



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 642

Danilo Schneider

**Geometrische und stochastische Modelle
für die integrierte Auswertung
terrestrischer Laserscannerdaten
und photogrammetrischer Bilddaten**

München 2009

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5054-9



Geometrische und stochastische Modelle
für die integrierte Auswertung
terrestrischer Laserscannerdaten
und photogrammetrischer Bilddaten

An der Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
der Technischen Universität Dresden
vorgelegte Dissertation zur Erlangung
des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. Danilo Schneider

München 2009

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283/- 1100

e-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Erklärung des Promovenden:

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema
*Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer
Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten* wird hiermit bestätigt.

Dresden, am 13.11.2008

Danilo Schneider

Referent: Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Möser

Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann,
Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven

Tag der Einreichung: 21.08.2008

Tag der Verteidigung: 13.11.2008

© 2009 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5054-9

Kurzfassung

Terrestrische Laserscanner finden seit einigen Jahren immer stärkere Anwendung in der Praxis und ersetzen bzw. ergänzen bisherige Messverfahren, oder es werden neue Anwendungsgebiete erschlossen. Werden die Daten eines terrestrischen Laserscanners mit photogrammetrischen Bilddaten kombiniert, ergeben sich viel versprechende Möglichkeiten, weil die Eigenschaften beider Datentypen als weitestgehend komplementär angesehen werden können: Terrestrische Laserscanner erzeugen schnell und zuverlässig dreidimensionale Repräsentationen von Objektoberflächen von einem einzigen Aufnahmestandpunkt aus, während sich zweidimensionale photogrammetrische Bilddaten durch eine sehr gute visuelle Qualität mit hohem Interpretationsgehalt und hoher lateraler Genauigkeit auszeichnen. Infolgedessen existieren bereits zahlreiche Ansätze, sowohl software- als auch hardwareseitig, in denen diese Kombination realisiert wird. Allerdings haben die Bildinformationen bisher meist nur ergänzenden Charakter, beispielsweise bei der Kolorierung von Punktwolken oder der Texturierung von aus Laserscannerdaten erzeugten Oberflächenmodellen. Die konsequente Nutzung der komplementären Eigenschaften beider Sensortypen bietet jedoch ein weitaus größeres Potenzial.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Berechnungsmethode – die integrierte Bündelblockausgleichung – entwickelt, bei dem die aus terrestrischen Laserscannerdaten und photogrammetrischen Bilddaten abgeleiteten Beobachtungen diskreter Objektpunkte gleichberechtigt Verwendung finden können. Diese Vorgehensweise hat mehrere Vorteile: durch die Nutzung der individuellen Eigenschaften beider Datentypen unterstützen sie sich gegenseitig bei der Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten, wodurch eine höhere Genauigkeit erreicht werden kann. Alle am Ausgleichungsprozess beteiligten Daten werden optimal zueinander referenziert und die verwendeten Aufnahmeggeräte können simultan kalibriert werden.

Wegen des (sphärischen) Gesichtsfeldes der meisten terrestrischen Laserscanner von 360° in horizontaler und bis zu 180° in vertikaler Richtung bietet sich die Kombination mit Rotationszeilen-Panoramakameras oder Kameras mit Fisheye-Objektiv an, weil diese im Vergleich zu zentralperspektiven Kameras deutlich größere Winkelbereiche in einer Aufnahme abbilden können. Grundlage für die gemeinsame Auswertung terrestrischer Laserscanner- und photogrammetrischer Bilddaten ist die strenge geometrische Modellierung der Aufnahmeggeräte. Deshalb wurde für terrestrische Laserscanner und verschiedene Kameratypen ein geometrisches Modell, bestehend aus einem Grundmodell und Zusatzparametern zur Kompensation von Restsystematiken, entwickelt und verifiziert. Insbesondere bei der Entwicklung des geometrischen Modells für Laserscanner wurden verschiedene in der Literatur beschriebene Ansätze berücksichtigt. Dabei wurde auch auf von Theodoliten und Tachymetern bekannte Korrekturmodelle zurückgegriffen.

Besondere Bedeutung innerhalb der gemeinsamen Auswertung hat die Festlegung des stochastischen Modells. Weil verschiedene Typen von Beobachtungen mit unterschiedlichen zugrunde liegenden geometrischen Modellen und unterschiedlichen stochastischen Eigenschaften gemeinsam ausgeglichen werden, muss den Daten ein entsprechendes Gewicht zugeordnet werden. Bei ungünstiger Gewichtung der Beobachtungen können die Ausgleichungsergebnisse negativ beeinflusst werden. Deshalb wurde die integrierte Bündelblockausgleichung um das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung erweitert, mit dem optimale Beobachtungsgewichte automatisch bestimmt werden können. Erst dadurch wird es möglich, das Potenzial der Kombination terrestrischer Laserscanner- und photogrammetrischer Bilddaten vollständig auszuschöpfen.

Zur Berechnung der integrierten Bündelblockausgleichung wurde eine Software entwickelt, mit der vielfältige Varianten der algorithmischen Kombination der Datentypen realisiert werden können. Es wurden zahlreiche Laserscannerdaten, Panoramabilddaten, Fisheye-Bilddaten und zentralperspektive Bilddaten in mehreren Testumgebungen aufgenommen und unter Anwendung der entwickelten Software prozessiert. Dabei wurden verschiedene Berechnungsvarianten detailliert analysiert und damit die Vorteile und Einschränkungen der vorgestellten Methode demonstriert. Ein Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Geologie veranschaulicht das Potenzial des Algorithmus in der Praxis.

Abstract

The use of terrestrial laser scanning has grown in popularity in recent years, and replaces and complements previous measuring methods, as well as opening new fields of application. If data from terrestrial laser scanners are combined with photogrammetric image data, this yields promising possibilities, as the properties of both types of data can be considered mainly complementary: terrestrial laser scanners produce fast and reliable three-dimensional representations of object surfaces from only one position, while two-dimensional photogrammetric image data are characterised by a high visual quality, ease of interpretation, and high lateral accuracy. Consequently there are numerous approaches existing, both hardware- and software-based, where this combination is realised. However, in most approaches, the image data are only used to add additional characteristics, such as colouring point clouds or texturing object surfaces generated from laser scanner data. A thorough exploitation of the complementary characteristics of both types of sensors provides much more potential.

For this reason a calculation method – the integrated bundle adjustment – was developed within this thesis, where the observations of discrete object points derived from terrestrial laser scanner data and photogrammetric image data are utilised equally. This approach has several advantages: using the individual characteristics of both types of data they mutually strengthen each other in terms of 3D object coordinate determination, so that a higher accuracy can be achieved; all involved data sets are optimally co-registered; and each instrument is simultaneously calibrated.

Due to the (spherical) field of view of most terrestrial laser scanners of 360° in the horizontal direction and up to 180° in the vertical direction, the integration with rotating line panoramic cameras or cameras with fisheye lenses is very appropriate, as they have a wider field of view compared to central perspective cameras. The basis for the combined processing of terrestrial laser scanner and photogrammetric image data is the strict geometric modelling of the recording instruments. Therefore geometric models, consisting of a basic model and additional parameters for the compensation of systematic errors, was developed and verified for terrestrial laser scanners and different types of cameras. Regarding the geometric laser scanner model, different approaches described in the literature were considered, as well as applying correction models known from theodolites and total stations.

A particular consideration within the combined processing is the definition of the stochastic model. Since different types of observations with different underlying geometric models and different stochastic properties have to be adjusted simultaneously, adequate weights have to be assigned to the measurements. An unfavourable weighting can have a negative influence on the adjustment results. Therefore a variance component estimation procedure was implemented in the integrated bundle adjustment, which allows for an automatic determination of optimal observation weights. Hence, it becomes possible to exploit the potential of the combination of terrestrial laser scanner and photogrammetric image data completely.

For the calculation of the integrated bundle adjustment, software was developed allowing various algorithmic configurations of the different data types to be applied. Numerous laser scanner, panoramic image, fisheye image and central perspective image data were recorded in different test fields and processed using the developed software. Several calculation alternatives were analysed, demonstrating the advantages and limitations of the presented method. An application example from the field of geology illustrates the potential of the algorithm in practice.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Motivation	13
1.2	Vergleich terrestrischer Laserscanner- und photogrammetrischer Bilddaten	14
1.3	Gemeinsame Nutzung von Laserscanner- und Bilddaten	15
1.4	Potenzial der integrierten Bündelblockausgleichung	17
1.5	Zielsetzung	18
1.6	Gliederung der Arbeit	19
2	Grundlagen	21
2.1	Mathematische Grundlagen	21
2.1.1	Geometrie	21
2.1.2	Ausgleichsrechnung	23
2.1.3	Statistik	27
2.2	Photogrammetrische Grundlagen	31
2.2.1	Geometrisches Modell	31
2.2.2	Räumlicher Rückwärts- und Vorwärtsschnitt	32
2.2.3	Bündelblockausgleichung	33
3	Aufnahmegeräte	35
3.1	Zentralperspektive Kamera	35
3.1.1	Entwicklung	35
3.1.2	Digitalkamera	36
3.1.3	Anwendungen in der Photogrammetrie	36
3.2	Panoramakamera	36
3.2.1	Definition und Entwicklung	36
3.2.2	Aufnahmeprinzipien	37
3.2.3	Panoramakamera KST EYESCAN M3D metric	39
3.2.4	Anwendungen in der Photogrammetrie	41
3.3	Fisheye-Objektiv	48
3.3.1	Einteilung von Fisheye-Objektiven	49
3.3.2	Anwendungen in der Photogrammetrie	49

3.4	Weitere Möglichkeiten der Panoramabilderzeugung	51
3.4.1	Panorama-Stitching	51
3.4.2	Spiegel-Panorama	52
3.4.3	Rotationszeilenkamera mit Kegelgeometrie	52
3.5	Terrestrischer Laserscanner	53
3.5.1	Definition und Prinzip	53
3.5.2	Einteilung von Laserscannern	55
3.5.3	Terrestrischer Laserscanner Riegl LMS-Z420i	59
3.5.4	Auswertemethoden und Anwendungen	60
3.6	Kombinationen der Aufnahmegeräte	62
3.6.1	Panoramakamera und Fisheye-Objektiv	62
3.6.2	Laserscanner und Kamera	63
3.6.3	Laserscanner und Panoramakamera	64
3.7	Fazit	65
4	Geometrische Modelle	66
4.1	Zentralperspektive Kamera	66
4.1.1	Kollinearitätsgleichungen	66
4.1.2	Physikalische Realisierung	68
4.1.3	Zusatzparameter	68
4.2	Panoramakamera	69
4.2.1	Koordinatensysteme	69
4.2.2	Innere und Äußere Orientierung	71
4.2.3	Abbildungsgleichungen	72
4.2.4	Zusatzparameter	75
4.3	Fisheye-Abbildung	82
4.3.1	Arten der Fisheye-Abbildung	82
4.3.2	Modellgleichungen	83
4.3.3	Zusatzparameter	85
4.4	Vollsphärisches Panorama	85
4.4.1	Modellierung mittels Kugelkoordinaten	86
4.4.2	Modellierung mittels Panorama-Fisheye-Kombination	87
4.4.3	Zusatzparameter	89
4.5	Terrestrischer Laserscanner	89
4.5.1	Modellgleichungen	89
4.5.2	Zusatzparameter der Distanz	91
4.5.3	Zusatzparameter der Horizontal- und Vertikalwinkelmessung	96
4.5.4	Andere Ansätze der Modellierung von Instrumentenfehlern	99
4.6	Fazit	101

5	Verifikation und Anwendung der geometrischen Modelle	103
5.1	Panoramakamera	103
5.1.1	Räumlicher Rückwärts- und Vorwärtsschnitt	103
5.1.2	Bündelblockausgleichung	109
5.1.3	Weitere Anwendungen des geometrischen Modells	111
5.2	Fisheye-Abbildung	114
5.2.1	Kalibrierraum	114
5.2.2	Räumlicher Rückwärtsschnitt	115
5.2.3	Bündelblockausgleichung	118
5.2.4	Weitere Anwendungen der geometrischen Fisheye-Modelle	120
5.3	Vollsphärisches Panorama	121
5.3.1	Räumlicher Rückwärtsschnitt	121
5.3.2	Weitere Anwendungen des geometrischen Modells	122
5.4	Terrestrischer Laserscanner	123
5.4.1	Kalibrierräume	123
5.4.2	Aufnahme	123
5.4.3	Berechnung und Ergebnisse	125
5.4.4	Bewertung der Ergebnisse	130
5.5	Fazit	134
6	Integrierte Bündelblockausgleichung	136
6.1	Beobachtungen	136
6.2	Unbekannte Parameter	137
6.2.1	Innere Orientierung und Zusatzparameter	138
6.2.2	Äußere Orientierung	139
6.2.3	Objektpunktkoordinaten	139
6.2.4	Anzahl der unbekannten Parameter	139
6.3	Verbesserungsgleichungen	140
6.3.1	Ursprüngliche Verbesserungsgleichungen	140
6.3.2	Linearisierte Verbesserungsgleichungen	141
6.4	Struktur der Koeffizientenmatrix	142
6.5	Datumsfestlegung	144
6.5.1	Passpunkte	144
6.5.2	Freie Netzausgleichung	145
6.6	Zusätzliche Bedingungsgleichungen	145
6.6.1	Bedingungsgleichungen für die freie Netzausgleichung	146
6.6.2	Bedingungsgleichungen bei Nutzung von Quaternionen	146
6.7	Fazit	147

7	Stochastisches Modell für die integrierte Bündelblockausgleichung	148
7.1	Stochastische Informationen	148
7.1.1	Kovarianzmatrix der ursprünglichen Beobachtungen	149
7.1.2	Kofaktormatrix der ursprünglichen Beobachtungen und Gewichtsmatrix	150
7.1.3	Kofaktormatrix und Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten	150
7.1.4	Kofaktormatrix und Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Beobachtungen	151
7.2	Festlegung von Beobachtungsgewichten	151
7.2.1	Zentralperspektive Bildkoordinaten	152
7.2.2	Fisheye-Bildkoordinaten	153
7.2.3	Panoramabildkoordinaten	153
7.2.4	Distanzmessung terrestrischer Laserscanner	153
7.2.5	Winkelmessung terrestrischer Laserscanner	155
7.3	Varianzkomponentenschätzung	156
7.3.1	Modell der Varianzkomponentenschätzung	158
7.3.2	Berechnungsschema	160
7.3.3	Alternative Schätzung für die ersten Iterationen	161
7.4	Fazit	161
8	Verifikation der integrierten Bündelblockausgleichung	163
8.1	Integration terrestrischer Laserscannerdaten und Panoramabilddaten	163
8.1.1	Datengrundlage	163
8.1.2	Aufnahmekonfigurationen und Ergebnisse	164
8.1.3	Kalibrierung der Aufnahmeggeräte	169
8.1.4	Äußere Genauigkeit	171
8.1.5	Vergleich unterschiedlicher stochastischer Modelle	172
8.1.6	Anwendungsbeispiel aus der Geologie	176
8.2	Integration terrestrischer Laserscannerdaten und Fisheye-Bilddaten	181
8.2.1	Datengrundlage	181
8.2.2	Aufnahmekonfigurationen und Ergebnisse	182
8.2.3	Kalibrierung der Aufnahmeggeräte	186
8.2.4	Äußere Genauigkeit	187
8.2.5	Vergleich unterschiedlicher stochastischer Modelle	188
8.3	Fazit	190
9	Zusammenfassung	192

Literaturverzeichnis	196
Abkürzungen	207
Formelzeichen	208
Tabellenverzeichnis	210
Abbildungsverzeichnis	212

Anhang

A.1 Software-Implementation: Integrierte Bündelblockausgleichung	A - 3
A.2 Software-Implementation: Varianzkomponentenschätzung	A - 18
A.3 Software-Implementation: Datenstrukturen und Parameter	A - 21
A.4 Software-Implementation: Benutzerschnittstellen	A - 28
A.5 Flussdiagramme	A - 35
A.6 Kombination von Laserscanner- und 360°-Panoramabildaten	A - 37

1 Einleitung

1.1 Motivation

In zahlreichen Anwendungsgebieten ist die dreidimensionale Aufnahme und Dokumentation von Geometrie, Form und Lage realer Objekte notwendig. Zu diesen Anwendungsgebieten gehören Architektur, Archäologie, Denkmalpflege, Anlagenbau, Bestandsdokumentation, Geologie, Virtual Reality, Facility Management. Diese Aufzählung kann beliebig erweitert werden. Die Objektrekonstruktion kann u. a. durch photogrammetrische Methoden aus Bildern oder Laserscannerdaten erfolgen.

Während lange Zeit ausschließlich analoge Kameras mit zentralperspektiver Aufnahmegeometrie in einer Zwei- oder Mehrbildanordnung zur Objekterfassung eingesetzt wurden, gibt es heutzutage für diesen Zweck sehr viele unterschiedliche Möglichkeiten, die je nach Zielstellung vorteilhaft sein können. Die Entwicklung der letzten Jahrzehnte ist vor allem durch die Verwendung digitaler Sensoren anstelle von analogem Film, durch die Nutzung spezieller Aufnahmegeometrien (z.B. Panoramakameras) und durch die immer stärkere Verbreitung terrestrischer Laserscanner geprägt. Gleichzeitig bieten sich durch immer leistungsfähigere Computer viele Möglichkeiten der Automatisierung. Heutzutage sind die verschiedensten Messsysteme verfügbar, die unterschiedliche Forderungen an Messvolumen, Genauigkeit, Geschwindigkeit und Kosten erfüllen. Außerdem werden Messsysteme oft kombiniert, um die Vorteile der einzelnen Geräte zu nutzen und Defizite zu kompensieren. Insbesondere die Kombination von Bild- und Laserscannerdaten ist angesichts ihrer komplementären Eigenschaften (Kapitel 1.2) nahe liegend und wird bereits hardware- und softwareseitig in kommerziellen Systemen realisiert. Allerdings stehen für die integrierte Auswertung von Laserscannerdaten und digitalen Bilddaten bisher nur Lösungen für einzelne Teilaufgaben zur Verfügung. Die sich aus der Komplementarität der Daten ergebenden Synergieeffekte werden meist nicht vollständig genutzt:

- Einige Hersteller terrestrischer Laserscanner erlauben die Installation einer digitalen Kamera am Gehäuse des Laserscanners. Für die geometrische Referenzierung der Daten von Laserscanner und Kamera werden meist eigene Lösungen angeboten.
- Es existieren Softwarepakete zur Auswertung von Laserscannerpunktwolken, welche unter anderem die Kolorierung der Laserscannerpunktwolken oder die Texturierung von Punktvermaschungen oder 3D-Modellen erlauben. Außerdem wird die Generierung von Orthophotos unterstützt oder die Bilddaten werden zur Unterstützung der Interpretation komplexer Punktwolken herangezogen. Detaillierte Beispiele für die gemeinsame Nutzung von Laserscanner- und Bilddaten werden in Kapitel 1.3 vorgestellt.

Alle Anwendungen, die auf der Kombination von Laserscanner- und Bilddaten beruhen, setzen eine strenge Modellierung und Kalibrierung sowie eine gegenseitige Referenzierung der beteiligten Sensoren voraus. Beide Systeme, Laserscanner und Kamera, werden allerdings bisher meistens entweder unabhängig voneinander orientiert und kalibriert, oder die Kameradaten werden einseitig auf die Laserscannerdaten referenziert. Eine gleichberechtigte kombinierte Auswertung terrestrischer Laserscanner und photogrammetrischer Bilddaten bietet jedoch ein weitaus größeres Potenzial. Bei konsequenter Nutzung der komplementären Eigenschaften der beiden Sensortypen im Rahmen einer gemeinsamen Ausgleichung können sich Laserscanner und Kamera bei der Bestimmung von Objektgeometrien und bei der Kalibrierung gegenseitig stützen.

Werden die Messdaten der an der Auswertung beteiligten Messgeräte mit einem ihrer Genauigkeit entsprechenden Gewicht in einer integrierten Bündelblockausgleichung berücksichtigt, ergeben sich vielfältige Vorteile (vgl. Kapitel 1.4). Zu nennen sind hier eine optimale Registrierung der Daten zueinander, die Möglichkeit der Selbstkalibrierung für alle beteiligten Messgeräte und dadurch eine Verbesserung der erreichbaren Genauigkeiten (z.B. Genauigkeit diskreter Objektpunkte) sowie die Erhöhung der Zuverlässigkeit der Auswertung, weil sich unterschiedliche Datentypen gegenseitig optimal kontrollieren und eventuell vorhandene Ausreißer in den Daten einfacher aufgedeckt werden können. Die integrierte Bündelblockausgleichung kann als Basis für unterschiedliche Anwendungen, die auf der Kombination von Laserscanner- und Bilddaten

beruhen, verwendet werden. Dies gilt vor allem dann, wenn für die jeweilige Anwendung hohe Genauigkeiten erforderlich sind.

Sollen terrestrische Laserscannerdaten und photogrammetrische Bilddaten in einer gemeinsamen Ausglei-
chung verarbeitet und das Potenzial der Daten möglichst vollständig ausgenutzt werden, ist für alle Messgerä-
te in gleicher Weise ein entsprechendes geometrisches Modell zu verwenden und gegebenenfalls um Zusatz-
parameter zur Kompensation von systematischen Fehlereinflüssen zu erweitern. Die geometrischen Modelle
werden im Zuge der integrierten Ausglei-
chung zu einem Gesamtmodell zusammengefasst. Weil terrestrische
Laserscanner oft ein sphärisches Gesichtsfeld abdecken, bietet sich die Kombination mit Panoramakameras
mit rotierendem Zeilensensor oder die Kombination mit einer Kamera mit Fisheye-Objektiv an. Weil deren
Geometrien sich grundlegend von der zentralperspektiven Geometrie unterscheiden, ist die Entwicklung spe-
ziell angepasster geometrischer Modelle notwendig.

Besondere Bedeutung kommt der Festlegung des stochastischen Modells innerhalb der gemeinsamen Aus-
gleichung zu. Weil Messdaten unterschiedlichen Ursprungs (Distanz, Winkel, Bildkoordinaten) mit jeweils
individueller Genauigkeit und Charakteristik gleichzeitig verwendet werden, hängt das Ergebnis der Auswer-
tung davon ab, mit welchem Gewicht die einzelnen Werte an der Berechnung beteiligt werden. Deshalb muss
neben dem geometrischen Modell auch ein stochastisches Modell aufgestellt werden.

1.2 Vergleich terrestrischer Laserscanner- und photogrammetrischer Bilddaten

Die Eigenschaften von Laserscannerdaten (3D-Punktwolken) und Kameradaten (Bilder) sind weitgehend
komplementär [Jansa et. al., 2004; Kern, 2003; Aguilera & Lahoz, 2006]. Innerhalb einer integrierten Aus-
wertung besteht die Möglichkeit, die Vorteile der Daten optimal zu nutzen. Die wichtigsten Eigenschaften
sind in Tabelle 1.1 zusammengefasst:

Laserscannerdaten	Bilddaten
• 3D-Punktwolken von einem Standpunkt • Hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit • Automatisierbarkeit der Auswertung • Hohe geometrische Auflösung • monochromatisches Intensitätsbild meist geringerer Qualität • Eingeschränkter Interpretationsgehalt • Einfache Erfassung von Oberflächen • Diskrete Objektmerkmale (Ecken, Kanten) indirekt ableitbar • Stabiler Standpunkt notwendig (z. B. Stativ) oder direkte Bestimmung der Orientierung (GPS/INS) • Aufnahmedauer mehrere Minuten • Nur für statische Objekte geeignet • Weitestgehend unabhängig von Objektbeleuchtung	• 3D nur indirekt über stereoskopische Aufnahme und Auswertung • Sehr hohe Genauigkeit möglich (signalisierte Punkte) • Automatisierbarkeit eingeschränkt, oft Interaktion notwendig • Sehr hohe geometrische Auflösung • Farbinformationen hoher Qualität (RGB, ggf. NIR) • Sehr hoher Interpretationsgehalt • Oberflächenerfassung über automatische Stereoauswertung möglich • Diskrete Objektmerkmale direkt messbar • Hohe Flexibilität, Freihand-Aufnahme (außer Rotationszeilenkamera) • Moment-Shot-Aufnahme (außer Rotationszeilenkamera) • Aufnahme bewegter Objekte möglich (außer Rotationszeilenkamera) • Abhängig von Objektbeleuchtung (ggf. Nutzung Blitzlicht)

Tabelle 1.1: Gegenüberstellung der Eigenschaften von Laserscanner- und Bilddaten

Terrestrische Laserscanner erzeugen 3D-Punktwolken hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Diese stel-
len eine gute Grundlage für die Automatisierung der Auswertung in unterschiedlichen Anwendungen dar. Das
geometrische Auflösungspotenzial ist jedoch im Vergleich zu Bilddaten etwas geringer. Während Laserscan-
ner optimal zur genauen Erfassung von Oberflächen geeignet sind, haben Bilddaten Vorteile bei der Messung
diskreter Objektpunkte, insbesondere wenn signalisierte Punkte mit Subpixel-Operatoren gemessen werden.

Bilddaten entsprechen der gewohnten Sichtweise des Nutzers, deshalb haben diese im Gegensatz zu Laserscannerdaten eine hohe visuelle Qualität und einen damit verbundenen hohen Interpretationsgehalt. Allerdings können dreidimensionale Objektgeometrien nur indirekt über stereoskopische Aufnahme und Auswertung abgeleitet werden. Bei komplexen Objekten ist eine automatische Stereoauswertung teilweise unzuverlässig und ist von der Objekttextur abhängig. Gegebenenfalls muss künstliche Textur auf das Objekt projiziert werden. Die interaktive Stereoauswertung ist oft sehr zeitaufwendig. Je nach verwendeter Kamera zur Aufnahme der Bilddaten können die beschriebenen Eigenschaften noch weiter differenziert werden. Beispielsweise bietet eine Panoramakamera mit rotierendem Zeilensensor im Vergleich zu Kameras mit Flächensensor ein noch größeres geometrisches Auflösungspotenzial bei gleichzeitig größerem Gesichtsfeld von bis zu 360° in horizontaler Koordinatenrichtung.

Es wird deutlich, dass Laserscanner und Kamera sich in ihren jeweiligen Stärken ergänzen können, die Vorteile des einen Verfahrens sind in vielen Fällen zugleich die Nachteile des anderen Verfahrens. Daraus leitet sich die Forderung nach Auswertemethoden ab, welche die für die jeweilige Anwendung wichtigen Vorteile beider Verfahren in geeigneter Weise kombinieren [Barber et. al., 2001; Beraldin, 2004].

1.3 Gemeinsame Nutzung von Laserscanner- und Bilddaten

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten einer gemeinsamen Nutzung von Laserscanner- und Bilddaten geben und damit den Bedarf an entsprechenden Auswertekonzepten aufzeigen. Dabei wird auf die unterschiedlichen methodischen Kombinationsmöglichkeiten in der Datenauswertung eingegangen. Bei der zugrunde liegenden Literaturrecherche wurde deutlich, dass die meisten Veröffentlichungen über die gemeinsame Nutzung von Laserscanner- und Bilddaten aus den letzten fünf Jahren stammen, was die Entwicklung der letzten Jahre, hin zu einer stärkeren Verzahnung der Datentypen für unterschiedliche Anwendungen, bestätigt.

Folgende Kombinationsmöglichkeiten wurden bisher realisiert:

- Kolorierung von Laserscannerpunktwolken
- Texturierung von Oberflächen von 3D-Modellen
- Verfeinerung von 3D-Modellen durch Bilddaten
- Monoplotting
- Generieren von Orthophotos
- Unterstützung der Interpretation komplexer Punktwolken
- Unterstützung der Registrierung von Punktwolken

Eine der am häufigsten realisierten Möglichkeiten der Kombination terrestrischer Laserscanner- und photogrammetrischer Bilddaten ist die Kolorierung von Punktwolken. Dabei wird jeder Punkt der Punktwolke in das orientierte Bild projiziert und der entsprechende Farbwert zugeordnet. Für einfache Visualisierungen ist die auf diese Weise eingefärbte Punktwolke bereits das Endprodukt, in der Weiterverarbeitung lassen sich die kolorierten Punktwolken meist besser interpretieren und sind damit für eine interaktive Auswertung gut geeignet. Die Kolorierung von Punktwolken wird oft bereits durch die Steuersoftware des Laserscanners unterstützt [Riegl, 2007; Faro, 2005]. Stehen mehrere Bilder von unterschiedlichen Standpunkten für die Kolorierung einer Punktwolke zur Verfügung, stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien die Bilder zum Kolorieren ausgewählt werden (z.B. Distanz zur Punktwolke, Blickwinkel auf die durch die Punktwolke repräsentierte lokale Oberfläche) oder ob die Farbinformationen mehrerer Bilder in geeigneter Weise kombiniert werden [Abdelhafiz & Niemeier, 2006].

Visuell sehr anschauliche Ergebnisse liefert die Texturierung von 3D-Modellen, die entweder durch Triangulation von Laserscannerpunktwolken oder durch eine interaktive oder automatische Modellgenerierung erzeugt wurden. Diese Vorgehensweise findet beispielsweise in den Bereichen Architektur [Lee & Choi, 2004], Denkmalpflege [Alshawabkeh et. al., 2007; Böhler & Marbs, 2004; Bouramand & Studnicka, 2004; Ressler, 2005; Guarnieri et. al., 2006], Facility Management [Kern et. al., 2002] oder bei der Dokumentation von Tunneloberflächen [Paar et. al., 2005] Anwendung. Die Aufzählung der Einsatzmöglichkeiten texturierter 3D-Modelle lässt sich beliebig erweitern.

[Böhm et. al., 2007] geht über die bloße Texturierung von Oberflächen, insbesondere von Gebäudefassaden hinaus. Es wird eine Vorgehensweise beschrieben, bei der orientierte photogrammetrische Bilddaten genutzt werden, um aus Laserscannerdaten erzeugte 3D-Modelle zu verfeinern. Beispielsweise werden geometrische Details im Bereich von Fenstern innerhalb einer Fassade mit Hilfe photogrammetrischer Stereoauswertung rekonstruiert und in das aus terrestrischen Laserscannerdaten erzeugte 3D-Modell der Gebäude eingepasst. Dies kann zum Beispiel bei der Generierung von 3D-Stadtmodellen sinnvoll sein. Auch [Becker & Haala, 2007] nutzen die Kombination aus Laserscanner- und Bilddaten zur digitalen Rekonstruktion von Gebäudefassaden.

Weitere Möglichkeiten der Kombination gegenseitig referenzierter terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten sind das Monoplotting und die automatische Generierung von Orthophotos. Beim Monoplotting wird eine dreidimensionale Szene am Bildschirm im zweidimensionalen Bild ausgewertet, wobei die dritte Koordinate durch Interpolation aus der Punktwolke extrahiert wird [Becker et. al., 2004; Schwermann & Effkemann, 2004]. In [Abdelhafiz et. al., 2005] wird die Erstellung von „3D-Bildern“ erläutert, indem jedem Pixel im Bild dreidimensionale Koordinaten durch die Projektion der Punktwolke ins Bild und lokale Interpolation benachbarter Punkte zugeordnet werden. Weiterhin wird die automatische Erstellung von Orthophotos auf der Grundlage von Bild- und Laserscannerdaten bereits in kommerziellen Softwarepaketen realisiert [Riegl, 2007; Walter, 2005]. Dies findet unter anderem in der Bauforschung (Erstellung von Fassadenplänen), der Denkmalpflege und Archäologie Anwendung [Neubauer et. al., 2005; Neubauer, 2006].

In verschiedenen CAD-basierten Auswerteprogrammen, welche die interaktive Modellierung von Laserscannerpunktwolken erlauben, besteht die Möglichkeit, orientierte und entzerrte Bilder perspektivisch in die dreidimensionale Szene einzublenden und dem Operateur dadurch Hilfestellung bei der Interpretation der Punktwolke zu geben. Beispiele dafür sind die Programme Phidias für Microstation [Effkemann, 2003; Benning et. al., 2004] und Pointcloud für AutoCAD [Bringmann, 2007]. Vor allem im Anlagenbau zur Erfassung und 3D-Dokumentation kann dies besonders vorteilhaft sein. Beispielsweise beschreibt [Klemann, 2005] die Aufnahme und auf diese Weise durchgeführte Auswertung eines komplexen Rohrleitungs- und Maschinensystems.

In [Böhm, 2007] wird die Anwendung der Kombination von Laserscanner- und Bilddaten für die Navigation innerhalb von Räumen, beispielsweise eines autonomen Roboters, vorgestellt. Die Geometrie der Umgebung wird durch eine unmodellerte Punktwolke repräsentiert, während die Position einer Kamera innerhalb dieser Umgebung automatisch in Echtzeit bestimmt wird. Die Bestimmung der Orientierung der Kamera erfolgt hier durch räumlichen Rückwärtsschnitt mit Hilfe von homologen Merkmalspunkten, die in den Laserscannerdaten (speziell im Intensitätsbild) und im Kamerabild automatisch extrahiert und mit einem RANSAC-Algorithmus zugeordnet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass der vorgeschlagene Algorithmus auch auf Texturierungs- und Modellierungsaufgaben übertragen werden kann.

Eine wichtige Aufgabe im Auswerteprozess von mit terrestrischen Laserscannern durchgeführten Projekten ist die gegenseitige Registrierung der Punktwolken benachbarter Aufnahmestandpunkte. Diese Aufgabe sollte robust und automatisch möglichst am Messort durchgeführt werden können. Es existieren Lösungen basierend auf Verknüpfungspunkten, die in den Punktwolken automatisch identifiziert werden (z.B. Kugeln oder retro-reflektierende Zylinder) und Lösungen, welche versuchen, die gegenseitige Orientierung der Scans unmittelbar über die Geometrie und Struktur des Messobjektes mit Hilfe von ICP-Algorithmen [Besl & McKay, 1992; Chen & Medioni, 1991] herzustellen. Letzteres ist aus Sicht des Anwenders besonders vorteilhaft, weil auf die Anbringung von Verknüpfungspunkten verzichtet werden kann. Das Ergebnis ist allerdings oft abhängig von einer bekannten Näherungsorientierung und dem Vorhandensein geeigneter Objektstruktu-

ren. In mehreren Publikationen wird deshalb die Nutzung von Bilddaten, deren relative Orientierung zur jeweiligen Punktwolke bekannt ist, zur Unterstützung des automatischen Registrierprozess benachbarter Punktwolken vorgeschlagen [Tournas & Tsakiri, 2005; Al-Manasir & Fraser, 2006; Dold & Brenner, 2006; Barnea & Filin, 2007; Wendt, 2008].

Die in diesem Kapitel bisher genannten Anwendungen der Kombination zwischen Laserscanner- und Bilddaten beziehen sich auf die Verwendung von Kameras mit zentralperspektiver Aufnahmegeometrie. Weil jedoch mehrere Laserscanner ein Gesichtsfeld von horizontal bis zu 360° haben, ist die Kombination mit 360°-Panoramabilddaten, basierend auf einer zylindrischen Aufnahmegeometrie, in vielen Fällen eine sinnvolle Alternative. Neben dem größeren Gesichtsfeld bieten Panoramakameras oft eine höhere geometrische Auflösung [Luhmann & Tecklenburg, 2004]. Beispielsweise nutzen [Klette & Scheibe, 2005; Salemi et. al., 2005; Strackenbrock et. al., 2005] die Kombination der Daten von Laserscanner und Panoramakamera zur 3D-Modellierung und Texturierung historischer Bauwerke. Die Visualisierung detaillierter 3D-Modelle mit hoch aufgelöster Textur aus Panoramabildern stellt besondere Anforderungen an die Hard- und Software des zur Darstellung genutzten Computers [Scheibe et. al., 2004].

In [Reulke & Wehr, 2004] wird die Kombination einer 360°-Panoramakamera und einem terrestrischen Laserscanner mit einem GPS/INS-System für Mobile-Mapping-Anwendungen beschrieben. Weitere Anwendungen der Kombination der Daten von Laserscanner und Panoramakamera finden sich in der Forstwissenschaft oder in der Geologie. [Haala et. al., 2004] nutzt beispielsweise diese Kombination zur Analyse eines Waldbestandes, insbesondere zur Bestimmung der Baumart. Dabei werden zuerst die Panoramabilder zu den Laserscannerdaten referenziert und anschließend die Textur aus den Panoramabildern und gleichzeitig die 3D-Oberflächenstruktur der Baumstämme genutzt, um mittels Klassifikationsmethoden die Baumart aller in der 360°-Umgebung des Standpunkts erfassten Bäume zu ermitteln. [Buckley et. al., 2006; Kurz et. al., 2008] kombinieren die Daten eines terrestrischen Laserscanners mit den Bilddaten einer hyperspektralen Panoramakamera zur Untersuchung geologischer Aufschlusszonen, indem die unterschiedlichen Spektralkanäle einer Klassifikation unterzogen und die Laserscannerpunktwolke mit dem Klassifikationsergebnis koloriert wird. Die auf diese Weise eingefärbte Punktwolke stellt ein hilfreiches Analysewerkzeug in der Geologie dar, weil Geometrie und semantische Informationen gleichzeitig zur Verfügung stehen.

Die Kombination von Laserscanner- und Bilddaten in dynamischen Anwendungen (Mobile Mapping, kombinierte Luftbild- und Laserscanneraufnahme) wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die entsprechende Erweiterung der Betrachtungen und der entwickelten Software für solche Anwendungen ist jedoch grundsätzlich möglich.

1.4 Potenzial der integrierten Bündelblockausgleichung

Die Kombination terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten setzt in jedem Fall eine gegenseitige Referenzierung der Datensätze voraus (z.B. [Rönholm et. al., 2007]). Je nach geforderter Genauigkeit ist außerdem eine Selbstkalibrierung der verwendeten Aufnahmegeräte wünschenswert. In den meisten der in Kapitel 1.3 vorgestellten Anwendungen wird jedoch von kalibrierten Aufnahmegeräten ausgegangen und es werden die Bilddaten einseitig zu den Laserscannerdaten referenziert. Diese Vorgehensweise stellt in mehrfacher Hinsicht keine optimale Lösung dar, weil das sich aus der Komplementarität der Eigenschaften der beiden Datentypen ergebende Genauigkeitspotenzial nicht vollständig genutzt wird.

Eine Möglichkeit, die komplementären Eigenschaften der Daten von Laserscanner und Kamera konsequent zu nutzen, stellt die Erweiterung der aus der photogrammetrischen Praxis bekannten Bündelblockausgleichung auf die Integration von Laserscanner- und Bilddaten dar [Jansa et.al., 2004; Wendt & Heipke, 2006; Ullrich, et.al., 2003]. Daraus ergeben sich zahlreiche Vorteile:

- Optimale Ausnutzung der komplementären und individuellen Eigenschaften der Daten
- Beteiligung der Bilddaten an der Bestimmung von Objektgeometrie
- Optimale Referenzierung aller Datensätze von unterschiedlichen Standpunkten

- Automatische Gewichtung der am Ausgleichungsprozess beteiligten Daten möglich
- Selbstkalibrierung der beteiligten Aufnahmegeräte möglich
- Berücksichtigung von Aufnahmegeräten mit unterschiedlicher Aufnahmegeometrie (z.B. Panoramakamera, Kamera mit Fisheye-Objektiv)
- Höhere Genauigkeiten (Objektkoordinaten, Orientierungsparameter, Kalibrierparameter)
- Verbesserung der Zuverlässigkeit der Parameter- und Koordinatenbestimmung

In einer integrierten Bündelblockausgleichung können die verwendeten Datentypen entsprechend ihrer individuellen Eigenschaften am Ausgleichungsprozess beteiligt werden. Beispielsweise können die in einem Bild mit Subpixel-Operatoren gemessenen Bildkoordinaten diskreter Objektpunkte bezogen auf den Objektraum höhere Genauigkeiten aufweisen als die entsprechenden Winkelmessungen eines Laserscanners. Demzufolge ist es sinnvoll, die Bestimmung der Koordinaten dieser Objektpunkte nicht nur durch die Messungen des Laserscanners allein, sondern gleichzeitig durch die in mehreren Bildern gemessenen Bildkoordinaten zu bestimmen.

Wird das stochastische Modell der Beobachtungen für die integrierte Bündelblockausgleichung durch eine Varianzkomponentenschätzung ermittelt, kann das Gewicht für die unterschiedlichen Beobachtungen im Ausgleichungsprozess entsprechend ihrer individuellen Genauigkeiten automatisch bestimmt werden. Genauere Daten erhalten dann ein größeres Gewicht, wodurch die Genauigkeit des Ausgleichungsergebnisses insgesamt verbessert werden kann. Außerdem lässt sich mit diesem Verfahren ein realistischer Wert für die Genauigkeit der zugrunde liegenden Daten unter den gegebenen Messbedingungen abschätzen.

Die Kalibrierwerte der Aufnahmegeräte können nicht immer als zeitlich stabil und unter verschiedenen Messbedingungen konstant angesehen werden und sind zudem auch nicht immer a-priori bekannt, insbesondere bei der Verwendung von Amateurkameras. Steht für das verwendete Messgerät ein geometrisches Modell inklusive Zusatzparameter zur Kompensation systematischer Resteffekte zur Verfügung, kann das Messgerät im Zuge der integrierten Bündelblockausgleichung simultan kalibriert werden. Diese für Kameras übliche Vorgehensweise kann auch auf terrestrische Laserscanner übertragen werden. Durch die Berücksichtigung der Selbstkalibrierung ist eine weitere Genauigkeitssteigerung der Ausgleichungsergebnisse möglich.

Zu den Ergebnissen der integrierten Bündelblockausgleichung zählen neben den Koordinaten diskreter Objektpunkte und den Kalibrierwerten der beteiligten Messgeräte auch die Orientierungsparameter im übergeordneten Objektkoordinatensystem. Da alle Geräte gleichberechtigt in der Ausgleichung verwendet werden, können die Orientierungsparameter aller Scans und Bilder als konsistente und dadurch optimale gegenseitige Referenzierung verstanden werden.

Werden mehrere Laserscanner- und Kamerastandorte berücksichtigt, tragen neben den sphärischen Beobachtungen des Laserscanners und den im Bild gemessenen Bildkoordinaten ebenso die Strahlenschnitte, die durch die Winkelmessungen des Laserscanners, sowie die Strahlenschnitte, die durch die Bildkoordinaten in unterschiedlichen Bildern aufgespannt werden, automatisch zur Bestimmung der dreidimensionalen Koordinaten der Objektpunkte bei. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Datentypen ist eine Steigerung der Zuverlässigkeit zu erzielen. Distanzmessungen, Winkelmessungen und Bildkoordinatenmessungen von unterschiedlichen Standpunkten sind an der Berechnung aller unbekannten Parameter beteiligt. Dadurch ist eine optimale gegenseitige Kontrolle der Beobachtungen gegeben und eventuelle Ausreißer können effizient detektiert und eliminiert werden.

1.5 Zielsetzung

Um Aufnahmegeräte für messtechnische Zwecke einsetzen zu können, ist eine strenge Beschreibung der Aufnahmegeometrie notwendig. Erst damit lässt sich ein räumlicher Bezug zum Messobjekt und zwischen den Aufnahmestandpunkten und -geräten herstellen. Deshalb ist es ein wichtiges Ziel dieser Arbeit, geometrische Modelle für verschiedene Aufnahmegeräte zu entwickeln und zu verifizieren. Während die Geometrie

zentralperspektiver Kameras als bekannt vorausgesetzt wird, soll für terrestrische Laserscanner, Rotationszeilen-Panoramakameras und Kameras mit Fisheye-Objektiv ein geometrisches Modell hergeleitet werden. Dabei wird teilweise auf bekannte Parametrisierungen aus der Literatur zurückgegriffen und teilweise werden weitere Parameter nach gründlicher Analyse der Restsystematiken hinzugefügt, um das Genauigkeitspotenzial der einzelnen Geräte möglichst vollständig auszunutzen.

Anschließend soll ein Konzept für die integrierte Bündelblockausgleichung erstellt und durch eine zu entwickelnde Software verifiziert werden, in welche die hergeleiteten geometrischen Modelle implementiert werden und die eine konsequente Kombination terrestrischer Laserscanner- und photogrammetrischer Bilddaten erlaubt. In unterschiedlichen Testumgebungen sollen zahlreiche Punktwolken und Bilder aufgenommen und die daraus extrahierten Messwerte mit der entwickelten Software ausgiebig getestet werden. Dabei sind mehrere für die Praxis sinnvolle Datenkombination, beispielsweise Laserscannerdaten einer 360°-Umgebung und Panoramabilddaten sowie Laserscannerdaten eines Raumes und mehrere Fisheye-Bilder, gleichzeitig auszuwerten, um die Vorteile der Integration der Daten in einer gemeinsamen Ausgleichung zu analysieren.

Als Messwerte können die in zentralperspektiven Bildern, in Panoramen oder Fisheye-Bildern gemessenen Bildkoordinaten, sowie die aus den Punktwolken terrestrischer Laserscanner extrahierten sphärischen Koordinaten diskreter Objektpunkte in die gemeinsame Ausgleichung eingehen. Die Bildkoordinaten werden dafür entweder interaktiv oder automatisch mit entsprechenden Bildmessoperatoren oder Matching-Methoden bestimmt. Die Laserscannermessungen diskreter Objektpunkte können entweder aus der Punktwolke bzw. einem daraus abgeleiteten Intensitätsbild interaktiv abgegriffen oder bei geeigneter Objektpunktsignalisierung bzw. bei geeigneter Oberflächenstruktur automatisch aus der Punktwolke oder den Intensitätsbildern extrahiert werden. Die für die Ausgleichung notwendigen Näherungswerte für die Orientierung der Aufnahmen und die Objektpunkte sollen vorausgesetzt werden können.

Das Konzept der integrierten Bündelblockausgleichung ist möglichst so zu verallgemeinern, dass es nicht nur für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit gültig ist, sondern darüber hinaus auch für verschiedene Anwendungen geeignet ist und in Form einer Software-Programmbibliothek in andere Anwendungsprogramme eingebettet werden kann. Das Konzept soll unter anderem

- die Verwaltung unterschiedlicher geometrischer Modelle und Parametrisierungen,
- die automatische Ableitung des stochastischen Modells für die gemeinsame Auswertung durch Varianzkomponentenschätzung,
- die Berechnung einer freien Netzausgleichung ohne geometrischen Zwang,
- das automatische Erkennen und Entfernen grober Fehler im Datenmaterial,
- die Selbstkalibrierung aller beteiligter Aufnahmegeräte und
- den Export aller Berechnungsergebnisse in protokollarischer und graphischer Form

berücksichtigen. Außerdem soll der Nutzer auf einfache Weise zwischen unterschiedlichen Berechnungsvarianten, wie beispielsweise räumlichem Rückwärtsschnitt, räumlichem Vorwärtsschnitt und Bündelblockausgleichung, wählen können.

1.6 Gliederung der Arbeit

In *Kapitel 2* werden zunächst alle mathematischen und photogrammetrischen Grundlagen zur Verfügung gestellt, auf die in den folgenden Kapiteln zurückgegriffen wird.

Alle Aufnahmegeräte, für die ein geometrisches Modell hergeleitet wird und deren Daten in der integrierten Bündelblockausgleichung verarbeitet werden, sind in *Kapitel 3* ausführlich beschrieben. Dabei wird nicht nur auf die Geräte selbst eingegangen, sondern auch auf mögliche Anwendungen.

In *Kapitel 4* werden ausgehend von dem bekannten Modell zentralperspektiver Kameras die geometrischen Modelle für terrestrische Laserscanner, zylindrische und vollsphärische Panoramakameras und Kameras mit Fisheye-Objektiv hergeleitet. Basierend auf den physikalischen und geometrischen Eigenschaften der Geräte werden mögliche Abweichungen vom Grundmodell aufgezeigt und entsprechende Zusatzparameter abgeleitet.

Die entwickelten Modelle werden in *Kapitel 5* zunächst separat untersucht, die Wirksamkeit der abgeleiteten Zusatzparameter verifiziert und verschiedene Anwendungen der jeweiligen geometrischen Modelle beschrieben.

Kapitel 6 erläutert detailliert den Algorithmus der integrierten Bündelblockausgleichung. Da bei der integrierten Bündelblockausgleichung Messdaten verschiedenen Ursprungs und unterschiedlicher Genauigkeit gemeinsam verwendet werden, kommt der Festlegung des stochastischen Modells eine besondere Bedeutung zu. Deshalb beschäftigt sich *Kapitel 7* mit dieser Thematik.

Kapitel 8 stellt die Aufnahme verschiedener Datensätze und deren Prozessierung innerhalb einer integrierten Bündelblockausgleichung vor und analysiert und bewertet die erzielten Ergebnisse. Dabei wird auf verschiedene Aspekte eingegangen, beispielsweise auf die Genauigkeit der berechneten Objektkoordinaten und die Kalibrierwerte der Aufnahmeggeräte. Gleichzeitig werden die Vorteile der Varianzkomponentenschätzung zur automatischen Gewichtung aufgezeigt.

Kapitel 9 fasst die gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf das Potenzial der gemeinsamen Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten zusammen und gibt einen Ausblick über Möglichkeiten der Erweiterung des vorgestellten Ansatzes, z.B. um die Verwendung von Linien als Beobachtungen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen beschrieben, die in den nachfolgenden Kapiteln Verwendung finden. Dabei werden mathematische und geometrische Grundlagen bereitgestellt, die beispielsweise für Kapitel 4 (Geometrische Modelle) vorausgesetzt werden, genauso wie Grundlagen der Ausgleichsrechnung und Statistik, die in Kapitel 6 (Bündelblockausgleichung) und Kapitel 7 (Stochastisches Modell) aufgegriffen und dort weiter spezialisiert werden. Ein kurzer Überblick über photogrammetrische Begriffe und Methoden rundet dieses Kapitel ab.

2.1 Mathematische Grundlagen

2.1.1 Geometrie

2.1.1.1 Koordinatensysteme

Basis für die Herleitung geometrischer Modelle für Aufnahmegeräte von Messdaten ist die Definition geeigneter dreidimensionaler Koordinatensysteme, um Punkten im Raum reelle Zahlen (Koordinaten) eindeutig zuordnen zu können und umgekehrt. Das sind entweder rechtwinklige, zylindrische oder sphärische Koordinatensysteme. Weitere Koordinatendefinitionen, beispielsweise schiefwinklige oder homogene Koordinaten, werden hier nicht weiter betrachtet. Während Punkte im dreidimensionalen Raum jeweils durch drei Koordinaten unmittelbar beschreibbar sind, können Kurven, Flächen oder Körper beispielsweise durch Funktionen der Koordinaten ausgedrückt werden.

