	-----	---	-----	---	-----	---	----	----	----	-----

### 3.6.5. Schärfentiefe

Das Modell der Lochkamera stellt unabhängig vom Objektstand zur Kamera ein scharfes Bild des Objekts dar. In dem hier vorliegenden Fall werden jedoch kleine Unschärfen toleriert, die über einen Unschärfekreis  $u'$  (Zerstreuungskreis) definiert werden. Dessen Durchmesser wird bei digitalen Bildsensoren als 1 bis 3 Pixel angenommen und kann auf die Auflösungsgrenze des photogrammetrischen Systems übertragen werden. Aufgrund des tolerierbaren Unschärfekreises  $u'$  wird nicht nur der fokussierte Objektpunkt  $P$  (Fokuspunkt) scharf abgebildet, sondern alle Punkte, die innerhalb der sogenannten Schärfentiefe  $t$  liegen. Die Abbildung 3.10 zeigt die Schärfentiefe  $t$  basierend auf dem Durchmesser des Unschärfekreises  $u'$  um einen Bildpunkt  $P'$  und den Objektstand  $a_h$  (hinterste Objektweite) und  $a_v$  (vorderste Objektweite) der Objektpunkte  $P_h$  und  $P_v$  sowie eine zusätzliche Blende. [Luhmann 2010b, S. 111–112]


 Abbildung 3.10: Schärfentiefe  $t$  bei definiertem Unschärfekreis  $u'$ ; [Luhmann 2010b, S. 112]

Die Objektabstände  $a_h$  und  $a_v$  werden nach den Formeln (3.13) über einen zusätzlich definierten Parameter  $K$  berechnet. Dieser ergibt sich aus der Blendenzahl  $k$ , der Brennweite  $f$ , der fokussierten Objektweite  $a$  und dem tolerierbaren Unschärfekreis  $u'$ . [Luhmann 2010b, S. 111–112]

$$a_h = \frac{a}{1-K} \quad \text{und} \quad a_v = \frac{a}{1+K} \quad (3.13)$$

mit  $K = \frac{k \cdot (a-f) \cdot u'}{f^2}$

Zusammengefasst wird die Schärfentiefe  $t$  nach Formel (3.14) ermittelt. Diese zeigt, dass die Schärfentiefe  $t$  für einen fokussierten Punkt  $P$  vom tolerierbaren Unschärfekreis  $u'$ , der gewählten Blendenzahl  $k$ , der Brennweite  $f$  und dem Abbildungsmaßstab  $M_b$  abhängt. [Luhmann 2010b, S. 112].

$$t = a_h - a_v = \frac{2u'k(1 + M_b)}{M_b^2 - \left(\frac{u'k}{f}\right)^2} \quad (3.14)$$

Da der Abbildungsmaßstab  $M_b$  nach Formel (3.1) wiederum von der Kamerakonstante  $c$  und dem Aufnahmeabstand  $h$  abhängt, kann die Schärfentiefe bei festgelegtem Objektiv zusammenfassend anhand der Blendeneinstellung und des Aufnahmeabstandes durch den Anwender variiert werden. Genauer kann sie durch Abblenden, Vergrößern des Aufnahmeabstandes oder Verkürzen der Brennweite erhöht werden. [Luhmann 2010b, S. 112]



## **4. Bildverarbeitungsprozess mit Agisoft-Metashape**

Dieses Kapitel behandelt den Prozess der Bildverarbeitung, der in der vorliegenden Arbeit mit der Software Agisoft-Metashape durchgeführt wurde. Im Folgenden wird die hierarchische Strategie der Bildzuordnung beschrieben. Anschließend wird die Bündelausgleichung behandelt und durch die Erläuterung der Kollinearitätsgleichungen ergänzt, um deren Relevanz und Anwendung in diesem Kontext zu verdeutlichen.

### **4.1. Prozess der Bildzuordnung und Objektrekonstruktion**

Die Bildzuordnung ist ein zentraler und komplexer Schlüsselprozess in der Bildverarbeitung. Dessen Ziel ist es, korrespondierende Bildpunkte in zwei oder mehreren Aufnahmen desselben Objekts einander zuzuordnen, um letztendlich die Objektpunkte präzise im Raum zu positionieren und die Objektoberfläche zu rekonstruieren. Das Verfahren folgt einer hierarchischen Strategie und setzt sich aus mehreren Schritten zusammen. Diese umfassen die Vorverarbeitung mit Schwerpunkt auf die Mustererkennung, die Extraktion von Merkmalen aus den Bildern und die anschließende merkmalsbasierte Punktzuordnung auf Grundlage der Korrespondenzanalyse. Schließlich erfolgt eine abschließende flächenbasierte Zuordnung in Form der Feinzuordnung. [Luhmann 2010b, S. 453–454]

#### **Vorverarbeitung der Aufnahmen**

Dieser Schritt dient der hierarchischen Mustererkennung durch die Verwendung einer Bildpyramide. Dabei wird die Bildauflösung durch die Verkleinerung der Aufnahme schrittweise reduziert, wobei das Bild vor der Verkleinerung geglättet werden kann. Durch diese Vorgehensweise ermöglicht die Bildpyramide eine hierarchische Mustererkennung, die mit groben Merkmalen in geringer Auflösung beginnt und in den folgenden Stufen die Suche auf die zuvor identifizierten Merkmalsbereiche einschränkt und verfeinert. Dieser hierarchische Ansatz erleichtert die effiziente Erkennung von relevanten Merkmalen und ermöglicht eine präzise Analyse der Bilddaten. [Luhmann 2010b, S. 380 i.V.m. 454]

#### **Merkmalsextraktion**

In jeder Stufe der Bildpyramide wird eine Merkmalsextraktion durchgeführt, wofür beispielsweise Interest-Operatoren und Kantenoperatoren zum Einsatz kommen. Es werden zunächst Bildmerkmale ermittelt, von denen angenommen wird, dass in allen beteiligten Bildern eine größere Schnittmenge enthalten ist. Solche Bildmerkmale sind in der Regel Kanten und Punkte, die sich durch ihre Seltenheit, Einzigartigkeit, Invarianz und ihre klare Erkennbarkeit von anderen Bildpunkten abheben. Das Ergebnis eines Interest-Operators ist eine unstrukturierte Liste mit Koordinaten und Interest-Werten der Bildpunkte von jedem beteiligten Bild. [Luhmann 2010b, S. 454–455 i.V.m. 463]

#### **Merkmalbasierte Zuordnung**

Abschließend folgt eine merkmalsbasierte Zuordnung durch die Korrespondenzanalyse, dessen Ziel die Identifikation möglichst vieler übereinstimmender Merkmale in allen Bildern ist. Die Aufgabe dieser Analyse ist es nun, aus der Liste des Interest-Operators aufgrund der vorliegenden Koordinaten und Interest-Werte

im jeweiligen Bild eine Schnittmenge korrespondierender Punkte zu ermitteln. Die Komplexität dieses Verfahrens ist im Wesentlichen von der Aufnahmekonfiguration, der Oberflächenstruktur und der Bekanntheit geometrischer Informationen, wie Orientierungsparameter abhängig. [Luhmann 2010b, S. 454 i.V.m. 461]

### **Feinzuordnung**

Der abschließende Schritt ist die Feinzuordnung, die eine flächenbasierte Zuordnung der Originalgrauwerte umfasst, um das zugehörige Oberflächenelement mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Zu den flächenbasierten Zuordnungsverfahren gehören Korrelations- und Kleinste-Quadrate-Lösungen. Durch die Verwendung von geometrischen Bedingungen werden aus den ermittelten korrespondierenden Bildelementen schließlich räumliche Objektdaten abgeleitet, die zu einer strukturierten Objektrekonstruktion führen. Als Grundlage der geometrischen Bedingungen wird in der Regel das funktionale Modell der Bündelausgleichung herangezogen, die durch die Kollinearitätsgleichungen die Forderung zugrunde legt, dass sich homologe Strahlen unter Berücksichtigung der Orientierungsparameter optimal im Objektpunkt schneiden. [Luhmann 2010b, S. 455 i.V.m. 467]

## **4.2. Mehrbildtriangulation durch Bündelausgleichung**

Die Bündelausgleichung zur Mehrbildtriangulation ist ein wichtiger Ansatz zur präzisen räumlichen Objektpunktpositionierung und der Orientierung des Bildverbandes. In diesem Kapitel wird das Verfahren der Bündelausgleichung sowie deren bekannte und unbekannte Parameter vorgestellt. Dem folgt die Herleitung der Kollinearitätsgleichungen, die der Bündelausgleichung als Beobachtungsgleichungen dienen.

### **4.2.1. Verfahren der Bündelausgleichung**

Die Bündeltriangulation ist ein Verfahren zur Rekonstruktion eines räumlichen Objektmodells durch simultane Einpassung und Orientierung beliebig vieler Strahlenbündel räumlich angeordneter Aufnahmen. Durch eine iterative Ausgleichung werden die beteiligten Größen des gesamten photogrammetrischen Bildverbandes, zusammen mit ihren zugehörigen statistischen Angaben zur Genauigkeit, in einem simultanen Berechnungsvorgang berücksichtigt. Ziel ist es, dass sich die homologen Bildstrahlen bestmöglich an den Objektpunkten schneiden. Dieser Prozess führt zu einer sehr stabilen geometrischen Figur der Strahlenbündel, die ein dichtes dreidimensionales Netz hoher Genauigkeit ergeben. Die Abbildung 4.1 veranschaulicht die resultierenden Strahlenbündel nach der Bündelausgleichung. [Luhmann 2010b, S. 301–302]

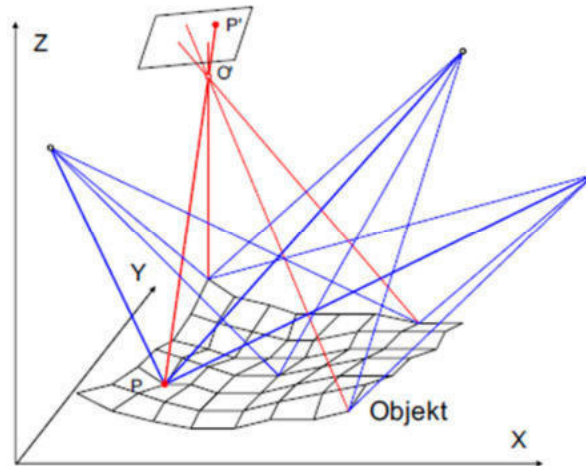


Abbildung 4.1: Strahlenbündel der Mehrbildtriangulation; [Luhmann 2010b, S. 302]

Zur Formulierung des Gleichungssystems werden die sogenannten Kollinearitätsgleichungen als Verbesserungsgleichungen im Sinne der Ausgleichung nach den kleinsten Quadraten genutzt. Durch diese können die beobachteten Koordinaten der Bildpunkte im Bildkoordinatensystem als Funktion sämtlicher Unbekannten des photogrammetrischen Systems dargestellt werden. Im Folgenden sind die in der Regel bekannten und unbekanntenen Größen der Bündelausgleichung zusammengefasst. [Luhmann 2010b, S. 307]

Bekannte Größen des Gleichungssystems:

- Bildkoordinaten der korrespondierenden Bildpunkte
- Zusätzliche geometrische Informationen

Unbekannte Größen des Gleichungssystems:

- Dreidimensionale Objektkoordinaten der korrespondierenden Bildpunkte (je 3 Unbekannte)
- Parameter der inneren Orientierung für jede Kamera (je  $\geq 3$  Unbekannte)
- Parameter der äußeren Orientierung für jede Aufnahme (je 6 Unbekannte)

Zusätzliche geometrische Informationen dienen der Festlegung des absoluten Maßstabes und der Lage des Objektkoordinatensystems. Dies kann durch Passpunkte, einen Maßstabsbalken oder andere bekannte Größen erfolgen. [Luhmann 2010b, S. 306]

#### 4.2.2. Kollinearitätsgleichungen

Um die Kollinearitätsgleichungen herzuleiten ist das Modell der Zentralprojektion Grundlage. Wie bereits in Abbildung 3.8 der äußeren Orientierung dargestellt, können die Koordinaten eines Objektpunktes P im Objektkoordinatensystem XYZ aus dem Vektor  $\mathbf{X}_0$  (vom Ursprung des Objektkoordinatensystems zum Projektionszentrum  $O'$ ) und einem zusätzlich erforderlichen Vektor  $\mathbf{X}^*$  (vom Projektionszentrum  $O'$  zum Objektpunkt P) ermittelt werden. Deren Kombination führt zur Formel (4.1) und definiert den Objektvektor  $\mathbf{X}$ , der den Objektpunkt P im Objektkoordinatensystem XYZ festlegt. [Luhmann 2010b, S. 239]

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \mathbf{X}^* \quad (4.1)$$

Da der benötigte Vektor  $\mathbf{X}^*$  nicht direkt bestimmt werden kann, wird dieser durch Transformierung des Bildvektors  $\mathbf{x}'$  (Abbildung 3.8) in den Objektraum gebildet. Dies erfolgt gemäß Formel (4.2) durch Anwendung der Drehmatrix  $\mathbf{R}$  und einem Maßstabsfaktor  $m$ . [Luhmann 2010b, S. 239]

$$\mathbf{X}^* = m * \mathbf{R} * \mathbf{x}' \quad (4.2)$$

Wird die Formel (4.2) in die Formel (4.1) eingesetzt, ergibt sich der Objektvektor  $\mathbf{X}$  gemäß Formel (4.3). Dieser beschreibt die Abbildung eines Bildpunktes  $P'$  ( $x', y', z'$ ) in den Objektpunkt  $P$  ( $X, Y, Z$ ). [Luhmann 2010b, S. 239]

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + m * \mathbf{R} * \mathbf{x}' \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m * \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$

Durch Umkehrung und Erweiterung der Formel (4.3) um den Bildhauptpunkt  $H'$  ( $x'_0, y'_0$ ) und einem Korrekturterm  $\Delta \mathbf{x}'$  für die achsenbezogenen Korrekturwerte der Abbildungsfehler  $\Delta x'$  und  $\Delta y'$ , ergibt sich folgende Formel (4.4) [Luhmann 2010b, S. 240].

$$\mathbf{x}' - \mathbf{x}'_0 - \Delta \mathbf{x}' = \frac{1}{m} * \mathbf{R}^{-1} * (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (4.4)$$

$$\begin{bmatrix} x' - x'_0 - \Delta x' \\ y' - y'_0 - \Delta y' \\ z' \end{bmatrix} = \frac{1}{m} * \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

Der für jeden Objektpunkt  $P$  unbekannte und individuell anzunehmende Maßstabsfaktor  $m$  wird durch Division der ersten und zweiten Gleichung jeweils durch die dritte Gleichung eliminiert. Daraus ergeben sich die Kollinearitätsgleichungen (4.5) als Grundgleichungen der Photogrammetrie. [Luhmann 2010b, S. 240]

$$x' = x'_0 + z' \frac{r_{11} * (X - X_0) + r_{21} * (Y - Y_0) + r_{31} * (Z - Z_0)}{r_{13} * (X - X_0) + r_{23} * (Y - Y_0) + r_{33} * (Z - Z_0)} + \Delta x' \quad (4.5)$$

$$y' = y'_0 + z' \frac{r_{12} * (X - X_0) + r_{22} * (Y - Y_0) + r_{32} * (Z - Z_0)}{r_{13} * (X - X_0) + r_{23} * (Y - Y_0) + r_{33} * (Z - Z_0)} + \Delta y'$$

Die Kollinearitätsgleichungen beschreiben somit die Transformation von Objektkoordinaten ( $X, Y, Z$ ) in Bildkoordinaten ( $x', y'$ ) bei Kenntnis der Parameter der inneren Orientierung ( $x'_0, y'_0, c, \Delta x', \Delta y'$ ) der Kamera und der äußeren Orientierung ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ ) einer Aufnahme. Sie zeigen, dass jeder Objektpunkt eindeutig in nur einen Bildpunkt abgebildet wird. Somit beschreiben diese einen geometrischen Vorgang einer zentralprojektiven Bildentstehung. Werden die Kollinearitätsgleichungen nach den Objektkoordinaten umgeformt, eignen sie sich als Beobachtungsgleichungen für eine überbestimmte Ausgleichung zur Mehrbildtriangulation. [Luhmann 2010b, S. 241]

## 5. Genauigkeiten in der Photogrammetrie

Dieses Kapitel behandelt die Ermittlung der erreichbaren Objektgenauigkeit eines photogrammetrischen Systems in der Ebene und in Aufnahme­richtung, um die Leistungsfähigkeit eines photogrammetrischen Kamerasystems zu beurteilen. Darauf folgt eine Zusammenfassung der für die vorliegende Arbeit relevanten Parameter zur Bewertung der inneren Genauigkeit der Bündelausgleichung. Zum Abschluss wird die äußere Genauigkeit, der durch Bündelausgleichung räumlich positionierten Objektpunkte, betrachtet.

### 5.1. Erreichbare Objektgenauigkeit

Die Genauigkeitsabschätzung eines photogrammetrischen Kamerasystems ist im Wesentlichen von dem Bildmaßstab, dem Objektauflösungsvermögen, der Bildmessgenauigkeit und der Aufnahmekonfiguration abhängig. Durch deren Kombination ist die Bewertung der Objektgenauigkeit des photogrammetrischen Systems möglich, die in die Genauigkeit in der Ebene und jene in Aufnahme­richtung zu unterteilen ist. [Luhmann 2010b, S. 531]

#### Objektgenauigkeit in der Ebene

Besondere Bedeutung kommt hier dem Objektiv zu, da es durch die Kamerakonstante  $c$  den Abbildungsmaßstab  $m_b$  bestimmt. Dieser legt bei gegebenen Aufnahme­abstand  $h$  direkt die Detailerkennbarkeit und somit die erreichbare Genauigkeit eines photogrammetrischen Systems fest [Luhmann 2010b, S. 8 i.V.m. 531]. Zur besseren Übersicht ist dieser Zusammenhang nach Formel (3.1) folgend erneut abgebildet.

$$m_b = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'} = \frac{1}{M_b} \quad (3.1)$$

Die Formel (3.1) zeigt die Bildmaßstabszahl  $m_b$  (Kehrwert des Abbildungsmaßstabs  $M_b$ ) als das Verhältnis von Aufnahme­abstand  $h$  zur Kamerakonstanten  $c$  oder als Verhältnis einer Objektstrecke  $X$  zur Bildstrecke  $x'$ , wobei die beiden Strecken als parallel angenommen werden. Durch Ableitung der Formel (3.1) zeigt sich, dass sich die Messunsicherheit in der Bildauswertung  $dx'$  mit der Bildmaßstabszahl  $m_b$  mit  $dX$  in den Objektraum überträgt. Daher kann die Bildmaßstabszahl zu einer Abschätzung der Detailerkennbarkeit nach Formel (5.1) herangezogen werden. [Luhmann 2010b, S. 136–137 i.V.m. 8]

$$dX = m_b \cdot dx' \quad (5.1)$$

Wird das Fehlerfortpflanzungsgesetz auf die Formel (5.1) angewendet, kann die Standardabweichung der Objektpunkte  $S_X$  als Maß für die erreichbare Objektgenauigkeit in der Ebene betrachtet werden und gemäß Formel (5.2) mittels der Bildmaßstabszahl  $m_b$  und der Bildmessgenauigkeit  $S_{x'}$  abgeschätzt werden. Darüber hinaus hängt sie allerdings von der Aufnahmekonfiguration und der Identifizierbarkeit der Bildpunkte ab. [Luhmann 2010b, S. 137]

$$S_X = m_b \cdot S_{x'} \quad (5.2)$$

### Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung

Ist es durch die Aufnahmekonfiguration nicht möglich, das Objekt von unterschiedlichen Seiten zu erfassen, kann die erreichbare Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung stark von jener quer dazu abweichen. Dies ist bei der in dieser Arbeit durchgeführten Ortsbrustaufnahme der Fall, da hier keine Rundum­aufnahme möglich ist. Daher ist eine separate Betrachtung der Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung erforderlich. Hierzu wird ein idealer Stereonormalfall (parallele Blickrichtung orthogonal auf Stereobasis; ohne Haupt­punktverschiebung und Abbildungsfehler) angenommen, für den sich die erreichbare Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung  $S_z$  gemäß Formel (5.3) ergibt. [Luhmann 2010b, S. 138]

$$S_z = m_b \cdot \frac{h}{b} \cdot S_{px'} \quad (5.3)$$

Die Formel (5.3) beinhaltet die Bildmaßstabszahl  $m_b$ , die Bildmessgenauigkeit der x-Parallaxe  $S_{px'}$  (entfer­nungsabhängiger horizontaler Versatz eines Objektpunktes am Bild bei Stereonormalfall), die Stereobasis  $b$  (Abstand zwischen den beiden Aufnahme­standorten) und den Aufnahme­abstand  $h$ . Die Bildmessgenauigkeit der x-Parallaxe  $S_{px'}$  kann durch die Annahme eines idealen Stereonormalfalls aus der Bildmessgenauigkeit  $S_{x'}$  mittels folgender Formel (5.4) berechnet werden. [Luhmann 2010b, S. 138 i.V.m. 273]

$$S_{px'} = S_{x'} \cdot \sqrt{2} \quad (5.4)$$

## 5.2. Innere Genauigkeit der Bündelausgleichung (Präzision)

Die innere Genauigkeit der Bündelausgleichung ist ein Maß für die Präzision und Qualität der Ausgleichsrechnung, die die Güte widerspiegelt, mit der die Beobachtungen unter Berücksichtigung der geometrischen Parameter zum funktionalen Modell passen. Kenngrößen der inneren Genauigkeit beschreiben zufällige Abweichungen der Beobachtungen, wenn keine systematische Abweichung vorliegt. Die innere Genauigkeit ist im Wesentlichen durch die Genauigkeit der Orientierungsparameter und der ausgeglichenen Objektpunkte definiert. [Luhmann 2010b, S. 337 i.V.m. 534]

Folgend werden die für diese Arbeit relevanten Parameter zur Evaluierung der inneren Genauigkeit der Bündelausgleichung erläutert. Neben diesen können beispielsweise die Verteilung der Objektpunkte, die Anzahl der beteiligten Raumstrahlen und der Strahlenschnittwinkel sowie die Genauigkeit der Bildkoordinaten Aufschluss über die Genauigkeit im Objektraum geben. [Luhmann 2010a, S. 111–112]

### Standardabweichung der inneren Orientierungsparameter

Nach dem Benutzerhandbuch von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] wird jeder der inneren Orientierungsparameter, der im Rahmen der Bündelausgleichung ermittelt wurde, mit einer Standardabweichung versehen. Diese kann in Kombination mit dem Parameter und dessen Korrelationen ausgegeben werden.

Handelt es sich um Aufnahmen ebener Objekte, bei denen keine Schrägaufnahmen möglich sind und zudem keine Maßstabsinformation in Aufnahme­richtung vorhanden ist, kann die Kamerakonstante in manchen Fällen nicht eindeutig bestimmt werden. Dadurch kann sich ein Wert ergeben, der nicht plausibel ist oder deren Standardabweichung sehr hoch ausfällt. Ist dies der Fall, bedeutet das nicht, dass die Objekt-

punkte schlechter bestimmt wurden. Werden die Parameter jedoch für eine tatsächliche Kamerakalibrierung herangezogen und in einer externen Berechnung verwendet, sollte die Standardabweichung der Kamerakonstante in der Größenordnung der Bildmessgenauigkeit liegen. Zudem sollte die Standardabweichung der Koordinaten  $x'_0$  und  $y'_0$  des Bildhauptpunktes in der Größenordnung der benötigten Bildmessgenauigkeit berechnet worden sein. [Luhmann 2010b, S. 340]

Die Standardabweichung der radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  sollte deutlich geringer als die Parameter selbst sein [Luhmann 2010b, S. 340]. Die tangential-asymmetrischen Verzeichnungsparameter  $B_1$  und  $B_2$  sowie die Affinitäts- und Scherungs-Transformationskoeffizienten  $C_1$  und  $C_2$  sollten eine Standardabweichung aufweisen, die mindestens eine Größenordnung kleiner ist als der jeweilige Parameter [Luhmann 2010a, S. 115].

### Korrelation zwischen den inneren Orientierungsparameter

Wird die Kamera im Rahmen der Bündelausgleichung kalibriert, kommt es in der Regel zu Korrelationen zwischen den ausgeglichenen Parametern. Diese können durch geeignete Aufnahmekonfiguration weitgehend vermieden werden. Werden die Parameter für eine tatsächliche Kamerakalibrierung verwendet und in einem externen Berechnungsvorgang herangezogen, sollten hohe Korrelationen vermieden werden, da sie sich negativ auf die weiterführenden Ergebnisse auswirken können. Sie spielen jedoch lediglich eine untergeordnete Rolle, wenn die Objektrekonstruktion und die Kamerakalibrierung in einem simultanen Berechnungsvorgang erfolgen, wie es bei der Simultankalibrierung der Fall ist, da in diesem Fall die Korrelationen berücksichtigt werden. [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115]

### RMS-Wert der äußeren Orientierungsparameter

Im Allgemeinen entspricht nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 88] der Root-Mean-Square (RMS-Wert) der mittleren quadratischen Abweichung zwischen gegebenen Sollwerten und der ausgeglichenen Beobachtungen. Dieser wird laut dem Benutzerhandbuch von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] für die äußeren Orientierungsparameter nach der Bündelausgleichung für jede Raumrichtung einzeln ausgegeben, aus denen ein mittlerer RMS-Wert in der Ebene und ein totaler Wert für alle drei Raumrichtungen ermittelt wird. Die Formel in (5.6) zeigt die Berechnung des totalen RMS-Wertes.

$$RMS_{total} = \sqrt{\frac{\langle X_{i,geschätzt} - X_{i,input} \rangle^2 + \langle Y_{i,geschätzt} - Y_{i,input} \rangle^2 + \langle Z_{i,geschätzt} - Z_{i,input} \rangle^2}{n}} \quad (5.5)$$

### RMS-Wert aller Objektpunkte

Für das Genauigkeitsniveau der gesamten Ausgleichung im Objektraum ist der Root-Mean-Square (RMS-Wert) ausschlaggebend, der die mittlere quadratische Abweichung der Objektkoordinaten angibt [Luhmann 2010a, S. 114]. Nach dem Benutzerhandbuch von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] wird der RMS-Wert der Objektpunkte als der mittlere Reprojektionsfehler aller Verknüpfungspunkte aller Aufnahmen definiert. Zur Berechnung nach Formel (5.6) wird für die Anzahl der Verknüpfungspunkte  $n$  die mittlere quadratische Abweichung der Distanz zwischen der projizierten Position  $X_{i,ist}$  des Objektpunktes auf das  $i$ -te Bild und der zur Rekonstruktion des Objektpunktes verwendeten originalen Position des Bildpunktes  $X_{i,soll}$  berechnet [Luhmann 2010b, S. 88].

