



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria



DIPLOMARBEIT

Verschiebungsmessungen im Tunnelbau mit automatisierten photogrammetrischen Methoden

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums

Geodäsie und Geoinformation

eingereicht von

Rudolf Resch

Matrikelnummer 01127691

ausgeführt an der Forschungsgruppe Photogrammetrie (E120.7)

am Department für Geodäsie und Geoinformation

der Fakultät für Mathematik und Geoinformation an der technischen Universität Wien

Betreuung:

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

Projektass. Dipl.-Ing. Wilfried Karel

Wien, 9. Februar 2020

(Unterschrift Verfasser)

(Unterschrift Betreuer)

Erklärung zur Verfassung der Arbeit

Ich erkläre hiermit an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die vorliegende Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Diplomarbeit eingereicht.

9. Februar 2020

(Rudolf Resch)

	Unterzeichner	Rudolf Leonhard Resch
	Datum/Zeit-UTC	2020-02-09T22:23:23+01:00
	Prüfinformation	Informationen zur Prüfung der elektronischen Signatur finden Sie unter: https://www.signaturpruefung.gv.at
Hinweis	Dieses mit einer qualifizierten elektronischen Signatur versehene Dokument ist gemäß EU Verordnung Nr. 910/2014 (eIDAS) einem handschriftlich unterzeichneten Dokument grundsätzlich rechtlich gleichgestellt.	

Danksagung

Dank gebührt dem Ideengeber dieser Arbeit, Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. **Karl Strobl**, dessen Überlegungen aufgegriffen wurden und der mit seinem Ziviltechnikerbüro die praktischen Arbeiten ermöglichte. Bedanken möchte ich mich bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn **Norbert Pfeifer**, der die Entwicklung der anfänglichen Idee zu dieser Arbeit ermöglichte. Die Umsetzung konnte erst durch die erfolgreiche Betreuung von Projektkass. Dipl.-Ing. **Wilfried Karel** gelingen, der trotz zwischenzeitlichem Auslandsaufenthalt immer mit Rat zur Stelle war.

Besonderer Dank gebührt meiner langjährigen Partnerin **Magdalena Doppelbauer**, BSc, die mich durch die der Zeit der Tiefs getragen hat.

Meine Familie soll nicht unerwähnt bleiben. Erst durch die Unterstützung meiner Eltern **Barbara** und Ing. **Rudolf Resch** und dem Ratschlägen meiner Schwester Dipl.-Ing. **Verena Mikl-Resch** fand ich den Mut ein Studium zu beginnen, dessen Ende diese Arbeit darstellt .

Dank gebührt weiters allen Freunden, Bekannten und Weggefährten, die unerwähnt geblieben sind, mich jedoch über den Zeitraum der Diplomarbeit unterstützt haben.

Kurzfassung

Beim Tunnelbau wird als Stand der Technik eine dreidimensionale geodätische Verschiebungsmessung mit Präzessionstotalstation durchgeführt (OGG, 2014, Wulf Schubert, 2004). Ziel derselben ist es, die Bewegungen der Tunnelschale in den drei Raumrichtungen aufzuzeigen. Aus geodätischer Sicht wird bei dieser 3D-Verschiebungsmessung die Bewegung von Punkten bestimmt. In dieser Arbeit wird die Verschiebungsmessung um ein automatisiertes, photogrammetrisches Modell erweitert, mit dem einzelne Verschiebungspunkte bestimmt werden können.

Die Modelle der Geotechnik benötigen die vollständige Messung aller Punkte im definierten Bereich, um Aussagen über zu erwartende Verschiebungen tätigen zu können. Den Vermesser stellt diese Forderung von Vollständigkeit vor die Herausforderung, eine Sichtverbindung zwischen Totalstation und jedem Punkt herstellen zu müssen. Sichtverbindungen zu einzelnen Punkten können aus vielen Gründen unterbrochen sein (Unebenheiten der Tunnelwand, stehende Baumaschinen und andere Geräte, an Tunnelwand befestigte Einbauten, . . .), sodass im Sinne der Wirtschaftlichkeit ein Abwegen zwischen Vollständigkeit und Messdauer notwendig ist.

Um dies zu verringern wird im Zuge der vorliegenden Arbeit eine Erweiterung der geotechnischen Messung vorgestellt. Mithilfe eines automatisierten, photogrammetrischen Modells soll die Möglichkeit gegeben werden, einzelne, terrestrisch mit Totalstation nicht gemessene Punkte zu bestimmen. Der Ansatz entspringt praktischer Überlegung, denn Bilder für ein photogrammetrisches Modell sind deutlich schneller aufgenommen, als Standpunkte mit der Totalstation gemessen. Die Aufgabe der nachfolgenden Diplomarbeit ist nachzuweisen, ob ein automatisiertes, photogrammetrische Modell aufgestellt werden kann und dessen Genauigkeit zu untersuchen.

Zur Entwicklung und Testung der Umsetzung wurde weitgehend auf quelloffene Software in der Programmiersprache Python zurückgegriffen. Es wurde ein Messprinzip entwickelt, das auf die einzigartigen Gegebenheiten des Bauwerks Tunnel eingeht. Aus diesem wurde ein Programmablauf entworfen, der Fokus auf die *automatische* Bildung des photogrammetrischen Modells legt. Als Testumgebung diente die Großbaustelle *Semmering Basistunnel Neu*, wo die Datenerfassung (Messbilder und tachymetrische Messung) durchgeführt wurde.

Als Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Erweiterung der aktuellen Verschiebungsmessung mit automatisierten, photogrammetrischen Methoden gelingt. Mit Grundlage des Testdatensatzes wurde ein Ablauf gefunden, der Bilder nach dem vorgestellten Messprinzips übernimmt, automatisiert verarbeitet und am Ende Koordinaten von Zielmarken und deren Genauigkeiten ausgibt. Die erzielten photogrammetrischen Genauigkeiten sind aktuell in den besten Fällen um einen Faktor fünf größer, als jene der tachymetrischen. In schlechten Konfigurationen kann jener Faktor auf über 15 steigen, im Extremfall versagt das Programm. Abschließend werden bereits weitere Forschungsaspekte aufgestellt, um die Genauigkeiten weiter zu steigern.

Abstract

In the field of tunnelling, 3D displacement measurements with total stations are currently considered state of the art (OGG, 2014, Wulf Schubert, 2004). The goal of this method is to measure the movements of the tunnel lining in three directions. In this thesis, we establish how the 3D displacement measurement can be extended through an automated photogrammetric model. Through this model single displacement points can be determined, thereby adding to the current displacement measurement.

The outcome of surveyors in tunnelling serves as one of the most important inputs for the geotechnical engineers. By combining this outcome with other sources of information (i.e. geological predictions and observations) geotechnical models predict future displacements and confirm the building methods. The surveyor is therefore required to monitor all of the displacement points in the specified area. Since barriers are often blocking the needed line of sight from the total station to every displacement point, this monitoring can be a challenging task. Furthermore, the surveyor has to consider cost as well, which requires him to weigh measurement accuracy with a minimal amount of time spent underground.

Improving this trade-off is where the newly presented automated photogrammetric model finds its place. The model aims to reduce the time underground by avoiding new and additional total station standpoints whilst simultaneously minimizing the need for extra desk work. The images used as inputs for the photogrammetric model are captured through a recording setup and should be taken shortly after the total station measurements. The photogrammetric model then enables the surveyor to determine single points not measured by the total station.

The main goal of this thesis was to find a comprehensive and complete process for the automated photogrammetric model. Firstly, a capturing scheme was designed, which was then used in a measurement campaign at the construction site of Semmering Base Tunnel. Afterwards a process was developed using mostly open-source software (coded mainly in Python). The process takes the captured images and automatically calculates the photogrammetric model. During the process, some displacement points are marked for photogrammetric evaluation. These point coordinates are calculated through the photogrammetric bundle adjustment.

The results of this thesis show that current displacement measurements can be expanded through modern automated, photogrammetric methods. With the right recording setup and an optimised process, a photogrammetric model is calculated and coordinates of single displacement points are delivered. The test dataset shows that in the best cases, the achieved accuracy is decreased by a factor of five compared to total station measurements. In the worst cases, the accuracy reduces by a factor of fifteen. In extreme configurations, the obtained coordinates are unsuitable. Additional areas for future research are indicated to further improve achieved accuracy.

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation des Themas und Kurzeinführung in die Tunnelmessungen	6
1.1 Geotechnisches Monitoring	6
1.2 Dreidimensionale Verschiebungsmessung	6
1.2.1 Allgemeines	6
1.2.2 Punktdefinition und Vermarkung	7
1.2.3 Anordnung der Messpunkte	7
1.2.4 Messsystem und Messablauf	8
1.3 Zeitliche Messfenster im Tunnelbau	9
1.4 Anforderungen an die photogrammetrische Erweiterung	10
2. Theorie	11
2.1 Digitale Bildverarbeitung für maschinelles Sehen	11
2.1.1 Morphologische Filter	11
2.1.2 Kantenextraktion und Konturenfinden	12
2.2 Kamerasystem	13
2.2.1 Grundlagen der Bildentstehung	13
2.2.2 Kamerakoordinatensystem	14
2.2.3 Verzeichnung	14
2.3 Kollinearitätsgleichungen	16
2.4 Räumlicher Rückwärtsschnitt	17
2.5 Bündelblockausgleichung	18
2.5.1 Allgemeines	18
2.5.2 Mathematisches Modell	20
2.5.3 Robuste Verlustfunktion und Ausreißerdetektion	21
2.5.4 Unbekannte innere Orientierung und zusätzliche Parameter	22
2.5.5 Qualitätsmaße und Genauigkeiten	22
2.6 Exhaustive Search für Korrespondenzsuche und verbesserte Näherungswerte äußerer Orientierung	23
3. Messprinzip	25
3.1 Allgemeiner Ablauf der Messung	25
3.2 Tachymetrische Messung	25
3.3 System zur Bildaufnahme	26
3.3.1 Aufnahmeschema der Bildakquirierung	26
3.3.2 Kamerasystem	26
3.4 Verwendete Software	28
3.5 Anmerkungen	28

4. Ablauf des entwickelten Prozesses	30
4.1 Automatisiertes Bireflex-Zielmarken-Auffinden in Messbildern	31
4.2 Näherungswertverbesserung der äußeren Orientierungen und erste Korrespondenzsuche	32
4.2.1 Allgemeines und Herangehensweise	32
4.2.2 Hauptprogramm zur Näherungswertverbesserung ä. O. und Hauptkorrespondenzsuche	34
4.2.3 Exhaustive Search zur Näherungswertverbesserung äußerer Orientierung	35
4.3 Korrespondenzsuche und überbestimmter Rückwärtsschnitt	38
4.4 Bündelblockausgleichung	40
4.4.1 Übersicht über Bündelblockanwendung	40
4.4.2 Ausreißerdetektion und -eliminierung	43
5. Entwicklungsdatensatz und Testumgebung Semmering Basis Tunnel Neu	45
5.1 Projekt Semmering Basis Tunnel Neu	45
5.1.1 Allgemeines	45
5.1.2 Baulos SBT1.1 Gloggnitz	46
5.2 Datenbeschaffung	46
5.2.1 Bilddatensatz	46
5.2.2 Tachymetrische Messdaten	47
6. Auswertung	48
6.1 Auswahl eines verringerten Datensatzes	48
6.2 Bireflex-Zielmarken-Auffinden in Messbildern	48
6.3 Verbesserung der Näherungswerte der äußeren Orientierung	50
6.4 Korrespondenzsuche und weitere Verbesserung der äußeren Orientierung	51
6.5 Bündelblockausgleichung	51
6.5.1 Startparameter	52
6.5.2 Ausreißerdetektion	52
6.5.3 Ausgegliche Parameter	53
7. Diskussion und Ausblick	58
7.1 Fazit	58
7.2 Ausblick und ungenütztes Potential	58
7.2.1 Verfeinerung der aufgestellten Methoden	58
7.2.2 Erweiterungen des Messprinzips	59

1. Motivation des Themas und Kurzeinführung in die Tunnelüberwachungsmessungen

1.1 Geotechnisches Monitoring

Auch die genauesten und modernsten Methoden der geologischen und geotechnischen Erkundung vor Beginn eines Tunnelbauprojekts beinhalten Ungenauigkeiten. Diesen Ungenauigkeiten und Vereinfachungen in der Planungsphase folgen zusätzliche Risiken während des Baus. Um die Arbeiten sicher und ökonomisch auszuführen, wird im Allgemeinen ein geotechnisches Sicherheits- und Managementsystem erstellt und in diesem Zuge ein geotechnisches Monitoring durchgeführt. Mit dieser systematischen Überwachung kann der Bau optimiert und damit die Kosten und Risiken minimiert werden. Projektabhängig muss dafür ein angepasstes Überwachungskonzept aufgestellt werden, um das Systemverhalten aufzeichnen und auswerten zu können. In einer Schleife werden die Abweichungen vom Planungsmodell aufgezeigt und das Modell für weitere Planungen aktualisiert. Die aufgezeichneten Daten können verwendet werden, um Rückschlüsse auf die Bodenparameter zu ziehen.

Das geotechnische Monitoring wird durch Zusammenführen verschiedenster Informationsquellen ermöglicht. Beispiele dafür sind die geologische Dokumentation und Exploration, die optische Inspektion der Ortsbrust und der Tunnelschale, sowie weitere geotechnische Messungen. Aus diesen gemeinsamen Informationen können Aussagen zum Untergrund, zum Systemverhalten und dem dreidimensionalen Aufbau des Bodens gefunden werden. Einleitung frei übersetzt aus (OGG, 2014).

1.2 Dreidimensionale Verschiebungsmessung

1.2.1 Allgemeines

Eines der wichtigsten Instrumente des geotechnischen Monitoring stellt die *dreidimensionale geodätische Verschiebungsmessung* dar. Es werden damit die Verschiebungen der Tunnelschale in drei Richtungen festgehalten und dokumentiert. Aus diesen Bewegungen können, unter Vergleich mit prognostizierten Werten, Aussagen über das planerische Modell gezogen werden. Diese Messungen sind vor allem bei der neuen österreichischen Tunnelmethode (NÖT) von großer Wichtigkeit. Es werden damit die verwendeten Ausbaufestlegungen¹ bestätigt. Die Ergebnisse der Vermessung sind damit wichtige Bausteine für die Bereiche Wirtschaftlichkeit und Arbeitssicherheit im Tunnel.

Der bergmännische Vortrieb der NÖT erfordert das handgeführte Lösen des Gesteins mit Bagger. Daraus folgt, dass schwere Baumaschinen und alle weiteren Geräte handgesteuert bewegt werden und bei Leerlauf an der Tunnelwand abgestellt sind. In Abbildung 1.1 ist eine Übersicht des Semmering Basis Tunnels dargestellt. Es kann daran erkannt werden, dass

¹u.a. Art und Stärke der Betonaußenschale, Festlegung der Abschlagslänge



Abb. 1.1: Übersicht im Tunnel am Beispiel Semmering Basis Tunnel, in roten Kreisen sind unvollständig Zielmarken hervorgehoben

entlang der Tunnelwand Baumaschinen abgestellt sind (im Vordergrund rechts: Spritzbetonmaschine). Die Messpunkte entlang der rechten Tunnelwand beginnen über den drei Leitungsrohren, wodurch häufig die erwähnten abgestellten Maschinen zu messende Zielmarken verdecken.

1.2.2 Punktdefinition und Vermarkung

Als Messziele werden vorwiegend Bireflex-Zielmarken verwendet (siehe Abb. 1.2). Dabei handelt es sich um einen Kipphalter mit fix darauf verklebter Reflexfolie mit Loch als Mittelpunkt und wahlweise aufgedrucktem Fadenkreuz. Der Reflexfolienmittelpunkt stellt dabei die Realisierung des Messpunktes dar. Wird der Kipphalter verdreht, bleibt das Loch der Reflexfolie räumlich unverändert. Die Wahl dieser Vermarkung bringt einfache Vorteile: Egal aus welchem Winkel der Punkt beobachtet wird, es kann sichergestellt werden, dass die Reflexfolie normal auf den einfallenden Sehstrahl steht und damit eine optimale Messung durchgeführt werden kann. Das ebenfalls abgebildete Rundprisma verwendet den gleichen Kipphalter und wird nur für die Anschlusspunkte verwendet. Auf dessen Verwendung wird in Kapitel 1.2.4 vertieft eingegangen.

Die bergseitige Befestigung des Kipphalters erfolgt mit Augenmerk auf die Langzeitstabilität. Es werden Messdosen mit speziellen Verbindungsstücken in die Spritzbetonschale integriert und in der Herstellungsphase der Tunnelwand verbaut. Das Gegenstück der Verbindung ist an den Kipphaltern zu finden, wodurch die Montage einfach und weitestgehend ohne zusätzliche Werkzeuge möglich ist.

1.2.3 Anordnung der Messpunkte

Um Aussagen über das Systemverhalten des umgebenden Gebirges treffen zu können, hat sich ein System der Anordnung der Punkte etabliert. Es werden mehrere Punkte auf gleicher



Abb. 1.2: Rundprisma (links) und Goecke Bireflex Zielmarke zur Realisierung von Messzielen
Quelle: (Göcke Austria, 2018)

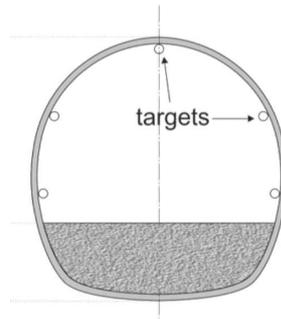


Abb. 1.3: Anordnung der Punkte bei Verwendung von fünf Messpunkten pro Messquerschnitt, Zielmarken (Messpunkte) als Targets bezeichnet, aus (OGG, 2014)

Tunnelstation in einem gemeinsamen Messquerschnitt (MQ) verbaut. Die Anzahl und genaue Anordnung hängt von verschiedenen Parametern ab, wie beispielsweise der Geologie oder dem Tunneldiameter. Im Allgemeinen werden drei bis zehn Messpunkte verbaut, die Anordnung erfolgt wie Abbildung 1.3 für fünf Punkte zeigt. Die Abstände zwischen zwei Messquerschnitten sind ebenfalls von den oben genannten Parametern abhängig. Gängige Distanzen betragen zwischen fünf und 20 Metern. (OGG, 2014)

1.2.4 Messsystem und Messablauf

Das Ziel der 3D-Verschiebungsmessung ist die Bewegung von Punkten in einem Messquerschnitt aufzudecken und Richtung und Betrag der Punktbeziehung zu dokumentieren. Die Messungen werden mit einer Präzisionstotalstation durchgeführt, welche frei stationiert zum Einsatz kommt. Um die geforderte Messgenauigkeit von 1 mm Standardabweichung an den Zielpunkten ((OGG, 2014),(Wulf Schubert, 2004)) zu erreichen, müssen die Anschlusspunkte der Stationierung als präzise Miniprismen (siehe Abb. 1.2) ausgeführt werden. Dazu werden bei stabilen Messpunkten (weniger als 1 mm Bewegung pro Monat, lt. (OGG, 2014, S 17)) die Bireflexhalter durch Miniprismen ersetzt und als Festpunkte in die Auswertung eingeführt. Die freie Stationierung erfolgt in den seltensten Fällen aus nur einem Standpunkt. Einerseits wird es kaum möglich sein, alle geforderten Punkte aus einem Standpunkt einsehen zu können und andererseits ist aus Gründen der Fehleraufdeckung und Allgemein der besseren Netzgeometrie mindestens ein weiterer Standpunkt ratsam. Die Messung in zwei Standpunkten könnte, wie in Abbildung 1.4 dargestellt, durchgeführt werden. Die dargestellten Maße (max. 80 m zum

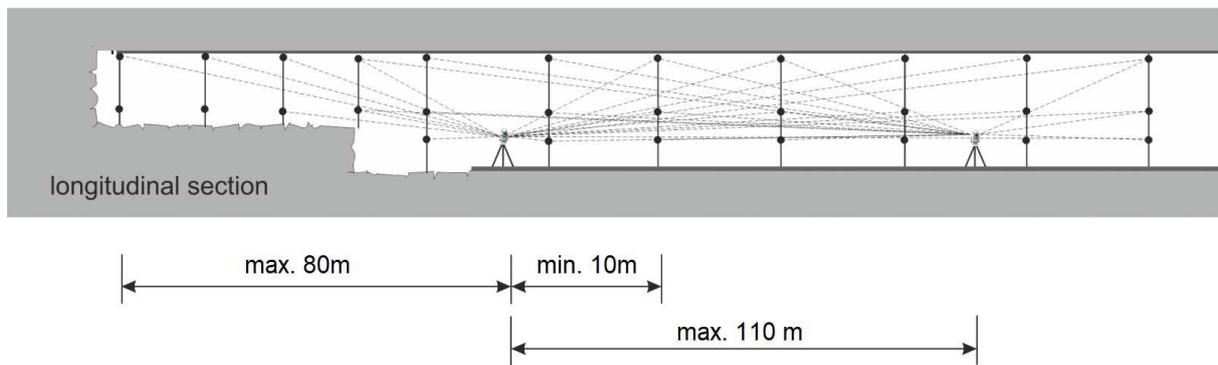


Abb. 1.4: Schematische Darstellung der freien Stationierung im Tunnel mit angeratenen Maximalabständen zwischen Standpunkten und zur Ortsbrust, aus (OGG, 2014)

weitest entfernten Messquerschnitt, min. 10 m zum nächsten Messquerschnitt, max. 110 m zwischen Standpunkten) sind Minimal- bzw. Maximalwerte und geben Auskunft über mögliche Messkonfigurationen. Es kann erkannt werden, dass aus beiden Standpunkten gemeinsame Messquerschnitte (s.g. Doppelpunkte) zur Versteifung des Netzes beobachtet werden sollten (Verbesserung der Netzgeometrie).

Bei aktivem Vortrieb wird die Deformationsmessung täglich durchgeführt. Die dabei geforderten Messquerschnitte werden nach Absprache mit den zuständigen Geotechnikern festgelegt. Im Allgemeinen sind alle Messpunkte mit Abstand bis 50 m zur Ortsbrust täglich zu messen, Punkte im Bereich zwischen 50 m und 100 m mehrmals wöchentlich und alle weiteren Punkte in größeren Zeitabständen (Wulf Schubert, 2004).

1.3 Zeitliche Messfenster im Tunnelbau

Die dreidimensionale Verschiebungsmessung stellt Ansprüche an die unmittelbare Umgebung und kann damit nicht während jedes Arbeitsschritts des Vortriebes durchgeführt werden. Um möglichst viele Messpunkte von einem Gerätestandpunkt messen zu können, sind die nötigen Gerätestandpunkte oft in der Tunnelmitte. Daraus folgt, dass der Baustellenverkehr nur eingeschränkt möglich ist oder sogar komplett unterbrochen werden muss (zwischen Standpunkt und Ortsbrust können keine Fahrzeuge verkehren). Aus wirtschaftlichen Gründen wird es nicht möglich sein, den Vortrieb für die Messdauer einzustellen. Stattdessen wird versucht die Messung so anzulegen, dass die Bautätigkeiten möglichst wenig gestört werden. Dazu ergeben sich mehrere zeitliche Fenster, in denen Messungen durchgeführt werden können.

Durch die Rücksichtnahme auf die aktuellen Arbeiten, folgt eine Verzögerung der Messung. Reine Messzeiten von beispielsweise zwei Stunden werden wegen abzuwartender Arbeitsschritte, um weitere ein bis zwei Stunden verzögert. Diese Verzögerungen bewirken einen Leerlauf des Messpersonals, das in dieser Zeit kaum andere Arbeiten durchführen kann. Der Unsicherheit über die tatsächliche Zeitdauer des abzuwartenden Arbeitsschritts folgt, dass das Messpersonal die Arbeitsfortschritte vor Ort abwarten muss.

Zu Beginn dieses Kapitels wurde auf Leerlaufzeit des Vermessers eingegangen. Die in Summe oft stundenlange Wartezeit, um die vollständige Messung durchführen zu können, könnte unter

Zuhilfenahme photogrammetrischer Methoden deutlich verringert werden.

Die Anzahl an Standpunkten bestimmt die Dauer der Messung. Sind aus den in Kapitel 1.2.4 erwähnten beiden Standpunkten nur 95 % der zu messenden Punkte einsehbar, muss zumindest ein weiterer Gerätestandpunkt gemessen werden. Wenn nun für die Messung der zusätzlichen Standpunkte obendrein ein Arbeitsschritt der Baufirma abgewartet werden muss, dehnt sich die Verzögerung von zehn bis zwanzig Minuten (reine Messzeit) auf bis zu mehrere Stunden aus. Aus der Tatsache der Verzögerung der Messungen ist die Idee dieser Arbeit entstanden. Der zeitliche Mehraufwand kann durch Einführung einer nachgeschalteten, automatisierten, photogrammetrischen Auswertung minimiert werden: Bilder für ein photogrammetrisches Modell können sehr viel schneller aufgenommen werden als Totalstationsstandpunkte gemessen. Dadurch kann die Aufnahme auch erfolgen, wenn Totalstationsmessungen momentan nicht möglich wären und somit wird die Messung beschleunigt und der Aufenthalt unter Tage verkürzt.