- Ein *rechtwinkliges bzw. kartesisches Koordinatensystem* wird durch einen Nullpunkt (Ursprung) definiert, durch den drei paarweise senkrecht aufeinander stehende Geraden, die Koordinatenachsen, verlaufen. Die Koordinatenachsen werden als x -, y - und z -Achse bezeichnet und spannen drei Koordinatenebenen auf. Zur Orientierung des Systems wird auf jeder Koordinatenachse ein Einheitsvektor definiert. Die Koordinaten eines Punktes in diesem System entsprechen dem Abstand zwischen Ursprung und jeweiligem Lotfußpunkt des Objektpunktes auf den drei Koordinatenachsen.
- Das *zylindrische Koordinatensystem* eignet sich zur Beschreibung von geometrischen Sachverhalten auf der Oberfläche eines Zylinders. Ausgehend von einem rechtwinkligen Koordinatensystem kann ein beliebiger Punkt im Raum durch den senkrechten Abstand von der z -Achse (Radius r), durch den Winkel zwischen der positiven x -Achse und der Projektion des Punktes auf die x - y -Ebene (Horizontalwinkel) und durch den senkrechten Abstand des Punktes von der x - y -Ebene (Höhe z) beschrieben werden. Jedem Koordinatentripel entspricht genau ein Raumpunkt, umgekehrt entspricht ein Raumpunkt nur dann einem einzigen Koordinatentripel, wenn der Punkt nicht auf der z -Achse liegt.
- Bei einem *sphärischen Koordinatensystem* werden Raumpunkte durch Kugel- bzw. Polarkoordinaten beschrieben. Die Kugelkoordinaten sind der Abstand vom Ursprung (Radius r), der Winkel den der Punkt mit der x - y -Ebene einschließt (Vertikalwinkel) und der Winkel zwischen der positiven x -Achse und der Projektion des Punktes auf die x - y -Ebene (Horizontalwinkel). Für Punkte auf der z -Achse ist der Horizontalwinkel beliebig.

2.1.1.2 Koordinatentransformationen

Zwei beliebig im Raum orientierte (rechtwinklige) Koordinatensysteme können durch eine *Koordinatentransformation* zur Deckung gebracht werden. Die am häufigsten verwendete Transformation im dreidimensionalen Raum ist die räumliche Ähnlichkeitstransformation (auch 3D-HELMERT-Transformation). Damit lassen sich die Koordinaten eines Punktes in die Koordinaten eines zweiten Systems überführen. Dies geschieht im Allgemeinen durch eine Kombination aus einer Translation und einer Rotation. Die *Translation* beschreibt eine Verschiebung des Koordinatensystems in Richtung der drei Koordinatenachsen, bis der Ursprung beider

Systeme identisch ist. Die Verschiebungsbeträge in x -, y - und z -Richtung sind die Translationsparameter x_0 , y_0 und z_0 . Bei der *Rotation* wird das Koordinatensystem um die drei Koordinatenachsen gedreht, bis die Achsen beider Systeme parallel bzw. nach bereits erfolgter Translation identisch sind. Die Rotationsparameter sind die drei Drehwinkel um die x -Achse (ω), die y -Achse (φ) und die z -Achse (κ). In einigen Fällen wird neben den Parametern der Translation und der Rotation ein Maßstabsparameter m verwendet, der die zu transformierenden Koordinatensysteme zueinander skaliert. In Matrixschreibweise kann die Koordinatentransformation wie folgt beschrieben werden:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{X} \quad (2.1)$$

Die Vektoren $\mathbf{X}$ und $\mathbf{X}'$ enthalten die Koordinaten eines zu transformierenden Punktes im Ausgangs- und im Zielsystem. Die Translationsparameter werden im Vektor $\mathbf{X}_0$ zusammengefasst. $\mathbf{R}$ ist die Rotationsmatrix, deren neun Elemente (r_{ij}) Funktionen der Rotationsparameter sind (vgl. Kapitel 2.1.1.3). Ausgeschrieben lautet die Transformationsvorschrift:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

2.1.1.3 Rotationsmatrizen

Die zur Koordinatentransformation geeigneten Rotationsmatrizen $\mathbf{R}$ sind orthonormal, d.h. die einzelnen Vektoren der Matrizen sind paarweise orthogonal und die Norm der Vektoren beträgt jeweils eins. Eine Rotationsmatrix setzt sich aus neun Rotationselementen (r_{ij}) zusammen:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Die Rotationselemente ergeben sich durch die drei Einzeldrehungen (Elementardrehungen) um die x -Achse (ω), die y -Achse (φ) und die z -Achse (κ). Mathematisch lässt sich dieser Zusammenhang als Multiplikation der Rotationsmatrizen beschreiben (Gleichung 2.4). Damit die Gesamtrotation eindeutig ist, muss die Drehreihenfolge bzw. die Reihenfolge der Multiplikationen berücksichtigt werden.

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Die drei Winkel (ω , φ , κ) werden auch als EULER-Winkel bezeichnet. Problematisch bei der Anwendung der Rotationsmatrix mit diesen Winkeln ist das Auftreten von Mehrdeutigkeiten, d.h. jeweils zwei unterschiedliche Winkel-Kombinationen bewirken identische Rotationen. In der Praxis wird die Rotationsmatrix deshalb oft durch Vertauschen der Drehreihenfolge an die jeweilige Anwendung angepasst [Luhmann, 2003].

Eine weitere Schwierigkeit bei der Nutzung der EULER-Winkel ist der als „Gimbal-Lock“ bezeichnete Effekt. Dieser entsteht durch die gegenseitige Beeinflussung der drei Winkel, insbesondere wenn die Achse der ersten Drehung mit der Achse der dritten Drehung zusammenfallen, weil dann ein Freiheitsgrad fehlt [Rietdorf, 2005].

Wegen der genannten Gründe wird als Alternative häufig eine Rotationsmatrix mit vier Quaternionen (a , b , c , d) verwendet. Quaternionen sind im mathematischen Sinne eine Erweiterung komplexer Zahlen und beschreiben die drei Elementardrehungen in der folgenden Form:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} d^2 + a^2 - b^2 - c^2 & 2(ab - cd) & 2(ac + bd) \\ 2(ab + cd) & d^2 - a^2 + b^2 - c^2 & 2(bc - ad) \\ 2(ac - bd) & 2(bc + ad) & d^2 - a^2 - b^2 + c^2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Diese Rotationsmatrix wird durch die Bedingung

$$a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = 1 \quad (2.6)$$

zu einer orthonormalen Drehmatrix mit drei voneinander unabhängigen Parametern (Normierung der Quaternionen). In der praktischen Anwendung hat die Verwendung der Quaternionen weitere Vorteile. In Ausgleichungsproblemen konvergiert die Lösung oft schneller, außerdem ist die Lösung robuster gegen ungenau bekannte Näherungswerte für das Aufstellen der Koeffizientenmatrix [Hinsken, 1987]. Im Gegensatz zu den EULER-Winkeln lassen sich Quaternionen nur schwer geometrisch veranschaulichen, jedoch ist eine indirekte Umrechnung zwischen Winkeln und Quaternionen mit Hilfe der Rotationsmatrix möglich.

2.1.2 Ausgleichungsrechnung

In vielen Anwendungen der Geodäsie, Photogrammetrie aber auch zahlreichen anderen Bereichen werden die unbekannten Parameter nicht direkt gemessen, sondern es werden andere Größen gemessen (Beobachtungen), die in funktionalem Zusammenhang mit den Unbekannten stehen. Beispiele sind die Bestimmung dreidimensionaler Koordinaten eines Punktes aus den mit einem Tachymeter gemessenen Beobachtungen (Winkel und Strecke), oder aus den in photogrammetrischen Bildern gemessenen Bildkoordinaten. Praktisch werden meist mehr Beobachtungen gemessen, als zur Bestimmung der Unbekannten notwendig sind (Überbestimmung). In diesem Fall kann keine eindeutige Lösung bestimmt werden, stattdessen erfolgt eine Schätzung der Parameter mit Hilfe funktionaler und stochastischer Modelle. Dabei ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass alle Messungen durch zufällige und systematische Fehler verfälscht sein können, was sich auf die Genauigkeit der zu bestimmenden Unbekannten auswirkt. Durch die Überbestimmung ist eine Kontrolle der Messwerte, d.h. eine höhere Zuverlässigkeit, sowie eine Steigerung der Genauigkeit möglich. In den folgenden Kapiteln wird eine kurze Zusammenfassung der für die Arbeit relevanten Lehrbuchinhalte aus [Wolf, 1975; Reißmann, 1976; Niemeier, 2002; Koch, 2004] gegeben.

2.1.2.1 Funktionales bzw. geometrisches Modell

Werden n Beobachtungen in einem Vektor $\mathbf{L}$ und u Unbekannte in einem Vektor $\mathbf{X}$ zusammengefasst, beschreibt das *funktionale Modell* den funktionalen Zusammenhang zwischen den wahren Werten der Beobachtungen (Vektor $\tilde{\mathbf{L}}$) und den wahren Werten der unbekannten Parameter (Vektor $\tilde{\mathbf{X}}$):

$$\tilde{\mathbf{L}} = f(\tilde{\mathbf{X}}) \quad (2.7)$$

Dieser funktionale Zusammenhang kann in den meisten Fällen durch geometrische Beziehungen hergeleitet werden und wird deshalb auch als *geometrisches Modell* bezeichnet. Die in Gleichung 2.7 verwendeten wahren Werte für die Beobachtungen und Parameter sind in der Regel unbekannt. Deshalb wird der Beobachtungsvektor durch die tatsächlichen Beobachtungen $\mathbf{L}$ und kleine Verbesserungen $\mathbf{v}$ und der Vektor der Unbekannten $\mathbf{X}$ durch die in der Ausgleichung geschätzten Unbekannten $\hat{\mathbf{X}}$ ersetzt:

$$\hat{\mathbf{L}} = f(\hat{\mathbf{X}}) = \mathbf{L} + \mathbf{v} \quad (2.8)$$

Durch Umstellen dieser Gleichung erhält man die Verbesserungsgleichungen, die für die Ausgleichung jedoch noch linearisiert werden müssen. Für die Linearisierung sind Näherungswerte der Unbekannten $\mathbf{X}^0$ notwendig. In der Ausgleichung werden dann nur noch kleine Zuschläge $\hat{\mathbf{x}}$ zu den Näherungswerten geschätzt. Die Werte der unbekannten Parameter ergeben sich durch folgende Gleichung:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \hat{\mathbf{x}} \quad (2.9)$$

Werden die mit Näherungswerten der Unbekannten berechneten Werte für die Beobachtungen ($\mathbf{L}^0$) von den Beobachtungen ($\mathbf{L}$) subtrahiert, ergibt sich der Beobachtungsvektor $\mathbf{l}$:

$$\mathbf{l} = \mathbf{L} - \mathbf{L}^0 \quad (2.10)$$

Die Linearisierung der Verbesserungsgleichungen erfolgt durch eine TAYLOR-Entwicklung an den Näherungswerten $\mathbf{X}^0$, die nach dem ersten Glied abgebrochen wird. Damit erhält man die Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}$,

welche die geometrischen Zusammenhänge zwischen den Messwerten und den Unbekannten in Form von Ableitungen des funktionalen Modells aller Beobachtungen nach den einzelnen Unbekannten enthält:

$$\mathbf{A}_{n,u} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1(\mathbf{X})}{\partial X_1} \right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_1(\mathbf{X})}{\partial X_u} \right)^0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n(\mathbf{X})}{\partial X_1} \right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_n(\mathbf{X})}{\partial X_u} \right)^0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Die linearisierten Verbesserungsgleichungen stellen das allgemeine Modell der vermittelnden Ausgleichung dar:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \quad (2.12)$$

2.1.2.2 Stochastisches Modell

Zu den stochastischen Eigenschaften der Beobachtungen gehören deren Genauigkeit (Standardabweichung σ_i der Beobachtungen L_i) und Korrelationen zwischen den Beobachtungen (Korrelationskoeffizient ρ_{ij} zwischen den Beobachtungen L_i und L_j). Diese Eigenschaften werden in der Kovarianzmatrix Σ_{LL} zusammengefasst. Die Kovarianzmatrix beinhaltet deshalb das *stochastische Modell* der Ausgleichung:

$$\Sigma_{LL} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \dots & \rho_{1n} \sigma_1 \sigma_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1} \sigma_n \sigma_1 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}$ mit den Gewichten p_i für die Beobachtungen L_i erhält man durch Multiplikation der inversen Kovarianzmatrix mit der Konstanten σ_0^2 (Varianz einer Beobachtung mit dem Gewicht Eins). Die Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{LL}$ der Beobachtungen ist die Inverse der Gewichtsmatrix:

$$\mathbf{P}_{n,n} = \mathbf{Q}_{LL}^{-1} = \sigma_0^2 \cdot \Sigma_{LL}^{-1} = \begin{bmatrix} p_1 & & \\ & \ddots & \\ & & p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

In den meisten Ausgleichungsproblemen sind a-priori keine Informationen über Korrelationen zwischen den Beobachtungen bekannt, es wird deshalb von unabhängigen Beobachtungen ausgegangen. Damit wird die Kovarianzmatrix der Beobachtungen zu einer Diagonalmatrix. Außerdem liegen oft keine Informationen über die a-priori Varianz der Beobachtungen vor. In der Praxis wird dann oft für alle Beobachtungen die gleiche a-priori Genauigkeit $\sigma_i = \sigma_0$ veranschlagt und die Gewichtsmatrix ist dann eine Einheitsmatrix.

Da die wahre Standardabweichung σ bei Ausgleichungsproblemen in der Regel unbekannt ist, wird sie durch die empirische Standardabweichung s ersetzt. In der Ausgleichung wird dann die a-posteriori Standardabweichung $\hat{s}$ (ausgeglichene Standardabweichung) geschätzt. Dieser Wert wird oft zur Analyse der Genauigkeit der Ausgleichungsberechnung herangezogen, er entspricht aber nur bei genügend großer Überbestimmung annähernd der wahren Standardabweichung.

2.1.2.3 Varianzkomponentenschätzung

Werden mehrere Messgrößen mit unterschiedlicher Genauigkeit für die Berechnung der Unbekannten verwendet, deren a-priori Standardabweichung jedoch nicht oder nur näherungsweise bekannt ist, bietet sich das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung an. Dabei wird das stochastische Modell aus den Beobachtun-

gen selbst hergeleitet, indem geeignete Gewichte für Beobachtungsgruppen mit unterschiedlichen a-priori Genauigkeiten geschätzt werden. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens der Varianzkomponentenschätzung erfolgt in Kapitel 7.3.

2.1.2.4 Vermittelnde Ausgleichung

Nach GAUSS-MARKOV basiert das Ausgleichungsmodell der vermittelnden Ausgleichung auf der Forderung, dass die Quadratsumme aller Verbesserungen v_i (Gleichung 2.12) unter Berücksichtigung des stochastischen Modells minimal wird (L2-Norm). Die zugrunde liegende Berechnung wird auch als Methode der kleinsten Quadrate (MKQ) bezeichnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Abweichungen normalverteilt sind und keine systematischen Fehler enthalten sind:

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \rightarrow \text{Minimum} \quad (2.15)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 2.12, Bilden der ersten Ableitung dieses Ausdruckes nach $\hat{\mathbf{x}}$ und Gleichsetzen mit Null (Lösungsschema einer Extremwertaufgabe) erhält man folgende Beziehung:

$$\frac{\partial(\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v})}{\partial \hat{\mathbf{x}}} = 2 \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} - 2 \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} = 0 \quad (2.16)$$

Wird diese Gleichung nach $\hat{\mathbf{x}}$ umgestellt, erhält man das Normalgleichungssystem, mit dem die Zuschläge zu den Näherungswerten der unbekannten Parameter berechnet werden können:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}) \quad (2.17)$$

Werden die Zuschläge zu den Unbekannten in Gleichung 2.12 eingesetzt, ergeben sich die Verbesserungen um welche die ursprünglichen Beobachtungen zu korrigieren sind, um ausgeglichene Messwerte zu erhalten (Gleichung 2.8).

Der Ausdruck $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ wird als Normalgleichungsmatrix $\mathbf{N}$ bezeichnet, die Inverse von $\mathbf{N}$ ist die Kofaktormatrix der Unbekannten $\mathbf{Q}_{xx}$. Wird die Kofaktormatrix der Unbekannten mit der in der Ausgleichung geschätzten a-posteriori Varianz der Gewichtseinheit $\hat{s}_0^2$ (Kapitel 2.1.3.3) multipliziert, erhält man die Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten:

$$\Sigma_{xx} = \hat{s}_0^2 \mathbf{Q}_{xx} = \hat{s}_0^2 \mathbf{N}^{-1} \quad (2.18)$$

Die Kofaktormatrix bzw. die Varianz-Kovarianz-Matrix dient der Analyse der Ausgleichungsergebnisse, da sie die Informationen zur Berechnung der Standardabweichungen der Unbekannten und der Korrelationen zwischen den Unbekannten beinhaltet. Mit Hilfe der Korrelationskoeffizienten und bestimmter statistischer Berechnungen (z.B. Signifikanztests) können die Unbekannten auf ihre Zweckmäßigkeit untersucht werden.

2.1.2.5 Vermittelnde Ausgleichung mit Bedingungen zwischen den Unbekannten

Eine Voraussetzung für die Berechnung der vermittelnden Ausgleichung (Gleichung 2.17) ist, dass alle Spaltenvektoren der Koeffizientenmatrix linear unabhängig voneinander sind, d.h. dass der Spaltenrang der Koeffizientenmatrix der Anzahl der Unbekannten entspricht. In diesem Fall existiert eine Inverse der Normalgleichungsmatrix $\mathbf{N}$ und damit eine eindeutige Lösung. In vielen Ausgleichungsproblemen ist dies jedoch nicht der Fall, sondern es fehlen Beobachtungen zur eindeutigen Bestimmung der Unbekannten, man spricht auch von einem Rangdefekt. Beispiele dafür sind die Bestimmung von Objektpunktkoordinaten, bei denen kein Koordinatensystem durch Passpunkte definiert ist (Datumsdefekt) oder die Bestimmung der vier Quaternionen (a, b, c, d) einer Rotationsmatrix.

Der Rangdefekt des Ausgleichungsproblems kann korrigiert werden, indem r zusätzliche Bedingungen zwischen den Unbekannten in Form von Bedingungs-gleichungen aufgestellt werden:

$$\mathbf{f}(\tilde{\mathbf{X}}) = \begin{bmatrix} f_1(\tilde{\mathbf{X}}) \\ \vdots \\ f_r(\tilde{\mathbf{X}}) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.19)$$

Wie auch die Verbesserungsgleichungen der Beobachtungen werden die Bedingungsgleichungen an der Stelle der Näherungswerte linearisiert. Dadurch erhält man die Matrix $\mathbf{B}$, welche die linearisierten Bedingungsgleichungen enthält:

$$\mathbf{B} = \left(\frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} \right)_{r,u}^0 \quad (2.20)$$

Die Minimierungsaufgabe des GAUSS-MARKOV-Modells (Gleichung 2.15) wird erweitert zur LAGRANGE'schen Funktion:

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} + 2 \mathbf{k}(\mathbf{B} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{w}) \rightarrow \text{Minimum} \quad (2.21)$$

Daraus ergibt sich das erweiterte Normalgleichungssystem entsprechend Gleichung 2.17:

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}) & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}) \\ -\mathbf{w} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Der Vektor $\mathbf{k}$ beinhaltet die LAGRANGE'schen Multiplikatoren und der Vektor $\mathbf{w}$ die Widersprüche (Abweichungen von Null) die sich ergeben, wenn man in die Bedingungsgleichungen die Näherungswerte der Unbekannten einsetzt.

Im Falle des oben genannten Anwendungsbeispiels der fehlenden Festlegung eines Koordinatensystems bei der Ausgleichung von Objektpunktkoordinaten werden in der Regel sieben linear unabhängige Bedingungsgleichungen formuliert, drei zur Festlegung des Ursprungs, drei zur Festlegung der Rotation und eine Gleichung zur Definition des Maßstabes. Diese Methode wird auch als *freie Netzausgleichung* bezeichnet und findet zum Beispiel bei der Bündelblockausgleichung Anwendung.

Sollen die vier Quaternionen einer Rotationsmatrix als Unbekannte, beispielsweise als Bestandteil der äußeren Orientierung eines Bildes, geschätzt werden, muss für jedes Bild eine Bedingungsgleichung entsprechend Gleichung (2.6) aufgestellt und das Normalgleichungssystem damit erweitert werden. Damit kann der Rangdefekt, der durch die Überparametrisierung entsteht (vier Elemente für drei Rotationen), korrigiert werden.

2.1.2.6 Praktische Gesichtspunkte

In vielen praktischen Anwendungen sind Näherungswerte für die zu schätzenden Parameter nur sehr grob bekannt. In diesem Fall ist es sinnvoll, die Ausgleichungsberechnung mehrfach iterativ durchzuführen. Das bedeutet, dass die nach der ersten Iteration erhaltenen Werte für die Unbekannten als neue Näherungswerte zur Linearisierung der Verbesserungsgleichungen für die zweite Iteration der Ausgleichung verwendet werden. Die Ausgleichungsberechnung iteriert dann so lange, bis ein vorher definierter Grenzwert für das Konvergenzkriterium erreicht wurde. Als Konvergenzkriterium wird meist die Summe der Zuschläge zu den Unbekannten verwendet, die unter einem bestimmten Wert liegen muss [Kraus, 1996]. Für nicht konvergierende Berechnungen ist es zweckmäßig, eine maximale Anzahl von Iterationen vorzugeben.

Das Aufstellen der Koeffizientenmatrix erfolgt in der Praxis entweder durch die strenge symbolische Ableitung des funktionalen Modells der Beobachtungen nach den Unbekannten oder durch numerische Berechnung des Differenzenquotienten. Im zweiten Fall wird der Anstieg der Tangente an den Graphen der Modellfunktion an der Stelle der Näherungswerte berechnet, indem zum Näherungswert der jeweiligen Unbekannten ein kleiner Wert $\varepsilon/2$ addiert und einmal subtrahiert wird und anschließend die Differenz der resultierenden Funktionswerte (berechnete Beobachtungen) durch ε geteilt wird. Dieser als zentraler Differenzenquotient bezeichnete Ausdruck ist bei genügend kleinem ε annähernd gleich der strengen symbolischen Ableitung, d. h. dem Differentialquotienten an der Stelle der Näherungswerte:

$$\left(\frac{\partial f(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}}\right)^0 \approx \left(\frac{\Delta f(\mathbf{X})}{\Delta \mathbf{X}}\right)^0 = \left(\frac{\Delta f(\mathbf{X})}{\varepsilon}\right)^0 = \frac{f(\mathbf{X}^0 + \frac{\varepsilon}{2}) - f(\mathbf{X}^0 - \frac{\varepsilon}{2})}{\varepsilon} \quad (2.23)$$

Der Vorteil der numerischen Methode ist die einfachere Implementation des funktionalen Modells, insbesondere bei komplexen funktionalen Modellen. In der Softwareanwendung wird die Prozedur, die das funktionale Modell enthält, nur einmal beschrieben und wird zum Aufstellen der Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}$ und des Beobachtungsvektors $\mathbf{l}$ genutzt. Wird das Modell geändert, beispielsweise zum Testen der Auswirkung verschiedener Parametrisierungen, muss das Modell nicht noch einmal nach den Zusatzparametern abgeleitet werden. Damit wird außerdem die Fehleranfälligkeit bei der Programmierung reduziert. Der Nachteil ist oft ein schlechteres Konvergenzverhalten gegenüber der strengen symbolischen Lösung. Ein weiterer Vorteil der numerischen Methode ist die Möglichkeit der Nutzung von geometrischen Modellen in gebrochener iterativer Formulierung (z.B. Mehrmedienphotogrammetrie) [Maas, 1992].

2.1.3 Statistik

Um die Ausgleichungsergebnisse richtig interpretieren zu können, ist es notwendig, bestimmte Qualitätsmaße zu berechnen. Dazu gehören die Genauigkeitsmaße, wie beispielsweise die Standardabweichung der Gewichtseinheit, sowie die Standardabweichungen der Unbekannten. Außerdem können die geschätzten Parameter auf ihre Bestimmbarkeit, Korrelationen untereinander und auf ihre Signifikanz untersucht werden. Die Kontrollierbarkeit der beteiligten Beobachtungen wird durch die Berechnung der Zuverlässigkeit der Ausgleichung analysiert. Es ist darüber hinaus zweckmäßig, grobe Fehler in den Beobachtungen zu identifizieren, um sie von der Lösung ausschließen zu können.

2.1.3.1 Messfehler

Jede Messung ist fehlerbehaftet. Es wird zwischen groben, zufälligen und systematischen Fehlern unterschieden [Reißmann, 1976]. Zufällige Fehler sind der eigentliche Gegenstand der Ausgleichungsrechnung. Sie entstehen durch die Unvollkommenheit der Messinstrumente und durch wechselnde äußere Bedingungen. Die zufälligen Fehler sind normalverteilt, das heißt kleine Fehler treten häufiger auf als große und Fehler mit gleichem Betrag kommen gleich oft positiv und negativ vor.

Besonders beachtet werden müssen systematische Fehler. In der Ausgleichungsrechnung wird gefordert, dass systematische Abweichungen aus den Messwerten zu eliminieren und Auswertungen nur mit berichtigten Messwerten zulässig sind. Andernfalls können die Berechnungsergebnisse und deren Genauigkeitsangaben verfälscht werden. Jedoch muss dabei zwischen systematischen Mess- und Modellabweichungen differenziert werden. Systematische Messfehler bewirken, dass die „wahren“ Werte und die geschätzten Werte der Unbekannten nicht zusammenfallen, unabhängig davon, in welchem Modell die Ausgleichung durchgeführt wird. Dagegen ergeben sich systematische Modellfehler, wenn die Parameter des funktionalen Modells den Zusammenhang zwischen Beobachtungen und den Unbekannten nicht ausreichend genau repräsentieren. Wird zum Beispiel eine nichtlineare Systematik durch eine lineare Regression berechnet, handelt es sich um einen ungenügenden funktionalen Modellansatz [Schmidt, 1997].

2.1.3.2 Test auf Normalverteilung

Der Test auf Normalverteilung kann Auskunft darüber geben, ob systematische Fehler in den Beobachtungen vorhanden sind, oder ob systematische Restabweichungen in den Verbesserungen der Beobachtungen nach der Ausgleichung vorliegen, die das Berücksichtigen dieser Systematik im funktionalen Modellansatz erforderlich machen. Sind die Beobachtungen bzw. die Verbesserungen nicht normalverteilt, ist ein vorhandener systematischer Fehler wahrscheinlich.

Bei dem so genannten χ^2 -Anpassungstest [Reißmann, 1976] wird die Nullhypothese aufgestellt, dass die Beobachtungen bzw. die Verbesserungen einer Normalverteilungsfunktion entsprechen. Aus dem Mittel aller Werte und der empirischen Standardabweichung der Werte kann die Prüfgröße $\hat{\chi}^2$ berechnet und diese dann mit der Sicherheitsgrenze χ_s^2 verglichen werden. Die Sicherheitsgrenze wird der χ^2 -Verteilungstabelle für eine

vorgegebene statistische Sicherheit (z.B. 95 %) entnommen. Ist die Prüfgröße größer als die Sicherheitsgrenze, wird die Nullhypothese abgelehnt, d.h. die Beobachtungen bzw. deren Verbesserungen sind nicht normalverteilt. In diesem Fall ist ein systematischer Fehler wahrscheinlich.

2.1.3.3 Standardabweichung der Gewichtseinheit

Die empirisch ermittelte a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit ist ein Indikator für die Qualität des Ausgleichungsergebnisses:

$$\hat{s}_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{(n+r)-u}} \quad (2.24)$$

Im Nenner dieser Gleichung steht die Redundanz (Anzahl der Überbestimmungen) des Ausgleichungsproblems, diese erhöht sich, wenn zusätzlich r Bedingungsgleichungen in die Berechnung eingeführt werden. Wenn alle systematischen Abweichungen aus den Beobachtungen eliminiert wurden, beschreibt die Standardabweichung der Gewichtseinheit die zufällige Messwertschwankung. Eventuell vorhandene unerkannte Systematiken oder grobe Fehler in den Beobachtungen verschlechtern diesen Wert. Wird ein zusätzlicher Parameter dem geometrischen Modell hinzugefügt, kann dessen Wirksamkeit anhand der Veränderung der Standardabweichung der Gewichtseinheit beurteilt werden.

Ob es sich durch das Berücksichtigen eines Zusatzparameters um eine signifikante Veränderung von $\hat{s}_0$ handelt, kann durch einen globalen Hypothesentest festgestellt werden. Die Nullhypothese, es liegen keine Instrumentenfehler vor bzw. alle Zusatzparameter sind Null, kann mit Hilfe der F-Verteilung (FISHER-Verteilung) geprüft werden.

2.1.3.4 Standardabweichung der Beobachtungen

Die a-posteriori Standardabweichung der ursprünglichen Beobachtungen ergibt sich durch Multiplikation der geschätzten Standardabweichung der Gewichtseinheit mit der Wurzel aus den Hauptdiagonalelementen der Kofaktormatrix der Beobachtungen $\mathbf{Q}_{LL}$ bzw. aus dem Quotienten der Standardabweichung der Gewichtseinheit und der Wurzel aus den Hauptdiagonalelementen der Gewichtsmatrix $\mathbf{P}$ (vgl. Gleichung 2.14).

Das bedeutet, es findet eine Skalierung der für das Aufstellen des stochastischen Modells vorgegebenen a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen entsprechend dem Quotienten aus s_0 (a-priori Standardabweichung der Gewichtseinheit) und $\hat{s}_0$ (a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit) statt:

$$\hat{s}_L = \hat{s}_0 \sqrt{q_{LL}} = \frac{\hat{s}_0}{\sqrt{p_i}} \quad (2.25)$$

Die Standardabweichung der ausgeglichenen Beobachtungen wird durch Multiplikation der Standardabweichung der Gewichtseinheit $\hat{s}_0$ mit der Wurzel aus den Hauptdiagonalelementen der Kofaktormatrix der ausgeglichenen Beobachtungen berechnet:

$$\hat{s}_{\hat{L}} = \hat{s}_0 \sqrt{q_{\hat{L}\hat{L}}} \quad \text{mit} \quad \mathbf{Q}_{\hat{L}\hat{L}} = \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{XX} \mathbf{A} \quad (2.26)$$

2.1.3.5 Standardabweichung der Unbekannten

Die empirische Standardabweichung einer einzelnen Unbekannten x_j ist eine Angabe der Genauigkeit eines in der Ausgleichung berechneten Parameters. Sie wird wie folgt berechnet, wobei die Elemente q_{jj} die Hauptdiagonalelemente der Kofaktormatrix der Unbekannten $\mathbf{Q}_{XX}$ sind:

$$\hat{s}_j = \hat{s}_0 \sqrt{q_{jj}} \quad (2.27)$$

Sind die Unbekannten Koordinaten von m Objektpunkten (z.B. bei einer Bündelblockausgleichung) werden die Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten der einzelnen Koordinatenrichtungen oft in RMS-Abweichungen (root mean square error bzw. mittlere quadratische Abweichung) zusammengefasst:

$$RMS_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \hat{s}_{X_i}^2}{m}} \quad RMS_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \hat{s}_{Y_i}^2}{m}} \quad RMS_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \hat{s}_{Z_i}^2}{m}} \quad (2.28)$$

Diese Vorgehensweise lässt die Beurteilung der Genauigkeit des Messverfahrens bzw. des funktionalen Modells, getrennt nach Lagekoordinaten (laterale Genauigkeit) und Tiefenkoordinaten (Tiefengenauigkeit) zu.

2.1.3.6 Bestimmbarkeit

Zur Untersuchung der Bestimmbarkeit einzelner Parameter in der Ausgleichung kann Gleichung (2.29) verwendet werden. Damit kann die Konditionierung des Normalgleichungssystems analysiert werden, die sich durch zusätzliche Parameter oft verschlechtert. Eine Überparametrisierung kann sogar zu einem singulären Gleichungssystem führen.

$$\mathbf{B}_{xx} = \mathbf{E} - (\text{diag } \mathbf{N} \cdot \text{diag } \mathbf{Q}_{xx})^{-1} \quad (2.29)$$

Die Werte für die Bestimmbarkeit der einzelnen Parameter stehen auf der Hauptdiagonalen der Matrix $\mathbf{B}_{xx}$, $\mathbf{E}$ ist die Einheitsmatrix. Die Bestimmbarkeit eines Parameters kann Werte zwischen Null (diagonale Normalgleichungsmatrix) und Eins (singuläre Normalgleichungsmatrix) annehmen. Für die zusätzlichen Parameter sollte er sich möglichst stark von Eins unterscheiden [Kraus, 1996].

2.1.3.7 Korrelationen

Die Kofaktormatrix der Unbekannten $\mathbf{Q}_{xx}$ enthält neben den Standardabweichungen der Unbekannten (entsprechend Gleichung 2.27) auch Informationen über die Korrelation zwischen den Unbekannten. Die Korrelationskoeffizienten ρ_{ij} liegen zwischen -1 und 1 und dienen der Analyse der Bestimmbarkeit der Unbekannten und der Güte des funktionalen Modells. Der Korrelationskoeffizient ρ_{ij} zwischen den Unbekannten i und j wird aus den Hauptdiagonalelemente q_{ii} und q_{jj} , sowie dem entsprechenden Nebendiagonalelement q_{ij} berechnet.

$$\rho_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sqrt{q_{ii} \cdot q_{jj}}} \quad (2.30)$$

Dieses Qualitätsmaß gibt Aufschluss über die Abhängigkeiten zwischen den ausgeglichenen Unbekannten. Der Betrag des Korrelationskoeffizienten sollte 0,9 nicht wesentlich übersteigen. Koeffizientenbeträge nahe Eins deuten auf eine lineare Abhängigkeit hin und sind zu vermeiden, da die Inversion der Normalgleichungsmatrix und damit die Lösung numerisch instabil werden kann. Meist ist in diesem Fall einer der beiden Parameter zu eliminieren. Allerdings wirkt sich eine starke Korrelation nicht immer negativ auf das Ausgleichungsergebnis aus. So sind beispielsweise die Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung eines Objektes oft stark miteinander korreliert.

2.1.3.8 Signifikanz

Die aus dem Normalgleichungssystem erhaltenen Werte für die zusätzlichen Parameter können mit Hilfe eines lokalen Hypothesentests auf ihre Signifikanz getestet werden, indem die Standardabweichung der Parameter den Parameterwerten gegenübergestellt wird. Ist das Verhältnis aus dem Wert des geschätzten Parameters $\hat{X}_i$ und dessen empirischer Standardabweichung $\hat{s}_i$ größer als der Tabellenwert der t-Verteilung (STUDENT-Verteilung) für eine bestimmte statistische Sicherheit (z.B. $S = 95\%$), ist der Parameter signifikant. Nach [Reißmann, 1976] wird zuerst die Nullhypothese H_0 in der Weise formuliert, dass der Parameterwert Null ist und somit keine Auswirkung auf das Ausgleichungsergebnis hat. Die Prüfgröße

$$\hat{t} = \frac{\hat{X}_i}{\hat{s}_i} \quad (2.31)$$

wird mit der Sicherheitsgrenze t_s , welche eine Funktion der Redundanz und der Sicherheitswahrscheinlichkeit S ist, verglichen. Ist der Betrag der Prüfgröße größer oder gleich der Sicherheitsgrenze ist die Nullhypothese abzulehnen, d.h. der Parameter ist als signifikant anzunehmen und dessen Berücksichtigung im funktionalen Modell sinnvoll. Andernfalls ist der Parameter mit der geringsten Signifikanz (kleinste Prüfgröße) aus der Liste der zu schätzenden Parameter zu entfernen [Rietdorf, 2005].

2.1.3.9 Zuverlässigkeit

Die Kontrolliertheit der beteiligten Beobachtungen wird durch die Zuverlässigkeit der Ausgleichung beschrieben. Sie ist abhängig von der Gesamtredundanz des Systems und der geometrischen Anordnung der Beobachtungen und gibt Auskunft darüber, ob und wie gut grobe Fehler im Beobachtungsmaterial erkennbar sind. Die Kontrolliertheit wird durch die einzelnen Redundanzanteile der Beobachtungen ausgedrückt. Die Redundanzanteile zeigen, welcher Anteil zur Berechnung der Unbekannten genutzt wird und welcher relative Anteil der Beobachtung „überschüssig“ ist. Dazu wird zuerst die Kofaktormatrix der Verbesserungen $\mathbf{Q}_v$ und daraus dann die Redundanzmatrix $\mathbf{R}_{LL}$ berechnet, deren Hauptdiagonalelemente die Redundanzanteile r_i ($0 \leq r_i \leq 1$) sind:

$$\mathbf{R}_{LL} = \mathbf{Q}_v \cdot \mathbf{P} = (\mathbf{Q}_{LL} - \mathbf{A} \mathbf{Q}_{XX} \mathbf{A}^T) \cdot \mathbf{P} = \begin{bmatrix} r_1 & & \\ & \ddots & \\ & & r_n \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Die einzelnen Redundanzanteile sollten möglichst hoch sein, da dies auf eine gute Kontrolliertheit der Beobachtungen hindeutet. Eine Beobachtung wäre dann gut durch andere Beobachtungen kontrolliert und könnte am ehesten eliminiert werden, ohne dass sich das Ergebnis der Ausgleichung relevant ändert. Sind die Redundanzanteile sehr klein, ist die Überbestimmung schwach und die Beobachtungen deshalb schlecht kontrollierbar. Für den Fall, dass eine Beobachtung den Redundanzanteil $r_i = 0$ besitzt, wird sie nicht durch andere Beobachtungen kontrolliert. Ein grober Fehler dieser Beobachtung wäre dann nicht erkennbar, würde aber in die Berechnung der Unbekannten eingehen, da der zur Berechnung genutzte Anteil $(1 - r_i)$ maximal ist.

2.1.3.10 Identifikation von Ausreißern

Ausreißer (grobe Fehler) müssen aus den Daten entfernt werden, da sie sich auf die Unbekannten und deren Standardabweichungen auswirken und das Ausgleichungsergebnis negativ beeinflussen. In den nach der Ausgleichung vorliegenden Verbesserungen sind grobe Fehler nur bedingt identifizierbar. Zum einen sind die Verbesserungen das Resultat der Überlagerung von Modellfehlern, d.h. einem ungenügenden funktionalen Ausgleichungsansatz, und groben Datenfehlern. Zum anderen werden Ausreißer auf die Verbesserungen aller Beobachtungen verteilt und damit die Erkennbarkeit von Datenfehlern eingeschränkt. Aus diesem Grund müssen andere Methoden zur Detektion von Ausreißern herangezogen werden. Bei guten Näherungswerten ist das Erkennen grober Fehler bereits vor der Ausgleichung möglich, indem der Beobachtungsvektor $\mathbf{l}$ (Gleichung 2.10) analysiert wird, der die Differenz zwischen den Beobachtungen und den mit Näherungswerten der Unbekannten berechneten Werten für die Beobachtungen enthält. Besonders große Differenzen können ein Hinweis auf grobe Fehler in den Messwerten sein.

Eine weitere Möglichkeit ist durch das Data-Snooping-Verfahren nach [Baarda, 1968] gegeben. Dieses basiert auf der Annahme, dass sich nur ein Ausreißer in den Beobachtungen befindet. Dazu werden die normierten Verbesserungen der Beobachtungen NV_i berechnet:

$$NV_i = \frac{v_i}{\hat{s}_{v_i}} \quad \text{mit} \quad \hat{s}_{v_i} = \hat{s}_0 \sqrt{(\mathbf{Q}_v)_{ii}} = \hat{s}_{L_i} \sqrt{r_i} \quad (2.33)$$

Die normierten Verbesserungen werden mit einem Schwellwert verglichen. Dieser Wert kann durch einen statistischen Test festgelegt werden, bei dem die Wahrscheinlichkeiten für einen Fehler 1. Art und einen Fehler 2. Art als Eingangsgrößen dienen. In der Praxis wird meist mit einem Wert ab 2,5 gearbeitet, ab dem ein grober Fehler 'wahrscheinlich' ist. Ab einem Wert von 4,0 ist ein grober Fehler 'sehr wahrscheinlich'. Es sollte immer nur die Beobachtung mit der größten normierten Verbesserung entfernt werden. Danach ist die gesamte Ausgleichung erneut durchzuführen, bis keine groben Fehler mehr enthalten sind. Weil die normierten Verbesserungen von den gewählten a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen abhängig sind, kann die Fehlersuche bei zu optimistischen oder zu pessimistischen Festlegungen der a-priori Standardabweichung der Beobachtungen unmöglich sein [Möser et. al., 2000].

Ist das Beobachtungsmaterial mit sehr vielen groben Fehlern behaftet, müssen robuste Schätzverfahren als Alternative verwendet werden, da das Data-Snooping-Verfahren dann ungeeignet ist. Beispiele sind die robuste Schätzung durch Gewichtsfunktionen, bei denen die Gewichte einer Beobachtung in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit eines groben Fehlers festgelegt werden, oder die robuste Schätzung nach der L1-Norm, bei der anstelle der Quadratsumme der Verbesserungen die Absolutwerte der Verbesserungen minimiert werden. Moderne Ansätze zur Elimination grober Fehler sind die RANSAC-Methode (Random Sampling Consensus) bzw. deren Erweiterung GASAC (Genetic Algorithm Sampling Consensus). Dabei wird die Parameterschätzung mehrfach mit einer kleinstmöglichen Anzahl zufällig ausgewählter Beobachtungen durchgeführt und anschließend die Lösung mit der maximalen Anzahl geeigneter Beobachtungen als korrekte Lösung akzeptiert. In einfachen Fällen kann das Ausgleichungsproblem mit diesen Methoden auch bei mehr als 90 % grober Fehler im Datensatz noch richtig gelöst werden.

2.2 Photogrammetrische Grundlagen

2.2.1 Geometrisches Modell

Als *geometrisches Modell* wird in der Photogrammetrie der funktionale Zusammenhang zwischen den Beobachtungen L_i , den Objektkoordinaten (X, Y, Z) , sowie der äußeren und inneren Orientierung des Aufnahmeapparates verstanden. Beschreibt das geometrische Modell das reale Aufnahmegerät nur ungenügend, wird das Modell um Korrekturterme ΔL_i in Abhängigkeit von Zusatzparametern erweitert:

$$L_i = f[(X, Y, Z), (X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa), (\text{innere Orient.}), \Delta L_i] \quad (2.34)$$

Wird das geometrische Modell in dieser Form beschrieben, kann es unmittelbar zur Formulierung von Verbesserungsgleichungen für die Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Kapitel 2.1.2.4) verwendet werden.

2.2.1.1 Koordinatensystem-Hierarchie

In photogrammetrischen Anwendungen wird meist ein *dreidimensionales kartesisches Objektkoordinatensystem* verwendet, in welchem die Koordinaten von Objektpunkten bzw. die Position und Ausrichtung der aufzunehmenden Objekte, sowie die Position und Orientierung der Aufnahmeapparate definiert wird. Dieses Koordinatensystem ist allen anderen Systemen übergeordnet.

Am Ende der Koordinatensystem-Hierarchie steht das Koordinatensystem, in dem die Messungen durchgeführt werden, d.h. die ursprünglichen Beobachtungen vorliegen. Bei Bildern ist das ein *zweidimensionales kartesisches Bildkoordinatensystem*. Bei einem Aufnahmegerät mit tachymetrischem Messprinzip, z.B. einem Laserscanner, ist dieses ein *dreidimensionales sphärisches Koordinatensystem*.

Zwischen das übergeordnete Objektkoordinatensystem und das Koordinatensystem der Beobachtungen werden oft verschiedene Koordinatensysteme geschaltet, die für die Herleitung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen den Beobachtungen und den Objektkoordinaten sinnvoll sind. Es handelt sich dabei um Koordinatensysteme, die dem jeweiligen Aufnahmesystem angepasst sind. Diese werden deshalb auch als *Gerätekoordinatensysteme* bezeichnet. Häufig handelt es sich dabei um ein dreidimensionales kartesisches

Gerätekoordinatensystem, es kann aber auch ein zylindrisches (z.B. Panoramakamera, Kapitel 4.2.1.3) oder sphärisches Koordinatensystem (z.B. vollsphärisches Panorama, Kapitel 4.4.1) sein. Der Ursprung des Gerätekoordinatensystems ist das Projektionszentrum, d.h. der Punkt, in dem sich alle Abbildungsstrahlen schneiden.

Werden mehrere Aufnahmegерäte zu einem Aufnahmesystem kombiniert, hat jedes Gerät ein eigenes Gerätekoordinatensystem. Dabei dient meist eines der Systeme als primäres Gerätekoordinatensystem in welches die anderen (sekundären) Systeme transformiert werden. Die Gerätekoordinatensysteme können aber auch als gleichwertig angesehen werden. Darüber hinaus besteht oft die Aufgabe, mehrere Objektkoordinatensysteme (z.B. verschiedene photogrammetrische Teilprojekte) in ein globales Weltkoordinatensystem (z.B. durch GPS-Messungen) zu transformieren. Dies kann beispielsweise bei der Kombination mit Luftbildanwendungen notwendig sein.

2.2.1.2 Äußere Orientierung

Als *äußere Orientierung* einer Aufnahme werden die Parameter zur Transformation des dazugehörigen Gerätekoordinatensystems in das übergeordnete Objektkoordinatensystem bezeichnet. Diese Parameter sind (bei statischer Aufnahme) drei Translations- und drei Rotationsparameter (Kapitel 2.1.1.2). Die sechs Parameter der äußeren Orientierung beschreiben also die Position und Ausrichtung eines Aufnahmegерätes innerhalb eines übergeordneten Objektkoordinatensystems.

2.2.1.3 Innere Orientierung

Der Bezug zwischen dem Gerätekoordinatensystem und dem Koordinatensystem in dem die Beobachtungen definiert sind wird als *innere Orientierung* bezeichnet. Bei einem photogrammetrischen Bild ist das die Position des Projektionszentrums in Bezug zur Bildebene. Dazu gehören die Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes (Lotfußpunkt durch das Projektionszentrum auf der Bildebene) und die Kamerakonstante (senkrechter Abstand zwischen Projektionszentrum und Bildebene). Bei Aufnahmegерäten, die nicht der Geometrie der Zentralperspektive entsprechen, muss die Definition der inneren Orientierung angepasst werden.

2.2.1.4 Zusatzparameter

Zusätzliche Parameter werden dem geometrischen Grundmodell bestehend aus äußerer und innerer Orientierung hinzugefügt, wenn dieses die reale Gerätegeometrie nicht ausreichend genau beschreibt. Diese Parameter sind meist Bestandteil additiver Korrekturterme am funktionalen Modellansatz und werden oft als Gerätefehler bezeichnet. Genau genommen kompensieren sie jedoch Abweichungen zwischen einem vereinfachten geometrischen Modell und den physikalischen Eigenschaften des Aufnahmegерätes. Beispiele für Zusatzparameter sind die Koeffizienten des Polynoms zur Kompensation der radial-symmetrischen Verzeichnung eines Objektivs oder die Achsabweichungen bei Geräten mit tachymetrischem Messprinzip. Die Parameter der inneren Orientierung einschließlich der Zusatzparameter werden auch als Kalibrierparameter bezeichnet, da sie der Kalibrierung des Messgerätes dienen.

2.2.2 Räumlicher Rückwärts- und Vorwärtsschnitt

2.2.2.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Bei einem *räumlichen Rückwärtsschnitt* werden die Parameter der äußeren Orientierung und bei ausreichender Anzahl bekannter Objektpunkte auch die der inneren Orientierung und Zusatzparameter mit Hilfe der Beobachtungen von einem einzigen Aufnahmestandpunkt bestimmt. Bei einem photogrammetrischen Bild müssen die Bildkoordinaten von mindestens drei bekannten Objektpunkten gemessen werden, um die sechs Parameter der äußeren Orientierung bestimmen zu können. Zur Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen wird die Beobachtungsgleichung (Gleichung 2.34) als Grundlage für Verbesserungsgleichungen verwendet, die zum Aufbau der Koeffizientenmatrix nach den unbekannten Parametern der äußeren Orientierung, gegebenenfalls der inneren Orientierung und Zusatzparametern abgeleitet werden. Die Linearisierung

der Verbesserungsgleichungen erfolgt mit Hilfe von Näherungswerten für alle zu schätzenden Parameter. Objektpunktkoordinaten gehen grundsätzlich als gegebene Größen in die Ausgleichung ein und können nicht geschätzt werden. Deshalb limitiert die Genauigkeit der Passpunkte häufig die Genauigkeit der Ausgleichungsergebnisse.

Es ist auch möglich, den räumlichen Rückwärtsschnitt mit einem linearen Gleichungssystem (Direkte Lineare Transformation, kurz DLT) zu lösen. Dem Vorteil dieses Ansatzes, dass keine Näherungswerte notwendig sind, steht der Nachteil gegenüber, dass mehr Passpunkte (mindestens 6) notwendig sind und es bei bestimmten Passpunktanordnungen zu schlecht konditionierten bis hin zu singulären Gleichungssystemen kommen kann. Die DLT wird oft zur Beschaffung von Näherungswerten für die Parameter der äußeren Orientierung angewendet [Luhmann et. al., 2006].

Die Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes ist nicht nur unter Nutzung der Beobachtungen photogrammetrischer Aufnahmegeräte möglich, sondern auch anderer Geräte, wie Tachymeter oder terrestrischer Laserscanner. Dabei werden als Beobachtungen sphärische Koordinaten (Horizontal- und Vertikalwinkel, ggf. Distanz) anstelle der Bildkoordinaten verwendet. In der Geodäsie ist die Berechnung der äußeren Orientierung getrennt in zweidimensionale Lagekoordinaten und eine Höhenkoordinate üblich, da die meisten Geräte (abgesehen von manchen terrestrischen Laserscannern) horizontalisiert werden können.

2.2.2.2 Räumlicher Vorwärtsschnitt

Die Umkehrung des räumlichen Rückwärtsschnittes ist der *räumliche Vorwärtsschnitt*. Dabei werden die Koordinaten von Objektpunkten als Unbekannte in einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtung geschätzt. Die Parameter der äußeren und inneren Orientierung, sowie mögliche Zusatzparameter gehen als feste Größen in die Ausgleichung ein. Für die Bestimmung der Objektkoordinaten sind die Beobachtungen (Bildkoordinaten) des jeweiligen Objektpunktes in mindestens zwei Aufnahmen von zwei unterschiedlichen Standorten zu messen. In der Regel ist die Berechnung am effektivsten, wenn für jeden unbekannten Objektpunkt eine eigene Ausgleichung durchgeführt wird. Die Verbesserungsgleichungen (abgeleitet aus Gleichung 2.34) werden zum Aufbau der Koeffizientenmatrix nach den Objektkoordinaten abgeleitet und damit an der Stelle von Näherungswerten der Objektkoordinaten linearisiert.

Der in der Photogrammetrie verwendete räumliche Vorwärtsschnitt ist mit einem geodätischen Vorwärtseinschnitt gleichzusetzen, bei dem als Beobachtungen statt den Bildkoordinaten Winkelmessungen (Horizontal- und Vertikalwinkel) eingehen. Aus diesem Grund können auch die Winkelmessungen eines Gerätes mit tachymetrischem Messprinzip (z.B. terrestrischer Laserscanner) mit in die Berechnung einbezogen werden. Die Möglichkeit der Messung der Distanz mit diesen Geräten und deren Berücksichtigung als weitere Beobachtung in der Ausgleichung kann die Objektkoordinatenbestimmung deutlich zuverlässiger machen, weil sich unterschiedliche Beobachtungen gegenseitig in hohem Maße kontrollieren.

