Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

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

Diplomarbeit

Untersuchung der Genauigkeit eines Bündelblockausgleichs im Wald

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer
Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien

von

Annika Kristina Lehner, BSc

Matr.Nr.: 0926595

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Norbert Pfeifer**

Betreuer:

Dipl.-Ing. Mag.rer.nat. Dr.techn. **Andreas Roncat**

Department für Geodäsie und Geoinformation
Technische Universität Wien
Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien

Wien, im Oktober 2018 _____

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich von Herzen bei meinen Eltern, **Regina** und **Wolfgang Lehner**, bedanken, ohne die in meinem Leben das Wenigste möglich gewesen wäre. Sie gaben mir immer Ihre volle Unterstützung in allen persönlichen und akademischen Belangen und sorgten so dafür, dass ich mein Leben nach meinen Vorstellungen gestalten kann.

Ein weiterer großer Dank gilt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Mag.rer.nat. Dr.techn. **Andreas Roncat**, der mir trotz seiner Verpflichtungen als Lehrer bis zur Fertigstellung meiner Arbeit mit Fachwissen und aufbauenden Worten zur Seite stand.

Auch Projektass. Dipl.-Ing. **Wilfried Karel** gebührt mein Dank. Viele Stunden seiner Arbeitszeit flossen in die Orientierung meiner Bilder.

Abstract

The idea behind this master thesis is to reconstruct the photographer's trajectory by orienting the pictures they take while walking through a forest. The starting point of the trajectory is considered to be known. The end point is approximately 50 meters apart from the starting point. A number of control points have to be defined in order to enable for evaluation of the resulting orientation. It is achieved by signalling and surveying artificial and natural control points.

A total station is used to survey the control points and determine their spatial coordinates in the Austrian official coordinate frame. The natural targets are defined by distinctive features of trunks and branches.

The pictures are taken in a row-wise manner using a digital single-lens reflex camera. Each row contains five pictures overlapping to 50 percent and covering a horizontal field-of-view of approximately 180°, 90° on each side of the trajectory. In total 145 pictures in 29 rows are taken.

The first and second row of pictures contain artificial and natural control points which are used to determine the initial parameters of orientation. There are also natural check points measured by total station and visible in the images of the final row. These check points are used for quality evaluation only and do not take part in the bundle block adjustment.

Approximate orientation of the pictures is done in Agisoft Photoscan. To optimise the parameters of orientation a bundle block adustment is done by using the program package OrientAL, developed at TU Wien. For visualisation of the resulting quality parameters MATLAB and GNU Octave are used.

This thesis shows that the solution of a bundle block adjustment is possible under the given prerequisites. However, a number of possible adaptations and improvements in order to enhance the quality of orientation and scene reconstruction is elaborated.

Kurzfassung

Aufgabe dieser Diplomarbeit ist es mit Hilfe einer Reihe von Fotos den Pfad des Fotografen zu rekonstruieren, den er durch ein Waldstück genommen hat. Der Pfad hat eine Länge von etwa 50 Metern. Es wird davon ausgegangen, dass der Anfangspunkt koordinativ bekannt ist. Die Aufnahme der Bilder soll ohne Stativ erfolgen. Zur Überprüfung des Ergebnisses soll ein Referenznetz mit Kontrollpunkten geschaffen werden, um die Qualität des rekonstruierten Pfades beurteilen zu können. Dies erfolgt über die Definition und Einmessung von künstlichen und natürlichen Passpunkten im österreichischen Landesvermessungssystem.

Als Messgerät wird eine Totalstation verwendet. Die natürlichen Passpunkte werden bei Einmessung im Feld durch Auswahl markanter natürlicher Merkmale festgelegt, die sich in Bild und Natur eindeutig identifizieren lassen.

Die Aufnahme der Bilddaten erfolgt reihenweise mit einer digitalen Spiegelreflexkamera. Pro Standpunkt des Fotografen werden fünf Bilder aufgenommen, die sich zu etwa 50 Prozent überlappen und ein Blickfeld von 180° abdecken (90° links und rechts von der Wegachse). Ein Bildverband besteht aus 145 Bildern in 29 Bildreihen.

In den ersten beiden Bildreihen finden sich künstliche und natürliche Passpunkte. Sie werden zur Bestimmung der Orientierungsparameter des Ausgangsblocks benötigt. Auch in der letzten Bildreihe werden natürliche Punkte eingemessen. Dabei handelt es sich ausschließlich um Kontrollpunkte, die nur zur Überprüfung des Orientierungsergebnisses dienen und nicht in den Bündelblockausgleich mit einfließen.

Die Vororientierung des Bildverbandes wird mit Agisoft PhotoScan vorgenommen, die Bündelblockausgleichung zur Optimierung der Orientierungsparameter mit dem Softwarepaket OrientAL, das an der TU Wien entwickelt wird. Zur Visualisierung der Ergebnisse werden MATLAB von MathWorks und GNU Octave verwendet.

Es wird in dieser Arbeit gezeigt, dass das Lösen einer Bündelblockausgleichung unter den gegebenen Voraussetzungen möglich ist. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt jedoch auch, dass eine Reihe von Verbesserungen und Erweiterungen des Aufnahme- und Auswerteprozesses denkbar wären, um die Genauigkeit der Bündelblockausgleichung weiter zu steigern.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung **3**

Abstract **5**

Kurzfassung **7**

1 Einleitung **11**
1.1 Motivation . . . 11
1.2 Einteilung . . . 12

2 Theoretische Grundlagen **13**
2.1 Digitales Messbild . . . 13
2.2 Verzeichnung . . . 14
2.3 Innere Orientierung . . . 15
2.4 Äußere Orientierung . . . 16
2.5 Kollinearitätsgleichungen . . . 17
2.6 Orientierungsverfahren . . . 18
2.6.1 Räumlicher Vorwärtsschnitt . . . 18
2.6.2 Räumlicher Rückwärtsschnitt . . . 19
2.7 Ausgleichsrechnung . . . 21
2.7.1 Qualitätsmaße . . . 21
2.7.2 Ausgleichsverfahren . . . 22
2.8 Erkennung von Ausreißern . . . 24
2.9 Methoden zur automatischen Bestimmung von Verknüpfungspunkten . . . 25

3 Der Bündelblock **27**
3.1 Aerotriangulation . . . 27
3.2 Nahbereichsphotogrammetrie . . . 28
3.3 Grundprinzip . . . 29
3.4 Verbesserung- und Normalgleichungen . . . 30
3.5 Zusätzliche Parameter . . . 31
3.6 Aufnahme- und Auswerteprozess . . . 31
3.7 Genauigkeitsanalyse . . . 32
3.7.1 Innere Genauigkeit . . . 32
3.7.2 Äußere Genauigkeit . . . 34

4 Akquirierung der Bilddaten **37**
4.1 Auswahl des Messgebiets . . . 37
4.2 Verwendete Geräte . . . 38
4.3 Bildmaterial . . . 38
4.4 Passpunkte . . . 40
4.5 Verfügbare Software . . . 40
4.5.1 OrientAL . . . 41

4.5.2 MonoScope . . . 41
4.5.3 Graphos . . . 41
4.5.4 VisualSFM . . . 41
4.5.5 Agisoft PhotoScan . . . 41
4.5.6 Matlab . . . 42
4.5.7 GNU Octave . . . 42

5 Auswertung **43**
5.1 Aufgabenstellung . . . 43
5.2 Realisierung . . . 43
5.3 Vorarbeiten . . . 44
5.4 Orientierung . . . 44
5.4.1 Manuelle Bestimmung der Passpunkte in MonoScope . . . 44
5.4.2 Einfluss der automatischen Verknüpfer auf die Bestimmung der Orientierungsparameter . . . 44
5.4.3 Orientierung des gesamten Bildverbandes . . . 57

6 Zusammenfassung und Ausblick **71**

Abbildungsverzeichnis **75**

Tabellenverzeichnis **77**

Anhang **79**

A Gerätespezifikationen **79**
A.1 Nikon D5000 . . . 80
A.2 Leica TCRP1201+ . . . 81

B Daten **84**
B.1 Passpunkte . . . 84
B.2 Konvexe Hülle . . . 86
B.3 Koordinaten der Projektionszentren . . . 90

Literaturverzeichnis **93**

Kapitel 1

Einleitung

Dieses Kapitel beleuchtet zum einen die Motivation dieser Arbeit und der Instrumente, die zur Realisierung gewählt wurden (Kapitel 1.1). Zum anderen gibt es einen Überblick über den Inhalt und die Gliederung der weiteren Kapitel (Kapitel 1.2).

1.1 Motivation

Zur dreidimensionalen Rekonstruktion von Objekten stellen sowohl Photogrammetrie als aus Laserscanning die nötigen Werkzeuge zur Verfügung. Wie der Name Photogrammetrie schon sagt, beinhaltet sie Messmethoden und Auswerteverfahren, die aus Fotografien eines Objektes Informationen zu seiner räumlichen Lage oder dreidimensionalen Form gewinnen. Laserscanning hingegen bezeichnet das zeilen- oder rasterartige Abtasten von Oberflächen oder Körpern, um diese zu vermessen. Der Vorteil, Kameras statt eines terrestrischen Laserscanners zu verwenden, liegt in den geringeren Kosten und der größeren Flexibilität.

Aus der Photogrammetrie stammt das Verfahren der Bündelblockausgleichung. Es ermöglicht die simultane rechnerische Einpassung beliebig vieler im Raum angeordneter Bilder (Strahlenbündel) unter Berücksichtigung photogrammetrisch gemessener Bildpunkte und geodätischer Beobachtungen sowie eines übergeordneten Koordinatensystems. Die einzelnen Bilder werden mithilfe identer (korrespondierender) Punkte zu einem Gesamtmodell verknüpft, in dem das Objekt vollständig dreidimensional rekonstruiert werden kann. Der Bezug zu dem übergeordneten System lässt sich über eine minimale Anzahl an Passpunkten realisieren, sodass größere passpunktlose Räume über Mehrbildverbände überbrückt werden können. Die Bündelblockausgleichung eignet sich daher ideal für die Auswertung des vorliegenden Bildverbandes dieser Arbeit, da nur in den ersten beiden Reihen Passpunkte verfügbar sind, während die restlichen Bildreihen nur über automatische Verknüpfungspunkte verbunden sind.

Gute Rekonstruktionsergebnisse bieten eine Grundlage für eine Reihe an Folgeprodukten. Es lässt sich etwa ein digitales Geländemodell ableiten oder die geometrische Form der Baumstämme rekonstruieren. Von Interesse wäre etwa der in der Forstwirtschaft wichtige Parameter des DBH (Baum-Durchmesser auf Brusthöhe (Bauwens u. a. 2016)). Außerdem könnten für die rekonstruierten Punkte die Genauigkeitsmaße der Bündelblockausgleichung mit in die Schätzung des DGMs (Kraus 2000) und der Baum-Parameter einbezogen werden.

1.2 Einteilung

Neben dem aktuellen Kapitel 1 teilt sich die Arbeit noch in weitere fünf Kapitel.

Kapitel 2 beleuchtet alle relevanten theoretischen Grundlagen, auf die im Laufe der Arbeit zurückgegriffen wird. Es werden die Charakteristiken des digitalen Messbildes erkärt (Kapitel 2.1) und die mit der Fotoaufnahme verbundene Verzeichnung (Kapitel 2.2). Die innere Orientierung (Kapitel 2.3) und äußere Orientierung (Kapitel 2.4) werden beschrieben und die Kollinearitätsgleichungen (Kapitel 2.5), die sie verbindet. Als technische Instrumente der Wahl werden der räumliche Vorwärts- und Rückwärtsschnitt erklärt (Kapitel 2.6). Anschließend wird ein Überblick über verschiedene Qualitätsmaße und das verwendete Ausgleichsverfahren gegeben (Kapitel 2.7.2). Zuletzt werden kurz die Erkennung von Ausreißern [Kapitel 2.8) und die gängigen Verfahren der automatischen Punktbestimmung vorgestellt (Kapitel 2.9).

Kapitel 3 gibt einen Überblick über das photogrammetrische Konzept des Bündelblocks. Es wird sowohl auf den luftgestützten Fall (Aerotriangulation) (Kapitel 3.1) als auch auf die Nahbereichsanwendung eingegangen (Kapitel 3.2). Das Grundprinzip des Bündelblocks sowie die Vorgangsweise der mathematische Auswertung (Kapitel 3.4) und die Berücksichtigung optionaler zusätzlicher Parameter (Kapitel 3.5) werden behandelt. Es wird außerdem der praktische Arbeitsablauf bei Orientierung von Bildverbänden dargestellt (Kapitel 3.6). Abschließend werden die verschiedene Kriterien der Genauigkeitsanalyse für innere und äußere Genauigkeit vorgestellt (Kapitel 3.7).

Kapitel 4 gibt eine Übersicht über die Parameter der Datenaufnahme. Es liefert Informationen zu Aufnahmegebiet (Kapitel 4.1), technischen Eckdaten der verwendeten Geräte (Kapitel 4.2), des aufgenommenen Bildmaterials (Kapitel 4.3) und der gemessenen Passpunkte (Kapitel 4.4). Abschließend werden einige verfügbare Softwarepakete vorgestellt (Kapitel 4.5).

Kapitel 5 beschreibt den praktischen Teil dieser Arbeit. Zunächst erläutert es die Aufgabenstellung (Kapitel 5.1), deren praktische Umsetzung (Kapitel 5.2) und die dafür nötigen Vorarbeiten (Kapitel 5.3). Kapitel 5.3 umfasst neben einer kurzen Einführung in die Punktbestimmung in MonoScope (Kapitel 5.4.1) einen Abschnitt über den Einfluss von automatischen Verknüpfungspunkten auf das Ergebnis der Bündelblockausgleichung des Ausgangsblocks (Kapitel 5.4.2) und die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung des gesamten Bildverbandes (Kapitel 5.4.3).

In Kapitel 6 wird dargestellt, welche Schlüsse aus den Ergebnissen dieser Arbeit gezogen werden können. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass eine Reihe von Verbesserungen und Erweiterungen des Aufnahme- und Auswerteprozesses für alle Schritte des Auswerteprozesses denkbar wären.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel beleuchtet alle relevanten theoretischen Grundlagen, auf die im Laufe der Arbeit zurückgegriffen wird. Es werden die Charakteristiken des digitalen Messbildes erklärt (Kapitel 2.1) und die mit der Fotoaufnahme verbundene Verzeichnung (Kapitel 2.2). Die innere Orientierung (Kapitel 2.3) und äußere Orientierung (Kapitel 2.4) werden beschrieben, ebenso die Kollinearitätsgleichungen (Kapitel 2.5), die sie verbinden. Als technische Instrumente der Wahl werden der räumliche Vorwärts- und Rückwärtsschnitt erklärt (Kapitel 2.6). Anschließend wird ein Überblick über verschiedene Qualitätsmaße und das verwendete Ausgleichsverfahren gegeben (Kapitel 2.7). Zuletzt werden kurz die Erkennung von Ausreißern [Kapitel 2.8) und die gängigen Verfahren der automatischen Punktbestimmung vorgestellt (Kapitel 2.9).

2.1 Digitales Messbild

In analogen Bildern werden geometrische Gebilde durch analytische Größen wie Punkte und Geraden beschrieben. In digitalen Bildern tritt an Stelle des Bildpunktes ein Bildelement. Ein digitales Bild ist eine (zweidimensionale) Matrix G mit den Bildelementen g_{ij}. Ein Bildelement wird gebräuchlich als Pixel ($\widehat{=}$ **pi**cture **x** **el**ement) bezeichnet. Die Größe eines Pixels beträgt $\Delta\xi \cdot \Delta\eta$. Ein digitales Messbild zeichnet sich dadurch aus, dass es den photogrammetrischen Anforderungen entspricht. Es handelt sich um eine zentralperspektivische Abbildung, die Position des Projektionszentrums im Bezug auf das Bild ist festgelegt. Im Weiteren muss der Zusammenhang zwischen der Pixelposition und den klassischen $\xi\eta$-Bildkoordinaten bekannt sein. Durch Multiplikation der Indices **i** und **j** der Bildmatrix mit $\Delta\xi$ und $\Delta\eta$ erhält man die Bildkoordinaten ξ und η des Mittelpunkts des Pixels g_{ij}.

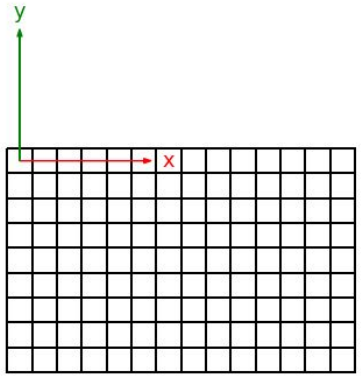


Abb. 2.1: Ausrichtung der Koordinatenachsen im digitalen Messbild aus Karel (2018)

Für das Bildkoordinatensystem sind verschiedene Definitionen in Gebrauch. Abbildung 2.1 zeigt die in dieser Arbeit verwendete Definition. Im gegebenen Fall liegt der Ursprung des Bildkoordinatensystems im Zentrum des Pixels in der oberen linken Ecke. Die x-Achse ($\widehat{=}\ \eta$ - Achse) liegt in Zeilenrichtung und zeigt nach rechts (in Richtung ansteigenden Zeilenindexes). Die y-Achse ($\widehat{=}\ \xi$ - Achse) liegt in Spaltenrichtung und zeigt nach oben (in Richtung absteigenden Spaltenindexes). Die y-Koordinate ist daher negativ (Kraus 2004).

Um aus Bildern Lage und Form von Objekten rekonstruieren zu können, müssen die entsprechenden geometrischen Abbildungsvorschriften bekannt sein. Wie bei analogen Bildern wird auch bei digitalen Bildern dieser Zusammenhang über die so genannte Kollinearitätsbeziehung in Form der Kollinearitätsgleichungen formuliert. Zur Lösung dieser Gleichungen werden neun unabhängige Parameter benötigt. Diese sogenannten Orientierungsparameter lassen sich in die innere Orientierung (siehe Kaptitel 2.3) und die äußere Orientierung (siehe Kapitel 2.4) unterteilen.

2.2 Verzeichnung

Bei der Aufnahme von Bildern lassen sich Abbildungsfehler nie gänzlich verhindern. Die sogenannte Verzeichnung ist ein optischer Abbildungsfehler, der gerade Linien deformiert erscheinen lässt. Ihre Ursache liegt im optischen Design der Kameralinsen. Die Verzeichnung tritt in Form von verschiedenen optischen Effekten auf, etwa in Tonnen-, Kissen- oder Wellenform, wie Abbildung 2.2 zeigen Weng u. a. (1992).

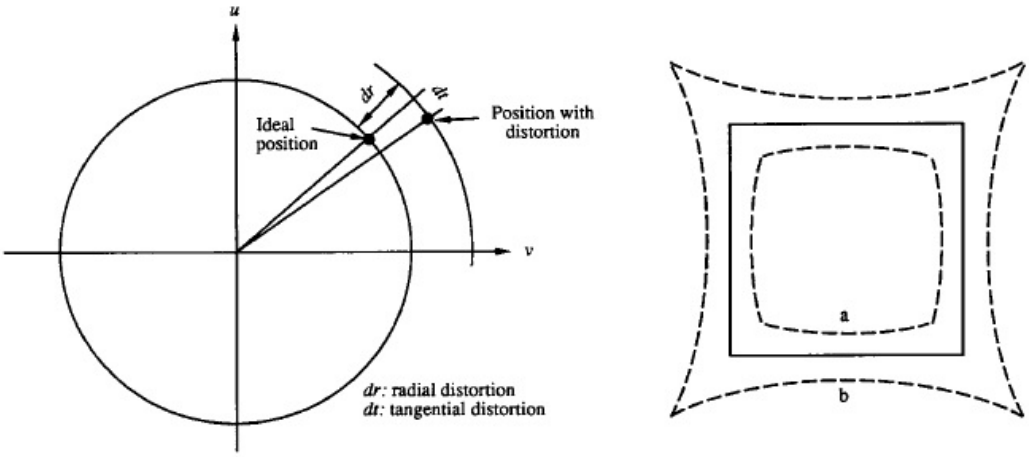


Abb. 2.2: Schematische Darstellung der Verzeichnung. Links: radial und tangential; rechts: tonnen- und kissenförmig (Weng u. a. 1992)

Mathematisch kann die Verzeichnung in Form eines radialen und eines tangentialen Anteils beschrieben werden. Welche Anteile berücksichtigt werden müssen, hängt von der verwendeten Kamera und der geforderten Genauigkeit der ausgelichenen Parameter ab. Welche und wie viele Verzeichnungsparameter geschätzt werden können, hängt von der Netzgeometrie ab. Es muss beim Definieren der Verzeichnungsparameter darauf geachtet werden, dass genügend Passpunkte vorhanden sind und dass keine linearen Abhängigkeiten entstehen.

Die mathematische Beschreibung unter Berücksichtigung des radialen und tangentialen Anteils kann wie folgt angeschrieben werden (Kraus u. a. 1997):

$$x_d = x_i - x_0 \tag{2.1}$$

$$y_d = y_i - y_0 \tag{2.2}$$

$$r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \tag{2.3}$$

$$dx = x_d(\rho_1 r^2 + \rho_2 r^4) + 2\rho_3 x_d y_d + \rho_4(r^2 + 2x_d^2) \tag{2.4}$$

$$dy = y_d(\rho_1 r^2 + \rho_2 r^4) + 2\rho_3 x_d y_d + \rho_4(r^2 + 2y_d^2) \tag{2.5}$$

Die Anteile d_x und d_y werden an die Bildbeobachtungen x_i und y_i angebracht, um unverzerrte Bildkoordinaten zu erhalten. Bei den ersten Termen $x_d(\rho_1 r^2 + \rho_2 r^4)$ und $y_d(\rho_1 r^2 + \rho_2 r^4)$ handelt es sich um den radialen Anteil, die weiteren Terme beschreiben die tangentiale Verzeichnung.

In der Bündelblockausgleichung (siehe Kapitel 3) wirkt die Verzeichnung wie ein systematischer Fehler. Systematische Fehler können in einem Ausgleich nicht eliminiert werden, sie müssen im Abbildungsmodell mathematisch berücksichtigt werden. Die Verzeichnungsparameter können als konstant angenommen werden oder werden als zusätzliche Parameter im Zuge des Ausgleichs mitgeschätzt (Kraus 2004; *Manual of Photogrammetry* 2004).

2.3 Innere Orientierung[1]

Die innere Orientierung gibt an, wo sich das Projektionszentrum einer Kamera bzw. einer fotografischen Aufnahme im Bezug auf das Bildkoordinatensystem befindet. Es handelt sich um kameraspezifische Größen, die vom Hersteller im Labor bestimmt werden.

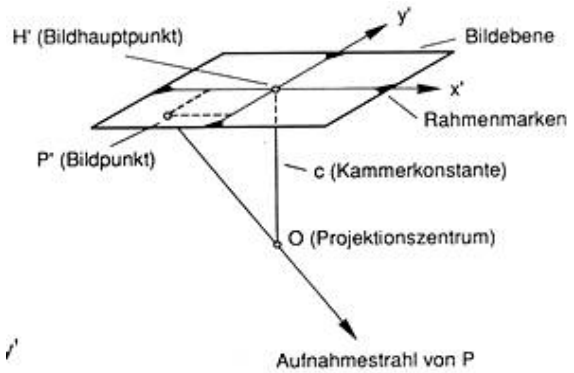


Abb. 2.3: Das Bildkoordinatensystem (Albertz und Wiggenhagen 2008)

Die **drei Parameter** der inneren Orientierung sind

ε_0, η_0 ... Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes H
c ... Kamerakonstante (auch Kammerkonstante genannt)

[1] Dieser Abschnitt folgt Kraus (2004).

2.4 Äußere Orientierung[2]

Die äußere Orientierung gibt an, von welchem Punkt aus eine Aufnahme aufgenommen worden ist, mit welcher Aufnahmerichtung und mit welcher Verdrehung um die Aufnahmerichtung. Das beliebig im Raum liegende Bildkoordinatensystem (ξ, η) wird in das übergeordnete Objektkoordinatensystem (X, Y, Z) gebracht.

Die **sechs Parameter** der äußeren Orientierung sind

X_0, Y_0, Y_0	... Objektkoordinaten des Aufnahmeortes (Translation)
3 Drehungen des Bildes	... Rotation

Abhängig von der Art der Aufnahmeplattform (terrestrisch, Airborne,...) werden die drei Drehwinkel unterschiedlich parametrisiert.

Parametrisierung $\omega\varphi\kappa$ bzw. $\varphi\omega\kappa$: Für luftgestützte Aufnahmen wird die Rotation über die Winkel ω, φ und κ definiert. Sie beschreiben die Transformation zwischen dem Bildkoordinatensystem und einem ebenen projizierten Koordinatensystem, wie etwa UTM oder Gauß-Krüger. Die primäre Rotation (ω bzw. φ) erfolgt um die X-Achse, die sekundäre Rotation (φ bzw. ω) um die rotierte Y-Achse und die tertiäre Rotation (κ) um die rotierte Z-Achse.

Parametrisierung $\alpha\zeta\kappa$: Diese Parametrisierung wird üblicherweise in der terrestrischen Photogrammetrie zur Rekonstruktion der Rotationsmatrix verwendet. Positive Rotationen sind bei Blick entlang einer Achse in Richtung Koordinatenursprung als Drehungen gegen den Uhrzeigersinn definiert.

Zu Beginn ist die Kameraachse nach unten entgegengesetzt der z-Achse gerichtet. In dieser Position sind die x- und y-Achse des Fotos parallel zu X- und Y-Achse des übergeordneten Koordinatensystems. Die Kamera wird um den Winkel α so gedreht, dass die y_α-Achse in der horizontalen Projektion der tatsächlichen - etwa horizontalen - Kamerarichtung in der XY-Ebene liegt. Diese Drehung wird primäre Rotation genannt. Die sekundäre Rotation ζ um die (horizontale) x_α-Achse entspricht der Nadirdistanz der Kamerarichtung. Die Nadirdistanz ist Null in Richtung der negativen Z-Achse, 100 Gon für horizontale Aufnahmen. Die tertiäre Rotation κ beschreibt die Blickrichtung der Kamera und erfolgt um die $\mathrm{z}_\alpha\zeta$-Achse.

Fasst man die drei Rotationen α, ζ und κ zusammen, erhält man die folgende Rotationsmatrix:

$$R_{\alpha\zeta\kappa} = \begin{pmatrix} c(\alpha)c(\kappa) - s(\alpha)c(\zeta)s(\kappa) & -c(\alpha)s(\kappa) - s(\alpha)c(\zeta)c(\kappa) & s(\alpha)s(\zeta) \\ s(\alpha)c(\kappa) + c(\alpha)c(\zeta)s(\kappa) & -s(\alpha)s(\kappa) + c(\alpha)c(\zeta)c(\kappa) & -c(\alpha)s(\zeta) \\ s(\zeta)s(\kappa) & s(\zeta)c(\kappa) & c(\zeta) \end{pmatrix} \tag{2.6}$$

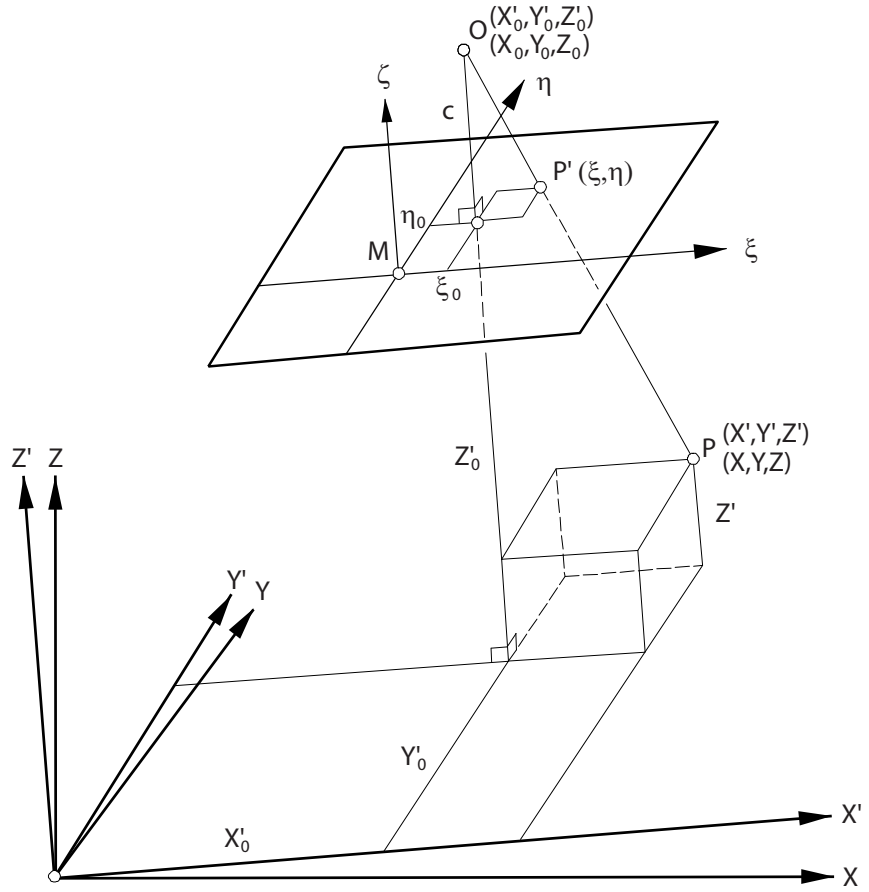


Abb. 2.4: Geometrischer Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinatensystem (Kraus 2004)

2.5 Kollinearitätsgleichungen[3]

Der Objektpunkt P, der Bildpunkt P' und das Aufnahmezentrum O liegen auf einer Geraden. Das $X'Y'Z'$-Objektsystem liegt parallel zum $\xi\eta\zeta$-Bildkoordinatensystem und ist gegenüber dem ursprünglichen XYZ-Objektsystem räumlich verdreht. Über die sogenannte Kollinearitätsbeziehung kann der Zusammenhang zwischen Bildkoordinatensystem und gestrichenem Objektkoordinatensystem ($\xi\eta\zeta \rightarrow X'Y'Z'$) in zwei Gleichungen hergestellt werden. Durch Auflösen der beiden Gleichungen nach den Bildkoordinaten erhält man

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = c\frac{(X' - X'_0)}{(Z' - Z'_0)} \tag{2.7}$$

$$\eta - \eta_0 = c\frac{(Y' - Y'_0)}{(Z' - Z'_0)} \tag{2.8}$$

Die Koordinaten des Objektpunktes X' und des Aufnahmezentrums X_0' können durch die Koordinaten des ursprünglichen Systems X und X_0 ersetzt werden.

[2]Dieser Abschnitt ist eine Zusammenfassung von Kraus (2004) und Rosenfield (1959).
[3]Dieser Abschnitt folgt Kraus (2004).