1.4 Anforderungen an die photogrammetrische Erweiterung

Der gesuchte Arbeitsablauf soll die Möglichkeiten aufzeigen, die die photogrammetrische Erweiterung des aktuellen Stands der Verschiebungsmessung vereinfachen kann. Dazu soll die Arbeitszeit unter Tage verringert werden, denn sie ist aus wirtschaftlicher Sicht teuer und aus dem Blickwinkel der Arbeitssicherheit potentiell gefährlich. Als weiterer wichtiger Punkt wird die Handhabung definiert. Das entwickelte Softwarepaket soll bereits in der Entwicklung weite Teile automatisiert durchführen. Diese Automatisierung erhöht den Grad der Komplexität und den Aufwand der Entwicklung.

2. Theorie

Digitale Bilder sind aus dem Alltagsleben nicht mehr wegzudenken und sind mit der wachsenden Verbreitung von digitalen Bildaufnahmesystemen (v.a. in Mobiltelefonen) beinahe jederzeit zur Hand. Werden Bilder als Grundlage für photogrammetrische Auswertungen aufgenommen, steht ein besonderer Aspekt im Fokus: Es soll ein optimales photogrammetrisches System am Ende der Auswertung erhalten werden. Die Parameter der Optimierung werden aus diesem Grund andere sein, als in der Fotografie.

Die Photogrammetrie kann in viele Teilgebiete gegliedert werden. Eine der größten davon ist die Nahbereichsphotogrammetrie. Dieser Bereich beschäftigt sich mit Objektgrößen von unter einem Meter (Industrieanwendungen) bis zu mehreren hundert Metern (Architektur- und Ingenieurwissenschaften) und ist stark interdisziplinär. Neben den, in den meisten technischen Bereichen, wichtigen Nachbardisziplinen Mathematik, Physik und Informatik sind die Bereiche Grafik und Bildverarbeitung, Computer-Aided Design (CAD), Geoinformatik und Kartografie besonders hervorzuheben.

Die Schritte der digitalen Verarbeitung der Aufnahmen werden verwendet, um in der Nachbearbeitung optimale Bilder für eine automatisierte photogrammetrische Auswertung zu erhalten. Die für diese Arbeit wichtigsten werden in den nächsten Unterkapiteln vorgestellt. Darin werden Operationen der digitalen Bildverarbeitung (Kap. 2.1) vorgestellt und vor allem auf morphologische Filter und die Kanten- und Konturensuche eingegangen. Danach wird auf das Aufnahmesystem Kamera (Kap. 2.2) eingegangen, mit Schwerpunkten bei der Bildentstehung, der Kamerakoordinatensysteme und der Verzeichnung. Die danach folgenden Abschnitte widmen sich den mathematischen Zusammenhängen zwischen Bildkoordinatensystem (Kap. 2.3) und der Bestimmung von Bildorientierungen (Kap. 2.4). Der umfangreiche Teil zur Berechnung des Ergebnisses und der Ausreißerdetektion wird erklärt (Kap. 2.5) und abschließend wird die robuste Methode der Exhaustive Search zum Finden von Korrespondenzen und der Verbesserung der äußeren Orientierung vorgestellt (Kap. 2.6).

2.1 Digitale Bildverarbeitung für maschinelles Sehen

2.1.1 Morphologische Filter

Die morphologischen Filter reihen sich unter die nicht-linearen Filter ein. Sie können nur auf Binärbilder angewandt werden, für kontinuierliche Daten sind sie irrelevant. Es wird eine klare Trennung zwischen Vorder- und Hintergrund benötigt, was in der Natur von Binärbildern mit *True* und *False* liegt. Neben der klaren Trennung von Objekt und Hintergrund, muss eine Hilfsgröße der Pixelnachbarschaft eingeführt werden. Diese wird Maske oder Kernel genannt und wird im Allgemeinen als quadratische Matrix in der Größenordnung der aufzulösenden Elemente (bspw. 3×3 oder 5×5 *Pixel*²) definiert. Die beiden häufigsten Vertreter der morphologischen Filter sind *Erode* und *Dilate*. Die Namensgebung gibt dabei schon erste Ideen, die eine Anwendung der Filter mit sich bringt. *Erode* reduziert den Vordergrund an den Rändern

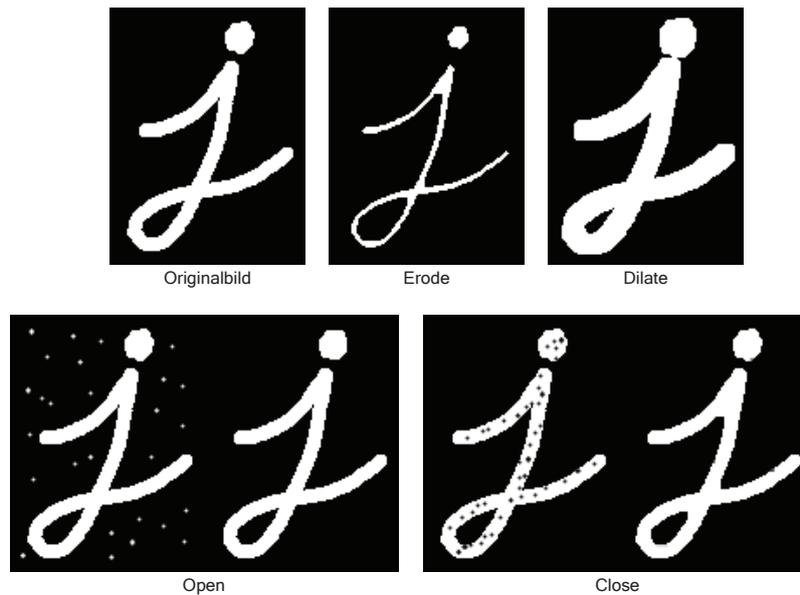


Abb. 2.1: Ergebnisse der Morphologischen Filter Dilate, Erode und den Sequenzen Open und Close mit Vordergrund Weiß und Hintergrund Schwarz, aus (OpenCV, 2019)

und glättet somit die Kontur. Es werden auch Kleinstelemente gelöscht. Dilate lagert an den Rändern an und lässt die Figur somit anwachsen. Häufig werden Sequenzen aus den beiden Befehlen verwendet, zwei sollen nun vorgestellt werden.

Die Sequenz *Open* wird aus der Ausführung von Erode und nachfolgender Dilate Operation zusammengesetzt. Der Filter bewirkt, dass dünne Verbindungen (dünner als die angewandte Maske) zwischen großen Objekten eliminiert werden, ebenso wie einzelne Kleinstelemente. Die Sequenz *Close* wiederum schließt kleine Löcher zwischen Objekten oder in größeren Objekten. Dazu wird zuerst Dilate und nachfolgend Erode angewandt. Veranschaulicht werden diese Operationen in Abbildung 2.1. Nach (Jansa, 2013).

2.1.2 Kantenextraktion und Konturenfinden

Ein beliebter Operator zur Kantenextraktion wurde von (Canny, 1979) entwickelt. Der Ablauf baut auf sechs Schritten auf, die im Folgenden kurz erwähnt werden. Der Algorithmus beginnt mit der Filterung von Bildrauschen durch Anwendung eines Gaußfilters bevor die Berechnung der Kantenstärke als Gradient erfolgt. Dieser Gradient wird in x- und y- Richtung mit dem Sobel Operator berechnet. Damit ist es nun ein einfaches die Richtung der Kante zu berechnen und diese generalisiert weiterzuverwenden. Der fünfte Schritt der „nonmaximum suppression“ versichert, dass nur dünne Kantenlinien erstellt werden. Der letzte Schritt ist wichtig, um Unterschiede im Gradienten entlang einer Kante auszugleichen und so Klein- und Kleinstsegmente durch Zusammenfügen zu vermeiden. Durch Anwendung eines s.g. Hysterese-Thresholds werden, mit der Verwendung eines Threshold-Paars, Variationen in den Gradienten entlang einer Kante abgefangen.

Die extrahierten Kanten können nun im weiteren zur Suche nach Konturen herangezogen

werden. Während der Canny-Algorithmus feine Linien an optimalen Stellen zeichnet, werden noch keine Aussagen bezüglich Objektzusammenhängen getätigt. Um diese Zusammenhänge zu finden, wird die Suche nach Konturen ausgeführt. Ein sehr beliebter Ansatz dazu wurde von (Satoshi Suzuki, 1985) vorgestellt. Dieser nimmt als Eingang ein kantenextrahiertes Binärbild und erstellt aus den gefundenen Kanten Elemente, die so genannten Konturen. Durch diese Gruppierung von Kantenpunkten zu Konturen lassen sich Objekte in Bildern erkennen und handhaben. Dazu können Hierarchien zwischen den Elementen aufgestellt, Untersuchungen zu der Form und Fläche von Konturen durchgeführt oder deren Ausdehnung untersucht werden. Beispielsweise können nun für alle gefundenen Konturen die optimalen Ellipsen nach (Fitzgibbon & Fisher, 1995) gefunden werden.

2.2 Kamerasystem

2.2.1 Grundlagen der Bildentstehung

Die Entstehung eines Bildes kann in den meisten Fällen (und so auch in dieser Arbeit) mit hinreichender Genauigkeit als Zentralprojektion der aufgenommenen räumlichen Objekte angenommen werden. Die geometrischen Abbildungsgesetze bilden den Rahmen zur mathematischen Handhabung. Soll der Zusammenhang zwischen Punkten der Abbildung (Bildpunkten) und des Objekts hergestellt werden, kann auf die Kollinearitätsgleichungen in Kapitel 2.3 verwiesen werden. In Fällen, in denen höhere Genauigkeitsanforderungen gestellt werden, muss das Modell der Zentralprojektion um weitere Terme erweitert werden. Eine dieser Erweiterungen stellt die Verzeichnung dar. Sie wird in Kapitel 2.2.3 vorgestellt.

Die Aufnahme wird im einfachsten Falle mit dem Modell der Lochbildkamera erzeugt. Die wichtigen Parameter der Orientierung dieser Kamera sollen nun vorgestellt werden. Die *innere Orientierung* wird durch das Aufnahmesystem definiert, dessen Parameter sind die Koordinaten des Projektionszentrums in einem kamerafesten Koordinatensystem $O' = (x_0 \ y_0 \ c)^T$ wobei c die Kamerakonstante darstellt und $(x_0 \ y_0)^T$ den Hauptpunkt. In Anwendungen, in denen Abbildungsfehler des Aufnahmesystems (bspw. Verzeichnung) modelliert werden, wird die innere Orientierung um diese Fehler erweitert. Die *äußere Orientierung* legt die absolute Lage der Aufnahme in Relation zu einem übergeordneten (Landes-) Koordinatensystem fest. Dessen Parameter sind der Raumvektor des Projektionszentrums $O = (X \ Y \ Z)^T$ im übergeordneten Koordinatensystem und die drei räumlichen Drehwinkel ϕ , ω und κ , die benötigt werden, um das übergeordnete in das kamerafeste Koordinatensystem im gemeinsamen Projektionszentrum zu überführen. Die Parameter der äußeren Orientierung werden im Allgemeinen indirekt aus Punkten, deren Koordinaten in beiden Systemen bekannt sind (s. g. *Passpunkte*) berechnet (siehe Kap. 2.4).

2.2.2 Kamerakoordinatensystem

Das Wissen über das verwendete Koordinatensystem, das bei der Verarbeitung der Bilder angewandt wird, wird interessant, sobald eigene Funktionen entworfen werden oder ein Softwarewechsel vorgenommen wird. Als Definition der Kamerakoordinatensysteme sollen zwei vorgestellt werden, die in der gängigen Praxis verwendet werden.

Bei den Koordinatensystemen handelt es sich um rechtwinklige, rechtshändige, kartesische Koordinatensysteme mit unterschiedlicher Lagerung. Die häufigste Verwendung findet eine Lagerung im Mittelpunkt des obersten linken Pixel des Bilds mit unterschiedlicher Achsendefinition. Die X-Achse wird durch die Mittelpunkte der nächstgelegenen Pixel in Zeilenrichtung definiert. Aus der Forderung der *rechten Hand Regel* ergibt sich je nach Definition der Y-Achse auch jene der Z-Achse. In Abbildung 2.2a zeigt die Y-Achse aus dem Bild, entlang der Spalte (wie bei OrientAL). Daraus folgen negative Y-Werte für alle Koordinaten im Bildbereich (ausgenommen der ersten Zeile). Weiters folgt, dass die Z-Achse zum Bildbetrachter zeigt. Die Definition rechts vermeidet, durch die Definition der Y-Achse entlang der Spaltenrichtung, negative Werte in Bildbereich (verwendet in openCV). Die Z-Achse hingegen zeigt weg vom Bildbetrachter (in Richtung des abgebildeten Objekts), zu finden in Abb. 2.2b.

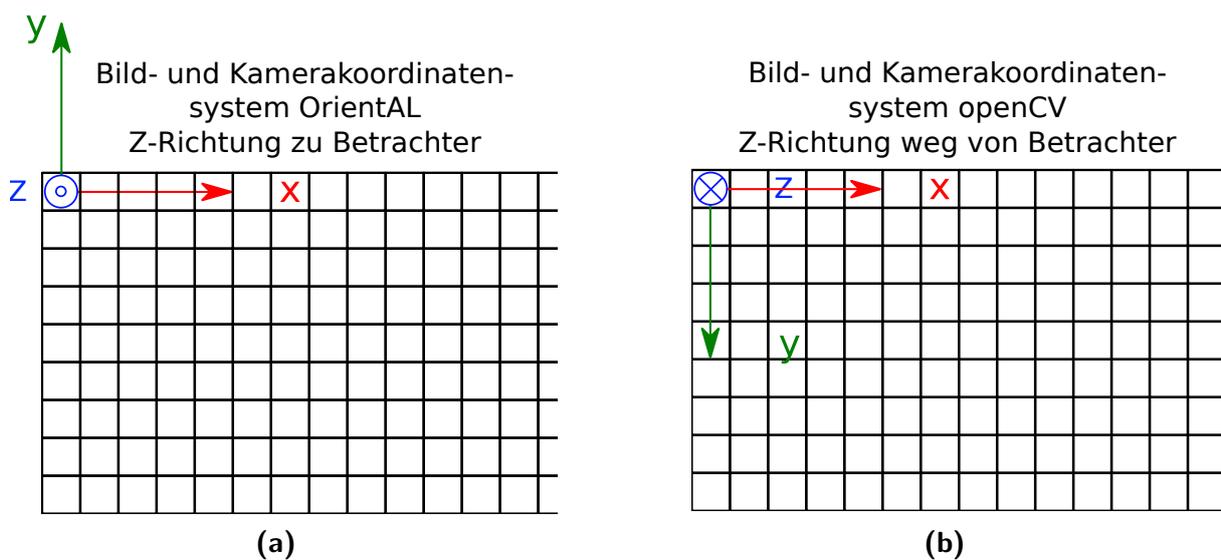
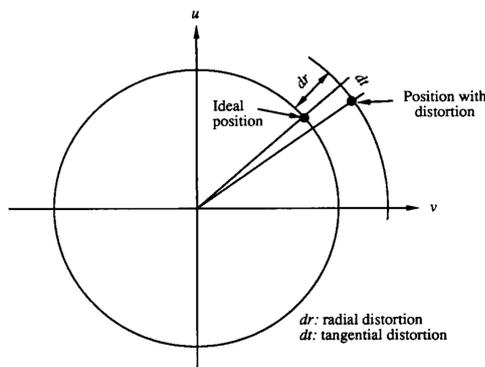


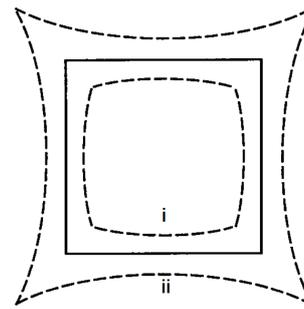
Abb. 2.2: Zwei gebräuchliche Kamerakoordinatensysteme wie sie in den Softwarepaketen OrientAL und openCV verwendet werden, nach (Karel, 2018)

2.2.3 Verzeichnung

Die Abbildung der Realität auf den Sensor der Kamera geschieht über ein Linsensystem des Kameraobjektivs. Dieses Objektiv *verzeichnet* das Bild der Realität aufgrund von Abweichungen zum theoretischen Modell der Zentralprojektion (dünne Linse der theoretischen Überlegung wird zu Linsensystem in praktischer Anwendung, Details siehe (Luhmann, 2018)). Der zu betrachtende Fehler wird Verzeichnung genannt und wird vor allem bei Abbildung von Geraden bemerkbar. Diese werden nicht weiter als Geraden abgebildet, sondern gebogen, wie in Abbildung 2.3b dargestellt. Es zeigt den radial-symmetrischen Fehleranteil, der den größten Einfluss



(a) Radial-symmetrische und tangentielle Anteile



(b) Geraden werden als gebogene Linien abgebildet und zeichnen sich als kissenförmige (ii) und tonnenförmige (i) Verzeichnung aus

Abb. 2.3: Radial-symmetrische und tangentielle Verzeichnung; Auswirkung der radial-symmetrischen und tangentialen Komponente der Verzeichnung (a); Radial-symmetrische Verzeichnung (unterbrochene Figuren) mit Unterschieden im Vorzeichen im Verhältnis zur unverzerrten Figur (b) aus (Weng, Cohen & Herniou, 1992)

besitzt. Die Form und Stärke der Verzeichnung ist vom Aufnahmesystem und den Einstellungen der Bildaufnahme (v.a. Brennweite und Blende) abhängig.

Die Ausprägung des radial-symmetrischen Fehlers ist abhängig von der Distanz zum Mittelpunkt. Dieser ist gleichzeitig jener, mit dem größten Einfluss. Bei einem Radius r_0 vom Hauptpunkt zeigt er Null. Sowohl in Richtung Hauptpunkt, als auch Richtung Bildrand steigt der Absolutwert der Abweichung an, jedoch zumeist mit je umgekehrten Vorzeichen.

Sollen Bilder für eine hoch genaue photogrammetrische Auswertung verwendet werden, bildet die Verzeichnung einen systematischen Fehler, der sich als zusätzliche Parameter der inneren Orientierung handhaben lässt. Die Modellierung der Verzeichnung wurde bereits in vielen Fachpublikationen behandelt, wie beispielsweise (Weng, Cohen & Herniou, 1992), (Förstner & Wrobel, 2016) und (Luhmann, 2018). In dieser Arbeit wurde auf die Erklärungen in (Kraus, 2004) und die Vertiefung in (Kraus, 1996) zurückgegriffen, das in vereinfachter Form häufig in der Praxis Anwendung findet. Das ursprüngliche Modell verwendet ein Verzeichnungspolynom 5. Grades, in der praktischen Anwendung werden jedoch oft nicht alle Polynomparameter modelliert. Im Einzelfall der Anwendung muss getestet werden, wie umfangreich das funktionale Modell der Verzeichnung sein soll. In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die Handhabung von nur zwei Verzeichnungsparametern genügt. Daraus ergeben sich die in Formeln 2.2 und 2.3 dargestellten Zusammenhänge. Die Abweichungen werden in radiale und tangentielle Komponenten aufgeteilt und gesondert für X- und Y-Koordinate berechnet. Der radial-symmetrische Anteil ist in Formel 2.2 mit Index r dargestellt, während der Index t den tangentialen Anteil handhabt.

$$x_n = \frac{x - x_0}{\rho} \quad y_n = \frac{y - y_0}{\rho} \quad r = \sqrt{x_n^2 + y_n^2} \quad (2.1)$$

In Formel 2.1 sind die vorbereitenden Größen dargestellt. Dabei wird x_0, y_0 als Koordinaten

des Hauptpunktes, x_n, y_n als normierte Punktkoordinaten und r die Distanz der normierten Koordinaten vom Hauptpunkt. ρ wird Maßstab eingeführt, der geläufig als Wert $\frac{1}{3}$ der Bild-diagonale misst. Dieser bewirkt eine Normierung der Verzeichnungsparameter bezüglich der Sensorgröße und macht die Parameter verschiedener Aufnahmesysteme vergleichbar.

$$\begin{aligned} dx_{r,3} &= g_{13}x_n(r^2 - 1) & dy_{r,3} &= g_{13}y_n(r^2 - 1) \\ dx_{t,5} &= g_{15}x_n(r^2 + 2x_n^2) & dy_{t,5} &= g_{15}2x_ny_n \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$x' = x - (dx_{r,3} + dx_{t,5}) \quad y' = y - (dy_{r,3} + dy_{t,5}) \quad (2.3)$$

Um einen, um die Verzerrung korrigierten, Bildpunkt zu erhalten, muss der beobachtete Bildpunkt um die Summe der berechneten Verzerrungsdifferenzen nach Formel 2.3 modifiziert werden.

2.3 Kollinearitätsgleichungen

Die Kollinearitätsbeziehung setzt Koordinaten im Kamerakoordinatensystem (siehe Kap.2.2.2) in Beziehung zu den Koordinaten eines übergeordneten Koordinatensystems. Sie wird nach (Luhmann, 2018) auch als *Grundgleichungen der Photogrammetrie* bezeichnet. Die zugrundeliegenden Zusammenhänge (und auch der Name) stammen aus der Zentralprojektion des Raums, denn es liegen der definierte Bildpunkt mit dem Objektpunkt und dem Projektionszentrum auf einer gemeinsamen Geraden (damit sind die drei Punkte *kollinear*). Erkennbar ist diese Kollinearität in Abbildung 2.4 zwischen Projektionszentrum O' , Bildpunkt P'_i und Objektpunkt P_i .

In dieser Herleitung wird ein kamerafestes Koordinatensystem, wie in Abbildung 2.2a dargestellt, verwendet. Der Übergang von Bild- zu Objektkoordinatensystem und vice versa kann als Spezialfall der Ähnlichkeitstransformation nach Formel 2.4 verstanden werden. Der Vektor vom Projektionszentrum zum Objektpunkt (im übergeordneten Koordinatensystem) wird so verdreht und maßstäblich verändert, dass er identisch zum Vektor vom Projektionszentrum zum Bildpunkt (im Kamerakoordinatensystem) wird. Eine Verschiebung ist nicht notwendig, weil als Bezugspunkt in jedem System das gemeinsame Projektionszentrum fungiert.

$$(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = \frac{1}{m} \mathbf{R}^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (2.4)$$

Dabei werden die Bildkoordinaten des Punktes P'_i mit $\mathbf{x} = (x \ y \ 0)^T$ bezeichnet, die Koordinaten des Objektpunktes im übergeordneten System $\mathbf{X} = (X \ Y \ Z)^T$ und das Projektionszentrum in Bildkoordinaten $\mathbf{x}_0 = (x_0 \ y_0 \ c)^T$ und übergeordneten Koordinaten $\mathbf{X}_0 = (X_0 \ Y_0 \ Z_0)^T$

eingeführt. Die Rotationsmatrix wird als $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$ bezeichnet. Die Einträge der Rotationsmatrix sind keine Unbekannten, jedoch Funktionen von Unbekannten, ω , ϕ und κ . Wird Formel 2.4 angeschrieben folgt:

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ 0 - c \end{pmatrix} = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Aus diesem Gleichungssystem kann durch Division der ersten beiden Zeilen durch die dritte und anschließender Lösung nach den Bildkoordinaten $(x \ y)^T$ die folgende Form gefunden werden:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = x_0 - c \cdot \frac{Z_x}{N} \\ y &= y_0 - c \cdot \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = y_0 - c \cdot \frac{Z_y}{N} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Die Kollinearitätsgleichungen werden zum räumlichen Rückwärtsschnitt, zur relativen Orientierung usw. genutzt (Albertz & Wiggenhagen, 2009) und stellen die Grundlagen für das funktionale Modell des Bündelblockausgleichs dar.

2.4 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Der räumliche Rückwärtsschnitt dient zur rechnerischen Bestimmung der äußeren Orientierung eines Einzelbildes. Dazu müssen die übergeordneten Koordinaten von mindestens drei Objektpunkten gegeben sein, die nicht auf einer Geraden liegen dürfen. Das durch die Passpunkte aufgespannte Strahlenbündel des Bildes lässt sich mit Näherungswerten der äußeren Orientierung in nur einer eindeutigen Lage und Orientierung auf die in der Bildebene verteilten Bildpunkte einpassen (siehe Abb. 2.4). Dazu müssen die Parameter der inneren Orientierung mit gewisser Genauigkeit bekannt sein.

Zur Berechnung stehen viele unterschiedliche Ansätze zur Verfügung. In dieser Arbeit wurde jener nach (Ke & Roumeliotis, 2017) verwendet. Es stellt eine effiziente Berechnung des Problems zur Verfügung. Bei Verwendung von nur drei Punkten ohne weitere Informationen ist die Lösung nicht eindeutig. Erst bei Hinzunahme eines vierten Punktes oder Näherungswerten der äußeren Orientierung kann für die korrekte Lösung entschieden werden.

Die Güte der erhaltenen äußeren Orientierung hängt u.a. von der Verteilung der drei Punkte im Messbild ab. Wie erwähnt, kann nur eine Lösung berechnet werden, wenn die Punkte nicht kollinear sind. Weiters dürfen die Punkte nicht auf einer *gefährlichen Fläche* zuliegen kommen.