2.2.3 Bündelblockausgleichung

- Definition

Bei der Bündelblockausgleichung im ursprünglichen Sinne werden beliebig viele im Raum angeordnete Bilder rechnerisch simultan orientiert. Als Messwerte dienen die im Bild gemessenen Koordinaten von Objektpunkten. Resultat der Berechnung sind neben den Orientierungselementen der Bilder und den Werten möglicher Zusatzparameter auch die Koordinaten von Objektpunkten. Zusätzlich zu den Parametern des geometrischen Modells können zahlreiche statistische Angaben zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit berechnet werden. Die Bündelblockausgleichung ist das leistungsfähigste und genaueste Verfahren zur Bildorientierung und Punktbestimmung in der Photogrammetrie.

- Funktionales Modell

Die Methode der Bündelblockausgleichung stellt eine Kombination der Verfahren des räumlichen Rückwärts- und Vorwärtsschnittes dar, weil alle in Gleichung 2.34 enthaltenen Parameter als Unbekannte in die

Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen eingehen. Zur Linearisierung der Verbesserungsgleichungen werden Näherungswerte für alle zu schätzenden Parameter benötigt. Darüber hinaus können im Rahmen der Bündelblockausgleichung zusätzliche Informationen über das Objekt in Form von Bedingungsgleichungen (Bedingungen zwischen Objektpunkten, z.B. Geraden, Ebenen, Körper) berücksichtigt werden.

- Datumsfestlegung

Das Ausgleichungsproblem kann nur gelöst werden, wenn vorher ein übergeordnetes Koordinatensystem festgelegt wird, da sonst das Normalgleichungssystem einen Rangdefekt (speziell Datumsdefekt) aufweist. Die Festlegung eines Koordinatensystems kann entweder über mindestens drei Passpunkte mit insgesamt sieben Koordinateninformationen (minimales Datum) oder über die Einführung sieben zusätzlicher Bedingungsgleichungen zwischen den Unbekannten (freie Netzausgleichung) geschehen.

- Simultankalibrierung

Bei der Bündelblockausgleichung besteht die Möglichkeit, neben den Orientierungselementen und Objektpunktkoordinaten auch die Werte von Zusatzparameter der verwendeten Kamera simultan zu ermitteln. Dies wird als Simultankalibrierung bzw. Selbstkalibrierung des Aufnahmegerätes bezeichnet.

- Kombinierte Ausgleichung unterschiedlicher Beobachtungen

Eine Verallgemeinerung der Definition der Bündelblockausgleichung bedeutet die gleichzeitige rechnerische Einpassung aller Aufnahmen beliebiger Messgeräte (Kamera, Panoramakamera, terrestrischer Laserscanner, etc.). Die Berechnung erfolgt dann unter der Forderung, dass sich alle Strahlen zwischen Objektpunkt und den beteiligten Messgeräten optimal in einem Objektpunkt schneiden. Das bedeutet, dass in der Bündelblockausgleichung neben Bildkoordinaten auch andere Beobachtungstypen wie beispielsweise Strecken und Winkel simultan ausgeglichen werden müssen.

Die simultane Ausgleichung der Beobachtungen verschiedener Messgeräte macht die Definition und Berücksichtigung unterschiedlicher geometrischer Modelle notwendig. Insbesondere die Verwaltung der verschiedenen geometrischen Modelle, unterschiedlicher Beobachtungstypen, der unbekannten Parameter einer beliebigen Anzahl von Objektpunkten, Messgeräten und Standpunkten stellt eine Herausforderung an die Struktur der verwendeten Software dar. Weiterhin ist bei der Ausgleichung unterschiedlicher Beobachtungen das stochastische Modell von zentraler Bedeutung.

3 Aufnahmegeräte

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Aufnahmegeräte vorgestellt, deren Messdaten in einer integrierten Bündelblockausgleichung verarbeitet werden sollen. Dabei werden vor allem technische und geometrische Aspekte berücksichtigt, die für die Entwicklung geometrischer Modelle von Belang sind. Augenmerk wird auch auf mögliche Anwendungen der Messgeräte und damit verbundene Auswerteverfahren gelegt. Zudem wird auf Kombinationsmöglichkeiten der Daten unterschiedlicher Aufnahmegeräte hingewiesen. Zentralperspektive Kameras werden einleitend nur kurz erwähnt, weil deren Aufbau und Funktionsweise als bekannt vorausgesetzt wird. Für die Aufnahmegeräte Panoramakamera und terrestrischer Laserscanner werden exemplarisch jeweils die Geräte genauer vorgestellt, mit denen zahlreiche Testdaten für die Entwicklung der geometrischen Modelle und für die kombinierte Auswertung aufgenommen wurden. Das sind die Panoramakamera EYESCAN M3D metric und der Laserscanner Riegl LMS-Z420i.

3.1 Zentralperspektive Kamera

3.1.1 Entwicklung

Die erste zentralperspektiv abbildende Kamera ist die Lochkamera, bzw. die 'camera obscura' („dunkle Kammer“), der alle späteren Kameras ihren Namen verdanken. Bereits Aristoteles erkannte das Prinzip der Lochkamera, das dann im späten Mittelalter in transportablen Geräten Verwendung fand. Bei diesen frühen Kameras wurde das Bild über einen Spiegel im Inneren der Kamera auf eine Mattscheibe nach oben projiziert (Abbildung 3.1, links). Das Bild konnte zwar noch nicht dauerhaft festgehalten werden, jedoch benutzten Maler – wie beispielsweise Canaletto bei seinem berühmten Gemälde von Dresden – diese Kamera als Zeichnungshilfe.

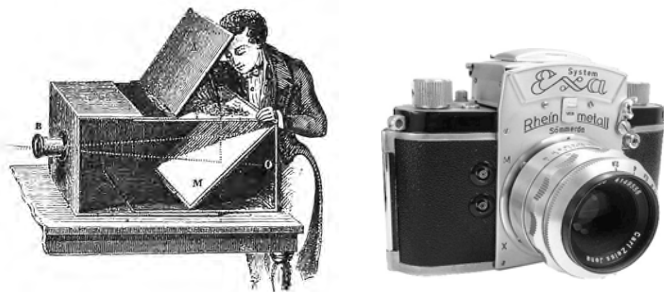


Abbildung 3.1: Camera obscura [www.foto-faq.de] und Exa Rheinmetall, die erste (1952) in Großserie produzierte SLR-Kamera [www.kamera-sammelsurium.de]

Das kleine Loch der Lochkamera wurde im Laufe der Entwicklung erst durch einfache Linsen und später durch komplexe Linsensysteme ersetzt, die eine schärfere Abbildung ermöglichten. An die Stelle der Mattscheibe der 'camera obscura' wurden im 19. Jahrhundert Bildträger eingebaut, die das Fixieren des fotografischen Bildes ermöglichten. Dies waren speziell beschichtete Glas- oder Zinkplatten und später auch Rollfilme. Die Kameras wurden immer kompakter, jedoch fand das geometrische Grundprinzip der zentralperspektiven Abbildung auf eine ebene Fläche bei allen Kameras Verwendung. Kameras werden heute nach verschiedenen Kriterien eingeteilt. Man unterscheidet entweder nach dem Aufnahmeformat zwischen Kleinbild-, Mittelformat und Großformatkameras oder nach der optischen Konstruktion zwischen Sucher- und Spiegelreflexkameras (SLR-Kameras). Weiterhin kann man Kameras nach der Art des Bildaufnahmesystems zwischen analogen (Filmkamera) und digitalen Systemen (Digitalkamera) unterscheiden. Für Luft- und Satellitenbildanwendungen gibt es Spezialkameras, meist mit sehr großen Formaten.

3.1.2 Digitalkamera

Bei einem digitalen Bildaufnahmesystem werden anstelle einer Filmschicht opto-elektronische Sensoren in der Bildebene angeordnet, welche die Bildinformationen erfassen. Die vom Objekt ausgehende elektromagnetische Strahlung wird dabei vom Bildsensor erfasst und in ein Spannungssignal umgewandelt. Das digitale Bild entsteht schließlich durch Abtastung und Quantisierung dieses Spannungssignals in eine Folge ganzer Zahlen (Grauwerte). In der digitalen Aufnahmetechnik stark verbreitet sind CCD- und CMOS-Sensoren. Die ersten Sensoren wurden etwa 1970 hergestellt und sind seitdem in ständiger Weiterentwicklung, vor allem geprägt durch eine zunehmende Anzahl von Sensorelementen (Pixel). Heutige Kameras mit digitalen Flächensensoren besitzen 4 bis 16 Megapixel im Kleinbildformat und bis zu 65 Megapixel in Form eines digitalen Rückteils für Mittelformatkameras. Für spezielle Anwendungen gibt es auch Flächensensoren mit noch höheren Anzahlen an Sensorelementen. Eine Besonderheit stellen Kameras dar, bei denen mit einem Zeilensensor ein großer Flächensensor simuliert wird. Dabei wird ein Zeilensensor in der Bildebene verschoben. Kameras, die nach diesem Scan-Prinzip (auch 'Macro-Scanning-Kamera') arbeiten sind beispielsweise die Pentacon Scan 5000 mit insgesamt 94 Megapixel [Schneider et. al., 2005] oder die Anagramm Scanback David mit über 250 Megapixel.

3.1.3 Anwendungen in der Photogrammetrie

Zentralperspektiv abbildende Kameras werden in zahlreichen Anwendungen für photogrammetrische Zwecke genutzt. Insbesondere Digitalkameras haben sich heute in der Nahbereichsphotogrammetrie durchgesetzt. Während früher oft spezielle Messkameras eingesetzt wurden, verwendet man heute eher Consumer-Kameras, die wegen hohen Stückzahlen viel preiswerter sind. Diese Kameras können einfache digitale Kompaktkameras sein oder professionelle Spiegelreflexkameras, abhängig von der in der jeweiligen Anwendung geforderten Genauigkeit und Auflösung. Für dynamische Messaufgaben werden außerdem spezielle High-Speed-Kameras verwendet. Sollen bestimmte Messprozesse automatisiert werden (z.B. in der Qualitätskontrolle), werden oft sog. Industriekameras eingesetzt. Diese Kameras werden meist mit der FireWire-Schnittstelle des Computers verbunden und deren Bilddaten nahezu in Echtzeit verarbeitet.

Die Anwendungen zentralperspektiver Kameras in der Nahbereichsphotogrammetrie sind sehr vielfältig. Dazu gehören Mess- und Überwachungsaufgaben in der Industrie (Automobilbau, Maschinenbau, Luft- und Raumfahrtindustrie, etc.), Anwendungen in der Architektur (Aufnahme historischer Gebäude, Fassadenkartierung, 3D-Stadtmodelle, etc.) und Aufgaben in der Ingenieurvermessung (Deformationsmessungen an Großbauwerken, Leitungs- und Tunnelaufnahme, etc.). Weitere Anwendungen sind im medizinischen Bereich, bei der Aufnahme von Verkehrsunfällen, bei der Datenerfassung für Informationssysteme oder in verschiedenen naturwissenschaftlichen Gebieten zu finden.

3.2 Panoramakamera

3.2.1 Definition und Entwicklung

Die für die Bildaufnahme verwendeten Kameras basieren bis heute in den meisten Fällen auf dem mathematischen Grundprinzip der Zentralperspektive. Es gibt aber auch zahlreiche Kameras denen dieses Grundprinzip nicht zugrunde liegt (z.B. [Regensburger, 1990; Luhmann, 2004]). Dazu gehören Panoramakameras.

Der Begriff des Panoramas ist allerdings nicht eindeutig definiert. Er leitet sich aus den beiden griechischen Wörtern für „alles“ und „sehen“ ab und charakterisiert entsprechend einen Rundumblick bzw. eine Ansicht des umliegenden Bereiches. Umgangssprachlich wird der Begriff allerdings nicht nur für komplette 360°-Ansichten verwendet, sondern beschreibt Bilder mit ungewohnt großen Betrachtungswinkeln. Aus geometrischer Sicht kann ein „ungewohnt großer Betrachtungswinkel“ so interpretiert werden, dass alle Abbildungen mit einem Betrachtungswinkel, der sich nicht durch eine zentralperspektive Projektion beschreiben lässt, als Panorama bezeichnet werden können.

Die ersten Panoramakameras wurden vor etwa 165 Jahren entwickelt: im Jahre 1843 erhielt der Österreicher Joseph Puchberger ein Patent für seine Panoramakamera, die mit einem schwenkbaren Objektiv einen Bildwinkel von 150° aufnahm. Das 'Goldene Zeitalter der Panoramafotografie' begann 1899, als die "Multi-scope & Film Co." die Massenproduktion einer Schwenkobjektiv-Panoramakamera (Kapitel 3.2.2.1) aufnahm. Diese Kameras dienten damals vor allem zur Aufnahme von Landschaften und innerstädtischen Ansichten. In den letzten 50 Jahren haben sich zahlreiche Firmen auf die Produktion von Panoramakameras spezialisiert. Neben den Panoramakameras mit Schwenkobjektiv-System wurden auch rotierende Panoramakameras entwickelt, mit denen Aufnahmewinkel von bis zu 360° möglich wurden.

Während in der Vergangenheit analoge Panoramakameras eingesetzt wurden, werden in den letzten 15 Jahren immer häufiger auch digitale Panoramakameras verwendet. Dabei wird an die Stelle des Filmmaterials ein digitaler Zeilensensor eingebaut (Rotationszeilenkamera).

Oft werden auch Bilder von Kameras, die mit Fisheye-Objektiven oder Spiegelvorsätzen ausgestattet sind, oder Bilder, die durch Zusammenfügen mehrerer zentralperspektiver Einzelbilder entstanden sind (Stitching), als Panoramen bezeichnet. Diese werden in den Kapiteln 3.3 und 3.4 gesondert betrachtet.

Heute ist die Panoramafotografie ein beliebtes Mittel, um Landschaften, Innenräume oder Plätze auf einem Bild festzuhalten, das einen vollen Rundumblick erlaubt. Dieses Mittel wird vor allem für verschiedene Aufgaben in den Bereichen Tourismus, Facility Management oder Denkmalpflege immer attraktiver (z.B. Abbildung 3.2). Besonders häufig werden Panoramabilder im Internet präsentiert, dabei kommen spezielle Viewer zum Einsatz, die eine interaktive Navigation in den Panoramen ermöglichen. Auch bei extraterrestrischen Aufnahmen von Mond- und Planetenoberflächen kamen Panoramakameras zum Einsatz. Bekannt geworden sind Panoramen vor allem auch durch Aufnahmen auf der Mars-Oberfläche, die 1997 durch den Mars-Rover 'Pathfinder' und 2004 durch 'Spirit' und 'Opportunity' aufgenommen worden sind.



Abbildung 3.2: 360°-Panorama eines historischen Innenhofes

3.2.2 Aufnahmeprinzipien

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen analogen und digitalen Panoramakameras. Der Vorteil der analogen Panoramaaufnahme besteht in wesentlich kürzeren Aufnahmezeiten, die bei den digitalen Panoramakameras hauptsächlich durch die geringere Empfindlichkeit des Digitalsensors und durch die Auslese- und Übertragungsrate der Daten limitiert ist. Dennoch bietet das digitale Aufnahmeprinzip – wie auch bei konventionellen Kameras – den in vielen Anwendungen entscheidenden Vorteil der Automatisierbarkeit von Bildverarbeitungs- und Bildanalysewerkzeugen, ohne den Zwischenschritt der Digitalisierung analoger Filme.

Die Panoramaabbildung lässt sich nur noch in einer Bildkoordinatenrichtung mit dem Modell der Zentralperspektive beschreiben. Geometrisch lässt sich der Abbildungsvorgang durch die Projektion auf einen Zylindermantel darstellen. Mit der Kalibrierung von Panoramakameras beschäftigen sich unter anderem [Lisowski & Wiedemann, 1998; Huang et. al., 2002a; Luhmann & Tecklenburg, 2004; Krüger et. al., 2005; Schneider & Maas 2006; Amiri Parian, 2007]. Das in der gemeinsamen Auswertung mit terrestrischen Laserscannern verwendete geometrische Modell der Panoramaabbildung wird in Kapitel 4.2 detailliert erläutert.

3.2.2.1 Analoge Panoramakamera

Abhängig von der Funktionsweise lassen sich zwei Grundtypen analoger Panoramakameras unterscheiden, zum einen ortsfeste Kameras mit bewegtem Objektiv (Schwenkobjektiv) und zum anderen sich bewegende Kameras mit festem Objektiv [Regensburger, 1990].

Bei der ortsfesten Kamera ist der Film an der Innenseite eines Zylinders angeordnet und wird mittels eines Spaltes in der Bildebene streifenweise durch das rotierende Objektiv belichtet (Abbildung 3.3, links). Mit diesem Prinzip sind maximale Bildwinkel von weniger als 180° möglich. Mit einer Panoramakamera mit fest eingebautem Objektiv ist hingegen eine ganze Umdrehung realisierbar. Dabei muss die Winkelbewegung der Kamera mit einem Filmtransport während der Aufnahme kombiniert werden (Abbildung 3.3, rechts).

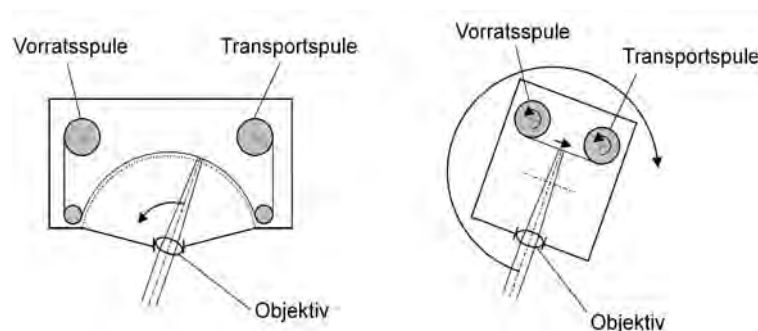


Abbildung 3.3: Grundprinzipien analoger Panoramakameras
(feste Panorama-kamera mit bewegtem Objektiv (links)
und bewegte Kamera mit festem Objektiv (rechts))

Bekannte Vertreter analoger Panoramakameras sind die Roundshot der Firma SEITZ (Schweiz), die Horizon 202 von KMZ (Krasnogorsky Mekhanichesky Zavod, Russland) und die Noblex 135 (Kamera Werk Dresden, Deutschland).

3.2.2.2 Digitale Panoramakamera

Durch die Verwendung von digitalen Zeilensensoren in der Bildebene kann bei dem analogen Panoramaaufnahmeprinzip mit kamerafestem Objektiv (Abbildung 3.3, rechts) auf die Mechanik des Filmtransports verzichtet werden. Stattdessen muss der Zeilensensor mit einer der Drehgeschwindigkeit der Kamera angepassten Frequenz ausgelesen werden. Wegen der Verwendung von Zeilensensoren werden digitale Panoramakameras auch als Rotationszeilenkameras bezeichnet. Die Drehbewegung kann entweder durch einen Schrittmotor oder durch einen kontinuierlichen Antrieb erfolgen. Das Prinzip der Aufnahme wird in Abbildung 3.4 veranschaulicht.

Digitale Panoramakameras bieten im Vergleich zu Digitalkameras mit Flächensensoren ein hohes Auflösungspotenzial zu vergleichsweise geringen Kosten. Bei Verwendung von CCD-Zeilen mit 10 000 Pixel Länge entstehen bei einer 360° -Aufnahme Panoramabilder mit bis zu einer Milliarde Bildelementen (1 Gigapixel). Ein weiterer Vorteil einer mit einem Zeilensensor arbeitenden Kamera ist die Möglichkeit, volle Farb-Informationen ohne Interpolation aufzunehmen, da der Zeilensensor in der Regel aus 3 parallelen CCD-Zeilen (trilinearer Sensor) besteht. Dabei ist jeweils eine Sensorzeile für rotes, grünes und blaues Licht empfindlich. Die effektive Auflösung erhöht sich dadurch zusätzlich. Ein wichtiger Nachteil der Zeilensensor-Kamera gegenüber konventionellen Kameras ist, dass nur statische Objekte aufgenommen werden können, die sich während des Scan-Vorganges nicht bewegen. Dadurch wird die Anwendung solcher Kameras eingeschränkt.

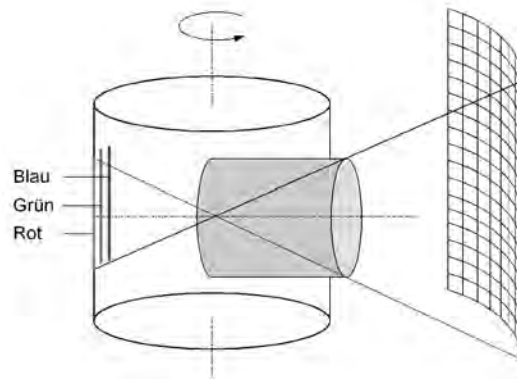


Abbildung 3.4: Aufnahmeprinzip einer Rotationszeilenkamera

Außerdem stellt die Beleuchtung des Objektes bei der Bildaufnahme eine besondere Schwierigkeit dar. Soll ein 360°-Panorama aufgenommen werden, ist es kaum möglich, eine Einstellung für Blende und Integrationszeit zu finden, die für jede Blickrichtung optimal ist. Vor allem bei Sonnenlicht sind zum einen unterbelichtete Schattenbereiche und zum anderen überbelichtete Bereiche im Bild vorzufinden. Deshalb ist in vielen Fällen eine nachträgliche Anpassung mittels digitaler Bildbearbeitung notwendig, will man visuell ansprechende Panoramen erhalten. Eine andere Möglichkeit ist die automatische Belichtungssteuerung während der Aufnahme. Dabei wird entweder Blende oder Integrationszeit permanent den aktuell vorherrschenden Beleuchtungsverhältnissen angepasst. Für die Aufnahme in Innenräumen bietet sich die Verwendung künstlicher Lichtquellen an. Dies kann jedoch kein Blitzlicht sein, da die Synchronisation der Blitzfrequenz mit der Auslesefrequenz technisch schwierig ist. Deshalb eignet sich hier eher eine dauerhafte Beleuchtung, die sich mit der Kamera mitdreht.

Digitale Panoramakameras sind beispielsweise die SpheroCam (Spheron), die SastaDigital DRS 5000 (Innotech-HT) und die EYESCAN M3D metric (Kamera & System Technik).

3.2.3 Panoramakamera KST EYESCAN M3D metric

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation wurde hauptsächlich die Panoramakamera EYESCAN M3D metric verwendet. Deshalb wird diese Kamera in diesem Kapitel ausführlicher beschrieben. Es handelt sich um ein digitales Rotationskamerasystem der Firma KST Dresden, welches in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt wurde [Scheibe et. al., 2001]. Das System hat folgenden grundsätzlichen Aufbau:

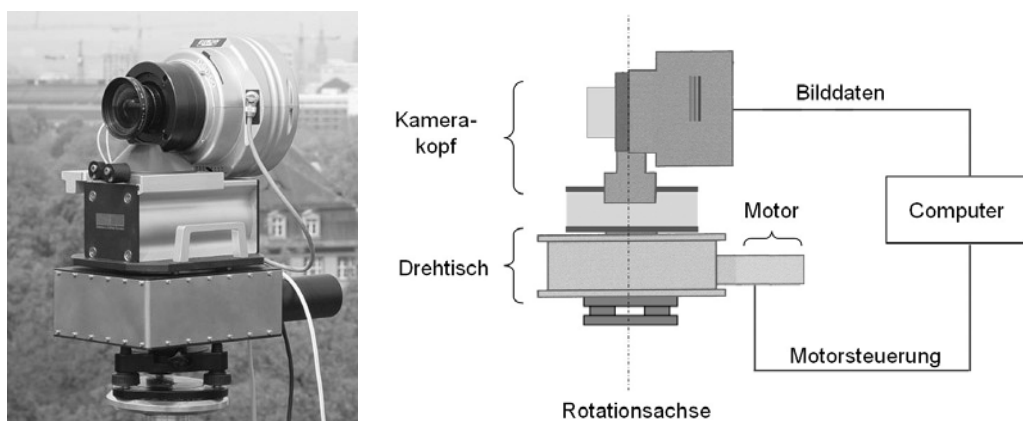


Abbildung 3.5: Panoramakamera EYESCAN M3D metric und schematische Darstellung

Kamerakopfmodul und Antriebsmodul bilden eine Einheit, an deren Unterseite ein Steckzapfen zum Befestigen der Kamera in einem Dreifuß angebracht ist. Damit ist es möglich, die Kamera auf ein geodätisches Stativ aufzusetzen. Da außerdem die Achse des Steckzapfens bis auf geringe Fertigungstoleranzen mit der Rotationsachse identisch ist, können bekannte Zentrier- und Horizontiergeräte, wie z.B. ein optisches Lot, eingesetzt werden.

3.2.3.1 Kamerakopf

In der Bildebene der Kamera ist eine trilineare CCD-Zeile der Firma KODAK parallel zur Rotationsachse angebracht, wobei jeweils eine Sensorzeile für rotes Licht, grünes Licht und für blaues Licht empfindlich ist. Die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit wird durch Filter, die auf den Sensorelementen angebracht sind, erreicht. Die Daten des Rot- und des Blaukanals werden softwareseitig auf den Grünkanal verschoben, so dass keine horizontalen Farbsäume vorhanden sind. Für jedes Pixel liegt schließlich die volle RGB-Information vor. Die einzelnen Zeilen liegen 22 Pixel auseinander, wobei der Pixelabstand horizontal und vertikal $7\mu\text{m}$ beträgt. Jede Zeile besteht aus 10 200 aktiven Elementen. Um eine zu starke Wärmeentwicklung während der Aufnahme zu vermeiden und damit das Dunkelrauschen des Sensors zu verringern, wurde unmittelbar hinter der CCD-Zeile ein passives Kühlsystem installiert.

Eine spezielle Vorrichtung an der Kamera erlaubt es, den Kamerakopf bezüglich des Drehtisches auf einer optischen Bank zu verschieben. Damit besteht die Möglichkeit, die Lage des Kamerakopfes so zu verändern, dass sich auch bei Verwendung von Objektiven mit unterschiedlicher Brennweite das Projektionszentrum annähernd in der Rotationsachse befindet. Der genaue Verschiebebetrag richtet sich nach der jeweiligen Brennweite und wird über schwenkbare Metallanschlüsse an der optischen Bank realisiert. Standardmäßig ist die Nutzung von Digital-Hochleistungsobjektiven für Mittelformatkameras der Firma Rodenstock mit Nennbrennweiten von 28 bis 180 mm möglich. Dadurch ergeben sich folgende Aufnahmeparameter:

Objektiv	28 mm	35 mm	45 mm	60 mm	100 mm	180 mm
Öffnungswinkel	100°	80°	62°	47°	28°	16°
Bildformat (360°)	250 Megapixel	310 Megapixel	400 Megapixel	540 Megapixel	890 Megapixel	1,6 Gigapixel
Datenvolumen (360°, 48 Bit)	1,4 GB	1,7 GB	2,3 GB	3,0 GB	5,0 GB	9,0 GB
Aufnahmedauer (360°, Integrationszeit: 5 ms)	2 min	2,4 min	3,1 min	4,1 min	6,9 min	12,4 min

Tabelle 3.1: EYESCAN M3D metric: Aufnahmedaten für verschiedene Objektive

Da die Objektive eine Festfokussierung besitzen, muss die Sensorebene bezüglich des Objektives für die Aufnahme verschiedener Entfernungsbereiche um die sog. Auszugsverlängerung so verschoben werden, dass eine Scharfabbildung entsteht. Dies geschieht mittels einer fünfstufigen Fokussiereinheit, die sich zwischen dem Objektiv und dem Kamerakörper befindet. Damit wird gleichzeitig gewährleistet, dass sich die Lage des Projektionszentrums bezüglich der Rotationsachse nicht verändert. Weil dadurch allerdings der Abstand zwischen Fokalebene und Rotationsachse variiert, ändert sich auch der Radius des Abbildungszyinders. Dem muss unter anderem bei der Berechnung der Drehgeschwindigkeit der Kamera Rechnung getragen werden.

3.2.3.2 Antrieb

Bei dem Antrieb der Rotationszeilenkamera EYESCAN M3D metric handelt es sich um einen Präzisionsdrehtisch mit Schneckengetriebe und einen Servomotor. Das Genauigkeitspotenzial der Kamera hängt stark von der Präzision des Antriebssystems ab. Es sollte zwei wichtige Anforderungen erfüllen. Zum einen sollte es stabil in einem möglichst großen Drehzahlbereich laufen und zum anderen sollte es über einen PC ansteuerbar sein, damit die Drehgeschwindigkeit durch die Kamerasoftware an unterschiedliche Integrationszeiten

angepasst werden kann. Außerdem sollte der verwendete Drehtisch eine hohe Laufruhe besitzen, damit die Bildaufnahme nicht durch Vibrationen gestört wird.

3.2.4 Anwendungen in der Photogrammetrie

Panoramakameras werden bereits seit den ersten Entwicklungen auch für photogrammetrische Zwecke eingesetzt. Dazu zählen Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie genauso wie in der Luftbildphotogrammetrie. Die ersten Panoramakameras für photogrammetrische Aufgaben wurden von Porro und Chevallier im Jahre 1858 entwickelt. Jedoch konnten sich diese Kameras wegen der unpräzisen mechanischen Antriebe und der komplizierten Abbildungsgeometrie nicht erfolgreich behaupten. Erst später, durch die Kombination der Kameras mit Theodoliten, wurden Panoramakameras in der terrestrischen Photogrammetrie immer häufiger eingesetzt.

Auch für die Luftbildphotogrammetrie wurden in der Vergangenheit Panoramakameras entwickelt, bei denen die Abbildung der Erdoberfläche auf einen Zylindermantel erfolgt. Der Vorteil der sehr großen Blickwinkel wurde bei militärischen Erkundungsflügen oft zur Erfassung eines von Horizont zu Horizont reichenden Geländestreifens rechtwinklig zur Flugrichtung ausgenutzt, um anschließend kleinmaßstäbige Karten großer Bereiche herzustellen.

Heute sind Panoramakameras, insbesondere digitale Panoramakameras mit hoher geometrischer Auflösung, vor allem im Bereich der Architekturphotogrammetrie interessant, beispielsweise zur Strich- und Schadenskartierung ebener Fassaden (Fassadenpläne), aber auch für industrielle Aufgaben und Sonderanwendungen, z.B. im Bereich der Forensik. Viel versprechende Möglichkeiten bietet auch die Kombination mit terrestrischen Laserscannern. Die Einsatzbereiche sind bei diesem Rotationszeilen-Aufnahmeprinzip aber immer auf statische Objekte beschränkt.

Im Folgenden werden photogrammetrische Aufnahme- und Auswerteverfahren für Panoramabilder, getrennt nach Einzelbild-, Stereo- und Mehrbildauswertung, aufgezeigt. Dabei wird vor allem auf die Besonderheiten bei der photogrammetrischen Nutzung von Panoramen eingegangen und Anwendungsbeispiele vorgestellt.

3.2.4.1 Einzelbildauswertung

Einzelne Panoramaaufnahmen können mittels räumlichem Rückwärtsschnitt orientiert und die verwendete Kamera gleichzeitig kalibriert werden. Zur Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes muss das geometrische Abbildungsmodell bekannt sein (vgl. Kapitel 4.2). Werden die Bildkoordinaten von mindestens drei bekannten Objektpunkten im Panorama gemessen, kann die äußere Orientierung der Panoramaaufnahme berechnet werden. Durch Verwendung weiterer räumlich gut verteilter Objektpunkte können außerdem die innere Orientierung und zusätzliche Parameter (Kalibrierparameter) bestimmt werden.

Ein auf diese Weise orientiertes Panorama kann in verschiedenen Anwendungen photogrammetrisch genutzt werden, bei denen eine Zuordnung zwischen den Bildinformationen und dem Objektkoordinatensystem notwendig ist. Beispielsweise kann ein vorhandenes 3D-Modell texturiert oder Laserscanner-Punktwolken koloriert werden. Wenn zusätzlich ein Oberflächenmodell des Objektes bekannt ist, können darüber hinaus Objektkoordinaten bestimmt werden (Monoplotting) oder durch differentielle Entzerrung ein Orthobild (Parallelprojektion) einer Objektoberfläche hergestellt werden (Abbildung 3.6).

In [Luhmann & Tecklenburg, 2005] wird die Entzerrung eines Panoramabildes auf eine ebene Oberfläche vorgestellt und das Ergebnis mit dem aus mehreren Einzelbildern einer zentralperspektiven Kamera zusammengesetzten Orthophotos unter photogrammetrischen Aspekten verglichen. Beide Methoden lieferten ähnliche Genauigkeiten.

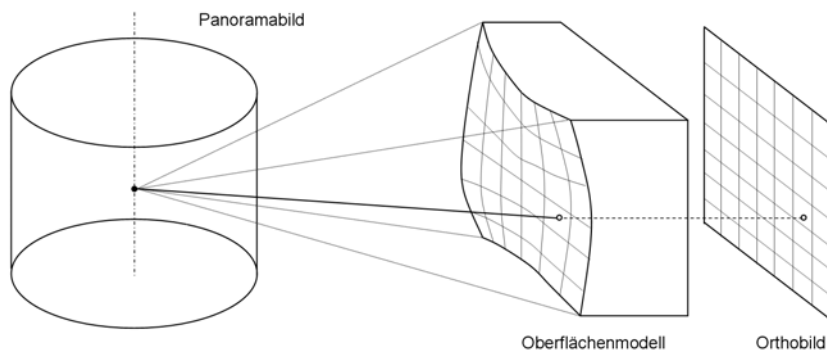


Abbildung 3.6: Prinzip der Orthobilderstellung aus einem 360°-Panorama

Im Unterschied zur Einzelauswertung zentralperspektiver Bilder können mit Panoramabildern 360°-Umgebungen mit nur einem Bild ausgewertet werden. Dies ist beispielsweise bei der Orthobilderstellung von mehreren umliegenden Fassaden einen Innenhofes im Bereich der Architekturphotogrammetrie sinnvoll, zumal digitale Panoramabilder meist eine vergleichsweise hohe Auflösung aufweisen. Allerdings müssen dafür mehrere Entzerrungsebenen definiert werden. Deshalb kommt in einigen Anwendungen auch die Definition einer zylindrischen Abbildungsfläche in Betracht, zum Beispiel bei der Aufnahme von Elementen eines Deckengewölbes oder Innenräumen mit rundem Grundriss.

• Tangentialbilder

Für die genannten photogrammetrischen Auswertemethoden von Panoramabildern muss eine entsprechende Software verwendet werden, die das geometrische Abbildungsmodell von Panoramakameras unterstützt. Will man jedoch andere Auswerteprogramme benutzen, ist es auch möglich, Panoramabilder mittels einer Tangentialprojektion in zentralperspektive Ansichten zu überführen. Dazu wird rechnerisch eine Tangentialebene an den Panorama-Zylindermantel gelegt und die Bildinformation auf diese Ebene projiziert (Abbildung 3.7).

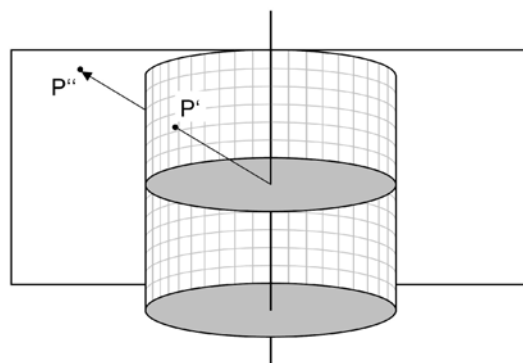


Abbildung 3.7: Tangentialprojektion eines Panoramas in eine zentralperspektive Ansicht

Die Grauwerte des Tangentialbildes werden mittels direkter oder indirekter Interpolation berechnet. Mit diesem Verfahren sind Aufnahmen mit Panoramawinkeln von weniger als 180° transformierbar. Praktisch sinnvolle Grenzwerte für den Panoramawinkel liegen zwischen 130° und 140°. Das bedeutet, dass 360°-Panoramen in mindestens 3 Tangentialbilder aufgeteilt werden müssen. Die äußere und innere Orientierung des Tangentialbildes kann auf einfache Weise aus der Orientierung des Panoramabildes abgeleitet werden.

Das folgende Bildbeispiel zeigt die Tangentialprojektion eines Panoramaausschnittes einer Fassade (Abbildung 3.8, links). Da es sich bei der Tangentialprojektion um eine ebene Abbildung handelt (Abbildung 3.8, mitte), ist es beispielsweise möglich, anschließend eine Projektivtransformation (ebene Entzerrung) zu berechnen. Dies wurde für das dargestellte Tangentialbild der Fassade durchgeführt (Abbildung 3.8, rechts). Als Entzerrungsebene diente hier eine mittlere Fassadenebene. Für die Projektivtransformation muss das Panorama- oder Tangentialbild nicht orientiert werden, sondern es müssen lediglich acht Transformationskoeffizienten mit Hilfe von mindestens vier identischen Punkten berechnet werden.



Abbildung 3.8: Panoramaausschnitt ca. 90°, Tangentialbild, ebene Entzerrung (v.l.n.r.)

- Andere Projektionen

Neben der Tangentialprojektion kommen für bestimmte Anwendungen auch andere Projektionsrichtungen des Panoramabildes zum Einsatz. Dazu gehört die Projektion der Panoramabildinformation auf eine orthogonal zur Rotationsachse angeordnete Ebene (Abbildung 3.9).

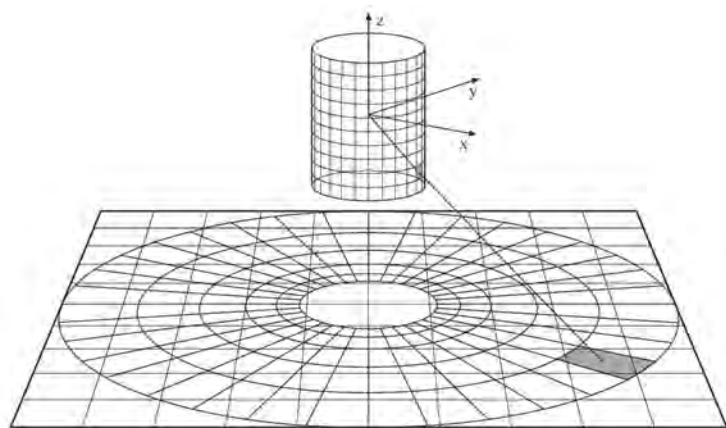


Abbildung 3.9: Projektion auf eine Ebene orthogonal zur Rotationsachse

Diese Panorama-Projektionsart wurde zum Beispiel testweise bei der Sichtfeldprüfung von mobilen Arbeitsmaschinen (Bagger, Kräne, Traktoren) eingesetzt. An allen mobilen Arbeitsmaschinen muss das Sichtfeld des Operators bestimmt werden und die Einhaltung gesetzlicher Mindestanforderungen kontrolliert werden. Das dafür bisher angewendete Verfahren basiert auf dem Schattenwurf einer auf den Fahrersitz gestellten Lampe. Die durch die Bauteile der Arbeitsmaschine verursachten Schatten auf der Bodenebene werden dabei manuell ausgemessen (Abbildung 3.10, links). Durch ein 360°-Panoramabild aus dem Führerhaus (Abbildung 3.10, rechts) und eine rechnerische Projektion auf eine definierte Bodenebene kann das bisherige Verfahren weitestgehend automatisiert werden [Hoske & Kunze, 2004].



Abbildung 3.10: Prinzip der Schattenwurfmethode und Panorama aus einem Baggerführerhaus

3.2.4.2 Stereoauswertung

Auch mit Panoramabildern ist es grundsätzlich möglich, stereoskopische Auswertungen durchzuführen. Dazu gehört unter anderem die interaktive Bestimmung der Koordinaten von Objektpunkten mittels räumlichem Vorwärtsschnitt und die automatische Erfassung von Freiformoberflächen durch Verfahren der Stereobildzuordnung. Dabei ist es ebenso möglich, statt der unabhängigen Orientierung der Panoramen im räumlichen Rückwärtsschnitt erst die relative Orientierung der Panoramen zueinander und anschließend die absolute Orientierung vorzunehmen. Bei Verwendung von Panoramabildern zur Stereoauswertung sind bezüglich der Aufnahmeanordnung einige Besonderheiten aufgrund ihrer geometrischen Eigenschaften zu beachten.

- Horizontale und vertikale Stereobasis

Soll eine Objektoberfläche mit Panoramabildern stereoskopisch ausgewertet werden, ist wie auch bei zentralperspektivischen Bildern auf ein geeignetes Basis-Höhenverhältnis zu achten. Jedoch lässt sich durch die Anordnung von zwei Aufnahmestandpunkten mit horizontaler Basis (Abbildung 3.11, links) keine 360°-Umgebung vollständig auswerten, da sich mit Veränderung der Raumrichtung auch das Basis-Höhenverhältnis verändert. Die Basiskomponente senkrecht zur Aufnahmeachse wird in Verlängerung der Basis Null, wodurch kein Strahlenschnitt mehr vorhanden ist. Es werden für die komplette stereoskopische Auswertung eines Innenraumes also mindestens drei Panoramabilder in nicht kollinearer Anordnung benötigt. Für die Auswertung selbst ist es unerheblich, ob mit dem Panoramabild oder mit abgeleiteten Tangentialbildern gearbeitet wird. Es sei darauf hingewiesen, dass die Ableitung eines Tangentialbild-Stereopaars, welches dem Stereornormalfall entspricht (parallele Aufnahmeachsen rechtwinklig zur Stereobasis), mit einfachen Mitteln bewerkstelligt werden kann, wenn die Panoramen vorab orientiert wurden. Dies ist vor allem für die Stereobetrachtung notwendig.

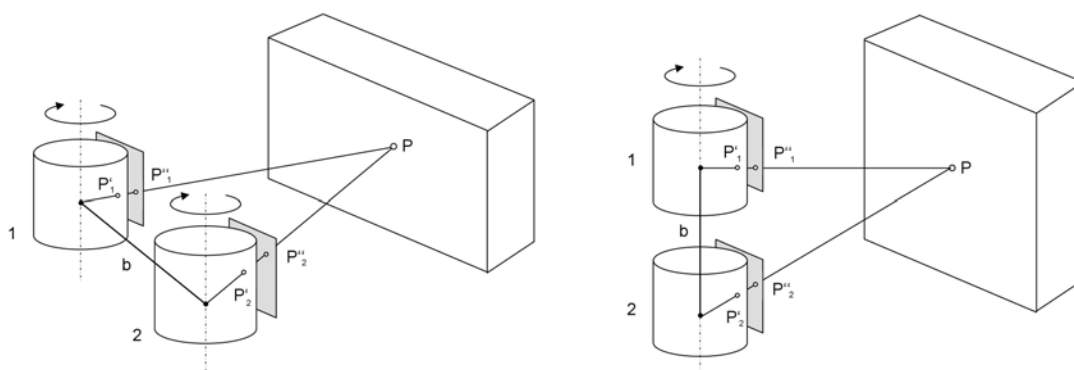


Abbildung 3.11: Stereo-Aufnahmeanordnung für Panoramabilder: horizontale Basis und vertikale Basis

Eine weitere mögliche Stereo-Konfiguration ist durch die vertikale Anordnung der Panoramabilder gegeben (Abbildung 3.11, rechts). Dadurch sind für eine 360°-Umgebung prinzipiell zwei Panoramen ausreichend, jedoch ist die Länge der Basis praktisch stark eingeschränkt (z.B. durch die maximale Höhe des Stativs). Bei großen Aufnahmeentfernungen kommt es dadurch zu ungünstigen Basis-Höhen-Verhältnissen, was zu schlechten Strahlenschnitten und damit zu geringen Genauigkeiten in Tiefenrichtung führt. Deshalb ist die Stereoanordnung mit vertikaler Basis hauptsächlich auf kleinere Räume beschränkt. Beispielsweise bietet der Panoramakamera-Hersteller Spheron eine entsprechende Hardware- und Software-Lösung für die einfache 3D-Vermessung basierend auf der Stereo-Konfiguration mit vertikaler Basis an, die durch ein ausfahrbares Stativ realisiert wird. Haupteinsatzgebiet dieses Systems ist die Vermessung von Unfall- und Tatorten (Forensik).

- „Off-Axis“-Stereo

Einen Sonderfall der Stereoanordnung von Panoramabildern stellt das „Off-Axis“-Prinzip dar [Huang et. al., 2002b]. Dabei wird die Panoramakamera und damit das Projektionszentrum aus der Rotationsachse um die Exzentrizität e herausgeschoben und um den Winkel α für die erste Aufnahme nach links und für die zweite Aufnahme nach rechts verschwenkt (Abbildung 3.12).

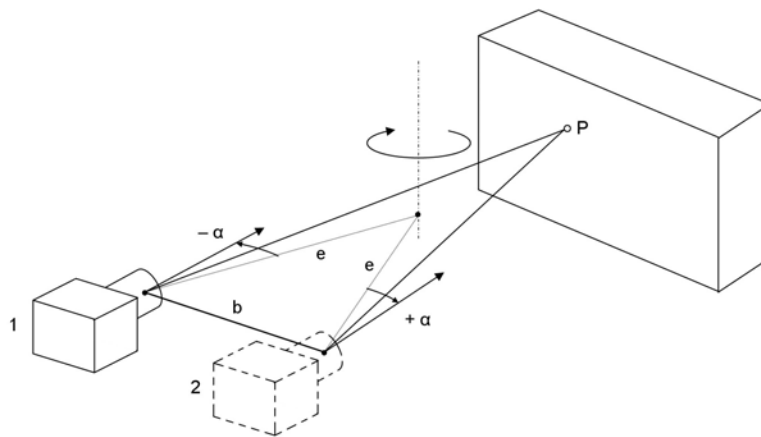


Abbildung 3.12: "Off-Axis"-Stereo-Anordnung für Panoramabilder

Dadurch entstehen Panorama-Stereobildpaare mit in alle horizontalen Raumrichtungen gleichlanger horizontaler Basis. Je nach Kombination von e und α kann die Länge der Basis variiert werden. Der Panoramakamera-Hersteller Kamera & System Technik Dresden bietet dafür eine entsprechende Verschiebe- und Schwenkeinrichtung an. Jedoch muss bei der Auswertung solcher Panoramabilder die stark veränderte Geometrie berücksichtigt werden.

Die „Off-Axis“-Geometrie weist Ähnlichkeit mit dem in [Heikkinen, 2005] vorgestellten Ansatz auf, bei dem eine zentralperspektive Kamera so auf einem Stativ montiert wird, dass sich das Projektionszentrum auf einer Kreisbahn um die Stehachse des Statives bewegt und die Aufnahmerichtung eine Tangente an diesen Kreis darstellt. Damit wird dann ein Verband zentralperspektiver Bilder (anstelle eines einzigen 360°-Panoramabildes) aufgenommen. Die Kamera wird dann zur Aufnahme eines zweiten Bildverbandes um 180° gedreht. Es wurde gezeigt, dass die beiden auf diese Weise aufgenommenen Bildverbände zur 3D-Objektrekonstruktion geeignet sind. Dabei wurde die Nebenbedingung in die Auswertung eingeführt, dass der Abstand zwischen Projektionszentrum und Rotationsachse konstant ist.

- Kernliniengeometrie

Zur Unterstützung der Punktzuordnung zweier zueinander orientierter Aufnahmen wird gewöhnlich die Kernliniengeometrie berücksichtigt. Die Suche nach einem homologen Punkt im zweiten Bild eines im ers-

ten Bild gefunden Bildpunktes erfolgt entlang der Kernlinie (z.B. mittels Kreuzkorrelation), was den Suchraum erheblich einschränkt und damit die Zuverlässigkeit der Zuordnung als auch die Rechenzeit stark reduziert. In einem Panoramabild ist die Kernlinie im Allgemeinen allerdings keine Gerade, sondern die Schnittkurve K' zwischen der durch die Projektionszentren und den Raumstrahl $O'P'$ aufgespannten Kernebene und dem Panoramazylinder (Abbildung 3.13) [Luhmann et. al., 2006]. Der Suchraum kann weiter eingeschränkt werden, wenn näherungsweise die Entfernung zum Objektpunkt bekannt ist.

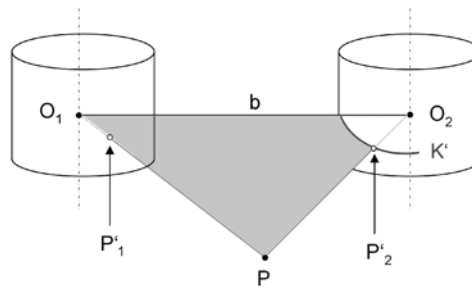


Abbildung 3.13: Panorama-Kernliniengeometrie

3.2.4.3 Mehrbildauswertung

Die Mehrbildauswertung von mehr als zwei 360°-Panoramabildern (Abbildung 3.14) ermöglicht die Bestimmung von im Raum verteilten Objektpunkten oder die direkte Bestimmung geometrischer Elemente (Gerade, Kreis, Kugel, etc.) in einer 360°-Umgebung. Dies kann entweder durch einen allgemeinen räumlichen Vorwärtsschnitt geschehen, wenn die Panoramen vorab bereits orientiert und die Kameras kalibriert wurden, oder im Rahmen der Berechnung einer Bündelblockausgleichung, bei der die Objektinformationen, die Orientierungen der beteiligten Panoramabilder und die Kalibrierung der Kameras simultan durchgeführt wird (Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung). Wird das Objekt zusätzlich mit einem terrestrischen Laserscanner aufgenommen, können für die Panorama-Bündelblockausgleichung sehr gute Näherungswerte für die Objektkoordinaten bereitgestellt werden.

Der Vorteil der Panorama-Mehrbildauswertung gegenüber der Verwendung zentralperspektiver Aufnahmen besteht darin, dass für die Auswertung von 360°-Innenraumgeometrien wesentlich weniger Bilder aufgenommen werden müssen, da die Panoramen sich – abgesehen von Verdeckungen – stark überlappen. Dadurch müssen weniger Orientierungselemente bestimmt werden, was zu einer höheren Redundanz des Ausgleichungssystems führt. Außerdem kommt auch der Vorteil des hohen Auflösungspotenzials der Panoramaaufnahmen zum Tragen. Nachteilig sind die längeren Aufnahmezeiten und die geringere Flexibilität der Aufnahmekonfiguration des Panorama-Scan-Prinzips im Vergleich zu One-Shot-Kameras (Notwendigkeit eines Stativs). Deshalb bietet sich in der Praxis eine Kombination von Panoramaaufnahmen mit zentralperspektiven Aufnahmen an. Dadurch kann die Strahlenschnittgeometrie gestärkt werden und gleichzeitig Bereiche, die in den Panoramabildern verdeckt sind, aufgenommen und in die Auswertung einbezogen werden [Schneider & Maas, 2005].