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \langle X_{i,soll} - X_{i,ist} \rangle^2}{n}} \quad (5.6)$$

### Maximaler RMS-Wert eines Objektpunktes

Zusätzlich sollte der maximale RMS-Wert ausgegeben werden und innerhalb einem projektspezifischen Genauigkeitsniveau liegen [Luhmann 2010a, S. 114]. Der Objektpunkt mit dem maximalen Reprojektionsfehler befindet sich in der Regel in einer Region problematischer Objektpunkte oder in ungünstigen Bereichen des Bildverbandes. [Luhmann 2010b, S. 339]

## 5.3. Äußere Genauigkeit der Bündelausgleichung (Richtigkeit)

Die äußere Genauigkeit der Bündelausgleichung wird in der Regel durch den Vergleich mit einer unabhängigen Referenz ermittelt. Als Referenzwerte werden in der Regel Größen mit übergeordneter Genauigkeit verwendet, die als fehlerfrei gelten und daher zur Bestimmung der äußeren Genauigkeit herangezogen werden können. Die Referenz gilt als fehlerfrei, wenn die Messwerte innerhalb einer projektspezifischen akzeptablen Messunsicherheit liegen. [Luhmann 2010a, S. 117, 2010b, S. 536]

Der Vergleich mit einer unabhängigen Referenz kann beispielsweise mit einer Distanzermittlung durchgeführt werden. Zur Ermittlung der Distanz, zwischen der Vergleichs- und der Referenzgröße, werden verschiedene Algorithmen herangezogen, wodurch eine präzise Beurteilung der Genauigkeit und Qualität der Ergebnisse ermöglicht wird. Die folgend erläuterten Algorithmen C2C (Cloud-to-Cloud), C2M (Cloud-to-Mesh) und M3C2 (Multiscale-Model-to-Model) werden von CloudCompare, einer Software zur Verarbeitung und Analyse von 3D-Punktwolken, bereitgestellt.

### C2C-Algorithmus

Der C2C-Algorithmus (Abbildung 5.1) ermittelt den Abstand zwischen einem Punkt der Vergleichspunktwolke und dem diesen nächstgelegenen Punkt der Referenzpunktwolke. Die ermittelte Distanz ist neben dem Punkterauschen von der Verteilung der Punkte der Vergleichspunktwolke und der Referenzpunktwolke abhängig. [Lague et al. 2013]

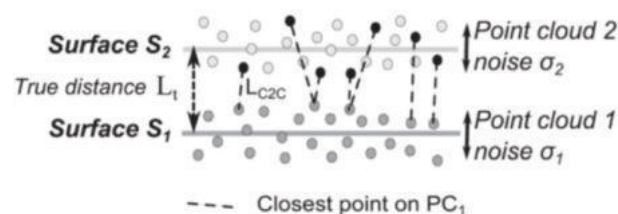


Abbildung 5.1: C2C-Algorithmus; Vergleichs- (hellgrau) und Referenzpunktwolke (dunkelgrau) mit Punkterauschen; C2C-Distanz zum nächstgelegenen Punkt; [Lague et al. 2013]



### C2M-Algorithmus

Der C2M-Algorithmus (Abbildung 5.2) berechnet die Distanz eines Punktes der Vergleichspunktwolke zur triangulierten Oberfläche der Referenzpunktwolke entlang der Flächennormalen. Der C2M-Algorithmus liefert eine Distanz, die von dem Punkterrauschen sowie von der Triangulation der Punkte beeinflusst wird. [Lague et al. 2013]

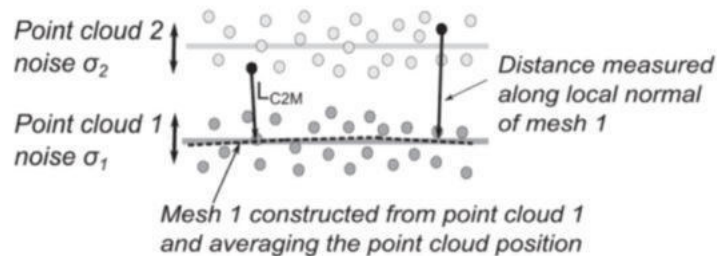


Abbildung 5.2: C2M-Algorithmus; Vergleichs- (hellgrau) und Referenzpunktwolke (dunkelgrau) mit Punkterrauschen; C2M-Distanz entlang der Flächennormalen; modifiziert nach [Lague et al. 2013]

### M3C2-Methode

Der robustere M3C2-Algorithmus berücksichtigt das Punkterrauschen durch die Erstellung einer Regressionsfläche, die anhand eines definierten Durchmesser  $D$  (normal scale) und eines Kernpunktes  $i$  (core point) auf einem Punkt der Vergleichspunktwolke festgelegt wird (Abbildung 5.3; Schritt 1). Auf dieser Regressionsfläche wird eine Flächennormale positioniert, entlang derer ein Zylinder mit einem definierten Durchmesser  $d$  (projection scale) und maximaler Höhe (max depth) in die positive und negative Richtung des Normalenvektors projiziert wird (Abbildung 5.3; Schritt 2). Dieser zylindrische Bereich dient zur Ermittlung des mittleren orthogonalen Abstandes der Vergleichspunktwolke zur Referenzpunktwolke entlang der Richtung des Normalenvektors. [Lague et al. 2013]

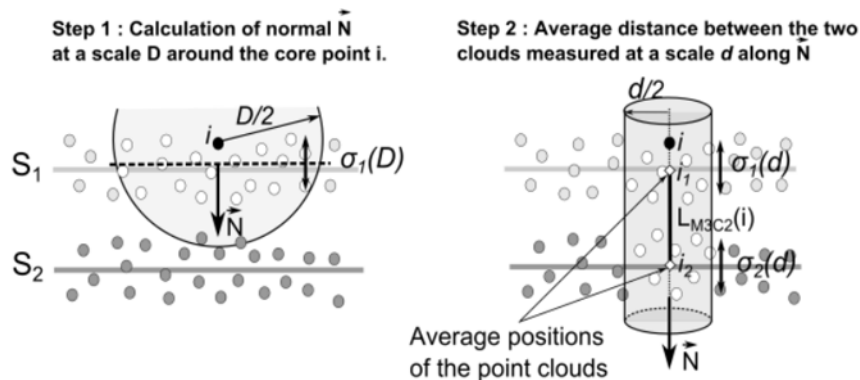


Abbildung 5.3: M3C2-Algorithmus; Vergleichs- (hellgrau) und Referenzpunktwolke (dunkelgrau) mit Punkterrauschen; Schritt 1: Kalkulation der Regressionsfläche im Bereich des Durchmessers  $D$ ; Schritt 2: Projektion des Zylinders mit dem Durchmesser  $d$  entlang dem Normalenvektor; [Lague et al. 2013]

Besonders bei komplexen und rauen Oberflächen ist die präzise Festlegung des Durchmessers  $D$  zur Ermittlung der Regressionsfläche entscheidend. Ist dieser Durchmesser ähnlich groß oder kleiner als die Rauheitselemente, kann dies aufgrund der Orientierung der Flächennormalen zu einer möglichen Überschätzung der mittleren orthogonalen Distanz führen. Dies wird in der Abbildung 5.4 veranschaulicht.

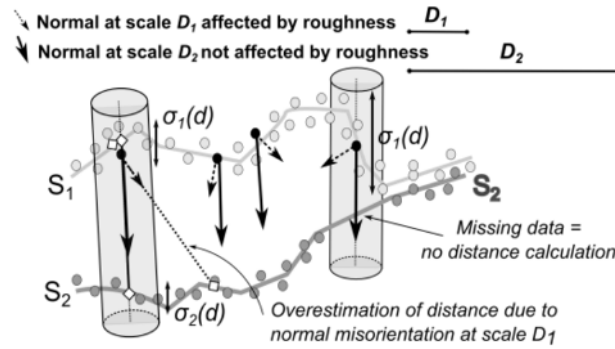


Abbildung 5.4: M3C2-Algorithmus; Vergleichs- (hellgrau) und Referenzpunktewolke (dunkelgrau) mit Punkterrauschen; Überschätzung der Distanz bei rauen Oberflächen aufgrund der Orientierung der Flächennormalen; [Lague et al. 2013]

Aufgrund der herausfordernden Definition der Parameter des M3C2-Algorithmus bietet die Software CloudCompare die Möglichkeit der automatischen Schätzung der optimalen Parameter.

## 6. Kamerasystem zur digitalen Ortsbrustaufnahme

Dieses Kapitel behandelt das photogrammetrische Kamerasystem der Montanuniversität, welches in Zusammenarbeit mit der Firma Geodata MT GmbH im Rahmen einer Forschungsarbeit entwickelt und zur Durchführung dieser Arbeit verwendet wurde. Zunächst wird die allgemeine Funktionsweise des Systems erläutert. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der Hauptkomponenten, nämlich der Steuer- und Kameraeinheit. Des Weiteren wird die Wahl der Kameraanzahl und die damit verbundene Problematik betrachtet. Abschließend wird die Notwendigkeit der Kamerapositionen als Maßstabsinformation und dessen Umsetzung erläutert, da dies ein wesentlicher Bestandteil der praktischen Anwendung des Systems darstellt.

### 6.1. Allgemeine Funktionsweise

Das photogrammetrische System zur digitalen Ortsbrustaufnahme im maschinellen Tunnelvortrieb wird während der Unterbrechungen des Vortriebs, beispielsweise bei der morgendlichen Begehung, eingesetzt. Dieses wird durch den Geologen direkt in die Diskengehäuse des Bohrkopfes montiert. Vor der Montage des Systems wird der Bohrkopf zurückgezogen und rotiert, um das restliche Ausbruchmaterial über das Förderband abzutransportieren. [Wenighofer et al. 2020]

Nach der Montage des Kamerasystems wird die photogrammetrische Aufnahme der Ortsbrust initiiert, indem die Stromversorgung des Kamerasystems aktiviert und somit die Bildaufnahme gestartet wird. Während der Bildaufnahme wird der Bohrkopf mit manueller Steuerung um 360 Grad rotiert, um eine sogenannte Aufnahmespur abzubilden. Die gesamte Ortsbrust wird durch die Erfassung mehrerer individueller Spuren abgebildet, die synchron oder nacheinander photogrammetrisch erfasst werden und deren Anzahl von verschiedenen Faktoren abhängt. [Wenighofer et al. 2020]

Vor der Verarbeitung des aufgenommenen Bildverbandes mit der Software Agisoft-Metashape müssen die während der Bildaufnahme verwendeten Kamerapositionen im Objektkoordinatensystem berechnet werden. Dies wird mit einer von der Firma Geodata MT GmbH bereitgestellten Software durchgeführt, deren Anwendung im Punkt 6.3. erläutert wird. Zusätzlich stellt die Firma Geodata MT GmbH die Parameter der inneren Orientierung sowie ein vorgefertigtes Python-Skript für den gesamten Bildverarbeitungsprozess (vom Einlesen der Bilder bis zum Höhenmodell) mit Agisoft-Metashape zur Verfügung. Dies ermöglicht die vollständige Rekonstruktion der Ortsbrust, ohne dass zusätzliche Softwarekenntnisse erforderlich sind.

Im Idealfall werden die Bildaufnahmen während des Bildverarbeitungsprozesses nicht nur innerhalb der Aufnahmespuren, sondern jene auch untereinander verknüpft, um eine nahtlose qualitativ hochwertige Rekonstruktion der gesamten Ortsbrust zu ermöglichen. Ist die Verknüpfung der Aufnahmespuren mithilfe bildverarbeitender Software nicht möglich, ist ein zusätzlicher nachgeschalteter Schritt erforderlich. In solchen Fällen kommt beispielsweise ein Iterative-Closest-Point-Algorithmus (ICP) zum Einsatz. Dieser Algorithmus ermöglicht es, die mit bildverarbeitender Software rekonstruierten Aufnahmespuren zu einer nahtlosen und vollständigen Rekonstruktion der Ortsbrust zusammenzuführen. [Wenighofer et al. 2020]

## 6.2. Systemaufbau

Das Kamerasystem besteht aus einer Steuer- und einer oder mehreren Kameraeinheiten, deren Montagepositionen im Bohrkopf von der Verteilung der Schneid-Diskens abhängig sind. Jede Kameraeinheit ist über ein Kabel mit der Steuereinheit verbunden, um deren Stromversorgung und digitale Ansteuerung sicherzustellen. [Wenighofer et al. 2017a; Wenighofer et al. 2020]

### 6.2.1. Steuereinheit

Da die Steuereinheit im Vergleich zur Kameraeinheit mehr Platz benötigt und zudem zur Ansteuerung der Kameras mit jenen über ein Kabel verbunden ist, wird sie nahe dem Rotationszentrum im Gehäuse einer Doppeldiske platziert. Die Steuereinheit beinhaltet die externe Stromversorgung, einen Steuer-PC und einen einachsialen Neigungssensor. Durch manuelles Einschalten der Stromversorgung wird der Steuer-PC hochgefahren und die Bildaufnahme mit einer zuvor definierten Bildrate automatisch gestartet. Während der Auslösung jeder Kamera wird ein Neigungswert des integrierten einachsialen Neigungssensors registriert und gemeinsam mit der Bilddatei am Steuer-PC gespeichert. Dieser Neigungswert wird als Rotationswinkel verwendet, um die Kameraposition während der jeweiligen Bildaufnahme zu berechnen. [Wenighofer et al. 2017a]

### 6.2.2. Kameraeinheit

Jede Kameraeinheit wird im entsprechenden Gehäuse einer Einfachdiske montiert und besteht je nach Anforderung aus einer Industriekamera mit einem Farb- oder Monochrom-Sensor. Die Kamera ist in einem schützenden Kameragehäuse untergebracht und wird innerhalb einer Kamerahalterung am Bohrkopf befestigt. Aufgrund des geringen Objektabstandes von in der Regel 20 bis 60 cm wird ein Objektiv mit geringer Brennweite verwendet. Zudem ist um das Objektiv ein LED-Ring angebracht, der als externe Lichtquelle dient und eine Helligkeit von über 10.000 Lumen bietet, um Ausbrüche von hoher Tiefe und mehreren Kubikmetern zu beleuchten. Um einen qualitativ hochwertigen Bildverband sicherzustellen, werden die optischen Aufnahmeparameter vor der Aufnahme der Ortsbrust festgelegt. [Wenighofer et al. 2020]

### Anzahl der Aufnahmespuren

Die Anzahl der Aufnahmespuren entspricht der Anzahl der Kameraeinheiten, die von Faktoren wie dem Durchmesser des Bohrkopfes, dem Abstand zur zu erfassenden Ortsbrust, der verwendeten Objektivbrennweite und der Sensorgröße der Kameras abhängt. Diese Faktoren beeinflussen die maximale Spurbreite, die pro Kameraeinheit abgebildet werden kann. Um eine reibungslose photogrammetrische Verarbeitung sicherzustellen, wird die Anzahl der Kameras im Idealfall so gewählt, dass die einzelnen Spuren ausreichend überlappen. Dies gewährleistet, dass die seitliche Bildüberlappung von mindestens 60% erreicht wird, wie es im Benutzerhandbuch von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] empfohlen wird.

### **Gewährleistung ausreichender Überlappung der Aufnahmespuren**

In der Praxis ist es oft herausfordernd, die empfohlene seitliche Bildüberlappung und somit eine ausreichende Überlappung der Aufnahmespuren zu erreichen. Dies resultiert in erster Linie aus dem begrenzten Zeitfenster für die Aufnahme der Ortsbrust, da dies zur Verwendung einer möglichst geringen Anzahl von Kameraeinheiten führt. Die Anordnung der Schneid-Diskens am Bohrkopf spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle, um die seitliche Bildüberlappung bei einer festgelegten Spurbreite sicherzustellen. Zudem treten montagespezifische Herausforderungen auf, da das Kamerasystem vor jeder Anwendung vom Bediener durch Klettern zu den Montagediskens befestigt werden muss.

Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Montagepunkte vorzugsweise innerhalb derselben Hälfte des Bohrkopfes zu platzieren. Dies gewährleistet eine sichere Montage in geringer Höhe und trägt zur Zeiterparnis bei. Ist eine Platzierung der Kameraeinheiten innerhalb derselben Hälfte des Bohrkopfes nicht umsetzbar, ist eine Drehung des Bohrkopfes erforderlich, um die nächste Kameraeinheit in geringer Montagehöhe anzubringen. Es ist jedoch ratsam, dies zu vermeiden, da es zu längeren Montagezeiten führt.

### **6.3. Kamerapositionen als Maßstabsinformation**

Da die Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb nicht direkt zugänglich ist, ist es unmöglich, mithilfe herkömmlicher Passpunkte oder Strecken eine Maßstabsinformation im photogrammetrischen Objektraum zu erlangen. Daher werden die Kamerapositionen während der Bildaufnahme genutzt, um die Maßstabstreue der photogrammetrisch verarbeiteten Punktwolke sicherzustellen.

Zur Umsetzung werden die Kamerapositionen in einem linkshändigen kartesischen Objektkoordinatensystem angegeben, dessen Ursprung sich im Mittelpunkt des Bohrkopfes befindet. Die positive z-Achse erstreckt sich in Vortriebsrichtung, während die positive y-Achse in Richtung Firste verläuft. Zur Ermittlung der Kamerapositionen erfolgt zunächst der maßstabstreue Import des Bohrkopfplans in die Konstruktionssoftware Civil3D, um die Montagepositionen der Kameras in der xy-Ebene des Objektkoordinatensystems auszumessen. Anschließend werden diese Daten in eine speziell von der Firma Geodata MT GmbH entwickelte Software eingegeben, welche die Kamerapositionen während der Bildaufnahme berechnet.

Die Software weist den ausgemessenen 2D-Koordinaten zunächst einen z-Wert von Null zu. Anschließend werden die so erzeugten 3D-Koordinaten mit dem Rotationswinkel kombiniert, welcher bei jeder Bildaufnahme durch den Neigungssensor registriert wurde. Durch Anwendung der Rotationsmatrix für eine Drehung um die z-Achse wird die Umrechnung der ursprünglichen Kameramontageposition in die Position der Kamera während der Bildaufnahme im ruhenden Objektkoordinatensystem ermöglicht.

Da die Software auf einer räumlichen Drehung um die z-Achse des Objektkoordinatensystems basiert, ist der Neigungssensor in der Steuereinheit so zu positionieren, dass der Rotationswinkel bei Blick auf die xy-Ebene gegen die Vortriebsrichtung (entlang negativer z-Richtung des Objektkoordinatensystems) gegen den Uhrzeigersinn zunimmt. Die Software errechnet die jeweilige 3D-Position der Kamera für jede einzelne Aufnahme und speichert diese in eine Textdatei, die in Agisoft-Metashape importiert werden kann.

## 7. Genauigkeitsvorbetrachtung

Im Folgenden werden die angewendete Kamera und das Objektiv beschrieben sowie eine Genauigkeitsvorbetrachtung in der Ebene und in Aufnahme­richtung durchgeführt. Ergänzend wird der verwendete Laserscanner vorgestellt und dessen Messgenauigkeit sowie das Objektauflösungsvermögen und die mögliche Punktedichte betrachtet. Dies dient der Einschätzung der zu erreichenden Genauigkeiten der Geräte.

Vorweg ist zu erwähnen, dass jegliche Herstellerangaben ohne Genauigkeitsinformation als fehlerfrei angegeben betrachtet wurden. Jene Kenngrößen, die auf Messung oder Berechnung basieren wurden als innerhalb annehmbarer Grenzen angesehen. Dies ist für die Einschätzung der Parameter im Rahmen der Genauigkeitsvorbetrachtung ausreichend.

### 7.1. Genauigkeitsvorbetrachtung des Kamerasystems

Dieser Abschnitt beschreibt die verwendete Kamera und das Objektiv des Kamerasystems der Montanuniversität und der Firma Geodata MT GmbH. Dem folgt die Berechnung der Bildmaßstabszahl, die zur Abschätzung der erreichbaren Objektgenauigkeit in der Ebene und jener in Aufnahme­richtung erforderlich ist.

Zur Überprüfung der tatsächlichen Genauigkeit von berührungslos messenden optischen 3D-Messsystemen bietet die Richtlinie VDI 2634 Prozeduren und Aufnahme­konfigurationen, die zur Annahme- und Bestätigungsüberprüfung der messtechnischen Leistungsfähigkeit eines solchen Systems angewandt werden.

#### 7.1.1. Verwendete Kamera und Objektiv

Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um eine Allied-Vision Mako G-234 Industriekamera mit dem Sony IMX249 CMOS-Sensor. Der Sensor hat eine Größe von 1/1,2" und 2,4 MP (1936 H × 1216 V) Auflösung mit einer Pixelgröße von 5,86 × 5,86 µm. [Allied Vision V1.0.1, 2022]

Die Kamera wurde mit dem Kowa LM5JCM 5 mm-Objektiv mit Festbrennweite ausgestattet. Das Weitwinkelobjektiv bietet einen Bereich der Blendenzahl von f/2.8 bis f/16 und einen Fokus von 10 cm bis unendlich und ist hervorragend für die Nahbereichsphotogrammetrie geeignet. [Kowa 2014]

#### 7.1.2. Bestimmung der Bildmaßstabszahl

Im vorliegenden Fall der photogrammetrischen Ortsbrustaufnahme im maschinellen Tunnelvortrieb ist der Aufnahmeabstand nicht frei wählbar, sondern davon abhängig wie weit der Bohrkopf der TBM zurückgezogen werden kann. Diese Distanz ist situationsabhängig und beträgt in der Regel 20 bis 60 cm.

Für diese Arbeit wurde der Aufnahmeabstand von 50,0 cm mit einem Rollmeter durch Einzelmessung mit vernachlässigbarer Mess- und Ablesegenauigkeit gemessen. In der vorliegenden Arbeit wird die tatsächliche Variation des Aufnahmeabstandes und die Abweichung von einer strengen Senkrechtaufnahme durch das Vorhandensein von räumlicher Tiefe als innerhalb annehmbarer Grenzen angesehen. Daraus folgt nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 136], dass zur weiteren Abschätzung der gemessene Abstand von 50,0 cm als der mittlere Aufnahmeabstand angenommen werden kann. Diese Annahme führt zu einer mittleren Bildmaßstabszahl.

Zur Bestimmung der mittleren Bildmaßstabszahl  $m_b$  ist nach folgend erneut abgebildeter Formel (3.1) neben dem Aufnahmeabstand  $h$  auch die Kamerakonstante  $c$  erforderlich. Letztere entspricht nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 143] bei unendlichem Fokus in guter Näherung der Brennweite des Objektivs. Die Brennweite basiert auf Herstellerangaben ohne Genauigkeitsinformation und wird daher, wie anfangs erwähnt, als fehlerfrei angegeben betrachtet.

$$m_b = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'} = \frac{1}{M_b} \tag{3.1}$$

Gemäß Formel (3.1) konnte die Bildmaßstabszahl  $m_b$  aus dem Verhältnis des Aufnahmeabstandes  $h$  von 500 mm zur Kamerakonstanten  $c$  von 5 mm ermittelt werden. Wie die Tabelle 7.1 zeigt, ergibt sich eine Bildmaßstabszahl  $m_b$  von 100, deren Genauigkeit als innerhalb annehmbarer Grenzen betrachtet wird.

Tabelle 7.1: Berechnung der Bildmaßstabszahl  $m_b$

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit
Mittlerer Aufnahmeabstand	$h$	500	mm
Kamerakonstante	$c$	5	mm
<i>Mittlere Bildmaßstabszahl</i>	$m_b$	100	-

### 7.1.3. Abschätzung der erreichbaren Objektgenauigkeit in der Ebene

Bei bekannter Bildmaßstabszahl  $m_b$  ist es möglich, die erreichbare Genauigkeit in der Ebene senkrecht zur Aufnahme­richtung zu schätzen. Dies erfolgt nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 137] gemäß folgend erneut abgebildeter Formel (5.2), die die angenommene Bildmessgenauigkeit  $S_{x'}$  über die Bildmaßstabszahl  $m_b$  mit der Objektgenauigkeit in der Ebene  $S_x$  ins Verhältnis setzt.

$$S_x = m_b \cdot S_{x'} \tag{5.2}$$

Die Abschätzung führt bei der Annahme einer Bildmessgenauigkeit  $S_{x'}$  von 1 Pixel mit der Pixelgröße von 5,86  $\mu\text{m}$  [Allied Vision V1.0.1, 2022] und einer Bildmaßstabszahl  $m_b$  von 100 (Tabelle 7.1) zu einer erreichbaren Objektgenauigkeit in der Ebene  $S_x$  von 0,6 mm. Die Tabelle 7.2 fasst die Parameter zusammen.

Tabelle 7.2: Berechnung zu erreichendes mittleres Objektauflösungsvermögen

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit
Mittlere Bildmaßstabszahl	$m_b$	100	-
Pixelgröße am Sensor	$S_{x'}$	5,86	$\mu\text{m}$
<i>Mittlere erreichbare Objektgenauigkeit in der Ebene</i>	$S_x$	0,6	mm

### 7.1.4. Abschätzung der erreichbaren Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung

Die Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung kann nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 138] durch die An­nahme eines Stereonormalfalls gemäß Formel (5.3) berechnet werden, die zur besseren Übersicht folgend erneut dargestellt wurde.

$$S_z = m_b \cdot \frac{h}{b} \cdot S_{px'} \quad (5.3)$$

Zur Berechnung der Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung ist zunächst die Abschätzung der Stereobasis  $b$  erforderlich, die wiederum die Objekt­abmessung in Bewegungs­richtung am Bild (Objekthöhe am Bild) erfordert. Der Sensor war während der Bildaufnahme so orientiert, dass die Bildhöhe von 1216 Pixel heranzuziehen ist. Gemäß der Formel (3.1) entspricht die Objekt­abmessung  $X$  der Objekt­abmessung am Bild. Diese ergibt sich aus der Bildmaß­stabszahl  $m_b$  von 100 (Tabelle 7.1), der Bildhöhe von 1216 Pixel und der Pixelgröße von  $5,86 \mu\text{m}$  [Allied Vision V1.0.1, 2022] zu 713 mm. Folgend ergibt sich aus der von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] empfohlenen Bildüberlappung in Bewegungs­richtung von 80% und einer Objekt­abmessung am Bild von 713 mm eine Stereobasis  $b$  von 143 mm.

Neben der Stereobasis  $b$  wurde zur Berechnung der erreichbaren Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung die Bildmessgenauigkeit der  $x$ -Parallaxe  $S_{px'}$  von  $8,29 \mu\text{m}$  gemäß folgend erneut abgebildeter Formel (5.4) aus der angenommenen Bildmessgenauigkeit  $S_{x'}$  von 1 Pixel mit der Größe von  $5,86 \mu\text{m}$  ermittelt.

$$S_{px'} = S_{x'} \cdot \sqrt{2} \quad (5.4)$$

Durch das abschließende Einsetzen der errechneten Bildmessgenauigkeit der  $x$ -Parallaxe  $S_{px'}$  von  $8,29 \mu\text{m}$  und der angenommenen mittleren Bildmessgenauigkeit  $S_{x'}$  von 1 Pixel mit  $5,86 \mu\text{m}$  in die Formel (5.3) ergibt sich eine mittlere Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung  $S_z$  von 3 mm. Die zur Abschätzung verwendeten Parameter sind in Tabelle 7.3 übersichtlich zusammengefasst.