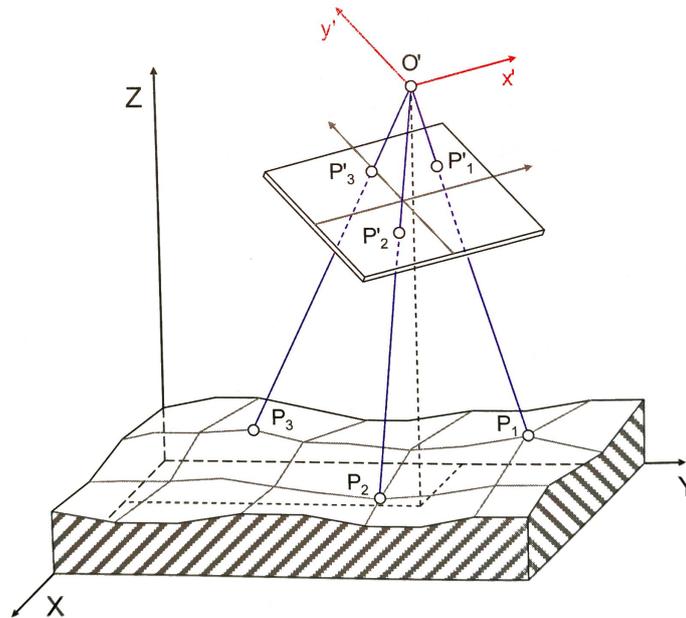


Abb. 2.4: Darstellung des räumlichen Rückwärtsschnitts aus (Luhmann, 2018), auch erkennbar: Kollinearität von Bildpunkt (P'_i), Objektpunkt (P_i) und Projektionszentrum O'

Eine solche Fläche ist ein Zylindermantel. Kommen die Objektpunkte mit dem Projektionszentrum auf oder nahe einem gemeinsamen Zylindermantel zu liegen, wird die Bestimmung der äußeren Orientierung mittels Rückwärtsschnitts versagen.

Zusammenfassung aus (Luhmann, 2018, S. 277 ff)

2.5 Bündelblockausgleichung

2.5.1 Allgemeines

Die Bündelblockausgleichung ist ein Verfahren zur simultanen rechnerischen Einpassung beliebig vieler im Raum angeordneter Bilder (Projektionszentrum und Bildpunkte definieren Strahlenbündel) unter Berücksichtigung photogrammetrisch gemessener Bildpunkte, sowie eines übergeordneten Koordinatensystems. Durch Erweiterung des funktionalen Modells ist es möglich, dass auch geodätische Beobachtungen in die Ausgleichung eingehen. Die einzelnen Bilder werden mithilfe identer (korrespondierender) Bildpunkte zu einem Gesamtmodell verknüpft, in dem das Objekt bereits vollständig dreidimensional rekonstruiert werden kann. Der Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem kann über Passpunkte erfolgen. Als wichtigste Forderung wird an das Ergebnis gestellt, dass sich alle korrespondierenden Bildstrahlen optimal in ihrem Objektpunkt schneiden sollen.

In einem überbestimmten Gleichungssystem werden 3D-Objektpunktkoordinaten, Orientierungsparameter der Bilder zusammen mit ihren zugehörigen statistischen Angaben zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit durch Ausgleichung gleichzeitig berechnet.

Das Ausgleichssystem kann wie folgt formuliert werden: Die Strahlenbündel werden

- verschoben (drei Translationen X_0, Y_0, Z_0)

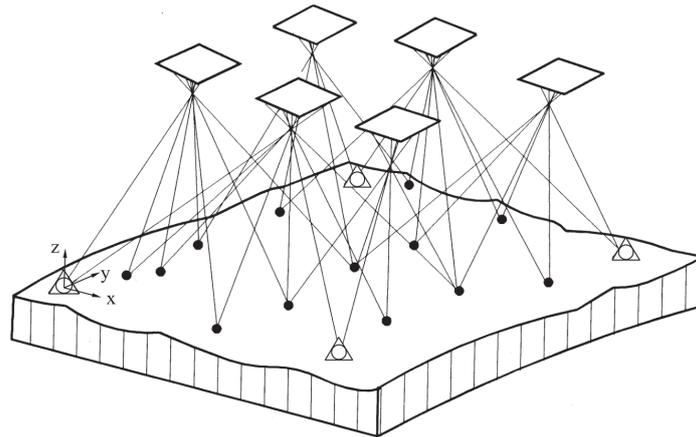


Abb. 2.5: Darstellung der Bündelblockausgleichung aus (Kraus, 2004)

- gedreht (drei Rotationen ω, ϕ, κ)

bis die entsprechenden Strahlen

- an den Verknüpfungspunkten möglichst gut zum Schnitt kommen
- mit den Passpunkten möglichst gut zusammentreffen.

Der mathematische Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten und den übergeordneten Objekt- bzw. Landeskoordinaten wird nach den Kollinearitätsgleichungen (siehe Kap. 2.3) hergestellt. Das Verfahren kann als Form simultaner räumlicher Vorwärts- und Rückwärtsschnitte aufgefasst werden, bei dem zusätzliche Unbekannte für weitere Bilder sowie für Objektpunkte (Neupunkte) hinzukommen (Mehrpunkteinschaltung). Die auftretenden Probleme liegen dabei weniger in der mathematischen Formulierung, als vielmehr in den Bereichen der Lösung großer Normalgleichungssysteme, der Beschaffung von Näherungswerten der Unbekannten und der Aufdeckung und Elimination grober Datenfehler.

Die Bündelblockausgleichung ist nach (Luhmann, 2018) das leistungsfähigste und genaueste Verfahren zur Bildorientierung und Punktbestimmung in der Photogrammetrie. Insbesondere im Nahbereich hat die Bündelblockausgleichung viel Erfindergeist benötigt. Einhergehend mit der kontinuierlichen Steigerung der Rechenleistung, den Entwicklungen im Bereich der digitalen Amateurphotographie und der Weiterentwicklung von Mobiltelefonen zu Smartphones sind immer wieder neue Anwendungsbereiche entstanden.

Die Bündelblockausgleichung im Nahbereich besitzt folgende Eigenschaften:

- unregelmäßig angeordnete, beliebige Aufnahmekonfigurationen (siehe Abb. 2.6)
- komplexere Struktur von Normalgleichungssystemen, verglichen mit anderen Disziplinen der Photogrammetrie
- aufwändige Beschaffung von Näherungswerten
- Verwendung mehrerer (Amateur-) Kameras möglich
- Ausgleichung zusätzlicher (geodätischer) Beobachtungen und Bedingungen

Das Kapitel 2.5 ist eine Zusammenfassung aus (Luhmann, 2018) und (Kraus, 2004).

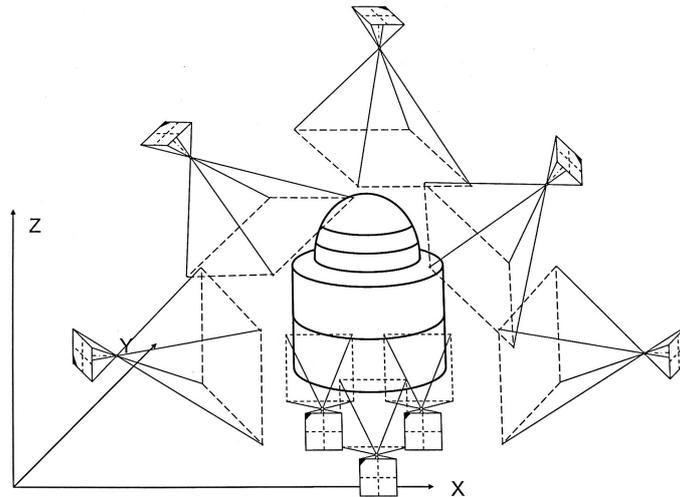


Abb. 2.6: Darstellung der Bündelblockausgleichung im Nahbereichsfall aus (Luhmann, 2018)

2.5.2 Mathematisches Modell

Die zugrundeliegenden mathematischen Zusammenhänge stellen die Kollinearitätsgleichungen zur Verfügung (vgl. Kap. 2.3). Für jeden gemessenen Bildpunkt werden nach Formel 2.7 zwei Verbesserungsgleichungen aufgestellt. Dabei werden für jeden (Neu-) Punkt i , dessen Bildkoordinaten im Messbild j gemessen wurden, die linearisierten Verbesserungsgleichungen einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen angegeben.

$$\begin{aligned}
 v_{xij} = & \left(\frac{\partial x}{\partial X_{0j}} \right)^0 dX_{0j} + \left(\frac{\partial x}{\partial Y_{0j}} \right)^0 dY_{0j} + \left(\frac{\partial x}{\partial Z_{0j}} \right)^0 dZ_{0j} \\
 & + \left(\frac{\partial x}{\partial \omega_j} \right)^0 d\omega_j + \left(\frac{\partial x}{\partial \phi_j} \right)^0 d\phi_j + \left(\frac{\partial x}{\partial \kappa_j} \right)^0 d\kappa_j \\
 & + \left(\frac{\partial x}{\partial X_i} \right)^0 dX_i + \left(\frac{\partial x}{\partial Y_i} \right)^0 dY_i + \left(\frac{\partial x}{\partial Z_i} \right)^0 dZ_i - (\bar{x}_{ij} - x_{ij}^0) \\
 v_{yij} = & \text{entsprechend}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Die Unbekannten sind die sechs Elemente der äußeren Orientierung des Messbildes j und die drei Objektraumkoordinaten des Punktes i . Verläuft ein Strahl zu einem Festpunkt, entfallen die Terme für (dX_i, dY_i, dZ_i) . In den Klammern $()^0$ sind die Differentialquotienten dargestellt, die Formeln zur Berechnung können in (Kraus, 2004) und mit etwas anderer Notation in (Luhmann, 2018) gefunden werden. Die Bildkoordinaten (x_{ij}^0, y_{ij}^0) sind gerechnete Bildkoordinaten, die mittels Kollinearitätsbeziehungen (Formel 2.6) aus den Objektkoordinaten und den Näherungswerten der Unbekannten berechnet werden. $(\bar{x}_{ij}, \bar{y}_{ij})$ sind die gemessenen Bildkoordinaten.

Das Verbesserungsgleichungssystem sieht in Matrixschreibweise wie folgt aus:

$$\mathbf{v} = \mathbf{Ax} - \mathbf{l} \quad (2.8)$$

mit der Normalgleichung:
$$\mathbf{A}^T \mathbf{Ax} = \mathbf{A}^T \mathbf{l} \quad (2.9)$$

Setzt man anstelle von $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ das Symbol \mathbf{N} und anstelle von $\mathbf{A}^T \mathbf{l}$ das Symbol \mathbf{n} , so lautet das Normalgleichungssystem:

$$\mathbf{Nx} = \mathbf{n} \quad (2.10)$$

Eine Ausgleichung liefert Korrekturen zu den Näherungswerten der äußeren Orientierungselemente jedes Messbildes und zu den Näherungskordinaten der Neupunkte. Bei schlechten Näherungswerten sind die korrigierten Werte wieder als Näherungswerte zu betrachten und die Ausgleichung zu wiederholen. Dieser Vorgang muss durchgeführt werden, bis das Ergebnis nach der Ausgleichung den eingegebenen Näherungswerten ausreichend gut entspricht.

2.5.3 Robuste Verlustfunktion und Ausreißerdetektion

Die Bündelblockausgleichung ist sehr empfindlich gegenüber groben Messfehlern (Ausreißern) im Datensatz. Grobe Fehler entstehen in komplexen Bildverbänden leicht durch Verwechslung von Objektpunkten und Vergabe falscher Punktkorrespondenzen oder Bildnummern. Durch fortschreitende Automatisierung treten vor allem letztere Fehlerquellen häufig auf.

Zur Handhabung grober Fehler sind in allen aktuellen Bündelblock Ausgleichsprogrammen Programmbausteine enthalten, um Beobachtungen mit groben Fehlern aus dem Ergebnis auszuschließen oder zumindest geringer zu gewichten. Grobe Fehler können im Ausgleichsprozess erkannt werden, da es sich im einfachsten Falle um die Beobachtungen mit den größten normierten Verbesserungen handelt.

Bei größerer Anzahl und komplexerem Zusammenspiel von Ausreißern kommen alternative Verlustfunktionen (V_f) zum Einsatz. Jene der kleinsten Quadrate wird allgemein als triviale V_f bezeichnet. Im Ausgleichsprogramm OrientAI stehen neben der trivialen noch sechs weitere V_f zur Verfügung, die Unterschiede in der Gewichtung von Beobachtungen mit großen Verbesserungen zeigen. Sie werden u. a. verwendet, um Ausgleichssysteme, in deren Datensatz grobe Fehler vermutet werden, zu berechnen. Die erhaltenen Ergebnisse ähneln bei guter Netzkonfiguration einer Ausgleichung mit trivialer V_f ohne Ausreißer. Damit kann iterativ eine Ausreißersuche und -eliminierung durchgeführt werden. Es sollte pro Ausgleichsschritt nur je ein vermuteter Ausreißer entfernt und die weitere Netzkonfiguration, ohne diese Beobachtung, überwacht werden. Nach Ausschluss der Beobachtung mit dem letzten, aufgedeckten groben Fehler ist die Bündelblockausgleichung ohne grobe Fehler und es kann mit der trivialen V_f die optimale Lösung berechnet werden.

Teile nach (Luhmann, 2018, S. 381).

2.5.4 Unbekannte innere Orientierung und zusätzliche Parameter

Vor allem bei Verwendung von Amateurkameras für die Aufnahmen, ist die Erweiterung des Bündelblockausgleiches interessant. Damit können die Parameter der inneren Orientierung und Parameter zur Korrektur von Abbildungsfehlern im Ausgleich bestimmt werden. Dazu werden die Verbesserungsgleichungen in Formel 2.7 um *zusätzliche Parameter*, nämlich die Größen der inneren Orientierung samt Verzeichnung, erweitert. Diese Art der Beschaffung der Kalibrierparameter wird auch *Simultankalibrierung* oder *Selbstkalibrierung* genannt.

2.5.5 Qualitätsmaße und Genauigkeiten

Mit der Standardabweichung der Gewichtseinheit \hat{s}_0 steht direkt aus dem Ausgleich ein Qualitätsmaß des Bündelblockausgleichs bereit. Diese sollte, sofern weder systematische Fehler unbeachtet bleiben, noch Ausreißer in den Beobachtungen enthalten sind, im Rahmen der erwarteten Bildpunktmessgenauigkeit liegen.

$$\hat{s}_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{r}} \quad (2.11)$$

$$\text{mit Redundanz} \quad r = n - u \quad (2.12)$$

mit

n ... Anzahl an Beobachtungen

u ... Anzahl an Unbekannten

Es wird deutlich, dass \hat{s}_0 den mittleren Rückprojektionsfehler darstellt und nur unter den genannten Umständen als Maß für die äußere Genauigkeit² verwendet werden darf. Mit der Division durch die Redundanz r fällt auf, dass weitere Beobachtungen, bei gleichbleibender Anzahl an Unbekannten, \hat{s}_0 beliebig weit verringern. Eine genauere Objektrekonstruktion geht damit aber nicht zwingend einher.

Die Genauigkeiten der Bildkoordinaten a posteriori werden aus der Kofaktormatrix berechnet:

$$\hat{s}_i = \hat{s}_0 \sqrt{q_{ii}} \quad (2.13)$$

Die Elemente q_{ii} sind die Hauptdiagonalelemente der Kofaktormatrix der ausgeglichenen Beobachtungen $\mathbf{Q}_{\hat{w}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{Q}_{\hat{X}\hat{X}} \cdot \mathbf{A}^T$ mit der Kovarianzmatrix $\mathbf{Q}_{\hat{X}\hat{X}} = \mathbf{Q}_{xx}$.

Die Genauigkeiten der ausgeglichenen Objektpunkte ergeben sich aus den Elementen der Hauptdiagonale der Kofaktormatrix der Unbekannten \mathbf{Q}_{xx} und geben Informationen über

²Genauigkeit des Modells im Bezug zum übergeordneten Koordinatensystem

die *innere Genauigkeit* (Präzision) der photogrammetrischen Auswertung. Dabei soll beachtet werden, dass bei gezwängter Ausgleichung etwaige Spannungen der Passpunkte die Genauigkeiten beeinflussen. Aussagen über die *äußere Genauigkeit* können nicht direkt aus der Bündelblockausgleichung erfolgen. Es müssen dazu unabhängige Kontroll- bzw. Vergleichspunkte verwendet werden. In dieser Arbeit wird die aufgestellte Methodik (siehe Kap. 4) untersucht. Darum sind Neupunkte des Bündelblockausgleichs keine eigentlichen Neupunkte, sie wurden bereits tachymetrisch bestimmt. Dadurch wird als Maß der äußeren Genauigkeit der Betrag des Differenzvektors zwischen den Koordinaten des Bündelblockausgleichs und dessen bekannter Koordinate aus der tachymetrischen Aufnahme berechnet.

2.6 Exhaustive Search für Korrespondenzsuche und verbesserte Näherungswerte äußerer Orientierung

Als Exhaustive Search (engl. *erschöpfende Suche*) wird eine lineare Suchmethode bezeichnet, die unbekannte Parameter schätzt, wenn bekannte (genäherte) Ergebnisse vorhanden sind. Dazu werden alle minimalen Sets an Beobachtungen eines direkten Verfahrens aufgestellt und deren Ergebnisse berechnet. Die erhaltenen Ergebnisse müssen über einen Vergleich mit einem vorab bekannten richtigen (genäherten) Ergebnis in Korrekt und Falsch sortiert werden. Auf Basis dessen wird eine Aussage, ob Parameter korrekt sind, abgeleitet. Eine Anwendung wird in (Förstner & Wrobel, 2016, S. 151) für die robuste Schätzung gezeigt. Einem ähnlichen Ansatz folgend ist der Random Sample Consensus (RANSAC) von (Fischler & Bolles, 1981) zur robusten Handhabung von Datensätzen mit groben Fehlern.

Verwandte Begriffe, die in unterschiedlichen Fachgebieten verwendet werden lauten

- Generate-And-Test Search (*Generiere-Und-Teste Suche*)
- Complete Search (*Vollständige Suche*)
- Brute-Force Search (*Rohe Gewalt Suche*)

Dabei sind die Herangehensweisen sehr ähnlich und die Unterschiede in Methodik und Bezeichnungen orientieren sich an dem jeweiligen Fachgebiet.

Die Anwendung der *exhaustive Search* startet mit Aufstellen aller minimalen Sets (Permutationen der Beobachtungen), mit denen das Problem eindeutig gelöst werden kann. Diese Liste wird schrittweise abgearbeitet und so werden ebenso viele Lösungen berechnet. Die Ergebnisse müssen mit einem vorab bekannten, korrekten, (genäherten) Ergebnis verglichen und nach einem passenden *Score* bewertet werden. Jene Beobachtungsgruppen, deren Lösungen als richtig angenommen werden, werden als Inlier bezeichnet, die Beobachtungen, die zu fehlerhaften Ergebnissen führen als Outlier.

Die exhaustive Search ist eine der einfachsten Suchalgorithmen und bezahlt ihre Einfachheit mit hohem Rechenaufwand. Mit steigender Anzahl an Beobachtungen steigt die Anzahl der Permutationen des Minimalsets exponentiell. Das schränkt die Anwendung der exhaustive

Search auf Suchprobleme mit einer geringen Anzahl an Beobachtungen und einer direkten Lösung der Parameter ein. Weiteres Wissen über die Wahrscheinlichkeit von Parametern korrekt zu sein, helfen die Sortierung der Permutationsliste zu Verbessern, um das Finden eines korrekten Parametersatzes zu beschleunigen. Nach (Förstner & Wrobel, 2016, S. 153).

In dieser Arbeit wird die exhaustive Search verwendet, um die sprichwörtliche *Nadel im Heuhaufen* zu finden. Der Datensatz wird durch die zufällige Zuordnung von Modell- und Objektpunkten dargestellt (Permutationen, *der Heuhaufen*). Mit den Permutationen wird ein räumlicher Rückwärtsschnitt berechnet, dessen genähertes Ergebnis bekannt ist. Unter Zuhilfenahme des genäherten Ergebnisses werden grob falsche Parameter frühzeitig erkannt und ausgeschieden. Es sollen die Näherungsparameter der äußeren Orientierung verbessert und korrekte Zuordnungen (Korrespondenzen) zwischen Objekt- und Modellraum (*die Nadel*) gefunden werden. Der erwähnte Score wird in dieser Arbeit erweitert, denn er zeigt nicht nur binär, ob das Ergebnis Korrekt oder Falsch ist, sondern gibt Auskunft über die Güte der Parameter der äußeren Orientierung. Dazu ist die Bewertung der Ergebnisse, als Anzahl an gefundenen Korrespondenzen realisiert. Die Anwendung kann in Kapitel 4.2.3 gefunden werden.

3. Messprinzip

3.1 Allgemeiner Ablauf der Messung

Die erprobte 3D- Verschiebungsmessung im Tunnelbau wird in dieser Arbeit um eine danach folgende, aufbauende, photogrammetrische Auswertung erweitert. Der Arbeitsablauf ändert sich dabei bereits nach der tachymetrischen Aufnahme im Tunnel (siehe Abbildung 3.1). In diesem Moment muss entschieden werden, ob eine photogrammetrische Auswertung notwendig ist. Wird dafür entschieden, müssen die Bilder aufgenommen werden. Der zeitliche Abstand zwischen tachymetrischer Messung und Bildakquirierung ist von den erwarteten Verschiebungen der Zielmarken abhängig. Ist der Zeitabstand zwischen den Aufnahmen zu groß, kann es zu tachymetrisch nicht beobachteten Bewegungen an den Zielmarken kommen, wodurch die tachymetrische und photogrammetrische Auswertung unterschiedliche Modelle darstellen würde. Die Ergebnisse sind dadurch nur noch bedingt aussagekräftig.

Sind die Bilder aufgenommen, ist die Feldarbeit abgeschlossen und die Auswertung kann durchgeführt werden. Begonnen wird mit der Auswertung der tachymetrischen Messung, denn diese stellt Eingangsdaten für die photogrammetrische Auswertung bereit und definiert die photogrammetrisch zu berechnenden Punkte. Die beobachteten Messpunkte der tachymetrischen Messung werden zur Bestimmung von Näherungswerten und in der abschließenden Bündelblockausgleichung als Passpunkte verwendet.

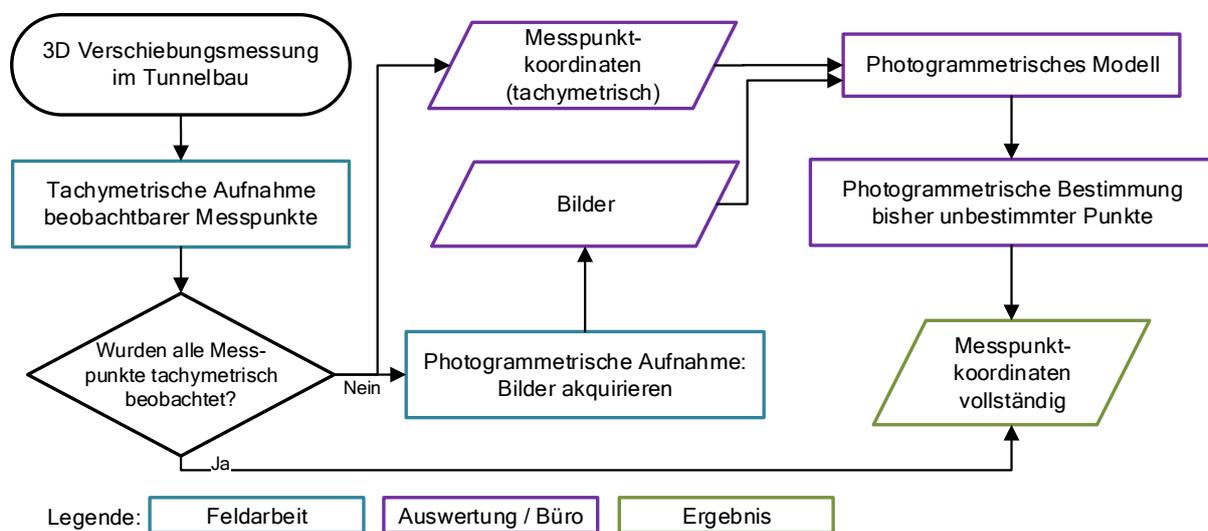


Abb. 3.1: Arbeitsablauf der Verschiebungsmessung mit photogrammetrischer Auswertung

3.2 Tachymetrische Messung

Die Beobachtungen mittels Totalstation müssen in jedem Fall durchgeführt werden. Mit der Auswertung dieser Messung werden die übergeordneten Koordinaten der Zielmarken berechnet. Diese gehen als Passpunkte, und somit Verknüpfen zum übergeordneten Koordinatensystem, in den photogrammetrischen Auswerteprozess ein. Die tachymetrisch bestimmten Punkte werden

als fehlerfrei angenommen. Grund dafür ist, dass eventuell aufgetretene grobe Fehler bereits bei der tachymetrischen Auswertung erkannt und eliminiert wurden und aus der Auswertung nur die berechneten Koordinaten erhalten werden. Diese Annahme muss strikt eingehalten werden. Denn unentdeckte Fehler, im als fehlerfrei angenommenen Passpunktfeld, schlagen sich direkt in den Koordinaten und Genauigkeiten des photogrammetrischen Modells nieder.

Die erwartbare Genauigkeit von 1 mm Standardabweichung der tachymetrischen Messung an den Zielmarken (siehe auch OGG, 2014) wird als Genauigkeitsziel für die photogrammetrischen Ergebnisse angestrebt. Eine Erklärung dazu ist in Kapitel 1.2 zu finden. In Kapitel 6 wird die erreichte Genauigkeit des aktuellen Programmprototypen anhand der Auswertung des Testdatensatzes erklärt und Kapitel 6.5.3 zeigt die erreichten Genauigkeiten anhand von beispielhaften Neupunkten.