Die Verdrehung des $X'Y'Z'$-Systems gegenüber dem XYZ-System wird über eine Rotationsmatrix ausgedrückt.

$$\begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{pmatrix} \tag{2.9}$$

Den gesuchten Zusammenhang erhält man durch Multiplizieren der Gleichung (2.9) mit $R^T = R^{-1}$ und entsprechendes Einsetzen in die Gleichungen (2.7) und (2.8).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - c\frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \varepsilon_0 - c\frac{Z_x}{N} \tag{2.10}$$

$$\eta = \eta_0 - c\frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_3(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \eta_0 - c\frac{Z_y}{N} \tag{2.11}$$

2.6 Orientierungsverfahren[4]

2.6.1 Räumlicher Vorwärtsschnitt

Beim allgemeinen räumlichen Vorwärtsschnitt werden zur Punktberechnung die Bildkoordinaten des Punktes in beliebig vielen beteiligten Bildern gemessen und zusammen mit den bekannten Parametern der inneren und äußeren Orientierung verwendet. Die gemessenen Bildkoordinaten beziehen sich dabei auf den Hauptpunkt. Weiters müssen die Messungen um die auftretende Verzeichnung korrigiert werden. Die Objektkoordinaten X, Y, Z eines Punktes P lassen sich dann basierend auf den Kollinearitätsgleichungen (2.10) und (2.11) im Zuge einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten (Kapitel 2.7.2) bestimmen.

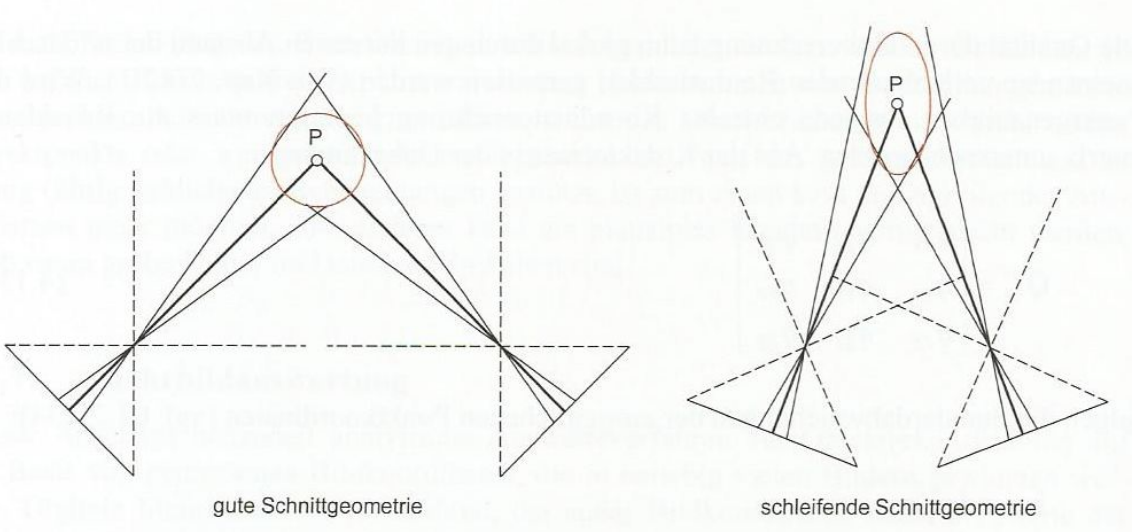


Abb. 2.5: Schnittgeometrie bei Vorwärtsschnitt (Luhmann 2018)

Für die Berechnung der drei Unbekannten X_i, Y_i, Z_i sind mindestens drei Beobachtungen (Bildkoordinaten) nötig. Daher kommt es bereits bei der Auswertung von nur zwei Bildern zu einer Überbestimmung. Mit jedem zusätzlichen Bildpaar kommen zwei weitere Beobachtungen hinzu. Im Vorwärtsschnitt werden im Gegensatz zu Punktbestimmung in

[4] Dieser Abschnitt folgt Luhmann (2018).

der Bündelblockausgleichung mögliche Korrelationen zwischen den ausgeglichenen Punktkoordinaten und den Orientierungsparametern nicht berücksichtigt. Nimmt man gleich genaue Bildkoordinatenmessungen in allen Bildern an, lässt ein gestrecktes Fehlerellipsoid auf einen schleifenden Schnitt homologer Raumstrahlen schließen (Abbildung 2.5).

Abbildung 2.6 zeigt links die Konfidenzellipsen einer Vorwärtsschnittberechnung, die nur aus zwei nebeneinander angeordneten Bildern (a) bestimmt worden sind, rechts zeigt sie die Konfidenzellipsen aus fünf rundum angeordneten Bildern (b). Es lässt sich deutlich erkennen, dass die Größe der Ellipsen im Fall (a) mit zunehmender Distanz zu den Kameras wächst. Die Messunsicherheiten sind in Aufnahmerichtung deutlich schlechter als in Querrichtung. Im Mehrbildfall (b) sind die Ellipsen insgesamt kleiner und die Verteilung der Messunsicherheiten in und quer zur Aufnahmerichtung ist gleichmäßiger ("rundere" Ellipsen).

Abb. 2.6: Schnittgeometrie bei Vorwärtsschnitt (Luhmann 2018)

2.6.2 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Zur Orientierung eines Bildes wird zunächst die äußere Orientierung (siehe Kapitel 2.4) bestimmt. Die direkte Ermittlung (über Winkel- und Streckenmessungen etwa) ist in der Regel zu ungenau oder nicht möglich, daher werden Verfahren zur indirekten Orientierung (mit Hilfe der im Bild gemessenen Objektabbildung) herangezogen. Diese Rechenverfahren werden räumlicher Rückwärtsschnitt genannt und in zwei Gruppen unterteilt:

- **Berechnung auf Basis der Kollinearitätsgleichungen:**
  Es liegt im Fall des räumlichen Rückwärtsschnitts eine nichtlineare Lösung vor, für deren eindeutige Bestimmung mindestens drei XYZ-Passpunkte im Objektraum sowie entsprechende Näherungswerte der gesuchten Orientierungsparameter bekannt sein müssen.

- **Berechnung mit Hilfe projektiver Beziehungen:**
  Dieses Verfahren benötigt mindestens sechs XYZ-Passpunkte, dafür werden keine Näherungswerte der Orientierungsunbekannten benötigt. Der bekannteste Vertreter dieser Kategorie ist die Direkte Lineare Transformation (DLT).

Im Zuge dieser Arbeit wird erstgenanntes Verfahren verwendet. Bei bekannter innerer Orientierung (siehe Kapitel 2.3) müssen mindestens drei Objektpunkte vorhanden sein, die weiters nicht auf einer Geraden liegen dürfen. Das Projektionszentrum und die Passpunkte spannen ein Strahlenbündel auf, das sich nur in einer eindeutigen Lage und Orientierung auf die Bildpunkte einpassen lässt. Aus den Kollinearitätsgleichungen (siehe Kapitel 2.5) lassen sich die benötigten Verbesserungsgleichungen ableiten.

Ist die innere Orientierung nicht bekannt, erhöht sich die Anzahl der zu bestimmenden Parameter um drei auf neun Orientierungsunbekannte. Statt bisher drei Passpunkte werden dann mindestens fünf Passpunkte benötigt. Bei entsprechender räumlicher Verteilung der Objektpunkte können mit dem Verfahren des räumlichen Rückwärtsschnitts noch weitere Parameter wie etwa die Verzeichnung bestimmt werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass sich mit steigender Anzahl an zu bestimmenden Parametern auch die Anzahl der verfügbaren Passpunkte erhöhen muss.

Näherungswerte für den Rückwärtsschnitt:

- **Gemessene Näherungswerte:**
  Teilweise ist es möglich Näherungswerte der Orientierungsparameter bereits vor Ort zu bestimmen. Es können etwa geodätische oder GPS/INS Messungen getätigt werden. Die Lageparameter sind häufig durch einfache Mittel wie das Abgreifen aus Plänen oder durch Abschritten zu bestimmen. Ist die Aufnahmekonfiguration einfach gehalten, können auch Drehwinkel gut geschätzt werden.
- **Kleine Bilddrehungen:**
  Die Näherungswerte der Drehwinkel können als Null angenommen werden, wenn die Richtungen der Koordinatenachsen von Bild- und Objektkoordinatensystem annähernd gleich sind. Aus dem Schwerpunkt der Passpunktkoordinaten lassen sich die Translationsparameter ableiten und der Aufnahmeabstand kann aus Kamerakonstante und näherungsweise bekanntem Bildmaßstab geschätzt werden.
- **Allgemeine Lösung:**
  Für die sechs äußeren Orientierungsparameter lassen sich Näherungswerte allenfalls immer aus mindestens drei gut verteilten Passpunkten bestimmen.

Gütekriterien

Die Güte des Rückwärtsschnitts hängt einerseits von der Genauigkeit der Bildkoordinatenmessung ab, andererseits von der Anzahl und der Verteilung der Passpunkte. Das Bildformat sollte von den gemessenen Objektpunkten möglichst vollständig abgedeckt werden. Weiters dürfen die Passpunkte nicht auf oder nahe an einer Geraden liegen, da das Normalgleichungssystem in diesem Fall singulär oder numerisch instabil wird. Liegen Objektpunkte und das Projektionszentrum auf einer sogenannten “gefährlichen Fläche“ (z.B. auf einem gemeinsamen Zylindermantel), existiert ebenfalls keine eindeutige Lösung.

Als Gütekriterium kann die Standardabweichung der Gewichtseinheit a posteriori s_o herangezogen werden. Sie ist ein Maß für die innere Genauigkeit der Beobachtungen, in diesem Fall also für die gemessenen Bildkoordinaten. Die Standardabweichungen der geschätzten Orientierungsparameter können aus der Kovarianzmatrix, die von s_o abhängt, abgeleitet werden. Näheres zu den verschiedenen Qualitätsmaßen findet sich im folgenden Kapitel 2.7.1.

2.7 Ausgleichsrechnung[5]

2.7.1 Qualitätsmaße

Es ist unabdingbar, einerseits die Qualität der Beobachtungen selbst zu kennen, andererseits aber auch die Qualität der davon abgeleiteten Größen.

Varianz
Die Varianz beschreibt die Abweichung der Daten von ihrem Erwartungswert μ. Sie wird aus der Summe der quadratischen Abweichungen der Beobachtungen von ihrem Erwartungswert dividiert durch n gebildet.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu_x)^2 \tag{2.12}$$

Bei unbekanntem Erwartungswert μ kann dieser durch den arithmetischen Mittelwert ersetzt werden. Die empirische Varianz wird mit s^2 bezeichnet. Es muss beachtet werden, dass die empirische Varianz besonders empfindlich gegenüber Ausreißern ist.

Die positive Quadratwurzel der Varianz ist die **Standardabweichung**:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \tag{2.13}$$

Die Standardabweichung σ_i ist ein gebräuchliches Kriterium zur Beurteilung von einzelnen Koordinatenunbekannten X_i.

Kovarianz
In einem Zufallsvektor $\mathbf{X}$ hat jedes Element X_i eine Varianz σ_i^2. Zwischen je zwei Elementen X und Y kann zusätzlich ein Parameter für die "gemeinsame Streuung" angegeben werden, die sogenannte "Kovarianz von X und Y":

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu_x)\cdot(y_i - \mu_y) \tag{2.14}$$

Die Kovarianz entspricht dem mittleren Produkt der Abweichungen der einzelnen x_i von ihrem jeweiligen Mittelwert. Bei einem positiven Produkt kann angenommen werden, dass die Zufallsgrößen X und Y tendenziell eher gleich sind. Bei negativer Kovarianz verhalten sich die Zufallsgrößen tendenziell eher reziprok.

Auch bei dem Beobachtungsvektor $\mathbf{L}$ handelt es sich um einen Zufallsvektor, er besitzt daher eine Kovarianzmatrix. In der Hauptdiagonale der Kovarianzmatrix stehen die Varianzen der einzelnen Beobachtungen, die Elemente außerhalb der Hauptdiagonale mit den entsprechenden Kovarianzen. Sind die Beobachtungen stochastisch unabhängig, ist der Wert Null. Die Verbesserungen sollen umgekehrt proportional zu den Varianzen und Kovarianzen vorgenommen werden. Da oft nur relative Genauigkeitsangaben zu den Beobachtungen vorliegen, wird eine "Bezugsvarianz" gewählt, zu der alle anderen in Verhältnis gesetzt werden. Diese Bezugsvarianz wird *Varianz der Gewichtseinheit* oder auch *Varianzfaktor* σ_0^2 genannt. Es wird auf diese Weise festgelegt, welche Beobachtungen das Gewicht Eins hat. Setzt man die Kovarianzmatrix in Proportion zu Varianz der Gewichtseinheit, erhält man die Kofaktormatrix $\mathbf{Q}$. Die Festlegung der Varianzen und Kovarianzen des Beobachtungs-

[5] Dieser Abschnitt ist eine Zusammenfassung von Niemeier (2002).

vektors erfolgt vor dem eigentlichen Ausgleich. Es wird daher von den “a priori Varianzen“ und von der “Varianz der Gewichtseinheit a priori“ gesprochen. Es handelt sich dabei um ausschließlich theoretische Größen, deren Korrektheit noch überprüft werden muss. In der Praxis wird zur Gewichtung die Kofaktormatrix **Q** verwendet. Durch Anwendung des *Kofaktorfortpflanzungsgesetzes* erhält man nach abgeschlossenem Ausgleich die Kofaktoren “a posteriori“. Aus den Hauptdiagonalen der Kofaktormatrix a posteriori können dann die Kofaktormatrizen der einzelnen relevanten Größen abgeleitet werden. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen lokalen und globalen Kriterien. Die Unterscheidung hängt dabei von der Art der Nutzung der Informationen aus der Kofaktormatrix ab. Wird die gesamte Matrix verwendet, handelt es sich um globale Kriterien, verwendet man nur kleine Ausschnitte, spricht man von lokalen Kriterien.

2.7.2 Ausgleichsverfahren

Formeln (2.10) und (2.11) bilden ein Gleichungssystem und liefern den funktionalen Zusammenhang zwischen den Größen im Bild und den Größen im übergeordneten Koordinatensystem. Durch Lösen des Gleichungssystems können die gesuchten Parameter der Orientierung bzw. die Objektpunktkoordinaten im übergeordneten System bestimmt werden. Sind weniger Beobachtungen als Unbekannte vorhanden, ist es ohne zusätzliche Information nicht möglich das Gleichungssystem eindeutig zu lösen. Eine eindeutige Lösung erhält man, wenn die Anzahl der Beobachtungen der der Unbekannten entspricht. Die bestimmten Unbekannten sind jedoch unkontrolliert und es kann keine Aussage über ihre Genauigkeit getroffen werden. Dies ist erst möglich, wenn mehr Beobachtungen als Unbekannte vorhanden sind (Überbestimmung). Eindeutig lösbar ist ein überbestimmtes Gleichungssystem nur dann, wenn die Beobachtungen keine Messunsicherheiten aufweisen und keine Modellfehler auftreten. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, wird ein Verfahren nötig, das eine bestmögliche Bestimmung der Unbekannten ermöglicht. Die nötigen Verfahren liefert die Ausgleichsrechnung.

In der Photogrammetrie übersteigt die Anzahl der Beobachtungen die der Unbekannten meist stark, es existieren redundante Beobachtungen. Das hat mehrere Gründe: (1) Kontrolle; um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten, (2) Wahrscheinlichkeitstheorie; um plausible Werte für die Unbekannten angeben zu können, (3) Qualitätssicherung; um ein Maß für die Genauigkeit der Messgrößen und Unbekannten angeben zu können. In der Photogrammetrie liegt daher im Allgemeinen ein Ausgleichungsproblem vor. Es gibt mehrere Möglichkeiten des Ausgleichens redundanter Beobachtungen.

Die Messungen, auch Beobachtungen genannt, werden in einem Beobachtungsvektor **L** zusammengefasst, die gesuchten Unbekannten im Unbekanntenvekor **X**. Das funktionale Modell, das den Zusammenhang des Beobachtungsvektors **L** und des Unbekanntenvektors **X** beschreibt, besteht aus den Beobachtungsgleichungen f_i:

$$\mathbf{L} + \boldsymbol{\epsilon} = f_i(\hat{X}_1, \hat{X}_2, ..., \hat{X}_u) \tag{2.15}$$

Die Beobachtungen sind Zufallsgrößen, die immer mit einer gewissen Messabweichung behaftet sind. Daher werden Verbesserungen $\boldsymbol{\epsilon}$ an den Beobachtungsvektor **L** angebracht.

Zur einfacheren mathematischen Handhabung möchte man den Zusammenhang in einem linearen mathematischen Zusammenhang darstellen. Dazu muss das funktionale Modell li-

nearisiert werden. Zur Linearisierung wird eine Taylorreihenentwicklung verwendet, die nach dem ersten Term abgebrochen wird. Das Ergebnis wird in der Matrix **A** zusammengefasst:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta X_1} & \frac{\delta f_1}{\delta X_2} & \cdots & \frac{\delta f_1}{\delta X_u} \\ \frac{\delta f_2}{\delta X_1} & \frac{\delta f_2}{\delta X_2} & \cdots & \frac{\delta f_2}{\delta X_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta f_n}{\delta X_1} & \frac{\delta f_n}{\delta X_2} & \cdots & \frac{\delta f_n}{\delta X_u} \end{pmatrix} \tag{2.16}$$

Um den Linearisierungsfehler möglichst klein zu halten, wird das Modell an einer Stelle des Unbekanntenvektors linearisiert, deren Näherungswerte $\mathbf{X}^0$ bekannt sind. Die Näherungswerte $\mathbf{X}^0$ und ein Koordinatenzuschlag $\hat{\mathbf{x}}$ bilden den ausgeglichenen Parametervektor $\hat{\mathbf{X}}$.

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \hat{\mathbf{x}} \tag{2.17}$$

Analog zu den Koordinatenzuschlägen $\hat{\mathbf{x}}$ müssen auch für die Beobachtungen Zuschläge berechnet werden. Dazu wird der genäherte Beobachtungsvektor $\mathbf{L}^0$ benötigt. Dieser wird mit Hilfe der Beobachtungsgleichungen f_i und der Näherungswerte $\mathbf{X}^0$ bestimmt.

$$\mathbf{L}_i^0 + = f_i(\hat{X}_1^0, \hat{X^0}_2, ..., \hat{X^0}_u) \tag{2.18}$$

Der gekürzte Beobachtungsvektor $\mathbf{l}$ kann berechnet werden.

$$\mathbf{l} = \mathbf{L} - \mathbf{L}^0 \tag{2.19}$$

Damit ergibt sich die lineare Beziehung in der Form von

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} \tag{2.20}$$

wobei $\mathbf{v}$ die Verbesserungen der Unbekannten sind.

Zur Bestimmung der unbekannten Koordinatenzuschläge $\hat{\mathbf{x}}$ wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Die Durchsetzung dieser Methode hat historische Gründe. Zum einen wäre da die einfache Handhabbarkeit. Alle Messmethoden lassen sich relativ leicht modellieren, von modernen GPS-Verfahren bis zu Längenmessungen mit herkömmlichen Maßbändern. Zum anderen ist sie schon vor den eigentlichen Messungen (a priori) einsetzbar und ermöglicht so die Abschätzung der erreichbaren Genauigkeiten. Nach den Messungen (a posteriori) ist die Absicherung der Ergebnisse durch statistische Tests möglich. Außerdem lassen sich sowohl die Varianzen der Messgrößen als auch die Korrelationen zwischen den Messgrößen berücksichtigen. Die Methode der kleinsten Quadrate lässt sich vor wahrscheinlichkeitstheoretischem Hintergrund ableiten. Ziel ist es, die Unbekannten so zu bestimmen, dass die quadratischen Verbesserungen $\mathbf{v}$ minimal werden. Folgende Bedingung wird formuliert:

$$\mathbf{v}^T\mathbf{v} \rightarrow \min . \tag{2.21}$$

Unter Berücksichtigung dieser Bedingung kann das System so umgeformt werden, dass der Lösungsvektor $\hat{\mathbf{x}}$ wie folgt berechnet werden kann:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{l} \tag{2.22}$$

Wobei die Gewichtsmatrix P die Inverse der Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{ll}$ entspricht.

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1} \tag{2.23}$$

Die Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{ll}$ setzt sich aus der Varianz der Gewichtseinheit σ_o^2 und der Kovarianzmatrix Σ_{ll} der Beobachtungen a priori zusammen.

$$\mathbf{Q}_{ll} = \frac{1}{\sigma_o^2}\mathbf{\Sigma}_{ll} \tag{2.24}$$

Die Varianz der Gewichtseinheit σ_o^2 ist eine "Bezugsvarianz", die festlegt, welche Beobachtung das Gewicht Eins hat. In der Hauptdiagonale der Kovarianzmatrix $\mathbf{\Sigma}_{ll}$ stehen die Varianzen der einzelnen Beobachtungen. Die Elemente außerhalb der Hauptdiagonale sind mit den Werten der entsprechenden Kovarianzen besetzt. Sind die Beobachtungen stochastisch unabhängig, ist das Element Null. ρ gibt an, wie stark die jeweiligen Beobachtungen korreliert sind.

$$\mathbf{\Sigma}_{ll} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_{12} & \cdots & \rho_{1n}\sigma_{1n} \\ \rho_{21}\sigma_{21} & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2n}\sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}\sigma_{n1} & \rho_{n2}\sigma_{n2} & \cdots & \sigma_n^2 \end{pmatrix} \tag{2.25}$$

Aus der Matrix $\mathbf{A}$ und der Gewichtsmatrix $\mathbf{P}$ kann die Kofaktormatrix der Unbekannten $\mathbf{Q}_{XX}$ bestimmt werden.

$$\mathbf{Q}_{XX} = (\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1} \tag{2.26}$$

Aufgrund der Linearisierung des funktionalen Modells muss überprüft werden, ob die Lösung auch im ursprünglichen Gleichungssystem den Genauigkeitsanforderungen entspricht. Ist das nicht der Fall, kann eine weitere Iteration mit den Ergebnissen als neue Näherungswerte durchgeführt werden. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Anforderungen erfüllt sind.

2.8 Erkennung von Ausreißern[6]

In praktischen Aufgabenstellungen können grobe Fehler in den Beobachtungen (Ausreißer) kaum vermieden werden. Da sie sich auf alle berechneten Unbekannten und Standardabweichungen auswirken und somit das Gesamtergebnis stark verfälschen können, müssen sie aus dem Satz der Beobachtungen entfernt werden. Nach Luhmann (2018) können die neben zufälligen und unbekannten systematischen Abweichungen auftretenden Fehler in den Beobachtungen folgendermaßen charakterisiert werden:

- **Grobe Fehler (Ausreißer):**
  Abweichungen von $3-5\sigma$ bis $20-50\sigma$ werden als grobe Fehler eingestuft. Sie entstehen in der Photogrammetrie z.B. durch fehlerhafte Bestimmung von partiell verdeckten Zielmarken oder durch fehlerhafte Zuordnung von Mustern in Stereoanwendungen.

- **Falsche Messwerte:**
  Fehlerhafte Messwerte liegen in einer Größenordung von $20-50\sigma$. Sie entstehen durch Bedienfehler, Ablesefehler oder Gerätefehler. Statistische Ausreißertests können durch falsche Beobachtungen gestört werden und dazu führen, dass tatsächliche grobe Fehler nicht mehr aufgedeckt werden. Plausibilitätskontrollen ermöglichen ihre Elimination.

[6] Dieser Abschnitt ist eine Zusammenfassung von Niemeier (2002).

- **Zuordnungsfehler:**
  In diese Kategorie fallen in nur einem Bild gemessene Bildkoordinaten, falsche Punktidentifizierungen und Verwechslungen von Bildnummern. Sie müssen durch Daten- und Plausibilitätskontrolle beseitigt werden.

- **Rundungsfehler:**
  Diese Abweichungen treten durch begrenzte Anzahl von Stellen bei einer Messwertanzeige oder einer importierten Datei bzw. durch Rechenunschärfe auf. Bei geringer Anzahl von Beobachtungen wirken sich Rundungsfehler vor allem auf die berechneten Genauigkeitsmaße und weniger auf den ausgeglichenen Mittelwert aus.

Für eine Erkennung von Ausreißern können die nach einem Ausgleich vorliegenden Verbesserungen nicht unmittelbar herangezogen werden, da die Verbesserungen nicht nur das Resultat von Fehlern in den Beobachtungen sind, sondern auch durch einen ungenügenden funktionalen Ansatz in der Ausgleichung (Modellfehler) bedingt sein können. Oft liegen Daten- und Modellfehler gleichzeitig vor und überlagern sich gegenseitig.

2.9 Methoden zur automatischen Bestimmung von Verknüpfungspunkten

Die zur Lösung des Bündelblockausgleichs (siehe Kapitel 3) benötigten Verknüpfungspunkte können manuell oder automatisch gewonnen werden. Die manuelle Bestimmung beschränkt sich meist auf die Verknüpfung von Passpunkten. Weitere Verknüpfungspunkte sollen bestmöglich automatisiert bestimmt werden (große Menge an Bildern, automatisierte Abläufe, Zeiteffizienz).

Die gebräuchlichen Bildverknüpfungsmethoden („Image Matching“) können in intensitätsbasierte („intensity-based“) Methoden und merkmalsbasierte („feature-based“) Methoden unterteilt werden. In der Photogrammetrie weiter verbreitet ist die merkmalsbasierte Methode, die dann angewendet wird, wenn lokale Strukturinformation signifikanter ist als die Information, die in der Bildintensität enthalten ist (Ni und Lou 2004). Merkmale können unter anderem Ecken, Kanten, Punkte, Linien oder Kurven sein. Ziel aller Verknüpfungsmethoden ist es, die in zwei Bildern paarweise auftretenden Merkmale zu detektieren und richtig zuzuordnen. Die Bestimmung von Verknüpfungspunkten ist die Vorstufe zu einer Vielzahl an photogrammetrischen Anwendungen, wie Bildregistrierung, Bildmosaikierung, automatischer Deformationsdetektion usw. Die Verknüpfungsgenauigkeit hat dabei direkt Einfluss auf die Genauigkeit dieser Anwendungen (Jiao 2008).

In Zuge dieser Arbeit sind vor allem Punktmerkmale von Interesse. Die Bestimmung erfolgt über sogenannte Operatoren. Bekannte Operatoren sind der Harris Operator (Harris und Stephens 1988) oder der Förstner Operator (Förstner und Gülch 1986). Beide Operatoren nutzen die Autokorrelationsfunktion zur Merkmalsdetektion. Die sogenannte SIFT (**S**cale **I**nvariant **F**eature **T**ransformation) Methode nach Lowe (2004) verwendet den Förstner Operator zur Extraktion und liefert Punktbeschreibungen, die unabhängig von Bildmaßstab, Verkantung, Aufnahmerichtung (mit Einschränkungen) und Belichtung sind. Für die Punkte wird eine lokale Orientierung bestimmt. Die lokal beschriebenen Punkte eines Bildpaares können dann einander zugeordnet werden. Wird angenommen, dass die Anzahl der groben Fehler nach der Detektion groß ist, kann die RANSAC (**RAN**dom **SA**mple **C**onsensus) Methode nach Fischler und Bolles (1981) zur Zuordnung verwendet

werden. Es handelt sich dabei um ein robustes Verfahren (über Gewichtsiteration und Data Snooping), das trotz vieler grober Fehler die korrekte Lösung liefert.

Kapitel 3

Der Bündelblock[7]

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über das photogrammetrische Konzept des Bündelblocks. Es wird sowohl auf den luftgestützten Fall (Kapitel 3.1) als auch auf die Nahbereichsanwendung eingegangen (Kapitel 3.2). Das Grundprinzip des Bündelblocks sowie die Vorgangsweise der mathematischen Auswertung (Kapitel 3.4) und die Berücksichtigung optionaler zusätzlicher Parameter (Kapitel 3.5) werden behandelt. Es wird außerdem der praktische Arbeitsablauf bei Orientierung von Bildverbänden dargestellt (Kapitel 3.6). Abschließend werden die verschiedenen Kriterien der Genauigkeitsanalyse für innere und äußere Genauigkeit vorgestellt (Kapitel 3.7).

Die Bündelblockausgleichung ist ein Verfahren zur simultanen rechnerischen Einpassung beliebig vieler im Raum angeordneter Bilder (Strahlenbündel) unter Berücksichtigung photogrammetrisch gemessener Bildpunkte und geodätischer Beobachtungen sowie eines übergeordneten Koordinatensystems. Die einzelnen Bilder werden mithilfe identer (korrespondierender) Punkte zu einem Gesamtmodell verknüpft, in dem das Objekt vollständig dreidimensional rekonstruiert werden kann. Der Bezug zu dem übergeordneten System lässt sich über eine minimale Anzahl an Passpunkten realisieren, sodass größere passpunktlose Räume über Mehrbildverbände überbrückt werden können.

Das Verfahren der Bündelblockausgleichung ist seit Ende der 1950er-Jahre bekannt. Es kann als verallgemeinerte Form simultaner räumlicher Vorwärts- und Rückwärtsschnitte aufgefasst werden, bei der zusätzlich Unbekannte für weitere Bilder sowie für Neupunkte hinzukommen (Mehrpunkteinschaltung). Die praktischen Probleme der Bündelblockausgleichung liegen nicht bei der mathematischen Formulierung, sondern in folgenden Bereichen:

- Lösung großer Normalgleichungssysteme (bis einige tausend Unbekannte)
- Beschaffung von Näherungswerten der Unbekannten
- Aufdeckung und Elimination grober Fehler

Die Entwicklung der praktischen Einsetzbarkeit der Bündelblockausgleichung geht einher mit der stetigen Steigerung der Rechenleistung. Im Zuge dieser Entwicklung erfolgte eine Trennung einerseits für Anwendungen der Luftbildauswertung (Aerotriangulation), andererseits für Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie.

3.1 Aerotriangulation

Die Ausgleichung von Luftbildverbänden wie in Abbildung 3.1 ist gekennzeichnet durch:

- überwiegend regelmäßig angeordnete, streifenförmige Bildverbände. Daraus folgen

[7] Dieses Kapitel basiert auf Abschnitten von Kraus (2004) und Luhmann (2018).

- günstigere Strukturen von Normalgleichungssystemen und
- einfachere Beschaffung von Näherungswerten (z.B. Drehwinkel näherungsweise Null),
- häufig große Zahl von Bildern und Objektpunkten und
- Verwendung *einer* (kalibrierten) Messkamera.