Die Mehrbildauswertung von Panoramabildern, ggf. in Kombination mit einem terrestrischen Laserscanner, kann in vielen Anwendungen in den Bereichen Architektur, Industrie, Facility Management, Forensik, etc. sinnvoll sein – überall dort, wo komplexe 360°-Umgebungen (Innenräume, Plätze, Industrieanlagen) aufgenommen werden müssen.

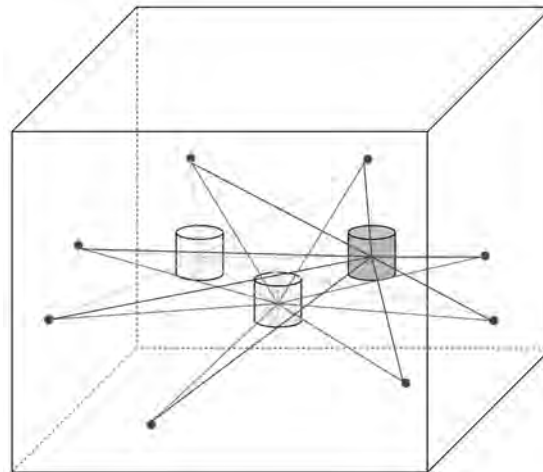


Abbildung 3.14: Prinzip der Mehrbildauswertung mit Panoramabildern

3.2.4.4 Genauigkeitspotenzial

Das Genauigkeitspotenzial einer Panoramakamera hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu zählen die geometrische Auflösung des Sensors, die Stabilität während der Aufnahme, die Übereinstimmung des geometrischen Modells (vgl. Kapitel 4.2) mit der physikalischen Realität und die Konstanz der Kalibrierparameter. Die Genauigkeit der Kamera in einer speziellen Anwendung hängt darüber hinaus noch von der Objektsignalisierung, und bei der Mehrbildauswertung auch von der Strahlenschnittgeometrie ab.

Eine Panoramakamera bietet, wie bereits erwähnt, die Möglichkeit einer hohen geometrischen Auflösung durch Verwendung von Zeilensensoren, die zusätzlich dadurch erhöht wird, dass keine Farbinterpolation notwendig ist, sondern die volle RGB-Information für jedes Pixel vorliegt. Die Stabilität der Aufnahme ist bei der Panoramakamera ein entscheidender, die Genauigkeit einschränkender Faktor. Durch die verhältnismäßig lange Aufnahmezeit pro Bild können sich viele Faktoren negativ auf die Genauigkeit der Abbildung auswirken. Dabei sind vor allem Instabilitäten, die von der Rotation der Kamera ausgehen, sowie Vibrationen, die über das Stativ übertragen werden, zu nennen.

In praktischen Untersuchungen (vgl. Kapitel 5.1.1) konnte das Genauigkeitspotenzial der Panoramakamera EYESCAN M3D metric mit ca. 1/4 Pixel im räumlichen Rückwärtsschnitt in einem 360°-Kalibrierraum mit ca. 220 gut verteilten retro-reflektierenden Zielmarken bestimmt werden. Auch durch die Berechnung einer Bündelblockausgleichung als freies Netz in einem anderen Kalibrierraum konnte dieser Wert bestätigt werden. Überträgt man diesen Wert unter Berücksichtigung der Kamerakonstante des verwendeten Objektivs in den Objektraum, erhält man den in Abbildung 3.15 dargestellten Zusammenhang für das laterale Genauigkeitspotenzial (mit $c = 35 \text{ mm}$).

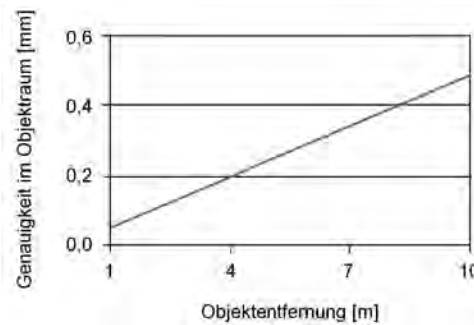


Abbildung 3.15: Genauigkeitspotenzial (lateral) der Panoramakamera EYESCAN M3D metric

Das Genauigkeitspotenzial im Bildraum ist geringer als bei zentralperspektiv abbildenden One-Shot-Kameras. Wird die Genauigkeit allerdings relativ zum Bildformat beschrieben, ergeben sich vergleichbar hohe Werte (Länge der Sensorzeile: 70 mm, Pixelgröße: 7 μm , ergibt eine Relativgenauigkeit von 1 : 40 000). In 10 m Entfernung (Objektdimension: 20 m) entspricht das (laterale) Genauigkeitspotenzial der getesteten Panoramakamera ca. 0,5 mm.

3.3 Fisheye-Objektiv

Kameras mit Flächensensoren zeichnen sich in der Regel durch eine zentralperspektive Abbildung aus. Dies gilt jedoch nicht bei Verwendung von Fisheye-Objektiven (Abbildung 3.16, links). Das sind Objektive mit einer extrem kurzen Brennweite im Vergleich zur Bildgröße und mit Öffnungswinkeln bis zu 180° und mehr. Damit sind sie in der Lage, große Bereiche der Umgebung in einem einzigen Bild festzuhalten (Abbildung 3.16, rechts). Bei einem Fisheye-Objektiv entspricht die aufgenommene Umgebung dem Winkelbereich einer Halbkugel, deshalb wird auch von einer hemisphärischen Abbildung gesprochen. Diese Abbildungsgeometrie ist, wie auch bei einer Panoramakamera (Kapitel 3.2), nicht mit der Geometrie der Zentralperspektive zu beschreiben, deshalb muss für deren photogrammetrische Nutzung ein gesondertes geometrisches Modell entwickelt werden (Kapitel 4.3). Das geometrische Modell wird in Kapitel 5.2 verifiziert.



Abbildung 3.16: Fisheye-Objektiv Nikkor 8 mm (links) und Fisheye-Bild (rechts)

Kameras mit Fisheye-Objektiv werden in der Literatur auch als „unechte Panoramakameras“ bezeichnet [Schröder, 1981]. Die Bildwirkung von Fisheye-Bildern ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Geraden, die nicht durch den Bildmittelpunkt verlaufen, stark gekrümmt sind. Dieser Eigenschaft verdankt das Fisheye-Objektiv auch seinen Namen, denn es soll der Sichtweise eines Fisches entsprechen, der aus dem Wasser durch die Wasseroberfläche nach oben schaut.

3.3.1 Einteilung von Fisheye-Objektiven

Fisheye-Objektive werden nach der Größe des Bildkreisdurchmessers im Verhältnis zum Bild- bzw. Sensorformat eingeteilt. Dabei unterscheidet man zwischen Rundbild- und Vollformat-Fisheye-Objektiven. Das Rundbild-Fisheye (zirkulares Fisheye) zeichnet sich dadurch aus, dass der Bildkreis des Objektives vollständig durch den Bildsensor erfasst wird. Dadurch bleiben Bereiche auf dem Sensor ungenutzt (Abbildung 3.17, links). Bei einem Vollformat-Fisheye (diagonales Fisheye) entspricht der Bildkreisdurchmesser der Diagonale des Bildformates. Allerdings wird der Öffnungswinkel von 180° dabei meist nur über die Bilddiagonale erreicht (Abbildung 3.17, rechts). Die auf dem Markt verfügbaren Objektive beziehen sich dabei standardmäßig auf die Haupt-Bildformate (z.B. Kleinbildformat, Mittelformat). Ist der Sensor kleiner (z.B. APS-C bei vielen Spiegelreflexkameras mit 24×16 mm) kann das 180° -Gesichtsfeld nicht vollständig abgebildet werden. Neben den Fisheye-Objektiven gibt es auch spezielle Fisheye- Konverter-Vorsätze für konventionelle Objektive. Die Modellierung und Kalibrierung solcher Konverterlinsen wird beispielsweise in [Backstein & Pajdla, 2002] beschrieben.

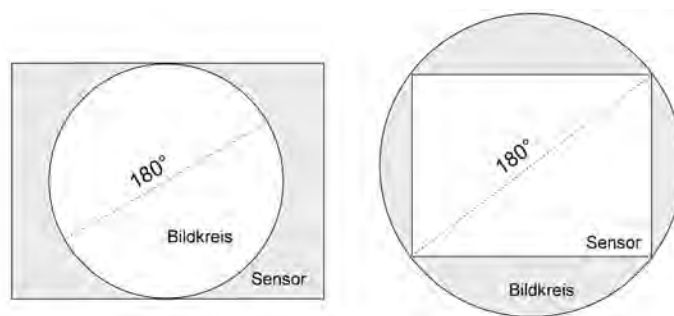


Abbildung 3.17: Rundbild-Fisheye (links) und Vollformat-Fisheye (rechts)

Zusätzlich unterscheiden sich Fisheye-Objektive durch ihre Abbildungsgeometrie. Es gibt äquidistant und flächentreu abbildende sowie orthografische Objektive [Prenzel, 1986]. Die entsprechenden geometrischen Modelle werden in Kapitel 4.3 detailliert erläutert. Die technische Konstruktion der meisten Fisheye-Objektive entspricht der äquidistanten oder der flächentreuen (raumwinkelgleichen) Abbildungsgeometrie. Vollformat-Fisheye-Objektive gehorchen hauptsächlich der flächentreuen Abbildung, bei der die Verzeichnung am Bildrand stärker ist als bei Fisheye-Objektiven mit äquidistanter Projektionsgeometrie. Die orthografische Abbildung kann nur mit relativ aufwendigen optischen Konstruktionen realisiert werden. Es gibt noch weitere Projektionsarten, die aber praktisch nicht realisierbar sind, sondern nur theoretisch, wie beispielsweise die winkeltreue (stereografische) Fisheye-Abbildung.

3.3.2 Anwendungen in der Photogrammetrie

3.3.2.1 Anwendungen

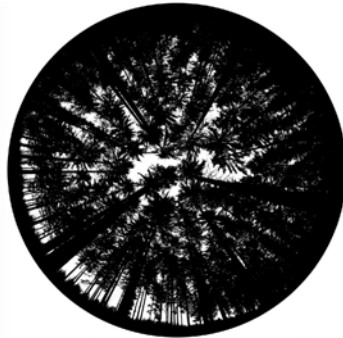
Durch ihren sehr großen Bildwinkel von meist 180° und in Ausnahmefällen sogar bis zu 220° haben sich Fisheye-Objektive zahlreiche (nicht-photogrammetrische) Anwendungen erschlossen. Sie werden beispielsweise zur Überwachung eingesetzt (z.B. in öffentlichen Gebäuden oder Verkehrsmitteln), zur Aufnahme von Übersichtsbildern (z.B. von Innenräumen oder Straßenszenen) oder in der Effekt-Photographie. Häufig werden Fisheye-Bilder auch im Internet präsentiert. Dazu werden die Bilder meist auf eine Zylinderoberfläche projiziert. Damit erhält man 360° -Panoramabilder, die mit Panorama-Viewer-Software interaktiv betrachtet werden können.

Im Vergleich zu den in Kapitel 3.2 beschriebenen Panoramakameras sind Fisheye-Objektive meist preiswerter, da sie mit konventionellen Kameras mit Flächensensor kombiniert werden. Der entscheidende Vorteil liegt jedoch darin, dass sie auch für die Aufnahme bewegter Objekte verwendet werden können, da es sich um

Momentaufnahmen handelt. Nachteilig ist die geringere geometrische Auflösung, die bei Fisheye-Systemen durch den Flächensensor der verwendeten Kamera beschränkt wird und die meist schlechtere Abbildungsqualität. Bei Farbbildern wirkt sich insbesondere die starke chromatische Abberation negativ auf die Bildqualität aus, allerdings gibt es Ansätze zur Korrektur dieses Effektes [Luhmann et. al., 2006; Schwalbe & Maas, 2006; van den Heuvel et. al., 2007].

Auch für photogrammetrische Aufgaben werden Fisheye-Kameras immer häufiger eingesetzt [Hellmeier, 1983], beispielsweise für die 3D-Aufnahme und -Auswertung von Innenräumen. Dabei lassen sich Teilbereiche eines Fisheye-Bildes auch in zentralperspektive Ansichten umwandeln, damit sie in photogrammetrischen Auswertprogrammen verarbeitet werden können.

In [Beers, 1997] wird die Anwendung eines Fisheye-Kamerasystems (CycloMedia Mapper), montiert auf dem Dach eines Autos, zur 3D-Aufnahme beschrieben. Darüber hinaus werden Fisheye-Objektive im Bereich der Forstwissenschaft verstärkt photogrammetrisch genutzt, z.B. zur quantitativen Beurteilung der Beleuchtungsbedingungen für Jungpflanzen [Schwalbe et. al., 2006]. Dabei wird die Aufnahmeachse des Fisheye-Kamerasystems meist lotrecht ausgerichtet, anschließend in den Bildern (z.B. Abbildung 3.18) strahlungsrelevante Bereiche des Kronendachs segmentiert und eine quantitative Angabe für die direkte Sonneneinstrahlung auf den Aufnahmepunkt abgeleitet.



*Abbildung 3.18: Fisheye-Bild in der Forstwissenschaft:
Kronendach eines Waldbestandes [Schwalbe et. al., 2006]*

3.3.2.2 Genauigkeitspotenzial

Trotz der schlechteren Abbildungsqualität im Vergleich zu zentralperspektiv abbildenden Objektiven ist es möglich, mit Fisheye-Objektiven Auswertungen mit Subpixel-Genauigkeit durchzuführen. Die Berechnung eines räumlichen Rückwärtsschnittes in einem speziell eingerichteten Kalibrierraum ergab einen Gewichtseinheitsfehler von 1/10 Pixel für das Fisheye-Objektiv Nikkor 8 mm in Kombination mit der Kamera Kodak DCS 14n (vgl. Kapitel 5.2.2). Übertragen in den Objektraum entspricht das einer Genauigkeit von 1 mm in 10 m Objektentfernung, unter Berücksichtigung der Pixelgröße und der Brennweite der verwendeten Fisheye-Kamera-Kombination. Dabei kam das in Kapitel 4.3 beschriebene geometrische Modell der äquidistanten Fisheye-Abbildung [Schwalbe, 2005] mit Zusatzparametern nach [Brown, 1971] zum Einsatz. In Kapitel 5.2 wird die Analyse des Genauigkeitspotenzial eines Fisheye-Objektives unter Anwendung verschiedener geometrischer Modelle im räumlichen Rückwärtsschnitt und in einer Bündelblockausgleichung näher beschrieben.

3.4 Weitere Möglichkeiten der Panoramabilderzeugung

Ergänzend zu den bereits vorgestellten Panorama-Aufnahmemöglichkeiten mit Rotationszeilenkamera und Fisheye-Objektiv sollen in diesem Kapitel weitere Möglichkeiten der Panoramabilderzeugung der Vollständigkeit halber aufgezeigt werden.

3.4.1 Panorama-Stitching

Bilder von herkömmlichen Analog- oder Digitalkameras werden bei dieser Methode der Panoramabilderzeugung zu einem Gesamtbild zusammengesetzt (Abbildung 3.19), um dem Betrachter einen besseren Eindruck von der Umgebung zu liefern. Viele Softwarehersteller bieten dafür Programme an, so z.B. „Photo Stitch“ (Canon) und „The Panorama Factory“ (Smoky City Design). Oft werden in diesem Zusammenhang auch die „Panotools“ von Helmut Dersch genannt, ein kostenfreies Plug-In für Adobe Photoshop.

Die Einzelbilder müssen eine entsprechende Überlappung aufweisen und sollten von einem Standpunkt mittels Stativ aufgenommen werden, um Verkantungen zu minimieren [Tecklenburg & Luhmann, 2002]. In einem ersten Schritt werden die zum Panorama gehörenden Bilder ausgewählt und in eine winkelbezogene sequentielle Reihenfolge gebracht. Aus jedem Bild erzeugt das Programm schließlich ein Panoramasegment durch Abbildung auf eine zylindrische oder sphärische Projektionsfläche (Umkehrung der Tangentialbildprojektion aus Kapitel 3.2.4.1). Die gegenseitige Anpassung der Panoramasegmente erfolgt mithilfe von Matching-Methoden unter Nutzung von Bildinformationen in den Überlappungsbereichen. Da die Aufnahmen trotz Stativ meist leicht verkantet sind und außerdem meist Amateurkameras verwendet werden, reichen die Matching-Verfahren oft nicht aus. Deshalb erzeugt das Programm Schnittkanten im Überlappungsbereich, an denen der Übergang von einem Panoramasegment zum nächsten erfolgt. Dieser Übergang wird durch Überblendungstechniken, die sich an den radiometrischen Inhalten der Bilder orientieren, realisiert.

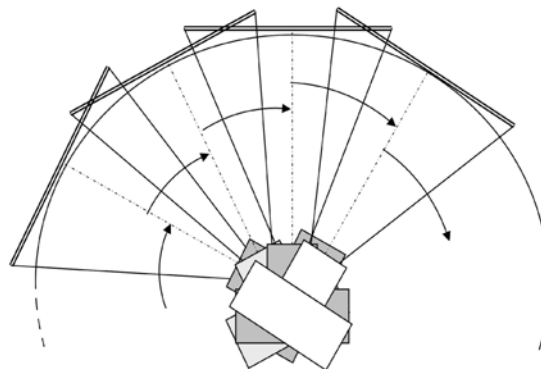


Abbildung 3.19: Prinzip des Panorama-Stitching

Diese Variante der Panoramaerzeugung ist sehr kostengünstig und wird deshalb oft für Internet-Präsentationen verwendet. Die Eignung auf diese Weise erstellter Panoramen für photogrammetrische Aufgaben ist relativ gering, da es aus photogrammetrischer Sicht kaum Vorteile gegenüber der Nutzung der dem Panorama zugrunde liegenden Einzelbilder bietet. Wenn die gegenseitige Orientierung der Einzelbilder jedoch sehr stabil ist, beispielsweise durch Verwendung einer entsprechenden Schwenk- und Neigevorrichtung, kann die photogrammetrische Nutzung eines solchen Panoramas sinnvoll sein, weil mit einer minimalen Anzahl von Orientierungsparametern für das gesamte Panorama gearbeitet werden kann [Haggren et. al., 2004; Remondino & Börlin, 2004].

3.4.2 Spiegel-Panorama

Eine weitere Möglichkeit der Aufnahme von Panoramabildern stellen sog. Spiegel-Panoramen dar [Svoboda, 1999]. Diese entstehen durch Reflexion an einer spiegelnden konvexen Oberfläche, die vor dem Objektiv der Kamera angebracht wird (Abbildung 3.20, links). Diese Technik wird seit über 25 Jahren eingesetzt, wurde aber erst in den letzten Jahren durch entsprechende benutzerfreundliche Entzerrungs-Software populär. Meistens werden parabolische, hyperbolische oder sphärische Spiegel eingesetzt, die entweder mit einem Spezialobjektiv fest verbunden sind oder als Vorsatz auf das vorhandene Objektiv gesteckt werden. Die entstehende Abbildung auf dem Sensor (rundes Bild mit Loch in der Mitte) kann unter Berücksichtigung der entsprechenden Spiegelgeometrie in ein zylindrisches 360°-Panoramabild (Abbildung 3.20, rechts) oder segmentweise auch in zentralperspektive Abbildungen entzerrt werden. Eine vertikal nach oben blickende Kamera hat damit einen horizontalen Öffnungswinkel von 360°.



Abbildung 3.20: Aufnahmeprinzip Spiegel-Panorama, Spiegel-Spezialobjektiv, Abbildung auf dem Sensor (Originalbild), umgewandeltes 360°-Panoramabild [Svoboda & Pajdla, 2000] (v.l.n.r.)

Der entscheidende Vorteil dieser Art der Panoramaaufnahme ist die Möglichkeit der Moment-Aufnahme bewegter Objekte, da es sich nicht um ein spannendes Aufnahmeprinzip handelt. Dazu ist keine spezielle Kamera nötig, es kann mit jeder beliebigen Kamera und einem (oft auch selbst gebauten) Spiegel-Vorsatz ein solches Panorama aufgenommen werden. Als nachteilig ist die oft schwer zu modellierende Geometrie der Konstruktion und der Spiegeloberfläche zu bewerten [Svoboda & Pajdla, 2002]. Zudem hängt die Bildqualität in hohem Maße von der Güte des verwendeten Spiegels ab. Die geometrische Auflösung wird durch die Größe und Pixelanzahl des Sensors der Kamera beschränkt. Wie auch bei den anderen Panorama-Aufnahmemethoden ist vor allem die Beleuchtung des Objektes problematisch: zum einen ist die gewählte Belichtungseinstellung (Blende, Belichtungszeit) der Kamera meist nicht für den gesamten Aufnahmebereich geeignet und zum anderen kann ein Blitzlicht nicht den gesamten Aufnahmebereich homogen ausleuchten.

Prinzipiell entsprechen die Vor- und Nachteile dieser Panorama-Aufnahmetechnik denen der Fisheye-Aufnahme. Der Unterschied besteht lediglich im Aufnahmewinkelbereich (Winkel zwischen dem einfallenden Lichtstrahl und der optischen Achse). Während das Fisheye-Objektiv Aufnahmewinkel zwischen 0° und ca. 90° erlaubt, können mit der Spiegel-Technik Aufnahmewinkel zwischen ca. 45° und ca. 135° realisiert werden, abhängig von der verwendeten Spiegelgeometrie. Daraus resultieren auch unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten für diese beiden Methoden.

3.4.3 Rotationszeilenkamera mit Kegelgeometrie

Diese Aufnahmetechnik basiert auf der in Kapitel 3.2 beschriebenen Panoramakamera. Wird der Kamerakopf der Rotationszeilenkamera um einen bestimmten Winkel gegen die Rotationsachse geneigt, beschreibt der Zeilensensor keinen Zylindermantel, sondern einen Kegelmantel (Abbildung 3.21).

Der Vorteil bei diesem Aufnahmeprinzip besteht in der für viele Anwendungen besseren Ausnutzung des vertikalen Öffnungswinkels. Beispielsweise ist es bei hohen Fassaden mit einer Panoramakamera, die die Bildinformation zylindrisch abbildet, oft schwer zu realisieren, die komplette vertikale Ausdehnung des Ob-

jektes zu erfassen. Stattdessen werden unwichtige Bereiche der Fußbodenebene abgebildet, da die Höhe des Stativs, auf dem die Kamera aufgebaut ist, nicht beliebig verändert werden kann. Hinzu kommt, dass dieses Problem meistens nicht durch größere Aufnahmeabstände kompensiert werden kann, da die Platzverhältnisse dies nicht zulassen.

In der Literatur werden bereits Untersuchungen mit entsprechend modifizierten Panoramakameras durchgeführt. Beispielsweise wird in [Scheibe et. al., 2001] die Aufnahme mit einer um 45° geneigten Panoramakamera und die Projektion der resultierenden Bilddaten in eine Ebene beschrieben.

Eine bessere Ausnutzung des vertikalen Öffnungswinkels lässt sich alternativ auch durch Verwendung von sog. Shift-Objektiven erreichen, bei denen das Linsensystem gegenüber dem Sensor parallel verschoben werden kann. Dadurch wird die Richtung der Abbildungsstrahlen, in ähnlicher Weise wie bei einer Rotationszeilenkamera mit Kegelgeometrie, variiert.

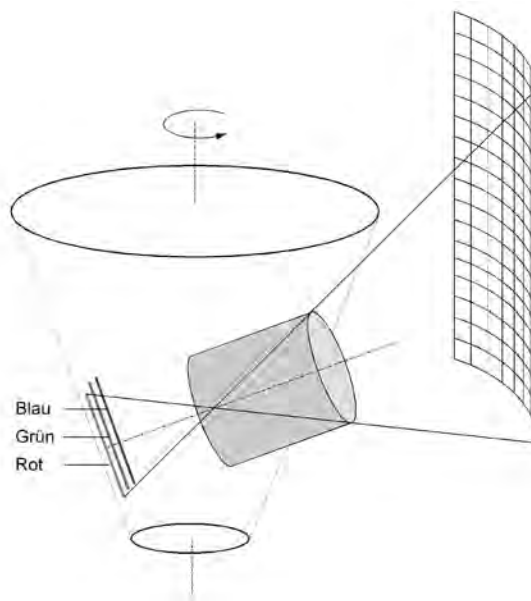


Abbildung 3.21: Prinzip einer Rotationszeilenkamera mit Kegelgeometrie

3.5 Terrestrischer Laserscanner

3.5.1 Definition und Prinzip

Laserscanner werden einerseits in Flugzeugen zur Abtastung der Erdoberfläche für die Erstellung digitaler Geländemodelle (Airborne Laserscanning) [Maas, 2005] und andererseits zur Nutzung für Nahbereichsanwendungen auf der Erdoberfläche (Terrestrisches Laserscanning) eingesetzt. Beide Verfahren sind durch eine ständige Weiterentwicklung und zunehmende Verbreitung gekennzeichnet.

Terrestrische Laserscanner werden seit einigen Jahren in den verschiedensten Anwendungen der Geodäsie und Photogrammetrie immer stärker genutzt (z.B. [Pfeifer & Briese, 2007]). Diese Geräte messen mit hoher Frequenz die Distanz zum reflektierenden Objekt, während der Zielstrahl permanent in horizontaler und vertikaler Richtung ausgelenkt wird (Abbildung 3.22, links). Sie sind somit in der Lage, Objektoberflächen dreidimensional abzutasten. Es entsteht eine sog. Punktwolke, die aus mehreren Millionen Einzelpunkten besteht, die die Objektoberfläche repräsentieren (vgl. Abbildung 3.23). Für jeden Einzelpunkt wird die Distanz zum Laserscanner, der Horizontalwinkel und der Vertikalwinkel aufgezeichnet. Üblicherweise werden diese sphärischen Koordinaten in kartesische Koordinaten (X , Y , Z) umgerechnet. Außerdem wird meist die Signalstärke

(bzw. Intensität) des vom Objekt reflektierten Laserstrahls als vierte Komponente erfasst. Abbildung 3.22 (mitte, rechts) zeigt zwei Vertreter terrestrischer Laserscanner.

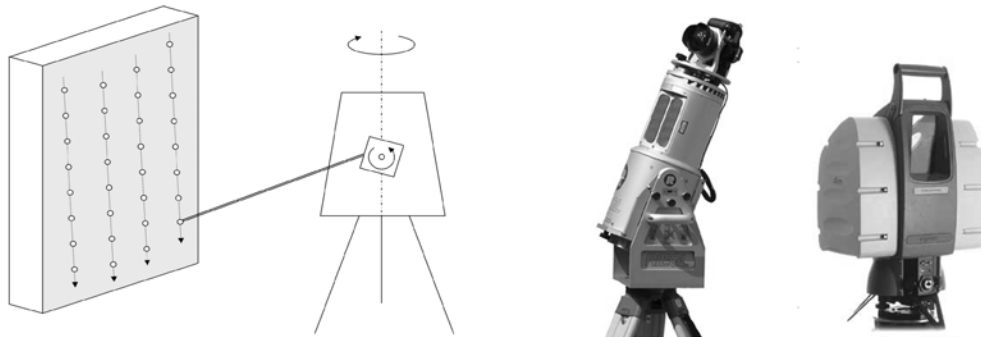


Abbildung 3.22: Aufnahmeprinzip terrestrischer Laserscanner (links), Terrestrischer Laserscanner Riegl LMS-Z420i (mitte), Terrestrischer Laserscanner Leica HDS 3000 (rechts)

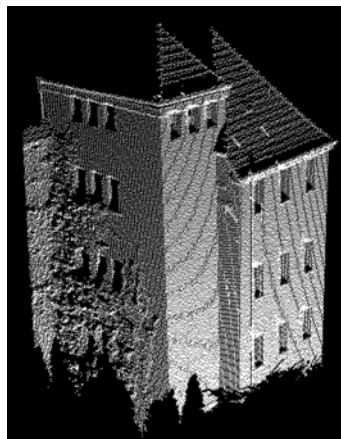


Abbildung 3.23: Beispiel einer Laserscanner-Punktwolke

Terrestrische Laserscanner ähneln in ihrem Aufbau und in ihrer Funktionsweise den in der Geodäsie verbreiteten Tachymetern. Deshalb ist es naheliegend, Fehlereinflüsse und Faktoren, die die Genauigkeit der Distanz- und Winkelmessung einschränken, von Tachymetern und Theodoliten (z.B. Achsabweichungen) zu adaptieren [Rietdorf, 2005].

Die Auswertetechniken der mit Laserscannern aufgenommen Daten werden oft von photogrammetrischen Bildanalyse-Methoden abgeleitet. Die aufgezeichneten Punktwolken sind nur in Ausnahmefällen das Endprodukt, meistens dienen sie nur als Grundlage zur Herstellung höherwertiger Daten (z.B. texturierte 3D-Modelle, Oberflächenmodelle, etc.). Dazu werden oft komplexe Softwareprodukte eingesetzt, die Auswertung erfolgt interaktiv oder automatisch und beansprucht meist ein Vielfaches der Zeit, die zur Datenakquisition notwendig ist [Kern, 2003]. Auf die Auswerteprozesse wird in Kapitel 3.5.1 näher eingegangen.

Der Vorteil des Laserscanning gegenüber anderen Verfahren ist die schnelle flächenhafte 3D-Erfassung mit hoher Punktdichte von einem einzigen Aufnahmestandpunkt aus. Heutige im Nahbereich eingesetzte Laserscanner haben Reichweiten von mehr als 1 000 m und nehmen zwischen 2 000 und 500 000 Punkte pro Se-

kunde mit einer maximalen Einzelpunktgenauigkeit von 2 bis 10 mm auf. Die Genauigkeit kann für abgeleitete Objekte unter Nutzung der Redundanz der Punktwolke noch höher sein. Die Aufnahmezeit pro Standpunkt beträgt abhängig vom gewählten Punktabstand (Auflösung), dem Messprinzip des Scanners und des aufzunehmenden Bereiches meist mehrere Minuten.

Sollen nicht nur einzelne Oberflächen, sondern komplexe Objekte dreidimensional erfasst werden, reicht ein Aufnahmestandpunkt nicht aus. Es werden dann Punktwolken von mehreren Standpunkten aufgenommen und diese anschließend in ein einheitliches übergeordnetes Koordinatensystem transformiert (z.B. [Schulz & Ingensand, 2004]). Dieser als Registrierung der einzelnen Punktwolken bezeichnete Vorgang erfolgt entweder über identische Punkte, die in den Punktwolken automatisch gefunden werden können (retro-reflektierende Zielmarken mit hoher Reflektivität oder Volumenkörper mit bekannter geometrischer Form) oder über 3D-Matching-Techniken (z.B. ICP).

Die derzeitige Entwicklung terrestrischer Laserscanner ist durch mehrere Tendenzen gekennzeichnet, zum einen durch eine Erhöhung der Datenrate und damit der Scangeschwindigkeit und zum anderen durch die Erhöhung der Genauigkeit und einer Ausweitung des Distanzbereiches. Die Hersteller terrestrischer Laserscanner sind außerdem ständig bemüht, dass die Geräte immer einfacher und flexibler zu handhaben sind, um sie möglichst einer großen Anzahl von Nutzern zugänglich zu machen und neue Anwendungsbereiche zu erschließen. Insbesondere die Software zum Steuern der Geräte und zum Auswerten der Daten wird ständig weiterentwickelt und mit neuen Funktionen ausgestattet, vor allem im Hinblick auf die Automatisierung des Mess- und Auswerteprozesses. Forschungseinrichtungen und Firmen entwickeln darüber hinaus Algorithmen und Spezialsoftware für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche.

Mehrere Laserscanner-Systeme bieten die Möglichkeit der hard- und softwareseitigen Integration einer Kamera, welche die simultane Aufnahme von hochauflösenden Farbinformationen und Laserscanner-Punktwolken erlauben (vgl. Kapitel 3.6). Die Bilddaten werden meist automatisch zu den Laserscannerdaten geometrisch referenziert.

3.5.2 Einteilung von Laserscannern

Die derzeit verfügbaren terrestrischen Laserscanner können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden. Dazu gehört die Einteilung nach dem verwendeten Distanzmessverfahren (3.5.2.1), nach dem Aufnahmebereich (3.5.2.2) und nach der Mechanik der Strahlauslenkung (3.5.2.3). Diese Kriterien müssen bei der Entwicklung eines geometrischen Modells berücksichtigt werden, vor allem die Zusatzparameter können sich je nach Typ des Laserscanners unterscheiden. Weitere charakteristische Kenngrößen, nach denen eine entsprechende Einteilung terrestrischer Laserscanner vorgenommen werden kann sind:

- maximale Reichweite
- Scangeschwindigkeit (Datenrate)
- Anwendungsbereich
- maximale Winkelauflösung
- Genauigkeit (Distanzmessung und Winkelmessung)
- Wellenlängenbereich des Lasers und Laserklasse
- Strahldivergenz
- Kosten

3.5.2.1 Entfernungsmessverfahren

Die Distanzmessung bei einem Laserscanner-System beruht grundsätzlich auf den Prinzipien der elektrooptischen Distanzmessung (z.B. [Joeckel & Stober, 1999; Witte & Schmidt, 2000; Blais, 2004]). Das von ei-

ner Laserdiode ausgestrahlte Licht wird am Objekt reflektiert und anschließend im Messinstrument ausgewertet. Entweder wird dessen Laufzeit gemessen (Impulslaufzeitverfahren), es wird die Phasenlage des gesendeten und des empfangenen Signals verglichen (Phasenvergleichsverfahren) oder Kombinationen aus beiden Prinzipien. Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle auch das Triangulations-Prinzip genannt werden.

Ein wichtiges Kriterium für die Qualität der Entfernungsmessung ist die Beschaffenheit der reflektierenden Oberflächen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Oberflächen mit spiegelnder und diffuser Reflexion. Ist die Frequenz der Oberflächenstrukturen deutlich größer als die des auftreffenden Lichtes, kommt es zur Spiegelung, beispielsweise bei Glas oder metallischen Oberflächen. Dies führt dazu, dass alle nicht senkrecht zur Oberfläche auftreffenden Laserstrahlen nicht mehr zur Empfangsdiode des Laserscanners zurückkehren und deshalb auch keine Distanz ermittelt werden kann. Bei einer rauen Oberfläche werden die Lichtstrahlen hingegen gleichmäßig in alle Richtungen reflektiert, es kommt zu einer diffusen Reflexion. Ein kleiner Anteil des ausgesandten Lichtes wird dabei wieder durch die Empfangsdiode registriert und es kann eine Distanz gemessen werden. In der Praxis ist meistens eine Kombination der beiden Reflexionsarten anzutreffen.

- Impulslaufzeitverfahren

Bei diesem Messprinzip, auch 'time-of-flight' genannt, wird die Laufzeit des von der Sendediode ausgestrahlten Laserimpulses bis zum Registrieren durch die Empfangsdiode gemessen. Wird die Hälfte dieser Laufzeit mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit multipliziert, erhält man die gesuchte Distanz (Abbildung 3.24). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist außer von der Wellenlänge auch von der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und dem Luftdruck entlang des Signalweges abhängig. Für genaue Messungen sind diese atmosphärischen Parameter deshalb durch den Laserscanner zu erfassen und zu berücksichtigen.

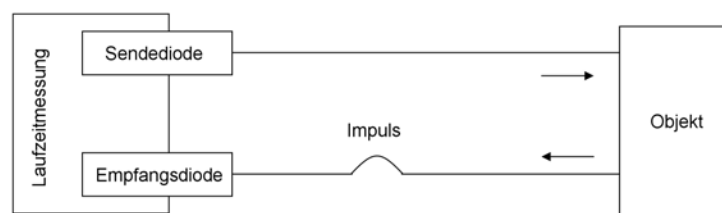


Abbildung 3.24: Prinzip des Impulslaufzeitverfahrens

Die Reichweite wird bei diesem Messverfahren lediglich durch die Stärke des Signals, durch die atmosphärischen Bedingungen und die Materialeigenschaften der reflektierenden Oberfläche beeinflusst. Solange die Empfangsdiode einen ausreichend starken Impuls vom Objekt zurück erhält, kann eine Entfernung ermittelt werden. Terrestrische Laserscanner, die dieses Distanzmessverfahren verwenden, erreichen maximale Reichweiten bis zu 6000 m (z.B. Riegl LPM-321). Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit, zwischen der aufsteigenden Flanke des Impulses (first pulse) und der absteigenden Flanke des zurückkehrenden Impulses (last pulse) zu unterscheiden. Im Unterschied zum Airborne Laserscanning werden beim terrestrischen Laserscanning bisher nicht beide Entfernungen gleichzeitig registriert, es lässt sich meist nur eine Einstellung verwenden.

Die Genauigkeiten der Distanzmessung bei Laserscannern mit diesem Messprinzip liegen bei 6 bis 20 mm im Entfernungsbereich bis zu 1000 m (vgl. Kapitel 3.5.3) und sind damit etwas geringer als die mit dem Phasendifferenzverfahren erreichbaren Genauigkeiten. Ein weiterer Nachteil gegenüber dem Phasendifferenzverfahren sind die geringeren Datenraten, die hier bis zu 50 000 Punkte pro Sekunde betragen, und die damit verbundenen längeren Scanzeiten.

Entscheidend für die häufige Nutzung dieses Messprinzips ist die Möglichkeit, in einem großen Entfernungsbereich ohne Mehrdeutigkeiten messen zu können. Aus diesem Grund sind terrestrische Laserscanner, die dieses Prinzip verwenden, sehr universell einsetzbar.

- Phasenvergleichsverfahren

Bei dem Phasenvergleichs- bzw. Phasendifferenzverfahren wird auf eine kontinuierlich ausgestrahlte Trägerwelle ein sinusförmiges Signal aufmoduliert. Zur Bestimmung der Distanz wird die Phasenlage des ausgehenden Signals mit dem empfangenen Signal verglichen. Abhängig von der Entfernung zum reflektierenden Objekt kommt es zu einer Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ (Abbildung 3.25). Entspricht die Entfernung genau der halben Modulationswellenlänge, ist die Phasenlage des ausgehenden und empfangenen Signals gleich, die Phasendifferenz ist also Null. Wird eine Phasendifferenz gemessen, ist die Entfernung kleiner als die halbe Modulationswellenlänge. Größere Entfernungen können nicht bestimmt werden, weil die Messung dann mehrdeutig ist. Aus diesem Grund ist die maximale Reichweite von Laserscannern, die nach diesem Prinzip arbeiten, durch die Wellenlänge des aufmodulierten Signals limitiert. Andererseits ist die Genauigkeit der Ermittlung der Phasendifferenz um so höher, je kleiner die Modulationswellenlänge ist. Deshalb wird oft mit mehreren Messfrequenzen (Feinfrequenz, Grobfrequenz) gearbeitet, die entweder nacheinander ausgesendet werden (z.B. bei Tachymetern) oder gleichzeitig bzw. sich überlagernd auf die Trägerwelle moduliert werden (z.B. bei einigen Laserscannern). Die Kriterien Reichweite und Messgenauigkeit stehen bei Laserscannern oft in Konkurrenz und es muss je nach Anwendungsgebiet ein Kompromiss gefunden werden.

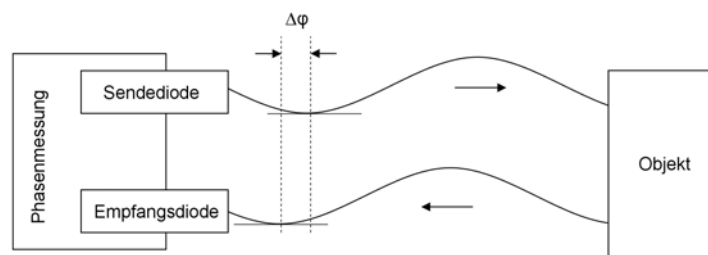


Abbildung 3.25: Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens

Terrestrische Laserscanner mit dem Phasendifferenzverfahren haben maximale Reichweiten bis zu 80 m und erreichen Genauigkeiten von 2 bis 8 mm. Sie sind deshalb meistens genauer als Laserscanner mit dem Impulslaufzeitverfahren. Ein wichtiger Vorteil dieses Messprinzips ist die Möglichkeit, sehr hohe Datenraten (momentan bis zu 500 000 Punkte pro Sekunde) zu erreichen und damit die Scanzeiten wesentlich zu verkürzen.

- Triangulationsverfahren

Die höchsten Genauigkeiten, allerdings in einem wesentlich geringeren Entfernungsbereich (bis 10 m), werden durch das Triangulationsverfahren erreicht (Abbildung 3.26). Dabei wird ein Laserstrahl auf das Objekt projiziert und nach der Reflexion am Objekt mit einer entsprechenden Optik und einer positionsempfindlichen Diode oder einer Photodiodenzeile (z.B. CCD-Zeile) empfangen. Die Sendediode und der Empfänger haben einen bekannten festen Abstand zueinander. Wird auf dem Empfangssensor eine bestimmte Position registriert, kann das Dreieck Sender-Objekt-Empfänger rekonstruiert und damit die Entfernung zum Objekt ermittelt werden.

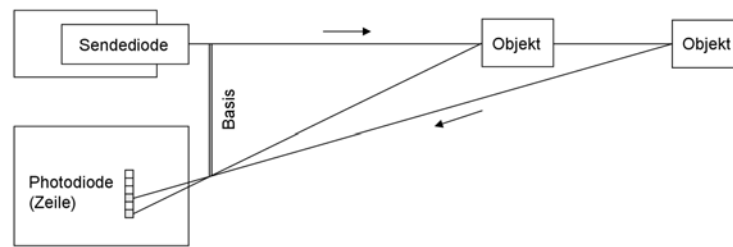


Abbildung 3.26: Prinzip des Triangulationsverfahrens

Wird der Laserstrahl kontinuierlich ausgelenkt, erfolgt eine punktweise Abtastung des Objektes. Meistens wird der Laserstrahl zu einer Laserlinie aufgeweitet und diese dann in einer Koordinatenrichtung ausgelenkt. Die Laserlinie wird dann mit einem Flächensensor aufgezeichnet und ein ganzes Profil gleichzeitig analysiert.

3.5.2.2 Aufnahmebereich

Eine weitere Unterteilung terrestrischer Laserscanner ist nach dem Aufnahmebereich (field of view) möglich. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Camera-view- und Panorama-view-Scannern. Camera-view-Scanner erlauben, bedingt durch deren Konstruktion, die Aufnahme eines kameraähnlichen rechteckigen Gesichtsfeldes. Panorama-view-Scanner hingegen zeichnen sich durch einen horizontalen Aufnahmewinkel von 360° aus, der durch die Rotation des Oberbaus des Instrumentes erreicht wird. Der vertikale Öffnungswinkel beträgt bis zu 160° . Im Falle von 160° ist der Laserscanner in der Lage, 'überkopf' aufzunehmen und damit, abgesehen von einem Bereich am Boden, der durch das Instrument selbst verdeckt wird (ca. 20°), die komplette umgebende Szene zu scannen (vollsphärische Aufnahme).

3.5.2.3 Strahlauslenkung

Die Konstruktion terrestrischer Laserscanner wird weitgehend durch die Art der Laserstrahlauslenkung bestimmt. Die Auslenkung des Laserstrahls erfolgt sequentiell in zwei Richtungen, entweder durch galvanometrische Spiegel, durch ein Polygonrad, durch einen elliptischen Spiegel oder die Rotation des Instrumenten-Oberbaus. Camera-view-Scanner lenken den Laserstrahl meist durch zwei zueinander rechtwinklig angeordnete galvanometrische Spiegel aus, die sich jeweils um eine Achse drehen lassen. Panorama-view-Scanner hingegen erreichen die horizontale Strahlauslenkung durch eine Drehung des Instrumentes und vertikal durch ein Polygonrad oder elliptischen Spiegel. Mit elliptischen Spiegeln (Abbildung 3.27) können größere vertikale Öffnungswinkel abgedeckt werden als mit einem Polygonrad.



Abbildung 3.27: Laserscanner FARO LS - vertikale Strahlauslenkung mit elliptischem Spiegel [Faro, 2005]

3.5.3 Terrestrischer Laserscanner Riegl LMS-Z420i

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ausschließlich mit dem terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i gearbeitet. Aus diesem Grund wird dieses Messsystem und dessen Charakteristik in diesem Kapitel gesondert vorgestellt. Dieser Panorama-view-Laserscanner arbeitet nach dem Impulslaufzeitverfahren und besitzt eine maximale Reichweite von 1000 m.

3.5.3.1 Aufbau

Den Aufbau des Laserscanners Riegl LMS-Z420i zeigt Abbildung 3.28 schematisch. Er hat eine zylindrische Form mit einem Durchmesser von 21 cm und einer Höhe von 46 cm. Es besteht die Möglichkeit, eine Digitalkamera fest auf dem Scanner zu montieren, wobei sich die vertikale Ausdehnung um 20 cm erhöht.

Die horizontale Strahlauslenkung erfolgt durch die Rotation des oberen Bereiches des Gerätes. Im unteren, nicht-rotierenden Bereich ist unter anderem die Elektronik für die Distanzmessung untergebracht. Die vertikale Strahlauslenkung erfolgt durch ein Polygonrad, wodurch ein vertikaler Öffnungswinkel von bis zu 80° möglich ist. Das Polygonrad rotiert entweder kontinuierlich oder oszilliert bei nur kleinen zu scannenden Winkelbereichen. Die Steuerung des Laserscanners sowie das Übertragen der Messdaten (Distanz, Winkel, Reflektivität, optionaler Zeitstempel) erfolgt über eine TCP/IP-Verbindung mit einem Computer. Diese Verbindung kann auch kabellos mittels WLAN betrieben werden, wodurch eine Fernsteuerung des Laserscanners ermöglicht wird.

Der Laserscanner kann auf ein geodätisches Stativ montiert werden. Dadurch besteht in Kombination mit einer speziellen Schwenkvorrichtung die Möglichkeit, den gesamten Scanner um definierte Winkelbeträge vertikal zu neigen. Durch mehrere überlappende vertikal verschwenkte Scans ist eine Ausweitung des vertikalen Scanbereichs möglich. Sind die Verschwenkungswinkel vorher kalibriert worden, können die Einzelscans ohne Verknüpfungspunkte automatisch zu einer gemeinsamen Punktwolke kombiniert werden.

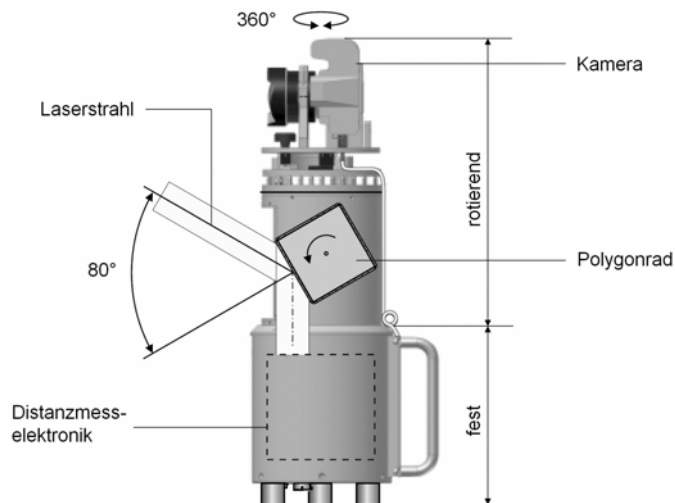


Abbildung 3.28: Aufbau des Laserscanners Riegl LMS-Z420i
[Riegl, 2007]

3.5.3.2 Spezifikationen

Der terrestrische Laserscanner Riegl LMS-Z420i hat folgende Eigenschaften (Angaben des Herstellers) [Riegl, 2007]:

- Laserklasse 1 (augensicher, keine Schutzmaßnahmen notwendig)
- Wellenlänge des Laser: Infrarot (ca. 1 500 nm)
- minimale Distanz: 2 m
- Reichweite: 350 m (Reflektivität $\geq 10\%$), 1 000 m (Reflektivität $\geq 80\%$)
- Distanzmessgenauigkeit: 5 - 10 mm (bei 50 m Entfernung)
- Scangeschwindigkeit: 8 000 Punkte/Sekunde (rotierender Spiegel), 11 000 Punkte/Sekunde (oszillierend)
- Strahldivergenz: 0,25 mrad (25 mm Zunahme des Durchmessers pro 100 m Distanz)
- Winkelbereich: $360^\circ \times 80^\circ$
- minimale Winkelschrittweite: $0,004^\circ$
- Auflösung der Winkelmessung: $0,002^\circ$ (vertikal), $0,0025^\circ$ (horizontal)
- Temperaturbereich: 0°C bis 40°C

3.5.4 Auswertemethoden und Anwendungen

Die Auswertemethoden der mit terrestrischen Laserscannern erzeugten Punktwolken sind sehr vielfältig, da sie stark von der jeweiligen Anwendung abhängen. Sie lassen sich in mehrere Komplexitätsstufen einteilen, die in den folgenden Kapiteln aufgezeigt werden sollen. Außerdem werden dazu verschiedene Anwendungsbeispiele vorgestellt. Die Aufzählung der Auswertemethoden und Anwendungen ist nicht vollständig, es gibt zahlreiche Spezialanwendungen, für die weitere Verfahren zur Auswertung der Laserscannerdaten entwickelt wurden.

Wie bei den meisten photogrammetrischen Verfahren wird auch beim terrestrischen Laserscanning zwischen Aufnahme und Auswertung getrennt. Die Aufnahme findet am Objekt statt, während die Auswertung im Nachhinein durchgeführt wird. Eine Ausnahme stellen dabei Echtzeitanwendungen dar oder einfache Auswerteprozesse, die eine Kontrolle der Vollständigkeit der Messungen erlauben (z.B. Registrierung der Standpunkte). In einigen Anwendungen wird das Objekt zwar aufgenommen, aber die Daten nicht notwendigerweise aufbereitet und ausgewertet. Stattdessen erfolgt die Auswertung nur bei Bedarf. Die Daten dienen dann nur zur Dokumentation des Ist-Zustandes beispielsweise von Fabrikhallen oder Anlagen. Für spätere Neu- und Umbaumaßnahmen werden dann nur die notwendigen Datenbereiche ausgewertet. Die meist in Datenbanken gespeicherten Punktwolken können auch zur Beweissicherung eines bestimmten Objektzustandes oder für Rekonstruktionszwecke im Falle der Zerstörung eines Objektes genutzt werden.

Den nachfolgend dargestellten Auswertemethoden geht in vielen Fällen eine Bereinigung der originären Punktwolken voraus. Dies kann entweder eine Ausdünnung bzw. Filterung nach verschiedenen Kriterien sein, eine Segmentierung der Daten in Teil-Punktwolken oder das Löschen von bestimmten Punkten aus der Punktwolke. Die Möglichkeiten in der Auswertung, die sich durch Kombination mit photogrammetrischen Bilddaten ergeben, werden in den folgenden Kapiteln erwähnt.