3.3 System zur Bildaufnahme

3.3.1 Aufnahmeschema der Bildakquirierung

Das System zur Aufnahme der Bilder für die photogrammetrische Auswertung wurde mit Hinblick auf die Besonderheiten im Tunnel entwickelt. Um die Netzwerkgeometrie zu optimieren wurde das Aufnahmeschema in Abbildung 3.2 entworfen. Die Messquerschnitte werden aus drei Kamerastandpunkten mit gleicher Blickrichtung, bezogen zur Tunnelrichtung, aufgenommen. Je ein Standpunkt befindet sich an einer Tunnelseite und der dritte mittig im Tunnel. Die dabei entstandenen Bilder weisen schleifende Schnitte auf. Durch eine zweite Bildserie in die entgegengesetzte Tunnelrichtung werden weitere Beobachtungen realisiert und die Schnittgeometrie verbessert. Der Arbeitsablauf zur Bildaufnahme soll, wie in Kapitel 3.1 erwähnt, unmittelbar nach der tachymetrischen Aufnahme erfolgen.

Das Messprinzip sieht vor, dass die Aufnahme der Messbilder mit Blitz und möglichst kurzer Belichtungszeit erfolgen soll. Die dabei akquirierten Bilder zeigen kaum Textur und die Zielmarken „leuchten“ als weiße Punkte im Bild hervor. Die spätere Auswertung benötigt Näherungen zur äußeren Orientierung, deshalb wird das Aufnahmeschema um ein „Übersichtsbild“ erweitert. Bei jedem Messquerschnitt muss mittig im Tunnel ein Bild mit längerer Belichtungszeit aufgenommen werden. Darauf wird der Tunnel erkennbar abgebildet und anhand dieses Bildes kann bei der Auswertung im Büro die Angabe des nächsten, abgebildeten Messquerschnitts und der Blickrichtung erfolgen.

3.3.2 Kamerasystem

Für die Aufnahmen im Tunnel wurde eine unkalibrierte Amateurkamera verwendet. Es handelt sich um eine Spiegelreflexkamera mit der Bezeichnung *Canon EOS 50D*. Es wird ein Weitwinkelobjektiv *Sigma AF 10-20mm 4.0-5.6 EX DC* und ein externer Aufsteckblitz verwendet. Das Objektiv wird in der kürzesten Brennweite (ca. 10 mm) verwendet. Das Aufnahmesystem soll über die gesamte Aufnahmedauer eine möglichst stabile innere Orientierung besitzen, was

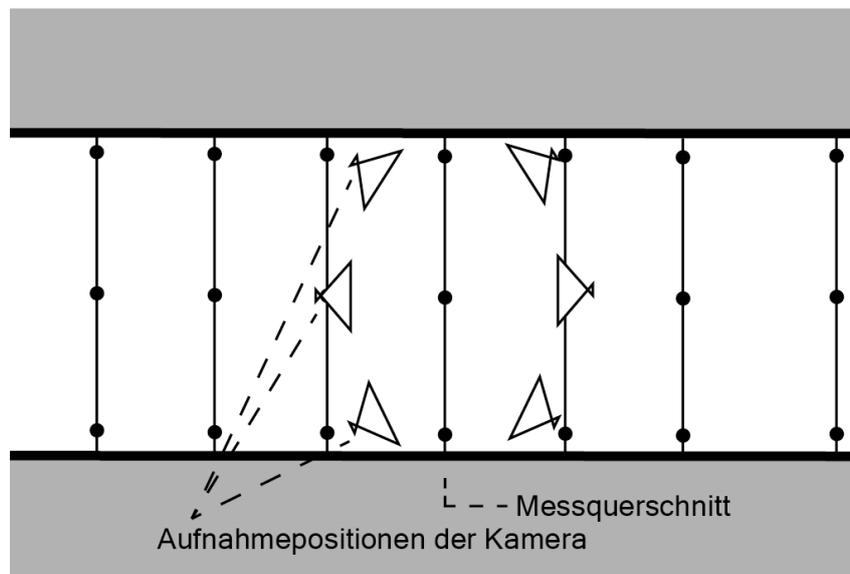


Abb. 3.2: Aufnahmeprinzip der Messbilder: Je drei Bilder pro Messquerschnitt in beide Tunnelrichtungen für alle aufgenommenen Messquerschnitte

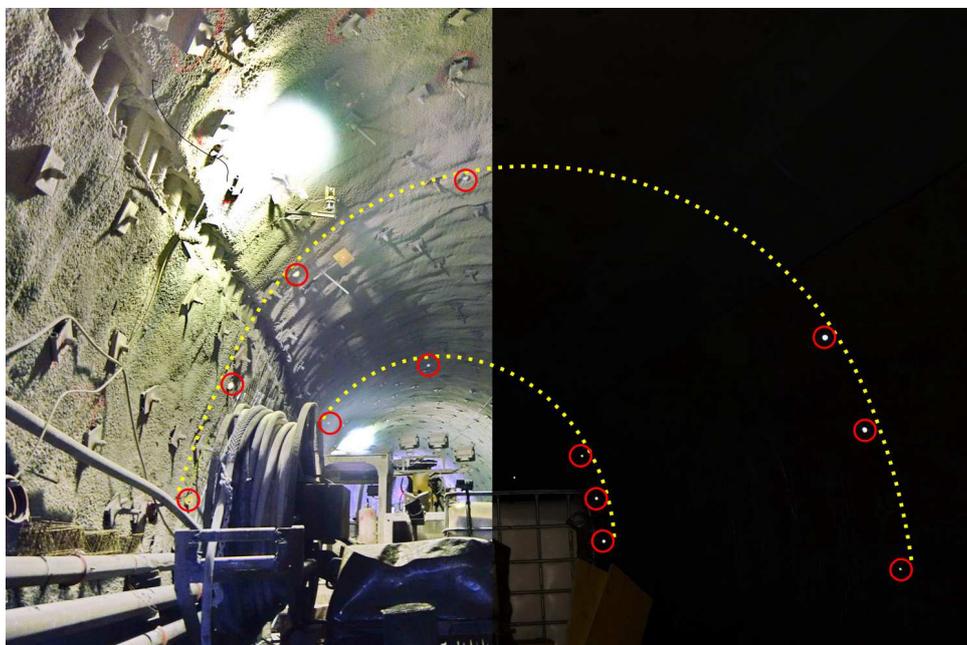


Abb. 3.3: Zwei Bilder mit gleicher äußerer und innerer Orientierung: Langzeitbelichtung zur Darstellung mit Textur (links) und Kurzzeitbelichtung mit Verwendung eines Blitzes; Hervorhebung der nächsten beiden Messquerschnitte (gelb punktiert) und deren Zielmarken (rote Kreise)

durch manuelle Fokussierung zu Beginn der Aufnahme und anschließender Fixierung der Einstellringe am Objektiv realisiert wird. Am Anfang der Auswertung stehen keine Kalibrierparameter der inneren Orientierung zur Verfügung. Diese werden im Zuge des Bündelblockausgleichs geschätzt und bei mehrfacher Ausführung iterativ als Näherungswerte in eben jenen eingeführt (siehe Kap. 2.5). Die Bodenauflösung (*engl. Ground Sampling Distance, GSD*) und die Abbildungsgröße von Zielmarken in Minimal- und Maximaldistanz ist in Tabelle 3.1 zu finden. Weitere Informationen zu den Einstellungen der Kamera und dem Bilddatensatz sind in Kapitel 5.2.1 zu finden.

Distanz	Bodenauflösung	Abbildungsgröße einer Zielmarke
5 m	2.3 mm	25 Px
60 m	28 mm	2 Px

Tab. 3.1: Bodenauflösung und Abbildungsgröße einer Zielmarke im Bild bei Distanz zw. Projektionszentrum und Objekt von 5 m und 60 m

3.4 Verwendete Software

Die eingesetzte Software beschränkt sich im weitesten auf frei verfügbare Pakete rund um die Programmiersprache Python wie das Paket *openCV* für Visual Computing von (Bradski, 2000) und weiteren Basis- und Erweiterungspaketen bezüglich Mathematik, Bildverarbeitung und Statistik. In diese Programmiersprache eingebettet, wurde das an der TU Wien entwickelte Paket OrientAL nach (Karel et al., 2013) verwendet, das unter anderem die Ausgleichung des Bündelblocks übernimmt und vom Forschungsbereich Photogrammetrie lizenziert wird. Nur die Verarbeitung der Rohbilddaten wurde mit kommerzieller Bildbearbeitungssoftware durchgeführt. Mit dem Programm ACDSsee wurden die RAW-Dateien der Kamera mit komplexen Helligkeits- und Kontrastfiltern bearbeitet und anschließend ins JPG-Format überführt.

3.5 Anmerkungen

Das in dieser Arbeit entwickelte System der photogrammetrischen Erweiterung der Verschiebungsmessung im Tunnelbau ist aus der praktischen Anwendung entstanden. Die spätere Verwendung in der Praxis schwebte während der gesamten Entwicklungszeit als Hintergedanke mit und diverse Entscheidungen wurden in Hinblick darauf getroffen. Ein plakatives Beispiel dazu ist der gewählte Grad an Automatisierung. Um die Software interessant für eine Anwendung im Feld zu machen, wurde eine Minimierung der Anwenderinteraktion angepeilt, was zur Entwicklung der Exhaustive Search Methode für Näherungswertverbesserung und Korrespondenzsuche führte. Von Entwicklungsseite um vieles günstiger, weil einfacher, wäre die Angabe einer Minimalkonfiguration korrespondierender Punkte durch den Anwender gewesen.

In vielen Arbeiten der Photogrammetrie und des Visual Computing wird das Mittel der „Structure from Motion“ (SfM) und der automatisierten Suche von Verknüpfungspunkten in Bildern verwendet. Diese Mittel wurden bereits in der Anfangsphase wegen mangelnder Erfolgsaussichten verworfen. Versuche an den Testdaten zeigten, dass ohne tiefgreifende Anpassung kaum eine zufriedenstellende Lösung gefunden werden kann. Der Algorithmus des SfM verwendet die Bildtextur (Helligkeits- und Kontrastverläufe), um Merkmale unabhängig der geänderten Darstellung in unterschiedlichen Bildern zu finden und zu identifizieren. Mit den gefundenen Bildkoordinaten mehrerer Merkmale in unterschiedlichen Bildern wird das photogrammetrische Modell aufgestellt. Probleme bereiten den SfM- Algorithmen regelmäßige Muster. Das Bauwerk Tunnel besteht aus vielen gleichartig aussehenden Merkmalen, womit die bestehenden SfM- Algorithmen keine Lösung zustande bringen. Wäre diese Hürde genommen, müssten trotzdem weitere Algorithmen entwickelt werden. Das gefundene Modell einer SfM-Standardsoftware würde den Tunnel darstellen, jedoch müssten die Probleme Maßstab und die Verbindung zu den tachymetrischen Messungen genommen werden. Diese ist nötig, um die gewünschte Information der Verschiebungen der Zielmarken zu erhalten. Das ist bisher nur über Erkennung der Zielmarken im photogrammetrischen Modell möglich.

4. Ablauf des entwickelten Prozesses

Ein Überblick über den Arbeitsablauf wird bereits in Kapitel 3.1 gegeben (Flussdiagramm siehe Abb. 3.1). Der Fokus des folgenden Kapitels liegt darauf, einen vertiefenden Einblick in die Arbeitsschritte der photogrammetrischen Erweiterung zu geben. Die Abbildung 4.1 zeigt den photogrammetrischen Prozess stark vereinfacht. Das Flussdiagramm erklärt, dass nur der erste Schritt „Bildakquirierung“ als Feldarbeit ausgeführt werden muss. Bereits das danach folgende vorbereitende Verarbeiten der Bilddaten wird im Büro durchgeführt. Ziel dieses Punktes ist die Bildeigenschaften mit Hilfe von Helligkeits- und Kontrastfiltern für die automatisierte Auswertung zu optimieren. Das Ergebnis sind Bilder, in denen die Zielmarken als weiße Punkte das einzig Erkennbare auf schwarzem Hintergrund darstellen (wie in Abb. 3.3 rechts). Diese verarbeiteten Bilder werden abschließend in einem für Python und openCV lesbaren Standardformat gespeichert. Neben der manuellen Vorbereitung der Bilder hat der Anwender die Aufgabe, für jedes zu verarbeitende Bild den nächsten abgebildeten Messquerschnitt und die Blickrichtung entlang der Tunnelachse zu definieren. Diese Angaben verbunden mit den Passpunkten der tachymetrischen Aufnahme werden für die automatisierte Verbesserung der Näherungswerte der äußeren Orientierungen und der ersten Suche nach korrespondierenden Bild- und Objektpunkten benötigt.

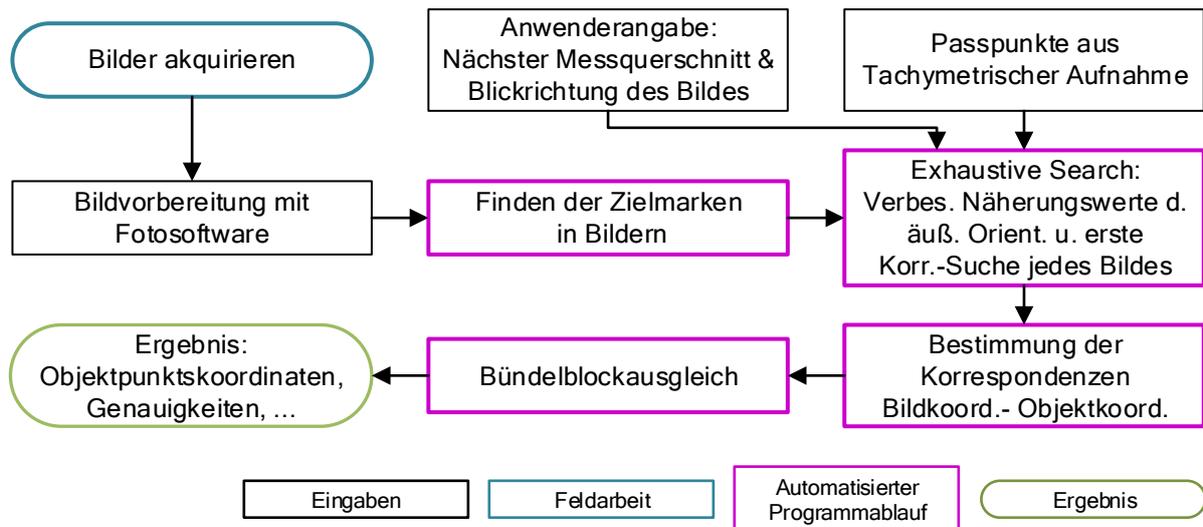


Abb. 4.1: Flussdiagramm zum vereinfachten Ablauf des photogrammetrischen Auswerteprozesses

Die folgenden Unterkapitel befassen sich mit den Herausforderungen des automatisierten, photogrammetrischen Prozessablaufs. Dabei geht das Kapitel 4.1 erweitert auf die Arbeitsabläufe zur Findung der Bildkoordinaten der Zielmarken ein. In Kapitel 4.2 wird erklärt, wie die manuell eingegebenen, nächsten Messquerschnitte mit einem exhaustive Search Algorithmus verarbeitet werden, um die groben Näherungswerte für die äußeren Orientierungen der Bilder zu verbessern und erste Korrespondenzen zu finden. Anschließend wird in Kapitel 4.3 erklärt, wie die Korrespondenzbildung zwischen Bild- und Objektkoordinaten durchgeführt wird und weitere Genauigkeitssteigerung der Näherungsorientierungen vorgenommen werden. Der

Bündelblockausgleich und der Weg zu den Endergebnissen, werden abschließend in Kapitel 4.4 erläutert.

4.1 Automatisiertes Bireflex-Zielmarken-Auffinden in Messbildern

Die Bireflex-Zielmarken in den Bildern zu finden ist mit dem angezielten Grad der Automatisierung herausfordernd. Durch die auftretenden Unterschiede in abgebildeter Textur, Helligkeit und Kontrast der Messbilder muss der Algorithmus unempfindlich gegenüber diesen Variationen entworfen werden, damit die Suche erfolgreich sein kann. Die Parameter sind empirisch gefundene Werte (bspw. Quantil des Grauwertbildes), die am Testdatensatz (siehe Kap. 5.2) erprobt wurden. Für weitere Datensätze müssen die Parameter erneut optimiert werden.

Der Programmablauf ist schematisch in Abbildung 4.2 dargestellt und Einzelschritte des verarbeiteten Messbildes `_MG_1824` in Abbildung 4.3 gezeigt. Der Ablauf stellt sich wie folgt dar: Das originale Messbild (Abb. 4.3a) wird mit Helligkeits- und Kontrastfiltern verarbeitet. In diesem verarbeiteten Bild (4.3b) wird nach Zielmarken gesucht. Die abgebildeten Bireflexzielmarken zeichnen sich in den Bildern als die hellsten Pixelanhäufungen aus. Um dunklere Bereiche mit etwas Textur bei der Konturensuche auszuschließen, wird ein Binärbild berechnet. Dazu wird das Quantil mit 99,89% des Grauwertbildes (Abb. 4.3c) als Schranke verwendet. Pixel, deren Grauwert kleiner der Schranke sind, werden als *False* gespeichert, während jene größer der Schranke als *True* verwendet werden. Daraus ergibt sich ein schwarzes Bild mit 1,1 % weißen Pixel. Auf das erhaltene Binärbild können morphologische Operationen angewandt werden (Abb. 4.3d). Es wird zuerst ein *Close* (Kernel 3x3) und darauf folgend ein *Open* (Kernel 8x8) angewandt, damit kann das Salz-Pfeffer-Rauschen minimiert und in kleinere Teile „zerfallene“ Objekte wieder vereint werden. Das entstandene gefilterte Binärbild ist als Eingangsgröße zur Konturensuche gut geeignet. Dazu kommen die openCV-Implementierungen des Ansatzes von (Canny, 1979) zum Einsatz, um die Kanten zu erkennen,

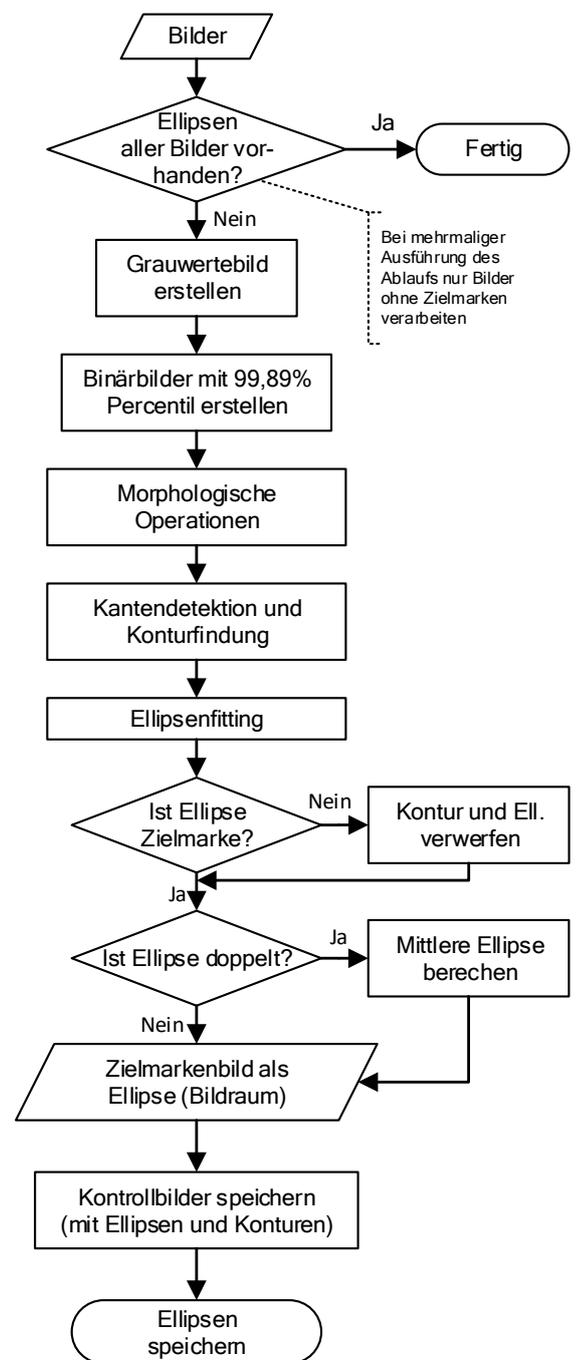


Abb. 4.2: Flussdiagramm zum Finden der Zielmarken in den Messbildern

und ein Ablauf nach (Satoshi Suzuki, 1985) für die Konturensuche. Für jede gefundene Kontur (Abb. 4.3e) kann nun nach (Fitzgibbon & Fisher, 1995) eine bestangepasste Ellipse berechnet werden. Die Ellipsen werden nach kleinsten Quadraten optimal an alle Punkte jeder Kontur angepasst (Abb. 4.3f).

Bei den berechneten Ellipsen muss es sich nicht zwangsläufig um Abbildungen von Zielmarken handeln. Im Testdatensatz konnte erkannt werden, dass andere helle Objekte (bspw. Lampen) ebenso Ellipsen erhalten. Darum wird an diesem Punkt eine Überprüfung durchgeführt, ob die Kontur von einer abgebildeten Zielmarke stammen kann. Es werden die Parameter der Ellipse verwendet und über die Fläche und Exzentrizität geschlossen, ob die gefundene Kontur eine Zielmarke abbildet. Kommt die Abfrage zum Ergebnis, dass die Ellipse keine Zielmarke abbildet, wird diese für die folgenden Arbeitsschritte verworfen. In Abbildung 4.3f sind nur noch die bestätigten Ellipsen gezeigt. Ebenso muss überprüft werden, ob sich zwei Ellipsen überlagern. Die verwendete Implementierung der Konturensuche in openCV hatte in einer Mehrzahl an Fällen zwei beinahe idente Konturen berechnet. Die daraus folgenden, nahezu identen Ellipsen konnten mittels einfacher Abfrage identifiziert werden. Dazu wird die Distanz der Mittelpunkte der umschließenden Rechtecke verwendet. Ist diese Distanz wenige Pixel groß, kann angenommen werden, dass zwei Ellipsen zu nahezu identen Konturen berechnet wurden. Es wird das Mittel der Parameter beider Ellipsen berechnet und weiterverwendet. Zur optischen Kontrolle durch den Anwender werden vor der Speicherung der gefundenen Zielmarken Übersichtsbilder erstellt, in denen die Konturen und Zielmarken über das originale Texturbild geplottet werden.

Mit den Ellipsen aus der Konturensuche, die als Zielmarken bestätigt wurden, sind die Eingangsdaten für die Näherungswertbeschaffung der äußeren Orientierung der Einzelbilder verfügbar. Der entwickelte Ablauf wird im folgenden Unterkapitel erklärt.

4.2 Näherungswertverbesserung der äußeren Orientierungen und erste Korrespondenzsuche

4.2.1 Allgemeines und Herangehensweise

In der Nahbereichsphotogrammetrie stellt die Beschaffung von Näherungswerten der äußeren Orientierung (ä.O.) nach (Luhmann, 2018) des Öfteren ein Problem dar. Einige Schwierigkeiten mussten bei der Entwicklung des Ablaufes gemeistert werden, denn durch die Verwendung von Standard-Bireflex-Zielmarken (siehe Abb. 1.2) ist mit dem Finden im Bild, der korrespondierende Objektpunkt weiter unbekannt. Weit verbreitete Ansätze wie das erwähnte Konzept der Structure from Motion (SfM) können nicht oder nur mit großem Aufwand angewandt oder adaptiert werden (weitere Überlegungen siehe Kap. 3.5). Der entwickelte Ablauf ist in den folgenden Schritten gezeigt. Dabei wird in Kapitel 4.2.2 das Hauptprogramm der Näherungswertverbesserung und Hauptkorrespondenzsuche erklärt, während in dem Kapitel 4.2.3 der Ablauf des räumlichen Rückwärtsschnittes und der Entscheidungsfindung der

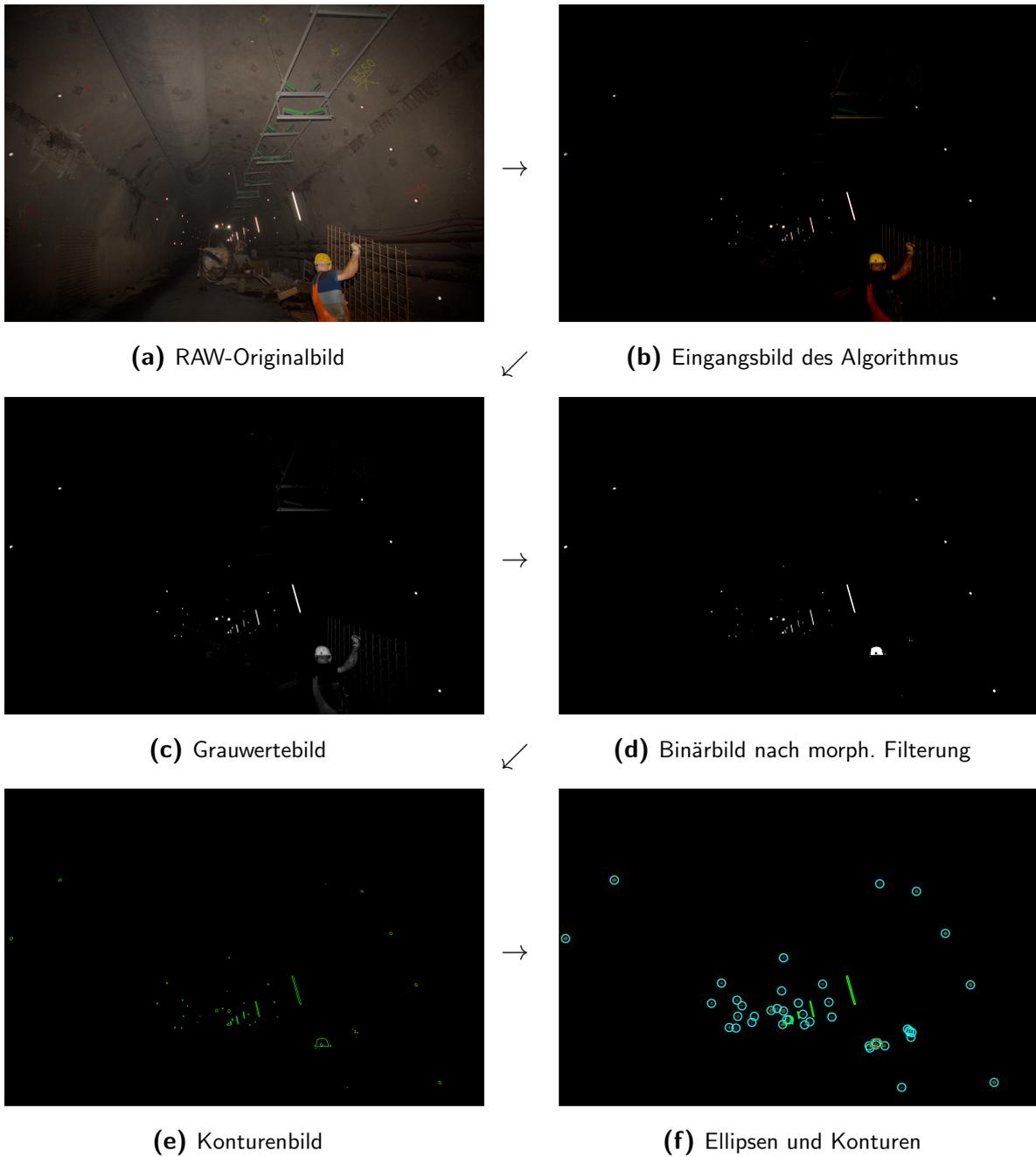


Abb. 4.3: Darstellungen der Einzelschritte des Bireflex-Zielmarken-Auffinden in Messbildern am Beispielbild `_MG_1824`

Farbkodierung: Grün: Gefundene Konturen; Rot: Akzeptierte Ellipsen; Türkis: Kreisrunde Hervorhebung der gefundenen, akzeptierten Ellipsen zur besseren Sichtbarkeit

Inlierberechnung gezeigt wird.