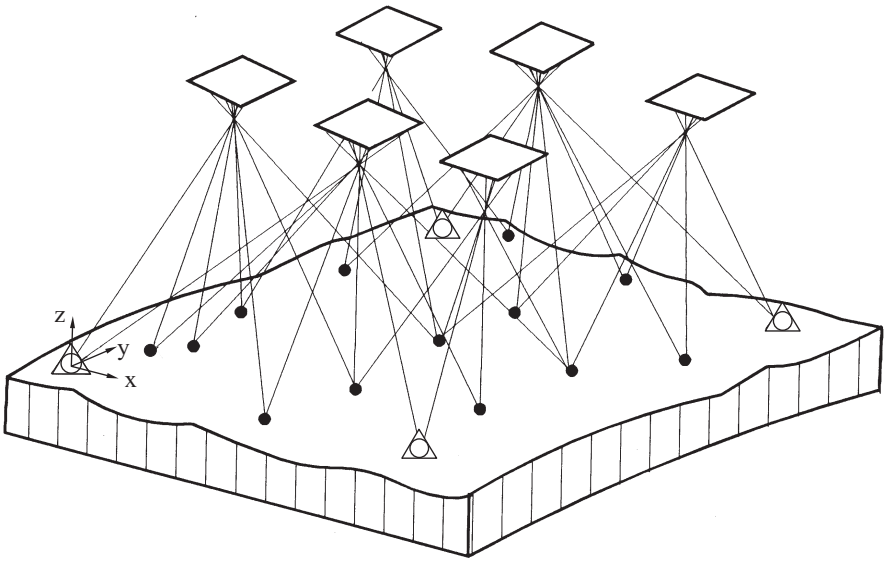


Abb. 3.1: Anordnung der Bilder in einem Bündelblock (Kraus 2004)

3.2 Nahbereichsphotogrammetrie

Im Gegensatz dazu zeichnet sich der Standardfall in der Nahbereichsphotogrammetrie aus durch:

- unregelmäßig angeordnete, beliebig (und oftmals ungünstige) Aufnahmekonfigurationen (Abbildung 3.2)
- komplexere Struktur von Normalgleichungssystemen
- aufwändige Beschaffung von Näherungswerten
- beliebig gelagerte Objektkoordinatensysteme
- Ausgleichung zusätzlicher (geodätischer) Beobachtungen und Bedingungen
- (mehrere) simultan zu kalibrierende Aufnahmesysteme

Seit Beginn der 1980er-Jahre hat sich der Bündelblockausgleich in der Photogrammetrie in allen Bereichen durchgesetzt. Auf dem Markt sind heutzutage verschiedene Programmsysteme verfügbar, abhängig von den unterschiedlichen gestellten Anforderungen. Da praktisch beliebige Aufnahmeanordnungen bei freier Wahl des Aufnahmesystems und der Aufnahmerichtungen möglich sind, hat besonders im Nahbereich das Verfahren des Bündelblockausgleichs seit Beginn der Entwicklungen ein deutlich größeres Anwendungsspektrum gewonnen.

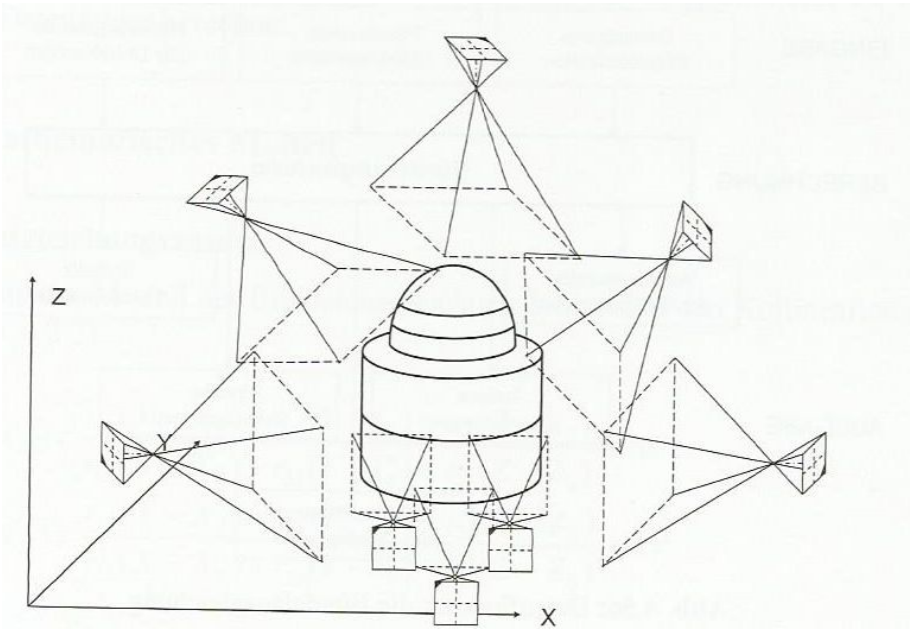


Abb. 3.2: Beliebige Aufnahmekonfiguration im Nahbereich (Luhmann 2018)

3.3 Grundprinzip

In den bisherigen Überlegungen sind die innere und äußere Orientierung als bekannt angenommen worden. Dies ist jedoch oft nur unzureichend genau oder gar nicht der Fall. Eine mögliche Lösung bietet der Bündelblockausgleich. In einem gemeinsamen Ausgleich sollen sowohl die Orientierungsparameter als auch die Objektpunkte mehrerer Bilder gleichzeitig bestimmt werden. Bei einer Bündelblockausgleichung wird der Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten und den Objektkoordinaten auf rechnerische Weise direkt (ohne Modell) hergestellt. Ein streifen- oder blockförmiger Bildverband bildet den Ausgangspunkt. Die Elementareinheit des Bündelblocks ist also das Messbild. Abbildung 3.1 skizziert das Grundprinzip.

Die Bildkoordinaten und das dazugehörige Projektionszentrum definieren ein räumliches Strahlenbündel. Die Strahlenbündel werden im Zuge des Ausgleichs verschoben (drei Translationen) und gedreht (drei Drehwinkel). Ziel ist es, dass sich die entsprechenden Strahlen an den Verknüpfungspunkten möglichst genau schneiden und die Abweichung von den Passpunkten möglichst gering ist. Verknüpfungspunkte sind jene Punkte, die in mehr als einem Messpunkt vorkommen. Definiert man eine Ähnlichkeitstransformation zwischen Bildkoordinatensystem und Objektkoordinatensystem, kann die äußere Orientierung pro Bild mit sechs zusätzlichen Parametern bestimmt werden. Die innere Orientierung kann je nach verwendeter Kamera als bekannt angesehen werden oder muss einzeln für jedes Bild in den Ausgleich eingeführt werden.

Verknüpfungspunkte alleine reichen nicht aus, um die Koordinaten der Objektpunkte im Objektkoordinatensystem zu bestimmen. Die relative Orientierung der Bilder zueinander kann bestimmt werden. Kennt man die relative Orientierung, ist es möglich dreidimensionale Objektpunkte zu rekonstruieren, diese liegen jedoch in einem lokalen Koordinatensystem. Dieses so genannte Modellkoordinatensystem unterscheidet sich im Allgemeinen vom

Objektkoordinatensystem in Lage, Orientierung und Maßstab. Um den Zusammenhang zwischen den beiden Systemen herstellen zu können, müssen Position und Rotation der Kamera(s) entweder direkt gemessen werden (GPS, IMU) oder zusätzlich zu den bereits bestimmten Verknüpfungspunkten werden noch Passpunkte im Objektkoordinatensystem bestimmt. Die Bestimmung der äußeren Orientierung der Strahlenbündel erfolgt dann mit Hilfe der Bildkoordinaten und Koordinaten der Passpunkte im übergeordneten System und der Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte. Die Herstellung des Zusammenhangs zwischen Bild- und Objektkoordinatensystem wird Datumsdefinition genannt. Bei einem Bündelblockausgleich im dreidimensionalen Raum müssen mindestens sieben Parameter fixiert werden. Datumsparameter gehen nicht als Unbekannte in den Ausgleich mit ein. Sie müssen so gewählt werden, dass die Transformationsparameter eindeutig bestimmt sind.

3.4 Verbesserung- und Normalgleichungen

Beim Bündelblockausgleich handelt es sich um einen Kleinste-Quadrate-Ausgleich nach vermittelnden Beobachtungen (siehe Kapitel 2.7). Da es sich bei den Kollinearitätsgleichungen (2.10) und (2.11) um nichtlineare Gleichungen handelt, müssen für die linearisierten Verbesserungsgleichungen die Differentialquotienten der Kollinearitätsgleichungen gebildet werden. Die Verbesserungsgleichungen können für jeden Punkt i angegeben werden, dessen Bildkoordinaten im Messbild j gemessen wurden. Jeder gemessene Bildpunkt liefert zwei Verbesserungsgleichungen.

$$\begin{aligned}\nu_{\xi ij} = &\left(\frac{\delta\xi}{\delta X_{0j}}\right)^0 dX_{0j} + \left(\frac{\delta\xi}{\delta Y_{0j}}\right)^0 dY_{0j} + \left(\frac{\delta\xi}{\delta Z_{0j}}\right)^0 dZ_{0j} \\ &+ \left(\frac{\delta\xi}{\delta\omega_j}\right)^0 d\omega_j + \left(\frac{\delta\xi}{\delta\phi_j}\right)^0 d\phi_j + \left(\frac{\delta\xi}{\delta\kappa_j}\right)^0 d\kappa_j \\ &+ \left(\frac{\delta\xi}{\delta X_i}\right)^0 dX_i + \left(\frac{\delta\xi}{\delta Y_i}\right)^0 dY_i + \left(\frac{\delta\xi}{\delta Z_i}\right)^0 dZ_i - (\bar{\epsilon}_{ij} - \epsilon^0_{ij}) \\ \nu_{\eta ij} = &\text{ entsprechend}\end{aligned} \tag{3.1}$$

Die Unbekannten sind die sechs Elemente der äußeren Orientierung des Messbildes j und die drei Landeskoordinaten des Punktes i. Handelt es sich bei einem Punkt i um einen Festpunkt, entfallen die entsprechenden Terme dX_i, dY_i und dZ_i in der Verbesserungsgleichung. Bei ϵ^0_{ij} und η^0_{ij} handelt es sich um gerechnete Bildkoordinaten, die sich bei vorhandenen Näherungswerten über die Kollinearitätsgleichungen (2.10) und (2.11) bestimmen lassen. Die Terme $\bar{\epsilon}_{ij}$ und $\bar{\eta}_{ij}$ stehen für die gemessenen Bildkoordinaten. Zur Auswertung der Differentialquotienten $(\ )^0$ sind Näherungswerte der Unbekannten erforderlich. Diese können auf verschiedene Weise bestimmt werden. Die Verbesserungsgleichungen werden zu einem Gleichungssystem zusammengefasst. In Matrizenschreibweise:

$$\mathbf{v = A\ x\ -\ l} \tag{3.2}$$

Zur leichteren Handhabung werden die Verbesserungsgleichungen als Normalgleichungssystem angeschrieben.

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A}\ \mathbf{x} = \mathbf{A}^T\mathbf{l} \tag{3.3}$$

$\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ kann zu $\mathbf{N}$ zusammengefasst werden, $\mathbf{A}^T\mathbf{l}$ zu $\mathbf{n}$.

Das Normalgleichungssystem lautet dann:

$$\mathbf{N}\,\mathbf{x} = \mathbf{n} \tag{3.4}$$

Das Auflösen des Gleichungssystems liefert Korrekturen für die Näherungswerte der äußeren Orientierung eines jeden Messbildes und für die Näherungskoordinaten der Neupunkte. Waren die Näherungswerte nicht genau genug, werden die korrigierten Werte als neue Näherungswerte übernommen und die Ausgleichung wird wiederholt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis sich die Unbekannten nicht mehr signifikant ändern.

3.5 Zusätzliche Parameter

Werden die Aufnahmen mit einer Amateurkamera, wie auch im Falle dieser Arbeit, anstelle einer Messkamera gemacht, kann der Bündelblockausgleich um die Elemente der inneren Orientierung (siehe Kapitel 2.3) erweitert werden. Der Verbesserungsgleichung werden die Elemente der inneren Orientierung hinzugefügt. Es muss beachtet werden, dass sich dadurch die Anzahl der Unbekannten erhöht. Zusätzliche Pass- und Verknüpfungspunkte sind notwendig, um die erhöhte Anzahl zu kompensieren.

Ein weiteres Problem von Amateuraufnahmen ist die typischerweise auftretende Objektverzeichnung (siehe Kapitel 2.3), wodurch die Aufnahme gegenüber einer Zentralprojektion in großem Ausmaß deformiert sein kann. Verursacht werden diese Verformungen durch Linsenfehler. Durch das Einführen von Korrekturpolynomen in die Verbesserungsgleichungen kann dieser Einfluss berücksichtigt werden. Bei der Auswertung von Messbildern kann der erweiterte Bündelblock zur Selbstkalibrierung genutzt werden. Durch Selbstkalibrierung können allenfalls auftretende Restverzeichnung, -verformung und -refraktion korrigiert werden.

3.6 Aufnahme- und Auswerteprozess

In der Nahbereichsphotogrammetrie folgt die Auswertung üblicherweise dem Arbeitsablauf, wie er in Abbildung 3.3 dargestellt wird.

Dieser Arbeitsablauf kann weitgehend automatisiert werden (rote Markierungen), wenn die Identifikation der Punktnummern mittels codierter Zielmarken erfolgt und das Objekt geeignet signalisiert wird, oder wenn genügend dichte und texturierte Bildaufnahmen vorliegen und durch Structure-from-Motion-Verfahren ausgewertet werden. In beiden Fällen ist es notwendig Näherungswerte zu kennen sowie grobe Fehler (Ausreißer) durch robuste Schätzverfahren zu eliminieren.

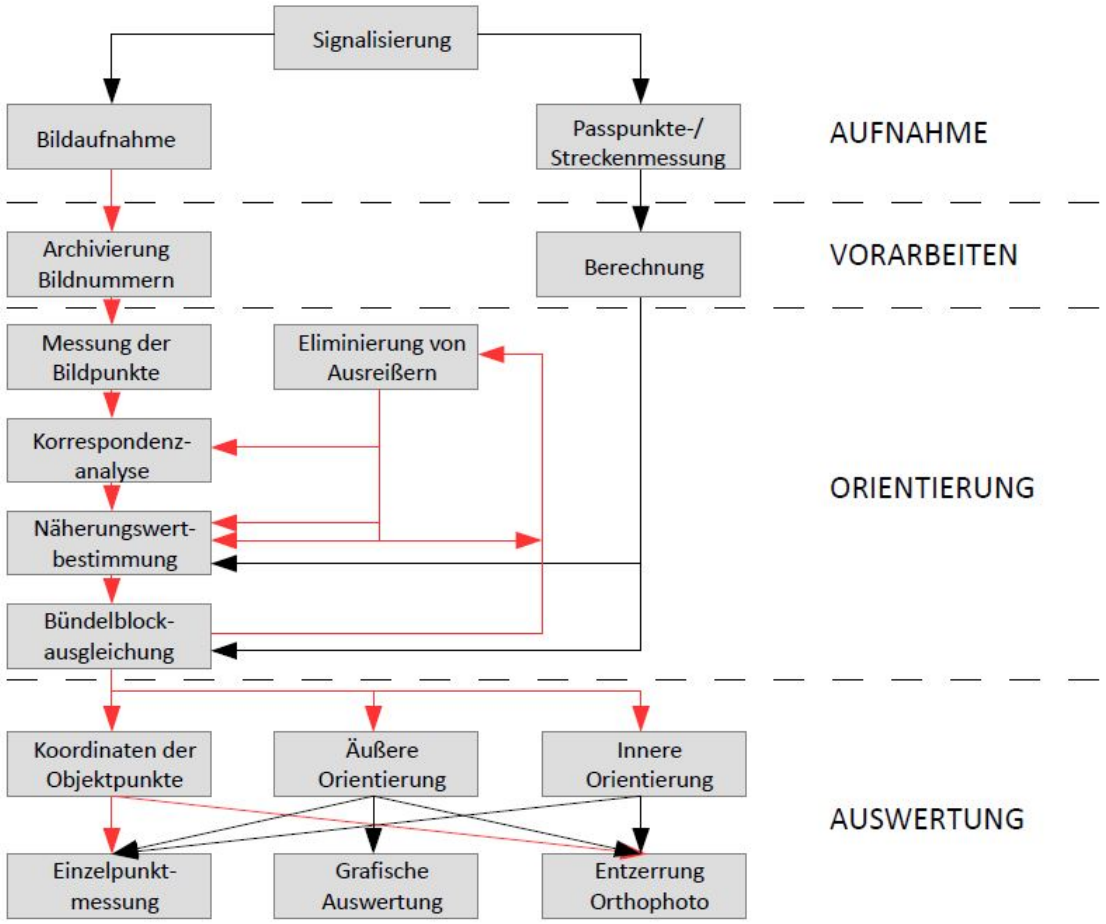


Abb. 3.3: Aufnahme- und Auswerteprozess (rot: automatisierbar im digitalen System) nach Luhmann (2018)

3.7 Genauigkeitsanalyse

3.7.1 Innere Genauigkeit

Die Güte, mit der die Messwerte (Beobachtungen) unter Berücksichtigung der geometrischen Konfiguration (Design-Matrix) zum verwendeten funktionalen Modell passen, lässt sich aus internen statistischen Größen der Bündelblockausgleichung ableiten. Unter der Annahme, dass keine systematischen Abweichungen in den Beobachtungen vorliegen, beschreiben die Kenngrößen der inneren Genauigkeit die zufälligen Abweichungen der Messwerte. Zu den Kenngrößen gehören:

3.7.1.1 Mittlere Verbesserungen (Residuen) der Bildkoordinaten

Die mittleren Verbesserungen der gemessenen Bildkoordinaten sind ein Maß für die Güte der Bildmessung. Sie lassen sowohl Rückschlüsse auf die Qualität der Punkterkennung als auch auf die Güte der Kamerakalibrierung (innere Orientierung) bzw. die Kamerastabilität zu.

3.7.1.2 Standardabweichung der Gewichtseinheit

Die Standardabweichung (Berechnung siehe Kapitel 2.7.1) a posteriori σ_o wird aus den Verbesserungen (Residuen) der Beobachtungen und der Redundanz $r = n - u$ berechnet. Durch Erhöhung der Redundanz lässt sich daher σ_o praktisch beliebig verkleinern. σ_o a priori und σ_o a posteriori sollten ähnliche Größenordnung aufweisen. Ist σ_o a posteriori kleiner als σ_o a priori wurden die Standardabweichungen der Eingangsgrößen zu pessimistisch geschätzt, ist σ_o a posteriori größer, zu optimistisch.

3.7.1.3 Standardabweichung der Objektkoordinaten

Als Ergebnis des Bündelblockausgleichs erhält jede Unbekannte eine Standardabweichung. Handelt es sich bei den Unbekannten um dreidimensionale Koordinaten, wird die mittlere Standardabweichung der Punkte folgendermaßen angegeben:

$$s_{XYZ} = \sqrt{s_X^2 + s_X^2 + s_Z^2} \tag{3.5}$$

Die mittlere Standardabweichung von n ausgeglichenen Objektkoordinaten wird als RMS-Wert bezeichnet:

$$RMS_X = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} s_{X_i}^2} \qquad RMS_Y = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} s_{Y_i}^2} \qquad RMS_Z = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} s_{Z_i}^2} \tag{3.6}$$

Standardabweichungen von Objektkoordinaten sind datumsabhängig. Das heißt, sie können je nach Lage der Punkte im Objektkoordinatensystem ein verfälschtes Bild der erreichten Genauigkeit wiedergeben.

3.7.1.4 Fehler- und Konfidenzellipsen

Wünschenswert wäre es, die Bewegungsmöglichkeiten des betrachteten Punktes unabhängig von den Koordinatenachsen angeben zu können. Für Punkte sind daher Fehler- und Konfidenzellipsen sowie unterschiedliche Punktlagefehler wie der helmertsche Punktlagefehler üblich. Zwischen verschiedenen Punkten können relative Fehler- und Konfidenzellipsen angegeben werden. Wie bereits erwähnt, ist das Ziel die Standardabweichung in einer beliebigen Richtung zu berechnen und die Gesamtheit dieser Abweichungen durch einen mathematischen Ausdruck eindeutig zu beschreiben. Diese Anforderung führt auf die Fußpunktkurve einer Ellipse mit den Halbachsen A und B.

$$A_F^2 = \frac{1}{2}\left(s_x^2 + s_y^2 + \omega\right) \tag{3.7}$$

$$B_F^2 = \frac{1}{2}\left(s_x^2 + s_y^2 - \omega\right) \tag{3.8}$$

$$\text{mit der Hilfsgröße } \omega^2 = \left(s_x^2 - s_y^2\right)^2 + 4s_{xy}^2$$

Der Richtungswinkel Θ_F der Halbachse A berechnet sich nach:

$$\Theta_F = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2s_{xy}}{s_x^2 - s_y^2}\right) \tag{3.9}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass die wahre Punktlage innerhalb der helmertschen Fehlerellipse liegt, beträgt zwischen 29 Prozent und 39 Prozent, abhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade. Um die Wahrscheinlichkeit auf 90 Prozent zu erhöhen, müsste man die Achsen auf mehr als das Doppelte vergrößern, für 99 Prozent auf mehr als das Dreifache. Flächenmäßig wäre diese Ellipse nahezu 10-mal so groß wie die helmertsche Fehlerellipse.

Die helmertsche Fehlerellipse kann auch direkt aus der Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{xx}$ abgeleitet werden, indem eine Spektralzerlegung von $\mathbf{Q}_{ii}$ des zum Punkt i gehörenden Abschnitts aus $\mathbf{Q}_{xx}$ durchgeführt wird. Man erhält eine Spektralmatrix $\mathbf{D}$ mit den Eigenwerten λ_1 und λ_2 auf den Hauptdiagonalen und eine Modalmatrix $\mathbf{S}$ mit den Eigenwerten s_1 und s_2.

$$\mathbf{Q}_{ii} = \mathbf{S}_i \mathbf{D}_i \mathbf{S}_i^T = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1^T \\ s_2^T \end{pmatrix} \tag{3.10}$$

Für die Kenngrößen der helmertschen Fehlerellipse gelten dann folgende Beziehungen:

$$A_F^2 = s_0^2 \lambda_1 \tag{3.11}$$

$$B_F^2 = s_0^2 \lambda_2 \tag{3.12}$$

$$\tan \Theta_F = \frac{s_{1x}}{s_{1y}} \tag{3.13}$$

Beschränkt man sich wie bisher nicht nur auf den zweidimensionalen Fall, sondern verallgemeinert die angestellten Überlegungen auf einen Parametervektor mit u Unbekannten, führt dies zu einem Hyperellipsoid. Auch hierfür lassen sich Wahrscheinlichkeitsbeziehungen ableiten. Das u-dimensionale Konfidenzhyperellipsoid ist geometrisch jedoch nicht mehr anschaulich. Die Berechnung erfolgt analog zum Gleichungssystem (3.11) - (3.13).

3.7.1.5 Restklaffung beim Vorwärtsschnitt

Die beim räumlichen Vorwärtsschnitt (Kapitel 2.6.1) verbleibende Restklaffung des Geradenschnitts im Raum ist ein weiteres Maß für die Präzision der Punktbestimmung. Zu beachten ist, dass im Stereofall (z.B. beim Einsatz eines Mehrkamerasystems) die Restklaffung (y-Parallaxe) bei fehlerhafter Messung zu Null werden kann, wenn die gemessenen Bildpunkte auf korrespondierenden Epipolarlinien liegen.

3.7.2 Äußere Genauigkeit

Um die äußere Genauigkeit einer photogrammetrischen Messung zu ermitteln, sind Referenzmaße erforderlich, die selbst nicht am Berechnungsprozess teilnehmen. Ihre Realisierung kann über Prüfkörper mit bekannten Maßen oder Vergleichspunkte mit bekannten Koordinaten erfolgen, die mithilfe eines übergeordneten genaueren Messverfahrens gestimmt worden sind. Es gilt zu beachten, dass die äußere Genauigkeit sämtliche systematischen und zufälligen Abweichungen der Messwerte enthält.

- **Vergleich mit unabhängigen Referenzpunkten:**
  Liegen zu einigen der in der Bündelblockausgleichung bestimmten Objektpunkte (keine Passpunkte) unabhängige Referenzkoordinaten mit übergeordneter Genauigkeit vor, kann ein direkter Vergleich vorgenommen werden. Sinnvoll ist dieses Verfahren nur dann anwendbar, wenn a) die Anforderungen an die Genauigkeit und Unabhängigkeit der Vergleichspunkte erfüllt ist und b) die Objektpunktbestimmung mit dem Ergebnis

der Bündelblockausgleichung abgeschlossen ist. Beide Voraussetzungen sind in der Praxis nicht immer zu erfüllen, da die Erstellung von Vergleichspunkten mit höherer Genauigkeit und hinreichender Antastgüte häufig nicht hinreichend möglich ist und zum anderen Korrelation zwischen den Pass- und Vergleichspunkten herrscht, wenn sie mit der gleichen Messmethode erzeugt worden sind. Des Weiteren führt die numerische Korrelation zwischen Pass- und Neupunkten dazu, dass die Vergleichspunkte als unabhängige Prüfpunkte nur bedingt geeignet sind.

- **Überprüfung unabhängiger Referenzlängen:**
  Aus den berechneten Objektkoordinaten von Punkten einer unabhängigen Prüflänge, die nicht als Beobachtung in der Bündelblockausgleichung enthalten ist, können Distanzen berechnet werden, die dann den kalibrierten Längen gegenüber gestellt werden. In Nahbereichsanwendungen sind Prüflängen relativ leicht zu realisieren, durch die in technischen Anwendungen übliche Weiterverarbeitung der Koordinaten zu abgeleiteten Größen wie Strecken, Deformationen, Flächen usw. möglich sind. Prüflängen erlauben außerdem die Ermittlung der standardisierten Längenmessabweichungen und somit die Rückführbarkeit auf die SI-Einheit Meter. Voraussetzung dafür ist, dass das Netz mindestens eine bekannte Länge (Systemmaßstab) beinhaltet.

- **Vergleich mit unabhängigen Vorwärtsschnitten:**
  Eine durchgreifendere Methode ist die Messung weiterer Bildpunkte. Für eine unabhängige Ermittlung der äußeren Genauigkeit eignet sich die Bestimmung von Referenzpunkten oder Strecken, die aus nicht an der Bündelblockausgleichung teilnehmenden Bildmessungen und den aus der Bündelblockausgleichung stammenden Parametern der inneren und äußeren Orientierung durch räumlichen Vorwärtsschnitt berechnet werden. Dabei werden alle Unsicherheiten der Bündelblockausgleichung eingeschlossen. Dieses Verfahren findet in der Praxis die häufigste Anwendung, die berechneten Orientierungsdaten für weitere Objektmessungen zu nutzen.

Kapitel 4

Akquirierung der Bilddaten

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über die Parameter der Datenaufnahme. Es liefert Informationen zu Aufnahmegebiet (Kapitel 4.1), technischen Eckdaten der verwendeten Geräte (Kapitel 4.2), des aufgenommenen Bildmaterials (Kapitel 4.3) und der gemessenen Passpunkte (Kapitel 4.4). Abschließend werden die verwendeten Softwarepakete vorgestellt (Kapitel 4.5).

4.1 Auswahl des Messgebiets

Für die Suche nach einem passenden Waldgebiet werden eine Reihe an Kriterien festgelegt. Bei einem Abstand von 2 Schritten ($\widehat{=} \sim 1.6$ Metern) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildreihen soll der Baumabstand bei 3 bis 6 Metern liegen, um ausreichend überlappenden Bildinhalt zur Verknüpfungspunktsuche abzudecken. Um ausreichende Belichtung zu gewährleisten, soll es sich außerdem um ein Stück Laub- oder Mischwald handeln. Als Objektkoordinatensystem dient das Landesvermessungssystem, daher ist die Nähe zu einem amtlichen Festpunkt wünschenswert.

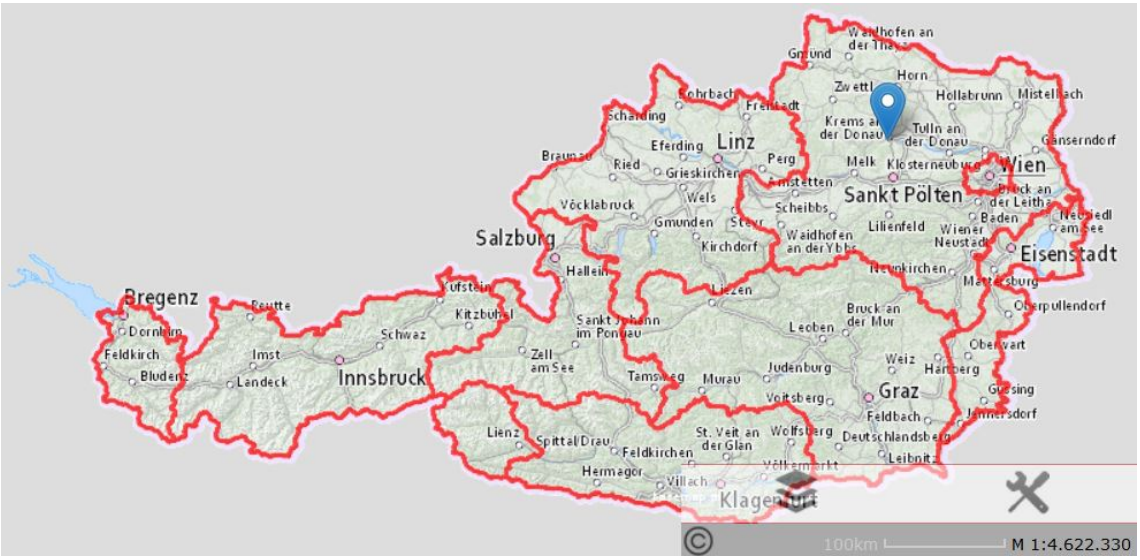


Abb. 4.1: Ausschnitt des Waldstücks von Geoland.at (Stand 13.9.2018). Der blaue Marker zeigt die Position des Aufnahmegebiets.

Die Aufnahmen wurden in einem Stück Wald zwischen Mautern an der Donau und Baumgarten, Niederösterreich, aufgenommen. Abbildung 4.2 zeigt ein Orthophoto des Aufnahmegebiets. Der Aufnahmezeitpunkt Ende März 2017 des ersten Bildsatzes wurde so gewählt, dass noch keine Belaubung vorhanden war. Die Aufnahme des zweiten und dritten Bildsatzes erfolgte Anfang April 2017 bei aufkeimender Belaubung.

Abb. 4.2: Orthophoto des Waldstücks von Geoland.at (Stand 13.9.2018). Der rote Bereich markiert das Aufnahmegebiet.

4.2 Verwendete Geräte

Die Aufnahmen wurden mit der digitalen Spiegelreflexkamera D5000 der Firma Nikon (*www.nikon.de*) gemacht. Näheres zu den technischen Eckdaten der Kamera findet sich in Anhang A.1. Es wurde ein Objektiv mit verstellbarer Brennweite verwendet. Die zur Vermarkung der Passpunkte verwendeten Reflektorfolien stammen von der Firma Leica Geosystems (*www.leica-geosystems.it*). Ebenso wie die zum Einmessen der Passpunkte verwendete Totalstation TCRP 1201+. Die Totalstation verfügt über eine automatische Zielerkennung und liefert eine Winkelauflösung von 1^{cc} (Leica Geosystems AG 2018). Alle weiteren technischen Daten lassen sich Anhang A.2 entnehmen.

4.3 Bildmaterial

Es werden drei Bildsätze aufgenommen, einer am 25.03.2017, zwei am 06.04.2017. Die Bildsätze bestehen jeweils aus 145 Einzelbildern (siehe Abbildung 4.3), die in 29 Bildreihen zu 5 Bildern angeordnet sind, wie Abbildung 4.4 beispielhaft zeigt. Die Überlappung beträgt jeweils in etwa 50 Prozent. Die technischen Eckdaten der Bildsätze können Tabelle 4.1 entnommen werden.

Abb. 4.3: Einzelaufnahme vom 25.03.2017.

Abb. 4.4: Jeweils fünf Bilder bilden eine Bildreihe. Die Bildüberdeckung zwischen den Bildern beträgt etwa 50 Prozent.