3.5.4.1 Messung in der Punktwolke

Die einfachste Form der Auswertung ist die interaktive 3D-Koordinatenmessung direkt in der Punktwolke. Dabei werden mit entsprechender Software einzelne Laserpunkte ausgewählt, deren Koordinaten angezeigt bzw. aus mehreren nacheinander ausgewählten Punkten anschließend Strecken, Winkel, Flächeninhalte oder Volumen unmittelbar berechnet. Durch die Charakteristik der Daten ist es nicht möglich, Ecken und Kanten von Objekten exakt zu messen. Die Repräsentationsgenauigkeit ist durch die Punktdichte der Punktwolke und die Strahldivergenz begrenzt. Anwendungsbeispiele sind die Gerichts- und Unfalluntersuchung (Forensik) oder die Messung von Freiraumprofilen im Straßenverkehr (z.B. Messung von Durchfahrtshöhen). Alternativ besteht die Möglichkeit, die zu messenden Punkte in einem zur Punktwolke orientierten Bild zu markieren.

Daraus kann der Richtungsvektor zwischen Projektionszentrum und Objektpunkt berechnet werden, der anschließend mit der zugehörigen Punktwolke verschnitten wird (Monoplotting). Die gesuchten 3D-Koordinaten sind entweder die Koordinaten des Punktes mit dem geringsten Abstand zu diesem Vektor, oder die Koordinaten werden aus mehreren benachbarten Punkten interpoliert.

3.5.4.2 Ableitung von 2D-Profilen

In vielen Anwendungsbereichen ist das Ziel der Datenauswertung eine zweidimensionale Darstellung. Das sind beispielsweise Grundrisse oder Vertikalschnitte von Gebäuden in der Architektur oder Tunnelquerschnitte zum Nachweis des Lichtraumprofils. Dazu wird aus der Laserscanner-Punktwolke eine dünne Schicht, mit einer von der Punktdichte abhängigen Dicke ausgeschnitten und auf eine Ebene projiziert. Anschließend kann diese zweidimensionale Punktdarstellung geglättet und gegebenenfalls vektorisiert und bemaßt werden (Abbildung 3.29) [Bienert, 2006].

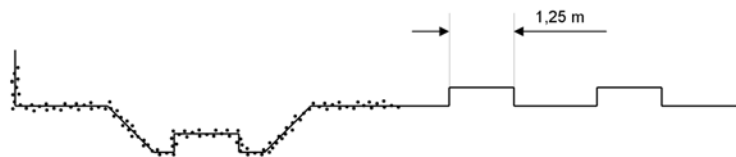


Abbildung 3.29: Synthetisches Beispiel eines Horizontalschnittes durch eine Punktwolke

Der Vorteil gegenüber konventionellen geodätischen Tachymeter-Verfahren ist die Möglichkeit, im Nachhinein 2D-Profile an beliebiger Stelle bzw. in beliebiger Höhe automatisch zu erstellen. Dies wird beispielsweise bei der Deformationsanalyse von Türmen oder Staudämmen [Schneider, 2006] oder bei der Erfassung von Tragwerk-Konstruktionen in Gebäuden genutzt [Scheller & Schneider, 2006].

Eine weitere Anwendung von aus Laserscannerdaten abgeleiteten 2D-Profilen ist in der Forstinventur möglich [Maas et. al., 2008]. Dabei werden ausgewählte Waldflächen stichprobenartig auf Baumverteilung, Baumdurchmesser und weitere Kriterien untersucht. Die mit einem terrestrischen Laserscanner aufgenommene Punktwolke wird dabei in Horizontalschnitte untergliedert und die gesuchten Inventur-Parameter anschließend automatisch aus den 2D-Schnitten bestimmt.

3.5.4.3 Modellierung in der Punktwolke

Eine sehr komplexe Auswertemethode stellt die interaktive bzw. automatische Modellierung in der Punktwolke dar. Dabei werden geometrische Elemente (Ebenen, Zylinder, etc.) in die Punktwolke eingepasst, diese miteinander verschnitten und auf diese Weise ein 3D-Modell generiert (z.B. Abbildung 3.30). Die Bearbeitung erfolgt meist innerhalb einer CAD-Umgebung wie Microstation (Bentley) oder AutoCad (Autodesk). Die Identifikation und Einpassung der Elemente erfolgt entweder automatisch (z.B. bei Rohren in einer Fabrikanlage) oder interaktiv durch entsprechende Vorgaben des Operators. Zur Interpretation der Punktwolken werden in vielen Fällen zusätzliche Bilder verwendet, die durch die Auswertesoftware hinter die Punktwolke geblendet werden [Effkemann, 2003]. Die interaktive Erstellung des 3D-Modells kann je nach Komplexität des Objektes unterschiedlich lange dauern, beträgt aber meist ein Vielfaches der Aufnahmezeit am Messort [Kleemann, 2005]. Die vollständige Automatisierung ist in den meisten Anwendungen (noch) nicht möglich, da die Generierung des 3D-Modells stark von der Interpretation des Betrachters abhängt. Allerdings gibt es Ansätze zur Automatisierung bestimmter Modellierungsaufgaben, beispielsweise zur Extraktion und Modellierung einfacher Gebäudestrukturen [Pu & Vosselmann, 2006] oder zur Detektion und Modellierung zylindrischer Objekte (z.B. Rohre in industriellen Anwendungen) [Rabbani & van den Heuvel, 2005].

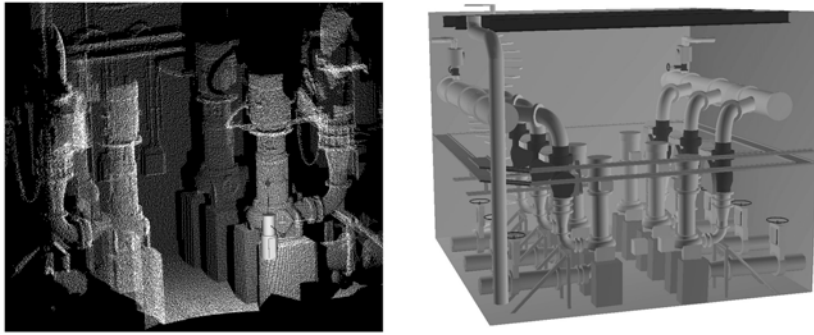


Abbildung 3.30: Punktwolke einer Pumpenanlage (links) und 3D-CAD-Modell (rechts)

Die Einsatzgebiete dieser Auswertemethode sind hauptsächlich in industriellen Anwendungen zu finden. Dazu gehört die Planung von Fabriken, die Konstruktion neuer Bauteile innerhalb bestehender Anlagen, Simulation, Kollisionskontrolle, Robotik und Facility Management.

3.5.4.4 Oberflächen- und Objektgenerierung durch Triangulation

Vor allen in Anwendungen der Architektur und Denkmalpflege ist die Generierung von Oberflächen und 3D-Modellen durch eine Triangulation der Punktwolke sinnvoll. Die Punkte werden dabei zu einem Dreiecksnetz verbunden und somit eine Oberfläche hergestellt. Dazu gibt es verschiedene Algorithmen (z.B. Delauney-Triangulation). Für die Erstellung und Bearbeitung von Dreiecksvermaschungen gibt es zahlreiche Programme (z.B. Innovmetric Polyworks, Geomagic Studio). Diese Vorgehensweise eignet sich vor allem dann, wenn beliebige Oberflächen (Freiformflächen), die nicht durch einfache geometrische Elemente zu beschreiben sind, modelliert werden sollen.

Eine weitere Anwendung dieser Methode ist das Reverse Engineering im Maschinenbau (z.B. Automobilbau). Vorhandene Objekte (z.B. Karosserieteile) werden mit einem Laserscanner aufgenommen, dreidimensional modelliert und anschließend analysiert. Ähnliche Anwendungen sind in den Bereichen Prototyping und Produktdesign zu finden.

3.6 Kombinationen der Aufnahmegeräte

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Aufnahmegeräte mit unterschiedlichen Eigenschaften beschrieben. Dazu gehörten verschiedene Kamerasysteme und terrestrische Laserscanner. Darüber hinaus bietet es sich oft an, die Aufnahmegeräte hardwareseitig zu kombinieren. Dies kann sinnvoll sein, um bestimmte Eigenschaften der Aufnahmegeräte in einem Gerät zu vereinen, beispielsweise zu einer Kamera mit vollsphärischem Gesichtsfeld, oder um bereits bei der Aufnahme zueinander orientierte Daten zu erzeugen, die dann in der Auswertung gemeinsam verwendet werden.

3.6.1 Panoramakamera und Fisheye-Objektiv

Wird eine 360°-Panoramakamera mit einem 180°-Fisheye-Objektiv ausgestattet, entsteht eine Kamera mit einem vollsphärischen Aufnahmebereich. Das heißt, es wird der gesamte umliegende Bereich aufgezeichnet, abgesehen von einer Verdeckung durch die Kamera selbst und ggf. durch die Stativbeine (Abbildung 3.31, rechts). Weil sich dadurch nicht nur das Gesichtsfeld ändert, sondern auch die geometrischen Zusammenhänge, wird die vollsphärische Kamera im Rahmen der Dissertation gesondert betrachtet. Die Abbildungsgeometrie entspricht auch in vertikaler Richtung nicht mehr dem Grundprinzip der Zentralperspektive. Die Abbildung lässt sich am ehesten mit der Projektion auf eine Kugeloberfläche beschreiben. In Abbildung 3.31 (links) ist die Panoramakamera EYESCAN M1 der Firma Kamera & System Technik in Kombination mit einem Fisheye-Objektiv (Nikkor, 8 mm) dargestellt. [Schwalbe & Schneider, 2005]

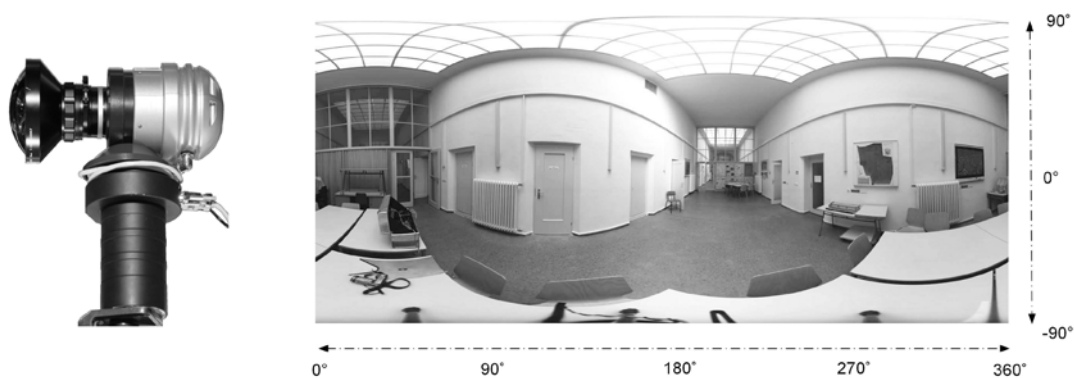


Abbildung 3.31: Panoramakamera EYESCAN M1 mit Fisheye-Objektiv (links) und vollsphärisches Panorama (rechts) [Schwalbe & Schneider, 2005]

In photogrammetrischen Anwendungen bietet die Kombination aus Rotationszeilenkamera und Fisheye-Objektiv den Vorteil, das extrem große Gesichtsfeld in einem Bild mit einer homogenen Geometrie aufzuzeichnen. Damit benötigt man für die 3D-Auswertung eines Innenraumes nur sehr wenige Bilder (und damit auch weniger Orientierungsunbekannte), da der Überlappungsbereich zwischen Bildern, die von unterschiedlichen Standpunkten aufgenommen werden, gegen 100 Prozent geht. Der Überlappungsbereich mehrerer Bilder wird nur durch Verdeckungen eingeschränkt. Eine große Herausforderung bei der Aufnahme eines vollsphärischen Panoramabildes stellt die gleichmäßige Ausleuchtung des Objektes dar.

Im Vergleich zur Verwendung von konventionellen, zentralperspektiv abbildenden Objektiven ist die geometrische Auflösung vollsphärischer Bilder, bezogen auf den Objektraum, geringer. Während hier ein Öffnungswinkel von 180° auf der Sensorzeile der Rotationszeilenkamera abgebildet wird, sind es bei konventionellen Objektiven deutlich kleinere Winkel.

In praktischen Untersuchungen (räumlicher Rückwärtsschnitt) wurden mit vollsphärischen Kameras Genauigkeiten von etwa $1/5$ Pixel ermittelt (vgl. Kapitel 5.3). Die Anwendung einer vollsphärischen Kamera ist wegen der geringeren Auflösung und der meist schwieriger zu modellierenden Abbildungsgeometrie von Fisheye-Objektiven nur dort empfehlenswert, wo der große Öffnungswinkel tatsächlich erforderlich ist. Dies kann neben der Aufnahme von Innenräumen (z.B. für Facility Management) auch die Anwendung im forstlichen Bereich sein, oder die Aufnahme von Unfall- und Tatorten (Forensik) [Bonnet, 2004].

3.6.2 Laserscanner und Kamera

Die Kombination der Daten von Laserscanner und Kamera bietet aufgrund ihrer weitgehend komplementären Eigenschaften vielfältige Möglichkeiten in der Auswertung und erweitert deshalb das Einsatzgebiet der Aufnahmegeräte erheblich. Mehrere Hersteller terrestrischer Laserscanner bieten bereits eine hardware- und softwareseitige Kombination des Laserscanners und einer Kamera an. Einen Überblick über derzeit verfügbare kombinierte Systeme wird in [Przybilla, 2006] gegeben. So kann beispielsweise auf den terrestrischen Laserscannern der Firma Riegl eine digitale SLR-Kamera fest installiert werden (Abbildung 3.32, links). Softwareseitig werden Kameras von Nikon und Canon unterstützt. Die Aufnahme mit Laserscanner und Kamera erfolgen nacheinander.

Die Firma FARO bietet ebenfalls ein System zur Befestigung einer Kamera an (Abbildung 3.32, rechts). Damit die Kamera den vertikalen Scanbereich nicht einschränkt, kann diese auf einer Schiene während des Scanvorgangs aus der Rotationsachse verschoben werden und anschließend für die Aufnahme der Bilder wieder zurück, um horizontal die gleiche Aufnahmeposition zu realisieren und die Parallaxe zwischen Scanner und Kamera zu minimieren. Bei den Laserscannern von FARO werden insbesondere Fisheye-Objektive verwendet, um die Anzahl der aufzunehmenden Bilder zu reduzieren.



Abbildung 3.32: Hardware-Kombinationen aus Laserscanner und Kamera: Riegl [Riegl, 2007] (links), FARO [Faro, 2005] (rechts)

Andere Laserscanner sind mit einer Spezialkamera ausgestattet, die direkt im Gehäuse des Scanners eingebaut ist. Beispielsweise hat die 'Scan Station 2' der Firma Leica-Geosystems eine integrierte Digitalkamera, jedoch mit einer relativ geringen Auflösung von einem Megapixel. Diese Kamera wird hier unter anderem verwendet, um ein Vorschaubild aufzunehmen, in dem der Scanbereich festgelegt werden kann.

Bei der Auswertung der Daten macht es aus geometrischer Sicht keinen Unterschied, ob die Aufnahmegeräte bereits hardwareseitig kombiniert wurden. Jedoch kann sich in der Auswertung eine Vereinfachung dadurch ergeben, dass die gegenseitige Orientierung (zumindest näherungsweise) bekannt ist.

Für die sich aus der Integration von Laserscanner und Kamera ergebenden Möglichkeiten der kombinierten Auswertung von Punktwolken und Bilddaten sei auf die Einleitung (Kapitel 1.3) verwiesen.

3.6.3 Laserscanner und Panoramakamera

Es gibt bereits Ansätze, Laserscanner und Kamera im selben optischen System zu integrieren. Insbesondere die Kombination von Laserscanner und Rotationszeilenkamera bietet sich aufgrund des ähnlichen Aufnahmeprinzips, dem Scannen des Objektes durch Rotation des Gerätes, an. Das bedeutet, die Strahlengänge des Laserstrahls und der Bildinformationen sind identisch, werden lediglich innerhalb des Aufnahmegerätes optisch getrennt, um die Signale entsprechend auswerten zu können.

Beispielsweise wird in [Seidl et. al., 2006] die Entwicklung und der Aufbau einer opto-mechanischen Kombination einer Panoramakamera und eines Laserscannersystems beschrieben. Dieses kombinierte System integriert einen Mikro-Scanspiegel [Schenk et. al., 2000] in den Strahlengang der Rotationszeilenkamera KST EYESCAN M3D metric (Kapitel 3.2.3). Die wesentlichen Bestandteile des Systems sind ein sphärischer Konkavspiegel und ein Strahlenteiler. Anhand eines Versuchsaufbaus, der in Abbildung 3.33 dargestellt ist, konnte die Funktionsfähigkeit nachgewiesen werden.

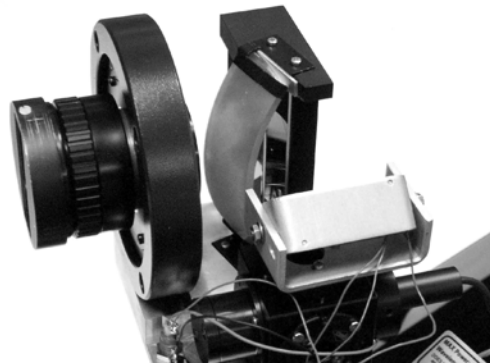


Abbildung 3.33: Experimenteller Aufbau einer opto-mechanischen Kombination aus Laserscanner und Panoramakamera [Seidl et. al., 2006]

Die entscheidenden Vorteile eines solchen Systems wären die absolut identischen Aufnahmepositionen (keine Parallaxen in den Daten) und die Möglichkeit, die Aufnahme gleichzeitig durchzuführen. Momentan ist allerdings noch keine derartige Lösung in einem Laserscanner-Messsystem verfügbar. Dies ist auf eine Vielzahl von praktischen Schwierigkeiten in der Realisierung zurückzuführen. Problematisch sind vor allem die aufwendige optische Konstruktion und der mit zusätzlichen optischen Bauelementen (Strahlenteiler oder halbdurchlässige Spiegel) verbundene Lichtverlust. Außerdem müssen Kompromisse zwischen der verwendeten Laserwellenlänge und dem für die optische Abbildung verwendeten Objektiv eingegangen werden.

Die für die photogrammetrische Datenauswertung relevanten geometrischen Zusammenhänge müssen neu entwickelt werden. Es ist zu erwarten, dass durch die veränderte Konstruktion das geometrische Modell, insbesondere die zu kalibrierenden Zusatzparameter von Panoramakamera und Laserscanner angepasst werden müssen.

3.7 Fazit

In diesem Kapitel wurden alle Aufnahmegeräte vorgestellt, für die in Kapitel 4 ein geometrisches Modell entwickelt wird und deren Daten in der integrierten Bündelblockausgleichung berücksichtigt werden können. Während auf zentralperspektive Kameras nur kurz eingegangen wurde, wurden Rotationszeilenkameras, Fish-eye-Objektive und terrestrische Laserscanner ausführlicher behandelt. Insbesondere technische und geometrische Gesichtspunkte wurden berücksichtigt, damit bei der Entwicklung der geometrischen Modelle für diese Aufnahmegeräte im nächsten Kapitel darauf zurückgegriffen werden kann.

Die Entwicklung und Verifikation des geometrischen Modells für Panoramakameras erfolgte anhand von Daten, die mit der Rotationszeilenkamera EYESCAN M3D metric aufgenommen wurden, deshalb wurde diese Panoramakamera näher vorgestellt. Ebenso wurde der für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit genutzte terrestrische Laserscanner Riegl LMS-Z420i detailliert beschrieben.

Es wurden die Anwendungsmöglichkeiten und Auswerteverfahren der einzelnen Aufnahmegeräte aufgezählt. Dabei wurde gleichzeitig gezeigt, dass die Kombination verschiedener Datentypen, insbesondere der Daten von Laserscanner- und Bilddaten unterschiedlicher Geometrie, in vielen Fällen sinnvoll ist und dadurch das Anwendungsspektrum der einzelnen Geräte erweitert werden kann. Dies wird auch durch die Tatsache bestätigt, dass die unterschiedlichen Aufnahmegeräte durch die Hersteller terrestrischer Laserscanner bereits hardwarseitig kombiniert werden.

4 Geometrische Modelle

Voraussetzung für die Auswertung photogrammetrischer Daten ist die Kenntnis der den Daten zugrunde liegenden geometrischen Modelle. Grundlage der Entwicklung eines geometrischen Modells ist die Definition geeigneter Koordinatensysteme. Dies können je nach Aufnahmegerät kartesische, zylindrische oder sphärische Systeme sein. Mathematisch werden die Modelle meist durch eine sequenzielle Transformation mehrerer Koordinatensysteme hergeleitet und als funktionale Abhängigkeit der Beobachtungen von den Objektkoordinaten, sowie von der äußeren und inneren Orientierung des Aufnahmegerätes beschrieben. Die geometrischen Modelle sollten dabei weitestgehend der physikalischen Realität des verwendeten Messinstrumentes entsprechen. Dies wird erreicht, indem einem Basismodell entsprechende Korrekturterme hinzugefügt werden, welche eventuelle Abweichungen des Modells von der physikalischen Realität des Aufnahmegerätes kompensieren. Dabei ist anzustreben, dass die in den Korrekturtermen enthaltenen Zusatzparameter physikalisch interpretierbar sind.

Sind die geometrischen Modelle hinreichend beschrieben, können sie für verschiedene photogrammetrische Berechnungsverfahren verwendet werden. Im einfachsten Fall ist dies die Berechnung der inneren und äußeren Orientierung einer Aufnahme sowie möglicher Zusatzparameter des Aufnahmegerätes in einem räumlichen Rückwärtsschnitt. Werden mehrere bereits orientierte Aufnahmen verwendet, lassen sich die Koordinaten von Objektpunkten im räumlichen Vorwärtsschnitt bestimmen. Um höchste Genauigkeiten zu erreichen werden die geometrischen Modelle in eine Bündelblockausgleichung implementiert (Kapitel 6), wodurch die simultane Bestimmung der Orientierung der Aufnahmen, der Kalibrierung der Aufnahmegeräte und die Bestimmung von Objektkoordinaten möglich ist.

4.1 Zentralperspektive Kamera

Das Prinzip der Zentralperspektive ist die Grundlage der meisten photogrammetrischen Aufnahmesysteme, dazu gehören alle Kameras bei denen die Objektinformationen auf eine ebene Fläche durch annähernd geradlinig verlaufende Strahlen abgebildet werden. Deshalb ist das entsprechende geometrische Modell in den meisten Standardwerken der Photogrammetrie umfassend beschrieben (z.B. [Rüger et. al, 1987; Luhmann, 2003; Kraus, 2004]). Dennoch soll es an dieser Stelle näher betrachtet werden, weil die geometrischen Modelle anderer Kameratypen in ähnlicher Weise in den folgenden Kapiteln hergeleitet werden sollen.

Das Modell der Zentralperspektive (auch als Lochkamera-Prinzip bekannt) basiert auf der Tatsache, dass jeder Objektpunkt durch geradlinig verlaufende Strahlen, die sich im Projektionszentrum schneiden, eindeutig auf der Bildebene abgebildet wird (Abbildung 4.1). Die Umkehrabbildung, also die Zuordnung der Bildpunkte zu entsprechenden Objektpunkten, ist dagegen nicht eindeutig, da ein Abbildungsstrahl aus unendlich vielen Punkten im Objektraum besteht.

4.1.1 Kollinearitätsgleichungen

Das Modell der Zentralperspektive wird mathematisch durch die Kollinearitätsgleichungen beschrieben. Zur Herleitung werden üblicherweise zwei Koordinatensysteme genutzt, zum einen das Objektkoordinatensystem, dessen Ursprung und Orientierung in geeigneter Beziehung zum Aufnahmeobjekt steht bzw. durch übergeordnete Koordinaten (z.B. Landeskoordinaten) definiert ist. Zum anderen wird ein Kamerakoordinatensystem verwendet, dessen Ursprung im Projektionszentrum O des Bildes liegt und durch ein kamerafestes Bezugssystem (Sensorsystem) festgelegt wird. Beide Systeme sind in Abbildung 4.1 dargestellt und müssen zur Ableitung der Projektionsbeziehungen ineinander überführt werden.

Die räumliche Lage des Kamerakoordinatensystems wird durch die Koordinaten des Projektionszentrums $O (X_0, Y_0, Z_0)$ im Objektkoordinatensystem beschrieben. Die Drehmatrix $\mathbf{R}$ stellt die räumliche Ausrichtung des Kamerakoordinatensystems dar und wird aus den Drehungen (ω, φ, κ) um die Koordinatenachsen zusammengesetzt (vgl. Kapitel 2.1.1.3). Die drei Drehwinkel und die Koordinaten des Projektionszentrums im Objektkoordinatensystem sind die Parameter der äußeren Orientierung.

Die innere Orientierung wird durch den Bezug des Bildkoordinatensystems zur Kamera definiert. Dabei ist der Bildhauptpunkt H' (x_0', y_0') der Lotfußpunkt des Projektionszentrums auf die Bildebene im Bildkoordinatensystem und die Kamerakonstante c der Abstand des Bildhauptpunktes vom Projektionszentrum.

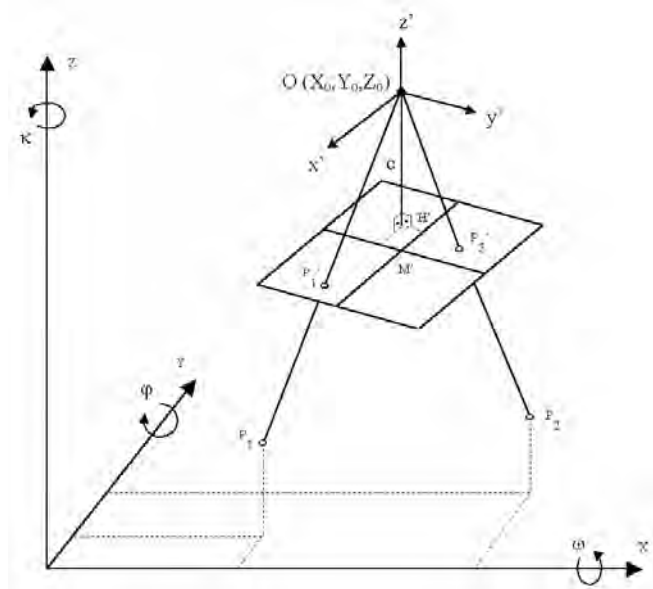


Abbildung 4.1: Geometrisches Modell der Zentralperspektive

Die Abbildung eines Bildpunktes in den Objektraum wird in Vektorschreibweise wie folgt definiert:

$$X = X_0 + m \cdot R \cdot x' \quad (4.1)$$

Der Maßstabsfaktor m ist unbekannt und kann für jeden Objektpunkt anders sein. Deshalb ist aus einem Bild nur die Richtung zum Objektpunkt eindeutig rekonstruierbar, nicht aber seine absolute Position. Gleichung (4.1) wird nun umgekehrt und zusätzlich um den Bildhauptpunkt $H'(x_0', y_0')$ und Additionsterme ($\Delta x'$, $\Delta y'$) zur Korrektur der Verzeichnung und anderer Effekte erweitert:

$$\begin{bmatrix} x' - x_0' - \Delta x' \\ y' - y_0' - \Delta y' \\ -c \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Werden die beiden ersten Gleichungen aus (4.2) durch die dritte dividiert, ergeben sich die Kollinearitätsgleichungen, in denen der Maßstabsfaktor eliminiert ist:

$$\begin{aligned} x' &= x_0' - c \cdot \frac{x}{z} + \Delta x' \\ y' &= y_0' - c \cdot \frac{y}{z} + \Delta y' \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dabei sind x , y und z die Koordinaten des Objektpunktes im Kamerakoordinatensystem, sie werden mit den folgenden Gleichungen in das Objektkoordinatensystem überführt:

$$\begin{aligned} x &= r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0) \\ y &= r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0) \\ z &= r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Die Kollinearitätsgleichungen beschreiben den Vorgang der Bildentstehung bei einer zentralperspektiv abbildenden Kamera. Sie sind Grundlage für den räumlichen Rückwärtsschnitt, Vorwärtsschnitt und die Bündelblockausgleichung, da mit diesen Gleichungen die eindeutige Abbildung eines Objektpunktes auf die Bildebene beschrieben wird.

4.1.2 Physikalische Realisierung

Das Modell der Zentralperspektive stellt eine Idealisierung der Realität der Aufnahme dar. Es müssen zusätzlich Fehler der Optik und der Kamertechnik berücksichtigt werden. Der Verlauf der abbildenden Strahlen ist im Objektiv durch Brechung an den Glas-Luft-Grenzflächen gekennzeichnet.

Im idealisierten Modell für dünne Linsen stimmt der Eintrittswinkel mit dem Ausfallswinkel überein. Das Objektiv besteht aber nicht nur aus einer Linse, sondern ist eine Kombination mehrerer Linsen und einer Blende, die sich im Allgemeinen nicht in der Optikmitte befindet. Außerdem sind die optischen Hauptebenen des Linsensystems des Objektivs in der Regel nicht mit der Lage von Eintrittspupille und Austrittspupille identisch, deshalb stimmt der Eintrittswinkel nicht mit dem Ausfallswinkel überein. Ein Bildpunkt P' wird deshalb unter einem Versatz $\Delta r'$ bezüglich seiner Sollage abgebildet. Dieser Versatz wird als radial-symmetrische Verzeichnung bezeichnet.

Darüber hinaus existieren andere Verzeichnungseffekte, wie die tangential-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung. Die tangential-asymmetrische Verzeichnung wird im Wesentlichen durch eine Dezentrierung und Schiefstellung einzelner Linsen verursacht und ist bei qualitativ hochwertigen Objektiven um den Faktor 10 kleiner als die radial-symmetrische Verzeichnung.

4.1.3 Zusatzparameter

Die im vorangegangenen Kapitel genannten Modellabweichungen werden üblicherweise durch Korrekturfunktionen $\Delta x'$, $\Delta y'$ der Bildkoordinaten ausgedrückt.

Die größte Abweichung vom Idealmodell wird durch die radial-symmetrische Verzeichnung des Objektivs hervorgerufen. Diese lässt sich am besten durch eine Reihenentwicklung mit den Verzeichnungsparameter A_1 bis A_3 beschreiben. Zur Vermeidung von Korrelationen dieser Parameter mit der Kamerakonstante c wird meist ein Parameter r_0 hinzugefügt, der einen zweiten Nulldurchgang der Verzeichnungsfunktion bewirkt. Die Korrekturfunktion lautet dann:

$$\Delta r'_{rad} = A_1 \cdot r'^3 + A_2 \cdot r'^5 + A_3 \cdot r'^7 - r' (A_1 \cdot r_0^2 + A_2 \cdot r_0^4 + A_3 \cdot r_0^6) \quad (4.5)$$

Die Bildkoordinaten werden daraus folgend proportional korrigiert:

$$\Delta x'_{rad} = x' \cdot \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \quad \Delta y'_{rad} = y' \cdot \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \quad (4.6)$$

Die Modellabweichungen, die durch die radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung (Dezentrierungsverzeichnung) verursacht werden, können durch folgenden Ansatz beschrieben werden [Brown, 1971]:

$$\Delta x'_{dez} = B_1 (r'^2 + 2x'^2) + 2B_2 x' \cdot y' \quad \Delta y'_{dez} = B_2 (r'^2 + 2y'^2) + 2B_1 x' \cdot y' \quad (4.7)$$

Neben den Modellabweichungen, die durch das Linsensystem hervorgerufen werden, können auch Abweichungen durch die Anordnung der Sensorelemente oder durch Fehler bei der A/D-Wandlung bei digitalen Sensoren bzw. durch Filmverzug bei analogen Bildern entstehen. Solche Abweichungen bewirken nicht orthogonale (Scherung) oder nicht gleichmaßstäbige Koordinatenachsen (Affinität) des Bildkoordinatensystems und können durch folgenden Ansatz kompensiert werden [El-Hakim, 1986]:

$$\Delta x'_{aff} = C_1 \cdot x' + C_2 \cdot y' \quad \Delta y'_{aff} = 0 \quad (4.8)$$

Die Gesamtkorrektur der Bildkoordinaten (vgl. Gleichung 4.3) ergibt sich dann mit:

$$\Delta x' = \Delta x'_{rad} + \Delta x'_{dez} + \Delta x'_{aff} \quad \Delta y' = \Delta y'_{rad} + \Delta y'_{dez} + \Delta y'_{aff} \quad (4.9)$$

Die Parameter $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1$ und C_2 stellen mögliche Zusatzparameter zur Kompensation von Abweichungen zwischen dem Grundmodell der Zentralperspektive und der physikalischen Realität dar und können im Rahmen einer Kamerakalibrierung mitbestimmt werden. Neben den aufgeführten Korrekturgleichungen gibt es auch andere Ansätze mit anderen Parameterbezeichnungen, sowie auf spezielle Kameratypen angepasste Parametrisierungen.

Werden die Blende und Fokussierung am Objektiv verändert, ändert sich die Lage des Projektionszentrums und je nach Kamerakonstruktion auch die gegenseitige Lage der einzelnen Linsen. Deshalb sind die Werte für die innere Orientierung und die Zusatzparameter von den aktuellen Einstellwerten am Objektiv abhängig. Die durch Kalibrierung ermittelten Kameraparameter sind also nur für die aktuell eingestellte Blende und Fokussierung gültig.

4.2 Panoramakamera

Panoramakameras erlauben die Aufnahme sehr großer horizontaler Öffnungswinkel (bis zu 360°) in einem Bild, was besonders für die Aufnahme von Räumen oder komplexen Anlagen von Vorteil ist. Technisch wird dies meist durch eine rotierende Sensorzeile realisiert (vgl. Kapitel 3.2). Die CCD-Zeile ist in einer sogenannten Rotationszeilenkamera parallel zur Rotationsachse angeordnet. Deshalb beschreibt die Sensorzeile beim Aufnahmevorgang einen Zylindermantel, auf dem die Objektpunkte durch geradlinig verlaufende Strahlen, die sich im Projektionszentrum O schneiden, eindeutig abgebildet werden (Abbildung 4.2). Die Umkehrabbildung ist wie auch bei der Zentralperspektive nicht eindeutig, da ein Abbildungsstrahl aus unendlich vielen Punkten im Objektraum besteht. Die Abbildung auf den Zylinder unterliegt nur in vertikaler Richtung, d. h. in Richtung der Rotationsachse, den Gesetzmäßigkeiten der Zentralperspektive. In horizontaler Richtung geht damit auch die Eigenschaft der geradentreuen Abbildung verloren, weshalb die mit einer Rotationszeilenkamera aufgezeichneten Bilder einen ungewohnten Eindruck vermitteln. Das Panoramabild ist mit einem abgewickelten Zylindermantel vergleichbar. Das geometrische Modell für Rotationszeilenkameras soll im Folgenden hergeleitet werden (vgl. [Luhmann et. al., 2006; Schneider & Maas, 2006]).

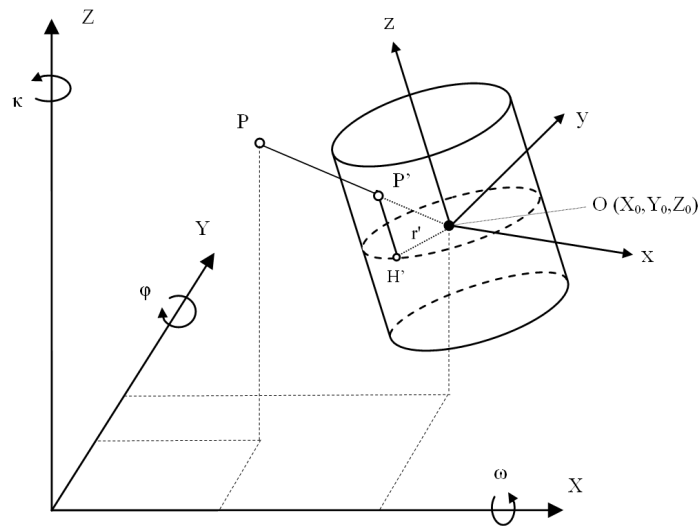


Abbildung 4.2: Geometrisches Modell einer Panoramakamera

4.2.1 Koordinatensysteme

Zur Herleitung des geometrischen Modells für Panoramakameras ist die Verwendung von vier verschiedenen Koordinatensystemen zweckmäßig. Wie auch beim Modell der Zentralperspektive werden ein kartesisches Objekt- und ein kartesisches Kamerakoordinatensystem verwendet. Angepasst an die spezielle Geome-

trie wird weiterhin ein zylindrisches Kamerakoordinatensystem definiert. Schließlich werden im Panoramabild zweidimensionale Bildkoordinaten gemessen.

4.2.1.1 Kartesisches Objektkoordinatensystem

Wie auch beim geometrischen Modell der Zentralperspektive wird ein Objektkoordinatensystem verwendet, dessen Ursprung und Orientierung in geeigneter Beziehung zum Aufnahmeobjekt steht bzw. durch übergeordnete Koordinaten (z.B. Landeskoordinaten) definiert ist.

4.2.1.2 Kartesisches Kamerakoordinatensystem

Das kartesische Kamerakoordinatensystem wird im geometrischen Modell einer Panoramakamera in der Weise definiert, dass dessen Orientierung im übergeordneten System sich während der Aufnahme nicht ändert, es also mit der Aufnahmerichtung nicht mitrotiert. Dies wird erreicht, indem die x -Achse in die Aufnahmerichtung der ersten Bildspalte und die z -Achse in die Rotationsachse gelegt wird (Abbildung 4.3). Die y -Achse des Gerätekoordinatensystems wird durch Vervollständigung zu einem räumlichen Rechtssystem definiert.

Der Winkel κ beschreibt die Ausrichtung der x -Achse gegenüber der X -Achse im Objektkoordinatensystem. Dieser Winkel ist im Gegenuhrzeigersinn definiert und beschreibt die Richtung der Kamera zu Beginn der Aufnahme eines Bildes bei einer im Uhrzeigersinn aufnehmenden Kamera. Die Stellung der z -Achse gegenüber der Z -Achse des Objektkoordinatensystems wird durch die Komponenten Längsneigung φ und Querneigung ω ausgedrückt. Die Längsneigung entspricht einer Rotation um die Y -Achse, die Querneigung einer Rotation um die X -Achse (Abbildung 4.2).

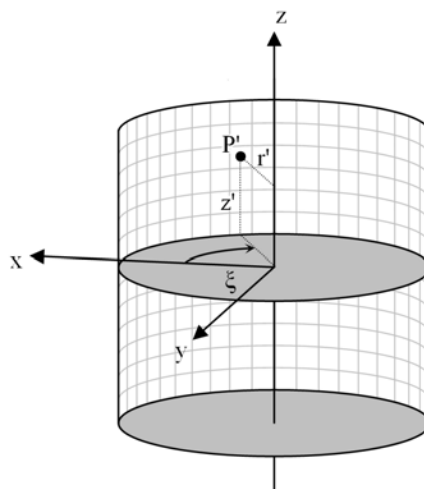


Abbildung 4.3: Kartesisches und zylindrisches Kamerakoordinatensystem

4.2.1.3 Zylindrisches Kamerakoordinatensystem

Bei der Aufnahme beschreibt die Sensorzeile einen Zylindermantel als Bildebene. Deshalb ist es sinnvoll, ein zylindrisches Gerätekoordinatensystem zu definieren, in welchem Zylinderkoordinaten zur Identifikation räumlich verteilter Punkte verwendet werden. Zu den Zylinderkoordinaten gehören der Radius r , d.h. der Abstand des jeweiligen Punktes von der Zylinderachse und die Koordinate z , die wie auch im kartesischen Gerätekoordinatensystem zur Definition vertikaler Abstände dient. Zur eindeutigen Beschreibung eines Punktes in diesem Koordinatensystem ist schließlich eine dritte Koordinate, der Winkel ξ , notwendig. Dies ist der Win-

kel zwischen der x -Achse und dem Ortsvektor zum Lotfußpunkt des Objektpunktes auf der x - y -Ebene (vgl. Abbildung 4.3) und wird im Unterschied zur mathematischen Darstellung eines Zylinderkoordinatensystems im Uhrzeigersinn, das bedeutet z.B. bei der Kamera EYESCAN M3D metric (Kapitel 3.2.3) in Drehrichtung der Kamera, definiert.

Um Bildpunkte P' eindeutig zu lokalisieren, ist es ausreichend, den Winkel ξ und die Vertikalkoordinate z' zu verwenden. Der Zylinderradius r' ist für das gesamte Bild konstant und im Idealfall mit der Kamerakonstante c identisch, wenn das Projektionszentrum auf der Rotationsachse liegt.

4.2.1.4 Panoramabild- und Pixelkoordinatensystem

Das Pixelkoordinatensystem besteht aus Zeilen und Spalten, die entsprechenden Pixelkoordinaten sind u (in Spaltenrichtung) und v (in Zeilenrichtung). Der Ursprung des Systems liegt in der Mitte des Bildelements, welches sich oben links befindet (vgl. Abbildung 4.4). Dieses Bildelement hat die Koordinaten $(0, 0)$, alle anderen Punkte haben die Koordinaten (u, v) . U ist die Anzahl der Spalten und V die Anzahl der Zeilen im Bild. Im speziellen Fall der Rotationszeilenkamera ist das Ergebnisbild mit einem abgewickelten Zylindermantel vergleichbar. Demzufolge kann u in ein Winkelmaß und v in eine Strecke umgerechnet werden.

In Analogie zu der üblichen Vorgehensweise, bei der die Bildkoordinaten in metrischen Einheiten ausgehend von der Bildmitte gemessen werden, kann auch bei einem Panoramabild ein solches Bildkoordinatensystem (x', y') definiert werden und eindeutig in das Pixelkoordinatensystem transformiert werden. Der Ursprung dieses Panoramabildkoordinatensystems befindet sich nur vertikal in der Bildmitte. Die Mitte des Panoramabildes hat in horizontaler Richtung keine Bedeutung, deshalb befindet sich der horizontale Ursprung per Definition in der Mitte der ersten Bildspalte.

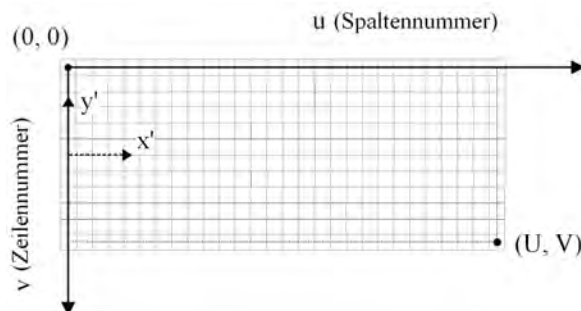


Abbildung 4.4: Definition des Bild- und Pixelkoordinatensystems im Panoramabild

4.2.2 Innere und Äußere Orientierung

4.2.2.1 Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung beschreibt die Lage und Ausrichtung des Kamerakoordinatensystems der Panoramakamera bezüglich des übergeordneten Objektkoordinatensystems (Kapitel 2.2.1.2). Der Abbildungszyylinder kann im Objektkoordinatensystem eine beliebige Orientierung aufweisen. In der Praxis wird die Rotationsachse der Kamera meist annähernd lotrecht sein. Das bedeutet, dass die Winkel ω und φ näherungsweise Null sind. Diese Orientierung kann durch einen Flüssigkeitshorizont, der am Kameragehäuse angebracht ist, realisiert werden. Aber auch eine horizontale Lage der Rotationsachse bezüglich der Erdoberfläche ist für bestimmte Anwendungen denkbar.

4.2.2.2 Innere Orientierung

Die innere Orientierung beschreibt die Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Bezugssystem bzw. stellt den Zusammenhang zwischen Kamerakoordinatensystem und Bildkoordinatensystem her (Kapitel 2.2.1.3). Die Kamerakonstante c ist mit dem Radius des Abbildungszyllinders r' gleichzusetzen, wenn das Projektionszentrum sich innerhalb der Rotationsachse befindet.

Der Bildhauptpunkt H' ist der Lotfußpunkt des Projektionszentrums auf dem Zylindermantel und sollte sich bei exakter Zentrierung der Linsen des Objektivs, sowie bei exakter Zentrierung der Sensorzeile gegenüber der optischen Achse, in der Mitte des Sensors befinden. Nur die vertikale Komponente des Bildhauptpunktes y'_0 ist für Rotationszeilenkameras relevant, da die Abbildung in dieser Richtung der zentralperspektiven Abbildung entspricht. Die horizontale Bildhauptpunkt Komponente x'_0 muss im Gegensatz dazu nicht im Modell berücksichtigt werden, weil für jede Spalte im Bild ein anderer Bildhauptpunkt mit der gleichen Exzentrizität x'_0 existiert. Alle Bildhauptpunkte liegen auf einem horizontalen Kreisbogen innerhalb des Zylindermantels, der auch Bildhauptkreisbogen genannt wird. Für x'_0 kann rechnerisch kein Wert ermittelt werden. Die durch eine horizontale Bildhauptpunktverschiebung verursachten Abweichungen können vollständig durch andere Zusatzparameter kompensiert werden und führen deshalb zu keiner Einschränkung der Modellgenauigkeit.

Zusätzlich zu den Parametern der inneren Orientierung können auch Zusatzparameter, die z.B. die Lage des Sensorzeile zur Rotationsachse beschreiben, berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.2.4).

4.2.3 Abbildungsgleichungen

Für die Herleitung von Gleichungen, die die Abbildung von Objektpunkten in das Bildkoordinatensystem analog zu den Kollinearitätsgleichungen der Zentralperspektive mathematisch beschreiben, werden drei Teiltransformationen verwendet (vgl. Abbildung 4.5). Zuerst werden die Koordinaten der Objektpunkte in das kartesische Gerätekoordinatensystem und anschließend in Zylinderkoordinaten überführt. Mit der Festlegung eines konstanten Zylinderradius wird die Abbildung der Objektpunkte auf die Bildebene beschrieben. Die Bildpunkte können schließlich durch Abwicklung des Zylindermantels in Pixel- bzw. Panoramabildkoordinaten umgerechnet werden.

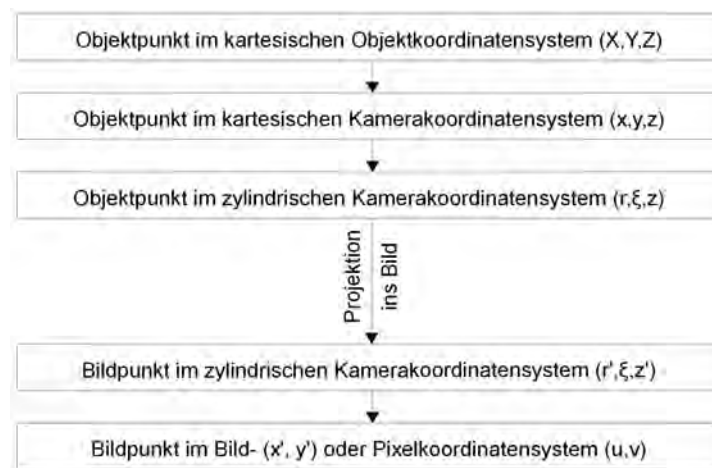


Abbildung 4.5: Teiltransformationen zur Herleitung eines geometrischen Modells für Panoramakameras

4.2.3.1 Transformation der Objektkoordinaten in kartesische Kamerakoordinaten

Die Parameter zur Transformation der Objektkoordinaten in kartesische Kamerakoordinaten sind die Elemente der äußeren Orientierung. Die mathematische Formulierung lautet (mit $\mathbf{X}_0$ Translationsvektor und $\mathbf{R}$ Rotationsmatrix) wie folgt:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \mathbf{R} \cdot \mathbf{x} \quad (4.10)$$

Der Translationsvektor $\mathbf{X}_0$ stellt den Standpunkt der Kamera im Raum bzw. genauer den Schnittpunkt der Rotationsachse der Kamera mit der x - y -Ebene im Kamerakoordinatensystem dar, der im Idealfall dem Projektionszentrum entspricht. Umgestellt nach den kartesischen Kamerakoordinaten entspricht Gleichung (4.10) der Gleichung (4.4).

4.2.3.2 Transformation kartesischer Kamerakoordinaten in Zylinderkoordinaten

Unter Berücksichtigung der Drehrichtung des Winkels ζ , d.h. dem Winkel zwischen Aufnahme-richtung in Ausgangsstellung der Kamera und der Richtung zum Objektpunkt, ergeben sich folgende Transformationsbeziehungen:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \zeta = \arctan \frac{-y}{x} \quad z = z \quad (4.11)$$

Der Radius r ist dabei der Abstand eines Objektpunktes von der Rotationsachse, und z ist wie auch im kartesischen Kamerakoordinatensystem die Höhe eines Objektpunktes über der x - y -Ebene.

In dem Zylinderkoordinatensystem ist es nun relativ einfach möglich, neben den Objektpunkten auch die Bildpunkte zu beschreiben und damit die eigentliche Abbildung auf die Bildebene zu formulieren. Die Abbildungen 4.6 und 4.7 veranschaulichen die Projektion eines Objektpunktes auf den Zylindermantel.

Der Radius r wird durch den Radius des Abbildungszyklinders r' und der Parameter z durch die Höhe des Bildpunktes über der x - y -Ebene z' ersetzt. z und z' können mithilfe einer Strahlensatzbeziehung ineinander überführt werden. Der Drehwinkel ζ ist für einen Objektpunkt und dessen Abbildung identisch:

$$z' = \frac{z}{r} \cdot r' \quad \zeta' = \zeta \quad (4.12)$$

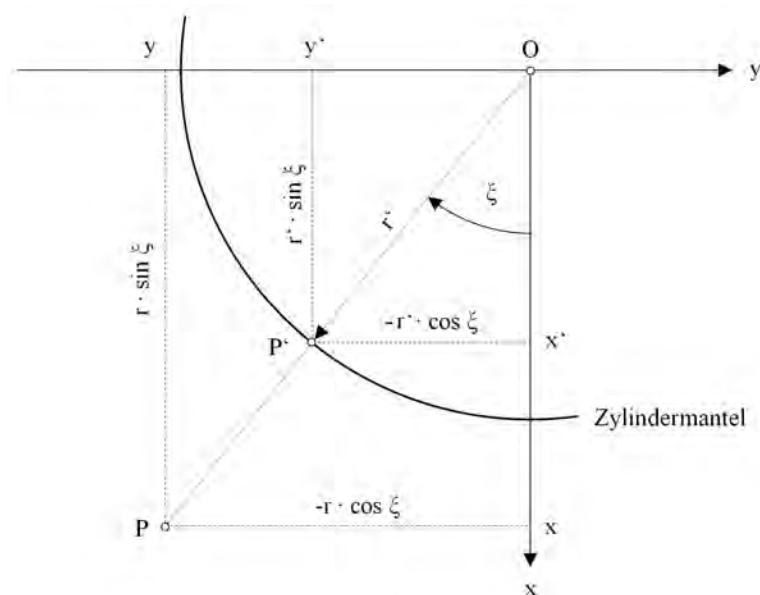


Abbildung 4.6: Horizontale Darstellung des Zylinderkoordinatensystems

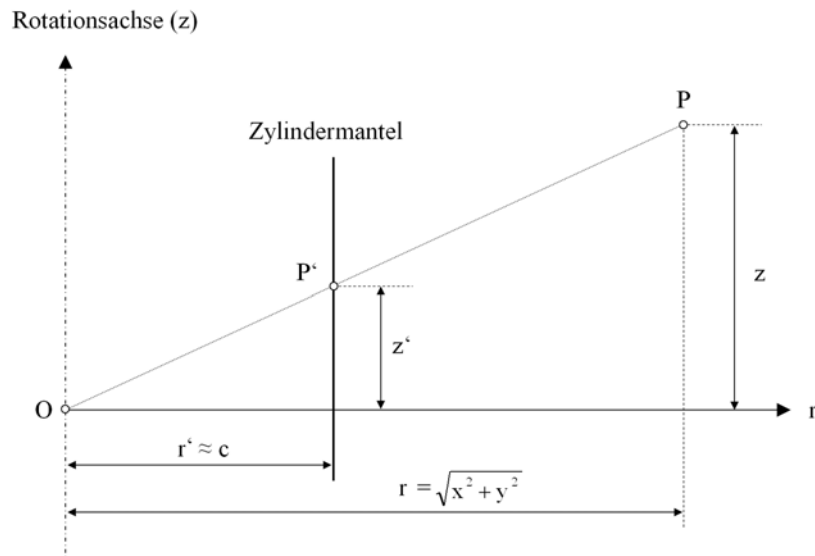


Abbildung 4.7: Vertikale Darstellung des Zylinderkoordinatensystems

4.2.3.3 Transformation der Zylinderkoordinaten ins Panoramabild- bzw. Pixelkoordinatensystem

Durch die Zylinderkoordinaten ζ und z' ist ein Bildpunkt P' eindeutig definiert, da der Zylinderradius für alle Punkte gleich ist. Die Umrechnung dieser Koordinaten erfolgt durch eine Abwicklung des Zylindermantels, die durch Abbildung 4.8 veranschaulicht wird.