4.2.2 Hauptprogramm zur Näherungswertverbesserung ä. O. und Hauptkorrespondenzsuche

Die Eingangsparameter für die Bestimmung von Näherungswerten der äußeren Orientierung sind aus drei Quellen: händische Eingabe von Zusatzinformation, aktuelle Objektraumkoordinaten und Ellipsen aus dem Zielmarkenfinden aus Kap. 4.1. Die Anwenderdaten legen die Zuordnungen des nächsten, abgebildeten Messquerschnitts in jedem Bild und die zugehörige Blickrichtung entlang der Tunnelachse fest (Blickrichtungen Tunneleinwärts und Tunnelauswärts). Als weitere Eingabegrößen werden die Koordinaten der tachymetrischen Auswertung (also den Objektkoordinaten der Zielmarken im übergeordneten Koordinatensystem) benötigt. Der Ablauf des Programms ist als Flussdiagramm in Abbildung 4.4 zu finden.

Jedes Bild wird einzeln betrachtet, denn es soll unabhängig von den anderen Bildern eine genäherte äußere Orientierung gefunden werden. Die einfachere Handhabung des Problems ermöglichte eine schnellere Entwicklung des zugehörigen Prozesses, denn das Aufstellen von komplexen Verlinkungen zwischen den einzelnen Bildern entfällt. Stattdessen genügt es, den folgenden Programmteil auf ein Bild nach dem anderen anzuwenden. Als Nebenprodukt des entwickelten Ablaufs werden Korrespondenzen der drei Punkte des räumlichen Rückwärtsschnittes erhalten. Diese werden folgend als *Hauptkorrespondenzen* bezeichnet.

Der dem Aufnahmezentrum nächste Messquerschnitt (MQ), der im Bild abgebildet ist, wird erster verwendet. Um aus all den Ellipsen eines Bildes, jene der Zielmarken dieses MQs zu detektieren, werden die Parameter der Ellipsen und deren Lage im Bild verwendet. Aus den Parametern wird die Fläche der Ellipse berechnet und als Entscheidungsgrundlage verwendet. Die Lage im Bild erfordert mehr Überlegung: Die Zielmarken des nächsten Messquerschnitts müssen die größte mittlere Distanz zu allen anderen Zielmarken aufweisen und dabei eine Mindestfläche besitzen. Die Abbildung der Zielmarken des nächsten Messquerschnitts entsprechen in vielen Bildern des Testdatensatzes nicht der geforderten Helligkeit aus Kap. 4.1. Gründe dazu sind auf das Aufnahmesystem zurückzuführen und werden in Kapitel 6.2 erklärt. Die fehlenden Abbildungen der Zielmarken haben zur Folge, dass die Konturensuche und das Einpassen von Ellipsen nicht funktioniert. Darum wird der Ansatz erweitert und auch die Zielmarken des zweitnächsten MQ verwendet. Die vermutete Zugehörigkeit von Ellipsen zu diesem MQ wird über die Fläche der Ellipsen ermittelt. Es kann passieren, dass nicht alle Zielmarken der nächsten beiden Messquerschnitte in den Messbildern als Ellipsen detektiert werden. Messpunkte können verdeckt sein oder aus anderen Gründen nicht im Bild abgebildet bzw. detektiert werden (bspw. verringerte Rückstahlkraft wegen Verschmutzung oder sind nicht montiert). Jene Punkte können in Kap. 4.1 nicht als Zielmarken erkannt werden und fehlen in allen weiteren Arbeitsschritten. Die genaue Anzahl der sichtbaren Zielmarken der beiden nächsten Messquerschnitte ist darum unbekannt. Für die Berechnung von genäherten äußeren Orientierungen muss jedoch eine Anzahl (siehe Kap. 1.2.3) an abgebildeten Zielmarken defi-

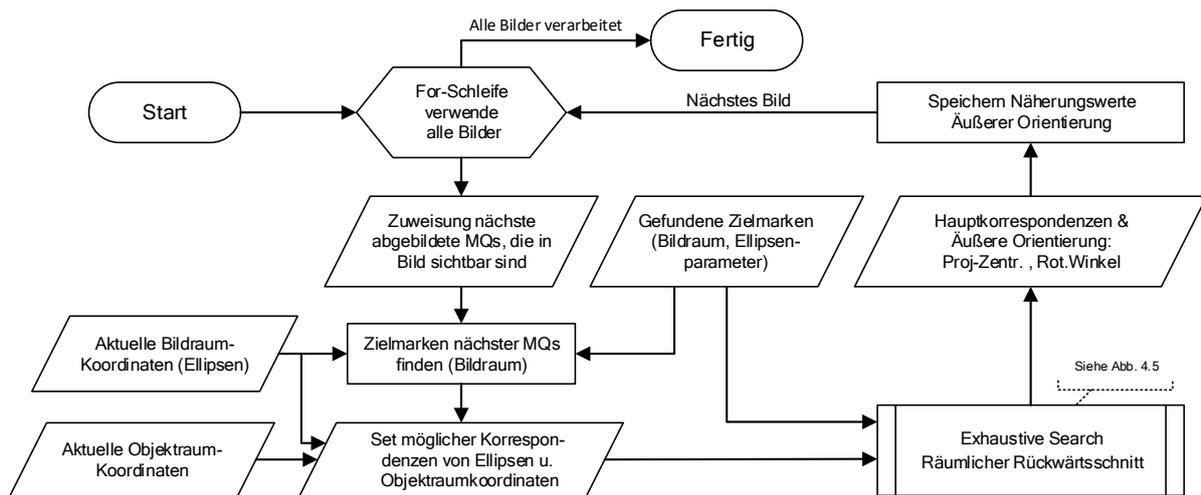


Abb. 4.4: Flussdiagramm zur Darstellung der Schritte für die Berechnung von Näherungswerten der äußeren Orientierung eines Messbildes

nirt werden. Diese werden zur Ermittlung der genäherten äußeren Orientierung verwendet. Mit bis zu zehn Zielmarken pro Messquerschnitt sind bei zwei Messquerschnitten 20 Messpunkte zu erwarten. Dies führt zur Auswahl von maximal 20 vermuteten Ellipsen der nächsten beiden MQ im Bildraum, die zur weiteren Berechnung der Näherungsorientierung verwendet werden.

Bis hierhin sind von den Zielmarken die Objektpunktnummer und die Modell- und Objektpunktkoordinaten vorhanden, jedoch ohne Korrespondenz. Diese Mehrdeutigkeit von je 20 Punkten in Bild- und Objektraum bedeutet, dass die Korrespondenzfindung gefragt ist. Die Lösung zu diesen beiden Problemen, Hauptkorrespondenzsuche und Näherungswertverbesserung, liefert der nachfolgende Exhaustive Search Algorithmus des räumlichen Rückwärtsschnittes. Mit diesem Ansatz können beide Probleme simultan gelöst werden, was jedoch auf Kosten höheren Rechenaufwands (siehe Kap. 2.6) geht. In Kapitel 4.2.3 wird der Ablauf im Detail erklärt.

Das Ergebnis des Rumpfprogramms stellen die Parameter der genäherten äußeren Orientierung (Projektionszentrum (X, Y, Z) mit Rotationswinkel ω, ϕ, κ) und *Hauptkorrespondenzen* von Punkten im Objekt- und Modellraum dar.

Nicht in allen Situationen kann eine korrekte Lösung gefunden werden. In Fällen, in denen die nächsten beiden Messquerschnitte nicht korrekt erkannt werden (können), können keine korrekten Näherungsorientierungen berechnet werden. Diese Fälle müssen beachtet werden, denn die betroffenen Messbilder können in der weiteren Auswertung nicht verwendet werden. Für weiterführende Informationen dazu kann auf Kapitel 6.1 verwiesen werden.

4.2.3 Exhaustive Search zur Näherungswertverbesserung äußerer Orientierung

Die Entwicklung einer robusten Methode zur Verbesserung der Näherungswerte der groben, äußeren Orientierung ist als Exhaustive-Search-Algorithmus realisiert. Dabei werden mittels räumlichen Rückwärtsschnitts weitere korrespondierende Modell- und Objektkoordinaten ge-

funden. Der Ablauf ist in Abbildung 4.5 zu finden.

Die Modell- und Objektkoordinaten stellen die Eingangsdaten dar. Nach einer Überprüfung, ob zumindest vier Punkte für den eindeutigen räumlichen Rückwärtsschnitt zur Verfügung stehen, wird eine Liste aller Permutationen von Bild- und Objektpunkten gebildet. Diese bildet jede mögliche Korrespondenz zwischen Objektpunkt und Ellipse ab. Diese Liste könnte mit Vorwissen sortiert werden, das ein Finden einer korrekten Lösung beschleunigen würde. Aufgrund des fehlenden Wissens, über das Auftreten von Messpunkten kann keine solche Sortierung durchgeführt werden. Stattdessen wird darauf geachtet, dass die Einträge der Liste zufällig sortiert sind, um die Wahrscheinlichkeit nicht abgebildete Zielmarken zu verwenden, gleichmäßig zu verteilen.

Der räumliche Rückwärtsschnitt kann bereits mit einem Minimalset aus drei Punktpaaren gelöst werden. Dabei ergeben sich im Allgemeinen mehrere Lösung, wodurch mittels weiterem Punktpaar oder anderem Zusatzwissen auf das korrekte Ergebnis geschlossen werden muss. In dieser Arbeit wird über Zusatzwissen auf das korrekte Ergebnis geschlossen. Die grobe Näherung der äußeren Orientierung (Lage des Projektionszentrums aus aus nächsten Messquerschnitten, grobe Näherung der Rotationswinkel der Drehmatrix aus der genäherten Tunnelrichtung) wird zur Überprüfung verwendet und nur, wenn die berechnete Lösung zulässige Werte aufweist, der nächste Schritt *Korrespondenzsuche* (siehe Kap. 4.3) gestartet. Für Ergebnisse, die bei der Überprüfung durchfallen, wird die weitere Berechnung abgebrochen und die Korrespondenz verworfen.

Für alle weiteren, bestandenen Lösungen, wird ein Score berechnet, der genauere Auskunft zur Güte der Lösung gibt. Dieser Score wird in Unterkapitel 4.2.3.1 detailliert erklärt. Zusammenfassend sei gesagt, dass die Anzahl an Inlieren (und damit den korrekten Korrespondenzen) als Score verwendet wird. Das Maximum ist für jedes Bild bekannt, denn mit der genäherten äußeren Orientierung lässt sich die Anzahl an maximal abgebildeten Zielmarken berechnen. Diese Anzahl stellt gleichzeitig den Maximalscore dar.

Die Schleife des räumlichen Rückwärtsschnittes wird so lange wiederholt, solange keine der Permutationen einen Score von 40% des Maximalscores übertrifft. Wird diese Schranke überschritten, wird die Schleife unterbrochen und die äußere Orientierung angenommen. Bis diese Schranke erreicht wird, wird bei allen als korrekt festgestellten äußeren Orientierungen, jene mit dem höchsten Score als *bisher beste Orientierung* gespeichert. Um zu verhindern, dass die Suche nach einer gültigen äußeren Orientierung zu viel Zeit in Anspruch nimmt, wird eine maximale Rechendauer von 30 Minuten pro Bild festgelegt. Wird diese Maximalzeit erreicht, wird die *bisher beste Orientierung* als Lösung verwendet.

4.2.3.1 Score-Berechnung Der Score zur Berechnung der Näherungswerte stellt eine Erweiterung des Exhaustive Search Algorithmus und bildet die Güte der Lösung ab. Sie wird durch die Anzahl an Inlier realisiert und ist die Anzahl an korrekten Korrespondenzen. Die Eingangsdaten sind die zu bewertende, genäherte, äußere Orientierung und die Zielmarken der nächsten beiden abgebildeten Messquerschnitte des Bildes in beiden Koordinatensystemen. Die

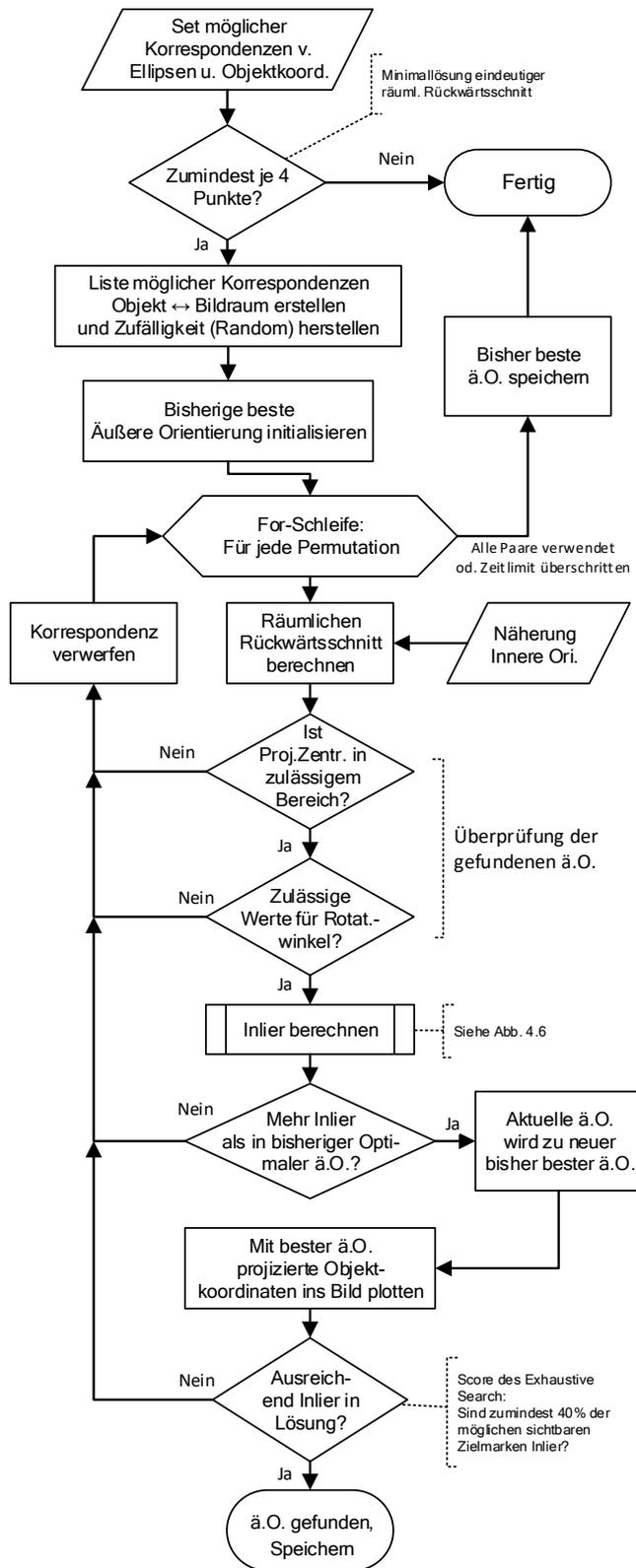


Abb. 4.5: Näherungswertberechnung äußerer Orientierung (ä.O.) mit Exhaustive Search Algorithmus und räumlichen Rückwärtsschnitt

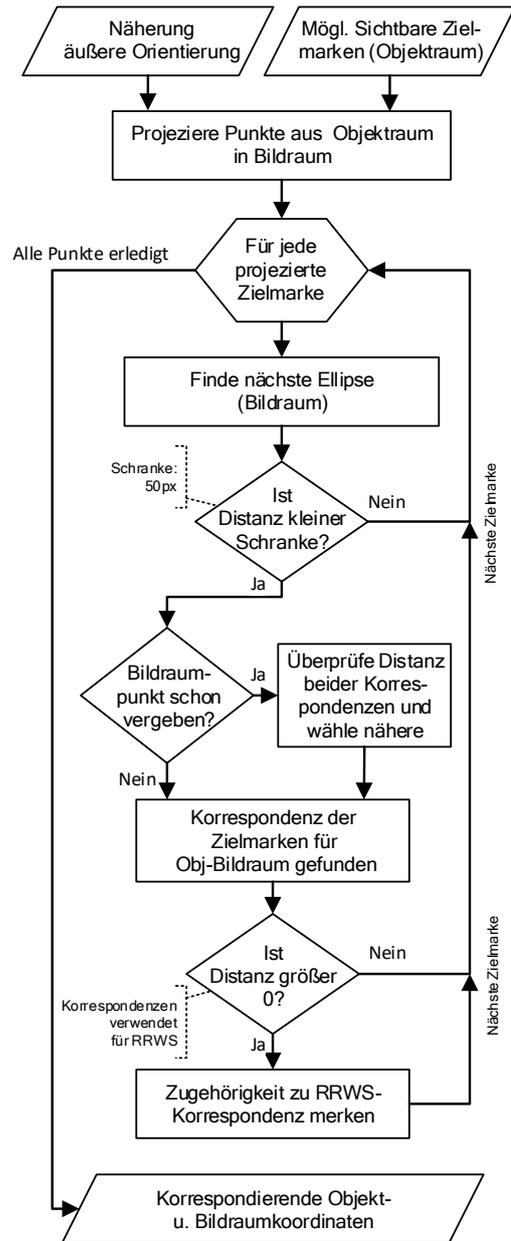


Abb. 4.6: Berechnung des Scores des exhaustive Search Algorithmus zur Bestimmung der Ergebnigsüte

Abbildung 4.6 stellt die Berechnung als Flussdiagramm vor.

Der Minimalscore wird durch die drei gewählten korrespondierenden Punkte (*Hauptkorrespondenzen*) des räumlichen Rückwärtsschnitts festgelegt, während der Maximalscore von der Aufnahmesituation abhängig ist. Diese bestimmt die Maximalanzahl der abgebildeten Zielmarken (genäherter Aufnahmeort und Blickrichtung ergeben die Zielmarken, die im Bild abgebildet werden können).

Die Berechnung wird im folgenden erklärt und ähnelt der Korrespondenzsuche in Kapitel 4.3. Die Objektpunkte werden mit den Parametern der äußeren Orientierung mittels Kollinearitätsbedingungen in den Bildraum projiziert. Anschließend wird für jeden projizierten Objektpunkt die nächste Ellipse (Bildraum) gesucht. Hat das Punktpaar weniger als 50 Pixel Distanz, ist eine Korrespondenz gefunden worden. Jedoch muss noch eine Prüfung durchgeführt werden, ob die gefundene Ellipse nicht bereits für eine Korrespondenz vorgemerkt ist. Anstatt diese Doppelvergabe zu verwenden, wird für den näheren, projizierten Punkt entschieden. Ist die Distanz zwischen den beiden Punkten größer 50 Pixel, wird keine Korrespondenz gespeichert und mit dem nächsten projizierten Punkt fortgefahren. Der Wert *50 Pixel* wurde empirisch gefunden, iterativ am Testdatensatz erprobt und zeigte optimale Ergebnisse. Die Hauptkorrespondenzen werden extra markiert, um bei dem abschließenden Plot ins zugehörige Bild hervorgehoben zu werden. Das Ergebnis an korrespondierenden Punkten zwischen Modell- und Objektraum wird zurückgegeben, gespeichert werden jedoch nur die Hauptkorrespondenzen.

4.3 Korrespondenzsuche und überbestimmter Rückwärtsschnitt

Der zweite Schritt der Korrespondenzsuche wird in Verbindung mit der Berechnung eines überbestimmten räumlichen Rückwärtsschnitts bestimmt. Iterativ wird der Rückwärtsschnitt berechnet und in jedem Durchlauf ein Korrespondenzpaar aus Objekt- und Bildpunkt (Ellipse) hinzugefügt. Dabei muss überwacht werden, ob die neue äußere Orientierung einer folgenden Iteration eine Verbesserung darstellt und ob die gewählte Korrespondenz zwischen Ellipse und Objektpunkt bestätigt wird.

Notwendig ist dieser Schritt, um die zuvor berechneten, genäherten, äußeren Orientierungen weiter zu verbessern. Für diese Berechnung der äußeren Orientierungen wurden bisher drei Punkte im nicht überbestimmten räumlichen Rückwärtsschnitt verwendet. Dabei besteht das Problem, dass kleine Fehler und ungünstige Anordnung der Ellipsen, große systematische Abweichungen an den weiteren korrespondierenden Punkten zur Folge haben können. Dies wird erkennbar durch große Residuen zwischen projizierten und detektierten Punkten. Darum werden im selben Arbeitsschritt zusätzlich zu den bisher bekannten Hauptkorrespondenzen weitere vermutete Korrespondenzpaare zum räumlichen Rückwärtsschnitt hinzugefügt. Durch Tests der Ergebnisse kann bestimmt werden, ob das hinzugefügte Korrespondenzpaar eine Verbesserung der äußeren Orientierung bewirkt. In diesem Schritt wird ein überbestimmter, räumlicher Rückwärtsschnitt mit einem möglichst umfangreichen Punktset berechnet. Der Ab-

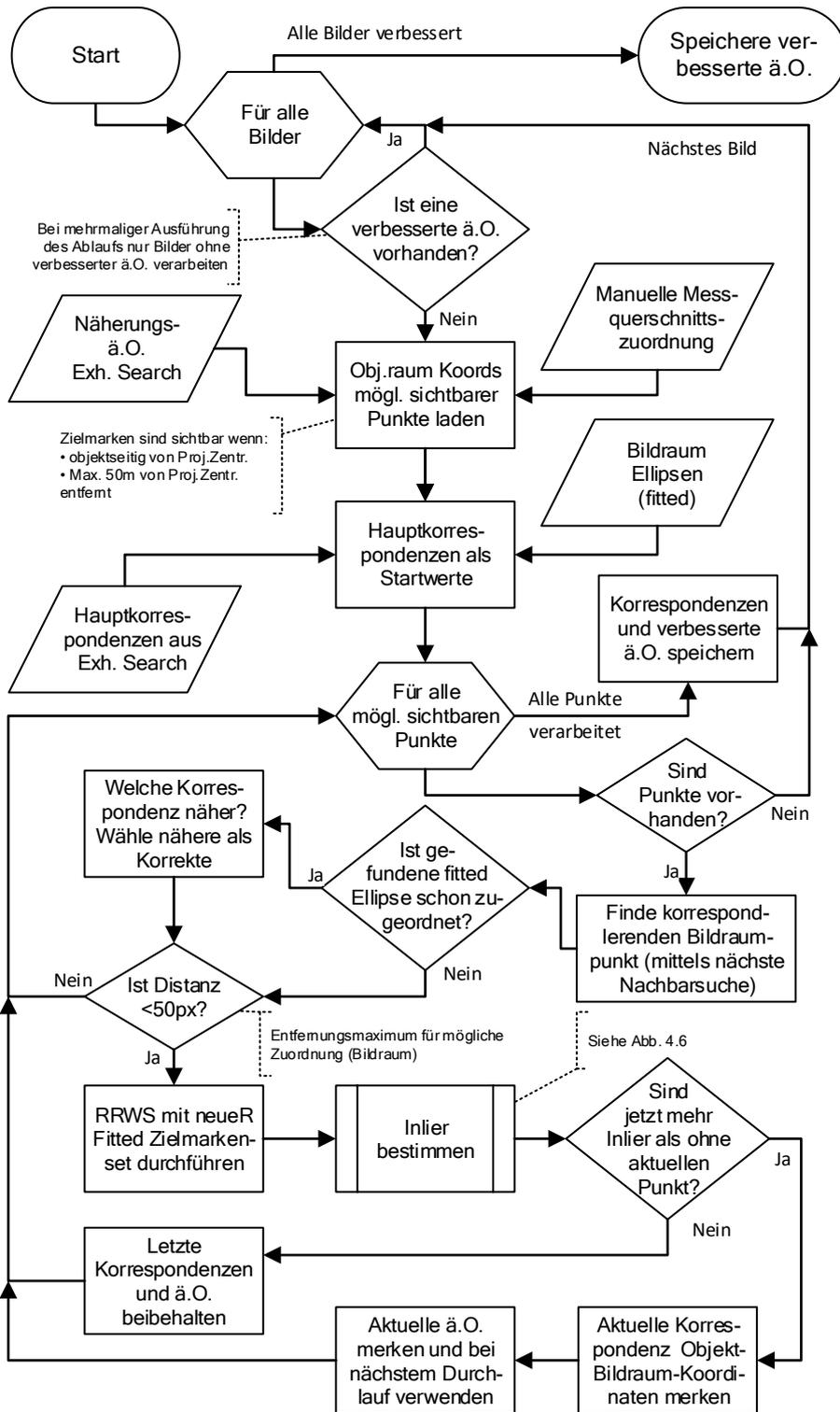


Abb. 4.7: Flussdiagramm zur Berechnung verbesserter äußerer Orientierung mittels ausgleichendem Rückwärtsschnitt und Suche von Korrespondenzen zwischen Bild- und Objektraumpunkten

lauf ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

Der Ablauf startet mit einem beliebigen Bild mit als Ellipsen detektierten Zielmarken im Bildraum und vorhandenen Näherungswerten äußerer Orientierung. Die Daten des genäherten Projektionszentrums und die Zuordnung der nächsten Messquerschnitte werden verwendet, um Objektpunktkoordinaten jener Zielmarken aus der Liste der Passpunkte (erhalten aus der tachymetrischen Messung) zu extrahieren, die nach Aufnahmeconfiguration im Bild abgebildet sein sollten. Es wird mit den bestehenden Parametern der äußeren Orientierung einer der Objektpunkte gewählt und Bildraumkoordinaten berechnet. Mittels nächster Nachbarsuche wird im Bildraum nach der Bildkoordinate der korrespondierenden Ellipse gesucht. Dabei muss überwacht werden, dass keine Doppelzuweisung einer Ellipse zu zwei Objektpunkten geschieht. Wird eine solche erkannt, werden die Distanzen der Nachbarsuche im Bildraum verglichen. Es wird für jene Korrespondenz entschieden, die die geringere Modellraumdistanz (Projizierter Punkt - nächste Ellipse) aufweist. In einer Schleife werden pro Durchlauf je einer der korrespondierenden Punkte dem Set des räumlichen Rückwärtsschnitts hinzugefügt. Die drei Hauptkorrespondenzen, die in Ablauf nach Kap. 4.2.3 berechnet wurden, dienen hier nun als Startdatensatz.