Parameter	Wert
Bildgröße	4288 x 2848 px
Belichtungszeit	1/1250 s
Blendenzahl	f 7/1
Brennweite	18 mm
Überlappung	∼ 50 %
Abdeckung	∼ 200 gon

Tab. 4.1: Kameraeinstellung für die Bildaufnahme

4.4 Passpunkte

Passpunkte werden in den ersten Bildreihen gebraucht, um die Orientierungsparameter bestimmen zu können. In den letzten Bildreihen dienen sie zur Bestimmung der erreichten Genauigkeit des Bündelblockausgleichs. Es werden zwei Arten von Passpunkten eingemessen. Einerseits werden im Aufnahmebereich der ersten Bildreihen mit Hilfe von Reflektorfolien künstliche Passpunkte geschaffen. Andererseits werden natürliche Passpunkte (wie Astlöcher, auffällige Rindenzeichnung, usw.) eingemessen. Diese natürlichen Passpunkte werden sowohl zusätzlich zu den Reflektorfolien im Startbereich der Aufnahme gemessen, also auch in den letzten Bildreihen als Kontrollpunkte für die Qualitätsanalyse. Hier wird auf künstliche Passpunkte verzichtet, um das Ergebnis des Bündelblocks durch die markante Vermarkung nicht zu beeinflussen. Abbildung 4.5 lässt die Verteilung der Passpunkte im Anfangs- und Endbereich gut erkennen.

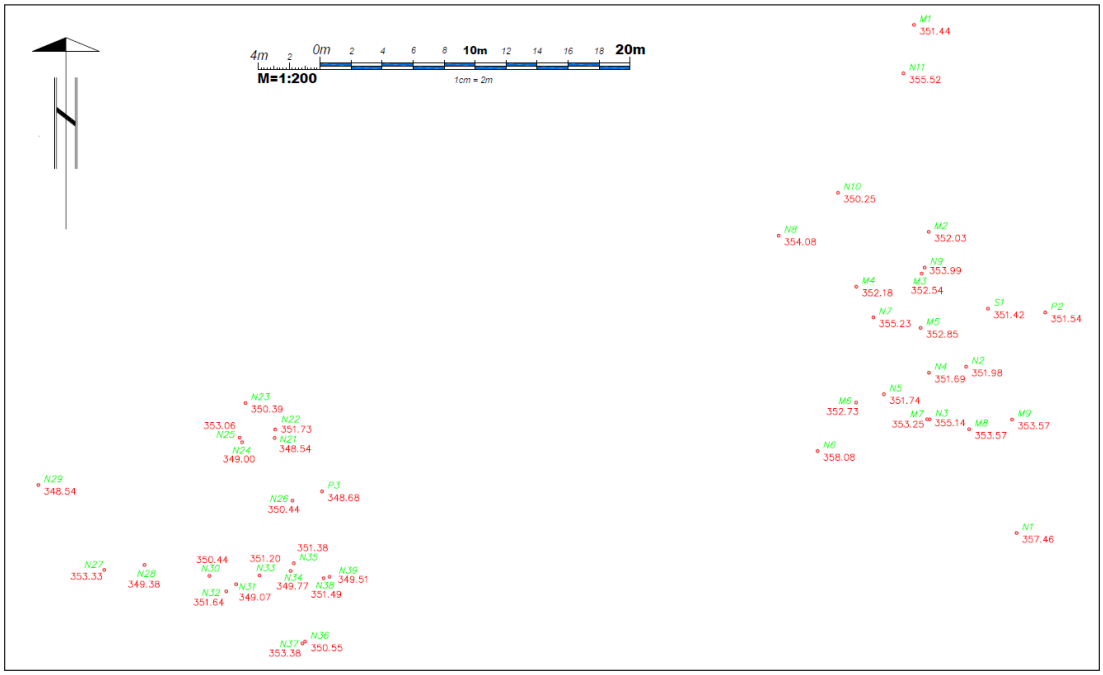


Abb. 4.5: Übersicht über die Verteilung der Passpunkte zu Beginn und Ende des Bildverbands

4.5 Verfügbare Software

Zur Auswertung eines Bildverbandes wird eine Reihe von Softwarepaketen angeboten. Abhängig davon, ob sie aus dem Computer Vision oder photogrammetrischen Bereich kommen, weisen sie verschiedene Ansätze in der Auswertung auf, die jeweils ihre eigenen Stärken und Schwächen mit sich bringen. Die bekanntesten Beispiele aus dem Computer Vision Bereich sind Visual FSM und Agisoft PhotoScan, während OrientAL und Graphos in erster Linie auf photogrammetrische Anwendungen ausgerichtet sind. Anschließend werden mit MATLAB und Octave noch zwei Programme zur Lösung und Visualisierung von mathematischen Anwendungen vorgestellt.

4.5.1 OrientAL

OrientAL (Karel u. a. 2013) bietet das nötige Werkzeug zur manuellen, halb- oder vollautomatischen photogrammetrischen Orientierung eins Bildes bzw. Bildverbandes, zur Kalibrierung einer Kamera und zur Rekonstruktion von Objekten. Es greift dabei auf die Funktionen des Python-Pakets *oriental* zurück. OrientAL beinhaltet weiters die graphische Benutzeroberfläche MonoScope. Der große Vorteil von OrientAL liegt darin, dass es neben allen Werkzeugen zur Orientierung von Bildverbänden auch ein vollwertiges Ausgleichsprogramm darstellt und so eine eingehende Genauigkeitsanalyse der erhaltenen Ergebnisse ermöglicht.

4.5.2 MonoScope

MonoScope ist ein Bildbetrachtungsprogramm, das interaktives Definieren und Betrachten von Bildpunkten ermöglicht. Die Messungen werden in einer SQLite-Datenbank verspeichert und können über Python geladen werden. Mit MonoScope wurden die manuellen Bildmessungen der Passpunkte an Anfang und Ende des Bildverbandes durchgeführt.

4.5.3 Graphos

Bei dem Programmsystem Graphos (inteGRAted PHOtogrammetric Suite) handelt es sich um eine Gemeinschaftsentwicklung verschiedener internationaler Universitäten. Es dient zur Bearbeitung von dichten 3D-Punktwolken, die aus terrestrischen und UAV-Bildern gewonnen werden. Es bietet vor allem Methoden zum Structure-from-Motion-Ansatz. Diverse Alghorithmen für Interest-Operatoren und Deskriptoren sowie zur Zuordnung der Merkmale sind implementiert. Ein Bündelausgleichungsprogramm zur Bildorientierung und 3D-Punktbestimmung ist enthalten. Auch Verfahren zur Erzeugung dichter Punktwolken sind integriert. Es soll die Automatisierung des Auswerteprozesses erleichtert werden. Die Flexibilität soll erhöht werden, indem alle Arten von Bildern, Aufnahmeszenarien und Kameras verwendet werden können. Die photogrammetrische Verlässlichkeit und Wiederholbarkeit sollen gewährleistet werden. GRAPHOS wird zu Forschungs- und Lehrzwecken gratis zur Verfügung gestellt. Einen guten Überblick über die angebotenen Funktionen bietet (González-Aguilera u. a. 2016).

4.5.4 VisualSFM

VisualSFM (*http://ccwu.me/vsfm*) ist eine schnelle, auf Multicore-Berechnungen basierende SfM („Structure from Motion“) Software mit graphischer Benutzeroberfläche. Es ist sowohl der SIFT-Algorithmus auf dem Grafikprozessor (SiftGPU) als auch eine Multicore-Bündelblockausgleichung integriert. Die Kameraparameter werden für jedes Bild berechnet. Die Kamerakonstante (in Pixel) wird automatisch als Näherung aus den EXIF-Daten entnommen. Der Hauptpunkt wird für jedes Bild im Bildzentrum angenommen (bei nicht vorgegebener Kalibrierung) und es wird nur ein Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung verwendet.

4.5.5 Agisoft PhotoScan

Agisoft wurde 2006 gegründet und ist spezialisiert auf Computer Vision Technologie. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung von Anwendungen und Algorithmen zur Bearbeitung von photogrammetrischen Daten. Es bietet Werkzeuge zur 3D-Rekonstruktion,

Visualisierung und zu Mess- und Kartierungsaufgaben. Bei PhotoScan handelt es sich um ein zeitsparendes, technisch effizientes Softwarepaket (Agisoft LLC 2018).

4.5.6 Matlab

MATLAB (*https://www.mathworks.com/products/matlab.html*) ist eine kommerzielle Software des US-amerikanischen Unternehmens MathWorks zur Lösung mathematischer Probleme und zur grafischen Darstellung der Ergebnisse. Matlab ist vor allem für numerische Berechnungen mithilfe von Matrizen ausgelegt, woher sich auch der Name ableitet: MATrix LABoratory. MATLAB ist als preisgünstige Studentenversion verfügbar.

4.5.7 GNU Octave

Octave (*https://www.gnu.org/software/octave*) ist eine freie Software zur numerischen Lösung mathematischer Probleme, wie zum Beispiel Matrizenrechnung, Lösen von (Differential-)Gleichungssystemen, Integration etc. Berechnungen können in Octave mit einer Skriptsprache durchgeführt werden, die weitgehend zu dem proprietären Matlab und zum ebenfalls freien FreeMat kompatibel ist.

Kapitel 5

Auswertung

In diesem Kapitel wird der praktische Teil dieser Arbeit zusammengefasst. Zunächst erläutert es die Aufgabenstellung (Kapitel 5.1), deren praktische Umsetzung (Kapitel 5.2) und die dafür nötigen Vorarbeiten (Kapitel 5.3). Kapitel 5.4 gliedert sich in einen Abschnitt über die Punktbestimmung in MonoScope (Kapitel 5.4.1), den Einfluss von automatischen Verknüpfungspunkten auf das Ergebnis der Bündelblockausgleichung des Ausgangsblocks (Kapitel 5.4.2) und die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung des gesamten Bildverbandes (Kapitel 5.4.3).

5.1 Aufgabenstellung

Aufgabe dieser Diplomarbeit ist es mit Hilfe einer Reihe von Fotos den Pfad des Fotografen zu rekonstruieren, den er durch ein Waldstück genommen hat. Der Pfad hat eine Länge von etwa 50 Metern. Es wird davon ausgegangen, dass der Anfangspunkt koordinativ bekannt ist. Die Aufnahme der Bilder soll ohne Stativ erfolgen. Zur Überprüfung des Ergebnisses soll ein Referenznetz mit Kontrollpunkten geschaffen werden, um die Qualität des rekonstruierten Pfades beurteilen zu können. Dies erfolgt über die Definition und Einmessung von künstlichen und natürlichen Pass- und Kontrollpunkten im österreichischen Landesvermessungssystem.

5.2 Realisierung

Vor Beginn der Aufnahmen wird zunächst ein Referenznetz mithilfe von Passpunkten geschaffen. Dazu werden die Festpunkte um das Aufnahmegebiet erhoben, um einen Anschluss an das Festpunktfeld der Landesvermessung zu ermöglichen. Die Realisierung der künstlichen Passpunkte erfolgt über Reflektorklebefolien der Firma Leica. Die Festlegung der natürlichen Passpunkte erfolgt bei Einmessung im Feld durch Auswahl markanter natürlicher Merkmale, die sich in Bild und Natur eindeutig identifizieren lassen. Als Messgerät wird eine Totalstation TCRP 1201+ der Firma Leica verwendet (Anhang A.2). Die Einmessung der Passpunkte wird zwischen den beiden Aufnahmeterminen vorgenommen. In den ersten Bildreihen finden sich künstliche und natürliche Passpunkte. Sie werden zur Bestimmung der Orientierungsparameter des Anfangsblocks benötigt. Bei den Passpunkten in der letzten Bildreihe handelt es sich ausschließlich um natürliche Passpunkte, die nur zur Kontrolle des Orientierungsergebnisses dienen und nicht in den Bündelblockausgleich mit einfließen.

Die Aufnahme der Bilddaten mit einer Nikon D5000 Kamera (Anhang A.1) erfolgt an zwei Terminen, die so geplant werden, dass die Bäume beim ersten Termin noch völlig laubfrei sind. Am zweiten Termin ist schon aufkeimende Belaubung vorhanden. Näheres zu den verwendeten Geräten und Kameraeinstellungen findet sich in Kapitel 4. Pro Standpunkt des Fotografen werden fünf Bilder aufgenommen, die sich zu etwa 50 Prozent überlappen

und 180° abdecken (90° links und rechts von der Wegachse). Ein Bildverband besteht aus 145 Bildern in 29 Bildreihen. Da die Aufnahmen frei Hand ohne Stativ erfolgen, sind als Folge die Projektionszentren eines Fünferbildverbandes sehr ähnlich, aber nicht ident.

5.3 Vorarbeiten

Als Vorbereitung der Auswertung werden die drei Bildverbände in entsprechender Ordnerstruktur abgespeichert. Die Messdaten der Passpunkte werden von der Totalstation übertragen und mit der Software rmGeo der Firma rmData (*www.rmdata.at*) ausgewertet. Als Ergebnis liegt eine Liste der Passpunkt im Landeskoordinatensystem Gauß-Krüger vor (Anhang B).

Die Auswertung des aufgenommenen Bildverbandes folgt dem üblichen Arbeitsablauf in der Nahbereichsphotogrammetrie, wie er in Kapitel 3.6 dargestellt wird. Zur Auswertung werden verschiedene Softwarepakete verwendet. Die Vorarbeit der manuellen Passpunktmessung wird mit MonoScope (Kapitel 4.5.2) vorgenommen. Zur Orientierung werden OrientAL (Kapitel 4.5.1), Agisoft PhotoScan (Kapitel 4.5.5), VisualSFM (Kapitel 4.5.4) und Graphos (Kapitel 4.5.3) verwendet. Die Visualisierung der Ergebnisse erfolgt durch OrientAL und Matlab.

5.4 Orientierung

5.4.1 Manuelle Bestimmung der Passpunkte in MonoScope

Bevor mit dem eigentlichen Orientierungsprozess begonnen werden kann, muss zuerst ein Zusammenhang zwischen den Bildern und dem Referenzsystem hergestellt werden. Dazu müssen die koordinativ bekannten Passpunkte im Bild identifiziert werden. Dies erfolgt manuell in MonoScope. Dabei legt MonoScope eine SQLite-Datenbank an, in der für jedes Bild innere und äußere Orientierung und gemessene Bildpunkte gespeichert werden.

Abbildung 5.1 zeigt das MonoScope Interface für eines der Bilder. Das “M“ steht dabei für eine Klebemarke, “N“ für einen natürlichen Passpunkt. Pro Bild stehen 5 bis 10 Passpunkte zur Verfügung. Es können nur Passpunkte zum Bündelblockausgleich beitragen, die in mindesten zwei Bildern beobachtet wurden. Die ist gut in der oberen Reihe von Abbildung 5.2 zu erkennen. In den äußeren Randbereichen der beiden äußersten Bilder befinden sich keine Passpunkte. Abbildung 5.3 zeigt die Verteilung der Passpunkte in der letzten Reihe des Bildverbundes. Diese werden ausschließlich zur Beurteilung des Orientierungsergebnisses benötigt.

5.4.2 Einfluss der automatischen Verknüpfer auf die Bestimmung der Orientierungsparameter

Der Ausgangsblock besteht aus den ersten beiden Bildreihen, das entspricht 10 Bildern. Die Orientierungsparameter werden zunächst nur über die eingemessenen Passpunkte bestimmt. In einem zweiten Schritt werden zusätzlich automatische Verknüpfungspunkte bestimmt, um die Redundanz im Ausgleich zu erhöhen. Anschließend werden die Ergebnisse der Orientierung mit und ohne zusätzliche automatische Verknüpfungspunkte verglichen.

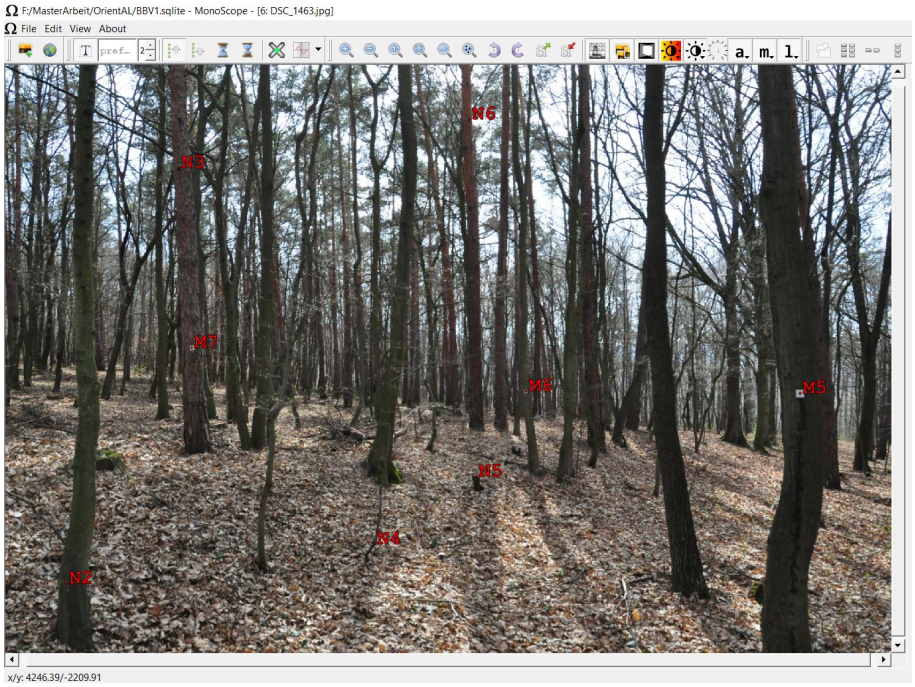


Abb. 5.1: Manuell gemessene Passpunkte in MonoScope. “M“ steht für Klebemarke, “N“ für natürliche Passpunkte.

Abb. 5.2: Verteilung der Passpunkte in der ersten Bildreihe (oben) und in der zweiten Bildreihe (unten).

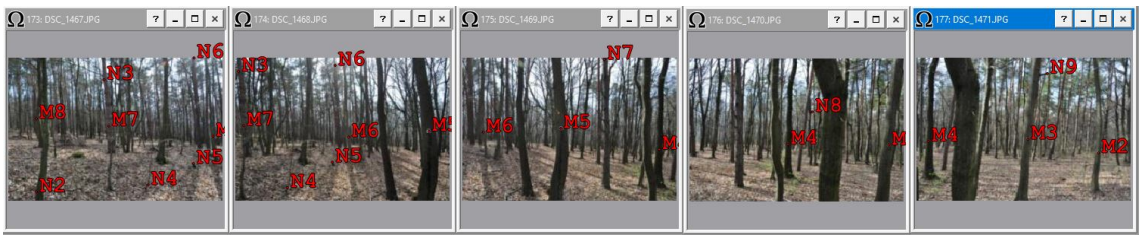


Abb. 5.3: Verteilung der Passpunkte in der letzten Bildreihe.

5.4.2.1 Bestimmung der Näherungswerte der Orientierungsparameter des Ausgangsblocks

Da es sich beim Bündelblockausgleich nicht um ein lineares Ausgleichungsverfahren handelt, werden vorab Näherungswerte der Orientierungsunbekannten benötigt. Diese ersten Näherungswerte können grob geschätzt werden. Die Lage des Projektionszentrums der Bilder im übergeordneten Landeskoordinatensystem wird im Zuge der Passpunktmessung näherungsweise eingemessen, die Orientierung der Bilder kann aus der Lage der gemessenen Passpunkte abgeleitet werden. Die innere Orientierung lässt sich aus Bildgröße und Brennweite abschätzen. Die Koordinaten des Hauptpunktes entsprechen dabei in etwa der halben Länge bzw. Breite der Bildabmessung (in Pixel). Die Kamerakonstante c schätzt man aus der Brennweite. Tabellen 5.1 und 5.2 enthalten die Näherungswerte für die innere und äußere Orientierung.

Innere Orientierung	
x_0	2144 px
y_0	1424 px
c	3410 px

Tab. 5.1: Näherungswerte der innere Orientierung für die Bündelblockausgleichung des Ausgangsblocks

Äußere Orientierung	
1. Bildreihe	
X	-542.65 m
Y	107.35 m
Z	353.00 m
α	+80/+45/+10/-15/-50 gon
ζ	100/100/100/100/100 gon
κ	100/100/100/100/100 gon
2. Bildreihe	
X	-544.35 m
Y	106.80 m
Z	352.85 m
α	+75/+45/+12/-20/-50 gon
ζ	100/100/100/100/100 gon
κ	100/100/100/100/100 gon

Tab. 5.2: Näherungswerte der äußeren Orientierung für die Bündelblockausgleichung des Ausgangsblocks

5.4.2.2 Bestimmung der Orientierungsparameter des Ausgangsblocks über Passpunkte

Die Bestimmung der Orientierungsparameter erfolgt über die in Kapitel 3.3 vorgestellte Bündelblockausgleichung. Es handelt sich in diesem Fall um einen gezwängten Ausgleich, da alle Passpunkte zur Datumsfestlegung verwendet werden. Als Auswertesoftware wird OrientAL (Kapitel 4.5.1) verwendet. Zur Abschätzung werden die Residuen der Passpunkte a priori und a posteriori verglichen. Die a priori Residuen werden mit den Näherungswerten der Orientierungsparameter bestimmt, die a posteriori Residuen mit den ausgeglichenen Orientierungsparametern.

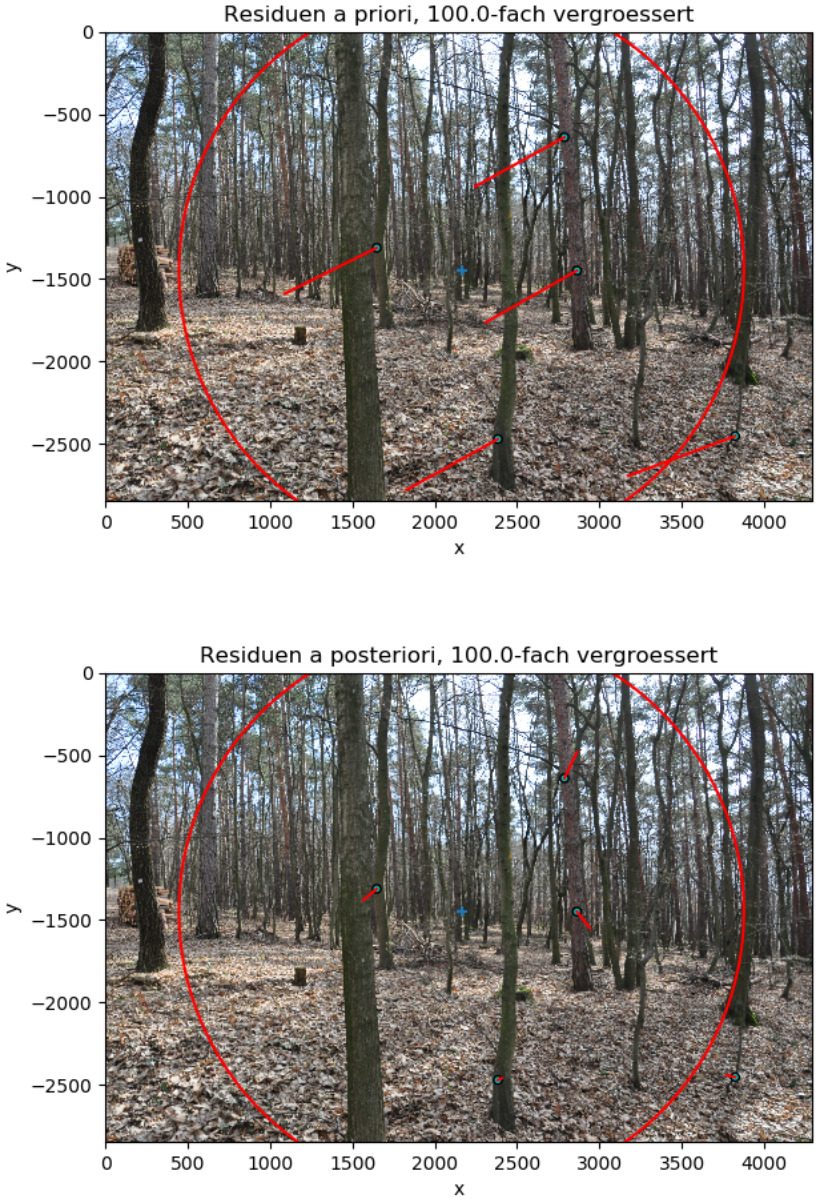
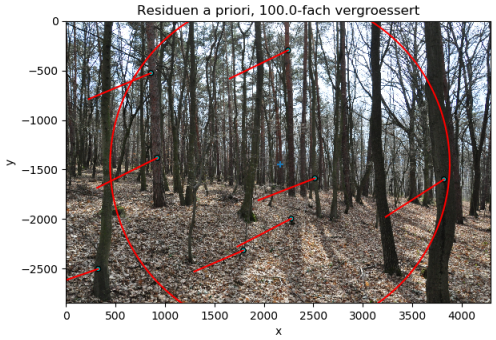
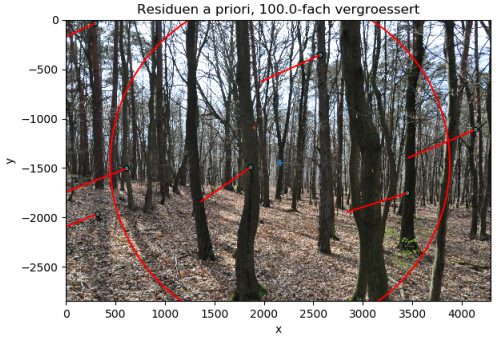
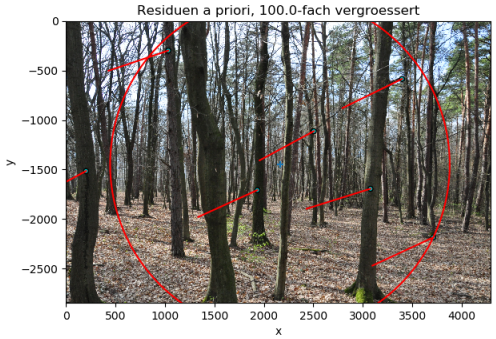


Abb. 5.4: Residuen a priori (oben) und a posteriori (unten) des ersten Bildes der ersten Reihe (Datensatz vom 25.03.2017).







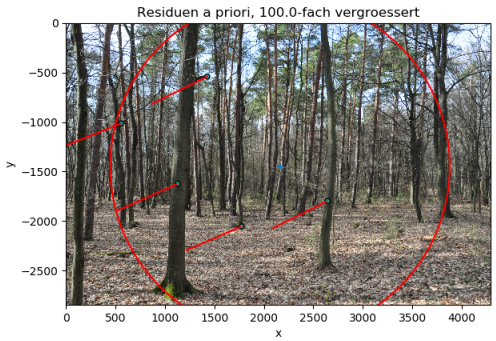
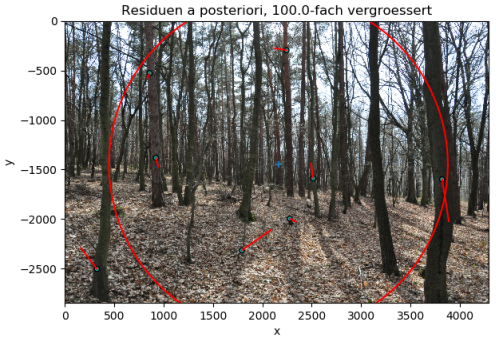
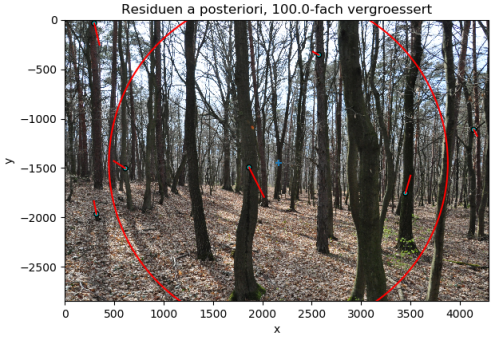
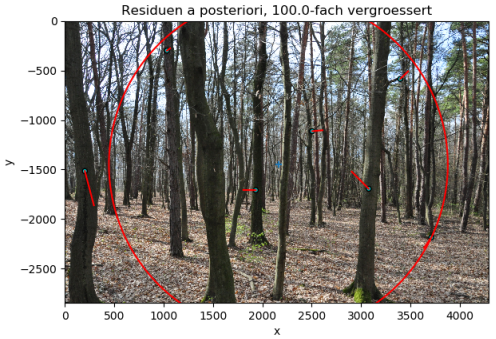


Abb. 5.5: Residuen a priori der ersten Reihe (Datensatz vom 25.03.2017).







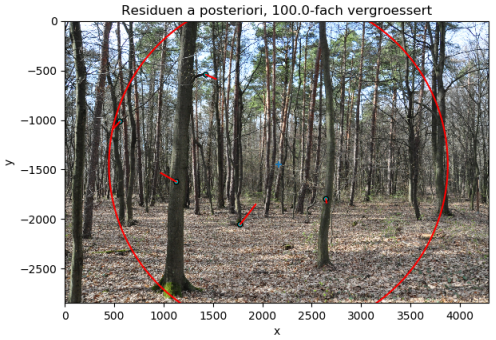


Abb. 5.6: Residuen a posteriori der ersten Reihe (Datensatz vom 25.03.2017).

Wie sich in Abbildung 5.4 oben und Abbildung 5.5 leicht erkennen lässt, zeigen die Residuen vor dem Ausgleich jeweils tendenziell in eine ähnliche Richtung. Dies ist auf einen systematischen Anteil durch die unzureichend genaue Schätzung des Drehwinkels zurückzuführen. Nach der Ausgleichung scheinen die Abweichungen zufällig, wie Abbildung 5.4 unten und Abbildung 5.6 zeigen.