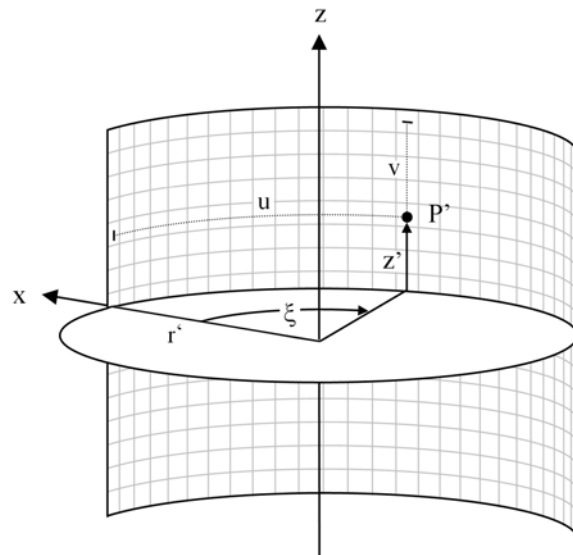


Abbildung 4.8: Zylinderkoordinaten und Pixelkoordinaten

Der Zusammenhang zwischen der horizontalen Komponente ζ und der Bildkoordinate x' bzw. der Bildspalte u wird durch die Gleichungen (4.13) ausgedrückt. A_h definiert die Größe des Winkels, der durch eine pixelbreite Bildspalte erfasst wird. Der Parameter A_h ist als Winkel pro Pixel definiert und ist bei kontinuierli-

chem Rotationsantrieb von der Drehgeschwindigkeit der Panoramakamera abhängig, bei einem Antrieb mit Schrittmotor von der Schrittweite. Wird der Wert des Parameters A_h mit dem Radius des Abbildungszyinders r' multipliziert, ergibt sich der horizontale Pixelabstand auf dem Zylindermantel. Dieser sollte mit dem vertikalen Pixelabstand A_v identisch sein, da es sonst zu einer Affinität, d.h. zu einer Abweichung von der Gleichmaßstäbigkeit der Bildkoordinatenachsen kommt. Aus diesem Grund entspricht A_h einem Affinitätsparameter.

$$x' = r' \cdot \xi \quad u = \frac{\xi}{A_h} \quad (4.13)$$

Die vertikale Komponente z' des zylindrischen Kamerakoordinatensystems ist mit der Panoramabildkoordinate y' identisch. Für die Umrechnung in eine entsprechende Bildzeile v des Pixelkoordinatensystems wird die Kenntnis des vertikalen Pixelabstandes A_v und die Anzahl der Bildzeilen im Panoramabild V auf der Sensorzeile vorausgesetzt:

$$y' = z' \quad v = \frac{V}{2} - \frac{y'}{A_v} \quad (4.14)$$

4.2.3.4 Zusammenfassung der Teiltransformationen

Durch Zusammenführen der in den vorangegangenen Kapiteln hergeleiteten Formeln, ergeben sich folgende Gleichungen, die die Abbildung von Objektpunkten in ein Panoramabild beschreiben:

$$x' = r' \cdot \arctan \frac{-y}{x} + \Delta x' \quad (4.15)$$

$$y' = r' \cdot \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} + y_0' + \Delta y' \quad (4.16)$$

Diese Gleichungen sind mit den Kollinearitätsgleichungen der zentralperspektiven Abbildung vergleichbar, da sie die Beobachtungen, d.h. die Bildkoordinaten, als Funktion der Orientierungs- und Objektpunktparameter beschreiben. Damit sind die hergeleiteten Transformationsbeziehungen Grundlage für verschiedene Ausgleichungsaufgaben von Bilddaten einer Rotationszeilenkamera.

Die kartesischen Koordinaten der Objektpunkte im Kamerakoordinatensystem x , y und z sind wie auch bei der zentralperspektiven Abbildung für die Transformation ins Objektkoordinatensystem mit den Gleichungen (4.4) zu substituieren. Die Gleichungen (4.15) und (4.16) wurden um die Korrekturterme $\Delta x'$ und $\Delta y'$ erweitert, in denen zusätzliche Parameter zur Kompensation von Restsystematiken berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.2.4). Außerdem wurde Gleichung (4.15) um die vertikale Komponente des Bildhauptpunktes y_0' erweitert.

4.2.4 Zusatzparameter

Auch bei einer Panoramakamera wird das als Grundlage dienende geometrische Modell durch den physikalischen Abbildungsvorgang nur genähert realisiert. Abweichungen vom Modell können verschiedene Ursachen haben, die in diesem Kapitel näher erläutert werden sollen. Diese Abweichungen können weitestgehend als Korrekturen an den Bildkoordinaten durch zusätzliche Parameter im Modellansatz berücksichtigt werden.

4.2.4.1 Neigung der Sensorzeile gegenüber der Rotationsachse

Ist die Sensorzeile gegenüber der Rotationsachse geneigt und liegen Sensorzeile und Rotationsachse in einer Ebene, dann bewegt sich der Sensor bei der Aufnahme auf einem Kegelmantel und nicht auf einem Zylindermantel. Die Aufnahme- und die Rotationsachse schließen in diesem Fall keinen rechten Winkel ein (vgl. Abbildung 4.9).

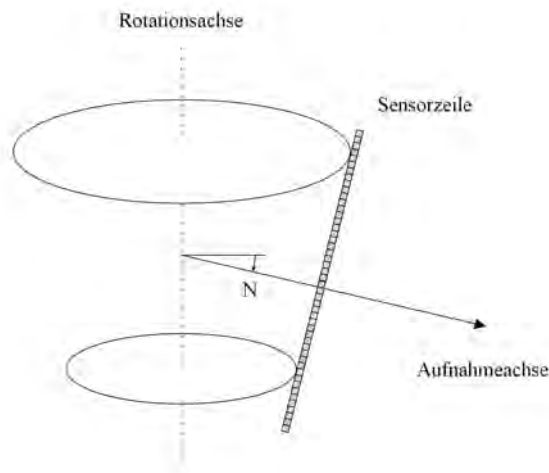


Abbildung 4.9: Neigung der Sensorzeile

Diese Modellabweichung wirkt sich ausschließlich auf die vertikalen Bildkoordinaten aus. Die Abhängigkeit der Bildkoordinaten von der Neigung der Sensorzeile N kann mit Hilfe von Abbildung 4.10 hergeleitet werden:

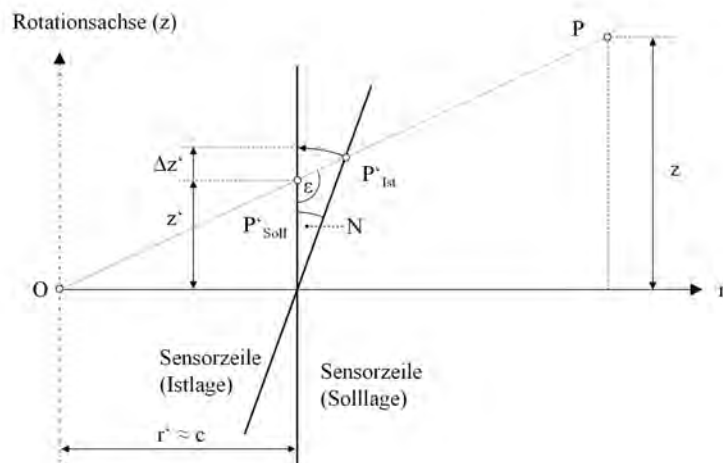


Abbildung 4.10: Auswirkung der Sensorneigung auf vertikale Bildkoordinaten

Folgende Gleichung lässt sich aus Abbildung 4.10 ableiten (Sinussatz im allgemeinen Dreieck):

$$\frac{z'}{z' + \Delta z'} = \frac{\sin(\pi - \varepsilon - N)}{\sin \varepsilon} \quad (4.17)$$

Der Winkel ε ist ein Hilfswinkel, der sich aus der Richtung des Abbildungsstrahles ergibt:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{z'}{c} \quad (4.18)$$

Daraus resultiert schließlich der Korrekturterm vertikaler Bildkoordinaten in Abhängigkeit von der Neigung der Sensorzeile. Auf horizontale Bildkoordinaten hat die Sensorneigung keinen Einfluss:

$$\Delta x'_N = 0 \quad \Delta y'_N = \Delta z' = \frac{z' \cdot \cos\left(\arctan \frac{z'}{r}\right)}{\cos\left(\arctan \frac{z'}{r} + N\right)} - z' \quad (4.19)$$

4.2.4.2 Kantung der Sensorzeile gegenüber der Rotationsachse

Liegen Sensorzeile und Rotationsachse nicht in einer gemeinsamen Ebene, ist die Sensorzeile gegenüber der Rotationsachse verkantet. Die gegenseitige Lage von Rotationsachse und Sensorzeile wird dann mathematisch als windschief bezeichnet (vgl. Abbildung 4.11). Objektgeraden, die parallel zur Rotationsachse stehen, werden nicht nur in einer Bildspalte abgebildet, sondern schneiden mehrere Spalten. Für Objektpunkte im Kamerahorizont ($z = 0$) wirkt sich der Fehler nicht aus.

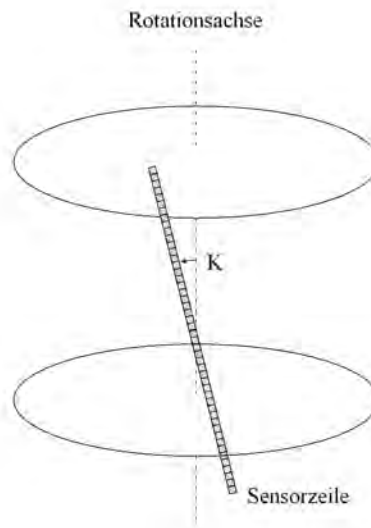


Abbildung 4.11: Kantung der Sensorzeile

Wie Abbildung 4.12 zeigt, wirkt sich diese Modellabweichung hauptsächlich auf die horizontale Komponente der Bildkoordinaten aus. Auf vertikale Bildkoordinaten hat die Verkantung nur einen geringen Einfluss.

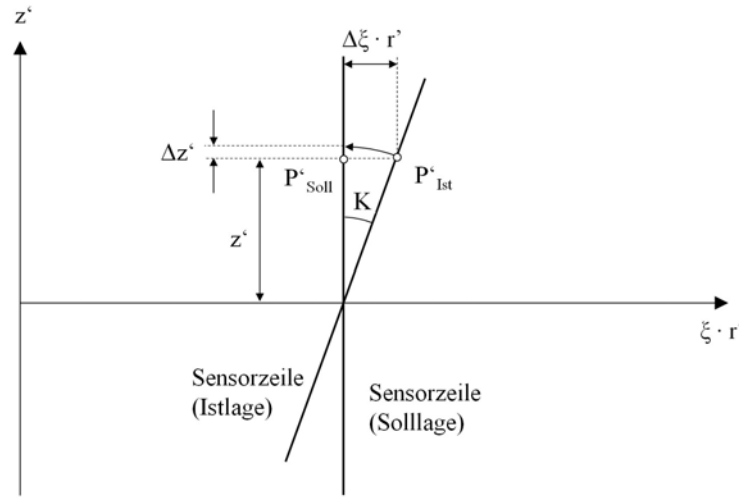


Abbildung 4.12: Auswirkung der Sensorkantung auf horizontale und vertikale Bildkoordinaten

Aus Abbildung 4.12 lassen sich folgende Korrekturterme ableiten:

$$\Delta x'_K = \Delta \xi \cdot r' = z' \cdot \tan K \quad \Delta y'_K = \Delta z' = z' \cdot \left(\frac{1}{\cos K} - 1 \right) \quad (4.20)$$

4.2.4.3 Exzentrizität des Projektionszentrums bezüglich der Rotationsachse

Das im Kapitel 4.2.3 hergeleitete geometrische Basismodell geht davon aus, dass sich das Projektionszentrum in der Rotationsachse befindet und der Radius des Abbildungszyinders r' deshalb mit der Kamerakonstante c übereinstimmt. Tatsächlich existiert jedoch meist eine Restexzentrizität e , die dazu führt, dass es streng genommen nicht nur ein Projektionszentrum gibt, sondern ein individuelles für jede Bildspalte. Die Kamerakonstante des Objektivs c ergibt sich dann durch die Differenz zwischen r' und e . Zur Herleitung der Auswirkung der Exzentrizität e auf die Bildkoordinaten soll Abbildung 4.13, ein Vertikalschnitt durch den Abbildungszyinder, dienen.

Aus dieser Abbildung lassen sich folgende Strahlensatzbeziehungen ableiten:

$$\frac{z'}{z} = \frac{r' - e}{r - e} \quad (4.21)$$

$$\frac{z' + \Delta z'}{z} = \frac{r'}{r} \quad (4.22)$$

Durch Umstellen von Gleichung (4.21) nach r' und Einsetzen in (4.22) ergibt sich die Abweichung vertikaler Bildkoordinaten aufgrund der Exzentrizität zwischen Projektionszentrum und Rotationsachse. Auf horizontale Bildkoordinaten hat diese Exzentrizität keinen Einfluss:

$$\Delta x'_e = 0 \quad \Delta y'_e = \Delta z' = e \cdot \frac{z - z'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} \quad (4.23)$$

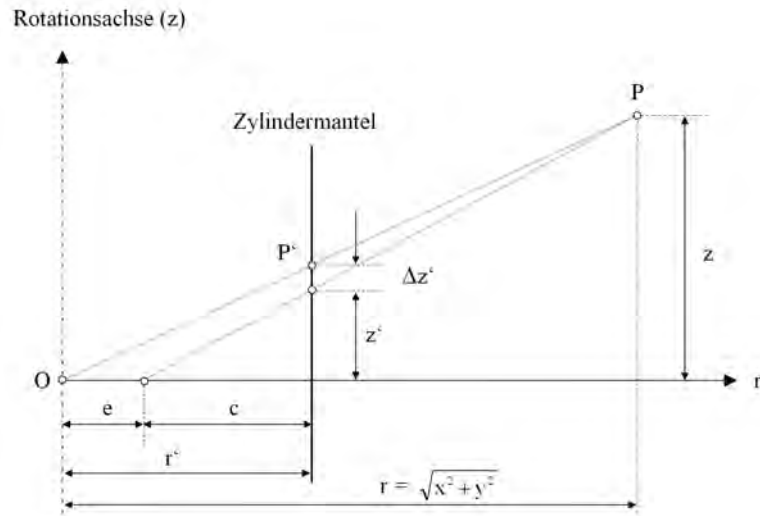


Abbildung 4.13: Auswirkung der Exzentrizität auf vertikale Bildkoordinaten

4.2.4.4 Verzeichnung des Objektivs

Die radial-symmetrische Verzeichnung wurde bereits in den Kapiteln zur Zentralperspektive (4.1.2 und 4.1.3) erläutert und entsprechende Korrekturterme vorgestellt. Während sich die Verzeichnung bei Kameras mit Flächensensoren zweidimensional, d.h. auf beide Bildkoordinatenrichtungen, auswirkt, ist ihr Einfluss bei einer Rotationszeilenkamera nur in vertikaler Bildkoordinatenrichtung (also in Richtung der Sensorzeile) wirksam. Entsprechend Gleichung (4.5) kann die Korrektur vertikaler Bildkoordinaten formuliert werden:

$$\Delta x'_{rad} = 0 \quad \Delta y'_{rad} = A_1 \cdot y'^3 + A_2 \cdot y'^5 + A_3 \cdot y'^7 - y' \left(A_1 \cdot r_0^2 + A_2 \cdot r_0^4 + A_3 \cdot r_0^6 \right) \quad (4.24)$$

Der Parameter r_0 beschreibt einen zweiten Nulldurchgang der Verzeichnungsfunktion, und sollte bei etwa 2/3 des Bildradius liegen, das entspricht bei Rotationszeilenkameras 1/3 der Sensorlänge. Dieser Parameter dient der Entkorrelation der Verzeichnungsparameter vom Bildmaßstab.

Andere Verzeichnungseffekte, wie die radial-asyymetrische und tangentiale Verzeichnung (Dezentrier-verzeichnung) können sich nur in einer Dimension (in Richtung der Sensorzeile) auf die Bildkoordinaten auswirken. Dadurch werden sie aber vollständig durch andere Zusatzparameter, wie die Sensorneigung und die radial-symmetrische Verzeichnung in Verbindung mit einer Bildhauptpunktverschiebung, kompensiert.

4.2.4.5 Affinität

Ursachen für eine Affinität können vor allem eine zu schnell oder zu langsam rotierende Kamera sein. Die aufgenommenen Pixel wären dann nicht mehr quadratisch, was dazu führt, dass die Bildinformation bei zu großer Rotationsgeschwindigkeit gestaucht und bei zu niedriger Geschwindigkeit gestreckt wird.

Die Affinität wird entweder durch den in Kapitel 4.2.3.3 eingeführten Parameter A_n direkt im Grundmodell berücksichtigt oder wird als Zusatzparameter, wie auch bei zentralperspektiv abbildenden Kameras üblich, entsprechend Gleichung 4.8 eingeführt [El-Hakim, 1986]:

$$\Delta x'_{aff} = C_1 \cdot x'_{pan} \quad \Delta y'_{aff} = 0 \quad (4.25)$$

4.2.4.6 Modellabweichungen durch Unzulänglichkeiten der Drehbewegung

Fehler in der Rotationsgeschwindigkeit können verschiedene Ursachen mit unterschiedlicher Wirkung auf die Bildkoordinaten haben. Einige mögliche Einflüsse werden anschließend aufgezeigt. Während die bisher genannten Abweichungen vom geometrischen Modell bei allen Rotationszeilenkameras in gleicher Weise berücksichtigt werden können, sind die Modellabweichungen, die durch Fehler der Drehbewegung verursacht werden, stärker vom Kamerateyp abhängig. Deshalb kann es sinnvoll sein, die Modellgleichungen entsprechend den individuellen Eigenschaften der jeweiligen Kamera anzupassen. Beispielsweise sind bei einem kontinuierlichen Antrieb andere Abweichungen zu erwarten als bei einem Schrittmotor-Antrieb. Die im Folgenden beschriebenen Abweichungen werden zumeist durch das komplexe Zusammenspiel unterschiedlicher mechanischer Bauteile innerhalb des Motors und des Getriebes verursacht, weshalb die physikalische Interpretation der zur Kompensation verwendeten Parameter nicht vollständig möglich ist.

- Winkelpositionierfehler des Drehtisches

Geringfügige Schwankungen der Rotationsgeschwindigkeit werden durch Spannungen in den Lagern, im Getriebe und im Motor verursacht. Dieser Effekt äußert sich darin, dass der tatsächliche Horizontalwinkel an verschiedenen Positionen unterschiedlich starke Differenzen zur Sollrichtung aufweist, was durch Abbildung 4.14 veranschaulicht wird.

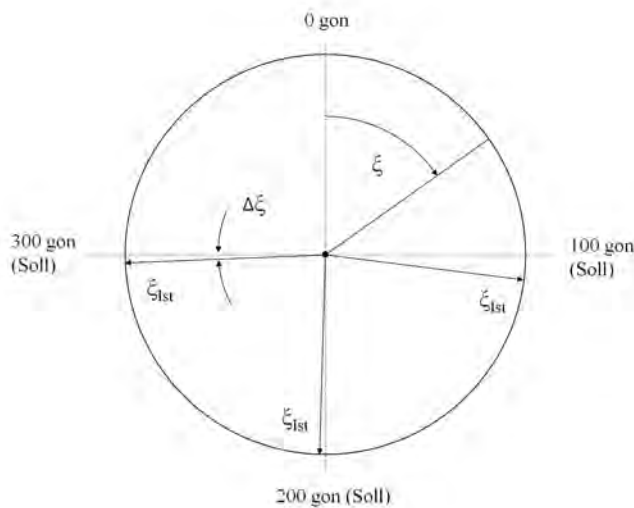


Abbildung 4.14: Veranschaulichung des Winkelpositionierfehlers

Periodische Anteile dieses Fehlers lassen sich durch einen Korrekturansatz in Form einer Fourierreihe, also einer Funktionenreihe aus trigonometrischen Funktionen, kompensieren. Die Parameter der Fourierreihe dienen dann als zusätzliche Parameter im Modellansatz. In praktischen Untersuchungen der Panoramakamera EYSCAN M3D metric [Schneider, 2002] hat sich die Verwendung einer Sinusfunktion in Form von Gleichung (4.26) als geeignet herausgestellt. Zusatzparameter sind die Parameter der Sinusfunktion (Amplitude a , Frequenz b , Phasenlage c):

$$\Delta x'_{rot} = r' \cdot \Delta \xi = a_1 \sin(b_1 \xi + c_1) + a_2 \sin(b_2 \xi + c_2) \quad (4.26)$$

- Fehler im Planlauf des Drehtisches

Der Planlauf des Drehtisches beschreibt die vertikale Stabilität des Drehtellers während der Drehung. Ungenauigkeiten werden hauptsächlich durch die Mechanik des Drehtisches verursacht. Zu erwarten sind vor

allem periodisch verlaufende Abweichungen vom Planlauf, die sich im Kamerasystem durch eine Vertikalbewegung der Kamera und damit durch eine Auf- und Abbewegung der Sensorzeile bemerkbar machen. Dieser Fehler lässt sich ebenfalls durch eine Korrekturfunktion in Form einer Fourierreihe (hier in Amplitude-Phasen-Notation), die an die vertikalen Bildkoordinaten angebracht wird, modellieren. Die Korrektur vertikaler Bildkoordinaten ist abhängig vom horizontalen Drehwinkel:

$$\Delta y'_{rot} = a_3 \sin(b_3 \zeta + c_3) + a_4 \sin(b_4 \zeta + c_4) \quad (4.27)$$

- Fehler im Rundlauf des Drehtisches

Abweichungen im Rundlauf des Drehtisches werden von einer Bewegung der Rotationsachse während der Kameradrehung bewirkt. Dieser Effekt ist mit einem Taumelfehler der Stehachse eines Theodoliten vergleichbar und entsteht infolge von Einflüssen der Achslagerung. Die Wirkung periodischer Abweichungen vom Rundlauf überlagert sich mit anderen durch die Drehbewegung verursachten Unzulänglichkeiten und kann deshalb mit den Parametern der Fourierreihen (Gleichung 4.26 und 4.27) oder mit einem Polynomansatz, wie in [Amiri Parian, 2007] gezeigt wird, weitestgehend kompensiert werden.

- Lastabhängigkeiten des Motors

Eine nicht lotrecht aufgestellte Panoramakamera kann dazu führen, dass die Drehgeschwindigkeit der Panoramakamera variiert. Die dadurch verursachten Abweichungen sind mit einem Winkelpositionierfehler vergleichbar und demzufolge mit dem gleichen Korrekturansatz erfassbar. Im Unterschied zum Winkelpositionierfehler ist dieser Fehler jedoch nicht konstant, sondern ist von der aktuellen Aufstellung der Kamera abhängig. Deshalb könnte er bei Berechnungen mit mehreren Panoramabildern eher als bild-variante Abweichung berücksichtigt werden.

- Anfahr- und Abbremsverhalten der Rotation

Während der Anfahr- und Abbremsphase des Rotationsantriebs kann es zu Vibrationen und zu weiteren Ungleichmäßigkeiten des Antriebs kommen. Da die dadurch verursachten Abweichungen kaum modellierbar sind, sollte während dieser Phasen keine Aufnahme von Bilddaten erfolgen. Dies sollte bei einer Panoramakamera durch die Steuersoftware berücksichtigt werden.

4.2.4.7 Zusammenfassung der Zusatzparameter

Alle im Kapitel 4.2.4 beschriebenen Korrekturfunktionen zur Kompensation von Abweichungen vom geometrischen Grundmodell können in den Gleichungen (4.15) und (4.16) wie folgt berücksichtigt werden:

$$\begin{aligned} \Delta x' &= \Delta x'_K + \Delta x'_{rot} + \Delta x'_{aff} \\ \Delta y' &= \Delta y'_N + \Delta y'_K + \Delta y'_e + \Delta y'_{rad} + \Delta y'_{rot} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Die darin enthaltenen Zusatzparameter Sensorneigung N , Sensorkantung K , Exzentrizität e , die Verzeichnungsparameter A_1 , A_2 und A_3 , die Affinität A_h bzw. C_l sowie die Parameter der Fourierreihen a , b und c können dann im Rahmen eines räumlichen Rückwärtsschnittes oder einer Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung bestimmt werden.

Im Kapitel 5.1 erfolgt die Verifikation des geometrischen Modells, insbesondere der Zusatzparameter. Dies soll zum einen zeigen, welche Parameter notwendig bzw. sinnvoll sind, und zum anderen soll die Stabilität der Parameter überprüft werden. Nicht ausreichend stabile Parameter können als bild-variant berücksichtigt werden. Es wurden auch weitere Parameter, wie beispielsweise eine Krümmung der Sensorzeile testweise berücksichtigt. Allerdings hat sich dabei entweder eine vollständige Korrelation mit anderen Parametern gezeigt, oder die Parameter konnten in den durchgeführten Tests nicht signifikant bestimmt werden.

4.3 Fisheye-Abbildung

Fisheye-Objektive sind Objektive mit einer extrem kurzen Brennweite und einem sehr großen Öffnungswinkel von bis zu 180° oder größer (vgl. Kapitel 3.3). Das geometrische Modell der Fisheye-Abbildung weicht von der Geometrie der Zentralperspektive ab, weil damit ein Öffnungswinkel von 180° nicht beschrieben werden kann. Die Herleitung geometrischer Modelle für verschiedene Fisheye-Geometrien soll im Folgenden erläutert werden.

4.3.1 Arten der Fisheye-Abbildung

Es gibt verschiedene gebräuchliche Abbildungsfunktionen für Fisheye-Objektive. In der folgenden Abbildung ist das geometrische Grundmodell einer Fisheye-Abbildung im Vergleich zur Abbildungsgeometrie der Zentralperspektive (vgl. Kapitel 4.1) dargestellt.

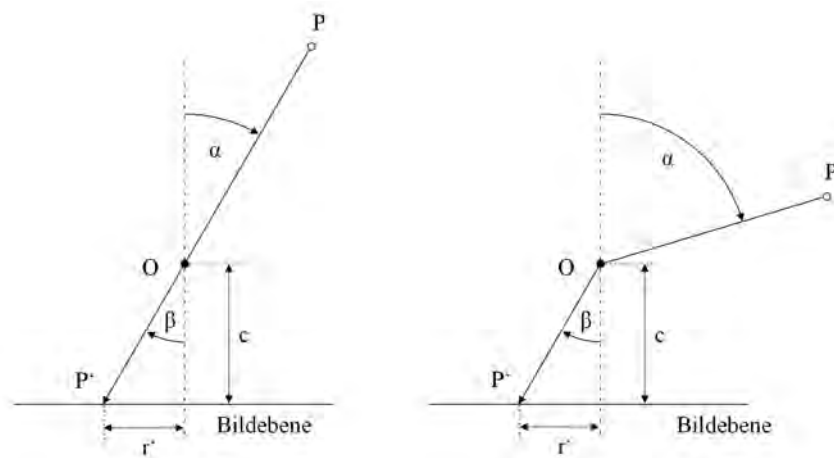


Abbildung 4.15: Zentralperspektive (links) und Fisheye-Abbildung (rechts) im Vergleich

Bei dem Modell der Zentralperspektive verlaufen die Projektionsstrahlen geradlinig und schneiden sich im Projektionszentrum (Abbildung 4.15, links). Deshalb gelten folgende Zusammenhänge:

$$\alpha = \beta \quad r' = c \cdot \tan \alpha \quad (4.29)$$

Im Unterschied zur zentralperspektiven Abbildung haben alle Fisheye-Projektion gemeinsam, dass der Einfallswinkel α nicht unter dem gleichen Winkel β auf die Bildebene abgebildet wird. Das heißt, die Abbildungsstrahlen werden im Projektionszentrum zur optischen Achse hin gebrochen. Fisheye-Abbildungen können verschiedenen Funktionen gehorchen: es gibt die äquidistante, die raumwinkelgleiche, die orthografische und die stereografische Projektion [Prenzel, 1986; Abraham & Förstner 2005].

Während die äquidistante, die raumwinkelgleiche und die orthografische Projektion bei realen Fisheye-Objektiven vorkommen, ist die stereografische Projektion nur theoretischer Natur, lässt sich aber softwareseitig einfach realisieren [Ray, 1994]. Die entsprechenden Gleichungen werden im Folgenden vorgestellt:

- Äquidistante Projektion (abstandstreue Abbildung):

$$\alpha \neq \beta \quad r' = c \cdot \alpha \quad (4.30)$$

Der Einfallswinkel wird linear in einen radialen Abstand vom Bildhauptpunkt übertragen. Diese Projektionsart eignet sich deshalb zur Winkelmessung in radialer Richtung (z.B. in Abbildungen des Sternenhimmels).

- Raumwinkelgleiche Projektion (flächentreue Abbildung):

$$\alpha \neq \beta \quad r' = 2c \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (4.31)$$

Diese Projektionsart bildet flächentreu ab, das heißt das Verhältnis eines einfallenden Raumwinkels zu der daraus resultierenden Fläche im Bild ist konstant. Dadurch eignen sich solche Linsen besonders, um beispielsweise Bedeckungsgrade (z.B. Vegetations- oder Wolkenbedeckung) zu messen.

- Orthografische Projektion:

$$\alpha \neq \beta \quad r' = c \cdot \sin \alpha \quad (4.32)$$

Der radiale Abstand vom Bildhauptpunkt ist proportional zum Sinus des Einfallswinkels. Dadurch wird eine orthogonale Projektion einer Halbkugel auf die Bildebene realisiert. Dadurch entstehen starke Verzerrungen im Randbereich des Bildes.

- Stereografische Projektion (winkeltreue Abbildung):

$$\alpha \neq \beta \quad r' = 2c \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (4.33)$$

Dies ist eine winkeltreu abbildende Projektion. Das heißt, dass ein Winkel im Objektraum und die Abbildung dieses Winkels im Bildraum gleich groß sind. Dadurch bleiben die Proportionen abgebildeter Objekte unverändert.

4.3.2 Modellgleichungen

Um die Projektion eines Objektpunktes in ein hemisphärisches Bild zu beschreiben, werden wie auch bei der Definition der zentralperspektiven Abbildung zwei Koordinatensysteme verwendet, das übergeordnete kartesische Objektkoordinatensystem (X, Y, Z) und das Kamerakoordinatensystem (x, y, z) , beide sind in Abbildung 4.16 dargestellt:

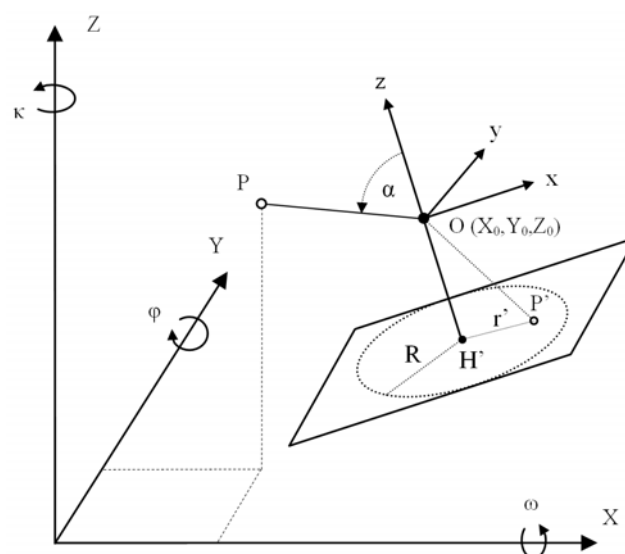


Abbildung 4.16: Geometrisches Modell einer Fisheye-Kamera

Objektkoordinaten können mit Gleichung (4.4) ins Kamerakoordinatensystem transformiert werden. Der Einfallswinkel α ist im Kamerakoordinatensystem wie folgt definiert:

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (4.34)$$

Die oben genannten Gleichungen verschiedener Fisheye-Projektionen sind als Funktion des Bildradius vom Einfallswinkel und der Kamerakonstante angegeben. Benötigt werden jedoch Funktionen der Bildkoordinaten x' und y' . Für die Umrechnung des Bildradius r' in eine x' - und y' -Komponente dient die folgende Gleichung:

$$r' = \sqrt{x'^2 + y'^2} \quad (4.35)$$

Zur Beschreibung der Bildkoordinaten x' und y' als Funktion der Objektpunktkoordinaten x und y im Kamerakoordinatensystem wird Gleichung (4.36) eingeführt. Diese Verhältnisgleichung entsteht durch Anwendung des Strahlensatzes in der Ebene, die durch die z -Achse, den Bildpunkt und den Objektpunkt aufgespannt wird.

$$\frac{x'}{y'} = \frac{x}{y} \quad (4.36)$$

Durch Einsetzen und Umstellen der Gleichungen (4.35) und (4.36) werden diese Grundbeziehungen erhalten:

$$x' = \frac{r'}{\sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2 + 1}} \quad y' = \frac{r'}{\sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1}} \quad (4.37)$$

Das Einsetzen der Modellgleichungen für die verschiedenen Projektionsarten (Gleichungen 4.30 bis 4.33) in Gleichung (4.37) führt schließlich zu den geometrischen Modellen von Kameras mit Fisheye-Objektiv. Dabei sind die kartesischen Koordinaten im Kamerakoordinatensystem x , y und z noch mit den Gleichungen (4.4) in das Objektkoordinatensystem zu transformieren.

Die endgültigen Modellgleichungen für die einzelnen Projektionsarten (4.38 bis 4.41) werden um die Koordinaten des Bildhauptpunktes x_0' und y_0' und die Korrekturterme $\Delta x'$ und $\Delta y'$ erweitert, in denen zusätzliche Parameter zur Kompensation von Restsystematiken berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.3.3) können.

- Äquidistante Projektion (abstandstreue Abbildung):

$$x' = c \cdot \frac{\arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}}{\sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2 + 1}} + x_0' + \Delta x' \quad y' = c \cdot \frac{\arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}}{\sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1}} + y_0' + \Delta y' \quad (4.38)$$

- Raumwinkelgleiche Projektion (flächentreue Abbildung):

$$x' = 2c \cdot \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2 + 1}} + x_0' + \Delta x' \quad y' = 2c \cdot \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1}} + y_0' + \Delta y' \quad (4.39)$$

- Orthografische Projektion:

$$\begin{aligned} x' &= c \cdot \frac{\sin\left(\arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2 + 1}} + x_0' + \Delta x' & y' &= c \cdot \frac{\sin\left(\arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1}} + y_0' + \Delta y' \end{aligned} \quad (4.40)$$

- Stereografische Projektion (winkeltreue Abbildung):

$$\begin{aligned} x' &= 2c \cdot \frac{\tan\left(\frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2 + 1}} + x_0' + \Delta x' & y' &= 2c \cdot \frac{\tan\left(\frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1}} + y_0' + \Delta y' \end{aligned} \quad (4.41)$$

4.3.3 Zusatzparameter

Als Zusatzparameter zur Kompensation von Abweichungen des verwendeten geometrischen Fisheye-Modells von der physikalischen Aufnahme­realität dienen die gleichen Parameter, die bereits bei der Zentralperspektive (Kapitel 4.1.3) vorgestellt worden sind. Das sind die Parameteransätze zur Kompensation der radial-symmetrischen und tangentialen Verzeichnung nach [Brown, 1971] und die Erweiterung des Ansatzes zur Kompensation von Affinität und Scherung nach [El-Hakim, 1986].

Durch praktische Untersuchungen (Kapitel 5.2) konnte gezeigt werden, dass Unterschiede zwischen den verschiedenen geometrischen Fisheye-Modellen nahezu vollständig durch die Polynom-Koeffizienten der radial-symmetrischen Verzeichnung $A_1 - A_3$ abgefangen werden können (außer bei der orthografischen Projektion). Je nach verwendetem Modell haben die Parameter der Verzeichnung dann andere Werte. Deshalb müssen das geometrische Modell und die Zusatzparameter immer als Einheit betrachtet werden und sind nur in Kombination gültig.

4.4 Vollsphärisches Panorama

Ein vollsphärisches Panorama entsteht, wenn man eine 360°-Rotationszeilenkamera mit einem 180°-Fish-eye-Objektiv ausstattet. In dem entstehenden Panoramabild wird die Umgebung der Kamera vollständig abgebildet (vgl. Kapitel 3.6.1). Soll ein solches Panoramabild photogrammetrisch genutzt werden, muss auch dafür ein geometrisches Modell hergeleitet werden. Dazu existieren zwei Ansätze: entweder es werden – angelehnt an den Begriff „vollsphärisch“ – Kugelkoordinaten eingeführt oder man kombiniert das Modell der Rotationszeilenkamera (vgl. Kapitel 4.2) in geeigneter Weise mit den Modellen der Fisheye-Abbildung (vgl. Kapitel 4.3). Während der erste Ansatz für die mathematische Beschreibung der vollsphärischen Projektion sehr anschaulich ist, bietet der zweite Ansatz die Möglichkeit, die verschiedenen Fisheye-Abbildungen zu verwenden und damit die realen Gegebenheiten besser zu modellieren.

4.4.1 Modellierung mittels Kugelkoordinaten

Wie auch beim geometrischen Modell der Panoramakamera werden verschiedene Koordinatensysteme definiert. Die Transformation der Koordinatensysteme ineinander führt schließlich zu den gesuchten Modellgleichungen.

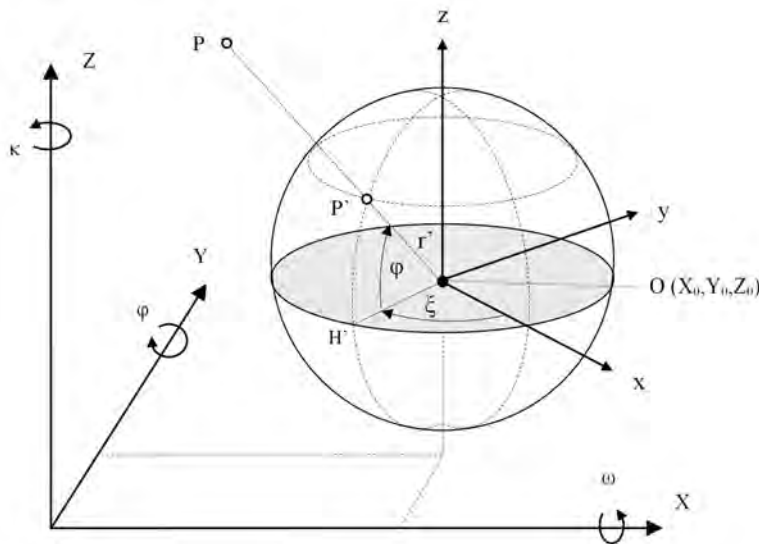


Abbildung 4.17: Geometrisches Modell einer vollsphärischen Panoramakamera

Die verwendeten Koordinatensysteme sind in Abbildung 4.17 dargestellt. Das zylindrische Koordinatensystem des Modells der Panoramakamera wird durch ein sphärisches System ersetzt, in dem auch die eigentliche Projektion vom Objekt ins Bild vollzogen wird. Die verwendeten Koordinaten zur Beschreibung eines Objektpunktes sind in diesem System der Abstand des Punktes vom Projektionszentrum r , der Horizontalwinkel ξ und der Vertikalwinkel φ . Durch die Projektion in das Bild wird r durch den Kugelradius r' ersetzt, dieser Wert entspricht im Idealfall der Kamerakonstante c , wenn sich das Projektionszentrum innerhalb der Rotationsachse befindet. Die beiden Winkel ξ und φ sind für Objektpunkt und zugehörigen Bildpunkt identisch.

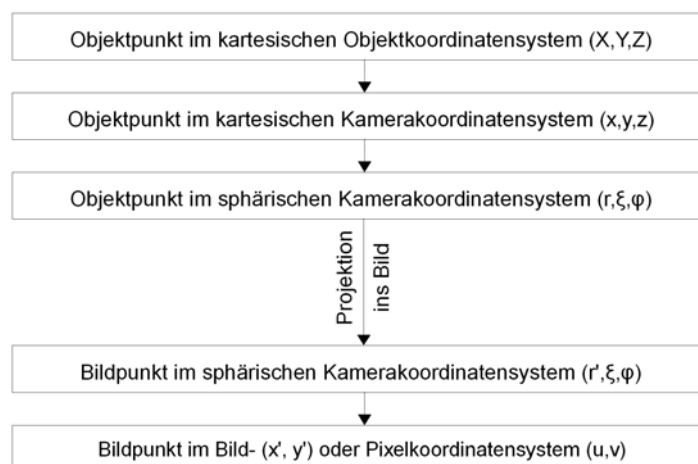


Abbildung 4.18: Teiltransformationen zur Herleitung eines geometrischen Modells für vollsphärische Panoramakameras

Die Herleitung der gesuchten Modellgleichungen folgt dem in Abbildung 4.18 dargestellten Schema. Zuerst werden wieder die kartesischen Objektkoordinaten X, Y, Z in das Kamerakoordinatensystem x, y, z transformiert. Diese Koordinaten werden anschließend mit Gleichung (4.42) in das sphärische Kamerakoordinatensystem übertragen:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad \zeta = \arctan \frac{-y}{x} \quad \varphi = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (4.42)$$

Im sphärischen Kamerakoordinatensystem erfolgt nun die Projektion des Objektpunktes auf die Kugeloberfläche. Der Abstand des Bildpunktes vom Projektionszentrum r' entspricht im Idealfall der Kamerakonstante c , Horizontal- und Vertikalwinkel bleiben unverändert:

$$r' = c \quad \zeta' = \zeta \quad \varphi' = \varphi \quad (4.43)$$

Abschließend müssen die sphärischen Koordinaten des Bildpunktes in das Pixelkoordinatensystem umgerechnet werden. Das Pixelkoordinatensystem entsteht durch Abwicklung der Kugeloberfläche in eine Ebene. Für horizontale Bildkoordinaten gilt der gleiche Zusammenhang, der bereits für zylindrische Panoramakameras hergeleitet wurde (Gleichung 4.13). Der Parameter A_h wird ebenfalls in „Winkel pro Pixel“ beschrieben und dient als Affinitätsparameter bei Abweichungen von der Gleichmaßstäbigkeit der Bildkoordinatenachsen, die vor allem durch eine zu schnell oder zu langsam rotierende Panoramakamera verursacht werden:

$$x' = r' \cdot \zeta \quad u = \frac{\zeta}{A_h} \quad (4.44)$$

Im Unterschied zu zylindrischen Panoramakameras, liegt der Geometrie vollsphärischer Panoramakameras auch in vertikaler Bildkoordinatenrichtung keine Zentralperspektive vor. Deshalb muss Gleichung (4.14) entsprechend angepasst werden. Werden die Beobachtungen im Pixelkoordinatensystem definiert, muss zusätzlich die Anzahl der Pixel auf dem Zeilensensor V , sowie der vertikale Pixelabstand A_v , berücksichtigt werden:

$$y' = r' \cdot \varphi \quad v = \frac{V}{2} - \frac{\varphi \cdot r'}{A_v} \quad (4.45)$$

Werden die Winkel ζ und φ (Gleichung 4.42) in die Gleichungen (4.44) und (4.45) eingesetzt, erhält man die Bildkoordinaten in Abhängigkeit von den kartesischen Koordinaten eines Objektpunktes im Kamerakoordinatensystem. Um die Bildkoordinaten als Funktion der Objektkoordinaten auszudrücken, sind x, y, z durch die Gleichungen (4.4) zu ersetzen. Außerdem wurden auch hier die Korrekturterme $\Delta x'$ und $\Delta y'$ zur Kompensation systematischer Abweichungen vom Modell, sowie die vertikale Komponente des Bildhauptpunktes y_0' hinzugefügt:

$$x' = r' \cdot \arctan \frac{-y}{x} + \Delta x' \quad (4.46)$$

$$y' = r' \cdot \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} + y_0' + \Delta y' \quad (4.47)$$

4.4.2 Modellierung mittels Panorama-Fisheye-Kombination

Die strenge Kombination des geometrischen Modells für Panoramakameras und des Modells für Fisheye-Objektive bedeutet die Verwendung des ersten Modells für horizontale Bildkoordinaten und die Verwendung des zweiten Modells für vertikale Bildkoordinaten. Während das Panoramakamera-Modell (Gleichung 4.15) direkt verwendet werden kann, sind für das Fisheye-Modell (Gleichungen 4.38 - 4.41) einige Anpassungen notwendig. Dazu soll folgende Skizze dienen:

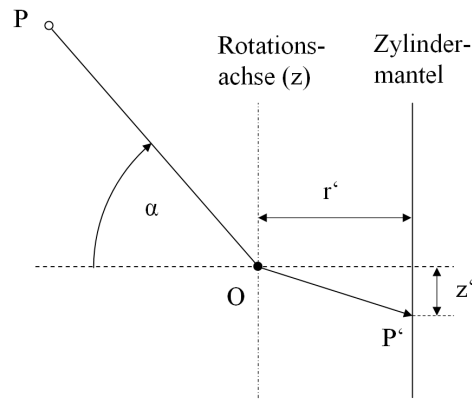


Abbildung 4.19: Geometrie der Kombination von Panoramakamera und Fisheye-Objektiv

Im Unterschied zu dem in Abbildung 4.16 dargestellten Zusammenhang ist der Einfallswinkel α hier nicht als Winkel zur z -Achse, sondern als Winkel zwischen der x - y -Ebene und dem einfallenden Strahl definiert. Die Definition von α ist identisch mit der Definition des Vertikalwinkels φ aus Abbildung 4.17:

$$\tan \alpha = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (4.48)$$

Wird die Grundgleichung für die äquidistante Fisheye-Projektion (Gleichung 4.30) auf Abbildung 4.19 angewendet, ergibt sich der folgende Zusammenhang. Er beschreibt die vertikale Position z' eines Bildpunktes auf dem durch die Rotation des Zeilensensors beschriebenen Zylindermantel als Funktion des vertikalen Einfallswinkels α und dem Zylinderradius r' . Die Koordinate z' im zylindrischen Koordinatensystem entspricht der Koordinate y' im Bildkoordinatensystem:

$$y' = z' = r' \cdot \alpha \quad (4.49)$$

Wird Gleichung (4.48) nach α umgestellt und in (4.49) eingesetzt, erhält man nach Hinzufügen von y_0' und $\Delta y'$ schließlich das geometrische Modell für vertikale Bildkoordinaten eines vollsphärischen Panoramabildes:

$$y' = r' \cdot \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} + y_0' + \Delta y' \quad (4.50)$$

Gleichung (4.50) ist erwartungsgemäß identisch mit Gleichung (4.47), obwohl der Ansatz zur Herleitung des geometrischen Modells für vollsphärische Panoramen unterschiedlich ist. Für horizontale Bildkoordinaten x' gilt Gleichung (4.15) entsprechend, da die Bildaufnahme in horizontaler Richtung in gleicher Weise wie bei einer zylindrischen Panoramakamera mit zentralperspektivem Objektiv erfolgt.

Der Vorteil dieses Ansatzes zur Herleitung des geometrischen Modells liegt in der einfach zu überblickenden Implementation unterschiedlicher Fisheye-Projektionen. Wird Gleichung 4.49 durch die Gleichungen der übrigen Fisheye-Projektionen ersetzt, ergeben sich folgende weiteren geometrischen Modelle für vertikale Bildkoordinaten eines vollsphärischen Panoramabildes:

- Raumwinkelgleiche Projektion (flächentreue Abbildung):

$$y' = 2r' \cdot \sin \left(\frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) + y_0' + \Delta y' \quad (4.51)$$

- Orthografische Projektion:

$$y' = r' \cdot \sin \left(\arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) + y_0' + \Delta y' \quad (4.52)$$

- Stereografische Projektion (winkeltreue Abbildung):

$$y' = 2r' \cdot \tan \left(\frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) + y_0' + \Delta y' \quad (4.53)$$

4.4.3 Zusatzparameter

Als Zusatzparameter werden im geometrischen Modell für vollsphärische Panoramakameras die gleichen verwendet wie beim einfachen Panoramamodell (Kapitel 4.2.4). Das sind Neigung und Kantung der Sensorzeile und die Exzentrizität des Projektionszentrums von der Rotationsachse. Besondere Bedeutung haben im Fall des vollsphärischen Panoramas die Parameter zur Korrektur der radial-symmetrischen Verzeichnung des Objektivs, mit denen Abweichungen des Fisheye-Objektivs von der verwendeten Fisheye-Abbildungsfunktion kompensiert werden. Außerdem dient ein Affinitätsparameter zur Kompensation einer zu schnell oder zu langsam rotierenden Kamera.

4.5 Terrestrischer Laserscanner

In den Kapiteln zum geometrischen Modell terrestrischer Laserscanner und dessen Verifikation werden photogrammetrische und geodätische Aspekte gleichermaßen berücksichtigt, da das Aufnahmeprinzip und die damit verbundenen Eigenschaften der Geräte sehr stark den in der Geodäsie verbreiteten Tachymetern ähneln, die später vorgestellte Auswertalgorithmik der Bündelblockausgleichung (Kapitel 6) jedoch photogrammetrischen Ursprungs ist. Besonders auf Unterschiede hinsichtlich der Vorgehensweise bei der geometrischen Beschreibung und Kalibrierung der Geräte wird hingewiesen.