Tabelle 7.3: Berechnung der mittleren Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung für 80% Bildüberlappung

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit
Mittlerer Aufnahmeabstand	$h$	500	mm
Angenommene Stereobasis	$b$	143	mm
Mittlere Bildmaß­stabszahl	$m_b$	100	-
Mittlere erreichbare Objektgenauigkeit in der Ebene	$S_x$	0,6	mm
Mittlere Bildmessgenauigkeit	$s_{x'}$	5,86	$\mu\text{m}$
Mittlere Bildmessgenauigkeit $x$ -Parallaxe	$s_{px'}$	8,29	$\mu\text{m}$
<i>Mittlere erreichbare Objektgenauigkeit in Aufnahme­richtung</i>	$S_z$	3	mm



### 7.1.5. Evaluierung der erreichbaren Objektgenauigkeit des Kamerasystems

Die abgeschätzte erreichbare Objektgenauigkeit in der Ebene von 0,6 mm und jene in Aufnahme­richtung von 3 mm sind im Kontext der geologischen Beurteilung als äußerst zufriedenstellend anzusehen. Dennoch hängt die tatsächliche Objektgenauigkeit von der Aufnahme­konfiguration, der Bildqualität und der Qualität der Bildverarbeitung ab. Es ist jedoch anzunehmen, dass die tatsächlichen Objektgenauigkeiten in der Größenordnung der hier abgeschätzten Genauigkeiten liegen werden.

## 7.2. Genauigkeitsvorbetrachtung des Laserscanners

Zur Genauigkeitsvorbetrachtung des Laserscanners wurde die Messgenauigkeit, die Leistungsspezifikation des Lasers und die Ablenkeinheit untersucht. In Kombination mit der projektspezifischen Aufnahme­konfiguration kann die Objektgenauigkeit, das Objektauflösungsvermögen und der erreichbare Punkteabstand abgeschätzt werden. Dieser Ansatz ermöglicht die Bewertung der Geräteleistung.

Da die vom Hersteller angegebenen Genauigkeiten in der Praxis durch unterschiedliche innere und äußere Faktoren beeinflusst werden, kann die tatsächliche projektspezifische Genauigkeit von den Herstellerangaben abweichen. Die von den Herstellern angegebenen Genauigkeiten von terrestrischen Laserscannern können nach Bedarf durch die Prüfverfahren in der ISO 17123 Teil 9 validiert werden.

### 7.2.1. Verwendeter Laserscanner

Der Focus-Premium-70 3D-Laserscanner der Firma Faro ist einer der genauesten und schnellsten Scanner am Markt. Laut Datenblatt bietet er eine maximale Scanrate von 2 Millionen Punkte pro Sekunde. Die Reichweite von 0,5 bis 70 m ist für unter Tage Messungen ausreichend. Das Sichtfeld erstreckt sich über 300 Grad vertikal und 360 Grad horizontal. [FARO Technologies Inc. 2023]

### 7.2.2. Messgenauigkeit nach Herstellerangaben

Das Messgerät wurde zur Aufnahme durch die örtliche Vermessungsfirma in einer Entfernung von rund 25 m zur Ortsbrust positioniert, dessen Abweichung vernachlässigbar ist. Gemäß den Angaben im Datenblatt [FARO Technologies Inc. 2023] beträgt das Rauschen bei der Messung einer dunkelgrauen Oberfläche für diese Entfernung 0,4 mm (Standardabweichung der wiederholten Messungen eines Einzelpunktes). Zudem liegt die Winkelmessgenauigkeit bei 19 Bogensekunden und die erreichbare 3D-Genauigkeit der Einzelpunkte bei 3,5 mm mit einem systematischen Entfernungsmessfehler von  $\pm 1$  mm (einfache Standardabweichung). Zur Übersicht sind die relevanten Angaben in Tabelle 7.4 zusammengefasst.

Tabelle 7.4: Messgenauigkeit Faro Focus Premium 70 bei 25 m Entfernung

Beschreibung	Wert	Einheit
Rauschen (Dunkelgrau 10% Reflexionsvermögen)	0,4	mm
3D-Genauigkeit	3,5	mm
Fehler im Bereich	$\pm 1$	mm

### 7.2.3. Objektauflösungsvermögen

Zusätzlich zeigt der Laser eine entfernungsabhängige Ausweitung des Strahls, die das Objektauflösungsvermögen eines Laserscanners in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung begrenzt [Wagner et al. 2003]. Dem Datenblatt [FARO Technologies Inc. 2023] ist ein Strahldurchmesser am Ausgang von 2,12 mm (1/e) mit einer Strahldivergenz von 0,30 mrad (1/e) zu entnehmen. In einer Entfernung von 25 m ergibt sich daraus ein Strahldurchmesser von 9,6 mm. Dieser ist als Objektauflösungsvermögen des Laserscanners in der Ebene zu verstehen [Wagner et al. 2003]. Folgende Tabelle 7.5 legt diese Parameter dar.

Tabelle 7.5: Betrachtung der Leistungsspezifikation des Lasers und Berechnung des Strahldurchmessers in einer Entfernung von 25 m

Beschreibung	Wert	Einheit
Strahldivergenz	0,30	mrad (1/e)
Strahldurchmesser am Ausgang	2,12	mm (1/e)
Entfernung	25	m
<i>Strahldurchmesser nach 25 m</i>	<i>9,6</i>	<i>mm</i>

### 7.2.4. Punktedichte

Die Ablenkeinheit des Laserscanners spielt eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung der erreichbaren Punktedichte. Laut den Angaben im Datenblatt [FARO Technologies Inc. 2023] beträgt die vertikale und horizontale Schrittweite 0,009 Grad. In einer Aufnahmeentfernung von 25 m ergibt sich somit ein minimaler Punkteabstand von 3,9 mm, der vom örtlichen Vermesser auf 1 cm reduziert wurde. Die Parameter der Ablenkeinheit sind in Tabelle 7.6 aufgeführt.

Tabelle 7.6: Betrachtung der Ablenkeinheit und Berechnung des minimalen Punkteabstandes in einer Entfernung von 25 m

Beschreibung	Wert	Einheit
Schrittweite vertikal und horizontal	0,009	Grad
Entfernung	25	m
<i>Minimaler Punkteabstand nach 25 m</i>	<i>3,9</i>	<i>mm</i>

### 7.2.5. Evaluierung der zu erreichenden Genauigkeit des Laserscanners

Im direkten Vergleich zum Kamerasystem scheint die 3D-Genauigkeit des Laserscans auf den ersten Blick etwas bescheidener auszufallen. Dennoch ist festzustellen, dass sie den etablierten Genauigkeitsanforderungen der Praxis entspricht. Daher kann sie für diese Arbeit als hinreichend genau betrachtet werden.

## 8. Methodik und Ablauf der Arbeit

Zu Beginn dieses Kapitels erfolgt eine Projektbeschreibung, um deren Standort und die Beschaffenheit der zu erfassenden Ortsbrust zu erläutern und den Kontext dieser Arbeit zu verdeutlichen. Um das Ziel der Identifikation potenzieller Herausforderungen bei der Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren mittels bildverarbeitender Software zu erreichen, wurde der Arbeitsablauf dieser Arbeit in drei Abschnitte unterteilt. Diese Abschnitte umfassen die Planung der photogrammetrischen Aufnahme, die Bildaufnahme und deren Rekonstruktion zu einer 3D-Punktwolke sowie deren abschließende Bewertung der Genauigkeit und der Qualität. Diese Bewertung erfolgt durch die Analyse der inneren Genauigkeit der Bündelausgleichung sowie der äußeren Genauigkeit der verarbeiteten 3D-Punktwolke der Ortsbrust.

### 8.1. Projektbeschreibung

Zur Umsetzung der vorliegenden Arbeit wurde das Kamerasystem der Montanuniversität und der Firma Geodata MT GmbH auf eine Gripper-TBM der Firma Herrenknecht AG adaptiert, die zum maschinellen Vortrieb des Zugangsstollens Nord für den Bau der zweiten Röhre des Gotthard-Straßentunnels eingesetzt wurde. Diese hat einen Durchmesser von rund 7 m und wurde für den Vortrieb im Hartgestein konzipiert.

Vor dem Aufbau der TBM wurde der Zugangsstollen mit konventionellem Tunnelvortrieb durch Bohren und Sprengen aufgeföhren und unter anderem mit Spritzbeton (Größtkorn 8 mm) gesichert. Nach Aushärtung des Spritzbetons wurde die Ortsbrust durch das örtliche Vermessungsunternehmen mit einem Laserscan abgetastet. Nach der Montage der TBM wurde vor Beginn des Vortriebes die Ortsbrust mit dem Kamerasystem der Montanuniversität und der Firma Geodata MT GmbH photogrammetrisch abgebildet. Es ist zu erwähnen, dass der Spritzbeton in der vorliegenden Arbeit als Rauheit der Oberfläche zu betrachten ist und in der Auswertung nicht berücksichtigt werden soll.

Die aufgenommene Ortsbrust befand sich südlich von Göschenen in der Schweiz im Bereich des Gotthard-Massivs. Aus dem von der örtlichen Vermessungsfirma zur Verfügung gestellten Laserscan konnte die genaue Position der Ortsbrust abgeleitet werden. Die Position wurde durch einen beliebigen Punkt an der Ortsbrust mit den Punktkoordinaten  $E = 2.688.783$  und  $N = 1.168.037$  im lokalen Bezugsrahmen des Schweizer Landeskoordinatensystems LV95 definiert. Dieses hat seinen Ursprung in Bern und bezieht sich auf das Bezugssystem CH1903+ mit dem Referenzellipsoid Bessel 1841. Laut Google-Earth (Abbildung 8.1) entsprechen diese den WGS84-Koordinaten Latitude  $46^{\circ}39'27.612''$  und Longitude  $8^{\circ}35'54.996''$ .

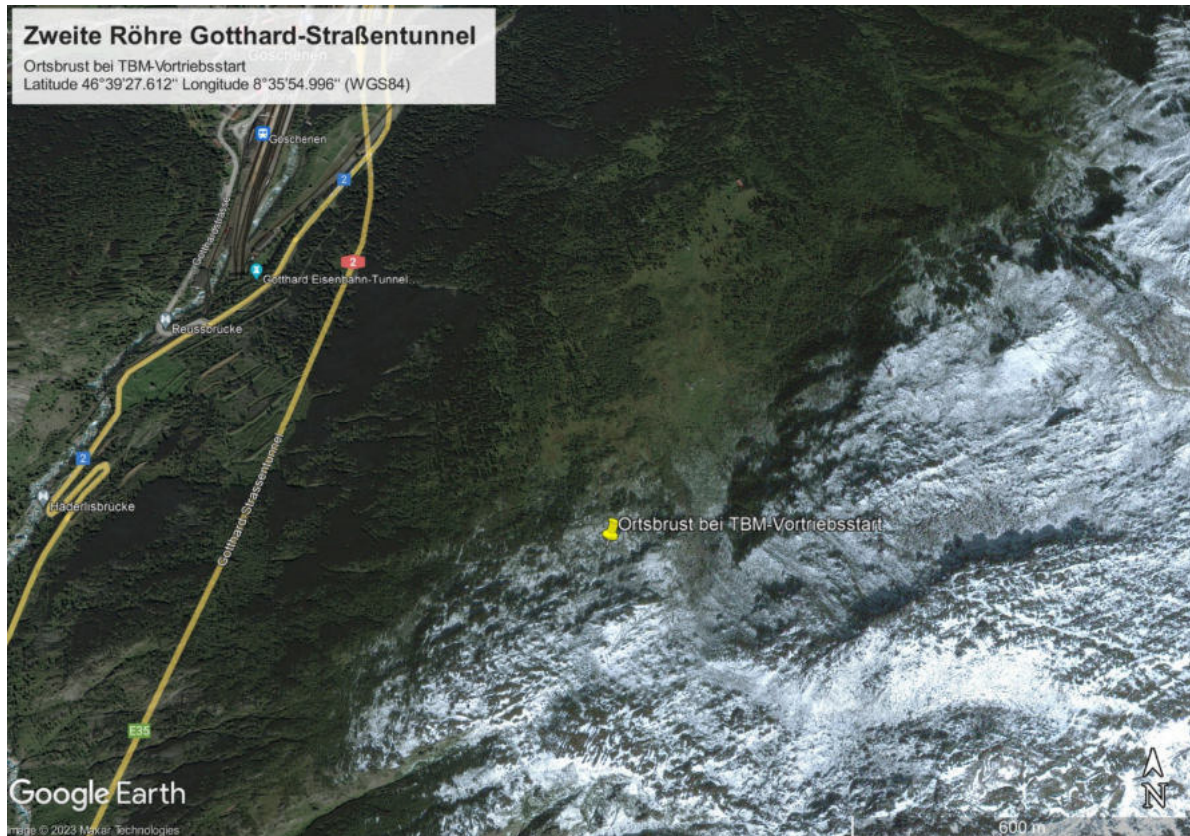


Abbildung 8.1: Standpunkt der Ortsbrust bei TBM-Vortriebsstart der zweiten Röhre Gotthard-Straßentunnel in Göschenen; [Google Earth Pro]

## 8.2. Planung der photogrammetrischen Aufnahme

Im ersten Abschnitt erfolgte die Planung der photogrammetrischen Ortsbrustaufnahme. Dieser Planungsprozess beinhaltete mehrere Schritte, darunter die Betrachtung der bereits ausgewählten Montagedisken für die Kameras und die Festlegung der optischen Aufnahmeparameter. Im Folgenden wird die Methodik zur Analyse der Montagedisken und zur Berechnung der optischen Aufnahmeparameter vorgestellt.

### 8.2.1. Analyse der vordefinierten Montagedisken

Die Montagedisken für die Kameras und die Steuereinheit wurden nicht im Rahmen dieser Arbeit festgelegt, sondern zur Umsetzung jener als vordefiniert übernommen. Eine maßgebliche Überlegung bei der Auswahl der Montagedisken soll die Gewährleistung einer ausreichenden Überlappung der Aufnahmespuren sein. Diese ist Voraussetzung, um die Aufnahmespuren mit hoher Genauigkeit zu verknüpfen.

Obwohl die konkrete Auswahl der Montagedisken nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, wurde dennoch eine Analyse und Bewertung vorgenommen, um potenzielle Auswirkungen der Überlappung der Aufnahmespuren auf deren Verknüpfung zu beurteilen. Die Ortsbrust soll durch vier einzelne Aufnahmespuren mit einer einzigen Kamera abgebildet werden. Die bereits festgelegten Montagedisken, in dessen Gehäuse die Kamera- und Steuereinheit montiert werden, sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst.

Tabelle 8.1: Vordefinierte Montagedisken der Kamera- und der Steuereinheit am Bohrkopf

Diskennummer	Diskenbezeichnung	Systemeinheit
#10	Einfachdiske	Kamera
#15	Einfachdiske	Kamera
#22	Einfachdiske	Kamera </td
#30	Einfachdiske	Kamera
#6 #8	Doppeldiske	Steuereinheit

Zur besseren Übersicht wurden in Abbildung 8.2 die Einfachdisken (rote Kreise) und die Doppeldiske (rotes Rechteck) im Bohrkopfplan der Firma Herrenknecht AG gekennzeichnet. Darüber hinaus wurde das Objektkoordinatensystem (blau) eingezeichnet.

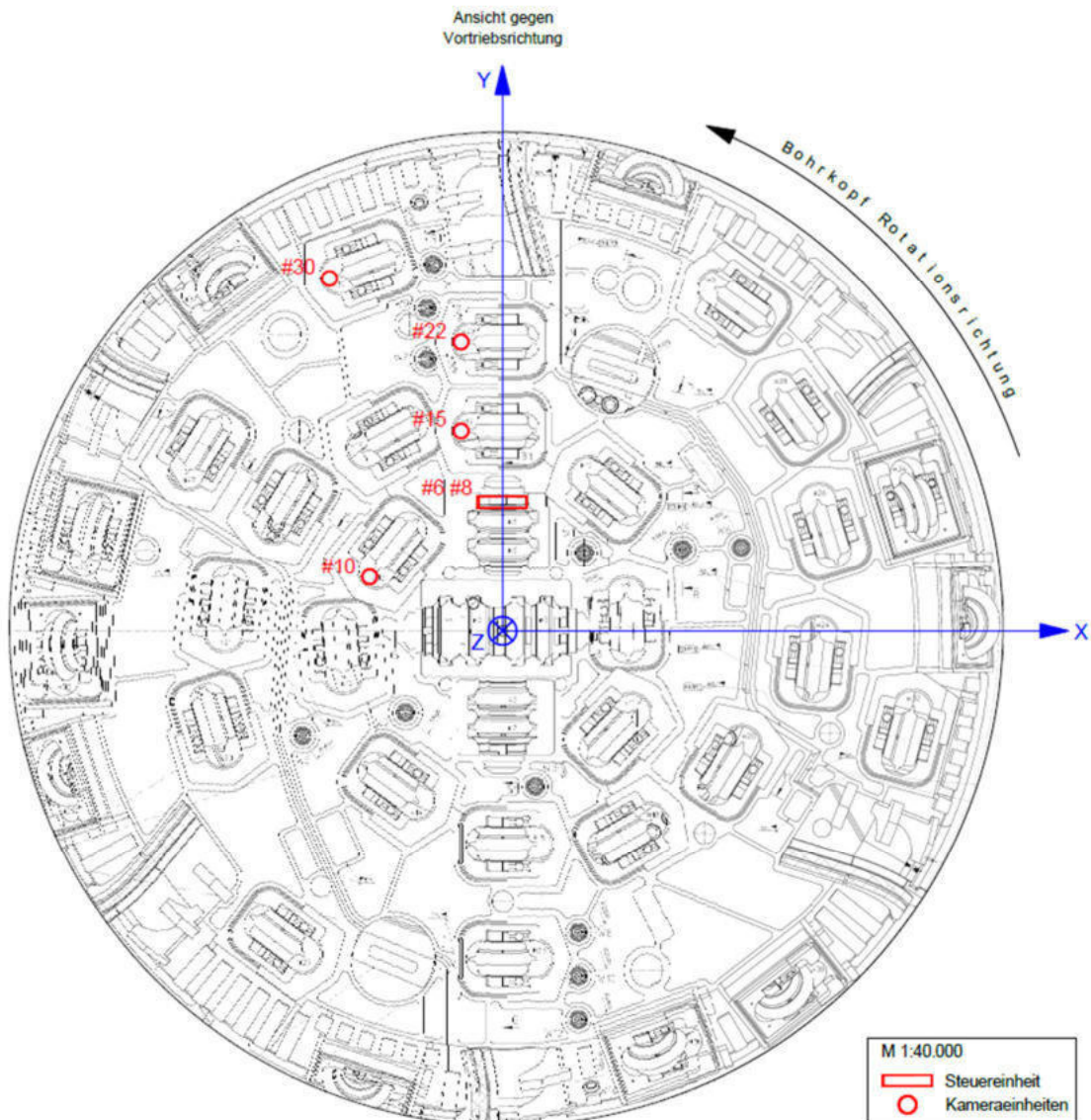


Abbildung 8.2: Bohrkopfplan der Firma Herrenknecht AG mit den Montagedisken (rot) und dem Objektkoordinatensystem (blau) bei Blick gegen Vortriebsrichtung; modifiziert nach Herrenknecht AG

Die Überlappung der Aufnahmespuren wurde anhand einer kombinierten rechnerischen und grafischen Lösung unter Verwendung des Konstruktionsprogramms Civil3D ermittelt. Zur Umsetzung wurden zunächst die einzelnen Montageradien der Kameras aus dem Bohrkopfplan der Firma Herrenknecht AG im Konstruktionsprogramm Civil3D ausgemessen. Dazu wurde jede Kamera im Gehäuse, der in Tabelle 8.1 aufgelisteten Montagedisken, mit einer Genauigkeit von  $\pm 1,0$  cm in der Ebene platziert. Im Anschluss wurden die Montageradien in Bezug auf den Mittelpunkt des Bohrkopfes mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,1$  mm in Civil3D erfasst.

Aus der Positionsgenauigkeit und der Messgenauigkeit ergibt sich eine kombinierte Genauigkeit von  $\pm 1,00005$  cm, die in diesem Zusammenhang auf  $\pm 1,0$  cm gerundet wurde. Die gemessenen Montageradien sind in der Tabelle 8.2 zusammengefasst angeführt.

Tabelle 8.2: Montagedisken und -radien in Bezug auf den Bohrkopfmittelpunkt

Diskennummer	Diskenzeichnung	Systemeinheit	Gemessener Montageradius [mm]	Kombinierte Unsicherheit [mm]
#10	Einfachdiske	Kamera	1011,5	10
#15	Einfachdiske	Kamera	1450,4	10
#22	Einfachdiske	Kamera	2071,5	10
#30	Einfachdiske	Kamera	2783,0	10

Darauf folgte die Berechnung der Breite einer Aufnahmespur, die der Bildbreite im Objektraum entspricht. Der Sensor, auf dem die Bildaufnahmen mit den Abmessungen von 1936 x 1216 Pixel [Allied Vision V1.0.1, 2022] abgebildet wurden, war so orientiert, dass die Bildbreite von 1936 Pixel der Breite einer Aufnahmespur im Bildraum entspricht. Aus dieser wurde gemäß der Formel (3.1) die Objektbreite X, die der Breite einer Aufnahmespur im Objektraum entspricht, ermittelt. In diesem Zusammenhang ergibt sich aus der Bildmaßstabszahl  $m_b$  von 100 (Tabelle 7.1), der Bildbreite von 1936 Pixel und der Pixelgröße von  $5,86 \mu\text{m}$  [Allied Vision V1.0.1, 2022] eine Objektbreite X von 1135 mm.

Abschließend wurde die berechnete Breite einer Aufnahmespur mit den aus Civil3D ausgemessenen Montageradien (Tabelle 8.2) und dem mittleren Aufnahmeabstand (Tabelle 7.1) in einer grafischen Darstellung in Civil3D kombiniert. In dieser wurde die Überlappung der jeweiligen Aufnahmespuren gemessen und mittels mathematischer Prozentrechnung in die jeweilige prozentuale Überlappung umgerechnet.

Die jeweilige Überlappung der Aufnahmespuren gleicht der entsprechenden seitlichen Bildüberlappung, die im Abschnitt der Ergebnisse unter Punkt 9.1. zusammenfassend vorgestellt wurden. Weiters wurden diese mit der im Benutzerhandbuch von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] empfohlenen seitlichen Bildüberlappung von 60% verglichen, um die erreichte Überlappung der Aufnahmespuren zu beurteilen.

### 8.2.2. Ermittlung der optischen Aufnahmeparameter

In diesem Abschnitt wird die Methodik zur Ermittlung der optischen Aufnahmeparameter (Bildrate, Belichtungszeit, ISO, Blendenöffnung, Fokus und Schärfentiefe) vorgestellt. Das Ziel besteht darin, qualitativ hochwertige Aufnahmen sicherzustellen, um negative Einflüsse auf die innere Genauigkeit und auf die Verknüpfung der Aufnahmespuren aufgrund von unzureichender Bildqualität auszuschließen.

#### **Bildrate für eine erfolgreiche Bildzuordnung**

Die Bildrate wurde in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit des Bohrkopfes und der Bildgröße für jede Kameraeinheit so gewählt, dass eine für die photogrammetrische Prozessierung laut Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] notwendige Überlappung der Bilder in Bewegungsrichtung von mindestens 80% erreicht wird. Da für diese Arbeit auf jeder Aufnahmespur die gleiche Kamera verwendet wurde und somit ein identes Bildformat vorliegt, wurde die Bildrate auf Basis des größten Montageradius (Spur 4) festgelegt.

Zur Berechnung der nötigen Bildrate war die Objektabmessung in Bewegungsrichtung am Bild (Objekthöhe am Bild) erforderlich. Diese wurde bereits im Rahmen der Genauigkeitsvorbetrachtung im Punkt 7.1.4. ermittelt und beträgt 713 mm. Anschließend wurde in Kombination mit der Drehgeschwindigkeit des Bohrkopfes die minimale Bildrate der Kamera auf Spur 4 berechnet, die erforderlich ist, um die empfohlenen 80% Bildüberlappung in Bewegungsrichtung zu erreichen.

Die Tatsache, dass die verwendete externe Lichtquelle zu variierenden Schattenbildungen auf einer ansonsten homogenen Spritzbetonoberfläche führt, birgt die Möglichkeit, dass korrespondierende Bildpunkte nicht eindeutig zugeordnet werden. Um diesem potenziellen Problem bei der Bildzuordnung entgegenzuwirken, wurde eine erhöhte Bildrate gewählt. Anschließend wurden die tatsächliche Bildüberlappung in Bewegungsrichtung und ergänzend die Bilddichte der Spur 4 ermittelt. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse erfolgt im Punkt 9.2.1.

#### **Belichtungszeit für eine minimale Bewegungsunschärfe**

Die Belichtungszeit wurde sorgfältig an die Rotationsgeschwindigkeit des Bohrkopfes und den Aufnahmeabstand angepasst, um die Bewegungsunschärfe auf ein vernachlässigbares Minimum von 1 Pixel zu reduzieren. Besonders auf der Aufnahmespur mit dem größten Montageradius (Spur 4) verursacht dieselbe Belichtungszeit die höchste Bewegungsunschärfe. Daher wurde die maximale Belichtungszeit auf Grundlage der Bedingungen auf Spur 4 festgelegt.

Zur Sicherstellung einer tolerierbaren Bewegungsunschärfe von 1 Pixel für die Kamera auf Spur 4 wurde zunächst die maximale Belichtungszeit berechnet. Die tatsächlich gewählte Belichtungszeit wurde leicht darunter festgelegt, um sicherzustellen, dass selbst bei geringerem Aufnahmeabstand und entsprechend niedrigerer Bildmaßstabszahl eine akzeptable Bewegungsunschärfe gewährleistet wird. Abschließend wurde die tatsächlich zu erwartende Bewegungsunschärfe aus der gewählten Belichtungszeit abgeschätzt. Das errechnete Ergebnis und die festgelegte Belichtungszeit sind dem Punkt 9.2.2. zu entnehmen.

### **Fokus, Blendenöffnung, ISO-Wert und Schärfentiefe**

Der Fokus wurde am Objektiv auf unendlich gestellt, um mit dem Weitwinkelobjektiv eine ausreichende Schärfe in der Tiefe zu erzielen. Zudem wurde die Blendenöffnung, der ISO-Wert und die Belichtungszeit so gewählt, dass gut belichtete Bilder mit minimalem Bildrauschen und hoher Schärfentiefe entstehen.

Die Berechnung der Schärfentiefe erfolgte gemäß den Formeln (3.13) und (3.14) unter der Annahme eines maximalen Unschärfekreises von 1 Pixel. Eine hohe Schärfentiefe wird bei festgelegtem Objektiv und einem nicht variablen Aufnahmeabstand sowie definierten Unschärfekreis durch Abblenden erhöht. Eine zu stark geschlossene Blende könnte jedoch zu unterbelichteten Bereichen führen. Diesem möglichen Problem wurde durch den Einsatz einer ausreichend leistungsstarken Lichtquelle entgegengewirkt. So kann angenommen werden, dass gute Lichtverhältnisse gegeben sind, die sicherstellen, dass die gewünschte Bildqualität und Schärfentiefe selbst bei der Verwendung einer geringen Blendenöffnung erreicht werden. Die ermittelten Ergebnisse wurden im Punkt 9.2.3. zusammenfassend dargestellt.

## **8.3. Bildaufnahme und Rekonstruktion der 3D-Punktwolke**

Dieser Abschnitt umfasst den Ablauf der Aufnahme des Bildverbandes und dessen anschließende Rekonstruktion zu einer 3D-Punktwolke mithilfe der bildverarbeitenden Software Agisoft-Metashape. Zudem beinhaltet dieser Abschnitt die Berechnung der Kamerapositionen während der Bildaufnahme, die während dem Bildverarbeitungsprozess als Maßstabsinformation dienen. Die gewählte Methodik erlaubt die Analyse des gesamten Bildverarbeitungsprozesses zur Identifikation potenzieller Herausforderungen bei der Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren. Besonderes Augenmerk wird auf den Prozess der Bildzuordnung gelegt, um festzustellen, ob die Aufnahmen vollständig miteinander verknüpft wurden und alle Aufnahmen in die Rekonstruktion miteinbezogen wurden.