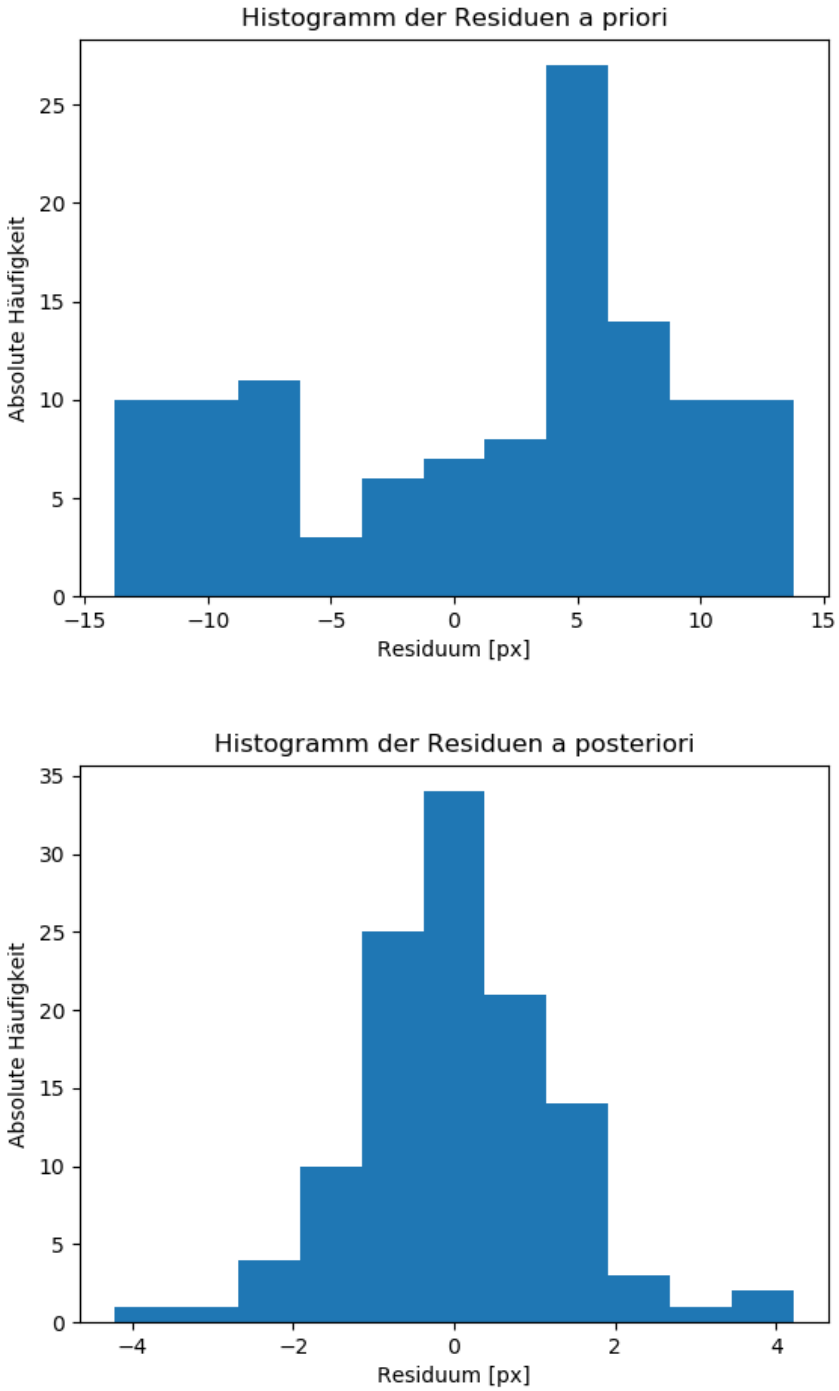


Abb. 5.7: Histogramm der Residuen a priori der Bilder der ersten beiden Bildreihen (Datensatz vom 25.03.2017).

Abbildung 5.7 zeigt die Histogramme der Residuen a priori (oben) und a posteriori (unten). Das Histogramm a priori zeigt eine mit Abschlägen relative Gleichverteilung der Residuen. Dies lässt darauf schließen, dass neben zufälligen Abweichungen noch systematische Einflüsse wirken. Die Residuen a posteriori andererseits folgen der Normalverteilung, wie es bei ausschließlich zufälligen Abweichungen zu erwarten ist.

5.4.2.3 Bestimmung der Orientierungsparameter des Ausgangsblocks über Passpunkte und automatische Verknüpfer

Da nur am Anfang und nicht über die gesamte Länge des Bildverbandes Passpunkte verfügbar sind, ist die Bestimmung von automatischen Verknüpfungspunkten erforderlich, um den gesamten Bildverband orientieren zu können. Als Vorbereitung darauf werden die Orientierungsparameter des Ausgangsblocks nun nicht nur über die Passpunkte bestimmt. Es werden zusätzlich automatische Verknüpfungspunkte bestimmt, die mit in die Bündelblockausgleichung einfließen. Die nötigen Funktionen zur Bestimmung sind in OrientAL enthalten. Eine Übersicht über die gängigen Methoden zur automatischen Punktbestimmung bietet Kapitel 2.9.

Im nächsten Schritt wird versucht die detektierten Punkte passend zu verknüpfen. Dabei kann es zu einem hohen Anteil an falschen Verknüpfungen kommen. Eine Ausreißerfilterung ist daher unerlässlich. Im Zuge dieser Arbeit werden die automatisch gefundenen und zugeordneten Verknüpfungspunkte darauf überprüft, ob

- die Residuen der neuen Punkte nicht zu groß sind (maximal 30 Pixel)
- die neuen Objektpunkte eine realistische Entfernung zum Projektionszentrum aufweisen (maximal 30 Meter)
- die neuen Objektpunkte vor der Bildebene liegen
- die Standardabweichung der neuen Objektpunkte während des Ausgleichs nicht zu groß wird (für die ersten fünf Iterationen maximal 5 Meter, dann maximal 0.5 Meter)

Um einen hohen Anteil an richtigen Verknüpfungen zu erreichen, müssen die Näherungswerte schon sehr gut sein. Im Fall dieser Arbeit wurden aus allen extrahierten Merkmalen 201 Beobachtungen zu 100 Punkten verknüpft. Nach Prüfung der Verknüpfungspunkte durch oben genannte Kriterien verbleiben 37 Verknüpfungspunkte.

In Abbildung 5.8 oben und Abbildung 5.9 lässt sich gut erkennen, dass die Residuen vor dem Ausgleich jeweils Tendenz in eine ähnliche Richtung zeigen. Dies ist auf einen systematischen Anteil durch die unzureichend genaue Schätzung des Drehwinkels zurückzuführen. Nach der Ausgleichung scheinen die Abweichungen zufällig, wie Abbildung 5.8 unten und Abbildung 5.10 zeigt.

Abbildung 5.11 zeigt die Histogramme der Residuen a priori (oben) und a posteriori (unten). Das Histogramm der Residuen hat im Fall von automatischen Verknüpfungspunkten bereits a priori Normalverteilungscharakter. Dies könnte daran liegen, dass der systematische Anteil durch einen unzureichend genauen Näherungswinkel durch einen zufälligen Anteil aus dem Verknüpfungsvorgang überlagert wird. Die Residuen a posteriori andererseits folgen ebenfalls der Normalverteilung.

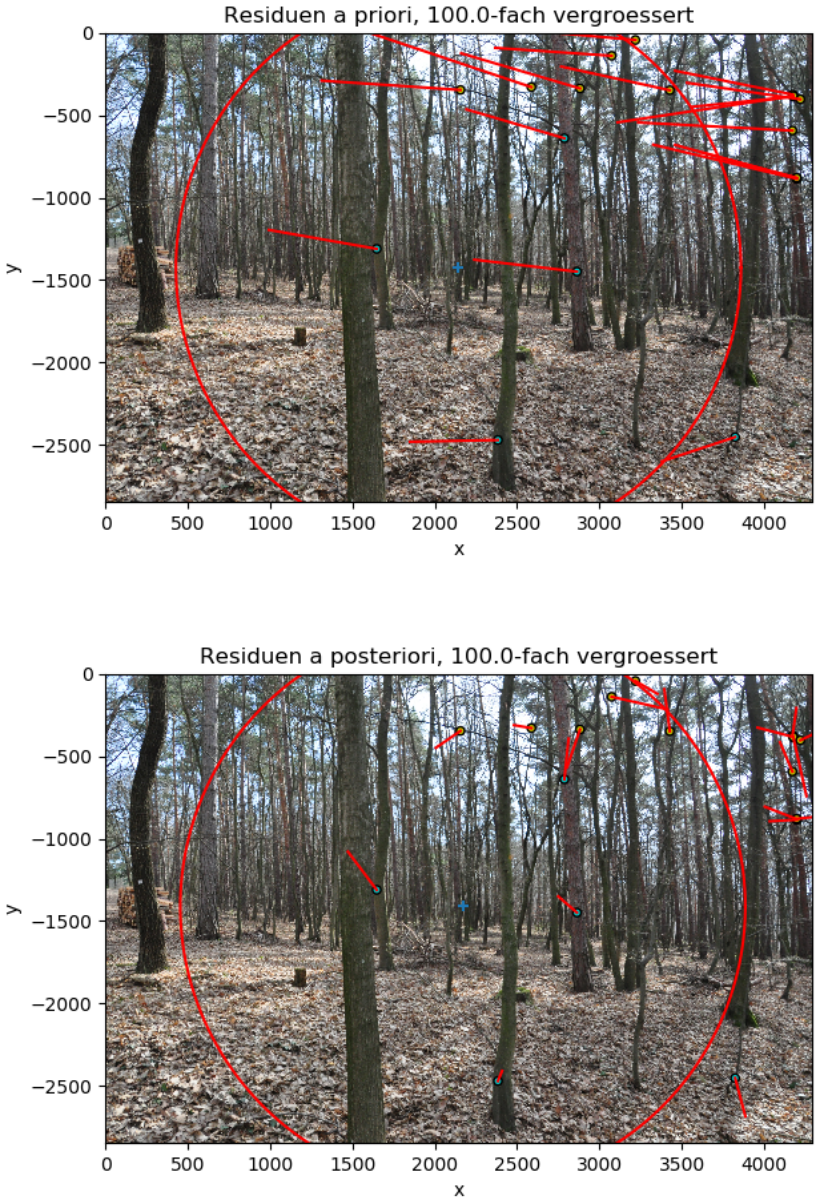


Abb. 5.8: Residuen a priori (oben) und a posteriori (unten) des ersten Bildes der ersten Reihe mit zusätzlichen automatischen Verknüpfungspunkten.(Datensatz vom 25.03.2017).

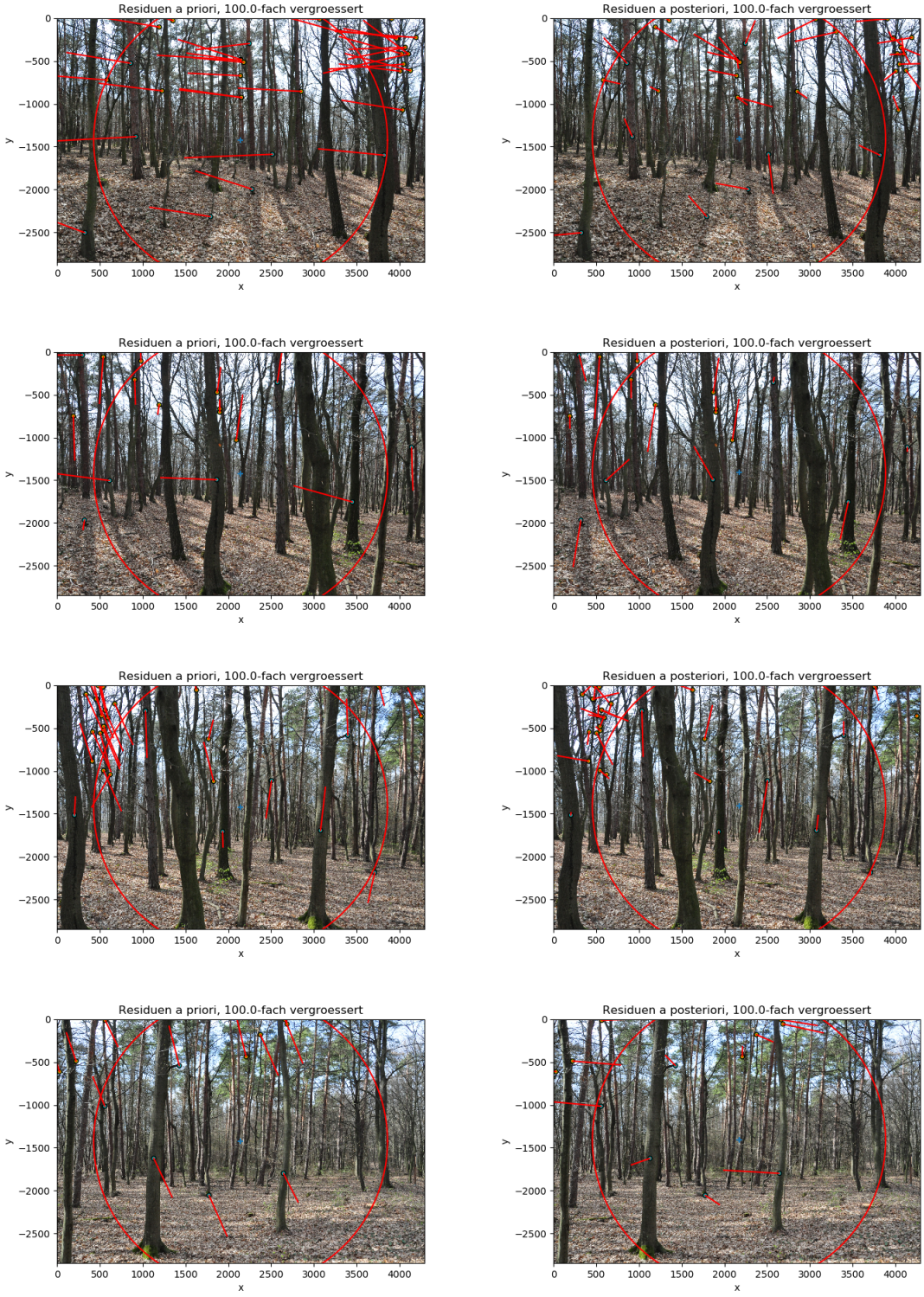


Abb. 5.9: Residuen a priori der ersten Reihe mit zusätzlichen automatischen Verknüpfungspunkten. (Datensatz vom 25.03.2017).

Abb. 5.10: Residuen a posteriori der ersten Reihe mit zusätzlichen automatischen Verknüpfungspunkten.(Datensatz vom 25.03.2017).

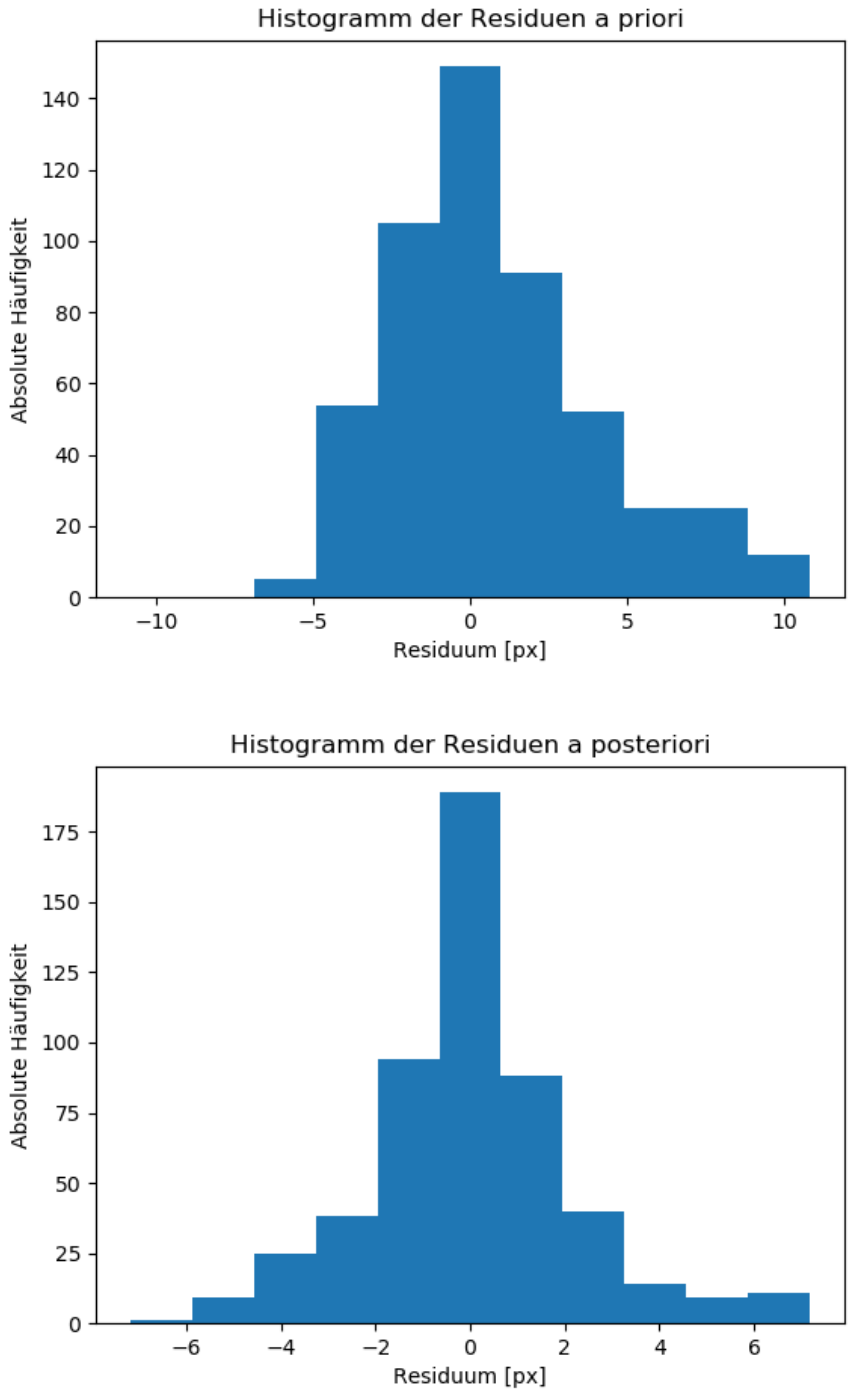


Abb. 5.11: Histogramm der Residuen a priori der Bilder der ersten beiden Bildreihen mit zusätzlichen automatischen Verknüpfungspunkten. (Datensatz vom 25.03.2017).

5.4.2.4 Vergleich der Ergebnisse

Ein genauerer Blick auf die Residuen a posteriori in Abbildung 5.12 zeigt, dass sich die Residuen der Passpunkte durch Hinzunahme der automatischen Verknüpfungspunkte in die Bündelblockausgleichung sowohl in Größe als auch in Lage stark verändern. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich durch die Hinzunahme auch die ausgeglichenen Orientierungsparameter an sich merklich verändern. In Tabelle 5.3 lassen sich die Differenzen zwischen den Orientierungsparametern nachlesen. Am stärksten ist die innere Orientierung betroffen. Bei den Rotationswinkeln kommt es im Maximalfall zu einer Änderung von einem $0,75$ gon. Am unempfindlichsten ist die Position des Projektionszentrums, die sich erst an zweiter Nachkommastelle unterscheidet.

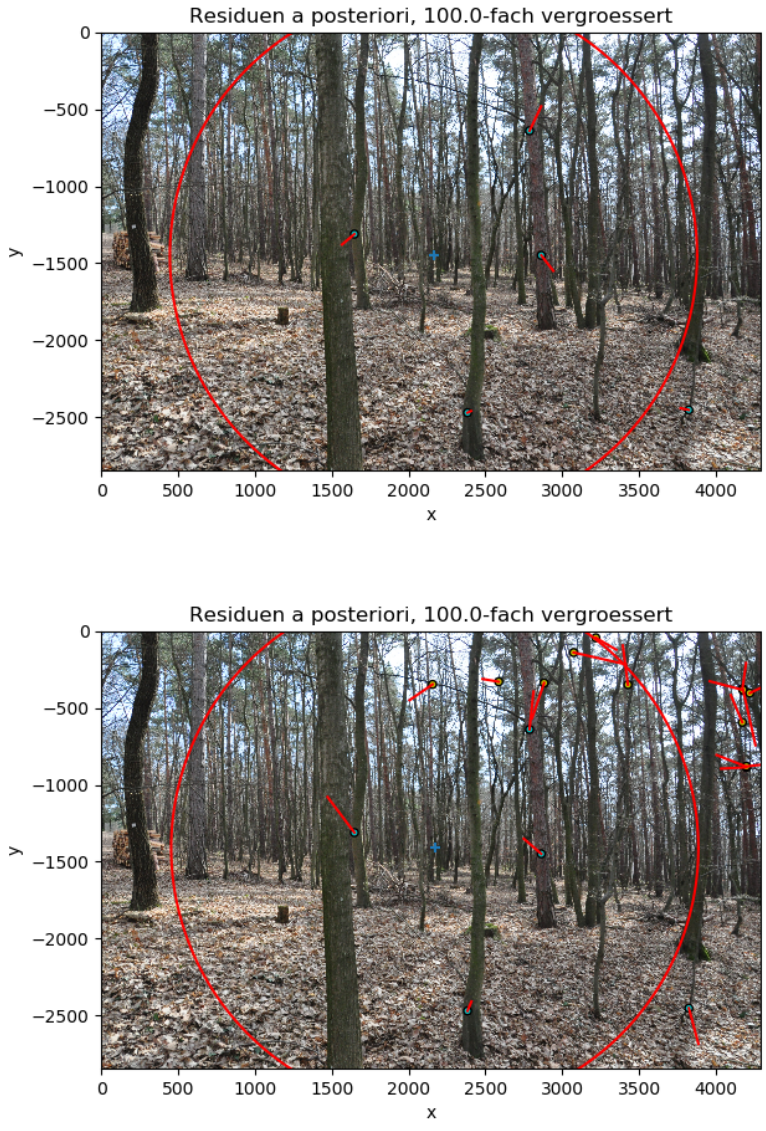


Abb. 5.12: Residuen a posteriori bei Bestimmung der Orientierungsparameter nur über Passpunkte (oben) und zusätzlich automatische Verknüpfungspunkte (unten) des ersten Bildes der ersten Reihe (Datensatz vom 25.03.2017).

Parameter	Wert
Innere Orientierung [px]:	-8.1840 -38.4210 -20.3900
ADPs:	-1.2280e-009
Projektionszentrum [m]:	-0.0260 -0.0300 -0.0090 -0.0380 -0.0230 +0.0040 -0.0880 -0.0140 +0.0100 -0.0500 +0.0200 -0.0080 -0.0400 +0.0540 -0.0050
Rotationswinkel [gon]:	+0.3520 -0.5350 -0.2200 +0.2030 -0.7290 +0.1000 +0.1460 -0.7590 -0.0170 +0.3310 -0.5750 +0.2910 +0.2980 -0.7450 -0.0050

Tab. 5.3: Differenzen der Orientierungsparameter gebildet aus Parametern ohne automatische Verknüpfungspunkte minus Parametern mit automatischen Verknüpfungspunkten.

Vergleicht man Tabelle 5.4, sieht man, dass die maximalen Residuennormen durch die Hinzunahme der automatischen Verknüpfungspunkte steigen. Interessant zu beobachten ist, dass auch im Fall rechts mit einer Ausnahme die Passpunkte die größten Residuen aufweisen. Dies lässt sich auf die Tatsache zurückführen, dass die Anzahl der automatischen Verknüpfungspunkte die der manuell gemessenen Passpunkte deutlich übersteigt. Die Gewichtung liegt daher auf Seiten der automatischen Bildbeobachtungen.

ohne Verknüpfungspunkte	mit Verknüpfungspunkten
DSC_1463.jpg M5 4.28	DSC_1464.jpg a066 7.22
DSC_1468.jpg N4 3.91	DSC_1468.jpg N5 6.69
DSC_1463.jpg N4 3.59	DSC_1466.jpg N8 6.62
DSC_1465.jpg M5 3.58	DSC_1468.jpg N6 6.60
DSC_1464.jpg M5 3.35	DSC_1467.jpg N2 6.56

Tab. 5.4: Die 5 größten Residuennormen. Links ohne automatische Verknüpfungspunkte, rechts mit automatischen Verknüpfungspunkten

Betrachtet man die Standardabweichungen der Orientierungsparameter aus Passpunkten (Tabelle 5.5) und zusätzlich mit den automatischen Verknüpfungspunkten (Tabelle 5.6), fällt im zweiten Fall zwar σ_0 schlechter aus, die Standardabweichungen der Orientierungsparameter bewegen sich jedoch in derselben Größenordnung.

Parameter	Wert
σ_0:	1.84
Innere Orientierung [px]:	5.929 7.163 5.054
ADPs:	2.808e-10
Projektionszentrum [m]:	0.007 0.011 0.008 0.009 0.010 0.007 0.013 0.009 0.011 0.008 0.007 0.006 0.010 0.008 0.007
Rotationswinkel [gon]:	0.129 0.151 0.084 0.129 0.141 0.067 0.087 0.152 0.043 0.126 0.141 0.054 0.105 0.154 0.077

Tab. 5.5: Standardabweichungen ohne automatische Verknüpfungspunkte. Projektionszentrum und Rotationswinkel der ersten Bildreihe.

Parameter	Wert
σ_0:	2.65
Innere Orientierung [px]:	5.342 10.118 4.225
ADPs:	2.808e-10
Projektionszentrum [m]:	0.005 0.008 0.003 0.006 0.006 0.003 0.010 0.004 0.003 0.010 0.004 0.003 0.007 0.006 0.003
Rotationswinkel [gon]:	0.093 0.189 0.109 0.091 0.188 0.055 0.087 0.184 0.077 0.081 0.190 0.070 0.108 0.190 0.179

Tab. 5.6: Standardabweichungen mit automatischen Verknüpfungspunkte. Projektionszentren und Rotationswinkel der ersten Bildreihe.

5.4.3 Orientierung des gesamten Bildverbandes

5.4.3.1 Vororientierung des Bildverbandes

Bevor die eigentliche Orientierung des Bildverbandes vorgenommen werden kann, müssen zuerst alle nötigen Näherungswerte und automatischen Verknüpfungspunkte bestimmt werden. Dies erfolgt über eine Vororientierung des Bildverbandes in PhotoScan (Kapitel 4.5.5). Für zwei Bilder ist keine Vororientierung möglich: DSC_1587 aus Reihe 26 und DSC_1592 aus Reihe 27. Sie nehmen an den weiteren Schritten der Auswertung nicht mehr teil.

Die genäherten Orientierungsparameter und automatischen Verknüpfungspunkte werden für jedes Bild mit OrientAl in eine SQLite-Datenbank importiert. Sie beinhaltet sämtliche Bild- und Objektpunkte, die PhotoScan bestimmt hat. Die Datenbank wird um die manuellen Bildmessungen der Passpunkte und deren Objektkoordinaten erweitert.

Basierend auf den bestimmten Vororientierungen werden die Residuen a priori der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes berechnet. Es werden nur Kontrollpunkte ausgegeben, die in mindestens zwei Bildern beobachtet werden. Tabelle 5.7 zeigt die Residuen in Metern. Es fällt auf, dass die größten Residuen in X-Richtung bei den Kontrollpunkten N27 und N29 auftreten. Ein Blick auf die letzte Bildreihe zeigt, dass diese beiden Kontrollpunkte am weitesten vom Aufnahmestandpunkt entfernt sind, was bei unzureichenden Näherungswerten und schleifender Schnittgeometrie beim Vorwärtsschnitt (siehe Kapitel 2.6.1) schnell zu großen Abweichungen führt.

Pkt Nr.	**ΔX**	**ΔY**	**ΔZ**	**|ΔXY|**	**|ΔXYZ|**
N26	-0.767	0.329	-0.193	0.834	0.856
N27	10.036	3.687	-2.851	10.692	11.065
N28	6.603	2.975	0.396	7.242	7.253
N29	29.230	-2.058	2.810	29.302	29.437
N30	-0.428	0.750	-0.245	0.863	0.897
N31	0.788	2.105	0.225	2.247	2.259
N32	0.672	2.040	-0.666	2.148	2.249
N34	-0.036	2.770	0.148	2.770	2.774
N35	0.102	3.111	-1.122	3.113	3.309

Tab. 5.7: A priori Abweichungen der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes (in Meter). Die Abweichungen berechnen sich aus vorwärtsgeschnittener Objektpunktkoordinate minus tachymetrisch gemessener Objektpunktkoordinate.

Es werden auch die Residuen a priori der Kontrollpunkte im Bildraum bestimmt. Die Residuen werden in Tabelle 5.8 zusammengefasst. Aufgrund der stark wechselnden Perspektiven und da die Überdeckung der Bilder nur 50 Prozent beträgt, wird kein Kontrollpunkt in mehr als zwei nebeneinander liegenden Bildern beobachtet. Von den 19 tachymetrisch eingemessenen Kontrollpunkten (Anhang B.1) werden daher nur jene ausgegeben, die in mindestens zwei Bildern beobachtet werden.

Pkt Nr.	Bild	ΔX	ΔY	|ΔXY|
N26	DSC_1605	0.063	0.773	0.775
N26	DSC_1606	-0.047	-1.107	1.108
N27	DSC_1604	0.022	4.382	4.382
N27	DSC_1605	-0.442	-3.967	3.991
N28	DSC_1604	-0.715	-6.117	6.159
N28	DSC_1605	0.364	5.489	5.501
N29	DSC_1604	0.142	1.288	1.296
N29	DSC_1605	-0.098	-1.426	1.429
N30	DSC_1603	-0.022	-0.294	0.295
N30	DSC_1604	0.027	0.300	0.301
N31	DSC_1603	-0.484	-4.947	4.970
N31	DSC_1604	-0.000	4.580	4.580
N32	DSC_1603	0.373	7.314	7.324
N32	DSC_1604	-0.922	-6.673	6.736
N34	DSC_1602	-0.095	-0.915	0.920
N34	DSC_1603	0.056	0.869	0.871
N35	DSC_1602	1.581	8.821	8.961
N35	DSC_1603	-2.870	-8.331	8.812

Tab. 5.8: A priori Abweichungen der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes (in Pixel). Die Abweichungen berechnen sich aus rückprojizierter Bildkoordinate minus manuell gemessener Bildkoordinate.

5.4.3.2 Optimierung der Orientierung des Bildverbandes

Nach erfolgreicher Vororientierung in PhotoScan erfolgt die anschließende Bündelblockausgleichung in OrientAL, das dafür eine entsprechendes Skript bietet. Der Aufruf des adjust-Skripts entfernt Ausreißer in den Bildbeobachtungen und schätzt verbesserte innere und äußere Orientierungsparameter. Die Standardabweichung der manuellen Bildmessungen wird mit 1.6 Pixel angenommen, die der automatischen Bildmessungen mit 0.2 Pixel. Die Standardabweichung der Passpunkte wird auf 2 Zentimeter geschätzt. σ_0 wird a priori mit 1 angenommen. Die Genauigkeitsangaben a priori finden sich übersichtlich in Tabelle 5.9.

Parameter	Wert
σ manuell	1.6 px
σ auto	0.2 px
σ Passpunkt	2 cm
σ_0 a priori	1

Tab. 5.9: Übersicht über die Eingangsparameter der Bündelblockausgleichung.

5.4.3.3 Ergebnis der Orientierung des Bildverbandes

Die Anzahl der an der Ausgleichung teilgenommenen Punkte fasst Tabelle 5.10 zusammen. Da die Netzgeometrie suboptimal ist, kommen vom Gleichungslöser der Bündelblockausgleichung eine Reihe von Warnungen über nicht positiv definite Matrizen. Im Zuge der Ausreißerkontrolle werden 7408 Bildpunkte und 1910 Objektpunkte entfernt, deren Bildresiduennorm größer 3 ist. Außerdem werden alle Bilder entfernt, die weniger als 7 Verknüpfungspunkte enthalten. Von den 145 Bildern des Bildverbandes bleiben nach Vororientierung durch PhotoScan und Optimierung der Orientierungen in OrientAL also 140 Bilder übrig, für die eine endgültige Orientierung bestimmt werden kann.

Parameter	**Wert**
# Bilder	140
# Verkn. Pkt (Bildraum)	45749
# Verkn. Pkt (Objektraum)	14967
# Kontrollpkt. (Bildraum)	58
# Kontrollpkt. (Objektraum)	16

Tab. 5.10: Übersicht über die Kenngrößen des Bündelblocks.