4.5.1 Modellgleichungen

Messdaten terrestrischer Laserscanner sind wie auch bei einem Tachymeter sphärische Koordinaten, d.h. die Schrägdistanz D , der Horizontalwinkel α und der Vertikalwinkel β . Im Unterschied zu den vorher beschriebenen geometrischen Modellen handelt es sich dabei nicht um Bildkoordinaten bezogen auf eine Projektionsfläche, sondern um Messwerte, die durch entsprechende Bauteile direkt im Messgerät ermittelt werden.

Es ist auf einfache Weise möglich, die Messwerte rechnerisch auf eine Bildebene abzubilden und dann mit den vorher beschriebenen geometrischen Modellen zu vergleichen. Definiert man eine Bildebene durch den Horizontalwinkel (x' -Achse) und den Vertikalwinkel (y' -Achse), entspricht das System einer abgewinkelten Kugeloberfläche und das geometrische Modell ist dann vergleichbar mit dem einer vollsphärischen Panoramakamera (vgl. Kapitel 4.4). Die Intensitäts- oder die Distanzwerte können dann in entsprechende Grauwerte umgerechnet werden. Man spricht auch von einem Intensitäts- oder Distanzbild. Die Berechnung eines einheitlichen Pixelrasters ist jedoch nur durch Interpolation möglich, da die Laserscanner-Messdaten eher unregelmäßig verteilt sind.

Das geometrische Modell eines terrestrischen Laserscanners (bzw. aller Messgeräte mit tachymetrischem Messprinzip) lässt sich durch die Definition eines sphärischen Koordinatensystems, dessen Ursprung die Position des Messgerätes im Objektraum darstellt, beschreiben (Abbildung 4.20). Die Definition dieses Modells analog zu den in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Modellen bedeutet die Herleitung eines funktio-

nen Zusammenhang zwischen den Beobachtungen, der Position und Ausrichtung des Gerätes im Raum (äußere Orientierung) und den Zusatzparametern, die in der Geodäsie als Instrumentenfehler bzw. als Korrekturen bezeichnet werden.

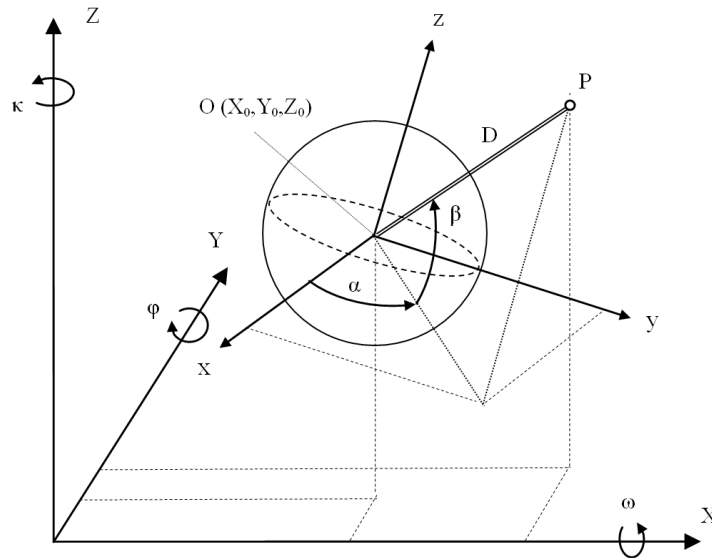


Abbildung 4.20: Geometrisches Modell terrestrischer Laserscanner

Das in Abbildung 4.20 dargestellte Fehler: Referenz nicht gefunden geometrische Modell lässt sich durch Umrechnung kartesischer in sphärische Gerätekoordinaten (Gleichungen 4.54 - 4.56) ausdrücken. Durch Anwendung von Gleichung 4.4 wird das lokale Gerätekoordinatensystem in ein übergeordnetes Objektkoordinatensystem transformiert.

$$D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \Delta D \quad (4.54)$$

$$\alpha = \arctan \frac{y}{x} + \Delta \alpha \quad (4.55)$$

$$\beta = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \Delta \beta \quad (4.56)$$

Bei Messsystemen, die sich an der Lotrichtung orientieren lassen, beispielsweise Tachymetern und Theodoliten, werden die Begriffe 'Horizontalrichtung' und 'Vertikalwinkel' verwendet. Das Bezugskordinatensystem für die Beobachtungen ist dann das übergeordnete, an der Lotrichtung ausgerichtete, Koordinatensystem. Bei terrestrischen Laserscannern wird meist auf die lotrechte Aufstellung verzichtet. Deshalb wird im Folgenden als Bezugskordinatensystem das lokale, fest mit dem Gerät verbundene Gerätekoordinatensystem verwendet und entsprechend werden die Begriffe 'Horizontalwinkel' als Winkel zwischen der der x-Achse und der orthogonalen Projektion des Vektors zum Objektpunkt auf die x-y-Ebene, sowie 'Vertikalwinkel' als Winkel zwischen dem Vektor zum Objektpunkt und der orthogonalen Projektion des dieses Vektors auf die x-y-Ebene definiert.

Ebenso wie bei den geometrischen Kameramodellen können beim geometrischen Modell terrestrischer Laserscanner Zusatzparameter in den Korrekturtermen ΔD , $\Delta \alpha$ und $\Delta \beta$ berücksichtigt werden, die individuelle Eigenschaften der jeweiligen Scannertypen erfassen und deren Kalibrierung erlauben. Die Zusatzparameter

werden wie bei [Lichti & Franke, 2005] mit a_i für die Distanz, b_i für die Horizontalwinkelmessung und c_i für die Vertikalwinkelmessung bezeichnet.

Bei der Kalibrierung terrestrischer Laserscanner besteht oft die Schwierigkeit, dass bereits durch den Hersteller im Scanner geometrische Korrekturen angebracht werden und das diesen Korrekturen zugrunde liegende geometrische Modell nicht bekannt ist. Entsprechend lassen sich entweder nur verbleibende Restabweichungen bestimmen, oder es sind überhaupt keine signifikanten systematischen Effekte in den Residuen der Beobachtungen zu erkennen.

4.5.2 Zusatzparameter der Distanz

4.5.2.1 Abweichungen der Distanzmessung und Ursachen

Zur Herleitung möglicher Zusatzparameter zur Korrektur der Distanzmessung ΔD muss zwischen Geräten mit Distanzmessung nach dem Impulszeit- und dem Phasenvergleichsverfahren unterschieden werden. Für alle elektrooptischen Distanzmessgeräte (EDM) wird von folgender Korrekturformel der gemessenen Schrägdistanz ausgegangen:

$$\Delta D = k_f + k_z + k_0 + k_n + k_{\Delta n} + r \quad (4.57)$$

Die einzelnen Korrekturterme werden in der Geodäsie als Korrekturen bzw. Reduktionen bezeichnet und sind entweder auf Fehler bzw. Abweichungen des Messinstruments oder auf atmosphärische bzw. geometrische Ursachen zurückzuführen [Joeckel & Stober 1999; Möser et. al., 2000; Deumlich & Staiger, 2002]:

k_f	...	Frequenzkorrektur (Maßstabskorrektur)
k_z	...	Zyklische Korrektur
k_0	...	Nullpunktkorrektur
k_n	...	Erste Geschwindigkeitskorrektur
$k_{\Delta n}$	...	Zweite Geschwindigkeitskorrektur
r	...	Geometrische Reduktionen

- Frequenzkorrektur

Abweichungen der Modulationsfrequenz beim Phasenvergleichsverfahren bewirken eine Maßstabsabweichung der Distanzmessung. Eine Ursache dafür ist in der Alterung und Temperatur- bzw. Spannungsabhängigkeit des Quarzes, der zur Stabilisierung der Modulationsfrequenz eingesetzt wird bzw. für die Laufzeitmessung beim Laufzeitverfahren verantwortlich ist, zu suchen. Die sich daraus ergebende Frequenzkorrektur wird angegeben durch folgende Gleichung, wobei f_0 die Sollfrequenz, f die tatsächliche Frequenz und D_a die durch das Messinstrument gemessene Distanz ist:

$$k_f = D_a \frac{f_0 - f}{f_0} \quad (4.58)$$

Diese Korrektur wird beispielsweise für Präzisionsmessungen in der Ingenieurgeodäsie an die mit Tachymetern gemessenen Strecken angebracht. Dazu wird entweder die Istfrequenz direkt gemessen oder aus einer Vergleichsstreckenmessung abgeleitet. In der Praxis sind in den Messgeräten meist Korrekturwerte gespeichert, die in Abhängigkeit von der im Gerät gemessenen Temperatur und Spannung an die Messwerte angebracht werden.

- Zyklische Korrektur

Zyklische Abweichungen treten hauptsächlich bei der Distanzmessung nach dem Phasenvergleichsverfahren auf und entstehen durch Überlagerung hochfrequenter Anteile des gesendeten und empfangenen Signals sowie durch Reflexionen des Signals im Messgerät. Die dadurch hervorgerufenen Abweichungen erzeugen eine sinusförmige Variation der Distanzabweichung mit der Periode der Modulationsfrequenz, die zur Bestimmung der Phasendifferenz verwendet wird:

$$k_z = A \sin((D_a - \phi_0) \frac{2\pi}{U}) \quad (4.59)$$

Diese Gleichung beschreibt die Korrektur der Distanz in Abhängigkeit von der Distanz und der Periode der Modulationsfrequenz $U = \lambda/2$. Die im Rahmen einer Kalibrierung zu ermittelnden Größen sind die Amplitude A des zyklischen Phasenfehlers und die Phasenverschiebung ϕ_0 . Die Kalibrierung dieses Fehlers bei Tachymetern erfolgt auf einer Messbahn mit zahlreichen sehr genau bekannten Messpunkten in unterschiedlicher Entfernung. Neben dem Fehler mit der Periode U können auch Fehler höherer Ordnung ($U/2$, $U/3$) modelliert werden. Bei deutlich ausgeprägten Fehlerkurven kann unter Umständen auch die Periode U mitbestimmt werden. Die Amplitude A kann mit der Entfernung variieren [Deumlich & Staiger, 2002]. Bei gut justierten Messinstrumenten ist die Amplitude der Funktion kleiner als 3 mm [Witte & Schmidt, 2000]. Eine Abweichung dieser Größenordnung sollte bei terrestrischen Laserscannern bereits Berücksichtigung finden. Auch wenn die Einzelpunktgenauigkeit meist geringer ist, können aus Punktwolken terrestrischer Laserscanner abgeleitete Objekte (z.B. Ebenen) von diesem Fehler beeinflusst werden.

- Nullpunktkorrektur

Die Abweichung des elektronischen und mechanischen Nullpunktes der Distanzmessung wird durch eine Nullpunktkorrektur kompensiert, die sowohl bei Geräten mit Distanzmessung nach dem Phasenvergleichs- als auch dem Impulslaufzeitverfahren auftreten kann. In praktischen Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Nullpunktkorrektur keine konstante Größe ist, sondern aufgrund von Phaseninhomogenitäten und anderen Effekten auch einen linearen bzw. polynomischen Verlauf haben kann [Witte & Schmidt, 2000]. Deshalb wird die Nullpunktkorrektur in einen konstanten, linearen und quadratischen Anteil aufgeteilt, weshalb auch die Bezeichnung 'Additionskonstante' nicht zutreffend ist:

$$k_0 = k_{0,a} + k_{0,b} D_a + k_{0,c} D_a^2 \quad (4.60)$$

Je kürzer die Strecke ist, desto stärker wirkt sich eine falsche bzw. nicht berücksichtigte Nullpunktkorrektur auf die relative Genauigkeit aus [Möser et. al., 2000]. Bestimmt wird diese Abweichung bei Tachymetern auf Eichstrecken mittels Soll-Ist-Vergleich (Distanzmessung in allen Kombinationen). Die Nullpunktkorrektur ist nicht allein vom Messinstrument abhängig, sondern wird auch von den Materialeigenschaften und der Geometrie des reflektierenden Objektes beeinflusst.

- Geschwindigkeitskorrekturen

In die Bestimmung der Distanz beim Phasenvergleichs- und Impulslaufzeitverfahren geht die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Messsignals ein, die ihrerseits von dem Brechungsindex des durchlaufenen Mediums abhängt. Der Brechungsindex ist nicht konstant, sondern kann als Funktion der atmosphärischen Parameter Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit dargestellt werden (z.B. durch die empirisch ermittelte Formel von BARREL und SEARS). Ausgehend von einer Normatmosphäre mit dem Brechungsindex n_0 und dem aus den gemessenen atmosphärischen Größen ermittelten tatsächlichen Brechungsindex n kann die Abweichung der Distanzmessung (erste Geschwindigkeitskorrektur k_n) wie folgt berechnet werden:

$$k_n = D_a \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (4.61)$$

In der Praxis werden die atmosphärischen Parameter meist nur am Gerätestandpunkt durch Sensoren im Messinstrument erfasst. Dies führt nur bei extrem großen Unterschieden dieser Parameter entlang des Si-

gnalweges zu signifikanten Abweichungen. Bei terrestrischen Laserscannern ist die erste Geschwindigkeitskorrektur unter normalen Messbedingungen meist zu vernachlässigen, weil die Abweichungen einer 100 m langen Strecke kleiner als 1 mm sind. Allerdings kann bei der Nutzung von terrestrischen Laserscannern in Umgebungen mit großen Temperaturgradienten, beispielsweise in Dachstühlen oder Industriehallen, die Berücksichtigung dieser Korrektur notwendig sein [Kern, 2003]. Die zweite Geschwindigkeitskorrektur ist nur bei sehr großen Distanzen (> 30 km) anzubringen und ist für terrestrische Laserscanner nicht relevant.

- Phaseninhomogenität

Der Laserstrahl eines elektrooptischen Distanzmessers hat beim Verlassen des Messgerätes bereits einen bestimmten Durchmesser, der bei terrestrischen Laserscannern mehrere Millimetern betragen kann und sich mit zunehmender Entfernung vergrößert (Strahldivergenz). Die Phasenlage innerhalb eines Querschnittes durch den Strahl in einer bestimmten Entfernung ist nicht konstant, sondern kann im Millimeterbereich variieren. Je nach dem, welcher Bereich des Laserstrahls für die Distanzmessung genutzt wird, wird ein anderer Wert ermittelt. Dieser Effekt ist als Ursache für andere Distanzabweichungen (Nullpunktkorrektur, Abhängigkeit von der Zielpunktgeometrie) zu berücksichtigen. Zu beachten ist zusätzlich, dass die Phaseninhomogenität bei reflektorloser Messung kaum von Effekten, die durch die Objektoberfläche hervorgerufen werden, zu trennen ist.

- Geometrische Reduktionen

Geometrische Reduktionen werden bei geodätischen Messungen durchgeführt, um die auf der Erdoberfläche gemessene gekrümmte Bahnkurve auf den Bogen im Niveau des sphärischen Bezugshorizonts zu transformieren. Die Krümmungsreduktion ist erst ab Distanzen > 10 km notwendig und damit bei der Anwendung terrestrischer Laserscanner zu vernachlässigen. Die Neigungs- und Höhenreduktion dient der Umrechnung der Raumsehne auf die Sehne im Niveau des Bezugshorizonts und ist nur dann anzubringen, wenn Distanzen im Bezugshorizont eines globalen Koordinatensystems beschrieben werden müssen. Bei terrestrischen Laserscannern ist diese Reduktion in der Regel nicht relevant, weil Laserscanner selten im übergeordneten Koordinatensystem horizontalisiert werden und meist nur die Schrägstrecken für die Auswertung genutzt werden.

4.5.2.2 Physikalische Zusatzparameter der Distanz

Das Ziel ist es nun, aus den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Abweichungen der gemessenen von der wahren Distanz Korrekturterme zu entwickeln, die analog zur Vorgehensweise in der Photogrammetrie systematische Fehler des geometrischen Modells kompensieren und damit zur Kalibrierung des Messgerätes geeignet sind. Das Korrekturmodell soll später in einen räumlichen Rückwärtsschnitt bzw. in eine Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung implementiert werden können.

Dazu müssen die beschriebenen Abweichungen so zusammengefasst werden, dass die verwendeten Zusatzparameter möglichst wenig korreliert sind. Beispielsweise bewirken die Abweichungen aufgrund der Frequenzkorrektur, der ersten Geschwindigkeitskorrektur und dem linearen Anteil der Nullpunktkorrektur jeweils einen linear von der Distanz abhängigen systematischen Fehler. Diese werden deshalb in einem Zusatzparameter a_1 zusammengefasst. Wird ein Wert für a_1 im Rahmen der Ausgleichung geschätzt, kann dieser allerdings nicht auf eine eindeutige Ursache zurückgeführt werden. Das gelingt nur, wenn die Messwerte (Distanzbeobachtungen) bereits vor der Ausgleichung um bekannte Fehleranteile korrigiert werden. So lässt sich der lineare Anteil der Nullpunktkorrektur beispielsweise nur bestimmen, wenn die Beobachtungen um die bekannte Geschwindigkeits- und Frequenzkorrektur, die vorab in einem separaten Kalibrierverfahren (z.B. Laborkalibrierung) bestimmt wurden, berichtigt werden.

Das abgeleitete Korrekturmodell für das geometrische Modell lautet:

$$\Delta D = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 + a_3 e^{-a_4 D} \sin\left((D - a_5) \frac{2\pi}{a_6}\right) \quad (4.62)$$

Die Distanz D entspricht hier dem Grundmodell ohne Korrekturterm ΔD (vgl. Gleichung 4.54). Das Korrekturmodell besteht aus den folgenden Komponenten, wobei die jeweiligen Ursachen (Kapitel 4.5.2.1) in Klammern stehen. Abbildung 4.21 stellt das Korrekturmodell schematisch dar.

- Konstanter Additionsterm a_0 (konstanter Anteil der Nullpunktkorrektur)
- Maßstab a_1 (Frequenzkorrektur, Geschwindigkeitskorrektur, linearer Anteil der Nullpunktkorr.)
- Quadratischer Korrekturparameter a_2 (quadratischer Anteil der Nullpunktkorrektur)
- Amplitude a_3 , Periode a_5 und Phase a_6 der zyklischen Abweichung (zyklische Korrektur)
- Dämpfungsparameter a_4 der zyklischen Abweichung (zyklische Korrektur)

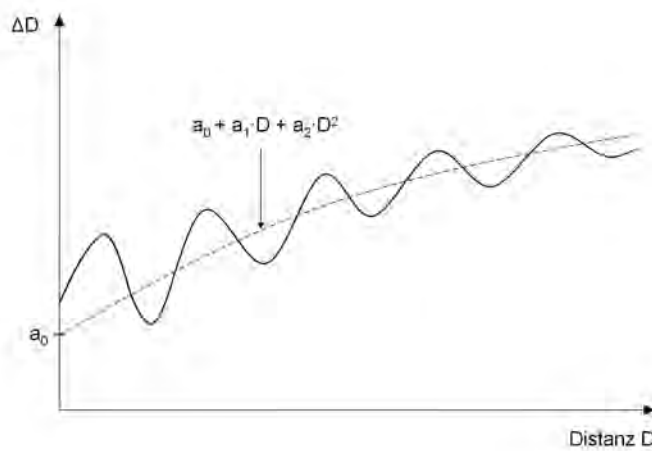


Abbildung 4.21: Schematische Darstellung möglicher Modellabweichungen der Distanzmessung terrestrischer Laserscanner

Das vorgeschlagene Korrekturmodell gilt sowohl für Tachymeter als auch für terrestrische Laserscanner und enthält alle Parameter, die sich aus dem physikalischen Messprinzip ableiten lassen – unabhängig davon, ob die Abweichungen bei dem jeweiligen Messgerät tatsächlich vorhanden sind und ob sie überhaupt in der Ausgleichung signifikant geschätzt werden können bzw. als feste Parameter eingehen müssen. Die Anzahl der Parameter kann abhängig vom Distanzmessverfahren und von der Genauigkeit und Reichweite des Messgerätes reduziert werden. Beispielsweise ist davon auszugehen, dass die quadratische Abweichung der Nullpunktkorrektur a_2 nur selten signifikant bestimmt werden kann [Witte & Schmidt, 2000] und die Periode des zyklischen Phasenfehlers a_6 nicht geschätzt werden kann, sondern als fester Wert (z.B. als ganzzahliger Bruchteil der Modulationswellenlänge) festgesetzt werden muss.

In [Lichti & Licht, 2006] wird für die zyklischen Abweichungen über das hier beschriebene Korrekturmodell hinaus vorgeschlagen, zwei sich überlagernde Schwingungen mit fester, von der Modulationsfrequenz abhängiger Periode zu modellieren. Dabei wird anstelle der Amplituden-Phasen-Notation einer Fourierreihe die allgemeine Form der Fourierreihe verwendet, bei der eine Schwingung durch die Summe aus einer Sinus- und Kosinusfunktion dargestellt wird. Statt der Amplitude p_1 und der Phasenlage p_2 werden dann die Amplituden q_1 und q_2 der Sinus- und Kosinusfunktion geschätzt:

$$p_1 \sin(\omega t - p_2) \cong q_1 \sin(\omega t) + q_2 \cos(\omega t) \quad (4.63)$$

Aufgrund der in [Deumlich & Staiger, 2002] getroffenen Aussage, dass die Amplitude des zyklischen Phasenfehlers variieren kann, wird im Korrekturmodell (Gleichung 4.62) unter Annahme einer gedämpften

Schwingung ein Dämpfungsparameter a_d verwendet, dessen Signifikanz jedoch in Frage steht. [Rietdorf, 2005] und [Klein, 2005] beschränken sich in ihren Distanzkorrekturmodellen auf eine Additionskonstante (entspricht a_0) und einen Maßstabsparameter (entspricht a_1).

Bei der Parametrisierung ist zusätzlich zu beachten, dass die Abweichungen nicht ausschließlich durch das Messinstrument hervorgerufen werden, sondern dass diese sich mit äußeren Fehlereinflüssen überlagern. So wird beispielsweise der Additionsterm a_0 durch die Zielpunktgeometrie und die Beschaffenheit des reflektierenden Materials, sowie der Maßstab a_1 durch atmosphärische Bedingungen beeinflusst. Eine Unterscheidung zwischen konstanten Instrumentenfehlern und wechselnden äußeren Einflussfaktoren ist nur durch zahlreiche Vergleichsmessungen unter wechselnden Bedingungen (Temperatur, Material der Zielpunkte) möglich.

Im Modellansatz lassen sich Parameter, die hauptsächlich durch konstante Einflüsse des Messinstrumentes begründet sind, von Parametern, die stark durch wechselnde äußere Einflüsse verursacht werden, unterscheiden, indem sie entweder als 'aufnahme-variant' oder 'aufnahme-invariant' definiert werden. Das bedeutet, dass bei einer Ausgleichung der Beobachtungen mehrerer Instrumentenaufstellungen der jeweilige Parameter entweder für jeden Standpunkt individuell geschätzt oder für alle Aufstellungen ein gemeinsamer Parameterwert bestimmt wird.

Eine wichtige Voraussetzung dafür, dass die zusätzlichen Parameter zur Kompensation von Distanzabweichungen überhaupt signifikant bestimmt werden können, ist, dass sich die verwendeten Punkte über den gesamten Entfernungsbereich des verwendeten Streckenmessgerätes erstrecken. Dies lässt sich durch zahlreiche Objektpunkte in unterschiedlicher Entfernung sowie zusätzlich durch Beobachtungen von mehreren Standpunkten realisieren. Werden Parameter durch Messungen in Testumgebungen mit einer bestimmten Objektausdehnung signifikant ermittelt, können sie streng genommen auch nur für diesen Distanzbereich als gültig angesehen werden.

4.5.2.3 Empirische und weitere Zusatzparameter der Distanz

Zusätzlich zu den im vorangegangenen Kapitel vorgeschlagenen Korrekturmodell für die Distanzmessung, werden in der Literatur noch weitere Parametrisierungen vorgeschlagen. Beispielsweise wird in [Lichti, 2007] die Untersuchung und geometrische Modellierung des terrestrischen Laserscanners FARO 880 erörtert, der nach dem Phasenvergleichsverfahren mit Amplitudenmodulation arbeitet. Bei der Analyse der Entfernungsrésiduen wurden systematische Effekte gefunden, die sich nicht eindeutig physikalisch erklären lassen, es werden lediglich Vermutungen aufgestellt. Deshalb wird in Gleichung (4.62) zum einen ein Parameter zur Kompensation eines sinusförmigen Distanzfehlers in Abhängigkeit vom Vertikalwinkel eingeführt (a_7) und zum anderen zwei Parameter (a_8 und a_9) zur Korrektur eines sinusförmigen Distanzfehlers als Funktion des Horizontalwinkels mit einer Periode von $\pi/2$:

$$\Delta D = \dots + a_7 \sin \beta + a_8 \sin(4\alpha) + a_9 \cos(4\alpha) \quad (4.64)$$

[Lichti, 2007] vermutet, dass a_7 auf einen vertikalen Offset zwischen dem Laserstrahl und der Kippachse zurückzuführen ist. Der Fehler ist Null bei horizontaler Zielung und erreicht im Zenit des Instrumentes sein Maximum. Diese Begründung konnte durch Simulationen bestätigt werden, dennoch wird dieser Parameter als empirischer Parameter bezeichnet.

Bei terrestrischen Laserscannern ist es unter Umständen sinnvoll, Abhängigkeiten von der Zielgeometrie im geometrischen Modellansatz zu berücksichtigen. Dies wird möglich, wenn die Zielgeometrie aus der Analyse der Punktwolke bestimmt werden kann. Beispielsweise lässt sich in vielen Fällen der Auftreffwinkel des Laserstrahls auf die Objektoberfläche aus der Betrachtung der benachbarten Laserscannerpunkte ableiten. In [Teschke, 2004] wird festgestellt, dass die mit dem terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i über das Impulslaufzeitverfahren ermittelte Distanz vom Auftreffwinkel τ abhängig ist. Die Ursache dafür ist in Phaseninhomogenitäten des Laserstrahls zu suchen. Diese Problematik kann durch folgende Modellerweiterung Berücksichtigung finden:

$$\Delta D = \dots + a_{10} \cos(\tau) \quad (4.65)$$

Trifft der Laserstrahl senkrecht auf die Oberfläche ($\tau = 90^\circ$) ist die Abweichung Null, trifft der Laserstrahl jedoch unter einem anderen Winkel auf die Oberfläche muss gegebenenfalls ein Korrekturwert an die Distanz angebracht werden. Der Winkel, bei dem die Abweichung theoretisch ihr Maximum erreichen würde ($\tau = 0^\circ$), ist praktisch nicht möglich.

4.5.3 Zusatzparameter der Horizontal- und Vertikalwinkelmessung

4.5.3.1 Achsabweichungen und Achsexzentrizitäten

Bei Theodoliten und Tachymetern werden drei Achsen definiert: die Stehachse (Rotationsachse der Horizontalrotation), die Kippachse (Rotationsachse der vertikalen Drehung) und die Zielachse (Richtung des Messstrahls). Bei einem fehlerfreien Messinstrument ist die Zielachse orthogonal zur Kippachse und die Kippachse orthogonal zur Stehachse ausgerichtet. Diese mathematische Definition eines fehlerfreien Messinstruments lässt sich konstruktiv nicht exakt realisieren, sondern es kommt zu einer Zielachs- bzw. Kippachsabweichung. Außerdem müssen sich die drei Achsen in einem Punkt schneiden. Ist dies nicht der Fall, führen diese Exzentrizitäten zu entfernungsabhängigen Abweichungen [Möser et. al., 2000].

Die meisten terrestrischen Laserscanner sind Theodoliten und Tachymetern konstruktiv sehr ähnlich. Deshalb können die diesen Abweichungen und Exzentrizitäten zugrunde liegenden geometrischen Zusammenhänge weitestgehend auch für die Herleitung von Zusatzparametern zum geometrischen Modell terrestrischer Laserscanner genutzt werden.

Die meisten Abweichungen können bei Theodolitmesssystemen durch die Messung in zwei Fernrohrlagen eliminiert werden. Dies ist bei terrestrischen Laserscannern meist nicht möglich oder nicht praktikabel. Im Folgenden sollen die Achsabweichungen und -exzentrizitäten, sowie weitere instrumentenspezifische Abweichungen beschrieben werden (vgl. [Deumlich & Staiger, 2002]):

- Stehachsabweichung

Eine Stehachsabweichung beschreibt eine nicht lotrecht aufgestellte Stehachse. Im hier entwickelten geometrischen Modell wird diese Abweichung nicht als instrumentenspezifischer Fehler betrachtet, sondern als Orientierung des Messinstruments im übergeordneten Koordinatensystem (vgl. Abbildung 4.20). Insbesondere die Orientierungsparameter ω (Rotation um X-Achse) und φ (Rotation um Y-Achse), beschreiben die Stehachsabweichung. Diese Betrachtungsweise entspricht auch der üblichen Vorgehensweise bei der Messung mit terrestrischen Laserscannern, die von vornherein nicht horizontiert werden, sondern erst später mit Hilfe korrespondierender Objektpunkte in ein übergeordnetes, meist horizontales Koordinatensystem transformiert werden.

- Zielachsabweichung

Wenn Zielachse und Kippachse keinen rechten Winkel einschließen, wird von einer Zielachsabweichung gesprochen. Die Zielachsabweichung beeinflusst die Horizontalwinkelmessung in Abhängigkeit vom Vertikalwinkel β :

$$\Delta \alpha_z = \frac{b_z}{\cos \beta} = b_z \sec \beta \quad (4.66)$$

Bei horizontaler Zielung ($\beta = 0$) ist der Einfluss der Zielachsabweichung am kleinsten und entspricht der Größe des Parameters b_z .

- Kippachsabweichung

Sind Kippachse und Stehachse nicht rechtwinklig zueinander, existiert eine Kippachsabweichung. Der Einfluss dieser Abweichung auf Horizontalwinkel ist wie auch die Zielachsabweichung abhängig vom Vertikalwinkel β , bei horizontaler Zielung ($\beta = 0$) ist der Einfluss der Kippachsabweichung gleich Null:

$$\Delta \alpha_K = b_K \tan \beta \quad (4.67)$$

- Höhenindexabweichung

Die Höhenindexabweichung c_H ist ein konstanter Offset der Vertikalwinkelmessung:

$$\Delta \beta_H = c_H \quad (4.68)$$

Existiert eine Höhenindexabweichung, beschreibt die Nullstellung des Vertikalwinkels ($\beta = 0$) bei der Horizontaldrehung des Instrumentes um die Stehachse keine Ebene, sondern einen Kegelmantel.

- Exzentrizität der Zielachse

Eine Exzentrizität der Zielachse liegt vor, wenn die Zielachse nicht die Stehachse schneidet oder wenn die Zielachse nicht die Kippachse schneidet. Die Zielachse liegt dann in einer Tangentialebene an einen Zylinder, dessen Achse die Stehachse bzw. die Kippachse ist. Die entsprechenden Komponenten b_E und c_E der Zielachsexzentrizität sind die Radien dieser Zylinder. Während sich b_E auf die Horizontalwinkelmessung auswirkt, beeinflusst c_E die Vertikalwinkelmessung:

$$\Delta \alpha_E = \arcsin \frac{b_E}{D_a} \approx \frac{b_E}{D_a} \quad (4.69)$$

$$\Delta \beta_E = \arcsin \frac{c_E}{D_a} \approx \frac{c_E}{D_a} \quad (4.70)$$

Die Auswirkung der Exzentrizität ist umgekehrt proportional zur Messdistanz. Da die Exzentrizität meist sehr klein im Vergleich zur Strecke ist und die Sinusfunktion bei kleinen Winkeln einen fast linearen Verlauf hat, können die Korrekturterme für die Horizontal- und Vertikalwinkelmessung vereinfacht durch das Verhältnis von Exzentrizität und Distanz ausgedrückt werden.

- Teilkreisexzentrizität und Kreisteilungsabweichungen

Abhängig von der Methode der Winkelmessung im Messinstrument müssen Teilkreisexzentrizitäten berücksichtigt werden. Bei Theodoliten wird der Horizontalwinkel und der Vertikalwinkel auf einem sog. Teilkreis abgelesen, dessen Rotationszentrum mit der Stehachse für die Horizontalwinkelmessung bzw. mit der Kippachse für die Vertikalwinkelmessung zusammenfallen muss. Ist das nicht der Fall, existiert entweder eine Horizontalkreis- oder Vertikalkreisexzentrizität. Bei Tachymetern werden codierte Teilkreise verwendet, und der Abgriff erfolgt automatisch.

Bei terrestrischen Laserscannern wird die Richtung des Laserstrahls meist direkt durch den Schrittmotor vorgegeben, und nicht nachträglich durch einen Winkelabgriff gemessen. Deshalb ist die Bezeichnung Teilkreisexzentrizität nicht unbedingt zutreffend. In Abhängigkeit vom mechanischen Aufbau des Laserscanners kann es jedoch trotzdem zu vergleichbaren Abweichungen kommen. Im geometrischen Modell eines terrestrischen Laserscanners kann der Effekt durch einen sinusförmigen Korrekturansatz mit einer 360°-Periode des Horizontalwinkels- bzw. Vertikalwinkels als Fourierreihe in Amplituden-Phasen-Notation oder in allgemeiner Form nach [Lichti, 2007] (vgl. Gleichung 4.63) berücksichtigt werden:

$$\Delta \alpha_T = b_{T_1} \sin(\alpha + b_{T_2}) \quad \text{oder} \quad \Delta \alpha_T = b_{T_1} \sin \alpha + b_{T_2} \cos \alpha \quad (4.71)$$

$$\Delta \beta_T = c_{T_1} \sin(\beta + c_{T_2}) \quad \text{oder} \quad \Delta \beta_T = c_{T_1} \sin \beta + c_{T_2} \cos \beta \quad (4.72)$$

Kreisteilungsabweichungen können bei Theodoliten und Tachymetern in langperiodische, kurperiodischen und nichtperiodische Systematiken aufweisen. Bei elektronischen Teilkreisabtastrungen sind solche Abweichungen meist nicht mehr messbar [Ingensand, 1988].

4.5.3.2 Zusatzparameter des Horizontalwinkels

• Physikalische Zusatzparameter

Wie auch für die Distanzmessung kann durch Addition der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Abweichungen ein Korrekturmodell $\Delta\alpha$ zur Kompensation von Abweichungen zwischen dem Grundmodell der Horizontalwinkelmessung (Gleichung 4.55) und der physikalischen Realität aufgestellt werden:

$$\Delta\alpha = b_z \sec\beta + b_K \tan\beta + \arcsin \frac{b_E}{D_a} + b_{T_1} \sin(\alpha + b_{T_2}) \quad (4.73)$$

Dieses Korrekturmodell berücksichtigt eine mögliche Zielachsabweichung b_z , Kippachsabweichung b_K , Zielachsexzentrizität b_E und Teilkreisexzentrizität (Amplitude b_{T_1} und Phasenlage b_{T_2}), unabhängig davon, ob die jeweilige Abweichung beim verwendeten Laserscanner wirklich vorhanden ist und damit signifikant bestimmt werden kann. Dies müssen praktische Untersuchungen zeigen.

Ein in [Lichti, 2007] vorgestelltes Korrekturmodell zur Kompensation von Abweichungen des Horizontalwinkels wurde durch Analyse von Messdaten, die mit einem terrestrischen Laserscanner FARO 880 aufgenommen worden sind, entwickelt und verifiziert. Dabei konnten von den in Gleichung (4.73) verwendeten Parametern nur Zielachs- und Kippachsabweichung signifikant nachgewiesen werden. Stattdessen wurden weitere physikalisch interpretierbare Systematiken gefunden. Zum einen wird eine sinusförmige Schwingung mit einer 180°-Periode des Horizontalwinkels erkannt und modelliert (b_3 und b_4) und zum anderen eine Maßstabsabweichung des Horizontalwinkels b_5 (Gleichung 4.74). Die Maßstabsabweichung äußerte sich nicht unmittelbar in einem linearen Trend der Winkelresiduen, sondern zeigte sich in einer leicht geneigten Schwingung. Die physikalische Ursache der Parameter b_3 , b_4 und b_5 wird mit einer Nicht-Orthogonalität der Ebene, die den Encoder für die Horizontalwinkelmessung enthält, und der Stehachse erklärt.

$$\Delta\alpha = \dots + b_3 \sin(2\alpha) + b_4 \cos(2\alpha) + b_5 \alpha \quad (4.74)$$

• Empirische Zusatzparameter

Zwei weitere Parameter (b_6 und b_7) werden von [Lichti, 2007] zur Modellierung von Residuen des Horizontalwinkels als Funktion des Vertikalwinkels eingeführt, welche nicht bereits durch die Parameter der Zielachs- und Kippachsabweichung korrigiert werden:

$$\Delta\alpha = \dots + b_6 \cos(3\beta) + b_7 \sin(4\beta) \quad (4.75)$$

Der Effekt der Parameter b_6 und b_7 ist am stärksten bei großen Vertikalwinkeln, als möglicher Grund wird ein Taumeln der Kippachse angegeben. Die Periode der Schwingungen wurde durch Analyse des Spektrums der Residuen festgelegt.

4.5.3.3 Zusatzparameter des Vertikalwinkels

• Physikalische Zusatzparameter

Die in Kapitel 4.5.3.1 beschriebenen Abweichungen, die sich auf den Vertikalwinkel auswirken, werden in einem Korrekturmodell zusammengefasst, mit dem die Höhenindexabweichung c_H , die Exzentrizität der Zielachse c_E und eine Teilkreisexzentrizität (Amplitude c_{T_1} und Phasenlage c_{T_2}) kompensiert werden können:

$$\Delta\beta = c_H + \arcsin \frac{c_E}{D_a} + c_{T_1} \sin(\beta + c_{T_2}) \quad (4.76)$$

Die Auswirkung der Exzentrizität der Zielachse wird in hohem Maße von der Art der Strahlauslenkung beeinflusst (Kapitel 3.5.2.3). Insbesondere die Verwendung von um die Kippachse rotierenden Polygonrädern zur vertikalen Strahlauslenkung bewirkt eine Exzentrizität der Spiegelfläche von der Rotationsachse. Es ist

davon auszugehen, dass bereits im Messgerät selbst entsprechende Korrekturen in Abhängigkeit von der Stellung des Polygonrades angebracht werden. Die im Rahmen einer Kalibrierung gegebenenfalls ermittelten Parameterwerte sind dann als verbleibende Restfehler zu interpretieren.

Wie auch beim Korrekturmodell des Horizontalwinkels (Gleichung 4.74), ist es möglich, eine Maßstabskorrektur des Vertikalwinkels anzubringen. Jedoch wurde durch [Lichti, 2007] eine sehr starke Korrelation mit der Höhenindexabweichung c_H festgestellt, deren Ursache nicht geklärt werden konnte.

- Empirische Zusatzparameter

Die empirischen Zusatzparameter c_3 und c_4 verwendet [Lichti, 2007] zum Modellieren einer sinusförmigen Abweichung des Vertikalwinkels als Funktion des Horizontalwinkels mit einer 120°-Periode:

$$\Delta \beta = \dots + [c_3 \sin(3\alpha) + c_4 \cos(3\alpha)] \quad (4.77)$$

Die Ursache wird in einem mechanischen Taumeln des Instrumentes im Dreifuß während der Rotation um die Stehachse vermutet. Auch durch [Kersten et. al., 2005] wurde ein solcher Effekt bei der Aufnahme mit einem terrestrischen Laserscanner Mensi GS100 aufgedeckt.

4.5.4 Andere Ansätze der Modellierung von Instrumentenfehlern

Neben den in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Möglichkeiten der geometrischen Modellierung von Instrumentenfehlern terrestrischer Laserscanner in Form von Korrekturtermen, die zum Grundmodell (Gleichung 4.54 - 4.56) hinzugefügt werden, werden in der Literatur weitere Modellierungsansätze beschrieben.

4.5.4.1 Modellierung durch Teiltransformationen in Quaternionenschreibweise

[Rietdorf, 2005] modelliert Abweichungen der Distanz- und Winkelmessung über eine sukzessive Einführung von Geräteparametern und deren Beschreibung in verschiedenen Systemtransformationen in Quaternionenschreibweise. Dabei wird für jede Abweichung ein Quaternionen-Quadrupel $q_i (a, b, c, d)$ definiert und schrittweise dem Ausgangssystem hinzugefügt:

$$X_i^Z = q_7 \cdot q_6 \cdot [q_4 \cdot q_3 \cdot (q_1 \cdot X_i^A \cdot q_1^T + q_2) \cdot q_3^T \cdot q_4^T + q_5^T] \cdot q_6^T \cdot q_7^T + q_8^T \quad (4.78)$$

mit i : Punktindex

X_i^A : Ausgangssystem mit bereits berücksichtigter Maßstabs- und Nullpunktabweichung der Distanzmessung

q_1 : Korrektur der Zielachsabweichung

q_2 : Korrektur der Exzentrizität zwischen Ziel- und Kippachse

q_3 : Korrektur des Höhenindexabweichung

q_4 : Korrektur der Kippachsabweichung

q_5 : Korrektur der Exzentrizität zwischen Steh- und Kippachse und zwischen Steh- und Zielachse

q_6 : Horizontale Drehung der Nullrichtung des Gerätesystems um den gemessenen Horizontalwinkel

q_7 : Orientierung des Gerätesystems im übergeordneten System (Rotation)

q_8 : Orientierung des Gerätesystems im übergeordneten System (Translation)

X_i^Z : Zielsystem

Die praktische Bestimmung der Geräteparameter erfolgt durch das Scannen mehrerer Ebenen, die mit unterschiedlicher Ausrichtung in einer Kalibrierumgebung installiert wurden. Dazu wird Gleichung 4.78 in eine Ebenengleichung in HESSEscher Normalform eingesetzt, die anschließend zum Aufstellen von Bedingungs-

gleichungen für eine bedingte Ausgleichung verwendet wird. Die Bedingungsgleichungen sind eine Funktion der Beobachtungen (Distanz, Horizontalwinkel, Vertikalwinkel) und der unbekannten Parameter:

$$E: n \cdot X_i^Z - d = 0 \quad (4.79)$$

mit n : Normalenvektor der jeweiligen Ebene
 d : Abstand der Ebene vom Koordinatenursprung

4.5.4.2 Modellierung durch Messungen in zwei Fernrohrlagen

Bei Messungen mit einem Theodolit oder einem Tachymeter lassen sich Abweichungen, insbesondere die Zielachs- und Kippachsabweichung, sowie die Exzentrizität der Zielachse durch Messung in zwei Fernrohrlagen bestimmen bzw. eliminieren [Deumlich & Staiger, 2002]. Dabei wird nach einer ersten Messung des Horizontal- und des Vertikalwinkels das Messinstrument um 200 gon um die Stehachse und das Fernrohr um 200 gon um die Kippachse gedreht und eine zweite Messung durchgeführt.

[Neitzel, 2006] überträgt dieses Prinzip zur Bestimmung der instrumentellen Abweichungen auf terrestrische Laserscanner. Dies ist natürlich nur mit Geräten möglich, die eine Messung in zwei Lagen zulassen. Das sind meistens Panorama-view-Scanner, bei denen die vertikale Strahlauslenkung mit einem elliptischen Spiegel realisiert wird (vgl. Kapitel 3.5.2.3). Es wird exemplarisch der terrestrische Laserscanner Imager 5003 (Zoller + Fröhlich) genannt und dessen Kalibrierung durch Messung in zwei Lagen beschrieben. Die Abweichung $\Delta\alpha$ des Horizontalwinkels aufgrund der Zielachs- und Kippachsabweichung und der Zielachsexzentrizität sowie der zugehörige Vertikalwinkel β ergeben sich bei der Messung in zwei Lagen (I, II) wie folgt:

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_{II} - 200 \text{ gon} - \alpha_I}{2} \quad \text{und} \quad \beta = \frac{\beta_{II} + 400 \text{ gon} - \beta_I}{2} \quad (4.80)$$

Die Abweichung des Horizontalwinkels wird in [Stahlberg, 1997] in Abhängigkeit von der Kippachsabweichung i , der Zielachsabweichung c und der Exzentrizität zwischen Ziel- und Stehachse e durch

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{\cos i \tan c}{\sin \beta} + \frac{\sin i}{\tan \beta}\right) + \frac{e}{D} \quad (4.81)$$

beschrieben. Die Parameter i , c und e können in einer vermittelnden Ausgleichung geschätzt werden. Als Beobachtungen dienen die Abweichungen $\Delta\alpha$, die durch Messung des Horizontalwinkels zu einem Punkt in zwei Fernrohrlagen nach Gleichung (4.80) bestimmt wird, sowie der Vertikalwinkel β und die Distanz D . Die Vertikalwinkel plus ihre Verbesserungen und die Distanzen plus ihre Verbesserungen werden als zusätzliche unbekannte Parameter entsprechend [Koch, 2004] eingeführt. Die ursprünglichen Verbesserungsgleichungen für jede Messung i lauten dann:

$$\Delta\alpha_i + v_{\Delta\alpha_i} = \arctan\left(\frac{\cos i \tan c}{\sin \hat{\beta}_i} + \frac{\sin i}{\tan \hat{\beta}_i}\right) + \frac{e}{\hat{D}} \quad , \quad \beta_i + v_{\beta_i} = \hat{\beta}_i \quad \text{und} \quad D_i + v_{D_i} = \hat{D}_i \quad (4.82)$$

Darüber hinaus wird durch [Neitzel, 2006] ein lineares funktionales Modell zur Bestimmung der Parameter i , c und e durch entsprechende Substitutionen und Vereinfachungen vorgeschlagen. Es wird beschrieben, dass in der Untersuchung des terrestrischen Laserscanners Imager 5003 (Zoller + Fröhlich) die unbekannten Parameter signifikant bestimmt werden konnten. Dabei sollten Messungen zu mindestens sechs Zielpunkten in zwei Lagen erfolgen. Einen guten Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit und Kontrolliertheit der Beobachtungen stellt die Messung zu acht Zielpunkten dar. Das Ergebnis der Ausgleichung hängt auch von der Anordnung der Zielpunkte, insbesondere der Distanz ab. Durch numerische Untersuchungen wurde gezeigt, dass dabei möglichst steile Visuren sowohl nach oben als auch nach unten vorhanden sein sollten.

4.5.4.3 Modellierung mit vollsphärischem Panoramakameramodell und Intensitätsbild

Ein weiterer Ansatz zur Modellierung der Aufnahmegeometrie terrestrischer Laserscanner beruht auf der Verwendung des zweidimensionalen Intensitätsbildes eines terrestrischen Laserscanners. Unter der Annahme, dass dieses Intensitätsbild die gleichen geometrischen Eigenschaften wie das Bild einer vollsphärischen Panoramakamera aufweist, kann das geometrische Modell eines vollsphärischen Panoramabildes (Kapitel 4.4) angewendet werden. Die im Intensitätsbild gemessenen zweidimensionalen Bildkoordinaten diskreter Objektpunkte können dann als Beobachtungen in die Berechnung der Orientierung und der Zusatzparameter eingehen.

Werden dabei die gleichen Zusatzparameter wie bei einer Panoramakamera angesetzt, ist die physikalische Interpretation der Parameter oft schwierig. Außerdem sind dann die ermittelten Werte nicht direkt auf die o.g. Achsabweichungen und -exzentrizitäten übertragbar, weil sich der physikalische Aufbau und der Vorgang zur Aufnahme der jeweiligen Messdaten von Panoramakamera und terrestrischem Laserscanner unterscheiden. Deshalb kann bei Verwendung des Intensitätsbildes eines terrestrischen Laserscanners eine Anpassung des Panorama-Korrekturmodells (Kapitel 4.2.4) notwendig sein. Die Distanzbeobachtung bleibt bei diesem Ansatz der geometrischen Modellierung unberücksichtigt, weshalb auch keine systematischen Abweichungen der Entfernungsmessung ermittelt werden können.

In [Amiri Parian & Grün, 2005] wird die Untersuchung dieses Modellierungsansatzes anhand der Kalibrierung eines terrestrischen Laserscanners Imager 5003 (Zoller + Fröhlich) beschrieben. Dabei werden die gleichen Zusatzparameter berücksichtigt wie bei einer vollsphärischen Panoramakamera. Für die Interpretation dieser Zusatzparameter bei einem terrestrischen Laserscanner wird ein virtueller Zeilensensor angenommen, der orthogonal zur Kippachse und parallel zur Stehachse ausgerichtet ist. Folgende Modellabweichungen konnten auf diese Weise signifikant nachgewiesen werden:

- Neigung und Kantung des virtuellen Zeilensensors bezüglich der Rotationsachse
- Exzentrizität zwischen Scan-Zentrum und Rotationsachse
- Abweichung der horizontalen und vertikalen Winkelauflösung (vergleichbar mit Bildmaßstab und Affinität)
- Mechanische Unzulänglichkeiten des Antriebs (insbesondere Taumelfehler)

4.6 Fazit

Das geometrische Modell von Panoramakameras und Kameras mit Fisheye-Objektiv ist nicht mit der bekannten Geometrie der Zentralperspektive zu beschreiben. Deshalb wurden geometrische Modelle für Bilddaten zylindrischer und sphärischer Panoramakameras, sowie für die mit einem Fisheye-Objektiv aufgenommenen Bilddaten hergeleitet. Dazu wurde auf Basis einer Koordinatentransformation des übergeordneten Objektsystems über das Geräte- in das Bildkoordinatensystem eine Grundbeziehung zwischen den Bildbeobachtungen und den Objektkoordinaten hergestellt. Weil diese Grundbeziehung aber nur teilweise mit der physikalischen Realität übereinstimmt, wurden Zusatzparameter zur Kompensation systematischer Abweichungen entwickelt und dem Grundmodell hinzugefügt.

Um auch die Daten terrestrischer Laserscanner in die integrierte Bündelblockausgleichung einbeziehen zu können, ist in gleicher Weise auch deren geometrische Beschreibung notwendig. Ausgehend von den sphärischen Messdaten (Distanz, Horizontal- und Vertikalwinkel) und den von Theodoliten und Tachymetern bekannten Fehlermodellen wurde ein geometrisches Modell für terrestrische Laserscanner hergeleitet. Dafür wurden auch bereits in der Literatur vorhandene und mit verschiedenen terrestrischen Laserscannern getestete Parametrisierungen ausgewertet und in das geometrische Modell einbezogen.

Damit liegen für alle Aufnahmegeräte, deren Daten in einer integrierten Bündelblockausgleichung kombiniert werden sollen, Beobachtungsgleichungen vor, die ebenso wie die bekannten Kollinearitätsgleichungen der Zentralperspektive, die Abhängigkeit der Beobachtungen von den Objektkoordinaten, von den Elementen der äußeren und inneren Orientierung und Zusatzparametern ausdrückt. Damit ist die konsistente Kombination der unterschiedlichen Daten möglich, genauso wie die Kalibrierung der einzelnen Aufnahmegeräte.