Bei der Suche nach nächsten Nachbarn wird ein maximal zulässiger Abstand definiert. Wird in einem Kreis mit Radius 200 Pixel um einen projizierten Objektpunkt keine Ellipse gefunden, wird angenommen, dass der Objektpunkt im Bild nicht abgebildet ist. Die fehlerhafte Korrespondenz bewirkt, dass der Objektpunkt ignoriert wird und es wird mit dem nächsten Objektpunkt fortgefahren. Der Wert *200 Pixel* wurde empirisch gefunden, iterativ am Testdatensatz erprobt und zeigte sich dort erfolgreich. Wird eine Ellipse zu dem projizierten Punkt gefunden, werden neue Parameter der äußeren Orientierung mittels überbestimmten räumlichen Rückwärtsschnitt nach (Lepetit, Moreno-Noguer & Fua, 2009) berechnet. Die erhaltenen Parameter für die äußere Orientierung müssen nun überprüft werden. Durchgeführt wird eine erneute Berechnung des Scores der exhaustive Search, entsprechend jener in Kap. 4.2.3.1 und dargestellt in Abb. 4.6. Die Anzahl der Inlier dient nun als Entscheidung, ob die hinzugefügte Korrespondenz und die aktuelle äußere Orientierung angenommen werden soll. Können zumindest gleich viele oder mehr Inlier als in der vorangegangenen Iteration gefunden werden, werden die aktuellen Parameter der äußeren Orientierung bestätigt. Andernfalls bleiben die alten Parameter in Verwendung. Nach dieser Entscheidung kann mit der nächsten Iteration fortgefahren werden, bis die gesamte Liste an möglichen, sichtbaren Zielmarken abgearbeitet ist.

4.4 Bündelblockausgleichung

4.4.1 Übersicht über Bündelblockanwendung

Die Bündelblockausgleichung stellt den letzten Schritt des Programms dar. Mit diesem Programmteil werden optimale Ergebnisse von äußerer und innerer Orientierung, Objekt- und Bildpunktkoordinaten berechnet und auf deren Genauigkeiten geschlossen. Der Ablauf dazu

kann in Abbildung 4.8 als Flussdiagramm gefunden werden.

Zu Beginn müssen die Berechnungsergebnisse der vorangegangenen Programmschritte geladen werden. Es wird versucht, die verbesserten Näherungswerte für äußere Orientierung zu laden. Sollten diese nicht geladen werden können, werden die *bisher besten äußeren Orientierungen* aus Kap. 4.2.3 verwendet. Die nicht orientierbaren Bilder (bspw. zu geringe Anzahl an detektierten Zielmarken) und alle Modellpunkte, die nur in einem Bild aufscheinen, werden für die spätere Berechnung deaktiviert. Mit einer Eingabe kann der Anwender entscheiden, ob die (etwas zeitaufwändigen) Plots der Residuen a priori und a posteriori für jedes Bild exportiert werden sollen. Ebenso kann er entscheiden, ob die gefundenen Ausreißer in die jeweiligen Bilder geplottet werden sollen.

Die zu berechnenden Neupunkte werden nun definiert. Der aktuelle Stand der Software sieht vor, die Objektpunktnamen direkt im Skript einzugeben. Im Kapitel 6.5 kann in Tabelle 6.5 die Auswahl der Punkte und in Kapitel 6.5.3 die Überlegungen dazu gefunden werden. Vertieft wird dort auf die Ergebnisse und die erzielten Genauigkeiten eingegangen.

Diese Neupunkte werden im Ausgleich bestimmt, während alle weiteren als konstante Punkte eingeführt werden. Die Initialisierung des Ausgleichsproblems mittels Ceres-Solver nach (Agarwal & Mierle, 2019) wird durchgeführt. Eine robuste Verlustfunktion (SoftLOne, vgl. Kap. 2.5.3) für den Beginn der Ausgleichsiterationen wird definiert, denn die Wahrscheinlichkeit, dass sich in den geladenen Daten Ausreißer (v.a. fehlerhafte Korrespondenzen) befinden, ist aufgrund der Automatisierung hoch. Fehlerhafte Zuweisungen von Korrespondenzen können nicht ausgeschlossen werden. Der Testdatensatz zeigte eine Ausreißeranteil von 10 % (Details siehe Kap. 6.5). Diese sollen im Zuge der Ausgleichung (näheres siehe Kap. 4.4.2) erkannt und eliminiert werden. Die robuste Verlustfunktion *SoftLOne* verwendet eine Skalierung, die den Wertebereich zwischen Ausreißer- und Nicht-Ausreißer-Bildpunkten trennt. Diese Skalierung entspricht jenem Residuum, ab dem ein Bildpunkt im Ausgleichsproblem als Ausreißer behandelt und geringer gewichtet wird. Diese Skalierung wurde mit zwei Pixel gewählt. Diese wird verwendet, so lange die Ausreißersuche durchgeführt wird.

Bevor die Schleife des Ausgleichs beginnt, werden dem Anwender die verwendeten Größen am Bildschirm ausgegeben. Dieser kann die Parameter der Orientierung, die Modell- und Objektpunktkoordinaten usw. am Bildschirm kontrollieren.

Der Ausgleichsvorgang wird iterativ durchgeführt. In einer Schleife werden die Parameter wiederholt ausgeglichen und spätestens nach 100 Durchläufen wird der Ausgleich beendet. Dazu wird in jedem Durchlauf dem Anwender das größte Residuum und die relative Änderung der Summe aller Residuennormen ausgegeben. Die berechneten Verbesserungen und die quadrierten Verbesserungen werden ebenso für jeden Durchlauf als Histogramm gespeichert. Daraus kann der Anwender Rückschlüsse auf die Konvergenz ziehen. Mit den Verbesserungen als Eingangsparameter kann nun die Ausreißersuche nach Kapitel 4.4.2 durchgeführt werden. Dieser Ablauf wird beibehalten, bis zu dem Iterationsschritt, bei dem die größte Verbesserung weniger sieben Pixel aufweist. Diese Schranke von sieben Pixel stammt aus der Multiplikation der erwarteten Messgenauigkeit der Bildpunkte von 2 Px mit Faktor 3.5 (in Anlehnung an die 3σ

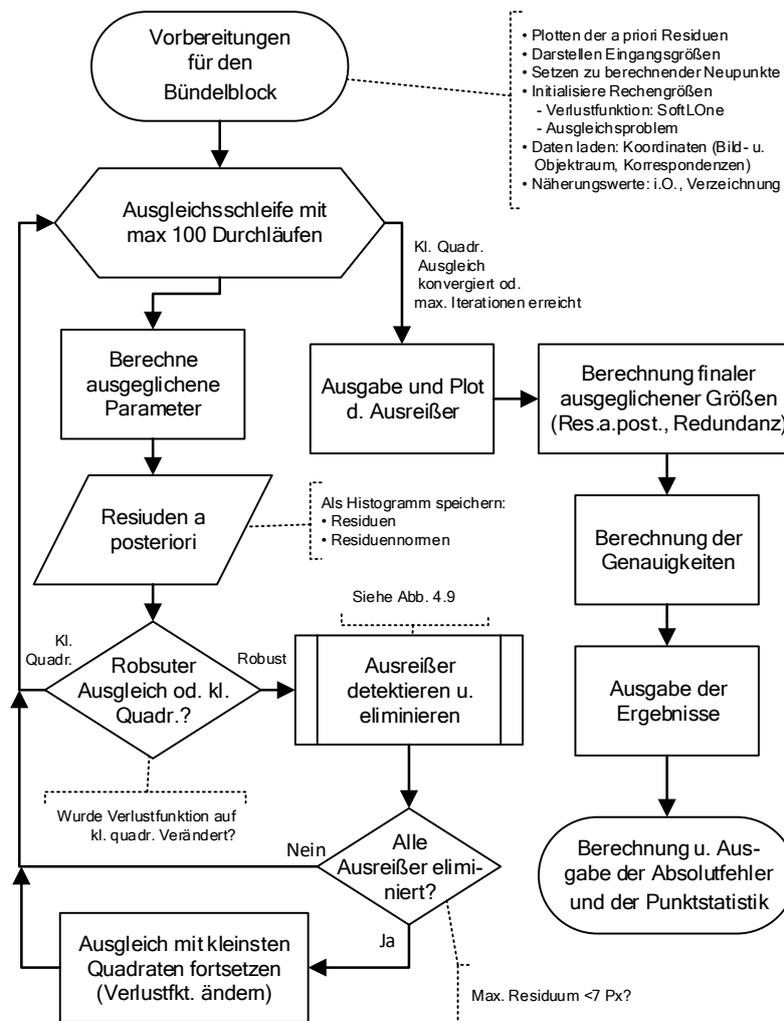


Abb. 4.8: Ablauf der gesamten Bündelblockanwendung

Regel bei Standardabweichungen der Messgenauigkeit). Wird dieser Wert erreicht, wird die Verlustfunktion auf die Methode der kleinsten Quadrate geändert und in den weiteren Iterationen keine Ausreißersuche mehr durchgeführt. Wird festgestellt, dass dieser kleinste Quadrate Ausgleich ebenfalls konvergiert, wird die Schleife abgebrochen. Die iterativ berechneten Parameter werden als Näherungswerte für einen finalen Ausgleichsdurchlauf verwendet womit das Endergebnis berechnet wird. Die Verbesserungen dieser Lösung werden berechnet und als Residuen a posteriori gespeichert. Alle ausgeglichenen Parameter (innere und äußere Orientierung, Objektpunktkoordinaten, Neupunktkoordinaten) werden ausgegeben und die 20 größten Residuen angezeigt. Mit der bereits erwähnten Benutzereingabe wird nun entschieden, ob die Ausreißerplots und die Plots der Residuen a posteriori gespeichert werden. In jedem Fall werden dem Benutzer die Bildbeobachtungen ausgegeben, die als Ausreißer erkannt wurden und nicht im Ausgleich Verwendung fanden. Abschließend werden die Genauigkeiten der berechneten Parameter bestimmt und die Bildbeobachtungsgenauigkeit \hat{s}_0 berechnet und ausgegeben.

4.4.1.1 Erweiterungen zum Testen des Programms Das Ziel der Arbeit sind die Koordinaten von tachymetrisch nicht bestimmten Zielmarken und Aussagen zur deren Genau-

igkeit. Wie bereits in Kapitel 2.5.5 besprochen, handelt es sich bei Genauigkeiten aus der Bündelblockausgleichung nur um innere Genauigkeiten, der Vergleich mit einem übergeordneten Koordinatensystem muss extra erfolgen. Die Anwendung ist nur mit einem Datensatz entwickelt und getestet worden und soll auch äußere Genauigkeiten umfassen. Um Aussagen dazu treffen zu können, wurden die in Tabelle 6.5 gewählten Punkte, entgegen dem Messprinzip aus Kapitel 3.1, bereits tachymetrisch bestimmt.

Aus dem Punktpaar tachymetrischer und photogrammetrischer Punkt lässt sich ein Absolutfehler als Norm des Verschiebungsvektors zwischen den beiden Punkten berechnen. Dieser wird abschließend dem Anwender am Bildschirm ausgegeben und das Auftreten der Neupunkte in den verschiedenen Bildern textlich dargestellt.

4.4.2 Ausreißerdetektion und -eliminierung

Die Ausreißersuche ist als Teil des Ausgleichsproblems implementiert und wird in jedem Iterationsschritt berechnet, so lange mit robuster Verlustfunktion ausgeglichen wird. Dargestellt wird der Ablauf in Abbildung 4.9 als Flussdiagramm.

Während die Parameter mit robuster Verlustfunktion ausgeglichen werden, werden für die Ausreißersuche die Residuen erneut mit *quadratischer* Verlustfunktion berechnet. Die Verbesserungen und deren quadrierte Werte werden berechnet und als je ein Histogramm, zur Inspektion durch den Anwender, gespeichert. Nun muss entschieden werden, ob eine Ausreißerdetektion durchgeführt werden kann, denn diese darf nur erfolgen,

- so lange die robuste Verlustfunktion verwendet wird,
- jedoch erst, sobald der robuste Ausgleich konvergiert.

Die Konvergenz des Ausgleichsproblems wird überprüft, indem die Gesamtsumme aller Residuenquadrate aus zwei auf einander folgenden Ausgleichsschritten verglichen wird. Ist die relative Änderung ausreichend gering ($< 1\%$), wird die Ausgleichung als konvergiert angesehen und erst dann kann die Ausreißersuche durchgeführt werden. Ob es sich um einen Ausreißer handelt, wird anhand eines Schwellenwertes festgestellt. Die maximal zulässige Bildpunktresiduenorm von *sieben Pixel*, die aus einer a priori abgeschätzten Bildpunktbeobachtungsgenauigkeit stammt, stellt den Schwellenwert dar. Gegen diesen Schwellenwert werden die fünf größten Residuen getestet. Sollten die getesteten Residuen größer dem Schwellenwert sein, werden die Beobachtungen des zugehörigen Punktes markiert und aus den weiteren Ausgleichsschritten ausgeschlossen. Die nächste Iteration wird anschließend berechnet und die Ausreißersuche beginnt von Neuem.

Die Ausreißersuche wird in jenem Iterationsschritt beendet, in dem das fünftgrößte Residuum unter dem genannten Schwellenwert *sieben Pixel* liegt. Zusätzlich muss sichergestellt sein, dass seit dem letzten Ausschluss von Ausreißern, der robuste Ausgleich konvergiert. Dann wird die Verlustfunktion auf jene der kleinsten Quadrate geändert und dieser bis zur Konvergenz iterativ ausgeglichen.

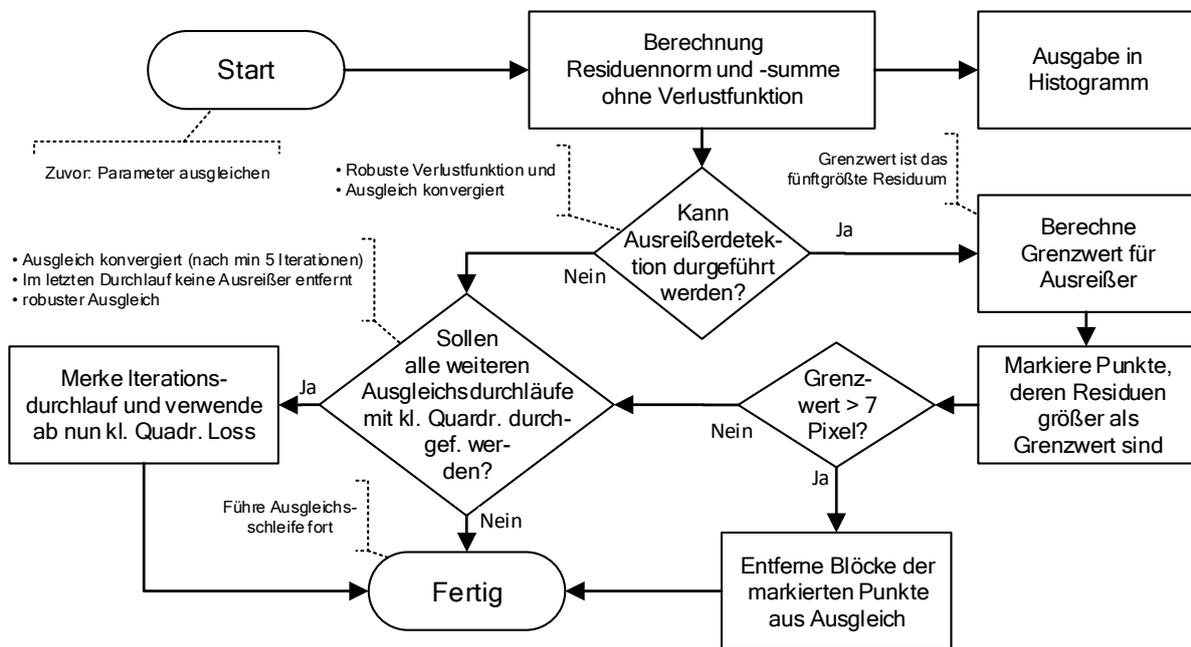


Abb. 4.9: Flussdiagramm zur Übersicht über die Ausreißerdetektion und -eliminierung im Rahmen des Bündelblocks

5. Entwicklungsdatensatz und Testumgebung Semmering Basis Tunnel Neu

5.1 Projekt Semmering Basis Tunnel Neu

5.1.1 Allgemeines

Der rund 27,3 km lange Semmering-Basistunnel neu (Abb. 5.1) soll künftig die Bahnhöfe Gloggnitz und Mürzzuschlag als ein Teil der baltisch-adriatischen Achse von der Ostsee (Danzig) zur Adria (Bologna) verbinden. Nach dem Projektauftrag im Frühjahr 2005 wurde die Trasse Pfaffensattel in einem mehrjährigen Planungsprozess aus insgesamt 13 möglichen Varianten als beste Trasse ausgewählt. Diese wurde vertieft erkundet und im Zuge einer zweijährigen Maßnahmenplanung optimiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen waren die Grundlagen für die Ausarbeitung der UVE³ Einreichunterlagen (Einreichung im Mai 2010).

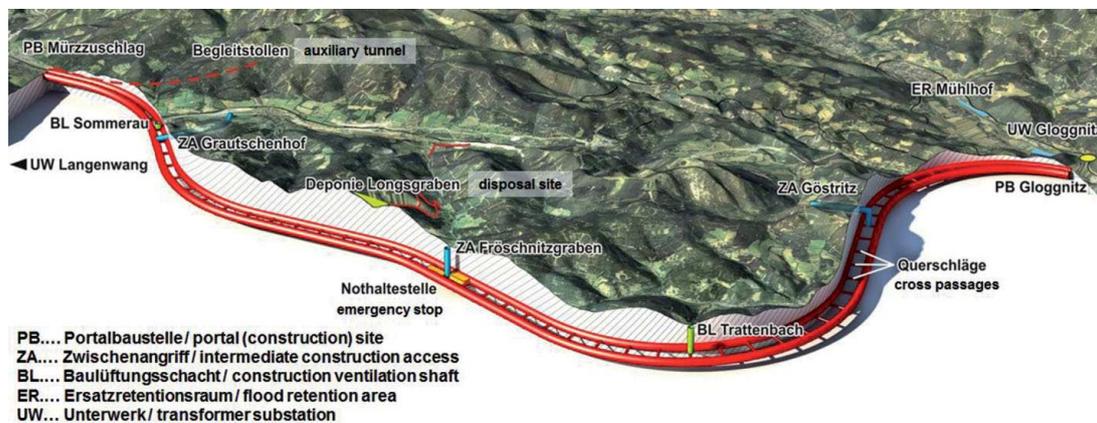


Abb. 5.1: Überblick Projekt Semmering Basis Tunnel Neu aus (Gobiet & Wagner, 2013)

Der Semmering-Basistunnel neu besteht aus zwei parallel verlaufenden, eingleisigen Tunnelröhren (lichte Querschnittsfläche rd. 42 m^2) mit Querschlägen in maximalen Abständen von 500 m. Aus bauleistungs- und topographischen Gründen wurden drei Zwischenangriffe (Göstritz, Fröschnitzgraben, Grautschenhof) vorgesehen, die das Auffahren des Tunnels in drei Abschnitten ermöglichen. Im mittleren Tunnelabschnitt (Fröschnitzgraben) ist im Endzustand eine Nothaltestelle situiert, deren Ereignisfalllüftung⁴ über einen rd. 420 m hohen Lüftungsschacht mit der Oberfläche verbunden ist. Das Projektgebiet ist in einem geologisch komplex gebauten Abschnitt der Ostalpen gelegen. Auf engem Raum treten hier mehrere geologische Großeinheiten auf, die durch tektonische Deckengrenzen voneinander getrennt sind. Der Untergrund wird von einer Vielzahl unterschiedlicher Gesteinsarten aufgebaut, die sowohl hinsichtlich geotechnischer wie auch hydrogeologischer Eigenschaften eine große Bandbreite aufweisen. Kapitel übernommen aus (Ekici, Rüegg, Wilfinger, Wagner & Weigl, 2011).

³UVE: Umweltverträglichkeitserklärung

⁴Lüftung, die während der Betriebsdauer des Tunnels im *Ereignisfall* (Längerer Zugshalt, Brand, Kollision, o.Ä.) Frischluftzufuhr sicherstellt

5.1.2 Baulos SBT1.1 Gloggnitz

Aus organisatorischen, terminlichen und topographischen Gründen ist der Tunnel in drei Baulose unterteilt. Das östliche Baulos SBT1.1 Tunnel Gloggnitz befindet sich seit Mitte 2015 in Bau. Das Baulos SBT1.1 stellt mit einem Auftragswert von etwa 456,5 Mio. EUR einen der größten bisherigen Bauaufträge in Österreich dar. Es setzt sich aus folgenden wesentlichen Bauwerken zusammen:

- Portalbaustelle Gloggnitz
- Zwei eingleisige Tunnelröhren mit einer Länge von je ca. 7,4 km
- 16 Querschläge
- Zwischenangriff Göstritz
- Endgültige Portalgestaltung und Betriebsgebäude in Gloggnitz
- Übernahme und Wartung von Bauwerken vorangegangener Baulose

Kapitel aus (Wagner, Haas, Druckfeuchter & Schachinger, 2015)

5.2 Datenbeschaffung

5.2.1 Bilddatensatz

Die Bildakquirierung erfolgte am 03.07.2018 in der Streckenröhre *Gleis 1* des Baulos SBT 1.1 in Gloggnitz. Der aufgenommene Datensatz umfasst 102 Bilder im proprietären Hersteller-RAW-Dateiformat mit Dateiendung *.cr2. Wie in Kapitel 3.1 gefordert, fand die Bilddatenakquirierung direkt im Anschluss an die tachymetrische Messung statt. Sie dauerte von 15:42 Uhr (Aufnahme erstes Bild) bis 16:46 Uhr (Aufnahme letztes Bild). Das in Kapitel 3.3 vorgestellte Aufnahmeschema bildet die Messquerschnitte zwischen Tunnelmeter 2419 und 2524 ab. Die Aufnahmeeinstellungen der Kamera sind in Tabelle 5.1 festgehalten.

Bildgröße	$(4752 \times 3168) Px^2$
	$(22.3 \times 14.9) mm^2$
Belichtungszeit	$1/250 s$
Blendenzahl	f/9
Brennweite	10 mm
Öffnungswinkel	107^{gon} horizontal
	82^{gon} vertikal

Tab. 5.1: Genäherte Kameraparameter bei Bildakquirierung aus EXIF Daten und (Canon Europa, 2019)

Die genannten Parameter der Kamera ergeben Darstellungsgrößen zwischen $25 Px$ bei den nächsten Zielmarken, während die am weitesten entfernten nur noch auf rd. $2 Px$ abgebildet werden. Die Bodenauflösung ist bereits in Tabelle 3.1 gezeigt.