Ergebnis der Auswertung sind die ausgeglichenen Parameter der inneren (Tabelle 5.11) und äußeren Orientierung (Projektionszentren im Anhang in Tabelle B.4) aller Bilder des Bildverbandes sowie die Objektkoordinaten der automatischen Verknüpfungspunkte (Tabelle 5.12). Alle Ergebnisse werden in der bereits bekannten SQLite-Datenbank abgespeichert. Außerdem erstellt OrientAL ein Protokoll zu den Genauigkeiten der Bündelblockausgleichung. Eine 3D-Visualisierung der Verknüpfungspunkte und Kamerapositionen ist ebenfalls verfügbar. Aus den Koordinaten der Projektionszentren lässt sich der Pfad des Fotografen rekonstruieren, wie in den Abbildungen 5.13 und 5.14 zu sehen ist.

Kamera ID	$\mathbf{x}_0$	$\mathbf{y}_0$	**c**
0	2145.680	-1438.493	3386.315
1	2149.502	-1462.066	3852.635

Tab. 5.11: Ausgeglichene Parameter der inneren Orientierung.

Obwohl zur Aufnahme des Bildverbandes nur eine Kamera verwendet wird, liefert PhotoScan zwei innere Orientierungen. Tabelle 5.11 zeigt, dass sich vor allem die Kammerkonstante deutlich verändert. Daraus lässt sich schließen, dass die eingestellte Brennweite nicht über die gesamte Strecke konstant war. Hierbei handelt es sich um einen Fehler während der Bildaufnahme. Für die ersten 18 Reihen werden die Parameter von Kamera 0 verwendet. Ab der 19. Reihe ist eine ausreichende Vororientierung mit diesen Parametern nicht mehr möglich. Als Folge kann für DSC_1557 keine Orientierung mehr bestimmt werden. Das Bild wird aus dem Bündelblock entfernt. Für das letzte Drittel des Bildverbandes wird die innere Orientierung von Kamera 1 verwendet.

Pkt Nr.	X	Y	Z
N26	-56586.643	360095.341	350.636
N27	-56596.879	360091.496	353.220
N28	-56594.911	360091.667	349.731
N29	-56600.918	360096.358	348.985
N30	-56591.319	360090.940	350.654
N31	-56589.845	360090.363	349.390
N32	-56590.290	360090.011	351.759

Tab. 5.12: Ausgeglichene Objektkoordinaten der Kontrollpunkte.

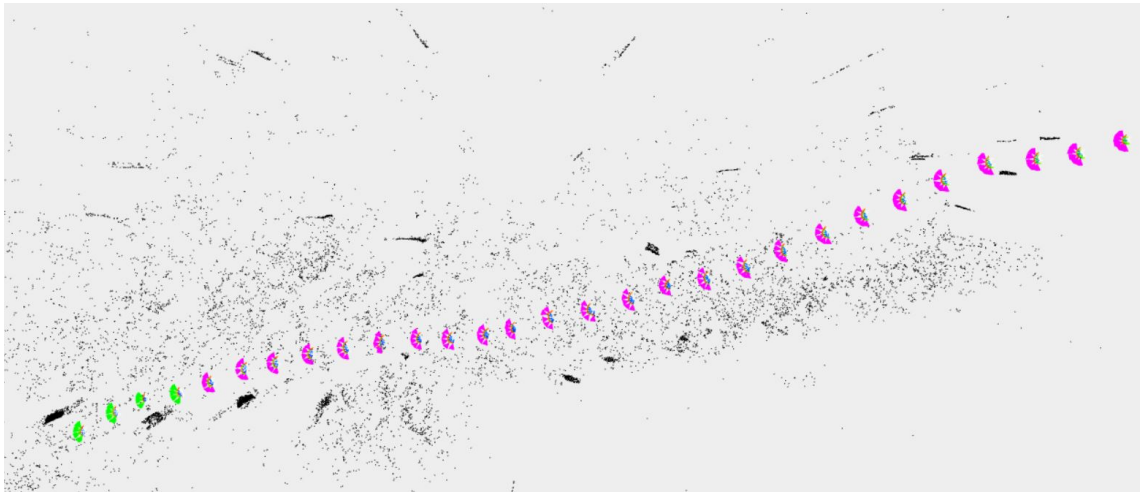


Abb. 5.13: Blick von oben auf den rekonstruierten Pfad.

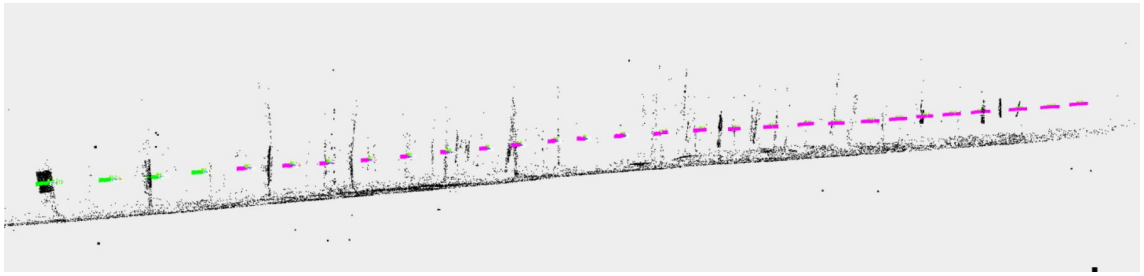


Abb. 5.14: Blick normal auf den rekonstruierten Pfad.

Die aus den automatischen Verknüpfungspunkten bestimmten Objektpunkte ermöglichen eine Rekonstruktion der Struktur der Umgebung. In Abbildung 5.15 lassen sich gut Teile des Bodens und ringsum stehender Baumstämme erkennen. Die geringe Punktdichte lässt sich darauf zurückführen, dass es sehr schwer ist im Wald gut definierte Verknüpfungspunkte zu finden. Es sind kaum scharfe Kanten zur guten Merkmalsextraktion vorhanden. Außerdem sind die Perspektiven zwischen den Aufnahmen stark unterschiedlich.

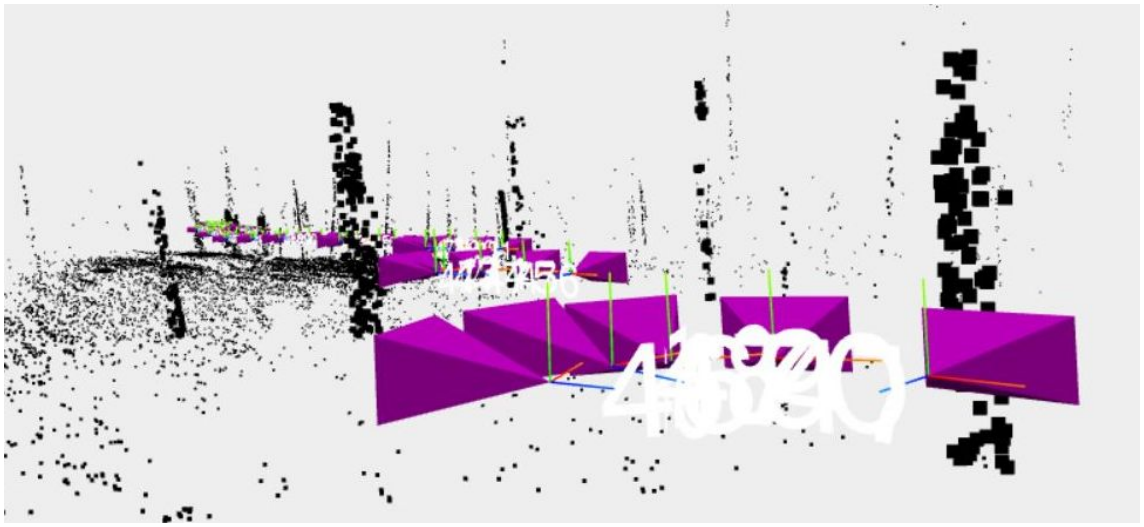


Abb. 5.15: Blick entlang des rekonstruierten Pfads.

5.4.3.4 Fehler bei der Orientierung des Bildverbandes

Bild nicht orientiert: Von den 145 aufgenommenen Bildern des Bildverbandes sind fünf Bilder aus unterschiedlichen Gründen nicht orientierbar. Wie bereits in Kapitel 5.4.3.1 beschrieben, ist für zwei Bilder (DSC_1587 aus Reihe 26 und DSC_1592 aus Reihe 27) keine Vororientierung durch PhotoScan möglich. Um zur Genauigkeitsanalyse die S_{xx}-Matrix berechnen zu können, darf die Ausgleichung kein Rangdefizit aufweisen. Das wäre für 3 Bilder der Fall. Diese Bilder (DSC_1593 aus Reihe 27, DSC_1597 aus Reihe 28 und DSC_1602 aus Reihe 29) müssen daher aus der Ausgleichung ausgeschlossen werden.

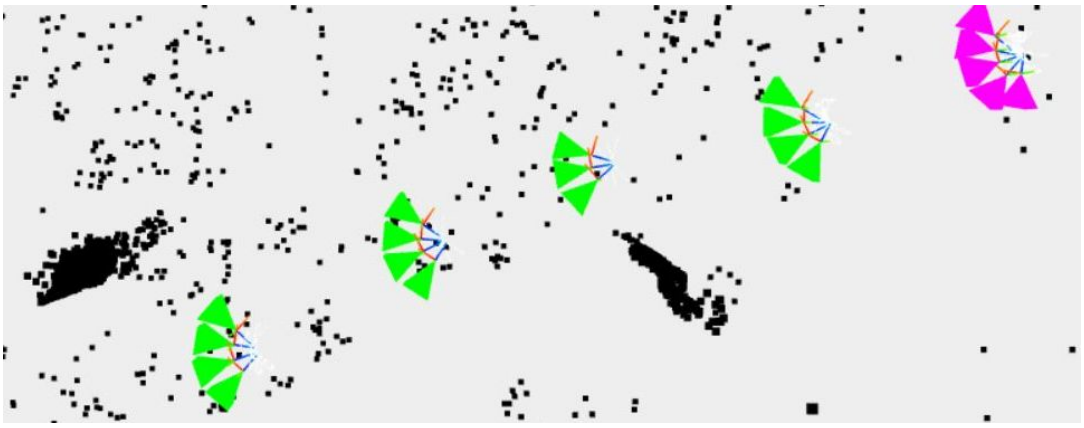


Abb. 5.16: Unvollständige Bildreihen (nicht vororientierbar oder im Zuge des Ausgleichs eliminiert).

Bilder falsch orientiert: Das Bild DSC_1557 in der 19. Bildreihe ist nach der Bündelblockausgleichung nicht richtig orientiert, wie Abbildung 5.17 eindeutig zeigt. Zur Orientierung stehen nur automatische Verknüpfungspunkte zu Verfügung. In Tabelle B.2 sieht man, dass für Bild DSC_1557 nur 15 automatische Verknüpfungspunkte gefunden wurden, deren konvexe Hülle nur 11 Prozent einnimmt. Ein Blick in die SQLite-Datenbank zeigt, dass 14

Verknüpfungspunkte vertikal entlang eines Baumstammes liegen. Diese Tatsache erklärt, warum vor allem der erste Drehwinkel α eine so große Abweichung aufweist.

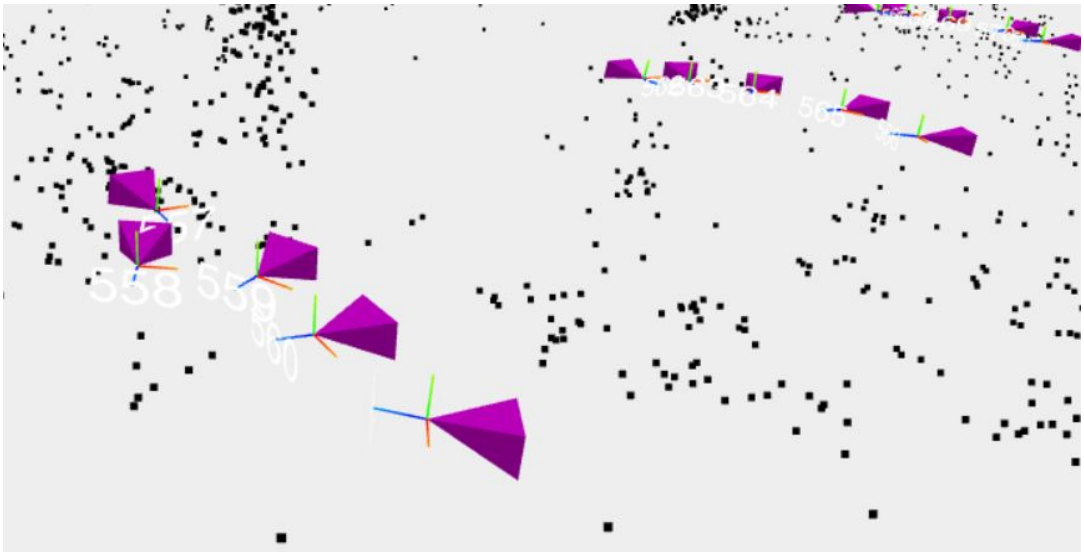


Abb. 5.17: Falsch orientiertes erstes Bild (DSC_1557) in der Bildreihe 19.

5.4.3.5 Qualität der Orientierung des Bildverbandes: Allgemein

Die Bündelblockausgleichung in OrientAL gibt neben den Orientierungsparametern auch eine Reihe von Parametern zur Abschätzung der erreichten Qualität aus. Tabelle 5.13 gibt einen Überblick über die Genauigkeit des Bündelblockausgleichs. Es stehen in etwa doppelt so viele Beobachtungen zur Verfügung wie zur Bestimmung der Unbekannten notwendig wären. Bei einem σ_0 a priori von 1 beträgt das σ_0 a posteriori 1.234. Da σ_0 a priori und σ_0 a posteriori eine ähnliche Größenordnung aufweisen, kann daraus geschlossen werden, dass die a priori angenommenen Standardabweichungen der manuellen und automatischen Bildpunktmessungen sowie der tachymetrischen Messungen der Objektpunkte (siehe Tabelle 5.9) gut gewählt sind.

Parameter	**Wert**
# Beobachtungen	91662
# Unbekannte	45749
Redundanz	45913
σ_0 a priori	1.000
σ_0 a posteriori	1.234

Tab. 5.13: Übersicht über die Ausgleichsparameter.

In Summe werden 45749 Verknüpfungspunktsbeobachtungen in 140 Bildern in die Ausgleichung aufgenommen. Die Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Bild variiert dabei stark, wie Tabelle 5.14 zeigt. Die Bilder weisen zwischen 10 und 1565 Bildbeobachtungen von Verknüpfungspunkten auf.

Statistischer Wert	#auto	#manu
min	10	0
med	293	0
max	1565	8

Tab. 5.14: Statistik über die Anzahl der Bildbeobachtungen pro Bild, links der automatischen Verknüpfungspunkte, rechts der manuell gemessenen Passpunkte.

Ebenfalls stark variierend ist die Verteilung der Verknüpfungspunkte innerhalb des Bildes. Tabelle 5.15 enthält eine Statistik darüber, wie viel Fläche die konvexe Hülle (umschließt alle Verknüpfungspunkte eines Bildes) im Vergleich zur Gesamtfläche des Bildes einnimmt. Ideal wäre eine gleichmäßige Verteilung der Verknüpfungspunkte über den gesamten Bildbereich. In diesem Fall weisen jedoch nur drei Bilder einen Wert von über 70 Prozent auf. Es muss weiterhin beachtet werden, dass die konvexe Hülle keine Angaben über die Gleichmäßigkeit der Verteilung zulässt. Um diese beurteilen zu können, ist das Bild selbst zu betrachten, das in der resultierenden SQLite-Datenbank enthalten ist. Eine bildweise Aufzählung der Anzahl der automatischen und manuellen Verknüpfungspunkte sowie der prozentualen Fläche der konvexen Hülle findet sich im Anhang B.2.

<10%	10% - 30%	30% - 50%	50% - 70%	> 70%
0	15	43	40	2

Tab. 5.15: Statistik über die von der konvexen Hülle der automatischen Verknüpfungspunkte eingenommenen Fläche im Verhältnis zur Bildfläche.

5.4.3.6 Qualität der Orientierung des Bildverbandes: Residuen

Automatische Verknüpfungspunkte: Das adjust-Skript bietet eine Reihe von statistischen und graphischen Auswertungen zu den auftretenden Residuen im Bündelblockausgleich. Die normierten Residuen der Verknüpfungspunkte werden in Form eines Histogramms als Grafik ausgegeben (Abbildung 5.18). Die meisten Residuennormen bewegen sich in einem Bereich von 0.3 Pixel bis 1.3 Pixel.

Statistischer Wert	Δx	Δy	|Δxy|
min	-0.660	-0.696	0.000
med	-0.000	0.000	0.194
max	0.716	0.625	0.716

Tab. 5.16: Statistik der a posteriori Residuen der automatischen Verknüpfungspunkte (in Pixel).

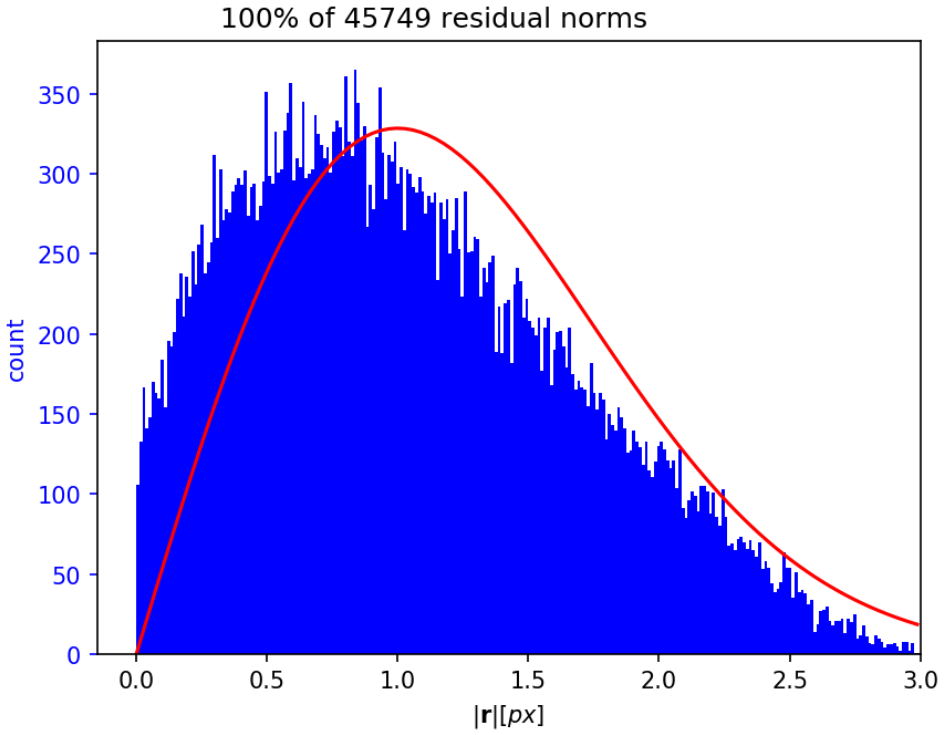


Abb. 5.18: Histogramm der Residuen der automatischen Verknüpfungspunkt.

Passpunkte: Auch für die Passpunkte werden die Residuen der Bild- und Objektkoordinaten statistisch ausgewertet (Tabelle 5.17 und Tabelle 5.18).

Statistischer Wert	**Δx**	**Δy**	**|Δxy|**
min	-9.549	-10.684	0.329
med	-0.021	0.033	1.642
max	7.731	10.044	14.329

Tab. 5.17: Statistik der a posteriori Residuen der Passpunkte (in Pixel).

Statistischer Wert	**ΔX**	**ΔY**	**ΔZ**	**|ΔXYZ|**
min	-0.056	-0.034	-0.051	0.011
med	-0.002	-0.001	0.004	0.028
max	0.152	0.035	0.021	0.162

Tab. 5.18: Statistik der a posteriori Residuen der Passpunkte (in Meter).

Außerdem werden die Residuen im Objektraum in Abbildung 5.19, getrennt in Lage und Höhe, dargestellt. Der Passpunkt N7 weist deutlich höhere Residuen auf als die restlichen Passpunkte. Ein Blick auf Tabelle 5.19 und Tabelle 5.20 bestätigt, dass es sich bei N7 sowohl im Bildraum als auch im Objektraum um den am schlechtesten definierten Passpunkt handelt. Grund dafür mag sein, dass N7 ein natürlicher Passpunkt in Form eines Astlochs ist, dessen Zentrum sich beim manuellen Einmessen nur annähernd schätzen lässt. In Tabelle 5.20 fällt auf, dass vor allem das Residuum in X-Richtung sehr groß ist. Der Hauptgrund dafür ist vermutlich wieder die schlechte Schnittgeometrie beim Vorwärtsschnitt.

Pkt Nr.	**Bild**	**Δx**	**Δy**	**|Δxy|**
N7	DSC_1469	-9.549	-10.684	14.329
N7	DSC_1465	5.213	10.044	11.316
N7	DSC_1464	7.731	4.096	8.749
N3	DSC_1467	1.618	-5.909	6.126
N4	DSC_1468	-1.611	-5.760	5.982
N4	DSC_1462	2.864	5.147	5.890
N3	DSC_1468	-1.084	5.389	5.497
M5	DSC_1468	4.359	0.074	4.359
N6	DSC_1464	0.719	3.686	3.755
N8	DSC_1466	1.810	3.257	3.726

Tab. 5.19: Liste der schlechtesten Passpunktbeobachtungen (in Pixel).

Pkt Nr.	**ΔX**	**ΔY**	**ΔZ**	**|ΔXYZ|**
N7	0.152	0.023	-0.051	0.162
M5	-0.056	-0.006	-0.019	0.060
N4	-0.045	-0.034	0.005	0.057
M3	-0.051	0.010	0.015	0.054
N10	0.028	0.035	0.003	0.045
N9	-0.038	0.005	0.021	0.044
M8	0.022	0.018	0.010	0.030
N2	-0.009	-0.023	0.015	0.029
M4	-0.026	0.003	-0.007	0.027
N6	0.021	-0.012	-0.009	0.025

Tab. 5.20: Liste der schlechtesten Passpunktbeobachtungen (in Meter).

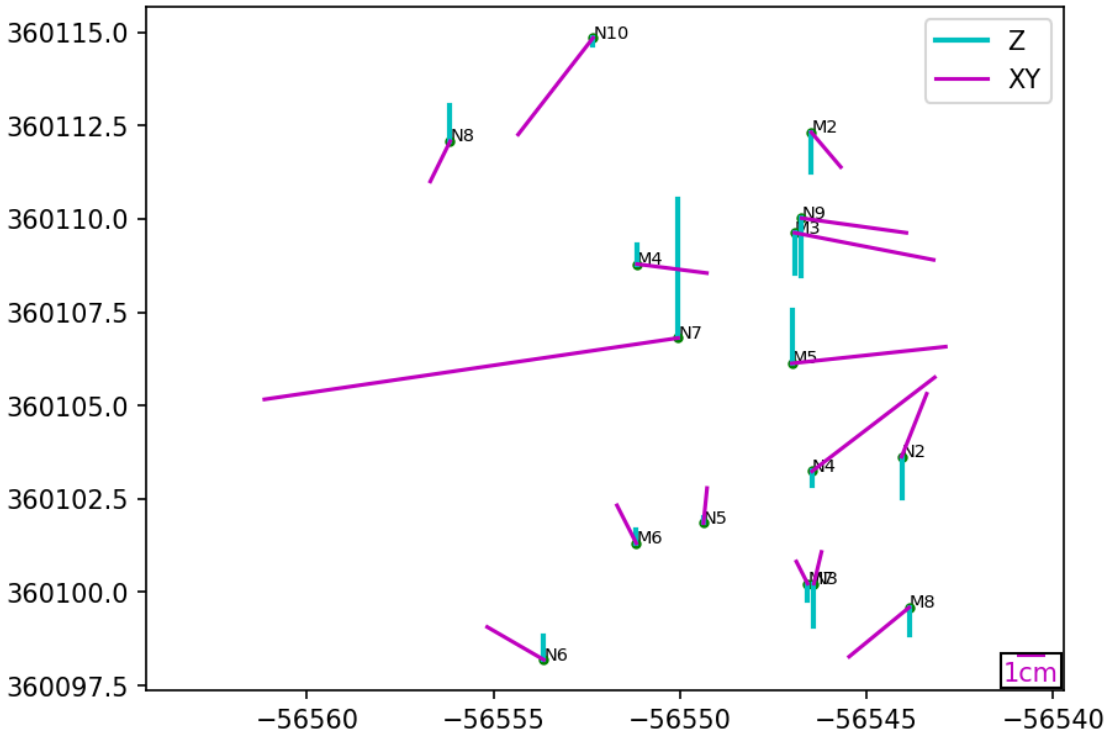


Abb. 5.19: Residuen der Passpunkte a posteriori. In Violett die Abweichung in der Lage, in Cyan die Höhenabweichung.

Kontrollpunkte: Das adjust-Skript in OrientAL erlaubt die Angabe von Punktnamen, die als Kontrollpunkte dienen. Diese Kontrollpunkte fließen nicht in die Ausgleichung mit ein. Nach Abschluss der eigentlichen Bündelblockausgleichung werden die Punkte aber an Hand der Bildbeobachtungen vorwärts geschnitten und die Differenzen zwischen den berechneten Punktkoordinaten und den dazugehörigen Kontrollpunktkoordinaten ausgegeben.

Die Differenzen zwischen ausgeglichenen Objektkoordinaten und tachymetrisch eingemessenen Kontrollpunktkoordinaten finden sich Tabelle 5.21. Es treten Fehler von bis zu 3 Metern auf. Angesichts der Netzwerkgeometrie und der damit verbundenen Problematik im Wald gut definierte, automatische Verknüpfungspunkte zu finden, besonders wenn die Perspektiven stark unterschiedlich sind, handelt es sich dabei um erwartbare Ergebnisse.

Pkt. Nr.	ΔX	ΔY	ΔZ	|ΔXY|	|ΔXYZ|
N26	-0.907	-0.351	-0.196	0.973	0.993
N27	-2.811	-0.986	0.110	2.979	2.981
N28	-2.189	-0.837	-0.351	2.343	2.370
N29	-3.032	-0.368	-0.445	3.054	3.087
N30	-1.591	-0.820	-0.224	1.790	1.804
N31	-1.345	-0.773	-0.320	1.552	1.584
N32	-1.530	-0.881	-0.119	1.765	1.769

Tab. 5.21: A posteriori Residuen der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes (in Meter). Die Residuen berechnen sich aus im Zuge der Bündelblockausgleichung bestimmter Objektpunktkoordinate minus tachymetrisch gemessener Objektpunktkoordinate.

Pkt Nr.	ΔX	ΔY	ΔZ	|ΔXY|	|ΔXYZ|
N26	-0.767	0.329	-0.193	0.834	0.856
N27	10.036	3.687	-2.851	10.692	11.065
N28	6.603	2.975	0.396	7.242	7.253
N29	29.230	-2.058	2.810	29.302	29.437
N30	-0.428	0.750	-0.245	0.863	0.897
N31	0.788	2.105	0.225	2.247	2.259
N32	0.672	2.040	-0.666	2.148	2.249

Tab. 5.22: A priori Abweichungen der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes (in Meter). Die Abweichungen berechnen sich aus vorwärtsgeschnittener Objektpunktkoordinate minus tachymetrisch gemessener Objektpunktkoordinate. Die Orientierungsparameter für die vorwärtsgeschnittenen Objektkoordinaten stammen aus der Vororientierung mit PhotoScan.

Um den Erfolg der Optimierung der Orientierungsparameter in OrientAL zu veranschaulichen, zeigt Tabelle 5.22 noch einmal die Differenzen zwischen den aus der Vororientierung von PhotoScan vorwärtsgeschnittenen Kontrollpunkten und den tachymetrisch eingemessenen Kontrollpunkten aus Kapitel 5.4.3.1. Die Abweichungen aller Kontrollpunkte haben sich in Y- und Z-Richtung deutlich verringert. In X-Richtung haben sich die geringen Abweichungen teilweise verdoppelt, die groben Abweichungen der Kontrollpunkte N27 und N29 haben sich jedoch stark verbessert. Der Kontrollpunkt N29 weist auch jetzt noch die größten Abweichungen auf, allerdings in einem viel geringeren Maß als zuvor. Dass die Abweichungen in X-Richtung um eine 10er-Potenz schlecht sind, lässt sich wieder auf die ungünstige Netzgeometrie zurückführen.

Tabelle 5.23 listet die Residuen der Kontrollpunkte für jedes Bild, in dem sie beobachtet werden.

Pkt Nr.	Bild	Δx	Δy	|Δxy|
N26	DSC_1605	-0.142	0.950	0.960
N26	DSC_1606	0.083	-0.878	0.882
N27	DSC_1604	0.010	0.281	0.281
N27	DSC_1605	-0.036	-0.254	0.256
N28	DSC_1604	-0.359	-2.784	2.807
N28	DSC_1605	0.192	2.494	2.501
N29	DSC_1604	0.047	0.394	0.397
N29	DSC_1605	-0.035	-0.437	0.438
N30	DSC_1603	-0.018	-0.271	0.272
N30	DSC_1604	0.022	0.277	0.278
N31	DSC_1603	-0.046	-0.644	0.645
N31	DSC_1604	-0.004	0.594	0.594
N32	DSC_1603	0.274	5.141	5.149
N32	DSC_1604	-0.659	-4.688	4.735

Tab. 5.23: A posteriori Residuen der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes (in Pixel). Die Residuen berechnen sich aus ausgeglichener Bildkoordinate minus rückprojizierter Bildkoordinate.

5.4.3.7 Qualität der Orientierung des Bildverbandes: Standardabweichungen

Die Standardabweichungen der ausgeglichenen Orientierungsparameter können der Kovarianzmatrix a posteriori $\mathbf{S}_{xx}$ entnommen werden. Jedes Element der Hauptdiagonale entspricht der Varianz einer Unbekannten.

In Tabelle 5.24 finden sich die Standardabweichungen der inneren Orientierungen. Die Standardabweichung der zweiten Kamera ist für jeden der Parameter mindestens doppelt so groß. Es lässt sich daraus schließen, dass die Brennweite mit zunehmender Entfernung zum Ausgangspunkt immer instabiler geworden ist.

Kamera ID	$\mathbf{s}_{x_0}$	$\mathbf{s}_{y_0}$	$\mathbf{s}_c$
0	0.0698	0.3307	0.3727
1	0.3188	0.6112	0.7277

Tab. 5.24: Standardabweichungen des Hauptpunkts und der Kamerakonstanten (in Pixel).

Eine Statistik der Standardabweichungen der ausgeglichenen Projektionszentren zeigt Tabelle 5.25. Der auffallend hohe Maximalwert in X-Richtung gehört zum falsch orientierten Bild DSC_1557 (siehe Kapitel 5.4.3.4). Klammert man diesen Maximalwert aus, zeigt Abbildung 5.20, dass die Standardabweichungen der Lage über die Entfernung von 50 Metern nicht größer als 9 Zentimeter werden. Die Z-Komponenten der Projektionszentren sind mit einem Maximalwert von unter 7 Zentimeter am genauesten bestimmbar. Aber auch die 3D-Genauigkeit der Projektionszentren wird nicht schlechter als etwas über 11 Zentimeter.