### **8.3.1. Aufnahme des Bildverbandes**

Zur Montage des gesamten Kamerasystems der Montanuniversität und der Firma Geodata MT GmbH auf den Bohrkopf der TBM der Firma Herrenknecht AG wurde die Kamera- und die Steuereinheit im Gehäuse der zuvor ausgewählten Montagedisken (Tabelle 8.1) montiert. Nach der Montage des Kamerasystems wurde die Steuereinheit eingeschaltet und die Bildaufnahme automatisch gestartet. Durch Drehen des Bohrkopfes mit manueller Steuerung wurde eine Aufnahmespur der Ortsbrust photogrammetrisch abgebildet. Dieser Vorgang wurde für vier Aufnahmespuren wiederholt, um die gesamte Ortsbrust zu erfassen. Die Verwendung der manuellen Steuerung ermöglichte ein kontrolliertes Starten und Stoppen der Rotation des Bohrkopfes und ist für die Anwendung des Kamerasystems unerlässlich.

In Abbildung 8.3 ist eine Kameraeinheit in einer Einfachdiske dargestellt, die mit einer eigens hergestellten Kamerahalterung ausgestattet ist und durch Anschrauben an den Bohrkopf fixiert wurde. Die Abbildung zeigt zudem die Steuereinheit, die in der Doppeldiske mit zwei Magneten fixiert wurde.





Abbildung 8.3: Steuereinheit im Gehäuse der Doppeldiske (links);  
Kameraeinheit im Gehäuse der Einfachdiske (rechts); Foto: Simone Schachner

### 8.3.2. Ermittlung der Kamerapositionen während der Bildaufnahme

Vor der photogrammetrischen Prozessierung der 3D-Punktwolke mit Agisoft-Metashape wurde die Bestimmung der Kamerapositionen während der Bildaufnahme durchgeführt, um diese als Maßstabsinformation während dem Bildverarbeitungsprozess zu verwenden. Für die Berechnung wird die im Punkt 6.3. erläuterte Software der Firma Geodata MT GmbH genutzt. Diese benötigt die 2D-Koordinaten der ursprünglichen Kamerapositionen im Objektkoordinatensystem und den während der Bildaufnahme durch den Neigungssensor registrierten Rotationswinkel.

Zur Bestimmung der 2D-Koordinaten der Kamerapositionen im Objektkoordinatensystem wurde der Bohrkopfplan der Firma Herrenknecht AG in die Software Civil3D importiert, um die x- und y-Koordinaten der Kamerapositionen auszumessen. Die Positionen wurden mit einer bereits im Punkt 8.2.1. der Ermittlung der Montageradien festgelegten kombinierten Unsicherheit von  $\pm 1,0$  cm (gerundete kombinierte Unsicherheit aus Positionsgenauigkeit  $\pm 1,0$  cm und Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  mm) bestimmt. Die Tabelle 8.3 zeigt die Koordinaten der Kamerapositionen im Objektkoordinatensystem.

Tabelle 8.3: 2D-Kamerapositionen; Einzelmessung aus Civil3D; Messgenauigkeit 10 mm

Einfachdiske	Gemessene x-Koordinate [mm]	Gemessene y-Koordinate [mm]	Kombinierte Unsicherheit [mm]
#10	-937,0	381,0	10
#15	-294,6	1420,2	10
#22	-295,0	2050,4	10
#30	-1224,4	2499,2	10

Durch die Software der Firma Geodata MT GmbH wurden den 2D-Koordinaten ein z-Wert von Null zugewiesen und mithilfe einer Rotationsmatrix die Kamerapositionen im Objektkoordinatensystem berechnet. Die so ermittelten Koordinaten wurden in einer Textdatei zur Verfügung gestellt, die im nächsten Schritt zur photogrammetrischen Prozessierung verwendet wurde.

### 8.3.3. Photogrammetrische Prozessierung

Da die Kamera nicht vorkalibriert ist und eine Testfeldkalibrierung aufgrund der speziellen Gegebenheiten nicht umsetzbar ist, stehen zur Rekonstruktion der Ortsbrust eine Zwei-Schritt-Methode oder eine Simultankalibrierung zur Verfügung. Die Zwei-Schritt-Methode setzt sich aus einer Selbstkalibrierung und einer anschließenden photogrammetrischen Prozessierung mit vorkalibrierter Kamera zusammen. Im Folgenden werden beide Ansätze verfolgt und deren Ergebnisse auf ihre Eignung für die weitere Verwendung geprüft.

Es ist zu erwähnen, dass zur photogrammetrischen Prozessierung mit Agisoft-Metashape in der Praxis von den Bedienern ein Python-Skript verwendet wird, das von der Firma Geodata MT GmbH zur Verfügung gestellt wird. Wie bereits in Punkt 6.1. der Funktionsweise des Kamerasystems erläutert, ist dieses Skript für eine vorab kalibrierte Kamera konzipiert. In dieser Arbeit wurde ohne das Python-Skript gearbeitet, jedoch wurden identische Prozessierungsparameter verwendet, um im Kontext der Qualität der Bildverknüpfung einen Bezug zur Praxis und zu vorherigen Anwendungen herzustellen.

#### 3D-Punktwolken-Prozessierung mit Selbstkalibrierung

Zunächst erfolgte eine Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung, bei der die innere und die äußere Orientierung gleichzeitig mit den Objektpunkten bestimmt wurden. Zur Umsetzung wurden alle Aufnahmen der Spuren 1 bis 4 in ein neu erstelltes Projekt als eine einzige Bildgruppe eingelesen.

Anschließend wurde die Bildqualität überprüft, da sich eine schlechte Bildqualität negativ auf den Prozess der Bildzuordnung auswirken kann. Die Qualität wurde gemäß der Definition von Agisoft-Metashape für jedes Bild auf Grundlage des Schärfegrades des am besten fokussierten Teils des Bildes bewertet und soll laut Benutzerhandbuch von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] einen Wert von mehr als 0,5 Einheiten aufweisen. Die Bildqualität wurde bei 11 Aufnahmen der Spur 1 nicht erfüllt, die daher deaktiviert wurden.

Im nächsten Schritt wurde der gesamte Bildverband durch den Prozess der Bildzuordnung unter Verwendung der Parameter des Python-Skripts verknüpft. Diese beinhalteten eine mittlere Genauigkeitsstufe für die Bündelausgleichung, die Vorauswahl von Bildpaaren auf Basis geringerer Qualität sowie die Begrenzung auf 4.000 Merkmalspunkte und 40.000 Verknüpfungspunkte pro Bild. Diese Schritte führten zu einer 3D-Punktwolke mit präzisen Verknüpfungspunkten, die in einem freien Netz ohne Maßstab vorlagen.

Im Punkt 5.2. der inneren Genauigkeit der Bündelausgleichung wurde erläutert, dass es in der Regel zu hohen Standardabweichungen und Korrelationen der inneren Orientierungsparameter kommt, wenn die Kamera im Rahmen der Bündelausgleichung kalibriert wird. Nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115] ist es erforderlich, dass diese Werte innerhalb empfohlener Grenzen liegen, wenn die Parameter in einem externen Bildverarbeitungsprozess zur Kamerakalibrierung verwendet werden.

Da dies im Falle der Zwei-Schritt-Methode zutrifft, wurden die Standardabweichungen und Korrelationen der Parameter der inneren Orientierung sorgfältig analysiert. Die Einhaltung der empfohlenen Genauigkeit ist eine Grundvoraussetzung, um ein qualitativ hochwertiges Ergebnis der Zwei-Schritt-Methode zu gewährleisten. Die Darlegung der Parameter und die Genauigkeitsanalyse sind dem Punkt 9.3.1. der Ergebnisse zu entnehmen.

### **3D-Punktwolken-Prozessierung mit Simultankalibrierung**

Zur Rekonstruktion der Ortsbrust mit Simultankalibrierung wurden die Aufnahmen der Spuren 1 bis 4 wiederum in ein neues Projekt geladen. Zudem wurden die Kamerapositionen, die bereits mithilfe der Software der Firma Geodata MT GmbH berechnet wurden, als translatorischer Anteil der äußeren Orientierungsparameter mit der Angabe einer Genauigkeit von  $\pm 1,0$  cm importiert. Dabei wurde das Objektkoordinatensystem als lokales Koordinatensystem festgelegt, um die geografische Position der Daten zu definieren.

Anschließend erfolgte eine Überprüfung der Bildqualität der Aufnahmen, da jene mit unzureichender Qualität im Rahmen der Selbstkalibrierung lediglich deaktiviert, jedoch nicht aus dem ursprünglichen Bildverband gelöscht wurden. Wiederum erfüllten 11 Aufnahmen der Spur 1 die von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] empfohlenen 0,5 Einheiten nicht. Die Aufnahme wurden erneut deaktiviert.

Im nächsten Schritt wurde der Bildverband durch Bildzuordnung verknüpft. Die Genauigkeitsstufe der Bündelausgleichung wurde wiederum auf mittel eingestellt und die Option der Vorauswahl von Bildpaaren auf Basis geringerer Qualität aktiviert sowie die Anzahl der Merkmalspunkte auf 4.000 und jene der Verknüpfungspunkte auf 40.000 limitiert. Die resultierende 3D-Punktwolke lag durch die Vorgabe der Kamerapositionen direkt im Objektkoordinatensystem vor und enthielt präzise positionierte Verknüpfungspunkte.

Wie bereits in Punkt 5.2. der inneren Genauigkeit der Bündelausgleichung erwähnt, haben gemäß Luhmann [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115] die Standardabweichungen und die Korrelationen der inneren Orientierungsparameter keine wesentliche Auswirkung auf die Genauigkeit der Objektpunktbestimmung, wenn diese simultan ermittelt werden. Daher sind die Standardabweichungen und Korrelationen der inneren Orientierungsparameter im Kontext der Simultankalibrierung nicht von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit der rekonstruierten Ortsbrust. Eine detaillierte Darstellung der Orientierungsparameter, die im Rahmen der Simultankalibrierung erreicht wurden, ist im Punkt 9.3.2. der Ergebnisse verfügbar.

#### **Filterung der Punktwolke**

Die Verknüpfungspunktwolke aus der Simultankalibrierung wurde zur Minimierung der Ausreißer und zur Steigerung der Objektpunktgenauigkeit gefiltert. Obwohl das in der Praxis verwendete Python-Skript keine Punktfiltrierung vorsieht, war dies für den darauffolgenden Vergleich mit der Referenz zur Bestimmung der äußeren Genauigkeit der rekonstruierten 3D-Punktwolke unerlässlich.

Die Kriterien für die Filterung der Verknüpfungspunkte umfassten einen hohen Reprojektionsfehler und eine geringe Bildanzahl auf denen der homologe Bildpunkt identifiziert wurde. Die Ausdünnung der Verknüpfungspunkte wurde so durchgeführt, dass keine Ausreißer mehr vorhanden waren und der mittlere und maximale RMS-Werte der Objektpunkte nicht weiter reduziert werden konnten. Anschließend wurde die Verknüpfung der Aufnahmen aktualisiert und die Koordinaten der Punktwolke in eine XYZ-Datei exportiert, um sie für den Vergleich mit der Referenz in das Programm CloudCompare zu importieren.

#### **Erstellung des Höhenmodells**

Zur Visualisierung der Rekonstruktion der Ortsbrust mit Simultankalibrierung wurde ein Höhenmodell erzeugt. Um mögliche Herausforderungen bei der Verknüpfung der Aufnahmespuren zu identifizieren, wurde der Prozess der Bildzuordnung aus der Simultankalibrierung auf Vollständigkeit untersucht und die Ergebnisse gemeinsam mit dem Höhenmodell in Punkt 9.3.3. präsentiert.

## 8.4. Evaluierung der Genauigkeit und Qualität der rekonstruierten Ortsbrust

Im letzten Abschnitt wurde die Präzision und Richtigkeit der mit Simultankalibrierung rekonstruierten Ortsbrust untersucht, um eine Qualitätskontrolle durchzuführen und potenzielle Folgen einer unvollständigen Bildverknüpfung zu verdeutlichen. In Anbetracht der in Punkt 9.3.1. ausgeführten nachweislich überlegenen Eignung der Simultankalibrierung zur Erreichung des Forschungsziels, wurde die Zwei-Schritt-Methode nicht weitergeführt. Die folgende Methodik basiert auf der gefilterten und hoch präzisen Verknüpfungspunktwolke aus der Simultankalibrierung.

Im Gegensatz zur äußeren Genauigkeit kann die innere Genauigkeit ohne weitere Schritte direkt im Anschluss der photogrammetrischen Prozessierung mit Agisoft-Metashape betrachtet werden. Zur Evaluierung der äußeren Genauigkeit, die mittels Distanzermittlung in CloudCompare erfolgt, sind zusätzliche vorangegangene Schritte erforderlich. Diese umfassen eine Koordinatentransformation des Laserscans in das Objektkoordinatensystem der photogrammetrisch prozessierten 3D-Punktwolke sowie die Aufbereitung der beiden Punktwolken zur Distanzermittlung, um diese optimal miteinander vergleichen zu können.

### 8.4.1. Ermittlung der inneren Genauigkeit

In diesem Abschnitt wurde eine detaillierte Bewertung der inneren Genauigkeit im Kontext der Bündelausgleichung der Simultankalibrierung durchgeführt. Zur Evaluierung wurden die RMS-Werte der äußeren Orientierungsparameter sowie der mittlere und maximale RMS-Wert der Objektpunkte herangezogen. Die Standardabweichungen und Korrelationen der inneren Orientierungsparameter wurden zwar analysiert, aber nicht als Qualitätskriterium herangezogen, da diese nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115] nicht für die Genauigkeit der Objektpunktbestimmung mit der Simultankalibrierung relevant sind.

Die Durchführung dieser umfassenden Analyse trug zur Beurteilung der Präzision der erfassten Objektpunkte bei. Die gewonnenen Ergebnisse dienen der Evaluierung der Genauigkeit und Qualität der rekonstruierten Ortsbrust und sind dem Punkt 9.4.1. der Ergebnisse zu entnehmen. Da eine ausreichende innere Genauigkeit maßgeblich ist, um die äußere Genauigkeit unabhängig zu beurteilen, ist die Analyse der inneren Genauigkeit unerlässlich. Sie trägt maßgeblich zur Beurteilung der Eignung der photogrammetrisch prozessierten 3D-Punktwolke für die Bewertung der äußeren Genauigkeit bei.

### 8.4.2. Koordinatentransformation des Laserscans vor der Distanzermittlung

Um die Punktkoordinaten des Laserscans (Ausgangssystem) in das Objektkoordinatensystem des photogrammetrischen Systems (Zielsystem) zu transformieren, bedurfte es einer Koordinatentransformation. Da keine Passpunkte zwischen den beiden Punktwolken vorhanden waren, wurde die Transformation durch Anwendung von zwei einzelnen räumlichen Drehungen und einer Translation durchgeführt.

Bei der Erstellung der Transformationen war besonders darauf zu achten, dass CloudCompare die Punkte im Raum rotiert, während die Achsen stationär bleiben. Zudem akzeptiert CloudCompare lediglich 4x4-Matrizen, wodurch die in Punkt 3.4. vorgestellten 3x3-Matrizen zur räumlichen Drehung erweitert wurden.

### Räumliche Drehung um die X-Achse

Im ersten Schritt wurde der von der örtlichen Vermessungsfirma zur Verfügung gestellte Laserscan in CloudCompare importiert und in Abbildung 8.4 visualisiert.

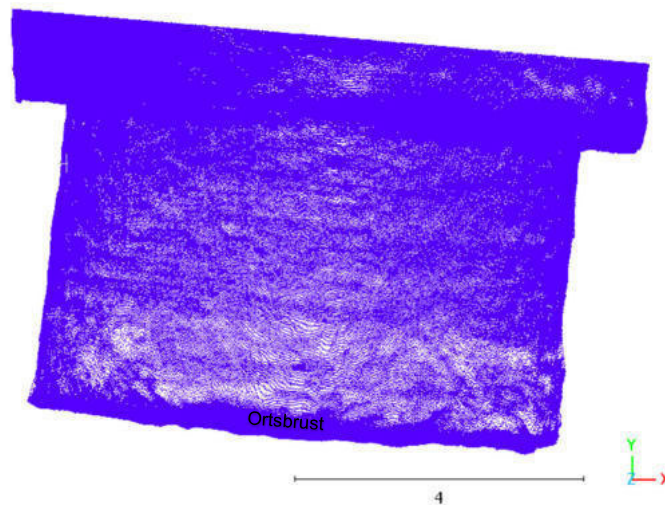


Abbildung 8.4: Originaler Laserscan; CloudCompare

Um die Koordinaten der Punkte des Laserscans aus dem schweizerischen Landeskoordinatensystem LV95 in das Objektkoordinatensystems des photogrammetrischen Systems zu transformieren, wurde zunächst eine Rotation von -90 Grad um die X-Achse durchgeführt. Durch die homogene Erweiterung der 3x3-Rotationsmatrix (3.5) zu einer 4x4-Matrix und Einsetzen des Drehwinkels resultierte folgende Matrix.

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nach der Anwendung der Drehung um die X-Achse von -90 Grad auf den originalen Laserscan, ergab sich die in Abbildung 8.5 dargestellte Punktwolke.

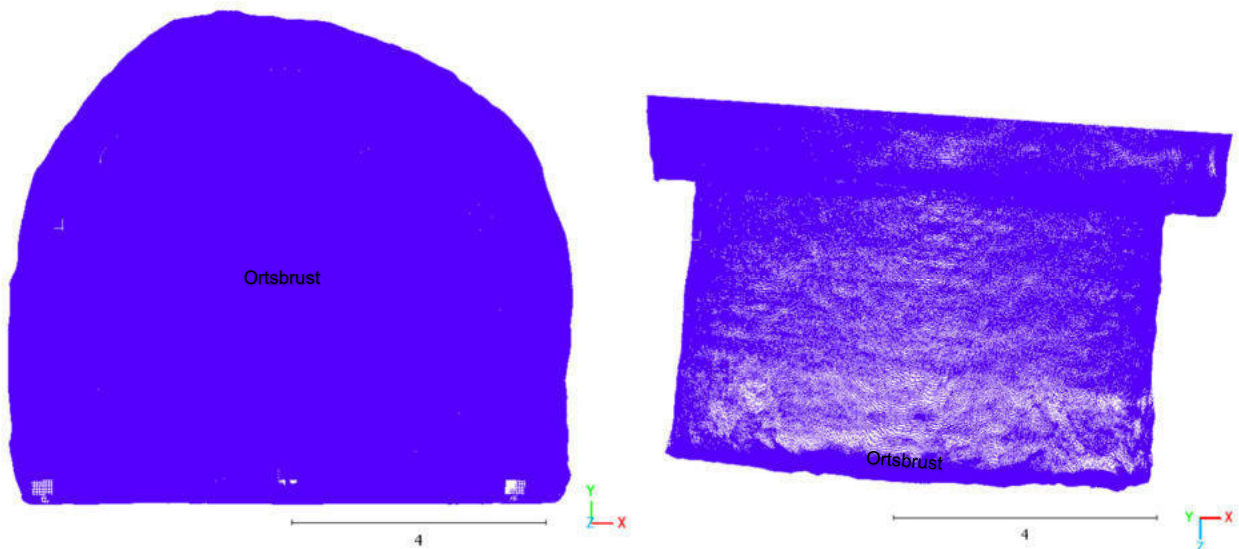


Abbildung 8.5: Originaler Laserscan rotiert um -90 Grad um die X-Achse; CloudCompare

### Räumliche Drehung um die Y-Achse

Da die Punktwolke schräg im Raum lag, wurde diese durch Rotation um die Y-Achse des Zielsystems parallel zu dessen Achsen ausgerichtet. Um den hierfür notwendigen Rotationswinkel zu bestimmen, wurden die erforderlichen Punktkoordinaten im Schweizer Landeskoordinatensystem LV95 in CloudCompare hochpräzise abgegriffen. Daraus wurden gemäß Formel (3.7) die beiden Vektoren aufgestellt und mit der Formel (3.6) der Winkel von 4,933 Grad zwischen den beiden Vektoren berechnet. Die homogen erweiterte Matrix (3.3) führte zu folgender Drehmatrix zur Rotation um die Y-Achse.

$$R_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,996 & 0 & 0,086 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ -0,086 & 0 & 0,996 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nach Umsetzen der Rotation um die Y-Achse auf den bereits um die X-Achse rotierten Laserscan resultierte die Punktwolke in Abbildung 8.6.

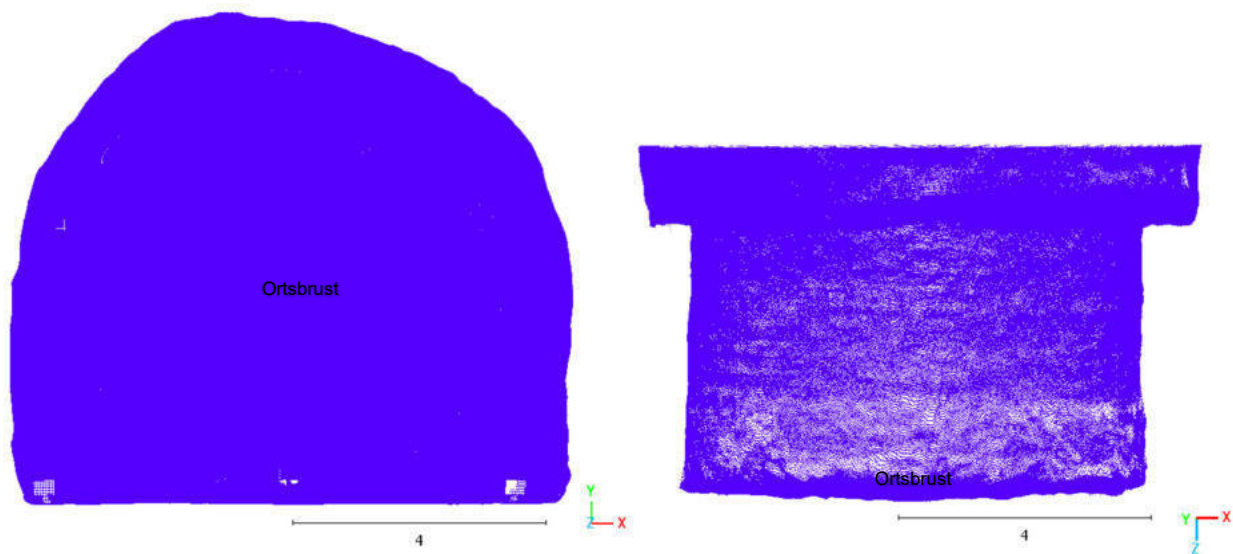


Abbildung 8.6: Originaler Laserscan rotiert um -90 Grad um die X-Achse und 4,933 Grad um die Y-Achse; CloudCompare

### Translation zum Ursprung

Um die gesamte Punktwolke auf den Ursprung des Objektkoordinatensystems zu translätieren, musste berücksichtigt werden, dass die Translation nach ausgeführter Rotation umzusetzen ist. Daher wurden die zuvor ermittelten Rotationsmatrizen für eine Rotation von -90 Grad um die X-Achse und von 4,933 Grad um die Y-Achse auf die Koordinaten des ursprünglichen Laserscans angewendet und der Mittelpunkt anschließend grafisch ermittelt. Die Koordinaten des rotierten Mittelpunktes dienen der Erstellung der folgend dargestellten 4x4-Matrix zur Translation der bereits rotierten Punktkoordinaten zum Ursprung des Objektkoordinatensystems.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -2.688.414,237 \\ 0 & 1 & 1 & -1.114,926 \\ 0 & 0 & 1 & 1.168.793,888 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Anschließend wurde eine finale Ausrichtung der photogrammetrischen Punktwolke auf den Laserscan durchgeführt, da die photogrammetrische Rekonstruktion um den Aufnahmeabstand von genau -49,3 cm in Richtung der z-Achse vorlag. Dies resultierte in einem RMS-Wert von 17,8 mm, der durchaus zur Bewertung der äußeren Genauigkeit herangezogen werden kann, jedoch keinen Aufschluss über die Verteilung der Residuen ermöglichte.

Nach abschließender Anwendung der finalen Ausrichtung lagen beide Punktwolken im Objektkoordinatensystem des photogrammetrischen Systems mit dem Ursprung im Mittelpunkt der Ortsbrust vor. Nach der zusätzlichen Aufbereitung jener wurden diese im folgenden Schritt zur Ermittlung der äußeren Genauigkeit der photogrammetrisch prozessierten Punktwolke herangezogen.

### **8.4.3. Aufbereitung der Punktwolken zur Distanzermittlung**

Die Aufbereitung der Punktwolken war entscheidend, um eine verlässliche Datengrundlage für die folgende Distanzermittlung und Bewertung der äußeren Genauigkeit zu schaffen. Hierzu wurde die Punktwolke des Laserscanners auf den Bereich der Ortsbrust begrenzt, um nicht benötigte Bereiche auszuschließen. Zudem wurde der mittlere Abstand der Punkte der photogrammetrischen Rekonstruktion auf jene des Laserscans von rund 1 cm angepasst. Um die Qualität der Daten weiter zu verbessern, wurde auf beide Punktwolken ein statistischer Filter zur Minimierung von Ausreißern eingesetzt, der zudem das Rauschen der Spritzbetonwand reduzierte.

### **8.4.4. Ermittlung der äußeren Genauigkeit durch Distanzermittlung**

Der folgende Abschnitt widmet sich der Evaluierung der äußeren Genauigkeit der Objektpunkte der photogrammetrisch prozessierten 3D-Punktwolke durch Distanzermittlung mit CloudCompare. Als Referenz diente der von der örtlichen Vermessungsfirma zur Verfügung gestellte Laserscan. Die Abweichung des Laserscans zum wahren Wert wurde als innerhalb eines akzeptablen Bereichs angenommen, wodurch dieser als fehlerfreie Referenz dienen konnte, die im Vergleich zur photogrammetrischen Rekonstruktion mit höherer äußerer Genauigkeit vorlag. Dies ist für die Bewertung der äußeren Genauigkeit der Vergleichspunktwolke unerlässlich und von entscheidender Bedeutung [Luhmann 2010a, S. 117, 2010b, S. 536].

Zur Ermittlung der Distanz zwischen der photogrammetrischen Punktwolke und dem Laserscan wurden die Algorithmen C2C (Cloud-to-Cloud), C2M (Cloud-to-Mesh) und M3C2 (Multiscale-Model-to-Model) angewendet. Durch die Anwendung verschiedener Algorithmen wird eine umfassende Analyse der Ergebnisse ermöglicht. Zudem ist es von wesentlicher Bedeutung, die Funktionsweise jedes einzelnen Algorithmus zu verstehen, um die ermittelten Distanzen kritisch bewerten zu können.

Der C2C-Algorithmus ermöglichte eine getrennte Analyse der x-, y- und z-Parameter, ohne dass zusätzliche Schritte erforderlich waren. Für die Anwendung des C2M-Algorithmus wurde mit der Delaunay-2.5D-Methode ohne Begrenzung der Kantenlängen ein Mesh aus den Punkten des Laserscans generiert.