Ein zweiter nicht zur Verwendung gelangter Datensatz wurde mit einer Kompaktkamera aufgenommen. Die Auswertung auf Basis dieses Datensatzes wurde im Laufe der Arbeit eingestellt. Die weitere Anpassung der aufgestellten Arbeitsabläufe aus Kapitel 4 an den zweiten Datensatz hätte den Aufwand der Arbeit unverhältnismäßig vergrößert.

5.2.1.1 Ausscheiden nicht verwendbarer Messbilder Das Aufnahmeschema (vorgestellt in Kap. 3.1) fand die erste Anwendung bei der Aufnahme des Datensatzes. Es fehlte Erfahrung, wie der Einfluss der Parameter der Kamera auf die Bilddaten sein wird. Trotz akribischer Vorbereitung und vorausgehenden Überlegungen, wurden manche Probleme erst bei der ersten Nachbearbeitung im Büro und im Zuge der Entwicklung des Programms erkennbar. Den in Kapitel 7.2.2 aufgezeigten Verbesserungsvorschlägen folgte eine Verkleinerung des Datenbestands. Von den aufgenommenen **102** Messbildern, konnten in der dargelegten Auswertung nur **43** Bilder verwendet werden. Auf das Ausscheiden von Messbildern und die Gründe dazu wird in Kapitel 6.1 vertieft anhand einiger Beispielbilder eingegangen.

In der Bilddatenakquirierung wurde das Aufnahmeschema strikt eingehalten, jedoch durch die Verwerfung von mehr als der Hälfte der Messbilder, ist das Schema für die Messquerschnitte der Auswertung, bis auf wenige Ausnahmen, nicht eingehalten. Von den neun Messquerschnitten wird nur bei Messquerschnitt 2444 das Messschema (siehe Abb. 3.2) eingehalten, während bei MQ 2468 nur zwei nahe aufgenommene Bilder in die Auswertung eingegangen sind. Als Extremfall ist bei MQ 2512 *kein* Bild im Rahmen des Aufnahmeschemas vorhanden. Die Abbildung der Zielmarken dieses MQs erfolgte rein aus größerer Entfernung.

5.2.2 Tachymetrische Messdaten

Die tachymetrische Messung erfolgte ebenfalls am 03.07.2018. Die Auswertung erfolgte mit dem Programm *PDM*, das von DI Dr. Karl Strobl (St. Pölten) entwickelt wurde. Sie wurde als Spezialanwendung für die Verwendung bei der 3D-Verschiebungsmessung entwickelt und handhabt neben der Auswertung, ebenso die Ergebnisse vergangener Messungen. Die Messungen wurden mit einer Präzisionstotalstation *TRIMBLE S8 Total Station*, Seriennummer 10242 durchgeführt. Die Totalstation weist laut Datenblatt eine Winkelmessgenauigkeit von 0.3^{mgon} und eine Streckenmessgenauigkeit von $2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ auf. Die tachymetrische Messung wurde in drei Standpunkten mit gesamt 218 Beobachtungen durchgeführt. Davon entfielen 50 Beobachtungen auf Messungen zu Festpunkten, die als Miniprismen ausgeführt sind, 164 Messungen zu Bireflex-Zielmarken, die die Verschiebungspunkte realisieren und die übrigen Messungen zu weiteren Punkten (Zwischenorientierungen um Stativverdrehung während der Messung aufzudecken, Messungen der Bauphase, u.Ä.).

6. Auswertung

Im folgenden Kapitel werden die aufgestellten Abläufe aus Kapitel 4 auf die aufgezeichneten Testdaten aus Kapitel 5.2 angewandt und die erhaltenen Ergebnisse diskutiert. Ähnlich der Aufteilung der Abläufe, werden hier Unterkapitel zu den Einzelschritten gezeigt, jedoch den Beginn macht das Kapitel 6.1 in dem vertieft auf die Gründe der Verringerung der Bilddaten eingegangen wird.

6.1 Auswahl eines verringerten Datensatzes

Der volle Umfang des in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Datensatzes konnte nicht in der Arbeit verwendet werden. In einem iterativen Prozess wurden händisch jene Bilder gewählt, die das Gesamtprogramm durchlaufen konnten. Vor allem die Lösbarkeit mit dem exhaustive Search Algorithmus war ausschlaggebend.

Der gewählte Exhaustive Search Algorithmus ist sehr rechenaufwändig und kann bei falscher Zuweisung einer Ellipse (Ellipse ist kein Zielmarkenabbild) sehr viel Zeit in Anspruch nehmen und schlussendlich trotzdem versagen. Darum wurde durch Testdurchläufe die Bestimmbarkeit der äußeren Orientierung durch den Exhaustive Search Algorithmus getestet und nur jene Bilder weiterverwendet, die eine Lösung lieferten. Die primäre Ursache, warum die Näherungswertsuche misslingt, liegt bereits im ersten Programmschritt, des Bireflex-Zielmarken-Auffinden (Kapitel 4.1) und wird im folgenden Unterkapitel 6.2 behandelt.

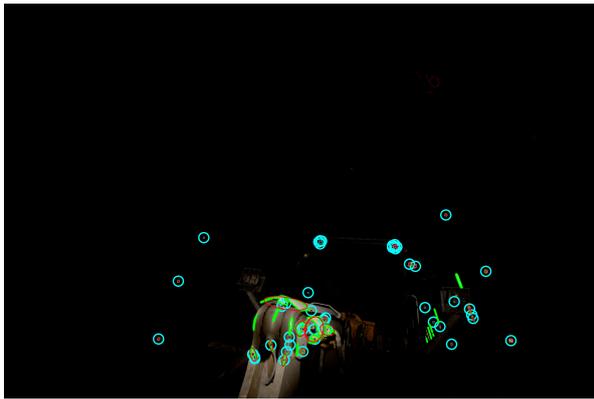
6.2 Bireflex-Zielmarken-Auffinden in Messbildern

Der Prozess um Zielmarken in Messbildern zu Entdecken wird auf den gesamten Datensatz angewandt und nutzt den Ablauf, der in Kapitel 4.1 erklärt wird. Die Unterschiede in den Ergebnissen zeigen, dass der Erfolg nicht immer gleich ausfällt. Vor allem, wenn Bilder nicht den Forderungen entsprechen und bspw. Texturen zeigen, misslingt der Ansatz, ebenso bei zu geringer Rückstrahlkraft der Zielmarken.

Im Mittel werden in den Bildern 32 Zielmarken erkannt. Dabei ist das Maximum an Zielmarken in Bild IMG_1780 mit 130 Zielmarken detektiert worden. Im Gegenzug versagt der Automatismus in Bildern IMG_1807, _MG_1721, _MG_1731, _MG_1745, _MG_1815, es werden keine Zielmarken erkannt. Die Laufzeit beträgt 4:13 (Min:Sek), was eine mittlere Laufzeit von etwa 2,5 s pro Bild bedeutet.

Die Bilder des verringerten Datensatzes weisen im Mittel ebenfalls 32 detektierte Zielmarken auf. Das Minimum von 16 wird in Bildern _MG_1727, _MG_1729 und _MG_1733 gefunden, in Bild _MG_1767 wird das Maximum von 61 Zielmarken erkannt.

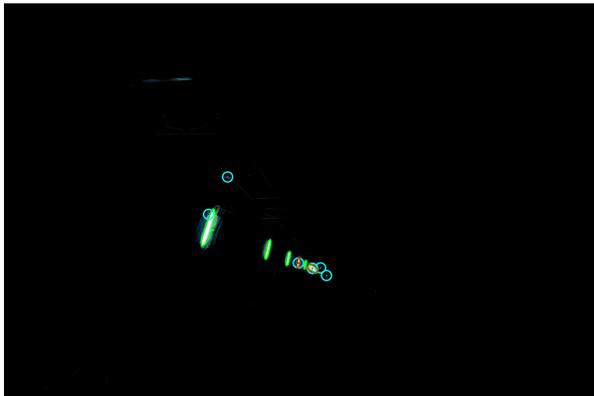
In Abbildung 6.1 sind vier Beispielbilder der gefundenen Ellipsen über das Eingangsbild des Algorithmus geplottet. Bei allen versagte der Algorithmus und wurden wenige bis keine Zielmarken gefunden. Dazu sind die Probleme vielfältig. In Abbildung 6.1a und 6.1b sind in



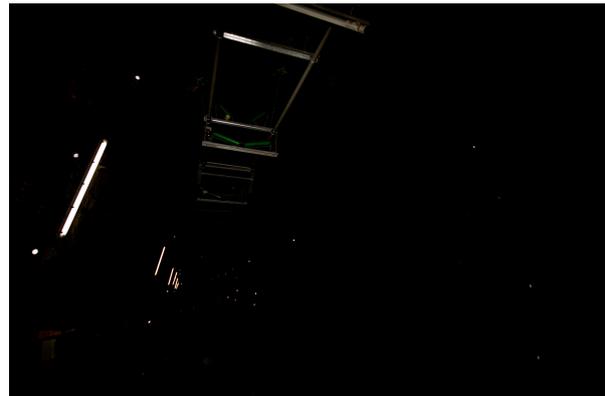
(a) Bild _MG_1778



(b) Bild _MG_1743



(c) Bild _MG_1702



(d) Bild _MG_1731

Abb. 6.1: Auszug an Bildern, bei denen die Ellipsensuche Probleme zeigt: (a) und (b) wegen Abschattung durch Baumaschinen, (c) wenige Zielmarken abgebildet → geringe Anzahl an Konturen und Zielmarken detektiert und Korrespondenzsuche misslingt, (d) Probleme bei der Berechnung des Schwellenwertes zur Binärbilderstellung und folglich keine Konturen erkannt

Farbkodierung: Grün: Gefundene Konturen; Rot: Akzeptierte Ellipsen; Türkis: Kreisrunde Hervorhebung der gefundenen, akzeptierten Ellipsen zur besseren Sichtbarkeit

unmittelbarer Nähe zu den, nach Aufnahmeschema nötigen Kamerastandpunkten, Baumaschinen abgestellt. Diese Maschinen werden mit deutlich erkennbarer Textur abgebildet und vor allem in Abb. 6.1a werden fälschlich viele Ellipsen an der Baumaschine detektiert. In Abbildung 6.1b ist die Abschattung der Maschine und die Verschiebung des 99,89- Perzentil infolge der Helligkeit der Baumaschine ausschlaggebend. Die Darstellungen in Abbildung 6.1c und 6.1d zeigen Probleme mit zu geringer Rückstrahlkraft der Messmarken. In Abb. 6.1c sind nur wenige Zielmarken als weiße Pixel-Flächen vom Beobachter zu erkennen, während der Algorithmus noch weniger erkennt. Als Grund können die Aufnahmeeinstellungen angenommen werden. Der menschliche Betrachter bemerkt dabei, dass Fehlzusweisungen stattfinden. In Abbildung 6.1d sind vom Benutzer die Zielmarken zu erkennen, jedoch misslingt der Ansatz des Algorithmus komplett. Es wird keine Zielmarke als Ellipse detektiert, was auf Probleme bei der Schwellwertberechnung zur Erstellung des Binärbildes zurückzuführen ist (99,89- Perzentil wird als Helligkeitswert 255 berechnet).

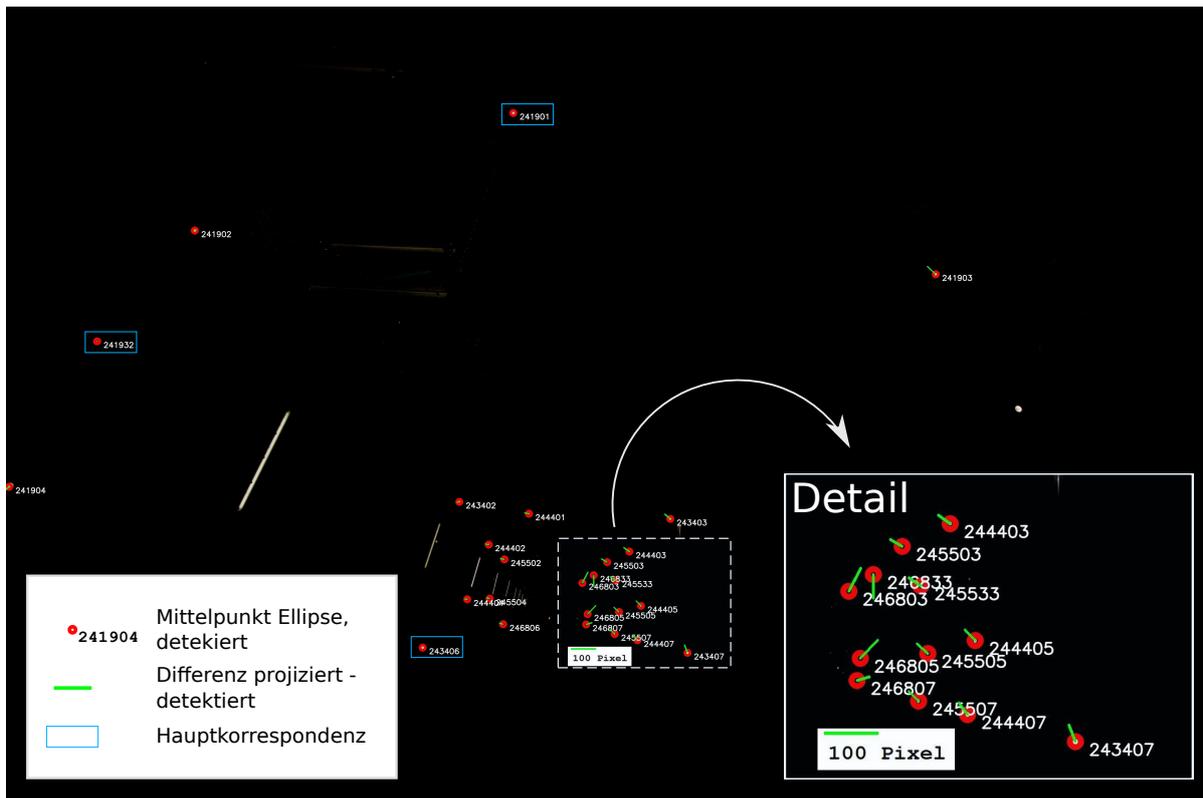


Abb. 6.2: Ergebnis genäherter äußerer Orientierung: Darstellung des Messbildes `_MG_1707` mit gefundenen Ellipsen und den Residuen zwischen projiziertem Punkt und detektierte Ellipse

6.3 Verbesserung der Näherungswerte der äußeren Orientierung

Für die Verbesserung der groben Näherungswerte der äußeren Orientierung wurde der in Kapitel 4.2 vorgestellte Ablauf auf den verringerten Datensatz angewandt. Die Laufzeit des Programms betrug trotzdem beinahe drei Stunden.

Die berechneten Näherungswerte der äußeren Orientierungen beziehen sich nur auf die drei Hauptkorrespondenzen des räumlichen Rückwärtsschnittes. Die Abbildung 6.2 zeigt dazu die Ergebnisse der Näherungswertberechnung. Dargestellt sind die gefundenen Korrespondenzen für Bild `_MG_1707` geplottet in das Startbild des Programms (vgl. dazu Abb. 4.3b). Zur besseren Erkennbarkeit ist ein Ausschnitt der Zielmarken vergrößert dargestellt. An dieser vergrößerten Darstellung kann erkannt werden, dass die Residuen deutlich erkennbar sind und Systematik in den Richtungen erkannt werden kann. Um diese systematischen Residuen weiter zu verringern ist es notwendig den Ansatz in Kapitel 4.3 als nächsten Programmschritt (siehe Kap. 6.4) auszuführen.

Eine Statistik über den Zeitaufwand zur Berechnung der Näherungswerte eines Bildes ist in Tabelle 6.1 zu finden. Sie lag im Mittel bei $4:1.8$ Minuten. Während die Lösung der geringsten Laufzeit in wenigen Sekunden gefunden werden konnte, kam die längste bereits in den Bereich der Maximalzeit von 30 Minuten.

Beschreibung	Dauer in [hh:mm:ss]	Bildname
Mittelwert	4:1.8	
Median	1:57.3	
Minimalzeit	3.4	_MG_1864
Maximalzeit	22:42.1	_MG_1781
Gesamtzeit	2:57:20.5	

Tab. 6.1: Statistik der Laufzeiten der exhaustive Search für Hauptkorrespondenzsuche und Näherungswertverbesserung der äußeren Orientierung

6.4 Korrespondenzsuche und weitere Verbesserung der äußeren Orientierung

Der zweite Schritt der Korrespondenzsuche (Ablauf siehe Kapitel 4.3) wird verwendet, um die Korrespondenzen zwischen Objektpunkten und Ellipsen (im Bildraum) zu finden und die Näherungswerte der äußeren Orientierung zu verbessern. Folglich sind nur die Bilder des verringerten Datensatzes verwendet worden, denn diese lieferten eine Lösung im exhaustive Search aus Kap. 6.3.

Dieser Arbeitsschritt ist jener mit der geringsten Rechenzeit. Die Gesamtlaufzeit für alle Bilder betrug lediglich $73.82\text{ s} = 1:13.82\text{ s}$ und zeigte für jedes Bild Erfolg.

Erneut soll das Ergebnis anhand des Messbilds _MG_1707 gezeigt werden. In Abbildung 6.3 ist der Plot der Residuen gezeigt. Dazu kam die verbesserte äußere Orientierung zum Einsatz, die mit dem ausgeglichenen Rückwärtsschnitt berechnet wurde. Verglichen mit dem Ergebnis aus Abb. 6.2 der genäherten äußeren Orientierung, kann erkannt werden, dass die Residuen andere Richtungen und Beträge aufweisen. Das Maximalresiduum des Bildes in diesem Schritt zeigt 13.5 Px . Die Verzeichnung wird erst im Bündelblockausgleich beachtet. Auf diesen Umstand soll hier erneut hingewiesen werden. Das dargestellte maximale Residuum müsste bei Beachtung der Verzeichnung im aktuellen Schritt und guten Näherungswerten dafür, vermutlich schon verworfen werden. Im aktuellen Schritt und den davor folgenden sind systematische Abweichungen als Folge zu erkennen. Diese Abweichungen sind gering genug, dass der Programmablauf funktioniert und wurde deshalb außer Acht gelassen. Die Berechnung des ausgleichenden Rückwärtsschnitt verringert die Residuen und detektiert falsche Korrespondenzen.

6.5 Bündelblockausgleichung

Die Bündelblockausgleichung stellt den Abschluss des Programms dar und beinhaltet einige Unterpunkte, die bereits im Theorieteil (Kap. 2.5) und Programmablauf (Kap. 4.4) dargestellt sind. Ähnlich dazu sollen in Kapitel 6.5.1 auf die Startparameter bei Anwendung auf den Testdatensatz eingegangen werden, in Kapitel 6.5.2 die Ergebnisse der Ausreißereliminierung diskutiert und die Endergebnisse des Ausgleichs in Kapitel 6.5.3 gezeigt werden.

Der iterative Teil der Bündelblockausgleichung benötigte 63 Durchläufe. Dazu zählen 52 lte-

Projektionszentrum [Px]	Verzeichnungsparameter []
$O' = \begin{pmatrix} +2349.660 \\ -1612.189 \\ +2133.695 \end{pmatrix}$	$g_{13} = +12.880$ $g_{15} = -0.011$

Tab. 6.2: Näherungswerte der inneren Orientierung, bereits durch Ausgleich erhalten



Abb. 6.4: Ausreißerdarstellung in Bildern _MG_1710 und _MG_1781, Ausreißer rot, Korrekte Ellipsen grün

ausgeschlossen und nicht weiter verwendet. Als die meisten Ausreißer (nämlich fünf) wurden in Bild _MG_1710 (246832, 246804, 245532, 246803, 241906) und in Bild _MG_1781 (245533, 246807, 244404, 245507, 244432) eliminiert. Dazu sind die korrekten Punkte und die Ausreißer in Abbildung 6.4 dargestellt. Weiters wurden in 12 Bildern nur je ein Punkt als Ausreißer erkannt. An der Grafik kann erkannt werden, dass sich die Ausreißer um den Fluchtpunkt häufen. In diesem Bildbereich werden Objektpunkte mit der größten Distanz zum Aufnahmezentrum abgebildet. Die Anwendung der Nächsten-Nachbar-Suche bei der Korrespondenzsuche verwendet eine Schranke von $50 Px$, welche in einer Entfernung von $50 m$ bereits etwa $70 cm$ entspricht. Dieser großen Bodenauflösung am Objekt folgt die Häufung der Ausreißer. Weiter entfernte helle Objekte im Tunnel (bspw. Frontscheinwerfer von Kfz) werden ebenfalls in diesem Bildbereich abgebildet. Werden Objektpunkte in $50 m$ und mehr Entfernung abgebildet, ist die fixe Bildraumschranke von $50 Px$ nicht mehr optimal und führt vermehrt zu Ausreißern.

6.5.3 Ausgegliche Parameter

Der um die Ausreißer bereinigte Bündelblockausgleich ergibt nun das Endergebnis des Programms. Die erhaltenen Größen stellen optimale Ergebnisse dar, die durch die Ausgleichung nach den kleinsten Quadraten erhalten wurden (siehe Theorie in Kap. 2.5). Die ausgeglichenen Parameter umfassen die innere und äußere Orientierung, Koordinaten der photogrammetrischen Neupunkte, verbleibende Residuen am Ende der Ausgleichung und Genauigkeitsparameter wie die Genauigkeiten der erwähnten Größen und die Standardabweichung der Gewichtseinheit \hat{s}_0 , die in Formel 6.1 zu finden ist.

$$\hat{s}_0 = 1.05 Px \quad (6.1)$$

Die ausgeglichenen Parameter der inneren Orientierung sind in Tabelle 6.3 dargestellt. Stellt man sie in Verhältnis zu den Näherungswerten, kann erkannt werden, dass das Projektionszentrum vor allem normal zur Bildebene verschoben werden musste (Vergrößerung der Kamerakonstante um $\Delta c \approx 67 Px$). Die Parameter der Verzeichnung, dessen Interpretation nicht direkt auf physikalische Größen zurückzuführen sind, zeigen relativ gesehen, große Veränderungen (Verringerung des Verzeichnungsparameters $\Delta g_{13} \approx 14$).

Projektionszentrum [Px]	Verzeichnungsparameter []
$\hat{O}' = \begin{pmatrix} + 2355.114 \\ - 1608.298 \\ + 2201.399 \end{pmatrix}$	$\hat{g}_{13} = -1.135$ $\hat{g}_{15} = 0.73$
$\hat{s}_{O'} = \begin{pmatrix} 1.4568 \\ 0.6844 \\ 0.6026 \end{pmatrix}$	$\hat{s}_{g_{13}} = 0.2004$ $\hat{s}_{g_{15}} = 0.2055$

Tab. 6.3: Geschätzte innere Orientierung aus Bündelblockausgleich und deren Genauigkeiten

Im Folgenden soll auf die Residuen des Ausgleichs eingegangen werden. Dazu sind in Abbildung 6.5 Histogramme der quadrierten Residuen zu finden. Unter Punkt (a) sind die Residuen nach dem ersten Ausgleichsdurchlauf dargestellt, während (b) jene des Endergebnisses darstellen. Die Histogramme sind mit unterschiedlichen Achsweiten dargestellt. Zu Beginn des Ausgleichs wird mit robuster Verlustfunktion (Vf) ausgeglichen, um Ausreißer gering zu gewichten. Die gezeigten Verbesserungen wurden mit der trivialen Vf berechnet. Es sind Residuen bis $80 Px$ vorhanden, während im Endergebnis das 99 % Perzentil knapp geringer als $5 Px$ ist. Dazu sind die fünf größten, verbleibenden Residuen des Ausgleichsergebnisses in Tabelle 6.4 dargestellt. Es sind die einzigen Residuen die im Endergebnis mehr als $5 Px$ aufweisen. Die Verteilung der schlussendlichen Ausgleichung folgt der erwarteten χ^2 -Verteilung, bei der Betrachtung der maximalen Residuen kann nicht ausgeschlossen werden, ob es sich dabei um Ausreißer handelt. Weitere statistische Tests wären nötig um diese Frage konkret zu beantworten.