Statistischer Wert	s_X	s_Y	s_Z
min	0.0078	0.0071	0.0064
med	0.0350	0.0223	0.0292
max	0.2642	0.0707	0.0682

Tab. 5.25: Statistik über die Standardabweichungen der Projektionszentren in Richtung der Koordinatenachsen (in Meter).

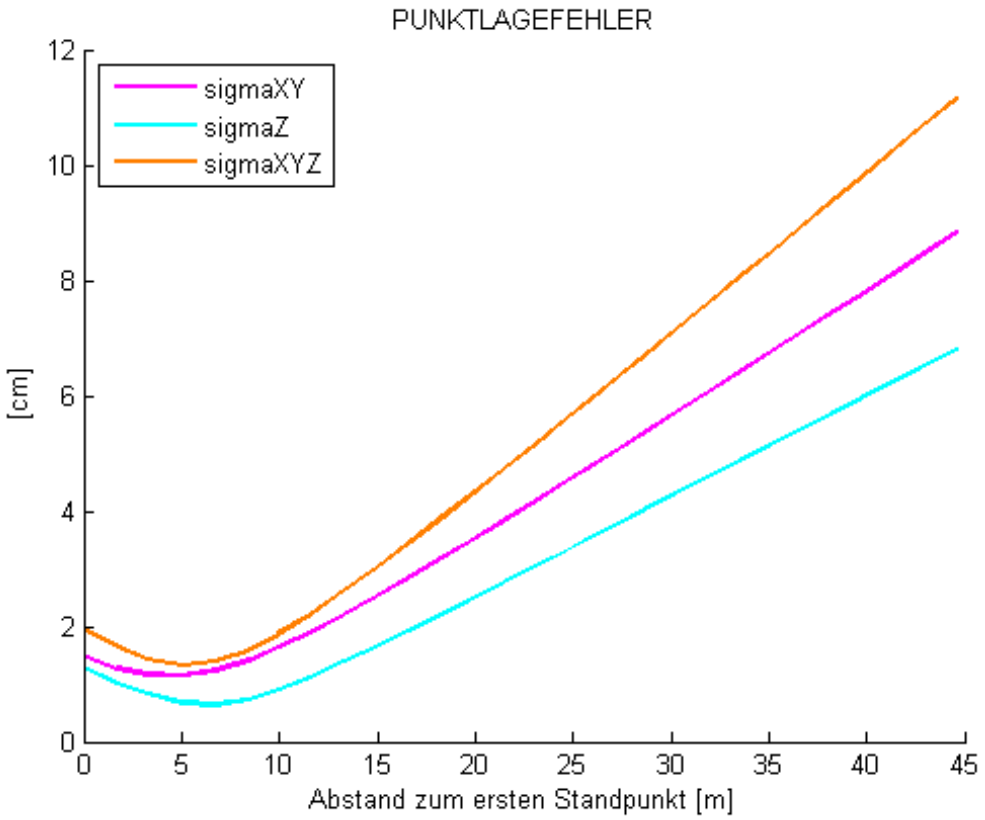


Abb. 5.20: Darstellung der Standardabweichungen abhängig von der Entfernung zum ersten Standpunkt. Standardabweichung in der Lage (2D) (magenta), Standardabweichung in der Höhe (cyan), Standardabweichung 3D (orange).

Ein weiteres Maß für die innere Genauigkeit eines Bündelblocks sind Fehler- und Konfidenzellipsen (Kapitel 3.7.1.4). Abbildung 5.21 zeigt die Fehlerellipsen jedes mittleren Bildes einer Reihe. Wie sich an der Orientierung der Ellipsen deutlich erkennen lässt, liegt keine nennenswerte Korrelation zwischen den σ_x und σ_y vor. Dass σ_x deutlich schlechter ist als σ_y liegt an der suboptimalen Schnittgeometrie beim Vorwärtsschnitt. Genau wie in Abbildung 5.20 wird auch hier die Verschlechterung der Genauigkeit mit zunehmender Entfernung zum Ausgangspunkt deutlich.

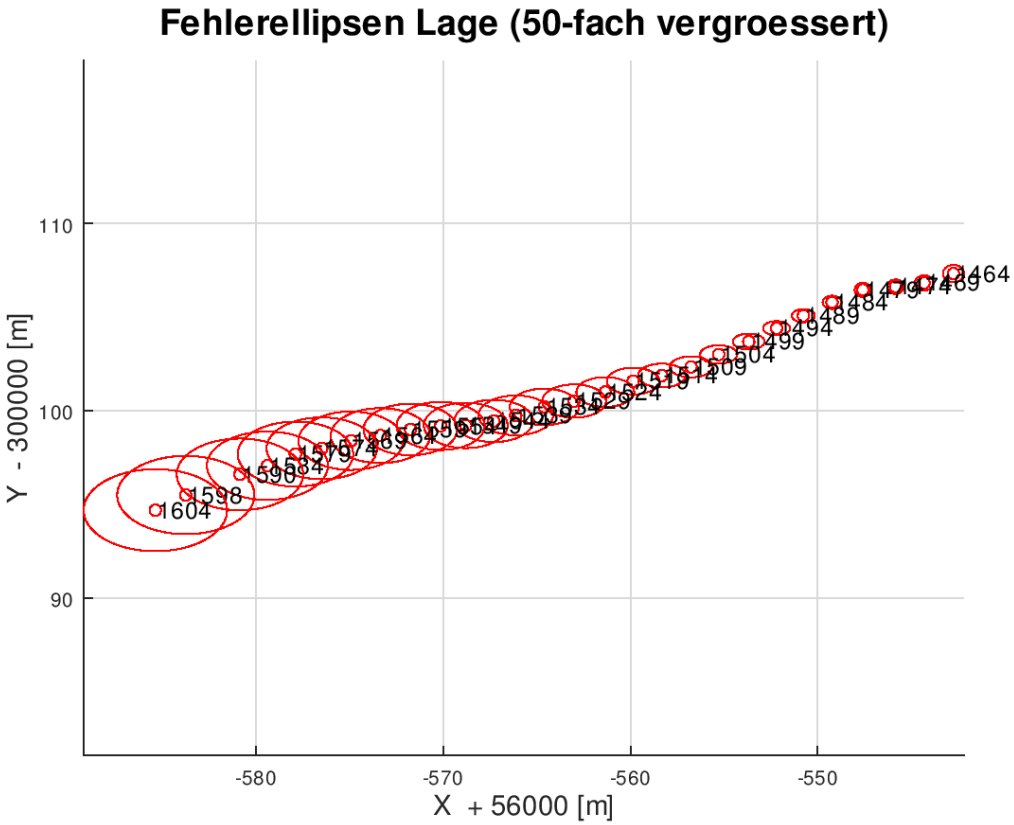


Abb. 5.21: Darstellung der Fehlerellipsen des mittleren Bildes jeder Reihe entlang des Pfads.

Vergleicht man alle Ergebnisse der Auswertung, fällt auf, dass die Objektpunktkoordinaten der Projektionszentren auf wenige Zentimeter genau bestimmt werden können, während in der Bündelblockausgleichung an den Kontrollpunkten im Objektraum Fehler von über 2 Metern auftreten. Der Grund dafür ist höchstwahrscheinlich, dass die Kontrollpunkte nur in Bildern beobachtet wurden, die praktisch identische Projektionszentren besitzen. Die Schnittwinkel sind daher sehr klein und die Schnittgeometrie damit stark schleifend.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Im Folgenden wird kurz dargestellt, welche Schlüsse aus den Ergebnissen dieser Arbeit gezogen werden können.

Durchführbarkeit. Es ist möglich, den Großteil des Bildverbandes in dieser Konfiguration über eine Bündelblockausgleichung zu orientieren und so den Pfad des Fotografen zu rekonstruieren (Abbildung 6.1). Für fünf Bilder werden keine Orientierungsparameter bestimmt, zwei Bilder können nicht vororientiert werden, drei werden im Zuge der Ausgleichung eliminiert. Um für die Bündelblockausgleichungen eine Lösung zu erhalten, ist jedoch eine Reihe von Vorarbeiten nötig. Da nur im Ausgangsblock (1. und 2. Reihe) des Bildverbandes Passpunkte verfügbar sind, müssen in den übrigen Bildreihen automatische Verknüpfungspunkte gefunden werden. Dies erfolgt über die Extraktion und Zuordnung von Bildmerkmalen. Weiters muss eine Vororientierung des Bildverbandes vorgenommen werden, die als Basis für die Merkmalszuordnung der automatischen Verknüpfungspunkte und die Berechnung der Näherungslösung für die Bündelblockausgleichung dient. Essenziell für die Lösbarkeit der Bündelblockausgleichung sind außerdem die Detektion und Elimination von Ausreißern in den Beobachtungen.

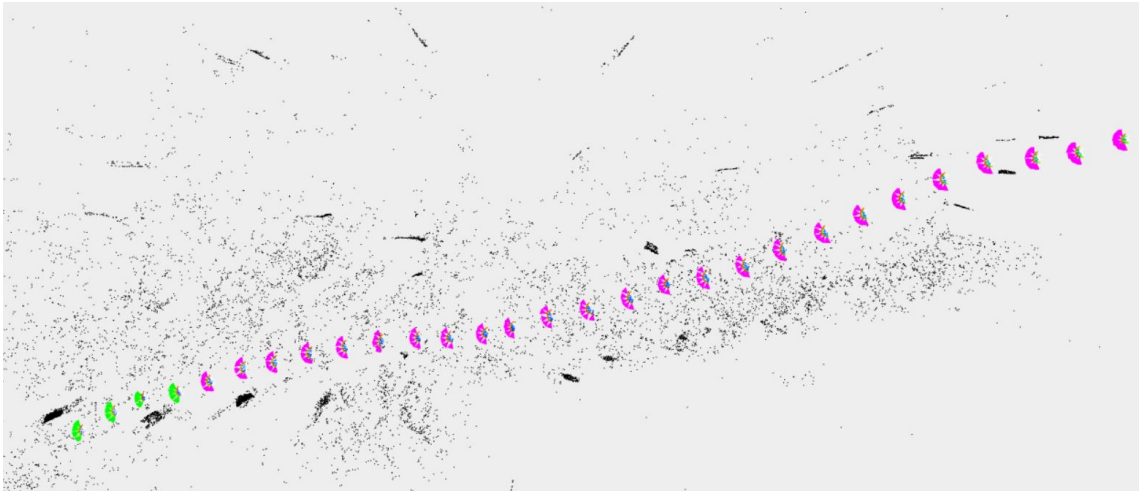


Abb. 6.1: Blick von oben auf den rekonstruierten Pfad.

Qualität des Ergebnisses. Die Projektionszentren weisen Standardabweichungen von wenige Zentimeter auf (Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3). In der Bündelblockausgleichung treten an den Kontrollpunkten aber Fehler im Objektraum von über 2 Metern auf. Das liegt höchstwahrscheinlich daran, dass die Kontrollpunkte nur in Bildern beobachtet wurden, die praktisch identische Projektionszentren besitzen. Die Schnittwinkel sind sehr klein und die

Schnittgeometrie ist damit stark schleifend. Die Wahl einer anderen Aufnahmekonfiguration könnte Abhilfe schaffen. Mehr dazu im Punkt **Aufnahmekonfiguration**.

Außerdem werden sowohl künstlich geschaffene Passpunkte (z.B. Zielmarken) als auch natürliche Passpunkte (z.B. Astloch) verwendet. Sinnvoll wäre es, unterschiedliche Gewichte für Zielmarken und natürliche Passpunkte einzuführen, da Zielmarken viel genauer definiert und damit messbar sind (siehe Punkt **Zielmarken**).

Ein weiterer Faktor, der zur Verschlechterung der Ergebnisse der Orientierung beigetragen hat, ist sicherlich die Instabilität der Kamerabrennweite, die sich mit zunehmender Entfernung vom Ausgangspunkt so stark verändert hat, dass in der Vororientierung für das letzte Drittel des Pfades eine zweite innere Orientierung bestimmt wurde. Diese Instabilität wirkt sich direkt auf die Qualität der automatischen Verknüpfungspunkte und damit auf das Ergebnis des Orientierungsvorganges aus.

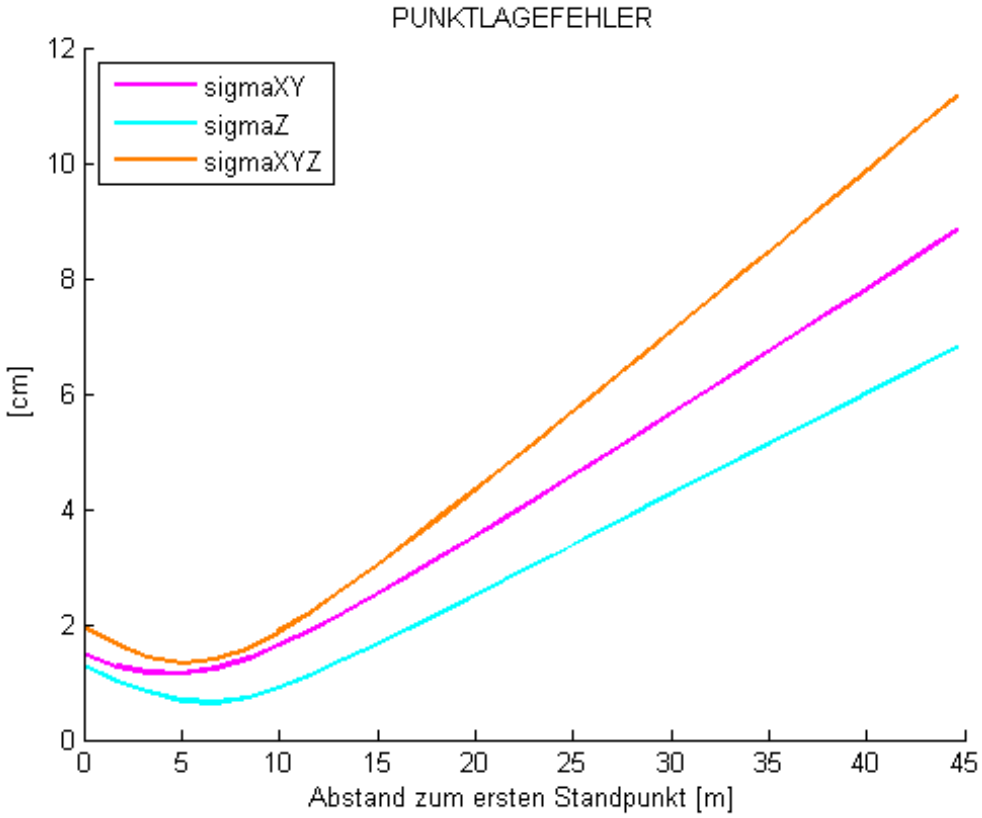


Abb. 6.2: Darstellung der Standardabweichungen abhängig von der Entfernung zum ersten Standpunkt. Standardabweichung in der Lage (2D) (magenta), Standardabweichung in der Höhe (cyan) (rot), Standardabweichung 3D (orange).

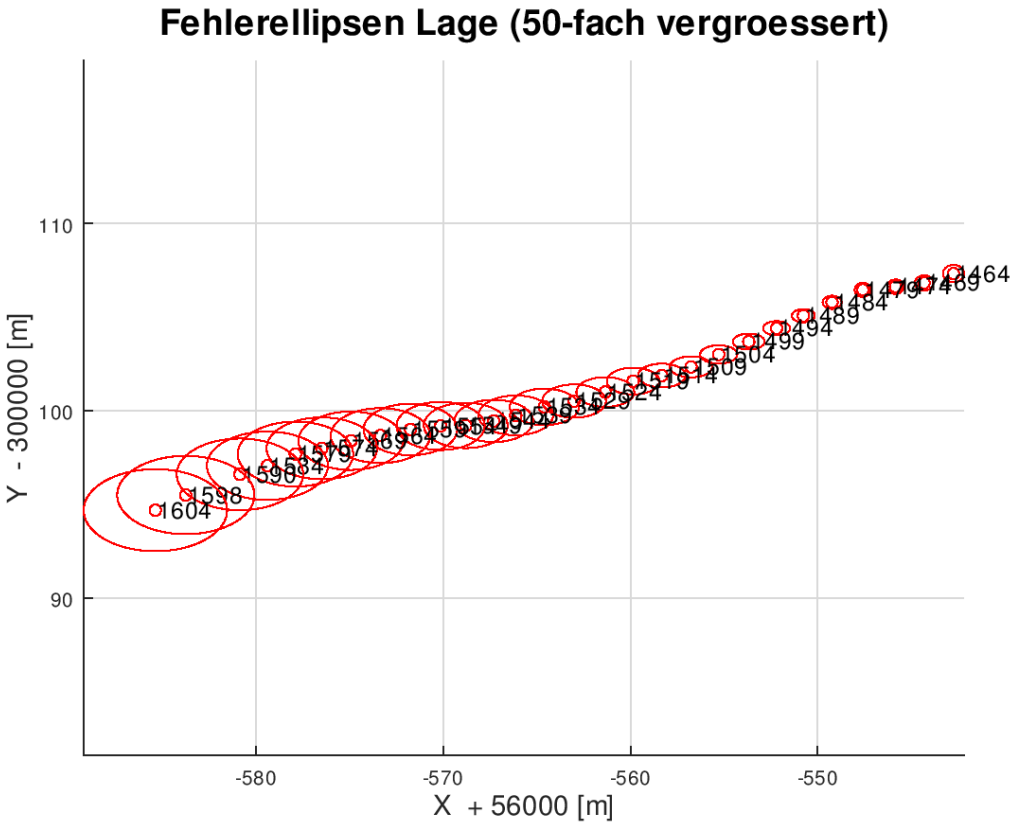


Abb. 6.3: Darstellung der Fehlerellipsen des mittleren Bildes jeder Reihe entlang des Pfads.

Aufnahmekonfiguration. Auch wenn die Orientierung des Bildverbandes in dieser Aufnahmekonfiguration weitestgehend bestimmbar ist, wäre die Wahl einer anderen Aufnahmegeometrie, die einen guten Strahlenschnitt pro Aufnahmereihe gewährleistet, eine Möglichkeit zur Verbesserung der Ergebnisse. Anstelle der freihändigen halbkreisförmigen Bildaufnahme von einem Standpunkt aus könnte man die Aufnahmekonfiguration folgendermaßen verändern:

- Anordnung der Aufnahmestandpunkte innerhalb einer Reihe in einer W-Form (weniger schleifende Schnittgeometrie)
- Aufnahme mit der Aufnahmerichtung genähert normal auf den Pfad (“Normalfall“), was zu einer sehr guten Schnittgeometrie führt
- Aufnahme mit gleichbleibender Konfiguration, aber mit Hilfe eines Stativs, damit alle Bilder einer Reihe exakt dasselbe Projektionszentrum teilen. Unter diesen Voraussetzungen wäre das Ableiten eines Panoramas für jede Bildreihe möglich.

Zielmarken. Besser wäre es ausschließlich mit Zielmarken und ohne natürliche Passpunkte zu arbeiten, da diese in Bild und Natur eindeutiger definierbar sind. Ein Astloch etwa kann im Bild wirken wie ein dunkler, großer, unförmiger Fleck an einem Baumstamm, während Zielmarken im Gegensatz dazu sehr gut definiert und messbar sind. Nachteil sind zusätzliche Kosten des Vermarkungsmaterials, erhöhter Zeitaufwand durch die Montage

und möglicherweise eingeschränkte Verteilung aufgrund der Beschaffenheit der Bepflanzung und der Zugänglichkeit des Geländes.

Anwendungsmöglichkeiten. Für die Bereiche, in denen die automatische Verknüpfungspunktsuche gute Ergebnisse liefert (Abbildung 6.4), konnten markante Bereiche des Waldbodens und der Baumstämme extrahiert werden, wie man in der Punktwolke sieht (Abbildung 6.5). Bei einer besseren Konfiguration des Bündelblocks sind entsprechend bessere Rekonstruktionsergebnisse zu erwarten, mit denen man a) das digitale Geländemodell in diesem Bereich ableiten und b) die geometrische Form der Baumstämme rekonstruieren könnte. Von Interesse wäre etwa der in der Forstwirtschaft wichtige Parameter des DBH (Baum-Durchmesser auf Brusthöhe (Bauwens u. a. 2016)). Der Vorteil, Kameras statt eines terrestrischen Laserscanners zu verwenden, liegt in den geringeren Kosten und der größeren Flexibilität. Außerdem könnten für die rekonstruierten Punkte die Genauigkeitsmaße der Bündelblockausgleichung mit in die Schätzung des DGMs (Kraus 2000) und der Baum-Parameter einbezogen werden.

Abb. 6.4: Automatisch extrahierte Verknüpfungspunkte in den Bildern DSC_1549, DSC_1550 und DSC_1551 aus der 17. Reihe. Die Verknüpfungspunkte werden als weiße Punkte dargestellt.

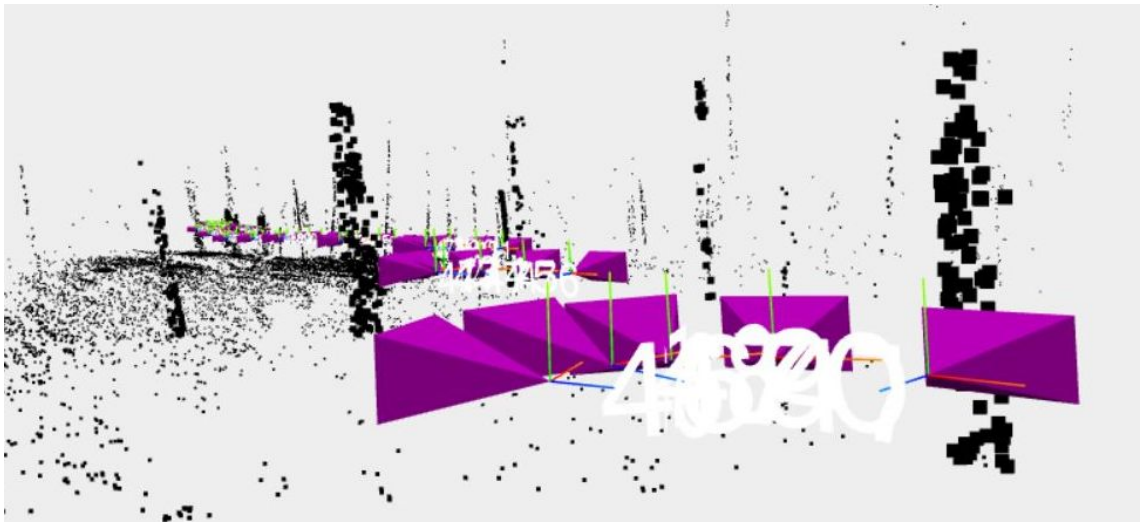


Abb. 6.5: Hohe Punktdichte im Bereich der Baumstämme bis zu einer Höhe von 5 Metern sowie im Bodenbereich im hinteren Teil des Pfades.

Abbildungsverzeichnis

2.1 Ausrichtung der Koordinatenachsen im digitalen Messbild aus Karel (2018) 13
2.2 Schematische Darstellung der Verzeichnung. Links: radial und tangential; rechts: tonnen- und kissenförmig (Weng u. a. 1992) 14
2.3 Das Bildkoordinatensystem (Albertz und Wiggenhagen 2008) 15
2.4 Geometrischer Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinatensystem (Kraus 2004) 17
2.5 Schnittgeometrie bei Vorwärtsschnitt (Luhmann 2018) 18
2.6 Schnittgeometrie bei Vorwärtsschnitt (Luhmann 2018) 19

3.1 Anordnung der Bilder in einem Bündelblock (Kraus 2004) 28
3.2 Beliebige Aufnahmekonfiguration im Nahbereich (Luhmann 2018) 29
3.3 Aufnahme- und Auswerteprozess (rot: automatisierbar im digitalen System) nach Luhmann (2018) 32

4.1 Ausschnitt des Waldstücks von Geoland.at (Stand 13.9.2018). Der blaue Marker zeigt die Position des Aufnahmegebiets. 37
4.2 Orthophoto des Waldstücks von Geoland.at (Stand 13.9.2018). Der rote Bereich markiert das Aufnahmegebiet. 38
4.3 Einzelaufnahme vom 25.03.2017. 39
4.4 Jeweils fünf Bilder bilden eine Bildreihe. Die Bildüberdeckung zwischen den Bildern beträgt etwa 50 Prozent. 39
4.5 Übersicht über die Verteilung der Passpunkte zu Beginn und Ende des Bildverbands 40

5.1 Manuell gemessene Passpunkte in MonoScope. “M“ steht für Klebemarke, “N“ für natürliche Passpunkte. 45
5.2 Verteilung der Passpunkte in der ersten Bildreihe (oben) und in der zweiten Bildreihe (unten). 45
5.3 Verteilung der Passpunkte in der letzten Bildreihe. 45
5.4 Residuen a priori (oben) und a posteriori (unten) des ersten Bildes der ersten Reihe (Datensatz vom 25.03.2017). 47
5.5 Residuen a priori der ersten Reihe (Datensatz vom 25.03.2017). 48
5.6 Residuen a posteriori der ersten Reihe (Datensatz vom 25.03.2017). 48
5.7 Histogramm der Residuen a priori der Bilder der ersten beiden Bildreihen (Datensatz vom 25.03.2017). 49
5.8 Residuen a priori (oben) und a posteriori (unten) des ersten Bildes der ersten Reihe mit zusätzlichen automatischen Verknüpfungspunkten.(Datensatz vom 25.03.2017). 51
5.9 Residuen a priori der ersten Reihe mit zusätzlichen automatischen Verknüpfungspunkten. (Datensatz vom 25.03.2017). 52
5.10 Residuen a posteriori der ersten Reihe mit zusätzlichen automatischen Verknüpfungspunkten.(Datensatz vom 25.03.2017). 52

5.11 Histogramm der Residuen a priori der Bilder der ersten beiden Bildreihen mit zusätzlichen automatischen Verknüpfungspunkten. (Datensatz vom 25.03.2017). 53
5.12 Residuen a posteriori bei Bestimmung der Orientierungsparameter nur über Passpunkte (oben) und zusätzlich automatische Verknüpfungspunkte (unten) des ersten Bildes der ersten Reihe (Datensatz vom 25.03.2017). 54
5.13 Blick von oben auf den rekonstruierten Pfad. 60
5.14 Blick normal auf den rekonstruierten Pfad. 60
5.15 Blick entlang des rekonstruierten Pfads. 61
5.16 Unvollständige Bildreihen (nicht vororientierbar oder im Zuge des Ausgleichs eliminiert). 61
5.17 Falsch orientiertes erstes Bild (DSC_1557) in der Bildreihe 19. 62
5.18 Histogramm der Residuen der automatischen Verknüpfungspunkt. 64
5.19 Residuen der Passpunkte a posteriori. In Violett die Abweichung in der Lage, in Cyan die Höhenabweichung. 66
5.20 Darstellung der Standardabweichungen abhängig von der Entfernung zum ersten Standpunkt. Standardabweichung in der Lage (2D) (magenta), Standardabweichung in der Höhe (cyan), Standardabweichung 3D (orange). . . . 69
5.21 Darstellung der Fehlerellipsen des mittleren Bildes jeder Reihe entlang des Pfads. 70

6.1 Blick von oben auf den rekonstruierten Pfad. 71
6.2 Darstellung der Standardabweichungen abhängig von der Entfernung zum ersten Standpunkt. Standardabweichung in der Lage (2D) (magenta), Standardabweichung in der Höhe (cyan) (rot), Standardabweichung 3D (orange). 72
6.3 Darstellung der Fehlerellipsen des mittleren Bildes jeder Reihe entlang des Pfads. 73
6.4 Automatisch extrahierte Verknüpfungspunkte in den Bildern DSC_1549, DSC_1550 und DSC_1551 aus der 17. Reihe. Die Verknüpfungspunkte werden als weiße Punkte dargestellt. 74
6.5 Hohe Punktdichte im Bereich der Baumstämme bis zu einer Höhe von 5 Metern sowie im Bodenbereich im hinteren Teil des Pfades. 74

Tabellenverzeichnis

4.1 Kameraeinstellung für die Bildaufnahme 39

5.1 Näherungswerte der innere Orientierung für die Bündelblockausgleichung des Ausgangsblocks 46
5.2 Näherungswerte der äußeren Orientierung für die Bündelblockausgleichung des Ausgangsblocks 46
5.3 Differenzen der Orientierungsparameter gebildet aus Parametern ohne automatische Verknüpfungspunkte minus Parametern mit automatischen Verknüpfungspunkten. 55
5.4 Die 5 größten Residuennormen. Links ohne automatische Verknüpfungspunkte, rechts mit automatischen Verknüpfungspunkten 55
5.5 Standardabweichungen ohne automatische Verknüpfungspunkte. Projektionszentrum und Rotationswinkel der ersten Bildreihe. 56
5.6 Standardabweichungen mit automatischen Verknüpfungspunkte. Projektionszentren und Rotationswinkel der ersten Bildreihe. 56
5.7 A priori Abweichungen der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes (in Meter). Die Abweichungen berechnen sich aus vorwärtsgeschnittener Objektpunktkoordinate minus tachymetrisch gemessener Objektpunktkoordinate. 57
5.8 A priori Abweichungen der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes (in Pixel). Die Abweichungen berechnen sich aus rückprojizierter Bildkoordinate minus manuell gemessener Bildkoordinate. 58
5.9 Übersicht über die Eingangsparameter der Bündelblockausgleichung. 58
5.10 Übersicht über die Kenngrößen des Bündelblocks. 59
5.11 Ausgeglichene Parameter der inneren Orientierung. 59
5.12 Ausgeglichene Objektkoordinaten der Kontrollpunkte. 60
5.13 Übersicht über die Ausgleichsparameter. 62
5.14 Statistik über die Anzahl der Bildbeobachtungen pro Bild, links der automatischen Verknüpfungspunkte, rechts der manuell gemessenen Passpunkte. 63
5.15 Statistik über die von der konvexen Hülle der automatischen Verknüpfungspunkte eingenommenen Fläche im Verhältnis zur Bildfläche. 63
5.16 Statistik der a posteriori Residuen der automatischen Verknüpfungspunkte (in Pixel). 63
5.17 Statistik der a posteriori Residuen der Passpunkte (in Pixel). 64
5.18 Statistik der a posteriori Residuen der Passpunkte (in Meter). 64
5.19 Liste der schlechtesten Passpunktbeobachtungen (in Pixel). 65
5.20 Liste der schlechtesten Passpunktbeobachtungen (in Meter). 65
5.21 A posteriori Residuen der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes (in Meter). Die Residuen berechnen sich aus im Zuge der Bündelblockausgleichung bestimmter Objektpunktkoordinate minus tachymetrisch gemessener Objektpunktkoordinate. 67

5.22 A priori Abweichungen der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes (in Meter). Die Abweichungen berechnen sich aus vorwärtsgeschnittener Objektpunktkoordinate minus tachymetrisch gemessener Objektpunktkoordinate. Die Orientierungsparameter für die vorwärtsgeschnittenen Objektkoordinaten stammen aus der Vororientierung mit PhotoScan. 67
5.23 A posteriori Residuen der Kontrollpunkte in der letzten Bildreihe des Bildverbandes (in Pixel). Die Residuen berechnen sich aus ausgeglichener Bildkoordinate minus rückprojizierter Bildkoordinate. 68
5.24 Standardabweichungen des Hauptpunkts und der Kamerakonstanten (in Pixel). 68
5.25 Statistik über die Standardabweichungen der Projektionszentren in Richtung der Koordinatenachsen (in Meter). 69