Der M3C2-Algorithmus erforderte die Angabe des Durchmessers der Umgebung (normal scale) die zur Erstellung einer Regressionsfläche der Vergleichspunktwolke berücksichtigt werden soll. Zudem war die Angabe des Durchmessers des zu projizierenden Zylinders (projection scale) und der maximalen Suchdistanz in beide Richtungen (max depth scale) erforderlich. Ursprünglich wurden die Parameter anhand der

projektspezifischen Empfehlungen von CloudCompare festgelegt und im Verlauf weiterer Anwendungen variiert. Dabei erwiesen sich die anfänglichen Vorschläge von CloudCompare (normal scale = 0,230893 m; projection scale = 0,115446 m; max depth scale = 0,458054 m) als ideal geeignet. Zudem wurde angegeben, dass die Normale auf die Regressionsfläche und somit der Mittelpunkt des Projektionszylinder auf dem jeweiligen Kernpunkt der Vergleichspunktwolke positioniert werden soll.

Die Ergebnisse der Methodik der Distanzermittlung sind im Punkt 9.4.2. übersichtlich dargestellt, wobei zu deren Auswertung ein maximal möglicher Fehler herangezogen wurde, der sich aus dem maximalen Fehler des Laserscanners und jenen der photogrammetrischen Objektpunkte zusammensetzte. Die Distanzermittlung ermöglichte die Messung der Abweichung der räumlichen Ausrichtung der rekonstruierten 3D-Punktwolke zu den Referenzdaten des Laserscans.



## 9. Ergebnisse

Die nachfolgend präsentierten Ergebnisse spiegeln das Resultat dieser umfangreichen Methodik wider. Sie fassen die festgelegten Parameter der Planung zusammen, zeigen die Ergebnisse des Bildverarbeitungsprozesses und ermöglichen Einblicke in die Präzision und Richtigkeit der photogrammetrisch prozessierten Rekonstruktion der Ortsbrust. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen die Identifizierung potenzieller Herausforderungen bei der Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren und zeigen dessen Folgen auf.

Dieses Kapitel reflektiert den dreistufigen Prozess der Methodik. Dieser umfasste im ersten Abschnitt die Planung der photogrammetrischen Aufnahme durch Analyse der Montagedisken zur Evaluierung der Überlappung der Aufnahmespuren und die Berechnung sowie Festlegung relevanter optischer Aufnahmeparameter. Die nachfolgende Bildaufnahme und Rekonstruktion der 3D-Punktwolke unterlag einer gründlichen Analyse, mit besonderem Fokus auf die Genauigkeit der Kamerakalibrierung und der Bildzuordnung, um sicherzustellen, dass sämtliche Aufnahmen und Aufnahmespuren vollständig miteinander verknüpft wurden. Darauf folgte eine detaillierte Prüfung der Genauigkeit und Qualität der rekonstruierten Ortsbrust. Dies beinhaltete die Beurteilung der inneren Genauigkeit und die intensive Untersuchung der äußeren Genauigkeit mittels Distanzermittlung zu einer Referenz.

### 9.1. Evaluierung der Überlappung der Aufnahmespuren

Gemäß der unter Punkt 8.2.1. beschriebenen Methodik wurden die Kamerapositionen, die nicht im Rahmen dieser Arbeit festgelegt wurden, herangezogen, um die seitliche Bildüberlappung durch kombinierte mathematische und grafische Lösung zu ermitteln. Die Abbildung 9.1 zeigt die resultierende Überlappung einzelner Aufnahmespuren, die sich aus den Montageradien (Tabelle 8.2), der Breite einer Aufnahmespur von 1135 mm und dem mittleren Aufnahmeabstand von 500 mm ergaben.

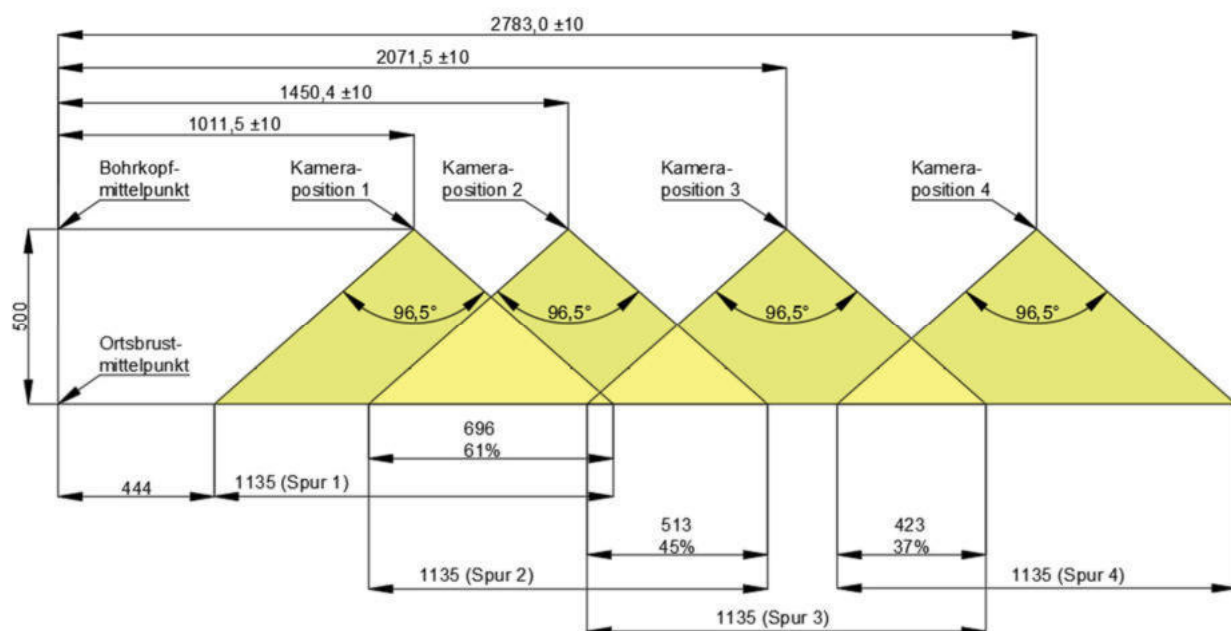


Abbildung 9.1: Grafische Lösung der seitlichen Bildüberlappung; Maße in mm; Maße ohne Toleranz: Toleranz innerhalb annehmbarer Grenzen; Civil3D

Aus der grafischen Lösung ergaben sich die seitlichen Bildüberlappungen, die der Überlappung der jeweiligen Aufnahmespuren entsprechen. Die Tabelle 9.1. zeigt die Ergebnisse tabellarisch aufgelistet.

Tabelle 9.1: Überlappung der Aufnahmespuren

Aufnahmespuren	Mittlere Spurüberlappung [mm]	Mittlere Spurüberlappung [%]
1 und 2	696	61
2 und 3	514	45
3 und 4	423	37

Zwischen den Aufnahmespuren 1 und 2 resultierte eine mittlere seitliche Bildüberlappung von 696 mm, das einer prozentualen Überlappung von 61% entspricht. Hingegen ergibt sich für die Aufnahmespuren 2 und 3 eine etwas geringere mittlere Überlappung von 513 mm, die prozentual 45% beträgt. Im Vergleich dazu weisen die Aufnahmespuren 3 und 4 eine mittlere seitliche Bildüberlappung von 423 mm auf, die 37 % der Bildbreite entspricht. Hier ist klar zu erkennen, dass die Überlappung der jeweiligen Aufnahmespuren vom Bohrkopfmittelpunkt in Richtung Randbereich des Bohrkopfes abnimmt.

Lediglich der Überlappungsbereich zwischen den Aufnahmespuren 1 und 2 erreicht die von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] geforderten 60%. Die prozentuale Überlappung der Aufnahmespuren 2 und 3 sowie 3 und 4 liegt deutlich unter den geforderten 60%.

## 9.2. Festgelegte optische Aufnahmeparameter

Vor der photogrammetrischen Aufnahme des Bildverbandes wurden die erforderlichen Aufnahmeparameter berechnet. Die Methodik ist im Punkt 8.2.2. erläutert und umfasst die Ermittlung der Bildrate zur Erfüllung der im Benutzerhandbuch von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] geforderten Mindestüberlappung in Bewegungsrichtung von 80%. Der nächste Aufnahmeparameter ist die Belichtungszeit, die so festgelegt wurde, dass lediglich eine Bewegungsunschärfe von bis zu 1 Pixel auftreten. Zudem wurden der ISO-Wert, die Blendenöffnung, der Fokus und die Schärfentiefe aufeinander abgestimmt, um einen qualitativ hochwertigen Bildverband mit hoher Schärfentiefe sicherzustellen.

### 9.2.1. Bildrate und Überlappung in Bewegungsrichtung

Die folgend dargestellte Tabelle 9.2 beinhaltet die relevanten Parameter zur Berechnung der Bildüberlappung in Bewegungsrichtung. In der Methodik wurde erläutert, dass die Bildrate auf Basis der projektspezifischen Parameter der äußeren Spur 4 für eine Bildüberlappung in Bewegungsrichtung von mindestens 80% berechnet wurde, die 0,5 1/s ergab. Aufgrund des erläuterten Schattenproblems wurde eine Bildrate von 1 1/s gewählt, die in einer tatsächlichen Überlappung der Aufnahmen in Bewegungsrichtung von 89% resultierte. Dies ergibt eine Bildanzahl von 225 1/U und eine Bilddichte von rund 13 1/m auf Spur 4.

Tabelle 9.2: Berechnung der Bildrate für 80% Bildüberlappung in Bewegungsrichtung der Spur 4; gewählte Bildrate; tatsächliche Bildüberlappung in Bewegungsrichtung sowie Bildanzahl und Bilddichte

Beschreibung	Wert	Einheit
Montageradius	2783,0	mm
Abzubildende Strecke (Umfang)	17,5	m
Zeit für 360 Grad Rotation	225	s/U
<i>Drehgeschwindigkeit</i>	<i>77,7</i>	<i>mm/s</i>
Objekthöhe am Bild	713	mm
<i>Bildrate für 80% Überlappung</i>	<i>0,5</i>	<i>1/s</i>
<i>Gewählte Bildrate</i>	<i>1,0</i>	<i>1/s</i>
<i>Tatsächliche Überlappung</i>	<i>89</i>	<i>%</i>
<i>Bildanzahl</i>	<i>225</i>	<i>1/U</i>
<i>Bilddichte</i>	<i>13</i>	<i>1/m</i>

Die Tabelle 9.3 zeigt die Bildüberlappung und die Bilddichte der Aufnahmespuren 1 bis 3 bei einer für alle Spuren idente Objekthöhe am Bild von 713 mm und der gewählten Bildrate von 1 1/s.

Tabelle 9.3: Bildüberlappung und Bilddichte in Bewegungsrichtung Spur 1 bis 3; Objekthöhe am Bild 713 mm; Bildrate 1 1/s; Zeit für 360 Grad Rotation 225 s/U

Aufnahmespur	Beschreibung	Wert	Einheit
Spur 3	Montageradius	2071,5	mm
	<i>Tatsächliche Überlappung</i>	<i>92</i>	<i>%</i>
	<i>Bilddichte</i>	<i>17</i>	<i>1/m</i>
Spur 2	Montageradius	1450,4	mm
	<i>Tatsächliche Überlappung</i>	<i>94</i>	<i>%</i>
	<i>Bilddichte</i>	<i>25</i>	<i>1/m</i>
Spur 1	Montageradius	1011,5	mm
	<i>Tatsächliche Überlappung</i>	<i>96</i>	<i>%</i>
	<i>Bilddichte</i>	<i>35</i>	<i>1/m</i>

Wie die Tabelle 9.3 zeigt, wird die von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] geforderte Überlappung der Aufnahmen in Bewegungsrichtung von 80%, bei festgelegter Bildrate von 1 1/s, in allen vier Aufnahmespuren erreicht. In der Spur 1 ergibt sich die höchste Überlappung von 96%, die durchaus zu einer verlängerten Rechenzeit während der photogrammetrischen Prozessierung führen kann, jedoch soll diese beitragen das Schattenproblem der sich bewegenden externen Lichtquelle zu umgehen.

### 9.2.2. Belichtungszeit und Bewegungsunschärfe

Ergänzend zur Bildrate wurde in der Methode im Punkt 8.2.2. die Berechnung der Belichtungszeit beschrieben. Unter Berücksichtigung der Rotationsgeschwindigkeit des Bohrkopfes und einer maximalen Bewegungsunschärfe von 1 Pixel resultierte eine maximale Belichtungszeit von 7,5 ms für die Spur 4.

Da für die vorliegende Arbeit zur Festlegung der Parameter ein mittlerer Aufnahmeabstand von 50,0 cm angenommen wurde und dieser in der Praxis variieren kann, wurde die tatsächliche Belichtungszeit etwas geringer festgelegt, sodass die maximal zulässige Bewegungsunschärfe auch bei geringerem Objektstand erreicht werden kann. Bei ausreichender Stabilität der Kamera führt die festgelegte Belichtungszeit von 5,0 ms zu einer minimalen Bewegungsunschärfe von 0,7 Pixel. Die herangezogenen Parameter, die maximale Belichtungszeit und die gewählte Belichtungszeit sind in der Tabelle 9.4 zusammengefasst.

Tabelle 9.4: Berechnung der maximalen Belichtungszeit für die maximale Bewegungsunschärfe von 1 Pixel; gewählte Belichtungszeit; tatsächliche Bewegungsunschärfe bei gewählter Belichtungszeit

Beschreibung	Wert	Einheit
Montageradius	2783,0	mm
Abzubildende Strecke (Umfang)	17,5	m
Zeit für 360 Grad Rotation	225	s/U
<i>Drehgeschwindigkeit</i>	77,7	mm/s
Maximale Bewegungsunschärfe	5,86	µm
Bildmaßstabszahl	100	-
<i>Maximale Belichtungszeit</i>	7,5	ms
<i>Gewählte Belichtungszeit</i>	5,0	ms
<i>Tatsächliche Bewegungsunschärfe am Sensor</i>	3,9	µm
<i>Tatsächliche Bewegungsunschärfe am Sensor</i>	0,7	Pixel

### 9.2.3. ISO-Wert, Blendenöffnung, Fokus und Schärfentiefe

Dieser Abschnitt beschreibt den festgelegten ISO-Wert, die gewählte Blendenzahl sowie den Fokus und die ermittelte Schärfentiefe. Nach der im Punkt 8.2.2. erläuterten Methodik, wurde der geringe ISO-Wert auf 150 und mit einer geringen Öffnung der Blende durch die Wahl von f/11 sowie einen Fokus von unendlich kombiniert. Durch die Wahl der hohen Blendenzahl ergibt sich in Kombination mit einer Brennweite von 5 mm eine Blendenöffnung von 0,45 mm gemäß Formel (3.12). Dies führt dazu, dass wenig Licht auf den Sensor trifft. Jedoch zielt diese Kombination darauf ab, eine hohe Schärfentiefe bei geringer Empfindlichkeit gegen Bildrauschen in einer durch den LED-Ring gut belichteten Umgebung zu erreichen. Die zur Berechnung verwendeten Parameter und die erreichte Schärfentiefe sind in folgender Tabelle 9.5 übersichtlich dargestellt.

Tabelle 9.5: Berechnung der Schärfentiefe

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit
Aufnahmeabstand	$a$	50,0	cm
Blendenzahl	$k$	11	-
Brennweite	$f$	5	mm
Unschärfekreis	$u'$	0,7	Pixel
Unschärfekreis	$u'$	3,9	$\mu\text{m}$
<i>Vorderster scharfer Objektpunkt</i>	$a_v$	27,1	cm
<i>Hinterster scharfer Objektpunkt</i>	$a_h$	325,4	cm
<i>Bereich der Schärfentiefe</i>	$t$	298,9	cm

Mit dem eingesetzten 5 mm-Objektiv, einer Blendenzahl  $k$  von 11 und einer tatsächlichen Bewegungunschärfe von 0,7 Pixel (entspricht einem Unschärfekreis von 3,9  $\mu\text{m}$  im Bildraum) können bei einem Objekt- abstand von 50,0 cm Ausbrüche in Bezug auf die Kamera im Abstand von 27,1 bis 325,4 cm scharf abgebildet werden. Dies ergibt einen Bereich der Schärfentiefe von 298,9 cm. Bei Betrachtung der Schärfentiefe in Bezug auf den mittleren Aufnahmeabstand von 50,0 cm können Felsnasen von bis zu 22,9 cm und Ausbrüche bis zu einer Tiefe von 275,7 cm scharf abgebildet werden.

### 9.3. Bildaufnahme und Rekonstruktion der 3D-Punktwolke

Wie in Punkt 8.3. der Methodik erläutert, wurde die Ortsbrust durch vier einzelne Aufnahmespuren photogrammetrisch erfasst und zur Erstellung der Rekonstruktion mit Agisoft-Metashape zwei mögliche Ansätze verfolgt. Diese waren die Simultankalibrierung und die Zwei-Schritt-Methode, die sich aus einer Selbstkalibrierung und einer photogrammetrischen Prozessierung mit vorkalibrierter Kamera zusammensetzte.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse der inneren Orientierungsparameter aus der Selbstkalibrierung präsentiert sowie zur Übersicht die Kalibrierungsparameter aus der Simultankalibrierung abgebildet. Zur Visualisierung der maßstabstreuen, räumlichen Rekonstruktion aus der Simultankalibrierung wurde das erstellte Höhenmodell dargestellt. Abschließend wurde der Prozess der Bildzuordnung auf vollständige Durchführung untersucht und die Ergebnisse übersichtlich dargestellt. Das Augenmerk der präsentierten Ergebnisse wurde auf die Identifikation möglicher Herausforderungen bei der Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren während der photogrammetrischen Prozessierung gelegt.

### 9.3.1. Genauigkeitsanalyse der Kamerakalibrierung aus der Selbstkalibrierung

Um die Selbstkalibrierung für eine tatsächliche Kamerakalibrierung im zweiten Schritt der Zwei-Schritt-Methode heranzuziehen, bedurfte es einer Genauigkeitsanalyse der inneren Orientierungsparameter. Im Rahmen dieser Analyse wurden die Standardabweichungen und Korrelationen der Parameter untersucht und bewertet. Das Ziel bestand darin sicherzustellen, dass die inneren Orientierungsparameter keine potenziellen negativen Auswirkungen auf die Genauigkeit der Objektpunktpositionierung haben.

#### Standardabweichungen der inneren Orientierungsparameter

Zur Evaluierung der Genauigkeit der inneren Orientierungsparameter, die durch die Selbstkalibrierung erzielt wurden, wurden die Empfehlungen gemäß Luhmann [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115] herangezogen. Diese enthalten Grenzen für die Standardabweichungen und Korrelationen der Parameter.

Es wird empfohlen, dass die Standardabweichung der Kamerakonstante  $c$  (in Agisoft-Metashape Brennweite  $F$ ) unterhalb der Bildmessgenauigkeit liegen sollte. Der resultierende Wert von Agisoft-Metashape (Tabelle 9.6) zeigt, dass die Standardabweichung der Brennweite  $F$  bei 3,93 Pixel liegt und somit nicht die erforderliche Genauigkeit der festgelegten Bildmessgenauigkeit von 1 Pixel erfüllt.

Die Empfehlung sieht für die Standardabweichungen der Koordinaten des Bildhauptpunktes  $x'_0$  und  $y'_0$  (in Agisoft-Metashape  $C_x$ ,  $C_y$ ) Werte vor, die unterhalb der festgelegten Bildmessgenauigkeit von 1 Pixel liegen. Wie die Tabelle 9.6 zeigt, wird diese Empfehlung erfüllt. Zusätzlich wird empfohlen, dass die Standardabweichungen der radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  (in Agisoft-Metashape  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ) im Vergleich zu den eigentlichen Parametern deutlich geringer sein sollten. Wie die Tabelle 9.6 zeigt, wird auch diese Genauigkeitsanforderung erfüllt. Zudem zeigt die Tabelle 9.6, dass die Empfehlungen für die Standardabweichungen der tangential-asymmetrischen Verzeichnungsparameter  $B_1$  und  $B_2$  (in Agisoft-Metashape  $P_1$ ,  $P_2$ ) auch erfüllt werden, da diese wie empfohlen mindestens eine Größenordnung kleiner sind als die Parameter selbst.

#### Korrelationen zwischen den inneren Orientierungsparametern

Neben den Standardabweichungen werden auch die Korrelationen der inneren Orientierungsparameter im Rahmen der Genauigkeitsanalyse untersucht und bewertet. Diese sollen nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115] so gering wie möglich gehalten werden, da sie sich bei der Anwendung in einem externen Berechnungsvorgang negativ auf weiterführende Ergebnisse auswirken können.

Wie die Tabelle 9.6 zeigt, sind der Varianz-Kovarianz-Matrix der inneren Orientierungsparameter die Korrelationen zwischen den Parametern zu entnehmen. Es ist auffällig, dass die radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter  $K_1$ ,  $K_2$  und  $K_3$  eine äußerst hohe Korrelation nahe 1 oder -1 untereinander sowie in Bezug auf die Brennweite  $F$  aufweisen. Die Brennweite  $F$  zeigt ebenso eine hohe Korrelation von 0,63 zu dem tangential-asymmetrischen Verzeichnungsparameter  $P_2$  sowie eine mittlere Korrelation von 0,42 zur vertikalen Position  $C_y$  des Bildhauptpunktes. Des Weiteren ist eine mittlere Korrelation von 0,43 oder -0,43 zwischen den radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter  $K_1$ ,  $K_2$  und  $K_3$  und der vertikalen Position  $C_y$  des Bildhauptpunktes zu erkennen. Diese Zusammenhänge verdeutlichen die Wechselwirkung und Abhängigkeit der inneren Orientierungsparameter.

Tabelle 9.6: Innere Orientierungsparameter aus der Selbstkalibrierung mit Standardabweichung (Error) und Varianz-Kovarianz-Matrix; Agisoft-Metashape

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	840.854	3.92808	1.00	0.07	0.42	-0.99	1.00	-1.00	-0.01	0.63
Cx	1.3679	0.0866713		1.00	-0.12	-0.10	0.07	-0.07	0.15	-0.13
Cy	-8.65125	0.078176			1.00	-0.43	0.43	-0.43	-0.10	0.12
K1	-0.0403834	0.000385205				1.00	-0.99	0.99	0.06	-0.60
K2	0.0865787	0.00162202					1.00	-1.00	0.00	0.63
K3	-0.0406547	0.00114237						1.00	0.00	-0.63
P1	-0.000136031	3.85616e-06							1.00	0.24
P2	0.000458625	6.82434e-06								1.00

Zusammenfassend ergibt das Ergebnis der Genauigkeitsanalyse der inneren Orientierungsparameter aus der Selbstkalibrierung, dass die Parameter nicht die Empfehlungen nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115] erfüllen.

### 9.3.2. Kamerakalibrierung aus der Simultankalibrierung

Für die inneren Orientierungsparameter aus der Simultankalibrierung ist keine Genauigkeitsanalyse durchzuführen, da diese nicht in einem externen Berechnungsvorgang verwendet wurden und nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115] die Standardabweichungen und Korrelationen der Parameter lediglich eine untergeordnete Rolle. Zudem bedeutet eine nicht eindeutig bestimmte Kamerakonstante mit hoher Standardabweichung nicht, dass die Objektpunkte ungenauer bestimmt wurden [Luhmann 2010b, S. 340]. Folgende Tabelle 9.7 zeigt die inneren Orientierungsparameter der Simultankalibrierung sowie deren Standardabweichungen und Korrelationen.

Tabelle 9.7: Innere Orientierungsparameter aus der simultankalibrierung mit Standardabweichung (Error) und Varianz-Kovarianz-Matrix; Agisoft-Metashape

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	746.901	4.37916	1.00	0.00	0.55	-0.98	1.00	-1.00	-0.05	0.07
Cx	5.38193	0.0848254		1.00	0.16	-0.01	0.01	-0.01	0.51	-0.12
Cy	-11.6538	0.0826882			1.00	-0.55	0.55	-0.55	0.13	0.26
K1	-0.030458	0.00036863				1.00	-0.98	0.98	-0.03	-0.06
K2	0.055834	0.0013089					1.00	-1.00	-0.05	0.08
K3	-0.0209708	0.000737365						1.00	0.05	-0.07
P1	-0.000210065	4.13187e-06							1.00	-0.20
P2	0.000332933	5.07156e-06								1.00

Werden die Standardabweichungen und Korrelationen dennoch betrachtet, kann zusammenfassend formuliert werden, dass diese mit jenen aus der Selbstkalibrierung sehr gut vergleichbar sind. Es fällt jedoch auf, dass im Gegensatz zu dem Parameter aus der Selbstkalibrierung der tangential-asymmetrischen Verzerrungsparameter P2 keine erwähnenswerten Korrelationen aufweist. Hingegen weist der tangential-

asymmetrischen Verzeichnungsparameter P1 eine mittlere Korrelation von 0,51 zur horizontalen Position des Bildhauptpunkte Cx auf. Zur weiteren Verwendung der durch Simultankalibrierung erzeugten Rekonstruktion spielt dies allerdings keine Rolle.

### 9.3.3. Höhenmodell der Simultankalibrierung

Wird das Höhenmodell zur geologischen Dokumentation herangezogen, ist die erreichte Bildmessgenauigkeit von 0,565 mm/Pixel ausschlaggebend, die sehr gut mit dem im Rahmen der Genauigkeitsvorbetrachtung berechneten Objektauflösungsvermögen von 0,6 mm/Pixel vergleichbar ist. Die Werte sind also in einem ähnlichen Bereich, was auf eine gute Übereinstimmung zwischen den erwarteten und den tatsächlich erreichten Genauigkeiten hinweist.

Die Abbildung 9.2 zeigt das Höhenmodell aus der Simultankalibrierung mit Blick in Vortriebsrichtung, entlang der positiven z-Achse, die der Aufnahmerichtung entspricht. Zur Darstellung des Höhenmodells wurde eine Auflösung von 2 mm/Pixel gewählt, da dieses lediglich der Visualisierung dient. Es zeigt Objektpunkte in Abständen von 28,3 bis 64,1 cm zur Kamera, die den Abständen zum Bohrkopf entsprechen. Ferner sind in den Quadranten drei und vier des Objektkoordinatensystems (rechte Bildhälfte) Anzeichen für eine nicht zusammenhängende Punktwolke zu erkennen.