Um die Richtung und Größe der Residuen anhand eines Beispielbildes zu sehen, kann auf Abbildung 6.6 verwiesen werden. Dargestellt ist erneut das Bild `_MG_1707` mit dem Plot der Residuen a posteriori in Richtung und Betrag. Es stellt damit den finalen Schritt des Programmes als Plot dar. Hier zeigen die Residuen in Richtung und Betrag deutliche Unterschiede zu Abbildung 6.3. Das Maximalresiduum des Bildes in diesem Schritt zeigt $2.8 Px$, die Residuen sind demnach in der Abbildung um einen Faktor 50 vergrößert dargestellt. Als Detail kann

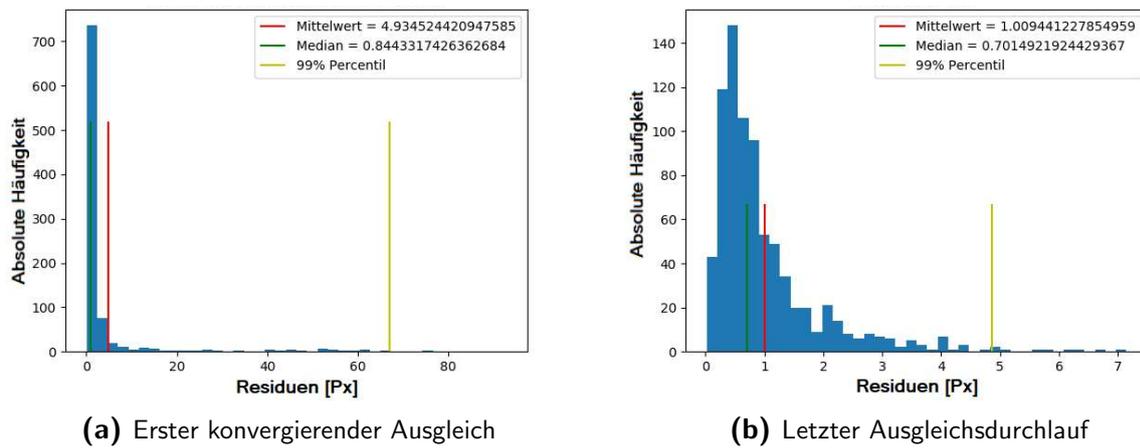


Abb. 6.5: Histogramm der quadrierten Residuen (kl. quadrate Ausgleich) bei erstem und letztem Durchlauf, man beachte die unterschiedlichen Skalierungen

Bild	Punktnummer	Residuum [Px]
_MG_1746	248133	6.41
_MG_1824	241904	5.77
_MG_1810	245506	5.60
_MG_1772	246805	5.25
_MG_1783	250105	5.06

Tab. 6.4: Fünf größten Verbesserungen des Endergebnisses des Bündelblockausgleichs

erkannt werden, dass in der Ausreißerdetektion der Punkt 241904 als Ausreißer erkannt wurde und im Übergang zwischen Abb. 6.3 zu Abb. 6.6 entfernt wurde.

6.5.3.1 Neupunkte Eine Aussage zur erreichbaren Genauigkeit des Programms in Verbindung mit dem Testdatensatz soll nun mit der Auswertung der Neupunkte getätigt werden. In Kapitel 4.4 wird erklärt, wie die Neupunkte berechnet werden. Kurz zusammengefasst werden Punkte im Auswerteskript definiert, deren Koordinaten im Bündelblockausgleich bestimmt werden. Zur Diskussion in dieser Arbeit wurden die Punkte in Tabelle 6.5 als Neupunkte definiert. Neben der Anzahl an Bildern, in denen die Neupunkte abgebildet sind, sind in dieser Tabelle die erreichten Genauigkeiten \hat{s}_i , berechnet im Bündelblockausgleich, dargestellt. Bei den kleinsten neun Neupunkten ist keine der Standardabweichungen entlang der Koordinatenachsen größer 3.9 mm . Von den weiteren vier Punkten zeigt bei drei zumindest eine Standardabweichung mehr als 11 mm . Der Neupunkt 2468 05 hat dabei die größte Standardabweichung mit $\hat{s}_y = 192.9\text{ mm}$.

Die äußere Genauigkeit ist ebenfalls in Tabelle 6.5 zu finden. Diese ist nicht direkt als Ergebnis des Bündelblockausgleich bestimmbar, gibt sie doch nach Kapitel 2.5.5 Auskunft, wie das Ergebnis des Ausgleichs verglichen mit anderen Punkten eines übergeordneten Netzes übereinstimmen. Diese Genauigkeiten werden als Betrag des Verschiebungsvektors zwischen den photogrammetrisch berechneten Neupunktskoordinaten und den tachymetrisch bestimmten, berechnet. Dabei kann erkannt werden, dass die geringste Verschiebung bereits größer als



Abb. 6.6: Verbleibende Verbesserungen a posteriori nach erfolgreichem Bündelblockausgleich, Bild _MG_1707

die angezielte Genauigkeit von 1 mm ist.

Aus der äußeren Genauigkeit lässt sich ablesen, dass die Abweichungen der berechneten Koordinaten des entwickelten Programms nicht die erwünschte Genauigkeit der tachymetrischen Messung von $1\text{ mm Standardabweichung an den Zielpunkten}$ (vgl. Kap. 1.2.4) erreichen konnten. Dabei zeigt die kleinste Verschiebung 3.6 mm bei Punkt 249332, während die größte mit $2513.2\text{ mm} \simeq 2.5\text{ m}$ bei Punkt 245505 auf unentdeckte Fehler der Auswertung schließen lässt.

Neupunkt		Auftreten	\hat{s}_x	\hat{s}_y	\hat{s}_z	Äußere Genauigkeit
MQ	PktID	#	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
2444	01	16	1.7	1.9	1.8	6.6
	04	15	1.7	3.9	1.8	4.8
	05	18	1.7	2.0	1.4	8.8
2455	01	4	7.2	8.0	8.4	16.8
	04	11	3.8	2.8	2.1	14.8
	05	20	2.0	1.6	1.3	8.1
2468	05	3	122.4	192.9	14.1	2513.2
2493	02	12	1.6	1.9	1.5	5.9
	03	11	1.8	3.2	1.9	7.4
	32	13	1.7	2.0	1.4	3.6
	33	11	1.6	3.3	1.8	9.4
2455	01	5	44.9	83.9	18.8	45.1
	05	10	6.2	11.9	3.2	22.1

Tab. 6.5: Innere und äußere Genauigkeiten der Neupunkte aus Bündelblockausgleich und Anzahl deren Auftreten in unterschiedlichen Bildern

7. Diskussion und Ausblick

7.1 Fazit

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass eine nachgeschaltete, automatisierte, photogrammetrische Verschiebungsmessung möglich ist. Die besten, erreichten Genauigkeiten bewegen sich im Bereich der erwarteten Genauigkeit berechnet nach der Faustformel zur Genauigkeitsabschätzung (siehe Formel 7.1, $\sigma_{x,y,z} = 2\text{ mm}$). Weitere liegen knapp darüber und die geringsten Genauigkeiten zeigen von weiterhin unbehandelten Problemen. Ziel weiterer Untersuchungen sollte sein, Ergebnisse mit einer vergleichbaren Genauigkeit, wie jener der tachymetrischen Messung, zu erhalten. Dazu werden in Kapitel 7.2 Ursachen aufgezeigt, deren verbesserte Handhabung verbesserte Ergebnisse bedeuten könnten.

$$\sigma_{x,y,z} = m_B \sigma_B \frac{k}{\sqrt{n}} \quad (7.1)$$

mit

m_B ... Bildmaßstab (1000)

σ_B ... Bildmessgenauigkeit ($2\ \mu\text{m}$)

k ... Netzwerkgeometrie $2 \leq k \leq 5$ (4)

n ... Bildanzahl (16)

In Klammern angenommene Werte

7.2 Ausblick und ungenütztes Potential

Um die vertiefende Eingangsfrage zur erzielbaren Genauigkeit bei Erweiterung des aktuellen Stands der Technik bei der Verschiebungsmessung im Tunnelbau beantworten zu können, wurde ein Ablauf entwickelt, wie er in Kapitel 4 gezeigt wird. Dazu werden die Überlegungen aus dem Messprinzip in Kapitel 3 herangezogen und mit einem gewissen Grad an Automatisierung umgesetzt. Dabei sind bereits weitere Verbesserungspunkte entdeckt worden, die hier nun diskutiert werden.

7.2.1 Verfeinerung der aufgestellten Methoden

Bei der visuellen Inspektion der Bilder und den gefundenen Zielmarken können bereits diverse Punkte an Verbesserung gefunden werden. Der menschliche Betrachter der Bilder kann erkennen, dass er mit seiner Intuition Zielmarken erkennt, die maschinell nicht detektiert wurden. Ein Lösungsansatz in diese Richtung ist eine erweiterte Zielmarkensuche, die erst stattfinden kann, sobald gute Näherungswerte für die äußeren Orientierungen vorhanden sind (bspw. nach exhaustive Search). Mittels Projektion von Objektpunkten könnten so im Modellraum Bereiche definiert werden, in denen Abbildungen von Zielmarken vermutet werden. Die Suche nach Helligkeitsextrema in diesen Bereichen vereinfacht sich aufgrund der geringeren Ausdehnung. So

könnten, durch lokale Betrachtung, bisher unentdeckte Zielmarken als lokale Helligkeitsmaxima in diesen Bereichen gefunden werden.

Die Bestimmung der Zielmarken ist im Modellraum der ausschlaggebende Hebel zur erreichbaren Genauigkeit. Dabei stellt nicht nur die Anzahl an detektierten Zielmarken eine wichtige Größe dar, sondern auch die Güte der Ellipsenanpassung. Im aufgestellten Ablauf werden bestangepasste Ellipsen an binäre Konturen eingepasst und die Ellipsenmittelpunkte als Realisierung des Zielmarkenmittelpunkts verwendet. Untersuchungen von (Otepka, 2004) zeigen, dass bei Einbeziehung des Grauwertverlaufs von Zielmarken, deutliche Genauigkeitssteigerungen möglich sind. In dieser Arbeit werden Zielmarken nicht auf (Teil-) Verdeckung untersucht. Damit wird nicht beachtet, ob die Zielmarken im Modellraum vollständig abgebildet werden und somit die Mittelpunkte der angepassten Ellipsen im weiteren den gesuchten Zielmarkenmittelpunkt darstellen.

Die Parameter der inneren Orientierung werden als Unbekannte in den Bündelblockausgleich eingeführt und als Ergebnis dessen geschätzt. Erst nach dem ersten Ausführen des Bündelblock-Skripts stehen somit Parameter der Verzeichnung zur Verfügung, die auch als Näherungswerte in die nächsten Auswertvorgänge verwendet werden können. Gute genäherte Parameter der inneren Orientierung sind bei jeder Projektion von Objektpunkten in den Bildraum wichtig, um systematische Fehler zu modellieren. Eine Projektion erfolgt beispielsweise beim exhaustive Search Algorithmus zur Berechnung der Näherungswerte der äußeren Orientierungen. Die Beachtung der Verzeichnung in den Schritten Näherungswertverbesserung der äußeren Orientierungen (Kap. 4.2) und Korrespondenzsuche (Kap. 4.3) würde die Nächste-Nachbarn-Suche der projizierten Objektpunkte im Modellraum verbessern, denn dadurch wäre die Anwendung verringerter Suchradien möglich.

Der Ansatz zur Berechnung der Näherungswerte der äußeren Orientierung ist der zeitaufwändigste Arbeitsschritt. Weitere Untersuchungen wären nötig, um festzustellen, welche Schritte zur Beschleunigung der Näherungswertsuche möglich sind. Beispielsweise wird in Kapitel 4.2.3 auf die Möglichkeit der Sortierung der Korrespondenzliste eingegangen. Eine geeignete Sortierung könnte die Berechnung der Näherung der äußeren Orientierung zeitlich verkürzen.

7.2.2 Erweiterungen des Messprinzips

Am verwendeten Messprinzip sind bereits während der Entwicklung des Prozesses Verbesserungsmöglichkeiten aufgefallen. Dessen Änderungen hätten den Aufwand soweit erweitert, dass es den Umfang der Arbeit gesprengt hätte. Bereits bei einer eingehenden visuellen Kontrolle der akquirierten Bilder wurde festgestellt, dass die Rückstrahlung der nächsten Zielmarken oft deutlich geringer ausgefallen sind, als bei weiter entfernten. Die Ursache dazu, dürfte aus dem gewählten Kamerasystem hervorgehen. Mit dem deutlichen Abstand zwischen Aufsteckblitz und Aufnahmezentrum bei gleichzeitig geringer Brennweite ist der Einfallwinkel des Blitz-Lichts auf die Zielmarken stark abweichend von den optimalen 90 Grad. Daraus folgt, dass die Rückstahleigenschaft der Zielmarke stark abnimmt. Als mögliche Lösung dieses Pro-

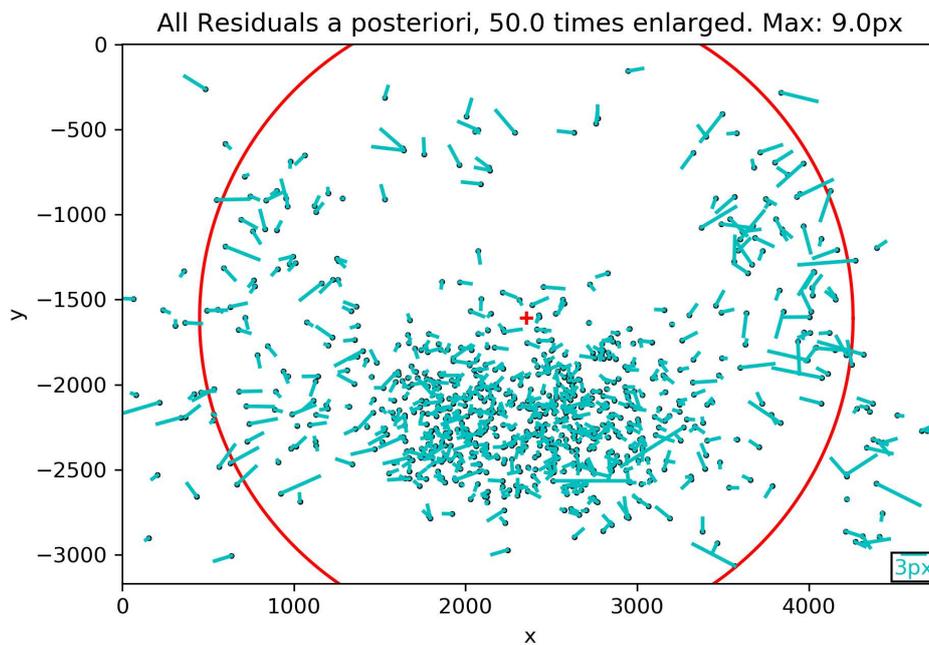


Abb. 7.1: Darstellung der Residuen a posteriori aller Bilder in einem gemeinsamen Plot um Punktverteilung aufzuzeigen: Erkennbar sind geringe Punktdichten über Kreismittelpunkt und außerhalb des roten Kreises, besonders in den oberen Bildecken

blems sollte die Verwendung größerer Brennweiten genügen, alternativ könnte die Verwendung eines Ringblitzes Abhilfe schaffen. Ebenso ist keine Notwendigkeit gegeben, ein Zoomobjektiv zur Bildaufnahme zu verwenden. Im Gegenteil würde ein Fixbrennweitenobjektiv aufgrund geringerer mechanischer Änderungsmöglichkeiten eine Verbesserung der Langzeitstabilität der Objektivparameter (v.a. Verzeichnung und Brennweite) ermöglichen. Es wäre die Verringerung jeglicher Schwellenwerte, bei nur minimalen Anpassungen im Ablauf, möglich.

Erst nach erfolgreicher Ausgleichung stehen exakte Parameter der Verzeichnung bereit. Wird, wie eingangs erwähnt, zukünftig ein Fixbrennweitenobjektiv verwendet, so werden die ausgeglichenen Parameter der inneren Orientierung für weitere Messkampagnen gute Dienste leisten. Dazu sollte ein System aufgebaut werden, das die Parameter nach Messkampagne speichert und so für ein Projekt langfristig verfügbar macht. Damit kann im weiteren über die Entwicklung der inneren Orientierung des Objektiv weitere Aussagen zum Systemverhalten der Kamera getroffen werden.

Ein Problem, dessen Lösung weitreichende Veränderungen benötigt, ist die Punktverteilung der Zielmarken in den Bildern. In Abbildung 7.1 ist der Plot aller Residuen a posteriori dargestellt. Darin kann erkannt werden, dass die größte Anzahl an Punkten im Bereich der Koordinaten $[-1500, 1500]$ und $[-2500, 3200]$ zuliegen kommen. Im Bereich direkt darüber ($[-1000, 1500]$ - $[-1500, 3200]$) sind kaum Punkte und in den oberen Bildecken ebenso. Diese ungünstige Konfiguration kann bei geringer Bildanzahl zu ungenügend gut bestimmten Parametern der inneren Orientierung führen. Zwar konnte am Testdatensatz und der Auswertung kein Problem auf die Konfiguration zurückgeführt werden, jedoch sollte es bei Weiterentwicklungen bedacht werden.

Eine große Herausforderung stellt das Finden von Näherungswerten für die äußeren Ori-

entierungen der Bilder dar. Die gefundene Lösung mit dem exhaustive Search Algorithmus ist sehr rechenaufwändig und kann bei wenig Ellipsen der nächsten beiden Messquerschnitten versagen. In diesem Fall ist der Zeitaufwand ebenso ein großes Thema. Als Abbruchkriterium wird dazu die benötigte Laufzeit pro Bild verwendet. Kann bei mehreren Bildern keine Lösung gefunden werden, kann die Näherungswertesuche mehrere Stunden Zeitaufwand bedeuten. Interesse muss nun daran bestehen, diese mögliche Verzögerung weitestgehend zu eliminieren. Eine Lösung dazu kann sein, dass die Abbildung des nächsten Messquerschnittes wie in Kapitel 3.3 gefordert erfolgt. Diese Forderung ist jedoch schwierig einzuhalten und bei der Bildakquirierung im Feld noch kaum festzustellen. Darum soll als Alternativvorschlag die Einführung von weiteren Zielmarken diskutiert werden. Werden neben oder statt der klassischen Zielmarken (siehe Abb. 1.2) Zielmarken eingeführt, die mit maschinellem Sehen eindeutig erkannt werden können, kann der automatisierte Ablauf schnellere Ergebnisse liefern. Erhalten diese neuen Zielmarken über die tachymetrische Messung Objektraumkoordinaten und ist die Verteilung so gewählt, dass je mindestens drei dieser Zielmarken in jedem Bild abgebildet werden, können daraus die Näherungswerte der äußeren Orientierung berechnet werden. Darüber hinaus erhöht sich der Automatisierungsgrad, denn die Angabe des nächsten Messquerschnitts durch den Anwender entfällt.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht im Tunnel am Beispiel Semmering Basis Tunnel	7
1.2	Goecke Bireflex-Zielmarke und Rundprisma	8
1.3	Anordnung der Punkte im Messquerschnitt	8
1.4	Freie Stationierung bei der 3D- Verschiebungsmessung	9
2.1	Morphologische Filter	12
2.2	Kamerakoordinatensysteme OrientAL und openCV	14
2.3	Radial-symmetrische und tangentiale Verzeichnung	15
2.4	Räumlicher Rückwärtsschnitt aus (Luhmann, 2018)	18
2.5	Bündelblockausgleichung aus (Kraus, 2004)	19
2.6	Bündelblockausgleichung für Nahbereich aus (Luhmann, 2018)	20
3.1	Arbeitsablauf Verschiebungsmessung m. fotogr. Auswertung	25
3.2	Aufnahmeprinzip der Messbilder	27
3.3	Gegenüberstellung(geteilt): Langzeitbelichtung und Blitzaufnahme	27
4.1	Vereinfachter Gesamtablauf photogr. Prozess - Flussdiagramm	30
4.2	Automatisiertes Finden der Zielmarken - Flussdiagramm	31
4.3	Darstellungen der Einzelschritte des Zielmarken Finden in am Bild _MG_1824	33
4.4	Hauptprogramm zum Finden von Näherungsorientierungen - Flussdiagramm	35
4.5	Näherungswertberechnung äußerer Orientierung mit Exhaustive Search Algorithmus und räumlichen Rückwärtsschnitt - Flussdiagramm	37
4.6	Scoreberechnung des exhaustive Search Algorithmus - Flussdiagramm	37
4.7	Verbesserung der äußeren Orientierung und Korrespondenzsuche - Flussdiagramm	39
4.8	Ablauf der Berechnung des Bündelblocks - Flussdiagramm	42
4.9	Detail Bündelblock Auswertung: Ausreißerdetektion - Flussdiagramm	44
5.1	Überblick Projekt Semmering Basis Tunnel Neu	45
6.1	Auszug an Bildern, bei denen die Ellipsensuche Probleme zeigt	49
6.2	Plot des Ergebnisses genäherter äußerer Orientierung	50
6.3	Verbesserte äußere Orientierung bzw. a priori Residuen des Bildes _MG_1707	52
6.4	Plot der Ausreißer der Bilder _MG_1710 und _MG_1781	53
6.5	Histogramm der quadrierten Residuen bei erstem und letztem Durchlauf	55
6.6	Verbleibende Verbesserungen a posteriori nach Bündelblockausgleich	56
7.1	Residuen a posteriori aller Bilder in einem Plot	60

Tabellenverzeichnis

3.1	Bodenauflösung und Abbildungsgröße einer Zielmarke im Bild	28
5.1	Genäherte Kameraparameter bei Bildakquirierung aus EXIF Daten und (Canon Europa, 2019)	46
6.1	Statistik der Laufzeiten der Näherungswertverbesserung ä.O.	51

6.2	Näherungswerte der inneren Orientierung, bereits durch Ausgleich erhalten	53
6.3	Geschätzte i. O. aus Bündelblockausgleich und deren Genauigkeiten	54
6.4	Fünf größten Verbesserungen des Endergebnisses des Bündelblockausgleichs . .	55
6.5	Genauigkeiten der Neupunkte aus Bündelblockausgleich	57

Literatur

- Agarwal, S. & Mierle, K. (2019). *Ceres Solver: Tutorial & Reference*. Google Inc.
- Albertz, J. & Wiggengagen, M. (2009). *Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung : = Guide for photogrammetry and remote sensing* (5., völlig neu bearb. und erw. Aufl.). Heidelberg: Wichmann.
- Bradski, G. (2000). The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*.
- Canny, J. (1979). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, November 1986, Vol.PAMI-8(6), pp.679-698*.
- Canon Europa. (2019). Handbuch Canon EOS 50D. Abgerufen am 17.09.2019. Verfügbar 17. September 2019 unter http://gdlp01.c-wss.com/gds/1/0300016561/01/EOS_50D_Instruction_Manual_DE.pdf
- Ekici, Z., Rüegg, C., Wilfinger, N., Wagner, O. K. & Weigl, J. (2011). Selection of tunnelling methods for the New Semmering Base Tunnel / Auswahl der Vortriebsmethode beim Semmering-Basistunnel neu. *Geomechanics and Tunnelling, 4(5), 544–552*. doi:10.1002/geot.201100037
- Fischler, M. & Bolles, R. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM, 01 June 1981, Vol.24(6), pp.381-395*.
- Fitzgibbon, A. & Fisher, R. B. (1995). A Buyer's Guide to Conic Fitting. In *In British Machine Vision Conference* (S. 513–522).
- Förstner, W. & Wrobel, B. (2016). *Photogrammetric computer vision : statistics, geometry, orientation and reconstruction*. Cham: Springer International Publishing.
- Gobiet, G. & Wagner, O. K. [Oliver K.]. (2013). The New Semmering Base Tunnel project / Das Projekt Semmering-Basistunnel neu. *Geomechanics and Tunnelling, 6(5), 551–558*. doi:10.1002/geot.201300041
- Göcke Austria. (2018). Tunnelvermessung. <https://goecke.de/Produkte/Tunnelvermessung>. Abgerufen am 17.09.2019.
- Jansa, J. (2013). Vorlesungsskript zur Vorlesung Digitale Bildverarbeitung. TU Wien - Forschungsbereich Photogrammetrie.
- Karel, W. (2018). OrientAL Manual: Handbuch der photogrammetrischen Software OrientAL. TU Wien - Forschungsbereich Photogrammetrie.
- Karel, W., Doneus, M., Verhoeven, G., Briese, C., Ressel, C. & Pfeifer, N. (2013). Oriental - Automatic geo-referencing and ortho-rectification of archeological aerial photographs. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.

- poster presentation: International Symposium of CIPA, Strasbourg, France; 2013-09-02 – 2013-09-06. doi:10.5194/isprsannals-II-5-W1-175-2013
- Ke, T. & Roumeliotis, S. I. (2017). An Efficient Algebraic Solution to the Perspective-Three-Point Problem. In *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- Kraus, K. (1996). *Photogrammetrie, Bd.2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. Dümmlers. Verfügbar unter <https://www.amazon.com/Photogrammetrie-Bd-2-Verfeinerte-Methoden-Anwendungen/dp/3427786536?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=3427786536>
- Kraus, K. (2004). *Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Lepetit, V., Moreno-Noguer, F. & Fua, P. (2009). EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem. *International Journal of Computer Vision, Feb 2009, Vol.81(2), pp.155-166*.
- Luhmann, T. (2018). *Nahbereichsphotogrammetrie : Grundlagen – Methoden – Beispiele (4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage)*. Berlin Offenbach: Wichmann.
- OGG. (2014). *Geotechnical Monitoring in Conventional Tunnelling*. AUSTRIAN SOCIETY FOR GEOMECHANICS.
- OpenCV. (2019). openCV Tutorials. Abgerufen am 22.10.2019. Verfügbar 22. Oktober 2019 unter <https://docs.opencv.org/3.4.0>
- Otepka, J. (2004). *Precision target mensuration in vision metrology*. Verfügbar unter <https://resolver.obvsg.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:1-11493>
- Satoshi Suzuki, K. A. (1985). Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 30(1)*, 32–46. doi:[https://doi.org/10.1016/0734-189X\(85\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90016-7)
- Wagner, O. K. [Oliver Kai], Haas, D., Druckfeuchter, H. & Schachinger, T. (2015). The challenges of contract SBT1.1 “Tunnel Gloggnitz/ Die Herausforderungen des Bauloses SBT1.1 Tunnel Gloggnitz. *Geomechanics and Tunnelling, 8(6)*, 554–567. doi:10.1002/geot.201500038
- Weng, J., Cohen, P. & Herniou, M. (1992). Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(10)*, 965–980. doi:10.1109/34.159901
- Wulf Schubert, E. A. B., Albert Steindorfer. (2004). Displacement Monitoring in Tunnels - an Overview. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.41(3)*, 538–539.