B.1 Koordinatenliste der Passpunkte im Anfangsbereich des Bildverbundes. “M“ steht für Klebemarke, “N“ für natürlichen Passpunkt. 84
B.2 Koordinatenliste der Kontrollpunkte im Endbereich des Bildverbundes. . . . 85
B.3 Pro Bild Anzahl der automatischen und manuellen Verknüpfungspunkte, sowie in Prozent die, von der konvexen Hülle der automatischen Verknüpfungspunkte eingenommenen Fläche im Verhältnis zur Bildfläche. 89
B.4 Liste der Projektionszentren und der Rotationswinkel des Bildverbandes. . . 93

Anhang A

Gerätespezifikationen

A.1 Nikon D5000

Allgemein

Typ	Digitale Spiegelreflexkamera für Wechselobjektive
Markteinführung	Mai 2009
Verfügbar bis	4. Quartal 2011

Elektronik

Sensor	CMOS-Sensor APS-C 23,6 x 15,8 mm (Cropfaktor 1,5)
Gesamtpixelanzahl	12,9 Millionen
Effektive Auflösung	12,3 Millionen
Pixelpitch	5,5 μm
Fotoauflösung	4.288 x 2.848 Pixel (3:2)
	3.216 x 2.136 Pixel (3:2)
	2.144 x 1.424 Pixel (3:2)
Bildformate	JPG, RAW
Farbtiefe	36 Bit (12 Bit pro Farbkanal)
Metadaten	Exif (Version 2.21), DCF-Standard

Objektiv

Objektivanschluss	Nikon F
Autofokus-Funktionen	Einzel-Autofokus, kontinuierlicher Autofokus, Manuell
Schärfekontrolle	Live View

Belichtung

Belichtungsmessung	Mittenbetonte Integralmessung
	Matrix/Mehrfeldmessung über 420 Felder
	Spotmessung (Messung über 3% des Bildfeldes)
Belichtungszeiten	1/4.000 bis 30 s (Automatik)
	Bulb-Funktion
Belichtungssteuerung	Programmautomatik, Blendenautomatik, Zeitautomatik, Manuell
Belichtungskorrektur	-5,0 bis +0,5 EV mit Schrittgröße von 1/3 EV
Lichtempfindlichkeit	ISO 200 bis ISO 3.200 (Automatik)
	ISO 100 bis ISO 6.400 (manuell)

A.2 Leica TCRP1201+

Allgemeine Daten

Kennzeichnung

Typ	Reflektorloses EDM, Automatisiert, Motorisiert, PowerSearch

Fernrohr

Vergrößerung:	30 x
Freier Objektdurchmesser	40 mm
Sehfeld:	1°30’ (1.66 gon)/2.7 m bis 100 m
Fokussierung:	1.7 m bis unendlich

Laserlot

Zentriergenauigkeit:	1.5 mm bei 1.5 m (Abweichung von der Lotlinie)
Laserpunktdurchmesser:	2.5 mm bei 1.5 m

Endlosfeintriebe

Anzahl der Triebe:	1 horizontal/ 1 vertikal

Dosenlibelle

Empfindlichkeit:	6’/ 2 mm

Umgebungsbedingungen

Arbeitstemperatur:	-20°C bis +50°C
Lagertemperatur:	-40°C bis +70°C
Luftfeuchtigkeit:	95%, nicht-kondensierend

Winkelmessung

Genauigkeit (ISO 17123-3)

Hz, V:	1“ (0.3 mgon)
Anzeigeauflösung:	0.1“ (0.1 mgon)
Methode	absolut, kontinuierlich, diametral

Kompensator

Einspielbereich:	4’ (0.07 gon)
Einspielgenauigkeit:	0.5“ (0.2 mgon)
Methode:	Zentrischer Zwei-Achs-Kompensator

Distanzmessung mit Reflektor (IR-Modus)

Reichweite

Standardprisma (GPR1)	1800 m bis 3500 m)
Reflektorfolie (60 mm x 60 mm)	150 m bis 250 m)

Genauigkeit (ISO 17123-4) / Messzeit

Standard-Modus	1 mm + 1.5 ppm / typ. 2.4 s
Schnell-Modus	3 mm + 1.5 ppm / typ. 0.8 s
Azeigeauflösung	0.1 mm

Methode

Prinzip	Phasenmessung
Typ	Koaxialer, sichtbarer roter Laser
Wellenlänge	660 nm
Mess-System	System Analyzer - 100 MHz

Reflektorlose Distanzmessung (RL-Modus)

Genauigkeit (ISO 17123-4) / Messzeit

Standard-Modus	
0 m - 500 m	2 mm + 2 ppm / typ. 3 - 6 s, max. 12 s
< 500 m	4 mm + 2 ppm / typ. 3 - 6 s, max. 12 s
Azeigeauflösung	0.1 mm

Methode

Typ	Koaxialer, sichtbarer roter Laser
Wellenlänge	660 nm
Mess-System	System Analyzer - 100 MHz

Anhang B

Daten

B.1 Passpunkte

Name	Y[m]	X[m]	H[m]
M1	-56547,42	360125,68	351,44
M2	-56546,48	360112,32	352,03
M3	-56546,93	360109,63	352,54
M4	-56551,15	360108,79	352,18
M5	-56547,00	360106,13	352,85
M6	-56551,17	360101,31	352,73
M7	-56546,58	360100,23	353,25
M8	-56543,86	360099,59	353,57
M9	-56541,08	360100,22	353,57
N1	-56540,80	360092,90	357,46
N2	-56544,06	360103,63	351,98
N3	-56546,41	360100,23	355,14
N4	-56546,46	360103,24	351,69
N5	-56549,37	360101,85	351,74
N6	-56553,65	360098,19	358,08
N7	-56550,05	360106,81	355,23
N8	-56556,16	360112,08	354,08
N9	-56546,74	360110,02	353,99
N10	-56552,33	360114,85	350,25
N11	-56548,10	360122,55	355,52

Tab. B.1: Koordinatenliste der Passpunkte im Anfangsbereich des Bildverbundes. “M“ steht für Klebemarke, “N“ für natürlichen Passpunkt.

Name	**Y[m]**	**X[m]**	**H[m]**
N21	-56588,70	360099,03	348,54
N22	-56588,66	360099,58	351,73
N23	-56590,58	360101,29	350,39
N24	-56590,80	360098,75	349,00
N25	-56590,96	360099,05	353,06
N26	-56587,55	360094,99	350,44
N27	-56599,69	360090,51	353,33
N28	-56597,10	260090,83	349,38
N29	-56603,95	360095,99	348,54
N30	-56592,91	360090,12	350,43
N31	-56591,19	360089,59	349,07
N32	-56591,82	360089,13	351,64
N33	-56589,68	360090,16	351,20
N34	-56587,67	360090,45	349,77
N35	-56587,47	360090,95	351,38
N36	-56586,73	360085,89	350,55
N37	-56586,91	360085,77	353,38
N38	-56585,54	360089,98	351,49
N39	-56585,16	360090,08	349,51
P1	-56513,23	359994,70	360,57
P2	-56538,95	360107,12	351,54
P3	-56585,64	360095,58	348,68
S1	-56542,64	360107,37	351,42

Tab. B.2: Koordinatenliste der Kontrollpunkte im Endbereich des Bildverbundes.

B.2 Konvexe Hülle

Bild	#auto	#manu	convHullArea
DSC_1462.JPG	169	5	26%
DSC_1463.JPG	470	8	53%
DSC_1464.JPG	431	7	68%
DSC_1465.JPG	68	7	56%
DSC_1466.JPG	56	5	31%
DSC_1467.JPG	512	8	66%
DSC_1468.JPG	562	7	69%
DSC_1469.JPG	373	4	60%
DSC_1470.JPG	201	3	54%
DSC_1471.JPG	170	4	57%
DSC_1472.JPG	183	0	19%
DSC_1473.JPG	406	0	51%
DSC_1474.JPG	311	0	59%
DSC_1475.JPG	112	0	47%
DSC_1476.JPG	92	0	59%
DSC_1477.JPG	208	0	32%
DSC_1478.JPG	470	0	40%
DSC_1479.JPG	361	0	44%
DSC_1480.JPG	114	0	55%
DSC_1481.JPG	106	0	53%
DSC_1482.JPG	135	0	25%
DSC_1483.JPG	520	0	32%
DSC_1484.JPG	414	0	29%
DSC_1485.JPG	301	0	35%
DSC_1486.JPG	398	0	47%
DSC_1487.JPG	278	0	33%
DSC_1488.JPG	616	0	33%
DSC_1489.JPG	559	0	28%
DSC_1490.JPG	169	0	37%
DSC_1491.JPG	108	0	41%
DSC_1492.JPG	96	0	19%
DSC_1493.JPG	486	0	29%
DSC_1494.JPG	714	0	37%
DSC_1495.JPG	333	0	41%
DSC_1496.JPG	158	0	42%
DSC_1497.JPG	90	0	35%
DSC_1498.JPG	393	0	38%
DSC_1499.JPG	615	0	61%
DSC_1500.JPG	292	0	70%
DSC_1501.JPG	107	0	51%
DSC_1502.JPG	120	0	51%
DSC_1503.JPG	326	0	35%
DSC_1504.JPG	453	0	51%

Bild	#auto	#manu	convHullArea
DSC_1505.JPG	169	0	57%
DSC_1506.JPG	81	0	47%
DSC_1507.JPG	89	0	48%
DSC_1508.JPG	294	0	30%
DSC_1509.JPG	545	0	30%
DSC_1510.JPG	349	0	46%
DSC_1511.JPG	153	0	65%
DSC_1512.JPG	75	0	25%
DSC_1513.JPG	343	0	24%
DSC_1514.JPG	512	0	26%
DSC_1515.JPG	599	0	51%
DSC_1516.JPG	394	0	77%
DSC_1517.JPG	30	0	23%
DSC_1518.JPG	260	0	38%
DSC_1519.JPG	458	0	32%
DSC_1520.JPG	286	0	50%
DSC_1521.JPG	117	0	59%
DSC_1522.JPG	104	0	34%
DSC_1523.JPG	346	0	35%
DSC_1524.JPG	500	0	35%
DSC_1525.JPG	279	0	26%
DSC_1526.JPG	101	0	68%
DSC_1527.JPG	193	0	2%
DSC_1528.JPG	410	0	26%
DSC_1529.JPG	545	0	29%
DSC_1530.JPG	410	0	35%
DSC_1531.JPG	170	0	44%
DSC_1532.JPG	57	0	13%
DSC_1533.JPG	274	0	19%
DSC_1534.JPG	490	0	36%
DSC_1535.JPG	289	0	38%
DSC_1536.JPG	127	0	38%
DSC_1537.JPG	115	0	17%
DSC_1538.JPG	440	0	17%
DSC_1539.JPG	725	0	25%
DSC_1540.JPG	451	0	23%
DSC_1541.JPG	329	0	66%
DSC_1542.JPG	262	0	41%
DSC_1543.JPG	501	0	35%
DSC_1544.JPG	718	0	39%
DSC_1545.JPG	686	0	53%
DSC_1546.JPG	378	0	67%
DSC_1547.JPG	49	0	32%
DSC_1548.JPG	133	0	41%
DSC_1549.JPG	550	0	41%
DSC_1550.JPG	704	0	29%
DSC_1551.JPG	654	0	68%

Bild	#auto	#manu	convHullArea
DSC_1552.JPG	64	0	59%
DSC_1553.JPG	158	0	56%
DSC_1554.JPG	575	0	55%
DSC_1555.JPG	645	0	31%
DSC_1556.JPG	453	0	55%
DSC_1557.JPG	15	0	11%
DSC_1558.JPG	114	0	38%
DSC_1559.JPG	475	0	44%
DSC_1560.JPG	462	0	35%
DSC_1561.JPG	251	0	47%
DSC_1562.JPG	111	0	7%
DSC_1563.JPG	151	0	67%
DSC_1564.JPG	461	0	51%
DSC_1565.JPG	434	0	42%
DSC_1566.JPG	251	0	53%
DSC_1567.JPG	52	0	8%
DSC_1568.JPG	176	0	16%
DSC_1569.JPG	460	0	53%
DSC_1570.JPG	417	0	33%
DSC_1571.JPG	230	0	49%
DSC_1572.JPG	576	0	57%
DSC_1573.JPG	688	0	35%
DSC_1574.JPG	498	0	62%
DSC_1575.JPG	477	0	32%
DSC_1576.JPG	235	0	44%
DSC_1577.JPG	110	0	31%
DSC_1578.JPG	151	0	31%
DSC_1579.JPG	466	0	66%
DSC_1580.JPG	430	0	49%
DSC_1581.JPG	265	0	35%
DSC_1582.JPG	10	0	6%
DSC_1583.JPG	207	0	32%
DSC_1584.JPG	376	0	52%
DSC_1585.JPG	211	0	40%
DSC_1586.JPG	120	0	50%
DSC_1588.JPG	268	0	25%
DSC_1589.JPG	463	0	60%
DSC_1590.JPG	313	0	37%
DSC_1591.JPG	163	0	32%
DSC_1594.JPG	227	0	19%
DSC_1595.JPG	322	0	40%
DSC_1596.JPG	306	0	51%
DSC_1598.JPG	173	0	19%
DSC_1599.JPG	390	0	52%
DSC_1600.JPG	189	0	54%
DSC_1601.JPG	44	0	18%

Bild	**#auto**	**#manu**	**convHullArea**
DSC_1603.JPG	100	0	9%
DSC_1604.JPG	124	0	17%
DSC_1605.JPG	1565	0	56%
DSC_1606.JPG	1527	0	49%

Tab. B.3: Pro Bild Anzahl der automatischen und manuellen Verknüpfungspunkte, sowie in Prozent die, von der konvexen Hülle der automatischen Verknüpfungspunkte eingenommenen Fläche im Verhältnis zur Bildfläche.

B.3 Koordinaten der Projektionszentren

Bild	**X[m]**	**Y[m]**	**Z[m]**	α **[gon]**	ζ **[gon]**	κ **[gon]**
DSC_1462.JPG	-56542.653	360107.239	352.975	80.655	102.421	99.735
DSC_1463.JPG	-56542.688	360107.268	352.967	45.765	101.329	100.194
DSC_1464.JPG	-56542.744	360107.320	352.957	12.335	99.722	100.012
DSC_1465.JPG	-56542.754	360107.407	352.951	-14.430	99.198	98.487
DSC_1466.JPG	-56542.696	360107.494	352.938	-48.500	97.235	98.747
DSC_1467.JPG	-56544.194	360106.713	352.843	74.922	102.077	98.763
DSC_1468.JPG	-56544.262	360106.768	352.840	44.573	101.791	98.665
DSC_1469.JPG	-56544.317	360106.824	352.830	12.980	100.282	100.631
DSC_1470.JPG	-56544.354	360106.918	352.822	-20.530	99.134	100.569
DSC_1471.JPG	-56544.303	360107.021	352.815	-48.758	98.250	101.069
DSC_1472.JPG	-56545.739	360106.516	352.750	81.953	104.259	99.695
DSC_1473.JPG	-56545.809	360106.532	352.744	48.787	103.249	99.836
DSC_1474.JPG	-56545.844	360106.623	352.735	14.931	101.963	99.340
DSC_1475.JPG	-56545.846	360106.731	352.727	-18.468	101.130	100.651
DSC_1476.JPG	-56545.801	360106.838	352.722	-52.749	100.317	100.926
DSC_1477.JPG	-56547.456	360106.354	352.654	90.351	104.948	99.615
DSC_1478.JPG	-56547.531	360106.388	352.645	55.853	103.070	100.679
DSC_1479.JPG	-56547.593	360106.454	352.637	21.562	101.608	99.950
DSC_1480.JPG	-56547.620	360106.565	352.623	-9.699	98.694	100.478
DSC_1481.JPG	-56547.598	360106.677	352.614	-41.261	96.957	100.089
DSC_1482.JPG	-56549.082	360105.699	352.573	89.108	101.598	98.356
DSC_1483.JPG	-56549.172	360105.722	352.564	50.217	100.377	99.321
DSC_1484.JPG	-56549.234	360105.789	352.556	17.018	99.154	100.806
DSC_1485.JPG	-56549.244	360105.927	352.546	-13.980	97.193	101.061
DSC_1486.JPG	-56549.195	360106.027	352.536	-48.664	95.789	101.470
DSC_1487.JPG	-56550.627	360104.944	352.500	84.441	101.860	98.058
DSC_1488.JPG	-56550.730	360104.988	352.488	50.604	99.471	98.869
DSC_1489.JPG	-56550.767	360105.076	352.482	17.269	99.048	100.095
DSC_1490.JPG	-56550.772	360105.164	352.479	-13.359	99.161	100.583
DSC_1491.JPG	-56550.704	360105.274	352.472	-43.033	98.509	100.306
DSC_1492.JPG	-56552.051	360104.319	352.408	95.957	100.997	99.172
DSC_1493.JPG	-56552.131	360104.335	352.402	62.641	100.474	99.443
DSC_1494.JPG	-56552.198	360104.403	352.394	27.976	99.242	99.504
DSC_1495.JPG	-56552.227	360104.520	352.382	-5.6101	96.905	99.881
DSC_1496.JPG	-56552.187	360104.615	352.372	-37.786	94.886	101.070
DSC_1497.JPG	-56553.499	360103.610	352.327	98.451	101.813	98.554
DSC_1498.JPG	-56553.599	360103.629	352.316	63.654	100.309	99.509
DSC_1499.JPG	-56553.684	360103.689	352.315	30.120	100.297	99.484
DSC_1500.JPG	-56553.713	360103.802	352.307	-4.889	98.289	99.561
DSC_1501.JPG	-56553.676	360103.911	352.298	-37.695	97.487	99.812
DSC_1502.JPG	-56555.166	360102.884	352.282	89.647	100.253	99.583
DSC_1503.JPG	-56555.228	360102.921	352.279	54.646	100.369	100.470
DSC_1504.JPG	-56555.287	360103.003	352.267	19.715	98.907	99.847

Bild	X[m]	Y[m]	Z[m]	α [gon]	ζ [gon]	κ [gon]
DSC_1505.JPG	-56555.307	360103.121	352.261	-12.218	97.305	99.241
DSC_1506.JPG	-56555.293	360103.235	352.252	-45.654	95.610	98.698
DSC_1507.JPG	-56556.609	360102.230	352.274	90.712	103.470	98.585
DSC_1508.JPG	-56556.688	360102.249	352.265	56.731	102.063	99.741
DSC_1509.JPG	-56556.763	360102.339	352.251	24.397	99.449	99.395
DSC_1510.JPG	-56556.792	360102.448	352.237	-8.070	97.690	98.757
DSC_1511.JPG	-56556.770	360102.580	352.225	-40.937	96.300	101.507
DSC_1512.JPG	-56558.159	360101.743	352.179	89.813	101.956	99.960
DSC_1513.JPG	-56558.267	360101.769	352.174	51.952	101.305	99.641
DSC_1514.JPG	-56558.326	360101.877	352.166	18.269	100.042	100.444
DSC_1515.JPG	-56558.344	360101.981	352.158	-17.792	98.938	100.443
DSC_1516.JPG	-56558.305	360102.099	352.149	-52.134	97.120	101.449
DSC_1517.JPG	-56559.726	360101.500	352.113	87.094	101.844	99.445
DSC_1518.JPG	-56559.824	360101.520	352.105	50.987	100.219	98.571
DSC_1519.JPG	-56559.864	360101.578	352.105	16.379	99.393	100.627
DSC_1520.JPG	-56559.857	360101.681	352.096	-15.248	97.698	99.723
DSC_1521.JPG	-56559.819	360101.770	352.086	-47.879	96.266	100.990
DSC_1522.JPG	-56561.191	360100.879	352.098	90.258	102.898	99.505
DSC_1523.JPG	-56561.296	360100.920	352.088	54.693	101.307	99.463
DSC_1524.JPG	-56561.348	360100.995	352.078	19.982	98.993	100.021
DSC_1525.JPG	-56561.370	360101.101	352.068	-14.326	97.495	100.544
DSC_1526.JPG	-56561.338	360101.221	352.052	-49.557	95.852	101.185
DSC_1527.JPG	-56562.777	360100.409	352.029	91.733	102.928	100.333
DSC_1528.JPG	-56562.937	360100.429	351.982	57.481	102.390	99.664
DSC_1529.JPG	-56563.015	360100.514	351.969	22.018	100.502	99.881
DSC_1530.JPG	-56563.034	360100.620	351.959	-11.562	98.464	100.542
DSC_1531.JPG	-56563.015	360100.732	351.951	-42.784	97.002	101.365
DSC_1532.JPG	-56564.463	360100.060	351.919	79.252	103.735	99.642
DSC_1533.JPG	-56564.553	360100.098	351.911	42.441	102.548	100.163
DSC_1534.JPG	-56564.606	360100.203	351.898	8.688	100.520	99.910
DSC_1535.JPG	-56564.665	360100.367	351.873	-25.779	97.764	100.583
DSC_1536.JPG	-56564.575	360100.440	351.868	-56.392	97.182	101.334
DSC_1537.JPG	-56566.030	360099.624	351.820	82.695	103.271	98.230
DSC_1538.JPG	-56566.111	360099.666	351.825	48.299	105.957	98.615
DSC_1539.JPG	-56566.133	360099.748	351.814	13.421	104.240	98.516
DSC_1540.JPG	-56566.155	360099.824	351.802	-19.130	101.993	99.040
DSC_1541.JPG	-56566.130	360099.918	351.793	-48.806	100.154	100.384
DSC_1542.JPG	-56567.170	360099.342	351.758	78.066	106.289	98.984
DSC_1543.JPG	-56567.265	360099.369	351.740	42.249	101.734	99.205
DSC_1544.JPG	-56567.310	360099.450	351.728	9.100	99.446	99.216
DSC_1545.JPG	-56567.309	360099.563	351.721	-24.065	98.513	101.491
DSC_1546.JPG	-56567.253	360099.649	351.714	-55.701	98.132	101.658
DSC_1547.JPG	-56568.615	360099.107	351.609	84.601	107.284	100.197
DSC_1548.JPG	-56568.752	360099.122	351.603	51.126	105.609	98.620
DSC_1549.JPG	-56568.805	360099.211	351.589	15.748	103.487	99.341
DSC_1550.JPG	-56568.809	360099.318	351.578	-17.888	101.330	99.161
DSC_1551.JPG	-56568.772	360099.434	351.569	-51.838	100.125	100.713

Bild	**X[m]**	**Y[m]**	**Z[m]**	α **[gon]**	ζ **[gon]**	κ **[gon]**
DSC_1552.JPG	-56570.009	360099.064	351.470	83.498	106.758	99.504
DSC_1553.JPG	-56570.093	360099.090	351.458	46.530	104.370	100.621
DSC_1554.JPG	-56570.147	360099.181	351.447	15.192	102.024	99.599
DSC_1555.JPG	-56570.145	360099.280	351.443	-20.351	101.493	100.719
DSC_1556.JPG	-56570.123	360099.394	351.434	-54.910	99.587	102.192
DSC_1557.JPG	-56571.733	360098.861	351.349	89.551	106.230	98.233
DSC_1558.JPG	-56571.656	360098.930	351.328	51.451	104.096	101.306
DSC_1559.JPG	-56571.759	360098.995	351.317	14.772	101.424	99.926
DSC_1560.JPG	-56571.731	360099.100	351.309	-19.292	100.109	100.952
DSC_1561.JPG	-56571.723	360099.231	351.298	-54.670	97.333	102.307
DSC_1562.JPG	-56573.208	360098.543	351.189	85.215	106.355	97.938
DSC_1563.JPG	-56573.293	360098.583	351.180	47.523	103.302	100.951
DSC_1564.JPG	-56573.360	360098.666	351.166	13.192	100.906	101.330
DSC_1565.JPG	-56573.385	360098.801	351.155	-22.995	98.262	101.417
DSC_1566.JPG	-56573.337	360098.933	351.147	-57.079	97.004	102.565
DSC_1567.JPG	-56574.801	360098.280	351.074	87.389	103.546	100.240
DSC_1568.JPG	-56574.890	360098.313	351.057	52.128	102.062	99.891
DSC_1569.JPG	-56574.939	360098.393	351.046	16.693	100.148	101.463
DSC_1570.JPG	-56574.925	360098.521	351.040	-18.615	99.138	100.378
DSC_1571.JPG	-56574.861	360098.614	351.035	-57.862	99.721	102.109
DSC_1572.JPG	-56576.350	360097.846	350.990	83.570	102.580	98.540
DSC_1573.JPG	-56576.454	360097.896	350.974	47.941	100.159	100.469
DSC_1574.JPG	-56576.495	360097.988	350.964	15.077	98.533	100.764
DSC_1575.JPG	-56576.501	360098.102	350.952	-20.642	96.534	100.402
DSC_1576.JPG	-56576.436	360098.201	350.956	-54.761	98.725	101.132
DSC_1577.JPG	-56577.752	360097.545	350.927	95.767	105.145	99.113
DSC_1578.JPG	-56577.836	360097.566	350.912	58.185	101.968	100.156
DSC_1579.JPG	-56577.902	360097.680	350.894	17.947	99.953	100.718
DSC_1580.JPG	-56577.895	360097.819	350.872	-17.985	98.217	100.029
DSC_1581.JPG	-56577.837	360097.905	350.864	-54.280	98.775	102.682
DSC_1582.JPG	-56579.247	360096.972	350.872	89.755	102.596	100.495
DSC_1583.JPG	-56579.348	360096.963	350.857	54.193	101.741	100.396
DSC_1584.JPG	-56579.401	360097.059	350.848	19.176	100.584	100.671
DSC_1585.JPG	-56579.424	360097.151	350.837	-13.074	99.258	101.153
DSC_1586.JPG	-56579.421	360097.263	350.828	-46.222	97.310	101.675
DSC_1588.JPG	-56580.746	360096.445	350.765	67.244	103.219	100.424
DSC_1589.JPG	-56580.829	360096.503	350.754	29.310	101.914	99.640
DSC_1590.JPG	-56580.868	360096.596	350.742	-0.841	99.197	100.350
DSC_1591.JPG	-56580.881	360096.705	350.729	-33.656	97.549	101.878
DSC_1594.JPG	-56582.459	360096.140	350.601	47.380	100.479	100.203
DSC_1595.JPG	-56582.513	360096.231	350.594	11.069	97.990	99.675
DSC_1596.JPG	-56582.513	360096.330	350.585	-17.991	95.986	100.297
DSC_1598.JPG	-56583.761	360095.493	350.588	63.958	101.903	99.287
DSC_1599.JPG	-56583.861	360095.559	350.573	29.868	99.288	99.794
DSC_1600.JPG	-56583.880	360095.657	350.559	-4.754	97.522	100.369
DSC_1601.JPG	-56583.864	360095.772	350.551	-38.389	96.064	102.410

Bild	**X[m]**	**Y[m]**	**Z[m]**	α **[gon]**	ζ **[gon]**	κ **[gon]**
DSC_1603.JPG	-56585.309	360094.598	350.561	54.764	100.956	100.140
DSC_1604.JPG	-56585.384	360094.682	350.553	21.541	99.355	100.400
DSC_1605.JPG	-56585.387	360094.803	350.542	-10.016	98.449	100.422
DSC_1606.JPG	-56585.371	360094.912	350.530	-45.606	96.982	102.497

Tab. B.4: Liste der Projektionszentren und der Rotationswinkel des Bildverbandes.

Literaturverzeichnis

Albertz, J. und M. Wiggenhagen (2008). *Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung*. Wichmann Herbert. 334 S. ISBN: 978-3-87907-384-9.

Bauwens, S., H. Bartholomeus, K. Calders und P. Lejeune (2016). „Forest Inventory with Terrestrial LiDAR: A Comparison of Static and Hand-Held Mobile Laser Scanning“. In: *Forests* 7.12, S. 127. DOI: 10.3390/f7060127.

Fischler, M. A. und R. C. Bolles (1981). „Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography“. In: *Communications of the ACM* 24.6, S. 381–395. DOI: 10.1145/358669.358692.

Förstner, W. und E. Gülch (1986). „A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centers of circular features“. In: *Proceedings of ISPRS Workshop on Fast Processing of Photogrammetric Data*, S. 281–305.

González-Aguilera, D., L. López-Fernández, P. Rodriguez-Gonzalvez, D. Guerrero, D. Hernandez-Lopez, F. Remondino, F. Menna, E. Nocerino, I. Toschi, A. Ballabeni u. a. (2016). „Development of an all-purpose free photogrammetric tool“. In: *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLI-B6*. ISPRS XXIII Congress, Prague (CZ), S. 31–38. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B6-31-2016.

Harris, C. und M. Stephens (1988). „A Combined Corner and Edge Detector“. In: *Procedings of the Alvey Vision Conference 1988*. Alvey Vision Club. DOI: 10.5244/c.2.23.

Karel, W., M. Doneus, G. Verhoeven, C. Briese, C. Ressl und N. Pfeifer (2013). „ORIENTAL – Automatic geo-referencing and ortho-rectification of archaeological aerial photographs“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. II-5/W1*, S. 175–180. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-175-2013.

Karel, W. (2018). *OrientAL manual*. Handbuch der photogrammetrischen Software OrientAL. GEO – Department für Geodäsie und Geoinformation, TU Wien, und VIAS – Vienna Institute for Archaeological Science, Universität Wien.

Kraus, K. (2000). *Photogrammetrie. Band 3. Topographische Informationssysteme*. Dümmler Verlag. 419 S. ISBN: 3-427-78751-6.

– (2004). *Photogrammetrie. Band 1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7. Aufl. De Gruyter. 540 S. ISBN: 978-3110177084.

Kraus, K., J. Jansa und H. Kager (1997). *Photogrammetry. Vol.2. Advanced Methods and Applications*. Dümmlers. ISBN: 3-427-78694-3.

Lowe, D. G. (2004). „Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints“. In: *International Journal of Computer Vision* 60 (2), S. 91–110.

Luhmann, T. (2018). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen – Methoden – Beispiele*. 4. Aufl. Wichmann Verlag. 792 S. ISBN: 978-3879076406.

Manual of Photogrammetry (2004). Hrsg. von ASPRS. 5. Aufl. ISBN: 978-1570830716.

Agisoft LLC (2018). *Agisoft PhotoScan*. URL: http://www.agisoft.com (besucht am 28. 09. 2018).

Leica Geosystems AG (2018). *Leica TPS1200+ Technical Data*. URL: http://www.leica-geosystems.it/downloads123/zz/tps/tps1200/brochures-datasheet/ (besucht am 14. 09. 2018).

Ni, G.-q. und Q. Lou (2004). „Analysis and prospects of multi-source image registration techniques“. In: *Opto-Electronic Engineering* 31.9, S. 1–5. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-GDGC200409000.htm.

Niemeier, W. (2002). *Ausgleichungsrechnung.* De Gruyter. ISBN: 978-3110140804.

Rosenfield, G. H. (1959). „The Problem of Exterior Orientation in Photogrammetry“. In: *Photogrammetric Engineering (PE)* 25.4, S. 536–553. URL: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1959journal/sep/1959_sep_536-533.pdf.

Weng, J., P. Cohen und M. Herniou (1992). „Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14.10, S. 965–980. DOI: 10.1109/34.159901.