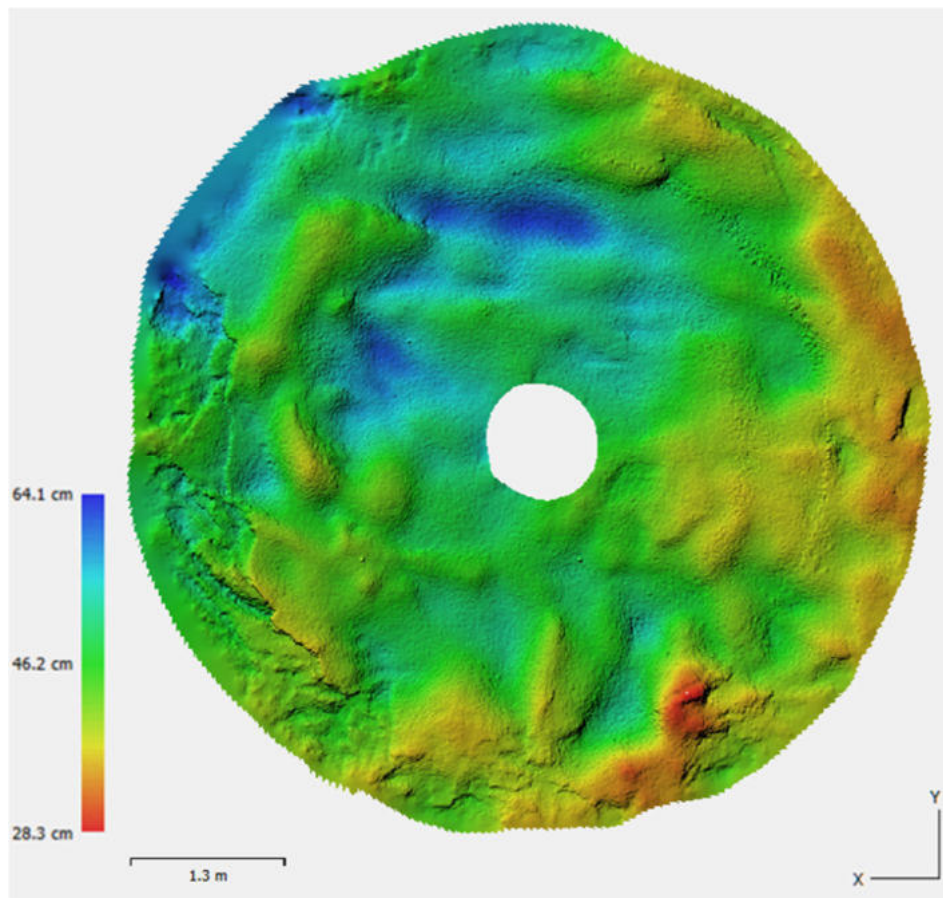


Abbildung 9.2: Höhenmodell mit 2 mm/Pixel bei Sicht in Vortriebsrichtung entlang der positiven z-Achse des Objektkoordinatensystems; Bildmessgenauigkeit 0,565 mm/Pixel; Agisoft-Metashape



Die Abbildung 9.3 veranschaulicht deutlich das Höhenmodell und den Bohrkopfplan bei Sicht in Vortriebsrichtung. Es stellt eine Verbindung zwischen dem Höhenmodell und den Positionen der Kamerapositionen im Objektkoordinatensystem her. Auffällig ist, dass die Anzeichen für eine nicht zusammenhängende Punktwolke (linke Bildhälfte) in den Überlappungsbereichen der Aufnahmespuren zu finden sind.

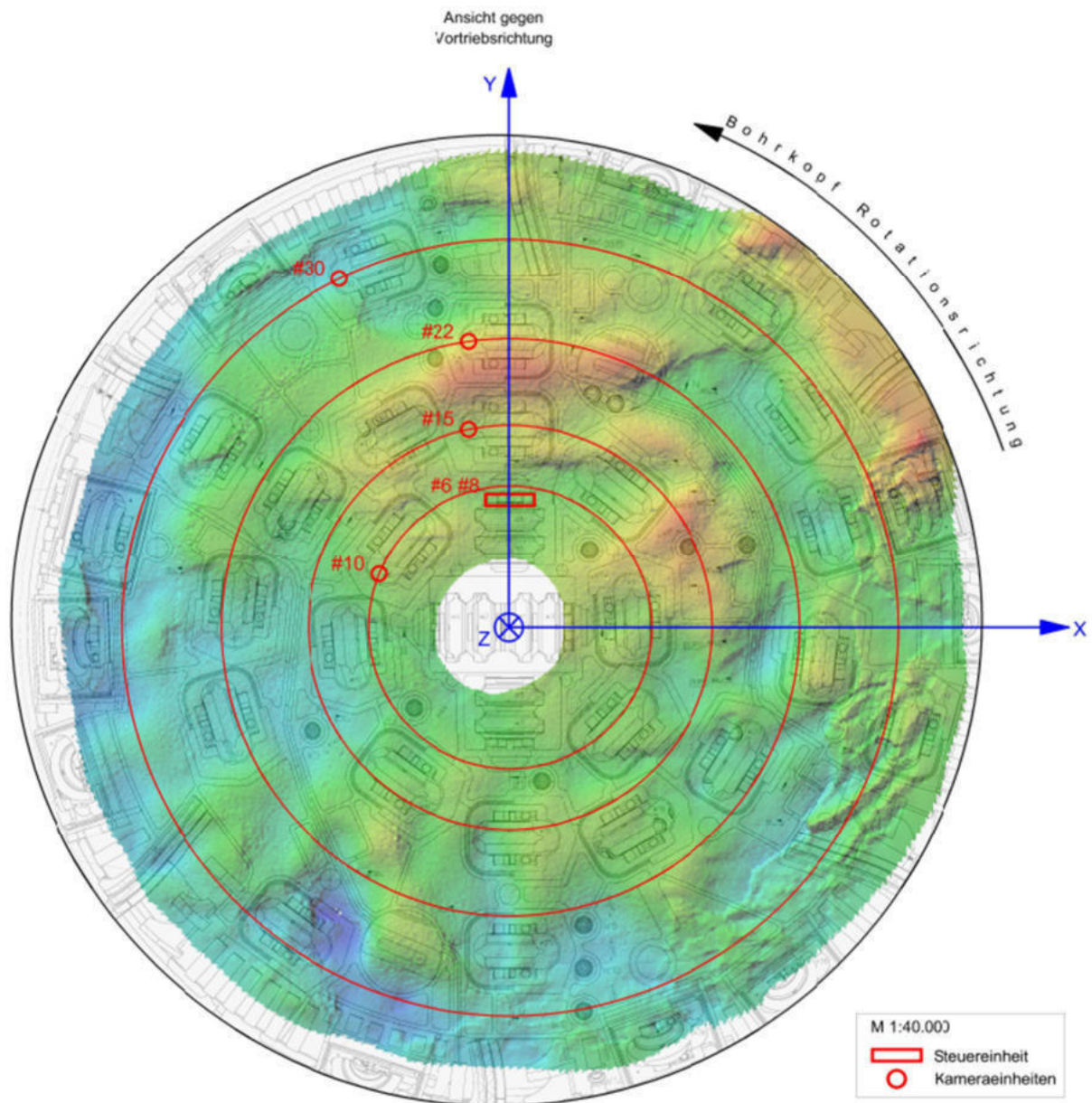


Abbildung 9.3: Höhenmodell und Bohrkopfplan mit den Kameramontagepositionen (rot) und der Steuereinheit (rot) im Objektkoordinatensystem (blau); Sicht entgegen Vortriebsrichtung entlang der negativen z-Richtung; Höhenmodell aus Agisoft-Metashape in Civil3D

### 9.3.4. Prozess der Bildzuordnung der Simultankalibrierung

Die Bewertung der Bildzuordnung erfolgte durch die Untersuchung der von Agisoft-Metashape erstellten Verknüpfungen zwischen den Aufnahmen. Es stellte sich heraus, dass die Aufnahmen nur innerhalb einzelner Aufnahmespuren ausreichend miteinander verknüpft wurden. Es fehlten jedoch Verknüpfungen zwischen den Aufnahmespuren, wodurch diese keine zusammenhängende Punktwolke bildeten.

Obwohl zwischen den Aufnahmespuren 1 und 2 ein Überlappungsbereich von 61% errechnet wurde, der die Anforderung von Agisoft-Metashape von 60% übertraf, wurden diese Aufnahmespuren nicht verknüpft. Die Untersuchung der Verknüpfungen innerhalb einer Aufnahmespur zeigte, dass im Bereich der Bildmitte viele Bildverknüpfungen zur Positionierung der Objektpunkte gefunden wurden. Im Gegensatz dazu wurden im Randbereich der Aufnahmen nur wenige Bildpunkte für die Bildverknüpfung verwendet, da dort Reflexionen von der externen Lichtquelle (LED-Ring um die Kamera) auftraten, die nicht als geeignete Verknüpfungspunkte während der Bildzuordnung verwendet werden konnten. In Abbildung 9.4 sind die gültigen (blau) und die ungültigen (rot) Verknüpfungen zwischen zwei Aufnahmen der Spur 4 dargestellt, die während des Bildzuordnungsprozesses gefunden wurden.

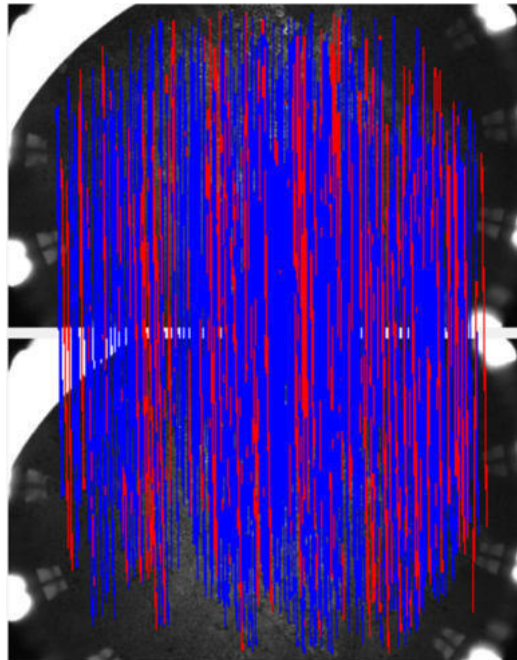


Abbildung 9.4: Verknüpfungspunkte zweier Aufnahmen der Spur 4; Cam2\_35\_185.91#30 (oben) und Cam2\_38\_187.75#30 (unten); 553 gültige Verknüpfungen (blau); 188 ungültige Verknüpfungen (rot); Agisoft-Metashape

## 9.4. Evaluierung der Genauigkeit und Qualität der rekonstruierten Ortsbrust

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der in Punkt 9.4. erläuterten Methodik zur Evaluierung der inneren und äußeren Genauigkeit der mit Simultankalibrierung photogrammetrisch prozessierten 3D-Punktewolke präsentiert. Diese Informationen sind entscheidend, um die Genauigkeit der äußeren Orientierungsparameter und der Objektpunktpositionierung zu beurteilen. Die vorgestellten Ergebnisse bieten Einblicke in die Präzision und Richtigkeit der 3D-Punktewolke und dienen der Qualitätskontrolle.

### 9.4.1. RMS-Werte zur Betrachtung der inneren Genauigkeit

Die Ergebnisse der inneren Genauigkeit der Bündelausgleichung der Simultankalibrierung spiegeln die Genauigkeit der äußeren Orientierungsparameter und die Genauigkeit der Objektpunktbestimmung wider. Als aussagekräftige Parameter der inneren Genauigkeit wurden die RMS-Werte der äußeren Orientierungsparameter sowie der mittlere und maximale RMS-Wert der Objektpunkte verwendet.

#### RMS-Wert der äußeren Orientierungsparameter

Die zuvor berechneten Kamerapositionen während der Bildaufnahme wurden als translatorischer Anteil der äußeren Orientierung in Agisoft-Metashape importiert und im Rahmen der Bündelausgleichung für jede Aufnahme optimiert. Dem folgt eine Berechnung der RMS-Werte für jede Raumrichtung (X error, Y error, Z error) sowie für die Ebene (XY error) und ein Gesamtwert (total error) nach Formel (5.6). Die resultierenden RMS-Werte sind in Tabelle 9.8 dargestellt. Der RMS-Wert in der xy-Ebene beträgt rund 6,50 mm und jener in die Tiefe entlang der z-Richtung rund 6,03 mm. Der totale RMS-Wert ergibt rund 8,86 mm.

Tabelle 9.8: RMS-Werte der Kamerapositionen im Objektkoordinatensystem; Agisoft-Metashape

X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total error (mm)
4.70456	4.48027	6.02596	6.49659	8.86104

#### Mittlerer und maximaler RMS-Wert der Objektpunkte

Die Genauigkeit der gesamten Bündelausgleichung im Objektraum wird durch den mittleren RMS-Wert aller Objektpunkte definiert und repräsentiert den mittleren quadratischen Reprojektionsfehler. Nach der in Punkt 8.3.3. beschriebenen Methodik der Punktfilterung der mittels Simultankalibrierung erzeugten Rekonstruktion der Ortsbrust ergab sich ein mittlerer RMS-Wert von 0,675 Pixel.

Im Gegensatz dazu stellt der maximale RMS-Wert den maximalen Reprojektionsfehler eines einzelnen Objektpunktes auf das Bild nach der Ausgleichung dar. Wie der mittlere RMS-Wert ergab sich der maximale RMS-Wert auch nach der Filterung der Punktewolke und beträgt 0,892 Pixel.

### 9.4.2. Distanzermittlung zur Betrachtung der äußeren Genauigkeit

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der in Punkt 8.4.4. beschriebenen Methodik der Distanzermittlung mittels der C2C-, C2M- und M3C2-Algorithmen in CloudCompare präsentiert. Dieser Ansatz ermöglicht die Bewertung der äußeren Genauigkeit der photogrammetrisch rekonstruierten 3D-Punktwolke und dient der Identifizierung möglicher Probleme bei der Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren.

In der Analyse der Ergebnisse der Distanzermittlung wurde ein kombinierter maximal möglicher Fehler herangezogen, der sich aus den unabhängigen Größen des maximalen Fehlers der Referenzpunktwolke und demjenigen der Vergleichspunktwolke zusammensetzt. Durch die Berücksichtigung und Kombination der Fehler aus zwei separaten Datenquellen wird die Unterscheidung von tatsächlichen und scheinbaren Positionsabweichungen sichergestellt. Dieser Ansatz unterstreicht die Bedeutung einer ganzheitlichen Fehleranalyse, um eine zuverlässige Auswertung zu gewährleisten.

Der maximale Fehler des Laserscans beträgt 4,5 mm und ergibt sich aus der Kombination der 3D-Genauigkeit von 3,5 mm und dem zugehörigen Fehlerbereich von  $\pm 1$  mm (Tabelle 7.4). Der maximale Fehler eines Objektpunktes der photogrammetrisch prozessierten 3D-Punktwolke kann lediglich durch einen Vergleich einzelner Objektpunkte mit einer Referenz bestimmt werden. Demnach wird für die vorliegende Arbeit der maximale RMS-Wert der Objektpunkte (maximaler Reprojektionsfehler) herangezogen. Dieser spiegelt in Kombination mit anderen Parametern zwar lediglich die Genauigkeit im Bildraum wider, wird aber für diese Arbeit zur Abschätzung gemäß Formel (3.1) über die Bildmaßstabszahl in den Objektraum übertragen. Daraus folgt der maximale Fehler der photogrammetrisch prozessierten Objektpunkte von 0,522 mm aus dem maximalen RMS-Wert von 0,892 Pixel.

Werden die einzelnen unabhängigen maximalen Fehler kombiniert, ergibt sich ein maximal möglicher Fehler von  $\pm 5,02$  mm, der als Schwellenwert zur Unterscheidung von tatsächlichen und scheinbaren Positionsabweichungen verwendet wurde.

### C2C-Algorithmus in x-Richtung

Zunächst erfolgte eine quantitative Analyse der Distanzen in x-Richtung des Objektkoordinatensystems, die mit dem C2C-Algorithmus ermittelt wurden. Diese Analyse bietet Einblicke in die räumliche Verteilung der Abstände zwischen den Objektpunkten aus der Photogrammetrie und den Referenzdaten des Laserscans in x-Richtung und dient vorrangig der Beurteilung der Maßstabstreue. Die ermittelten Distanzen der Punkte der photogrammetrisch prozessierten 3D-Punktwolke zum Laserscan wurden farblich kodiert und in Abbildung 9.5 dargestellt.

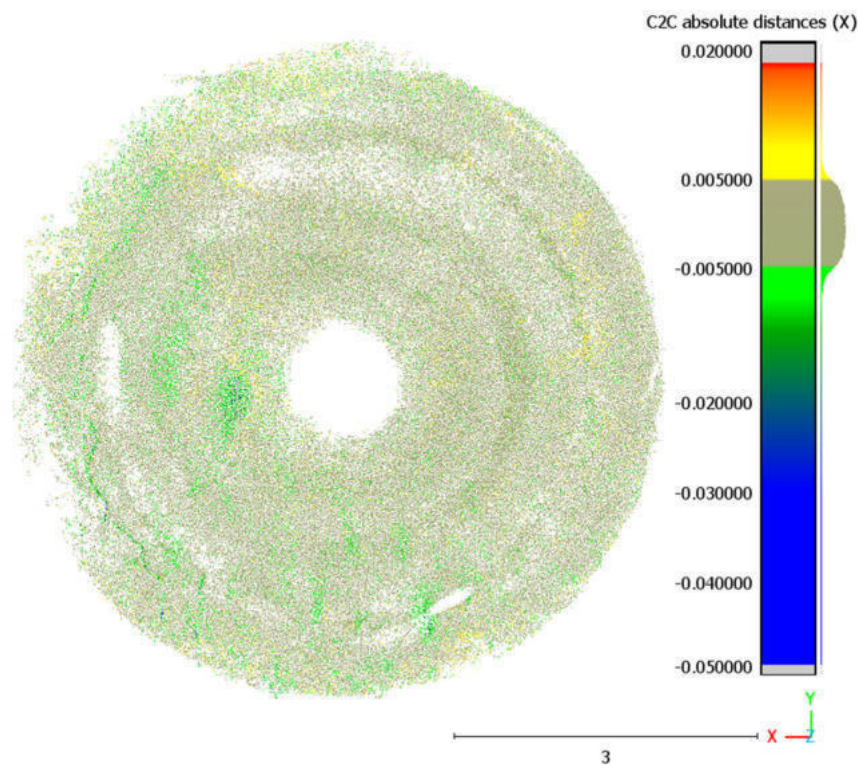


Abbildung 9.5: Distanzermittlung C2C-Algorithmus in x-Richtung; Referenzpunktwolke: Laserscan; Werte in m; CloudCompare

Gemäß Abbildung 9.5 wurden in der photogrammetrischen Punktwolke diejenigen Punkte, deren Abstand zum Laserscan innerhalb des berechneten maximalen Fehlers von  $\pm 5,02$  mm lag, in der Farbe grau dargestellt. Besonders hervorzuheben ist ein markanter Bereich im zweiten Quadranten des Objektkoordinatensystems (im linken unteren Bildbereich), der die maximale Distanz in negativer x-Richtung aufweist und bis zu  $-48,988$  mm erreicht. Des Weiteren sind im linken unteren Bildbereich vereinzelt kleine Bereiche mit negativen Maximalwerten im Randbereich sichtbar. Ein weiterer Bereich, der die maximale Distanz in negativer x-Richtung zeigt, ist im dritten Quadranten (rechter unterer Bildbereich) in der Umgebung einer Lücke der Punktwolke zu finden. Vereinzelt sind im Randbereich Punkte mit Distanzwerten in Richtung der positiven x-Achse (rot) erkennbar, die einen maximalen Wert von  $17,907$  mm erreichen.

### C2C-Algorithmus in y-Richtung

Nach der Distanzermittlung anhand des C2C-Algorithmus in x-Richtung erfolgte eine weitere Analyse der Distanzen in y-Richtung. Die Abbildung 9.6 bietet eine visuelle Repräsentation dieser Distanzen und trägt dazu bei die Maßstabstreue der photogrammetrisch prozessierten 3D-Punktwolke zu beurteilen. Dies wird insbesondere durch die Kombination mit den Distanzen des C2C-Algorithmus in x-Richtung ermöglicht.

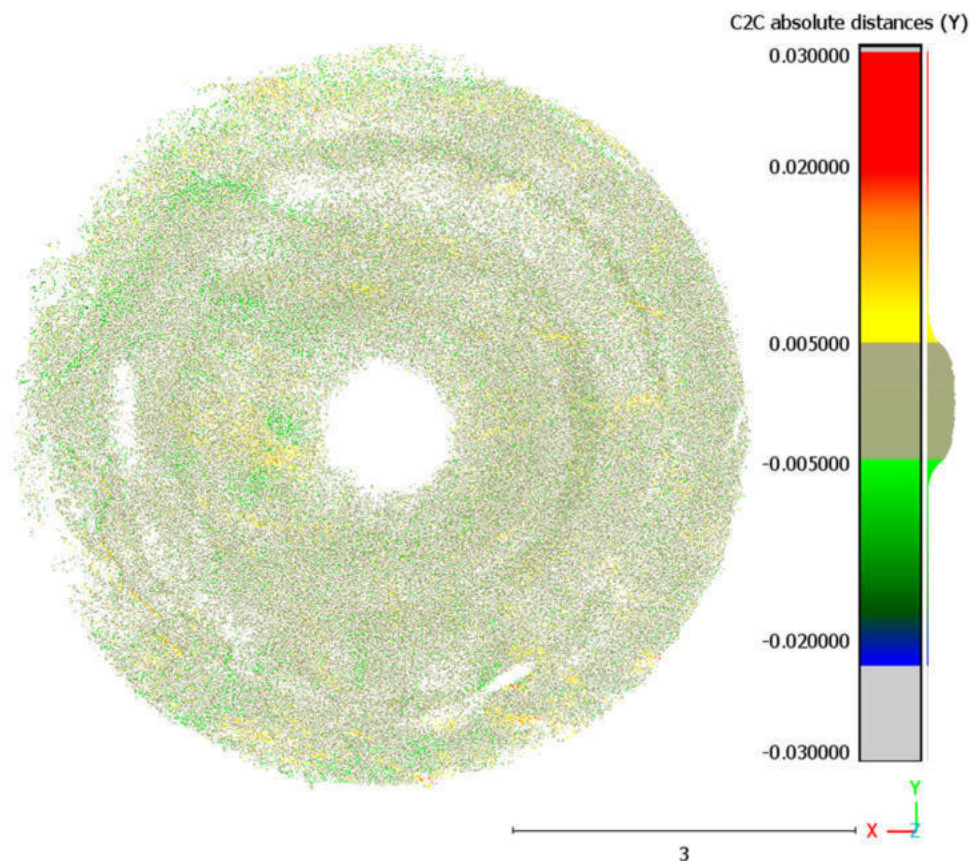


Abbildung 9.6: Distanzermittlung C2C-Algorithmus in y-Richtung; Referenzpunktwolke: Laserscan; Werte in m; CloudCompare

Die farblich kodierten Objektpunkte aus der Photogrammetrie, die sich innerhalb des maximalen Fehlers von  $\pm 5,02$  mm zum Laserscan befinden, wurden wiederum ausgegraut. Wiederum zeigt sich im zweiten Quadranten des Objektkoordinatensystems (linke untere Bildhälfte) ein auffälliger Bereich, der bereits bei der Anwendung des C2C-Algorithmus in x-Richtung bemerkt wurde. In y-Richtung sind in diesem Bereich, im Gegensatz zu den Distanzen in x-Richtung, eine Ansammlung von Objektpunkten mit maximal positiven Distanzwerten zum Laserscan ersichtlich, die Maximalwerte von bis zu 29,602 mm (rot) erreichen. Zusätzlich finden sich kleine Bereiche mit maximalen Werten in positiver y-Richtung, die vereinzelt über die Punktwolke verteilt sind. Der Randbereich der Punktwolke enthält vereinzelte Punkte mit positiven und negativen Maximalwerten von 29,602 mm (rot) und -22,082 mm (blau).

### C2C-Algorithmus in z-Richtung

Die Distanzen aus dem C2C-Algorithmus wurden neben jenen in x- und y-Richtung auch in die z-Richtung untersucht. Diese Raumrichtung ist für die vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung. Die Abbildung 9.7 bietet eine visuelle Darstellung der ermittelten Distanzwerte in z-Richtung, das zugehörige Histogramm und eine Häufigkeitsverteilung.

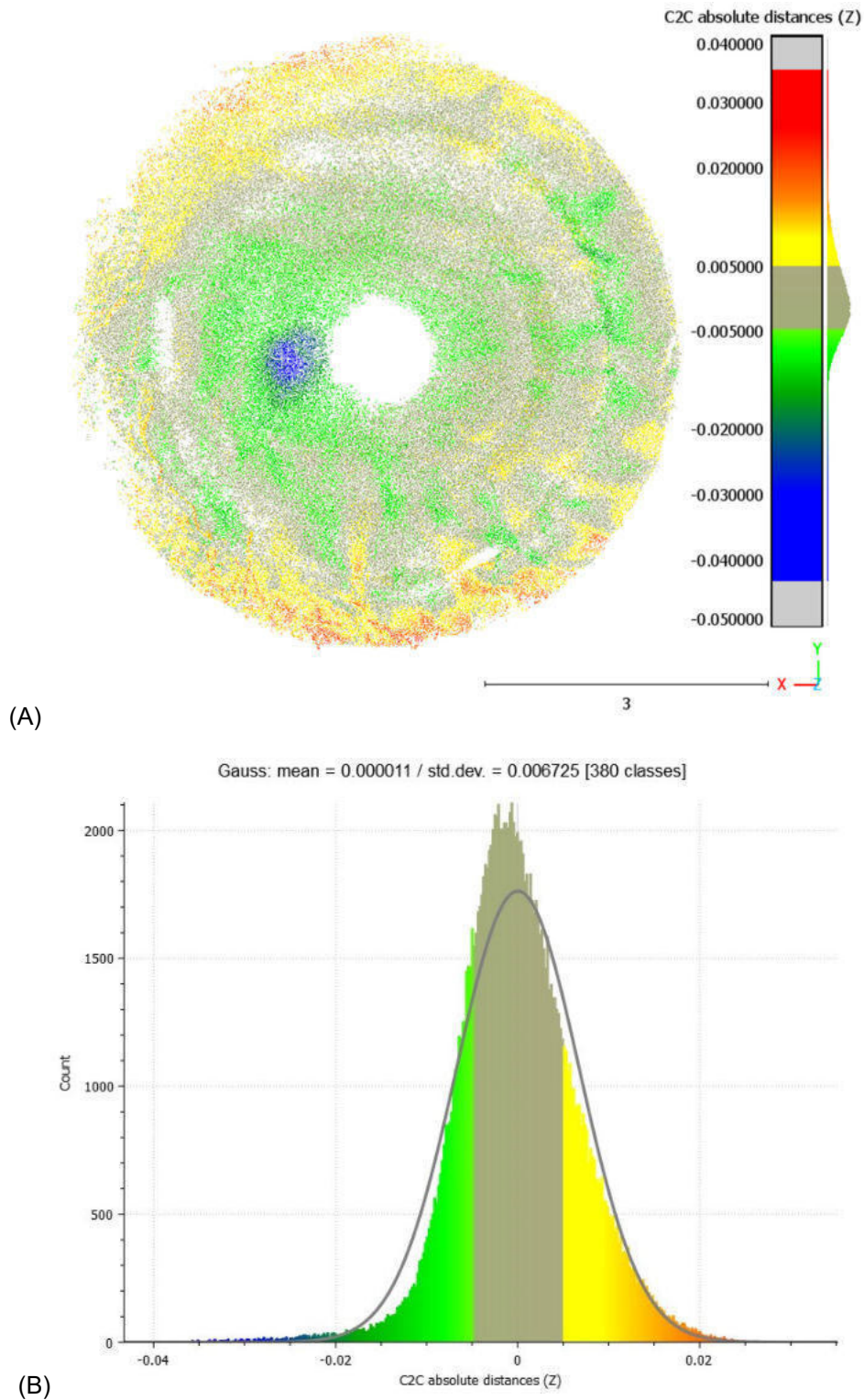


Abbildung 9.7: Distanzermittlung C2C-Algorithmus in z-Richtung; Referenzpunktewolke: Laserscan; Werte in m; (A) Distanzwerte; (B) Histogramm und Häufigkeitsverteilung; CloudCompare

In Bezug auf Abbildung 9.7 ist zunächst zu erwähnen, dass jene Punkte mit einer Distanz im Bereich vom berechneten maximalen Fehler von  $\pm 5,02$  mm in der Farbe grau dargestellt wurden. Zunächst ist im ersten und zweiten Quadranten des Objektkoordinatensystems (linke Bildhälfte) ein flächenhaft größerer Bereich mit negativen Distanzwerten bis zu  $-1,0$  cm (grün) auffällig. Darin befindet sich ein kleinerer Bereich, der die Maximalwerte in negativer z-Richtung bis zu  $-43,240$  mm beinhaltet. Hingegen sind die positiven Maximalwerte von bis zu  $35,146$  mm vorrangig im oberen und unteren Randbereich der Punktwolke zu sehen.

Bei der Betrachtung der farblich kodierten Objektpunkte fallen deutlich die einzelnen Aufnahmespuren auf. Zudem zeigt sich eine leichte zyklische Systematik, da die Distanzwerte innerhalb einer Aufnahmespur von  $1,0$  cm in positiver z-Richtung (innerer Rand einer Aufnahmespur) über den ausgegrauten Fehlerbereich (mittlerer Bereich einer Aufnahmespur), bis hin zu  $-1,0$  cm in negativer z-Richtung (äußerer Rand einer Aufnahmespur) verlaufen. Dies ist vor allem im dritten und vierten Quadranten des Objektkoordinatensystems (rechte Bildhälfte) deutlich erkennbar, insbesondere innerhalb der äußeren drei Aufnahmespuren. In der ersten Aufnahmespur um den Ursprung sind hingegen hauptsächlich negative Distanzwerte von bis zu  $1,0$  cm zu sehen. Auffällig sind auch Bereiche hoher Punktedichte und akute Wertesprünge von benachbarten Bereichen von  $1,0$  cm (gelb) auf  $-1,0$  cm (grün).

Zur Visualisierung der Verteilung der Distanzwerte des C2C-Algorithmus in z-Richtung wurde ein Histogramm mit der identen Farbskala wie die Distanzwerte erstellt. Die Häufigkeitsverteilung zeigt einen Erwartungswert von  $0,011$  mm und eine Standardabweichung von  $6,725$  mm. Es liegen 95% (zweifache Standardabweichung) der photogrammetrischen Objektpunkte innerhalb eines Distanzbereiches von  $\pm 13,450$  mm zum Laserscan.



### C2M-Algorithmus

Die Ergebnisse der Distanzermittlung durch den C2M-Algorithmus zeigen ähnliche Ergebnisse wie der C2C-Algorithmus in Bezug auf die z-Richtung. Die Ergebnisse des C2M-Algorithmus ergänzen und erweitern die Information, die bereits durch den C2C-Algorithmus gewonnen wurden. In Abbildung 9.8 sind die Distanzwerte und das Histogramm mit der Häufigkeitsverteilung der photogrammetrischen Objektpunkte zum Laserscan farblich kodiert dargestellt.

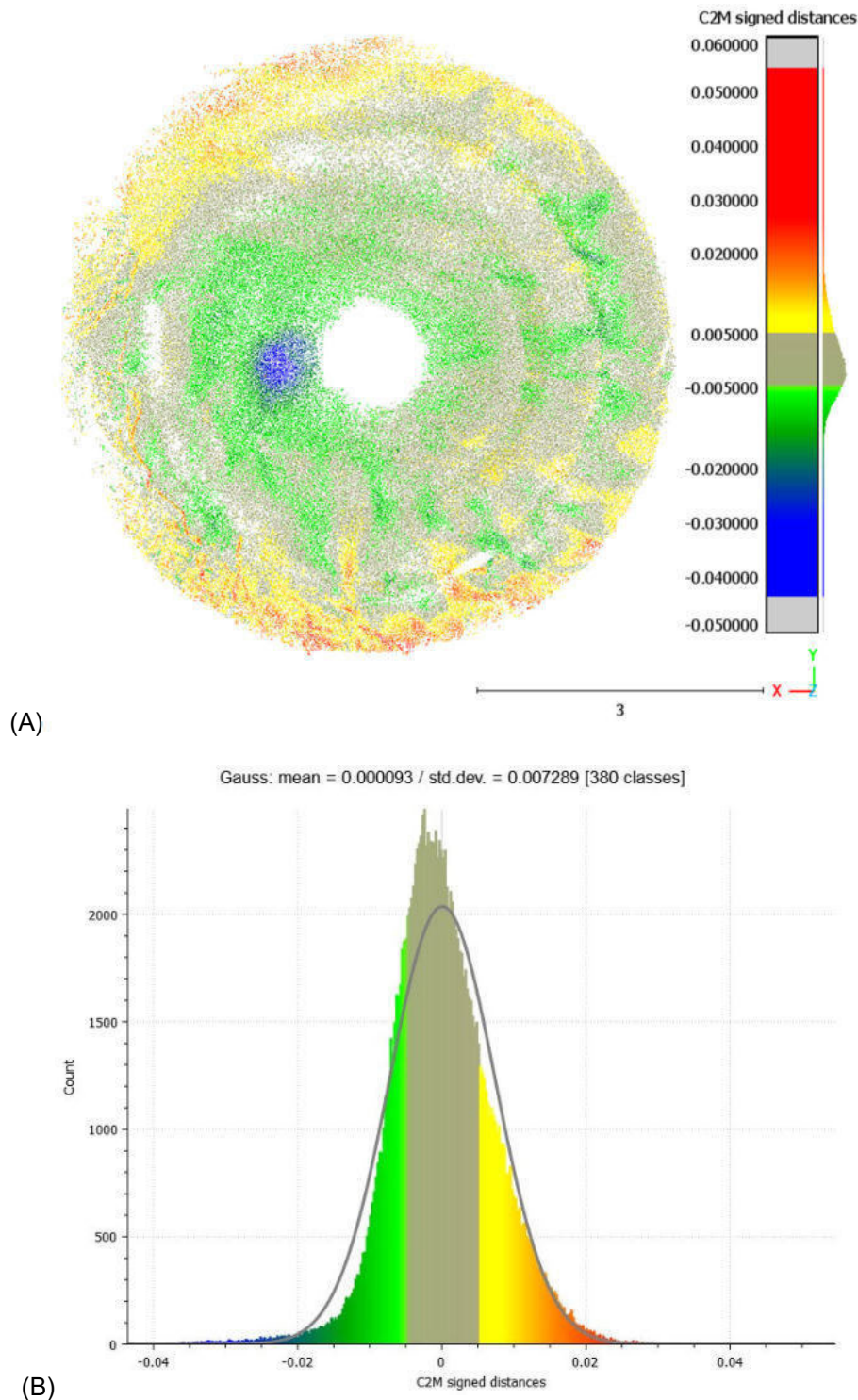


Abbildung 9.8: Distanzermittlung C2M-Algorithmus; Referenzpunktewolke: Laserscan; Werte in m; (A) Distanzwerte; (B) Histogramm und Häufigkeitsverteilung; CloudCompare

Wiederum wurden die Objektpunkte mit Distanzwerten innerhalb des maximalen Fehlerbereichs von  $\pm 5,02$  mm in der Farbe grau dargestellt. Im ersten und zweiten Quadranten des Objektkoordinatensystem (linke Bildhälfte) zeigt sich erneut der größere Bereich von negativen Distanzwerten bis zu  $-1,0$  cm (grün), der einen kleineren Bereich mit negativen Maximalwerten von bis zu  $-43,576$  mm (blau), enthält. Die positiven Maximalwerte von bis zu  $54,580$  mm liegen wiederum vorrangig im Randbereich der Punktwolke vor.

Wie auch den C2C-Algorithmus in z-Richtung erkennbar, zeigen auch die Distanzwerte des C2M-Algorithmus eine zyklische Systematik, die besonders in den dritten und vierten Quadranten des Objektkoordinatensystems (rechte Bildhälfte) erkennbar ist. Die Distanzwerte verlaufen innerhalb der Aufnahmespuren von negativen Distanzen (in negativer z-Richtung) von  $-1,0$  cm, über den ausgegrauten Fehlerbereich, bis hin zu positiven Distanzen (in positiver z-Richtung) von  $1,0$  cm. Ebenfalls sind die zuvor beobachteten Bereiche mit hoher Punktedichte und abrupten Wertesprüngen sichtbar.

Die Verteilung der Distanzwerte des C2M-Algorithmus, wurde in einem Histogramm, mit der gleichen Farbskala wie die Distanzwerte, visuell dargestellt. Deren Häufigkeitsverteilung zeigt einen Mittelwert von  $0,093$  mm mit einer Standardabweichung von  $7,289$  mm. Somit befinden sich 95% (zweifache Standardabweichung) der Objektpunkte innerhalb eines Distanzbereiches von  $\pm 14,578$  mm zum Laserscan.

### M3C2-Algorithmus

Der M3C2-Algorithmus unterscheidet sich erheblich in seiner Funktionsweise von den zuvor angewendeten C2C- und C2M-Algorithmen. Dies ist in der Verteilung der Distanzwerte des M3C2-Algorithmus in Abbildung 9.9 deutlich sichtbar.

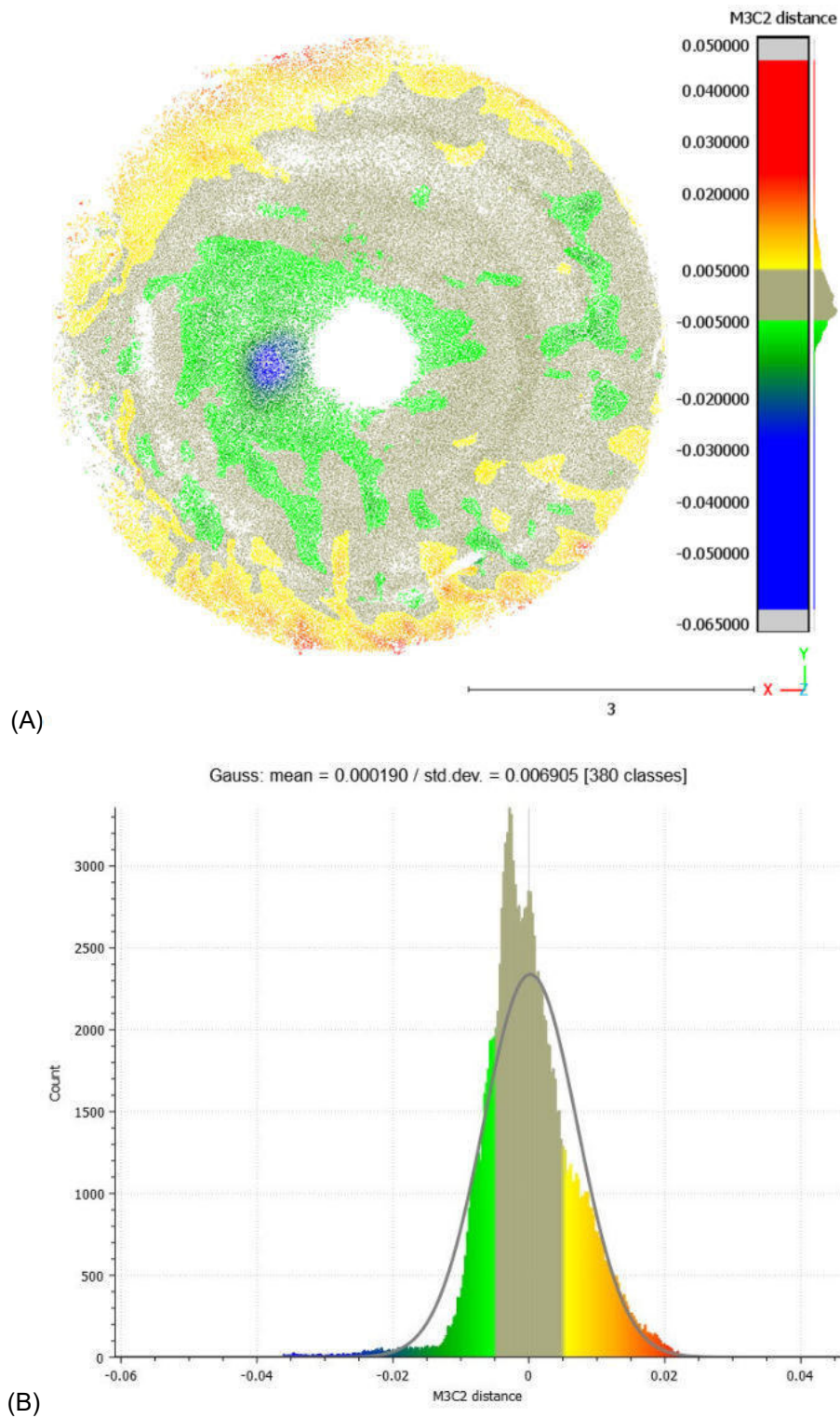


Abbildung 9.9: Distanzermittlung M3C2-Algorithmus; Referenzpunktewolke: Laserscan; Werte in m; (A) Distanzwerte; (B) Histogramm und Häufigkeitsverteilung; CloudCompare

Im Sinne einer übersichtlichen Darstellung sind alle Distanzwerte, die sich innerhalb des berechneten maximalen Fehlers des Laserscans und der photogrammetrisch prozessierten Punktwolke von  $\pm 5,02$  mm befinden, in Abbildung 9.9 in grauer Farbe dargestellt. Im ersten und zweiten Quadranten des Objektkoordinatensystem (linke Bildhälfte) ist wiederum ein größerer Bereich von negativen Distanzwerten bis zu  $-1,0$  cm (grün) erkennbar. Innerhalb dieses Bereichs befindet sich der einzige Abschnitt, in dem die Distanzen in negativer z-Richtung bis zum Maximalwert von  $-60,888$  mm ansteigen. Objektpunkte mit positiven Maximalwerten von  $45,929$  mm befinden sich wiederum im oberen und unteren Randbereich.

Im Gegensatz zu den zuvor angewandten C2C- und C2M-Algorithmen zeigt der M3C2-Algorithmus keine auffällige Systematik oder sprunghaften Wechsel der Distanzwerte im dritten und vierten Quadranten des Objektkoordinatensystems. Dennoch sind in diesen Bereichen wiederum Gebiete mit hoher Punktedichte zu erkennen, die jedoch Distanzen innerhalb des Fehlerbereichs (grau) aufweisen.

Die Häufigkeitsverteilung in Abbildung 9.9 weist einen Mittelwert von  $0,190$  mm mit einer Standardabweichung von  $6,905$  mm auf. Dadurch ergibt sich ein Distanzbereich von  $\pm 13,810$  mm zum Laserscan, innerhalb dessen 95% (zweifache Standardabweichung) der Objektpunkte aus der Photogrammetrie liegen.

### Analyse der Bereiche hoher Punktedichte und abrupter Wertesprünge

Die Bereiche mit hoher Punktedichte und akuten Wertesprüngen von  $1,0$  cm (gelb) auf  $-1,0$  cm (grün) sind durch die Anwendung des C2C-Algorithmus in z-Richtung sowie des C2M-Algorithmus besonders im dritten und vierten Quadranten des Objektkoordinatensystems (rechte Bildhälfte) gut sichtbar. Diese Bereiche sind dreimal ringförmig angeordnet, wobei besonders auffällige Teilbereiche in Abbildung 9.10 schwarz umrandet dargestellt sind. Zudem ist in Abbildung 9.10 eine Schnittlinie (A-A) dargestellt, die die gezielte Analyse und Bewertung der Überlappungsbereiche der Aufnahmespuren ermöglicht.

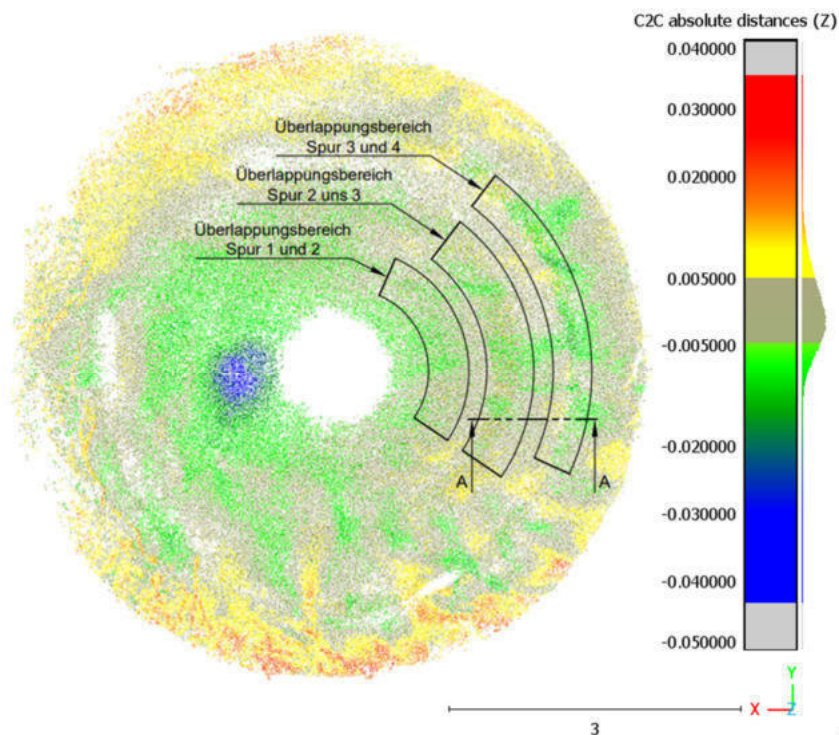


Abbildung 9.10: Distanzermittlung C2C-Algorithmus in z-Richtung; Referenzpunktwolke: Laserscan; auffällige Teilbereiche (schwarz); Schnitt A-A: in Abbildung 9.11; Werte in m; modifiziert nach CloudCompare

Um die auffälligen Teilbereiche genauer zu untersuchen, wurde der in Abbildung 9.10 gekennzeichnete Ausschnitt in Abbildung 9.11 dargestellt, wobei diese Ansicht die xz-Ebene vergrößert zeigt. Diese Darstellung ermöglicht eine detaillierte Untersuchung und Bewertung der räumlichen Verteilung der Punkte in den genannten Bereichen, wodurch die Überlappungsbereiche besser analysiert werden können.

Insbesondere zeigt Abbildung 9.11 eine detaillierte Darstellung der Aufnahmespur 3 und der damit verbundenen Überlappungsbereiche zwischen Spur 2 und 3 sowie Spur 3 und 4. Zusätzlich wurde der Laserscan (braun) eingeblendet, um die relative Lage der photogrammetrisch verarbeiteten Objektpunkte (nach Farbskala) in der z-Richtung zu visualisieren.

Um die Erkennbarkeit zu vereinfachen, wurden der Laserscan und die photogrammetrische Rekonstruktion in Abbildung 9.11 mit farblich angepassten Linien dargestellt. Diese visuelle Hervorhebung hilft der besseren Unterscheidung und Identifikation der jeweiligen Punktwolken, wodurch die Analyse der räumlichen Beziehung zwischen den Punktwolken erleichtert wird.

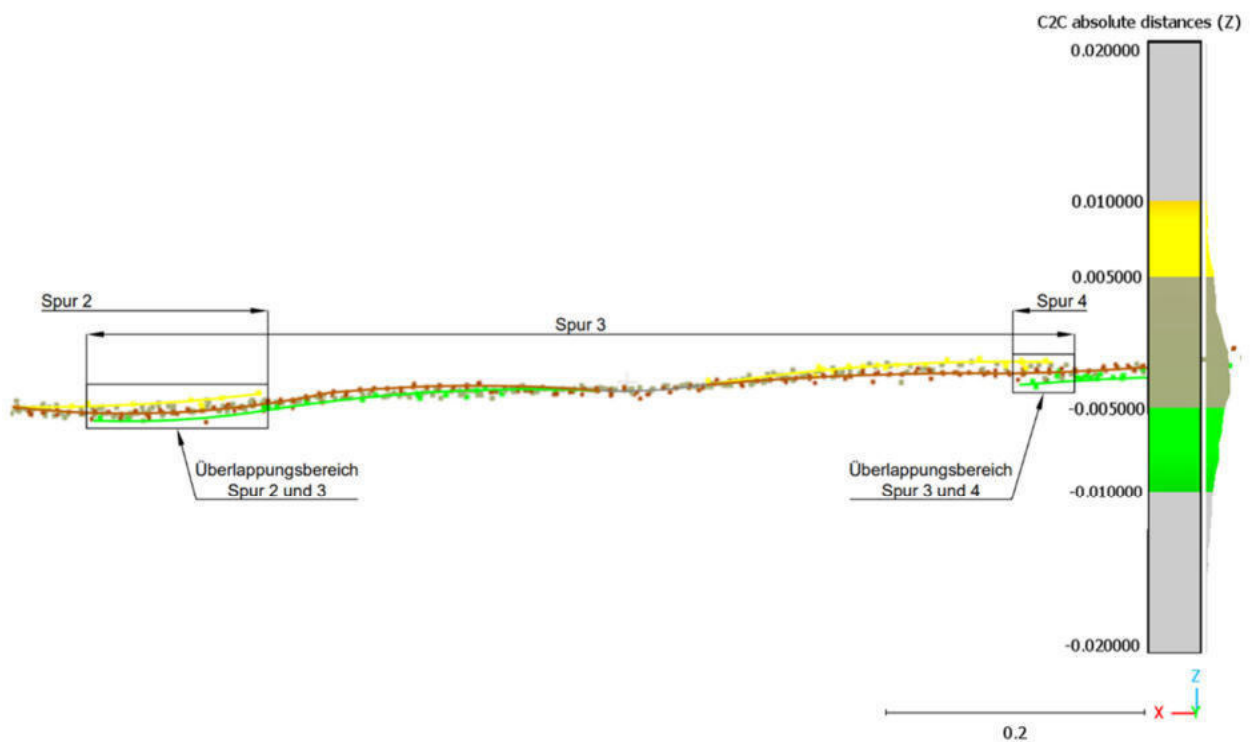


Abbildung 9.11: Schnitt A-A aus Abbildung 9.10; Distanzermittlung C2C-Algorithmus in z-Richtung; Referenzpunktewolke: Laserscan; Distanzwerte photogrammetrisch prozessierte Objektpunkte (Farbskala); Laserscan (braun); Werte in m; modifiziert nach CloudCompare

In der Abbildung 9.11 ist wiederum der Trend der Distanzwerte der photogrammetrischen Objektpunkte (Farbskala) innerhalb der Aufnahmespur 3 erkennbar. Dieser verläuft von grün dargestellten negativen Distanzwerten in z-Richtung (maximal -1,0 cm), über Werte im ausgegrauten Fehlerbereich ( $\pm 5,02$  mm), bis hin zu gelb visualisierten positiven Distanzwerten (maximal 1,0 cm).

Die Bereiche zeigen eine hohe Punktedichte, da wie in Abbildung 9.11 zu erkennen ist, hier die Punkte von zwei photogrammetrisch prozessierten Aufnahmespuren übereinander liegen und keine nahtlos verknüpfte Punktwolke bilden. Die gelblich dargestellten Objektpunkte im Überlappungsbereich der Spuren 2 und 3

sind jene von der Aufnahmespur 2 und liegen relativ zum braun dargestellten Laserscan in positiver z-Richtung. Hingegen gehören die grünlich dargestellten Objektpunkte im Überlappungsbereich 2 und 3 zu der Aufnahmespur 3 und sind relativ zum Laserscan in negativer z-Richtung positioniert.

Identes Verhalten zeigen die Punkte im Überlappungsbereich der Spuren 3 und 4. Hier sind die gelb dargestellten Objektpunkte Teil der Aufnahmespur 3 und jene in grün gehören zu der Aufnahmespur 4. Bei Ansicht der xy-Ebene in positiver z-Richtung ergeben sich die auffälligen akuten Wertesprünge von 1,0 cm (gelb) auf -1,0 cm (grün) der benachbarten Bereiche.

Bei sorgfältiger Analyse sind die soeben identifizierten Überlappungsbereiche der Aufnahmespuren im dritten und vierten Quadranten des Objektkoordinatensystems (rechte Bildhälfte) auch im ersten und zweiten Quadranten (linke Bildhälfte) festzustellen.

### **Analyse des Bereichs negativer Maximalwerte**

Durch eine gründliche Analyse des auffälligen Bereichs im zweiten Quadranten des Objektkoordinatensystems (linke untere Bildhälfte) mit negativen Maximalwerten wurde festgestellt, dass in diesem Bereich ein ausgedünnter Bildverband vorlag, der zur Rekonstruktion der Objektpunkte herangezogen wurde.

Wie im Punkt 8.3.3. der Methodik der Simultankalibrierung beschrieben, wurde die Qualität der Aufnahmen überprüft, bevor diese verknüpft wurden. Dabei wurde festgestellt, dass 11 Aufnahmen in Spur 1 eine mangelhafte Bildqualität aufwiesen. Diese Aufnahmen wurden aus dem Datensatz entfernt und hatten keinen Einfluss auf die Rekonstruktion der Ortsbrust. Die sorgfältige Analyse zeigte, dass diese Aufnahmen den betroffenen Bereich mit negativen Maximalwerten abdeckten. Da sie ausgeschlossen wurden, resultierte in diesem Bereich eine verringerte Bilddichte.

## 10. Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse diskutiert und der Bezug zur Forschungsfrage der Identifikation potenzieller Herausforderungen bei der Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren hergestellt. Die Diskussion unterteilt sich, wie auch die Methodik, in die drei Abschnitte der Planung der photogrammetrischen Aufnahme, der Bildaufnahme und der photogrammetrischen Prozessierung der 3D-Punktwolke und der Bewertung der Genauigkeit und Qualität der rekonstruierten Ortsbrust.

### 10.1. Planung der photogrammetrischen Aufnahme

Zusammenfassend unterstreicht diese Diskussion die Notwendigkeit einer sorgfältigen Planung der photogrammetrischen Aufnahme, um einen qualitativ hochwertigen Bildverband zu gewährleisten, der eine für den Bildverarbeitungsprozess ausreichende Bildüberlappung aufweist. Die Planungsschritte sollten die sorgfältige Auswahl der Montagedisken und die Abschätzung der optischen projektspezifischen Aufnahmeparameter umfassen. Zudem ist eine Analyse der Auswirkungen der getroffenen Entscheidungen unerlässlich. Dieser Ansatz bildet die Grundlage für eine erfolgreiche Bildverknüpfung der Aufnahmespuren.

#### 10.1.1. Auswahl der Montagedisken

Die ausgewählten Montagedisken beeinflussen das Ausmaß der Überlappungsbereiche in Kombination mit dem Objektiv und dem Aufnahmeabstand. Lediglich die Überlappung der Aufnahmespuren 1 und 2 erfüllt die vorgegebenen Anforderungen von 60% nach Agisoft-Metashape, jedoch nur knapp mit 61%. Die Überlappungen zwischen den Spuren 2 und 3 liegt bei 45% und jene zwischen den Spuren 3 und 4 bei 37%. Diese zeigen somit erhebliche Abweichungen von dem geforderten Wert.

Die zu geringe Überlappung der Aufnahmespuren ist auf eine suboptimale Verteilung der Einfachdisken am Bohrkopf oder einer unzureichenden Auswahl der Kameraanzahl zurückzuführen. Beide Annahmen führen zu dem Ergebnis, dass die Überlappung der Aufnahmespuren nicht ausreicht, um den Bildverband vollständig zu verknüpfen. Es kann mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass dieser Umstand zu einem Problem bei der Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren führt und eine nicht zusammenhängende Punktwolke entsteht.

#### 10.1.2. Optische Aufnahmeparameter

Die Anforderung an die Bildüberlappung in Bewegungsrichtung von 80% nach Agisoft-Metashape wird in jeder Spur übertroffen. Eine folgend richtige Entscheidung bestand darin, die Bildrate auf 1 1/s zu erhöhen, sodass sich auf Spur 4 eine Bildüberlappung von 89% ergibt. Der Ansatz verfolgte eine Umgehung des anfänglich angenommenen Schattenproblems, das durch die Bewegung der externen Lichtquelle erzeugt wird. Die endgültige positive Auswirkung dieser Entscheidung wurde durch die Analyse des Bildzuordnungsprozesses verdeutlicht, die zeigte, dass die Aufnahmen innerhalb der Spuren hervorragend verknüpft wurden. Daher kann ausgeschlossen werden, dass zumindest in der vorliegenden Arbeit variierende Schatten als Herausforderung bei der Bildverknüpfung fungierten.

Bei Betrachtung der aus der Belichtungszeit von 5 ms resultierenden Bewegungsunschärfe von 0,7 Pixel ist zu beachten, dass es sich lediglich um eine Abschätzung bei Annahme eines mittleren Aufnahmeabstandes handelt, der zu einer mittleren Bildmaßstabszahl führte. In der Realität variiert dieser Abstand und demzufolge auch die Bildmaßstabszahl für jeden Objektpunkt. Demnach ist in der Realität auch eine Variation der Bewegungsunschärfe anzunehmen. Aus diesem Grund wurde folgerichtig entschieden, die Belichtungszeit so festzulegen, dass eine Bewegungsunschärfe von unter 1 Pixel entsteht.

Diese Annahme konnte durch die mittels Agisoft-Metashape durchgeführte Überprüfung der Bildqualität vor der Bildverknüpfung bestätigt werden. Diese basierte auf der Bildschärfe, wobei lediglich 11 Aufnahmen in der Spur 1 nicht die von Agisoft-Metashape empfohlene Bildqualität erfüllten. Zudem wurden die Aufnahmen innerhalb der Aufnahmespuren vollständig zu einer hochpräzisen Rekonstruktion verknüpft. Daraus kann geschlossen werden, dass die Belichtungszeit erfolgreich abgeschätzt und festgelegt wurde.

Die Bildqualität ist jedoch nicht nur von der Bewegungsunschärfe abhängig, sondern erfordert zudem eine sorgfältige Abstimmung der restlichen optischen Aufnahmeparameter. In diesem Kontext erwies sich die Kombination des ISO-Werts von 150, der Blendenöffnung durch die Wahl von  $f/11$  und des unendlichen Fokus als effektiv, da in Kombination mit der Belichtungszeit ein zweifelslos hochqualitativer Bildverband erreicht wurde.

Im Kontext der abgeschätzten Schärfentiefe von 27,1 bis 325,4 cm in Bezug zur Kamera, ist zu beachten, dass es sich lediglich um eine Schätzung handelt und die tatsächliche Schärfentiefe in der Praxis durchaus etwas variieren kann. Es wurde jedoch angenommen, dass diese in einem tolerierbaren Bereich variiert, das durch das Höhenmodell von Agisoft-Metashape bestätigt werden konnte. Dieses zeigt, dass die Objektpunkte in einem Bereich von 28,3 bis 64,1 cm innerhalb der abgeschätzten Schärfentiefe liegen. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich aus der Kombination der festgelegten optischen Aufnahmeparameter eine für die vorliegende Arbeit optimale Schärfentiefe ergibt, die sich nicht negativ auf die Bildqualität und auf die Verknüpfung der Aufnahmespuren auswirkt.



## 10.2. Bildaufnahme und Rekonstruktion der 3D-Punktwolke

Dieser Abschnitt der Diskussion umfasst die Herausforderungen und Entscheidungen im Zusammenhang mit der Kamerakalibrierung und der Bildverknüpfung. Es wird zudem auf die Bedeutung einer angemessenen Überlappung der Aufnahmen hingewiesen, um eine erfolgreiche Bildverknüpfung zu gewährleisten.

### 10.2.1. Genauigkeitsanalyse der Selbstkalibrierung

Die Analyse der inneren Orientierungsparameter, die durch Selbstkalibrierung ermittelt wurden, ergab, dass die Empfehlungen der Genauigkeitsstandards nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115] nicht erfüllt wurden. Im Kontext der Standardabweichungen ist lediglich die Kamerakonstante (in Agisoft-Metashape Brennweite  $F$ ) betroffen. Obwohl die ermittelte Kamerakonstante von 840,854 Pixel plausibel erscheint, überschreitet die Standardabweichung von 3,9 Pixel die empfohlene Grenze von 1 Pixel.

Die hohe Standardabweichung kann mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Schwierigkeiten bei dessen Bestimmung begründet werden. Diese ergeben sich durch eine unzureichende Aufnahmekonfiguration für die Kamerakalibrierung, insbesondere auf das Fehlen einer Rundumaufnahme und fehlende Maßstabsinformationen in Aufnahme­richtung, da in solchen Fällen die Kamerakonstante häufig nicht eindeutig bestimmt werden kann [Luhmann 2010b, S. 340]. Da dies bei der vorliegenden Ortsbrustaufnahme zutrifft, ist von einer suboptimalen Aufnahmekonfiguration für die Durchführung einer Selbstkalibrierung auszugehen.

Die Untersuchung der Korrelationen zwischen den inneren Orientierungsparametern zeigt, dass mehrere mittlere bis hohe Korrelationen vorhanden sind, die nicht minimiert werden können und somit nicht den Empfehlungen nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115] entsprechen. Demzufolge muss angenommen werden, dass diese für eine tatsächliche Kamerakalibrierung in einem externen Berechnungsvorgang nicht geeignet sind, wodurch die Zwei-Schritt-Methode nicht ohne potenziellen Genauigkeitsverlust durchgeführt werden kann und demnach dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde.

### 10.2.2. Prozess der Bildzuordnung durch Simultankalibrierung

Da die Zwei-Schritt-Methode nicht fortgesetzt wurde stützt sich die gesamte Evaluierung der inneren und äußeren Genauigkeit auf die Simultankalibrierung. Diese ermöglichte zwar eine korrekte Bildverknüpfung innerhalb der Aufnahmespuren, jedoch wurden die einzelnen Aufnahmespuren nicht untereinander verknüpft. Demnach kann gefolgert werden, dass die inneren und die äußeren Orientierungsparameter lediglich auf Grundlage der Verknüpfungen innerhalb der Aufnahmespuren ermittelt wurden.

Es ist zu vermuten, dass die mangelhafte Verknüpfung zwischen den Aufnahmespuren auf unzureichende Überlappung jener zurückzuführen ist, da die von Agisoft-Metashape empfohlene Überlappung von 60% nur knapp mit 61% im Überlappungsbereich der Spuren 1 und 2 erfüllt wurde. Angesichts der Tatsache, dass Reflexionen der externen Lichtquelle im Randbereich der Aufnahmen sichtbar waren, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass dieses Ausmaß der Überlappung nicht ausreicht, um die Aufnahmespuren erfolgreich zu verknüpfen.

## 10.1. Evaluierung der Genauigkeit und Qualität der rekonstruierten Ortsbrust

Die innere Genauigkeit der Bündelausgleichung ist entscheidend, um die Präzision von räumlichen Rekonstruktionen zu bewerten. Es ist jedoch ebenso wichtig, die äußere Genauigkeit zu evaluieren, um eine umfassende Beurteilung der räumlichen Genauigkeit vorzunehmen. Diese kombinierte Analyse ermöglicht es, Schlussfolgerungen zur Präzision und Richtigkeit zu ziehen und verdeutlicht in der vorliegenden Arbeit die Folgen einer unvollständigen Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren.

### 10.1.1. Innere Genauigkeit der Simultankalibrierung

Der totale RMS-Wert von 8,86 mm und jener in der Ebene von 6,50 mm erscheinen auf den ersten Blick etwas hoch. Bei genauerer Betrachtung im Kontext der als eher gering zu bewertenden Genauigkeit von  $\pm 1,0$  cm der importierten Kamerapositionen wird die Plausibilität deutlicher. Bei den RMS-Werten der äußeren Orientierungsparameter handelt es sich um eine durchschnittliche Abweichung zwischen den im Rahmen der Bündelausgleichung geschätzten Kamerapositionen und den als Sollwerte in das Programm importierten Positionen. Infolgedessen lässt sich der Umstand hoher RMS-Werte plausibel erklären. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass trotz hoher RMS-Werte der Kamerapositionen keine Beeinträchtigung der inneren Genauigkeit der Bündelausgleichung vorliegt.

Zudem spiegelt der mittlere RMS-Wert der Objektpunkte von 0,675 Pixel eine hochpräzise Punktwolke mit ideal positionierten Objektpunkten wider. Diese Aussage wird durch den maximalen RMS-Wert von 0,892 Pixel bekräftigt, der den Rückschluss zulässt, dass sich keine Ausreißer in der Punktwolke befinden.

### 10.1.2. Äußere Genauigkeit der Simultankalibrierung

Die Genauigkeitsanalyse der durch Simultankalibrierung positionierten Objektpunkte wurde durch die Methodik der Distanzermittlung zur Referenzpunktwolke eines Laserscanners durchgeführt. Zur Umsetzung dienten die Algorithmen C2C, C2M- und M3C2. Ein kombinierter maximaler Fehler von  $\pm 5,02$  mm diente als Schwellenwert, um tatsächliche von scheinbaren Positionsabweichungen zu unterscheiden. Dieser Schwellenwert berücksichtigt sowohl den maximalen Fehler des Laserscans als auch jenen der photogrammetrischen Rekonstruktion. Es ist zu beachten, dass der maximale Fehler der positionierten Objektpunkte auf Grundlage des maximalen RMS-Wertes im Bildraum geschätzt wurde und daher vom tatsächlichen Fehler im Objektraum abweichen kann. Diese mögliche Abweichung wird in der vorliegenden Arbeit akzeptiert, da der kombinierte maximale Fehler von  $\pm 5,02$  mm als geeigneter projektbezogener Schwellenwert betrachtet wird. Er ermöglicht eine praxisrelevante Bewertung von Abweichungen, ohne die Identifizierung potenzieller Folgen einer unvollständigen Verknüpfung von Aufnahmespuren zu beeinträchtigen.

In Bezug auf die durch den C2C-Algorithmus ermittelten Distanzen in x- und y-Richtung zeigte sich, dass lediglich ein zu vernachlässigbarer Anteil der Objektpunkte außerhalb des definierten maximalen Fehlerbereichs lagen. Dies deutet darauf hin, dass die Rekonstruktion der Ortsbrust in der Ebene eine ausreichende Maßstabstreue aufweist, da die rekonstruierten Objektpunkte in akzeptabler Nähe zum Laserscan liegen. Eine mangelnde Maßstabstreue würde signifikante Abweichungen im Vergleich zum Laserscan zur Folge haben.

In Bezug auf die z-Richtung des C2C-Algorithmus sowie des C2M- und M3C2-Algorithmus war zu erkennen, dass sich die maximalen Negativwerte auf einen Bereich im zweiten Quadranten des Objektkoordinatensystems konzentrieren. Die Analyse des Bildverbandes zeigte, dass Aufnahmen, die von Agisoft-Metashape aufgrund einer Unterschreitung der empfohlenen Bildschärfe deaktiviert wurden, diesen speziellen Bereich abdeckten. Es wird angenommen, dass nicht genügend Aufnahmen verfügbar waren, um die Objektpunkte basierend auf dem ausgedünnten Bildverband richtig zu positionieren. Da die Aufnahmespuren nicht untereinander verknüpft wurden, kann ausgeschlossen werden, dass der soeben beschriebene Bereich weder zu Herausforderungen bei der Verknüpfung der Aufnahmespuren führt noch eine Folge der unvollständigen Bildverknüpfung ist.

Die positiven Maximalwerte lagen vorrangig im Randbereich der Punktwolke und haben keinen Einfluss auf die Verknüpfung der Aufnahmespuren. Sie stehen vermutlich mit dem systematischen Verlauf der Distanzwerte innerhalb der Aufnahmespuren in Verbindung, der anhand des C2C-Algorithmus in z-Richtung und des C2M-Algorithmus kenntlich gemacht wurde. Eine Schnittdarstellung mit Sicht in Richtung der positiven y-Achse auf die xz-Ebene zeigte, dass die inneren Randbereiche der Aufnahmespuren relativ zum Laserscan in Richtung der negativen z-Achse und die äußeren Randbereiche in Richtung der positiven z-Achse ausgerichtet waren. Diese Erkenntnis ermöglichte die Unterscheidung einzelner Aufnahmespuren und verdeutlichte, dass es sich nicht um eine zusammenhängende Punktwolke handelte. Besonders aufgrund der Tatsache, dass zwischen den Aufnahmespuren keine Bildverknüpfungen vorlagen.

Der M3C2-Algorithmus konnte diese Systematik nicht erkennen, dass durch die Funktion des Algorithmus zu erklären ist, da er einen Zylinder in beide Richtungen erzeugt der auf einer Regressionsfläche beruht. Demnach lagen die ermittelten Distanzen innerhalb des definierten maximalen Fehlerbereichs. Somit war es bei alleiniger Betrachtung der Distanzwerte, die mit dem M3C2-Algorithmus ermittelt wurden, nicht möglich, die beobachtete Systematik und die Unterscheidung der Aufnahmespuren zu erkennen.

Die Analyse der Distanzwerte in z-Richtung, die mittels des C2C-Algorithmus durchgeführt wurde, ergab, dass 95% der Distanzwerte innerhalb einer Spanne von  $\pm 13,450$  mm lagen. Ein ähnlicher Vergleich mit den Ergebnissen des C2M-Algorithmus zeigte, dass 95% der Punkte innerhalb einer Spanne von  $\pm 14,578$  mm lagen. Des Weiteren stimmten diese Ergebnisse weitgehend mit jenen des M3C2-Algorithmus überein, der zeigte, dass 95% der Distanzwerte innerhalb von  $\pm 13,810$  mm lagen.

Der Vergleich zwischen den verschiedenen Algorithmen verdeutlicht, dass die Genauigkeit der Distanzmessungen in z-Richtung in den vorliegenden Daten sehr ähnlich ist. Die Tatsache, dass die Ergebnisse der verschiedenen Algorithmen in einem vergleichbaren Bereich liegen, weist auf eine konsistente und zuverlässige Genauigkeit der Messungen hin. Dies ist eine bedeutsame Erkenntnis, die die Verlässlichkeit der angewendeten Methoden und Algorithmen für die Distanzmessung in dieser Arbeit unterstreicht.

Abschließend führt die Diskussion der Ergebnisse zur Tatsache, dass die vorliegende Rekonstruktion eine mangelhafte äußere Genauigkeit aufweist, obwohl diese eine ausgezeichnete Präzision durch Evaluierung der inneren Genauigkeit zeigt. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der kombinierten Betrachtung der inneren und äußeren Genauigkeit sowie die kritische Bewertung der Ergebnisse.

## 11. Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch sorgfältig abgestimmte optische Aufnahmeparameter wurde, bis auf wenige Ausnahmen, eine erstklassige Bildqualität erzielt, die keinen nachteiligen Einfluss auf die Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren hatten. Jedoch konnte die empfohlene seitliche Bildüberlappung aufgrund der vorher festgelegten Kameramontagepositionen nicht erreicht werden, wodurch es zu erheblichen Problemen bei der Bildverknüpfung der Aufnahmen kam, die nicht derselben Spur angehörten. Obwohl die Spuren in sich vollständig verknüpft wurden, konnten aufgrund der unzureichenden seitlichen Bildüberlappung keine gültigen Verknüpfungspunkte zwischen den Spuren identifiziert werden.

Daraus lässt sich schließen, dass sowohl die inneren als auch die äußeren Orientierungsparameter nicht auf Basis eines vollständig verknüpften Bildverbandes bestimmt wurden. Die Orientierungsparameter wurden zwar innerhalb des Bildverbandes ausgeglichen, jedoch basiert der Ausgleich, durch eine fehlende Verknüpfung zwischen den Spuren, lediglich auf den Bildverknüpfungen innerhalb der Aufnahmespuren.

Dennoch ist die erzielte innere Genauigkeit des photogrammetrischen Bildverbandes hoch und spiegelt die beeindruckende Präzision der Bündelausgleichung wider. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass sich diese Präzision ausschließlich auf die Genauigkeit der Bündelausgleichung bezieht und nicht auf die für die Praxis relevante äußere Genauigkeit der photogrammetrisch prozessierten Rekonstruktion.

Die Ergebnisse der Evaluierung der äußeren Genauigkeit der photogrammetrischen Punktwolke konnten durch die Anwendung verschiedener Algorithmen bekräftigt werden. Es wurde gezeigt, dass die angewandten Algorithmen mit Vorsicht zu interpretieren sind, und die spezifischen Verfahrensweisen der jeweiligen Algorithmen in Betracht gezogen werden sollten. Hier ist der M3C2-Algorithmus zu erwähnen, der sowohl in positiver als auch in negativer Richtung einen Zylinder auf Basis einer Regressionsfläche zur Distanzermittlung aufspannt, wodurch zwar das Rauschen berücksichtigt wird, allerdings der in z-Richtung orientierte Versatz der Aufnahmespuren in den Überlappungsbereichen nicht zu erkennen ist.

Im Gegensatz dazu erfasst der C2C-Algorithmus jegliche Distanz in z-Richtung, da er den Abstand eines einzelnen Punktes zum nächstgelegenen Punkt ermittelt. Dadurch werden einige Punkte in Richtung positiver und einige in Richtung negativer z-Richtung erfasst. Der C2M-Algorithmus ähnelt in dieser Hinsicht dem C2C-Algorithmus. Darüber hinaus bestätigte der C2C-Algorithmus die Maßstabstreue in x- und y-Richtung, da die gemessenen Distanzen relativ zum Laserscan in einem akzeptablen Bereich lagen. Eine Nicht-Einhaltung der Maßstabstreue wäre an den Distanzwerte der xy-Ebene deutlich erkennbar.

Bei der Betrachtung der Distanzwerte des C2C-Algorithmus einzelner Aufnahmespuren in Richtung der positiven y-Achse (xz-Ebene) und deren Kombination mit dem Laserscan fällt auf, dass die Randbereiche der Aufnahmespuren im Vergleich zum Laserscan abweichen. Genauer weicht der innere Randbereich in Richtung negativer z-Richtung und der äußere Randbereich in Richtung positiver z-Richtung ab. Dieses Muster ist für alle vier Aufnahmespuren identisch. Demnach handelt es sich zwar um eine Punktwolke mit hoher innerer Genauigkeit, jedoch mit geringer äußerer Genauigkeit.

## 12. Schlussfolgerung

Die Erkenntnis, dass die inneren und äußeren Orientierungsparameter lediglich auf den Verknüpfungen innerhalb der Aufnahmespuren ermittelt wurden, lässt die Schlussfolgerung zu, dass diese nicht optimal bestimmt wurden. Da die Maßstabstreue durch den C2C-Algorithmus in x- und y-Richtung bestätigt wurde, kann gefolgert werden, dass der translatorische Anteil der äußeren Kameraorientierung während der Bündelausgleichung erfolgreich ausgeglichen wurde, da dieser als Maßstabsinformation diente. Jedoch lässt sich folgern, dass der rotatorische Anteil der äußeren Orientierung zwar präzise bestimmt wurde, jedoch aufgrund einer unzureichenden Überlappung der Aufnahmespuren nicht auf Basis eines vollständig verknüpften Bildverbandes beruht. Dies führt wiederum zu Fehlern bei der Bündelausgleichung und somit zu einem Bildverband mit hoher innerer Genauigkeit, aber mit geringer äußerer Genauigkeit.

Diese Schlussfolgerung wird durch die Betrachtung der äußeren Genauigkeit der photogrammetrischen Punktwolke im Vergleich zum Laserscan bekräftigt, die darauf hindeutet, dass eine Optimierung der Kameraneigung (Tilt) erforderlich wäre, um die Ausrichtung relativ zum Laserscan zu optimieren. Dies würde bewirken, dass sich der innere Randbereich jeder Aufnahmespur in Richtung der positiven z-Achse des Objektkoordinatensystems bewegt, während der äußere Randbereich in Richtung der negativen z-Achse wandert. Eine fehlerhafte Kameraneigung resultiert aus einer nicht orthogonalen Ausrichtung der Kamera zur Ortsbrust, die in der vorliegenden Arbeit als Ebene angenommen wurde.

Wenn ausreichende Bildüberlappung vorhanden wäre, könnte die Kameraausrichtung so angepasst werden, dass die Rekonstruktion eine zusammenhängende Punktwolke bildet und die Aufnahmespuren mit höherer äußerer Genauigkeit relativ zum Laserscan ausgerichtet wären. Dadurch würden die Aufnahmespuren optimal im Raum ausgerichtet sein und könnten zu einer Rekonstruktion der Ortsbrust mit hoher innerer und äußerer Orientierung führen. Dies würde schließlich eine optimale Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren mit Hilfe von bildverarbeitender Software ermöglichen. Ist eine ausreichende seitliche Bildüberlappung nicht umsetzbar, ist der Ansatz zu verfolgen, die Kameraausrichtung während der praktischen Anwendung zu optimieren.

### 13. Fazit

Die vorliegende Arbeit verdeutlicht die essenzielle Rolle einer sorgfältigen Planung der Durchführung der photogrammetrischen Aufnahmen. Dies ist die Voraussetzung, um die Bildqualität zu maximieren und die Anforderungen für eine erfolgreiche Bildverknüpfung innerhalb und zwischen den Aufnahmespuren zu erfüllen. Die Präzision und Richtigkeit der erzielten Rekonstruktion der Ortsbrust hängen unmittelbar von der Qualität der Planung ab und sind entscheidend für die Erreichung genauer Ergebnisse.

In Hinblick auf die äußere Genauigkeit kann abschließend festgehalten werden, dass die Rekonstruktion der Ortsbrust maßstabstreu in der xy-Ebene vorliegt, was auf eine erfolgreiche Optimierung des translatorischen Anteils der äußeren Kameraorientierung während des Bündelausgleichs hinweist. Allerdings zeigt sich eine Herausforderung im rotatorischen Anteil der äußeren Kameraorientierung aufgrund unzureichender Überlappung der Aufnahmespuren. Dies kann auch durch den nachgeschalteten Schritt der Koregistrierung der Aufnahmespuren nicht korrigiert werden.

Zudem zeigt sich die Notwendigkeit der stets kritischen Betrachtung der inneren Genauigkeit einer räumlichen Rekonstruktion, wenn diese als alleinstehender Indikator zur Beurteilung der Genauigkeit und der zugehörigen Bildverknüpfung herangezogen wird. Hingegen ermöglicht sie in Kombination mit der äußeren Genauigkeit eine umfassende Bewertung der Präzision und Richtigkeit der räumlichen Rekonstruktion, wodurch die Folgen einer unvollständigen Verknüpfung einzelner Aufnahmespuren deutlich werden.

Diese Erkenntnisse sind von entscheidender Bedeutung, um die Effektivität des Kamerasystems der Montanuniversität und Geodata MT GmbH kontinuierlich zu verbessern. Zukünftig wird das Kamerasystem durch eine digitale vollflächige Rekonstruktion der Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb die geologische Beurteilung objektiver gestalten und eine erhöhte Transparenz der Ortsbrustkartierung für Auftraggeber und -nehmer schaffen.

## Literatur

- [Agisoft LLC 2022] Agisoft LLC: *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.8.*, 2022.
- [Allied Vision V1.0.1, 2022] Allied Vision: Ultra-compact GigE Vision cameras, Mako G-234, V1.0.1, 2022.
- [FARO Technologies Inc. 2023] FARO Technologies Inc.: Faro Focus Premium 70. USA, 2023.
- [Gaich, A., et al. 2019] Gaich, A., Pötsch, M., & Schubert, W.: 3D imaging on a hard rock TBM. *ISRM Congress 2019 Proceedings, Symposium on Rock Mechanics*, 2019.
- [Galler, R., et al. 2015] Galler, R., Wenighofer, R., & Entacher, M.: System for determining a working-face image: Österreichisches Patentamt (AT 14252 U1 2015-07-15), 2015.
- [Google Earth Pro] Google Earth Pro: *Version 7.3.6.9345, Ortsbrust Göschenen*. Google Earth Pro, 2023.
- [Henzinger, M. 2013] Henzinger, M.: Geotechnische Dokumentation der Ortsbrust eines TBM-Vortriebes mittels moderner messtechnischer Methoden. Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, 2013.
- [Kowa 2014] Kowa: Product Information LM5JCM | 2/3" 5mm 2MP C-Mount Lens, 2014.
- [Kraus, K. 1996] Kraus, K.: *Photogrammetrie: Grundlagen und Standardverfahren (Band 2)*. Bonn: Dümmler, 1996.
- [Lague, D., et al. 2013] Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J.: Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* (82), 2013.
- [Luhmann, T. 2010a] Luhmann, T.: Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. München. *Deutsche Geodätische Kommission* (Reihe C, 645). [https://dgk.badw.de/fileadmin/user\\_upload/Files/DGK/docs/c-645.pdf](https://dgk.badw.de/fileadmin/user_upload/Files/DGK/docs/c-645.pdf), 2010a.
- [Luhmann, T. 2010b] Luhmann, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie : Grundlagen, Methoden und Anwendungen* (3. Aufl.). Berlin und Offenbach: Wichmann, 2010b.
- [ÖGG 2014] ÖGG: Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2014.
- [ÖGG 2022] ÖGG: Empfehlung für die baugeologische Dokumentation bei der Ausführung von Untertagebauwerken. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2022.
- [Riat, M. 2006] Riat, M.: *Graphische Techniken - Eine Einführung in die verschiedenen Techniken und ihre Geschichte* (3. Aufl.). Burriana, 2006.
- [Six, G. 2017] Six, G.: Logistische Herausforderungen bei dem Einsatz eines kamerabasierten Aufnahmesystems. Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, 2017.
- [Wagner, W., et al. 2003] Wagner, W., Ullrich, A., & Briese, C.: Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. *VGI: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* (91), 223–235, 2003.

- [Wenighofer, R., et al. 2017a] Wenighofer, R., Six, G., Galler, R., & Chmelina, K.: Cameras for digitized 3D geological documentation of the tunnel face from cutterheads of TBMs: Ortsbrustkameras zur digitalen geologischen 3D-Dokumentation aus dem Bohrkopf von TBM - Stand der Entwicklungsarbeiten. *Geomechanik und Tunnelbau* (10.6), 706–766, 2017.
- [Wenighofer, R., et al. 2017b] Wenighofer, R., Galler, R., Chmelina, K., & Six, G.: Using Cameras in TBM Cutterheads for Geological Documentation of the Tunnel Face. *Proceedings of the World Tunnel Congress 2017, Surface challenges - Underground solutions*, 1507–1512, 2017.
- [Wenighofer, R., et al. 2020] Wenighofer, R., Galler, R., Karel, W., & Pfeifer, N.: Efficient Digital Imaging for Full Face Rock Mass Evaluation in Hard Rock TBM Tunnelling. *ISRM Congress 2019 Proceedings, Symposium on Rock Mechanics - EUROCK 2020*, 1–7, 2020.
- [Yamamoto, T., et al. 1999] Yamamoto, T., Miura, S., & Hirose, M.: Photographic processing system for TBM cutting image: Patentschrift (JPH1136785), 1999.