5 Verifikation und Anwendung der geometrischen Modelle

In diesem Kapitel sollen die im vorangegangenen Kapitel hergeleiteten geometrischen Modelle auf ihre Richtigkeit anhand verschiedener Aufnahmegерäte überprüft werden. Vor allem die Auswirkung der Verwendung der Zusatzparameter soll dargestellt werden. Dafür wurden spezielle Testräume eingerichtet, die jeweiligen geometrischen Modelle in einen räumlichen Rückwärtsschnitt bzw. eine Bündelblockausgleichung implementiert und anschließend analysiert. Das Resultat dieser Analyse ist die Angabe des Genauigkeitspotenzials des jeweiligen Aufnahmegерätes in Kombination mit dem entsprechenden geometrischen Modell. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden die Modelle in weitere photogrammetrische Anwendungen integriert und dadurch umfassend getestet.

Es werden die geometrischen Modelle für Panoramakameras, Kameras mit Fisheye-Objektiv, vollsphärische Panoramakameras und terrestrische Laserscanner auf diese Weise untersucht. Darüber hinaus werden für terrestrische Laserscanner in der Fachliteratur beschriebene Untersuchungen in die Analysen mit einbezogen. Das Modell der Zentralperspektive wird hier nicht näher betrachtet, da es zum Standard in der Photogrammetrie gehört und in zahlreichen Anwendungen etabliert ist.

5.1 Panoramakamera

5.1.1 Räumlicher Rückwärts- und Vorwärtsschnitt

5.1.1.1 Kalibrierraum

Der räumliche Rückwärtsschnitt setzt die Kenntnis der Koordinaten einer ausreichenden Anzahl von Objektpunkten voraus. Deshalb ist es notwendig, ein Passpunktfeld zu installieren und die Koordinaten der Punkte mit möglichst übergeordneter Genauigkeit zu bestimmen. Bei der Einrichtung des Passpunktfeldes sind Faktoren wie die räumliche Ausdehnung, die Anzahl und Anordnung der Passpunkte sowie deren Art und Größe zu berücksichtigen.

Für die zuverlässige Bestimmung der unbekannten Parameter der inneren und äußeren Orientierung sowie der zu untersuchenden Zusatzparameter sollte das Passpunktfeld eine räumliche Ausdehnung aufweisen, d. h. die Objektpunkte sollten unterschiedliche Entfernungen zur Kamera haben. Um dies zu gewährleisten wurden ca. 220 Zielmarken an den Wänden eines $13 \times 5 \times 4 \text{ m}^3$ großen Raumes befestigt (Abbildung 5.1). Zusätzlich wurden weitere durch die Türen sichtbare Zielmarken in den benachbarten Räumen installiert, um größere Distanzunterschiede zu gewährleisten. Die Marken wurden so verteilt, dass sich in einer 360°-Panoramaaufnahme aus der Raummitte eine homogene Punktverteilung ergibt.

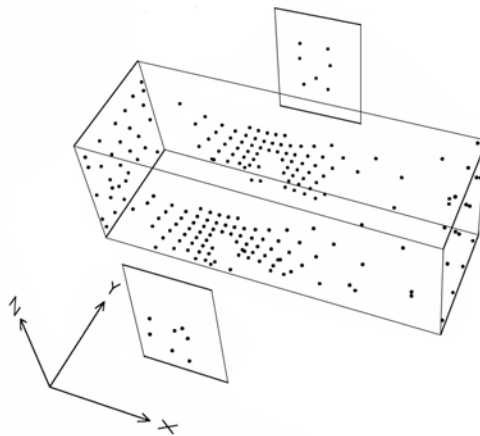


Abbildung 5.1: Kalibrierungsraum für Panoramakameras

Die Zielmarken bestehen aus retro-reflektierendem Material, um mit einer geeigneten Beleuchtung aus Aufnahmerrichtung Bilder zu erhalten, bei denen sich die zu messenden Punkte durch einen hohen Kontrast von der Umgebung abheben. Außerdem handelt es sich um Zielmarken, die mit einem 14-Bit-Ringcode um den eigentlichen Messpunkt ausgestattet sind. Durch diese beiden Maßnahmen ist bei Verwendung entsprechender Software eine weitgehende Automatisierung der Bildpunktmessung möglich. Es wurden Zielmarken und Software der Firma Aicon 3D Systems verwendet.

Die Referenzmessung der Objektkoordinaten der Passpunkte wurde photogrammetrisch mittels einer Bündelblockausgleichung durchgeführt. Dazu wurden etwa 100 Bilder mit der 6-Megapixel-Kamera Kodak DCS 660 unter Berücksichtigung einer geeigneten Strahlenschnittgeometrie mit ausreichenden Überlappungen aufgenommen. Es wurde ein Koordinatensystem festgelegt und ein Referenzmaßstab mit einer kalibrierten Länge im Objekt platziert.

Die Koordinaten der Passpunkte wurden mit einer mittleren Standardabweichung von 0,27 mm (RMS_x), 0,60 mm (RMS_y) und 0,16 mm (RMS_z) bestimmt. Die relativ schlechte Genauigkeit in Y -Richtung ist vor allem auf die entfernten Punkte in den benachbarten Räumen zurückzuführen, da deren Tiefenkoordinaten wegen der ungünstigen Strahlenschnittgeometrie nur mangelhaft berechnet werden konnten. Allerdings hat das auf die Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes mit Daten der Panoramakamera kaum einen Einfluss, da bei entsprechender Positionierung der Kamera nur die laterale Genauigkeit eine Rolle spielt.

5.1.1.2 Panoramaaufnahme

Zur Verifikation des geometrischen Modells für Rotationszeilenkameras wurden mit der Panoramakamera EYESCAN M3D metric (Kapitel 3.2.3) mehrere Panoramen in dem oben beschriebenen Kalibrierungsraum aufgenommen (Abbildung 5.2) [Schneider & Maas, 2003]. Die Analyse der Zusatzparameter soll im nächsten Kapitel anhand einer dieser Aufnahmen dargestellt werden. Für diese Aufnahme wurde ein 35mm-Objektiv verwendet. Es wurde ein größerer horizontaler Aufnahmewinkel als 360° gewählt, um bei der Auswertung des Überlappungsbereiches Erkenntnisse zur Stabilität der Kameraaufstellung ziehen zu können. Das auf diese Weise aufgenommene Bild ist 36000×10298 Pixel groß. Das Bild musste in mehrere Teilbilder zerlegt werden, um die große Datenmenge überhaupt verarbeiten zu können. Die mit Schwerpunkt- und Ellipsenoperator in den Teilbildern gemessenen Bildkoordinaten wurden jedoch anschließend wieder zu einem homogenen Datensatz zusammengeführt.



Abbildung 5.2: Panoramakamera im Kalibrierraum (links) und Streifenlichtbeleuchtung (rechts)

Die Objektbeleuchtung wurde durch ein mit der Kamera mitrotierendes Beleuchtungssystem realisiert. Dieses System besteht aus einer Xenon-Hochdrucklampe, deren Licht durch ein Lichtleiterkabel zu mehreren Querschnittswandlern geführt wird, die unmittelbar auf dem Kamerakopf installiert werden und eine Beleuchtung des Objektes in Form eines vertikalen Lichtstreifens bewirken (Abbildung 5.2, rechts).

5.1.1.3 Berechnung und Ergebnisse

Die Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes erfolgte mit der entwickelten Software, welche detailliert im Anhang A.1 vorgestellt wird. Es handelt sich dabei um ein Bündelblockausgleichsprogramm, was sich auch auf die Berechnung eines einfachen räumlichen Rückwärtsschnittes reduzieren lässt.

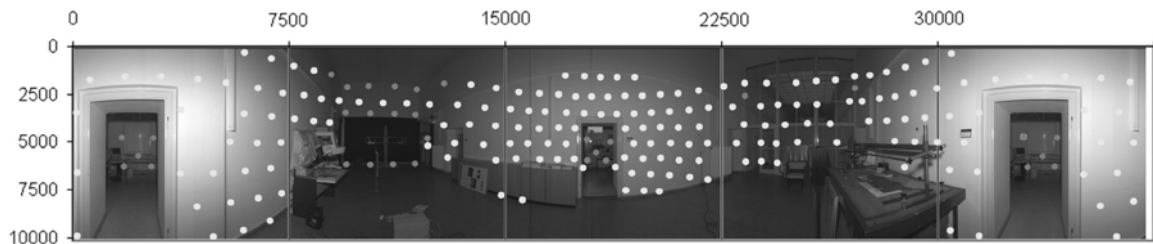


Abbildung 5.3: Panoramabild zur Untersuchung des geometrischen Modells (Bildpunkte hervorgehoben)

Da der horizontale Aufnahmebereich im Panoramabild (Abbildung 5.3) größer als 360° ist, konnten insgesamt 14 Punkte im Testbild doppelt gemessen werden. Dabei wurde festgestellt, dass die Differenz der vertikalen Bildkoordinaten dieser Punkte in dem untersuchten Panoramabild im Durchschnitt $0,43 \pm 0,13$ Pixel beträgt. Die Ursache dieser Differenz lässt sich nicht eindeutig klären. Es könnte sich die Sensorzeile während der Aufnahme des Panoramas vertikal aus ihrer Sollage herausbewegt haben (z.B. durch thermische Effekte). Es könnte sich aber auch um ein periodisches Verhalten, verursacht durch Unzulänglichkeiten im Planlauf des Drehtisches, handeln (vgl. Kapitel 4.2.4.6) oder um eine geringfügige Änderung der vertikalen Position der Kamera während der Aufnahme.

Es wurden mehrere Berechnungen des räumlichen Rückwärtsschnittes durchgeführt, dabei wurden die in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Zusatzparameter schrittweise in das geometrische Modell eingeführt. In der fol-

genden Tabelle (Tabelle 5.1) soll die jeweils resultierende Standardabweichung der Gewichtseinheit als Kriterium zur Beurteilung der Zusatzparameter vorgestellt werden.

Parameter		$\hat{\sigma}_0$ [Pixel]
Äußere Orientierung	$X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$	25,20
+ Innere Orientierung	c, y_0'	5,88
+ Exzentrizität des Projektionszentrums	e	5,63
+ Kantung der Sensorzeile	K	1,51
+ Neigung der Sensorzeile	N	1,15
+ Radial-symmetrische Verzeichnung	A_1, A_2	0,60
+ Affinität	A_h	0,45
+ Ungleichmäßigkeiten in der Rotation (horizontal)	a_1, c_1, a_2, c_2	0,31
+ Ungleichmäßigkeiten in der Rotation (vertikal)	a_3, c_3	0,24

Tabelle 5.1: Verringerung der Standardabweichung der Gewichtseinheit durch Hinzufügen zusätzlicher Parameter [Schneider & Maas, 2003]

Nach jedem Berechnungsdurchgang wurden die Verbesserungen der horizontalen und der vertikalen Bildkoordinatenrichtungen in Abhängigkeit von der Position im Bild in einem Diagramm dargestellt. Dabei waren zunächst deutliche systematische Effekte zu erkennen, die durch das Berücksichtigen der entsprechenden Zusatzparameter kompensiert werden konnten [Schneider, 2002]. Dadurch konnten die in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Abweichungen vom geometrischen Modell erkannt und entsprechende Korrekturterme entwickelt werden.

Bei den in Kapitel 4.2.4.6 beschriebenen Gleichungen zur Kompensation von Ungleichmäßigkeiten der Drehbewegung, konnten jeweils nur die Parameter für Amplitude (a) und die Phasenlage (c) bestimmt werden. Die Frequenz (b) konnte hingegen nicht erfolgreich geschätzt werden. Stattdessen wurde die Frequenz durch Analyse des Frequenzspektrums der Residuen mit $b_1 = 2$, $b_2 = 4$ und $b_3 = 1,5$ festgelegt. Das Berücksichtigen weiterer Parameter (u. a. Biegung der Sensorzeile) führte zu keiner weiteren Genauigkeitssteigerung der Ausgleichungsergebnisse, beziehungsweise konnten diese Parameter nicht signifikant bestimmt werden. Dies ist damit zu begründen, dass sie durch im Modell bereits vorhandene Parameter vollständig kompensiert werden oder weil der entsprechende Effekt bei der verwendeten Kamera nicht vorhanden ist. Tabelle 5.2 zeigt alle im räumlichen Rückwärtsschnitt geschätzten Parameter (ohne äußere Orientierung).

Wenn keine Restsystematiken mehr in der Darstellung der Abhängigkeit zwischen Verbesserungen und Bildposition zu erkennen waren, wurden die Residuen auf Normalverteilung untersucht (Kapitel 2.1.3.2). Der Test auf Normalverteilung bestätigte für das in Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 vorgestellte Beispiel, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Restsystematiken in den Beobachtungsresiduen mehr vorhanden sind. Deshalb konnte angenommen werden, dass nach Berücksichtigung aller Zusatzparameter nur noch zufällige Fehleranteile vorliegen. Die resultierende Genauigkeit von 0,24 Pixel entspricht unter Berücksichtigung der Sensorlänge der Rotationszeilenkamera von 70 mm und der Pixelgröße von 7 μm einer Relativgenauigkeit von ca. 1 : 40000. Überträgt man diese Genauigkeit unter Verwendung der Kamerakonstante des verwendeten Objektives als Maßstab in den Objektraum, erhält man eine laterale Genauigkeit von ca. 0,5 mm in 10 m Entfernung. Der Wert kann linear mit der Objektdistanz skaliert werden, es ergibt sich die bereits in Abbildung 3.15 dargestellte Abhängigkeit.

Parameter		Wert	Standardabweichung
Kamerakonstante	c	35,3831 mm	0,0039 mm
Bildhauptpunkt vertikal (4.2.4.4)	y_0'	0,1302 mm	0,0010 mm
Exzentrizität des Projektionszentrums (4.2.4.3)	e	41,81 mm	0,23 mm
Kantung der Sensorzeile (4.2.4.2)	K	-4,545 mrad	0,049 mrad
Neigung der Sensorzeile (4.2.4.1)	N	5,740 mrad	1,10 mrad
Radial-symmetrische Verzeichnung (4.2.4.5)	A_1	$2,490 \cdot 10^{-6}$	$0,057 \cdot 10^{-6}$
	A_2	$-3,182 \cdot 10^{-8}$	$0,175 \cdot 10^{-8}$
Affinität (4.2.4.6)	A_h	12,488424 mgon	0,000047 mgon
Ungleichm. Rotation (horizontal) - Amplitude	a_1	0,567 Pixel	0,023 Pixel
Ungleichm. Rotation (horizontal) - Phasenlage	c_1	2,488 rad	0,045 rad
Ungleichm. Rotation (horizontal) - Amplitude	a_2	-0,255 Pixel	0,021 Pixel
Ungleichm. Rotation (horizontal) - Phasenlage	c_2	3,369 rad	0,089 rad
Ungleichm. Rotation (vertikal) - Amplitude	a_3	0,290 Pixel	0,037 Pixel
Ungleichm. Rotation (vertikal) - Phasenlage	c_3	-1,170 rad	0,238 Pixel

Tabelle 5.2: Im räumlichen Rückwärtsschnitt geschätzte Zusatzparameter für die Panoramakamera

Die Passpunktgenauigkeit stellt beim räumlichen Rückwärtsschnitt einen limitierenden Faktor für die Genauigkeit des Ausgleichungsergebnisses dar. Ein weiterer Faktor ist die Genauigkeit der Bildpunktmessung, die unter den gegebenen Aufnahmeparametern als kritisch zu bewerten ist, da wegen der großen Entfernungsunterschiede (2 bis 10 m) der Schärfentiefebereich des Objektivs zwangsläufig unter- oder überschritten wurde. Dies führte teilweise zu einer unscharfen Abbildung der Zielmarken. Insbesondere bei langen Aufnahmezeiten beeinflusst auch die Stabilität des Kamerasystems die Gesamtgenauigkeit. Beispielsweise kann es während der Aufnahme zu Vibrationen kommen, die durch die Bewegung der Kamera selbst bzw. auch durch andere äußere mechanische Einflüsse hervorgerufen werden. Ungenauigkeiten können außerdem durch hochfrequente Störungen der Drehgeschwindigkeit oder Bewegungen der Rotationsachse (z.B. Taumelfehler) verursacht werden.

5.1.1.4 Stabilität der Zusatzparameter (Reproduzierbarkeit der Kalibrierung)

Zusätzlich zu den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Untersuchungen wurde auch eine Analyse der Reproduzierbarkeit der Zusatzparameter (Kalibrierwerte) durchgeführt. Dazu wurden drei Panoramabilder mit identischen Aufnahmeparametern zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen. Bei dem Vergleich der ermittelten Kalibrierwerte konnten nur bei dem Parameter für die Affinität A_h signifikante Unterschiede festgestellt werden [Schneider, 2002].

Die Ursache für den deutlichen Unterschied in dem Wert für die Affinität ist in unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten der Panoramakamera zu suchen, die sich in einem ungleichen Maßstab in Spalten- und Zeilenrichtung im Bild äußern. Dieser Parameter sollte deshalb in Anwendungen, in denen eine hohe Genauigkeit gefordert wird, bei jeder Aufnahme neu bestimmt werden. Ein ausreichend genauer Wert für A_h lässt sich auch ohne Ausgleichung durch Differenzbildung der horizontalen Bildkoordinaten doppelt gemessener Punkte bestimmen (360° geteilt durch die Koordinatendifferenz in Pixel). Dazu muss der horizontale Aufnahmewinkel mehr als 360° betragen.

Anhand von zwei weiteren Panoramabildern sollte überprüft werden, inwieweit sich die Kalibrierwerte ändern, wenn die Fokuseinstellung der Kamera geändert wird. Wie in Kapitel 3.2.3.1 beschrieben, wird die Fokussierung auf eine bestimmte Entfernung bei der Kamera EYSCAN M3D metric durch eine fünfstufige Fokussiereinheit eingestellt. Damit verbunden ist eine Änderung des Abstandes zwischen Fokalebene und Rotationsachse und damit eine Änderung des Radius des Abbildungszyinders. Wie dadurch zu erwarten ist, hat sich deshalb bei dem Vergleich der beiden Panoramaaufnahmen der Wert für die Exzentrizität des Projektionszentrums e und damit auch geringfügig die Kamerakonstante c geändert. Außerdem wurde ein signifikanter Unterschied in der Verkantung der Sensorzeile (K) festgestellt. Die Umfokussierung bewirkt scheinbar

nicht nur die beabsichtigte Verschiebung der Fokalebene, sondern auch eine geringfügige Verdrehung, die durch die Mechanik der Fokussiereinheit verursacht wird. Aus den genannten Gründen besitzen die Kalibrierwerte jeweils nur für eine der fünf Fokusstufen Gültigkeit.

Abschließend wurden noch 3 Panoramen mit jeweils unterschiedlicher Blendenzahl und Integrationszeit aufgenommen. Wird die Blendenzahl geändert, musste auch die Integrationszeit verändert werden, um ähnliche Belichtungsverhältnisse zu erhalten. Mit der Änderung der Integrationszeit muss durch die Steuerelektronik der Kamera eine größere bzw. kleinere Rotationsgeschwindigkeit festgelegt werden, damit die Geometrie der Panoramaaufnahme unverändert bleibt. Die Rotationsgeschwindigkeit scheint sich jedoch nicht ausreichend präzise steuern zu lassen, da eine deutliche Differenz der Affinität A_h zwischen den drei Aufnahmen ermittelt wurde. In [Seidl, 2000] wurde die Abweichungen zwischen Ist- und Solldrehzahl des Kameraantriebes untersucht. Dabei zeigte sich eine umso größere Abweichung zwischen Ist- und Solldrehzahl, je geringer die Rotationsgeschwindigkeit ist. Die Differenzen in den Werten für die Affinität der drei untersuchten Aufnahmen lassen sich dadurch erklären. Da jedoch alle übrigen Parameter weitestgehend identisch sind, ist davon auszugehen, dass die Veränderung der Blendenzahl für die Kalibrierung der Kamera kaum relevant ist.

5.1.1.5 Räumlicher Vorwärtsschnitt

Mit den Ergebnissen des räumlichen Rückwärtsschnittes (Kameraorientierungen und Kalibrierung) sollten 3D-Objektpunktkoordinaten berechnet und deren Genauigkeit analysiert werden. Dazu wurde das geometrische Modell der Panoramakamera in einen räumlichen Vorwärtsschnitt implementiert. Die Berechnung erfolgte unter Nutzung verschiedener Kombinationen von Kamerastandpunkten (Abbildung 5.4) in dem in Kapitel 5.1.1.1 beschriebenen Kalibrierraum. Die vorhandenen Referenzkoordinaten der Objektpunkte dienten lediglich als Näherungswerte.

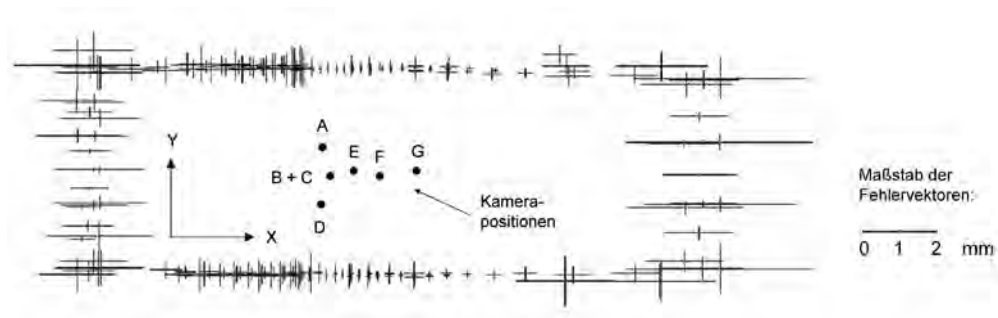


Abbildung 5.4: Grundriss des Kalibrierraumes: Kamerapositionen und Objektpunktgenauigkeiten

Zuerst wurden nur zwei Bilder (B und C) mit einer vertikalen Basis (ca. 60 cm) für die Berechnung verwendet, d.h. die Rotationsachse bei beiden Panoramaaufnahmen war annähernd identisch. Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 5.3 (erste Zeile) dargestellt. Wegen dem begrenzten vertikalen Öffnungswinkel konnten nicht alle Punkte in beiden Panoramabildern abgebildet werden. Anschließend wurden zwei Panoramen (B und G) mit horizontaler Basis (Länge ca. 2 m) für die Berechnung verwendet. Es ist offensichtlich, dass die Genauigkeit der resultierenden Objektpunktkoordinaten vom Schnittwinkel der Beobachtungsstrahlen abhängt. Der Schnittwinkel variiert für die Punkte im Kalibrierraum sehr stark bei Nutzung einer horizontalen Basis. Im ungünstigsten Fall bilden die beiden Kamerapositionen und der Objektpunkt eine Gerade, dann können keine Koordinaten bestimmt werden. Deshalb ist es empfehlenswert, mehr als zwei Kamerapositionen mit horizontaler Basis für die Berechnung des räumlichen Vorwärtsschnittes zu verwenden, um schlechte Strahlenschnittgeometrien zu vermeiden.

Standpunkte	Anordnung	Objektpunkte	RMS_x	RMS_y	RMS_z
2	Vertikal (B, C)	110	2,78 mm	0,89 mm	1,01 mm
2	Horizontal (B, G)	158	5,97 mm	1,23 mm	1,97 mm
6	Horizontal	185	1,48 mm	1,65 mm	0,54 mm
7	Horizontal + 1 Vertikal	185	1,13 mm	1,35 mm	0,51 mm

Tabelle 5.3: Im räumlichen Vorwärtsschnitt berechnete Objektpunktgenauigkeiten [Schneider & Maas, 2003]

Im dritten Berechnungsbeispiel wurden dem räumlichen Vorwärtsschnitt deshalb die gemessenen Bildkoordinaten von vier weiteren Panoramabildern (A, D, E und F) zugeführt. Dabei ist eine deutliche Verbesserung der durchschnittlichen Objektpunktgenauigkeiten zu erkennen. Die höchsten Genauigkeiten resultierten aus der vierten Berechnung des räumlichen Vorwärtsschnittes, indem der vorangegangenen Berechnung das um 60 cm vertikal verschobene Panorama (C) hinzugefügt wurde. Die Standardabweichungen der geschätzten Objektpunktkoordinaten dieser Berechnung sind in Abbildung 5.4 in Form von Vektoren in X - und Y -Richtung dargestellt.

Die Beispiele haben gezeigt, dass das entwickelte geometrische Modell auch für die Bestimmung von Objektkoordinaten im räumlichen Vorwärtsschnitt geeignet ist. Grundsätzlich ist dabei auf eine gute Strahlenschnittkonfiguration zu achten, wobei die Kameraaufstellungen sowohl horizontal als auch vertikal variiert werden sollten. Jedoch sollte zwischen dem Aufwand für die Aufnahmen und der erreichbaren Genauigkeit ein vertretbarer Kompromiss gefunden werden.

5.1.2 Bündelblockausgleichung

Wie bereits in Kapitel 5.1.1.3 erwähnt, stellt die Genauigkeit der Passpunkte beim räumlichen Rückwärtsschnitt einen der wichtigsten limitierenden Faktor für die Genauigkeit der Ausgleichungsergebnisse dar. Möglicherweise ist das Genauigkeitspotenzial der untersuchten Panoramakamera in Kombination mit dem entwickelten geometrischen Modell höher als durch den räumlichen Rückwärtsschnitt ermittelt werden konnte. Aus diesem Grund wurde eine photogrammetrische Bündelblockausgleichung unter Verwendung des geometrischen Modells für Panoramabilder (Kapitel 4.2) entwickelt. Diese erlaubt die simultane Orientierung einer beliebigen Anzahl von Panoramaaufnahmen, die Kalibrierung der verwendeten Kamera und die Bestimmung der 3D-Koordinaten von Objektpunkten.

In den Berechnungsalgorithmus wurden Verfahren implementiert, die die automatische Bestimmung von Näherungswerten für die Orientierungsparameter und die unbekannten Objektpunkte ermöglichen. Dazu ist es notwendig, die Koordinaten von mindestens drei Objektpunkten vorzugeben. Dies kann in einer benutzerfreundlichen Weise beispielsweise in Form eines kleinen Referenzobjektes (z. B. Dreieck) geschehen, welches direkt vor dem aufzunehmenden Objekt platziert wird [Schneider & Maas, 2004]. Wie auch beim räumlichen Vorwärtsschnitt sollten mindestens drei räumlich gut verteilte Panoramen aufgenommen werden, um ausreichende Strahlenschnitte für alle Punkte in einer 360°-Umgebung zu gewährleisten.

Für die praktische Untersuchung wurden insgesamt fünf Panoramen in einem Kalibrierraum der Firma Aicon 3D Systems, bestehend aus 364 signalisierten Objektpunkten aufgenommen. In Abbildung 5.5 ist die Objektpunktverteilung und die Aufnahmekonfiguration dargestellt.

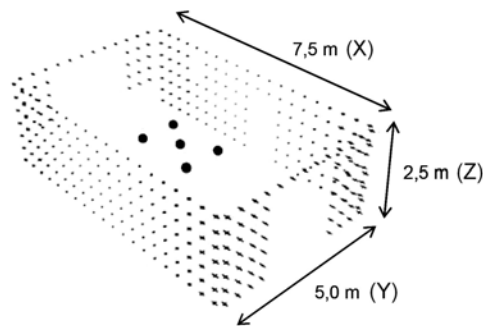


Abbildung 5.5: Kalibrierraum und Aufnahmekonfiguration für die Panorama-Bündelblockausgleichung

Die Bildkoordinatenmessung erfolgte mit Subpixel-Genauigkeit unter Verwendung photogrammetrischer Standardsoftware. Alle Objektpunktkoordinaten wurden als Unbekannte behandelt, wobei das Objektkoordinatensystem entweder durch ein minimales Datum oder durch die Berechnung als freie Netzausgleichung festgelegt wurde. In Tabelle 5.4 sind die erreichten Genauigkeiten im Bildraum (Standardabweichung der Gewichtseinheit) und im Objektraum (RMS der Standardabweichungen der berechneten Objektpunktkoordinaten) dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass durch die freie Netzausgleichung bessere Genauigkeiten als mit minimalem Datum erzielt werden können. Dies ist mit der ungünstigen Punktverteilung der für die Festlegung des minimalen Datums verwendeten Punkte zu begründen, die einen relativ geringen gegenseitigen Abstand im Verhältnis zur Raumgröße aufwiesen. Deshalb können die Resultate der freien Netzausgleichung als realistischere Werte für das innere geometrische Genauigkeitspotenzial in diesem Test angesehen werden.

	$\hat{s}_0$	RMS_x	RMS_y	RMS_z
Minimales Datum		0,97 mm	0,85 mm	2,28 mm
Freie Netzausgleichung	0,22 Pixel	0,39 mm	0,28 mm	0,16 mm

Tabelle 5.4: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung: Objektpunktgenauigkeiten [Schneider & Maas, 2004]

Die dargestellten inneren Genauigkeitswerte aus der Berechnung der Bündelblockausgleichung könnten verbleibende systematische Fehlereinflüsse, die durch das geometrische Kameramodell nicht kompensiert werden, beinhalten. Aus diesem Grund wurden die ermittelten Objektpunktkoordinaten mit Referenzkoordinaten verglichen. Dazu wurde das Objektkoordinatensystem aus der Bündelblockausgleichung auf das Referenzkoordinatensystem transformiert. Die verbleibenden mittleren Differenzen (RMS der Differenzen) aller Objektpunkte sind in Tabelle 5.5 getrennt nach der X -, Y - und Z -Richtung aufgeführt. Dabei kann jedoch nicht geklärt werden, ob die Differenzen die Grenze der erreichbaren Genauigkeit darstellen, oder ob sie auf die begrenzte Genauigkeit der Referenzkoordinaten zurückzuführen sind.

$RMS(\Delta X)$	$RMS(\Delta Y)$	$RMS(\Delta Z)$
0,77 mm	0,52 mm	0,43 mm

Tabelle 5.5: Abweichungen zwischen berechneten Objektpunkten und Referenzkoordinaten

Die ermittelte innere Genauigkeit und die durch Koordinatenvergleich ermittelten Angaben zur äußeren Genauigkeit entsprechen den bereits im räumlichen Rückwärtsschnitt (Kapitel 5.1.1.3) ermittelten Werten. Das Genauigkeitspotenzial der Panoramakamera in Verbindung mit dem verwendeten geometrischen Modell beträgt übereinstimmend 0,2 bis 0,3 Pixel (Genauigkeit im Bildraum). Durch [Amiri Parian & Grün, 2004] durchgeführte Untersuchungen mit Daten der gleichen Panoramakamera und einer ähnlichen Parametrisierung bestätigen diese Werte.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die ermittelten Genauigkeitswerte schlechter sind, als die von zentralperspektiv abbildenden Digitalkameras, bei denen Genauigkeiten von 0,05 Pixel und besser durch eine Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung und subpixel-genauer Bildkoordinatenmessung zu erwarten sind. Die Unterschiede liegen vor allem in der bewegten Kamera während der Bildaufnahme begründet. Diesen Zusammenhang bestätigen auch Erfahrungen aus einer Genauigkeitsuntersuchung einer 94-Megapixel Scan-Kamera mit einem linear in der Bildebene bewegten Zeilensensor. Die Aufnahmedauer beträgt hier etwa 3 Minuten, und es konnte ein Genauigkeitspotenzial bezogen auf den Bildraum von 0,15 Pixel durch Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung bestimmt werden. [Schneider et. al., 2005].

5.1.3 Weitere Anwendungen des geometrischen Modells

Über die in Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 genannten Anwendungen des geometrischen Modells für Panoramakameras hinaus, deren Ziel vor allem die Untersuchung des Modells selbst war, soll dessen Verwendung nun exemplarisch in typischen praktischen Aufgabenstellungen gezeigt und dessen Einsetzbarkeit damit empirisch bestätigt werden. Grundlage für die im Folgenden vorgestellten Anwendungen ist im Wesentlichen die Beschreibung des geometrischen Modells (Gleichungen 4.15 und 4.16) in Form einer Softwareroutine, welche die Bildkoordinaten eines Punktes in Abhängigkeit von den Objektpunktkoordinaten und den Orientierungs- und Kameraparametern berechnen.

5.1.3.1 Kernliniengeometrie

Die bereits in Kapitel 3.2.4.2 beschriebene Kernliniengeometrie für Bilder einer Panoramakamera ist erst durch die Kenntnis des geometrischen Kameramodells mit hoher Genauigkeit praktisch realisierbar. Die Kernlinie unterstützt die Suche homologer Punkte in Bildpaaren in interaktiven oder automatischen Stereo-Auswerteprogrammen. Im Allgemeinen ist die Kernlinie im Panoramabild keine Gerade, sondern eine Sinuskurve [Luhmann et. al., 2006]. Durch Verwendung des geometrischen Modells ist es möglich, die Kernlinie analytisch als Funktion in Abhängigkeit der Orientierungs- und Kameraparameter darzustellen. Die streng analytische Beschreibung ist für die praktische Umsetzung in Software-Funktionen nicht notwendig. Programmiertechnisch einfacher ist es, die Kernlinie als Kette mehrere Bildpunkte (Bildpunkt-Polygon) zu definieren. Ist der Abstand der Bildpunkte klein genug, kann das Suchfenster für die Korrespondenzsuche linear zwischen den Punkten verschoben werden. Der Abstand der Bildpunkte kann beliebig gewählt werden, jedoch ist es sinnvoll, diesen auf die Pixelgröße und die Größe des Suchfensters abzustimmen.

Wurde in einem ersten Panoramabild ein Bildpunkt gefunden, wird im zweiten Panorama das entsprechende Bildpunkt-Polygon wie folgt erstellt (vgl. Abbildung 5.6): Unter Verwendung des geometrischen Kameramodells und der bekannten Orientierungs- und Kameraparameter wird ein Vektor $O_1P'_1$ zwischen dem Projektionszentrum und dem gefundenen Bildpunkt aufgespannt, der im Objektraum auf den zunächst unbekannten Objektpunkt P gerichtet ist. Auf diesem Strahl werden nun mehrere Objektpunkte in unterschiedlichen Entfernungen definiert. Ist die Entfernung zwischen Kamera und Objektpunkt näherungsweise bekannt, kann der Distanzbereich stark reduziert werden. Alle diese Objektpunkte werden anschließend unter Nutzung des geometrischen Modells in das Bild der zweiten Kameraposition projiziert.

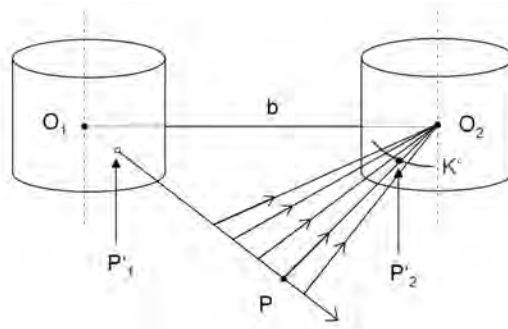


Abbildung 5.6: Anwendung des geometrischen Modells für Panoramakameras in der Stereoauswertung

In mehreren praktischen Versuchen konnte gezeigt werden, dass diese Vorgehensweise in den meisten Fällen zum richtigen Ergebnis, d.h. zum Finden von Punktkorrespondenzen geeignet ist. Rechen- bzw. Auswertezeiten und die Gefahr falscher Punktzuordnungen konnten mit Hilfe der durch das geometrische Modell für Panoramakameras beschriebenen Kernliniengeometrie erheblich reduziert werden. Abhängig von der Genauigkeit der Orientierung der beteiligten Bilder wurden die homologen Punkte in sehr geringem Abstand (meist weniger als 1 Pixel) von dem definierten Bildpunkt-Polygon gefunden. Dies bestätigt das in Kapitel 4.2 hergeleitete geometrische Modell auch aus praktischer Sicht.

5.1.3.2 Tangentialprojektion

Mittels einer Tangentialprojektion ist es möglich, die Bildinformation von Ausschnitten einer 360°-Panoramaaufnahme in zentralperspektive Bilder zu überführen (vgl. Kapitel 3.2.4.1). Auch dafür ist die Kenntnis des geometrischen Panoramakameramodells notwendig. Allerdings handelt es sich nur dann um eine strenge zentralperspektive Darstellung, wenn die Exzentrizität zwischen Projektionszentrum und Rotationsachse (Parameter e) Null ist [Schneider & Maas, 2006].

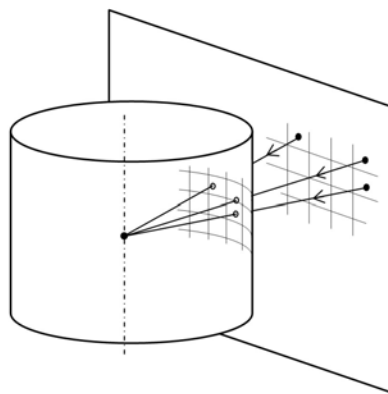


Abbildung 5.7: Anwendung des geometrischen Modells für Panoramakameras zur Tangentialbilderstellung

Im Folgenden soll die Erstellung eines (näherungsweise) zentralperspektiven Bildes unter Anwendung des geometrischen Panoramakameramodells mittels indirekter Entzerrungsmethode kurz erläutert werden: Zuerst wird die gewünschte horizontale Blickrichtung als Berührungspunkt der Tangentialebene an den Panoramazylinder definiert. Diese Blickrichtung kann beispielsweise eine zur auszuwertenden Objektebene orthogonale

Richtung sein. Anschließend wird entsprechend der Größe des umzuwandelnden Bildbereiches das Format und die Fläche des späteren Tangentialbildes berechnet und auf diesem Bild ein gleichmäßiges Raster definiert. Die Rasterweite (Pixelgröße) kann in Abhängigkeit der gewünschten Auflösung gewählt werden, jedoch sind wesentlich höhere Auflösungen als die des zylindrischen Panoramabildes nicht sinnvoll. Danach werden alle Rastermittelpunkte unter Verwendung des geometrischen Modells in das ursprüngliche Panorama projiziert (Abbildung 5.7), d. h. es werden die zugehörigen Bildkoordinaten im Panoramabild berechnet. An dieser Stelle kann schließlich der Grauwert (bzw. die Farbwerte) interpoliert werden und dem Pixel im Tangentialbild zugeordnet werden. Für die Interpolation des Grauwertes können verschiedene Methoden (nächster Nachbar, bilineare Interpolation oder bikubische Faltung) verwendet werden. Die Auswertung von auf diese Weise generierten Bildern (z. B. Abbildung 3.8) in photogrammetrischer Standardsoftware konnte erfolgreich durchgeführt werden.

5.1.3.3 Kolorierung und Texturierung von Laserscannerpunktwolken

Die mit einer Panoramakamera aufgenommenen Daten bieten sich insbesondere auch für die Kolorierung und Texturierung von mit terrestrischen Laserscannern aufgenommenen Punktwolken bzw. daraus generierten Objektoberflächen an. Die Verwendung von Panoramadaten ist vor allem für das Einfärben von Daten von Panorama-view-Scannern mit einem Gesichtsfeld von 360° sinnvoll, weil jeweils nur eine Aufnahme notwendig ist.

Ein einfacher praktischer Test wurde dazu in einer 360° -Umgebung, einem $45 \times 45 \times 20 \text{ m}^3$ großen Innenhof (vgl. Kapitel 5.4.1), durchgeführt. In der Mitte der Testumgebung wurden nacheinander der terrestrische Laserscanner Riegl-LMS Z420i und die digitale Panoramakamera EYESCAN M3D metric auf dem gleichen Stativ aufgebaut und jeweils ein Scan bzw. ein Panoramabild aufgenommen. Um auch in vertikaler Richtung die gleiche Aufnahmeperspektive für beide Geräte zu gewährleisten, wurde ein Abstandskörper zwischen Stativdreifuß und Panoramakamera installiert (Abbildung 5.8). Damit sollte der Ursprung des Laserscanner-Koordinatensystems und das Projektionszentrum der Panoramakamera näherungsweise identisch sein und damit die Kolorierung der Punktwolke parallaxenfrei durchgeführt werden können.



Abbildung 5.8: Laserscanner und Panoramakamera zur parallaxenfreien Aufnahme nacheinander auf gleichem Stativ

Das Panoramabild wurde unter Nutzung von 20 im Raum verteilten Punkten mittels räumlichem Rückwärtsschnitt bezüglich der Laserscanner-Punktwolke orientiert. Die signalisierten Passpunkte konnten sowohl im Intensitätsbild des Laserscanners als auch im Panorama erkannt und interaktiv mit Subpixel-Operatoren gemessen werden. Damit lagen bekannte Passpunktkoordinaten und gemessene Bildpunktkoordinaten für die Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes vor. Einige der Ergebnisse der Orientierung sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst. Dabei ist zu erkennen, dass der Ursprung der Gerätekoordinatensysteme von Laserscanner und Panoramakamera bis auf wenige Millimeter identisch ist.

	Wert	Standardabweichung
$\hat{S}_0$	1,75 μm (0,25 Pixel)	
X_0	-3,89 mm	1,31 mm
Y_0	3,55 mm	2,84 mm
Z_0	-5,39 mm	4,27 mm
ω	-0,2737 gon	0,0030 gon
φ	-0,0768 gon	0,0016 gon
κ	-1,4816 gon	0,0283 gon
c	35,1237 mm	0,0035 mm

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Orientierung des Panoramas im Gerätekoordinatensystem des Laserscanners

Mit Hilfe der im räumlichen Rückwärtsschnitt ermittelten Orientierung der Panoramakamera wurde die komplette Punktwolke (ca. 5 Millionen Einzelpunkte) koloriert. D.h. für jeden Einzelpunkt wurde der dazugehörige Bildpunkt unter Verwendung des geometrischen Panoramakameramodells berechnet und anschließend an jeder dieser Bildpositionen der Farbwert interpoliert und dem Laserscannerpunkt zugeordnet. Das Ergebnis der Kolorierung, die eingefärbte Punktwolke, ist im Anhang A.6.1 (linkes Bild) dargestellt.

In gleicher Weise kann das orientierte Panoramabild auch dazu genutzt werden, nicht nur die Laserscanner-Punktwolke einzufärben, sondern auch aus der Punktwolke generierte Oberflächen bzw. 3D-Modelle zu texturieren. Dazu werden in den virtuellen Objektflächen (Dreiecke einer Dreiecksvermaschung oder Flächen eines CAD-Modells) Pixelraster definiert und ebenso wie bei der Tangentialbilderstellung (Kapitel 5.1.3.2) jeder Pixelmittelpunkt rechnerisch in das Panorama projiziert (indirekte Entzerrungsmethode), der Farbwert interpoliert und dem Pixel zugeordnet. Je nach Grad der Detaillierung der Oberfläche oder des 3D-Modells können dadurch photorealistische Modelle entstehen. Im Anhang A.6.1 (rechtes Bild) ist das Texturmapping innerhalb der Software AutoCAD (Autodesk) dargestellt. Die zugrunde liegenden Texturen dafür wurden in einem eigenen Softwaretool aus den Panoramabildern erzeugt.

5.2 Fisheye-Abbildung

5.2.1 Kalibrierraum

Zur Verifikation der geometrischen Modelle für Fisheye-Objektive wurde ein Kalibrierraum genutzt, der speziell für die Kalibrierung von Fisheye-Objektiven eingerichtet wurde [Schwalbe, 2005]. Der Raum ist etwa $4 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ groß, die 141 Objektpunkte sind an den Wänden und der Decke des Raumes so verteilt, dass sie in einem von der Mitte des Raumes aufgenommenen hemisphärischen Bild auf konzentrischen Kreisen abgebildet werden. Die Zielmarken sind hauptsächlich codierte Marken, die in den Bildern automatisch erkannt werden können. Lediglich im Randbereich wurden nicht-codierte Marken verwendet, da hier die Verzeichnung meist zu groß ist, um Codemarken auswerten zu können. Die Referenzkoordinaten wurden mit dem photogrammetrischen Industriemesssystem Aicon 3D Studio mit einer Standardabweichung zwischen 0,02 mm bis 0,23 mm bestimmt. Abbildung 5.9 zeigt ein Bild des Kalibrierraumes, aufgenommen mit einer Kamera mit Fisheye-Objektiv aus der Mitte des Raumes senkrecht nach oben, sowie einen vergrößerten Ausschnitt mit den verwendeten codierten Zielmarken. Da es nicht möglich ist, ein Ringblitzlicht für die Aufnahmen zu verwenden, aber auch durch die Verwendung anderer Lichtquellen kaum eine gleichmäßige Ausleuchtung des gesamten Aufnahmebereiches gewährleistet werden kann, wurde auf die Verwendung retro-reflektierender Zielmarken verzichtet.

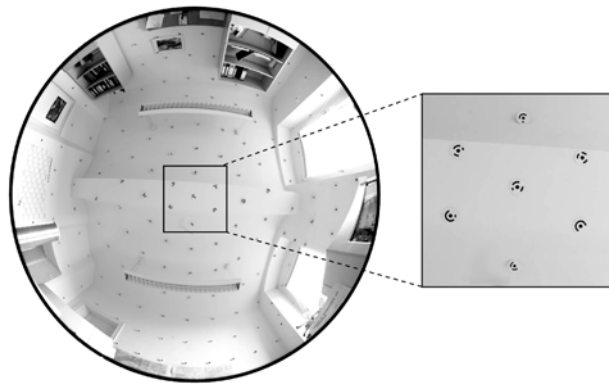


Abbildung 5.9: Kalibrierraum für Fisheye-Objektive [Schwalbe, 2005]

5.2.2 Räumlicher Rückwärtsschnitt

5.2.2.1 Datenaufnahme

Für die Aufnahmen zur Verifikation der geometrischen Fisheye-Modelle wurde die 14-Megapixel-Digitalkamera Kodak DCS 14n Pro in Verbindung mit einem 8 mm Nikkor Fisheye-Objektiv verwendet.

In Bildern, die mit Fisheye-Objektiven aufgenommen worden sind, sind oft starke Effekte der chromatischen Aberration zu erkennen. Aus diesem Grund wurden die Bilder für die weitere Analyse in die drei Farbkanaäle aufgeteilt und nur noch mit einem Farbkanal (Grün) gearbeitet. Eine Berücksichtigung der chromatischen Aberration im geometrischen Modellansatz ist möglich, wird an dieser Stelle jedoch nicht weiter untersucht (vgl. Kapitel 3.3.2).

Die subpixel-genaue Bildkoordinatenmessung in den hemisphärischen Bildern und die Auswertung der Codierung erfolgte mit der Software Aicon 3D Studio. Für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen im Rahmen eines räumlichen Rückwärtsschnittes wurde eine Aufnahme aus der Mitte des Kalibrierraumes verwendet, in der die Koordinaten von 116 Bildpunkten gemessen wurden.

5.2.2.2 Berechnung und Ergebnisse

Tabelle 5.7 zeigt die Standardabweichungen der Gewichtseinheit für verschiedene Berechnungsvarianten als Kriterium zur Beurteilung der Genauigkeit der Kombination des geometrischen Modells und der verwendeten Kamera mit Fisheye-Objektiv. Für jedes der im Kapitel 4.3.2 entwickelten geometrischen Fisheye-Modelle wurde die Berechnung mehrfach durchgeführt, während die innere Orientierung und verschiedene Zusatzparameter schrittweise zum Modell hinzugefügt wurden:

Parameter		äquidistant	raumwinkelgleich	orthografisch	stereografisch	zentralperspektiv
Äußere Orient.	$X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$	11,936	2,706	75,295	34,650	90,296
+ Innere Orient.	c, x_0', y_0'	7,701	2,075	24,046	32,796	56,806
+ Rad.-sym. Verzeichnung	A_1, A_2, A_3	0,132	0,134	2,061	0,135	13,509
+ Rad.-asym. Verzeichnung	B_1, B_2	0,103	0,107	1,976	0,107	12,426
+ Affinität / Scherung	C_1, C_2	0,102	0,106	1,969	0,107	12,459

Tabelle 5.7: Verringerung der Standardabweichung der Gewichtseinheit (in Pixel) durch Hinzufügen zusätzlicher Parameter

Fisheye-Objektive entsprechen konstruktiv dem äquidistanten, dem raumwinkelgleichen und selten auch dem orthografischen Modell. Obwohl das stereografische Modell nur theoretischer Natur ist, wurde es der Vollständigkeit halber in der Analyse berücksichtigt. Zum Vergleich wurden alle Berechnungen auch unter der Annahme einer zentralperspektiven Abbildung durchgeführt. Dies ist jedoch nur möglich, wenn der Einfallswinkel der Objektpunkte weniger als 90° beträgt.

Aus Tabelle 5.7 (erste Zeile) wird ersichtlich, dass das Grundmodell der raumwinkelgleichen Fisheye-Abbildung (ohne innere Orientierung und zusätzliche Parameter) mit einem Gewichtseinheitsfehler von ca. 2 Pixel im Bildraum die besten Genauigkeiten liefert. Es ist daher zu vermuten, dass das verwendete Fisheye-Objektiv konstruktiv dieser Abbildungsgeometrie entspricht. Bei der Berechnung wurden für die Kamerakonstante $c = 8$ mm und für den Bildhauptpunkt sowie alle Zusatzparameter der Wert Null vorgegeben. Erwartungsgemäß resultieren aus der Anwendung des zentralperspektiven Modells die schlechtesten Genauigkeitswerte.

Werden die Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung mitgeschätzt (Tabelle 5.7, dritte Zeile), ist der ermittelte Gewichtseinheitsfehler unter Nutzung des äquidistanten und des stereografischen Fisheye-Modells dem der raumwinkelgleichen Projektion nahezu identisch (0,13 Pixel). Deshalb ist festzustellen, dass die Abweichungen zwischen dem geometrischen Grundmodell und den physikalischen Eigenschaften des Objektives bei diesen Abbildungsarten vollständig durch das Polynom der radial-symmetrischen Verzeichnung kompensiert werden können. Die Verzeichnungskoeffizienten ($A_1 - A_3$) müssten sich dann bei den verschiedenen Modellen in ihrer Größenordnung signifikant unterscheiden. In der folgenden Tabelle sind die geschätzten Werte und deren Standardabweichung für die Parameter der inneren Orientierung und der Zusatzparameter aufgelistet.

Parameter	äquidistant	raumwinkelgleich	orthografisch	stereografisch	zentralperspektiv
c	$7,9978 \pm 0,0014$ mm	$7,9983 \pm 0,0015$ mm	$7,7841 \pm 0,0390$ mm	$7,9895 \pm 0,0013$ mm	$8,1208 \pm 0,1340$ mm
x_0'	$-0,1407 \pm 0,0012$ mm	$-0,1411 \pm 0,0012$ mm	$-0,0628 \pm 0,0212$ mm	$-0,1411 \pm 0,0012$ mm	$0,5102 \pm 0,0832$ mm
y_0'	$-0,0215 \pm 0,0009$ mm	$-0,0214 \pm 0,0010$ mm	$-0,0277 \pm 0,0177$ mm	$-0,0221 \pm 0,0009$ mm	$-0,3101 \pm 0,0753$ mm
A_1	$(-6,244 \pm 0,057) \cdot 10^{-4}$	$(0,146 \pm 0,079) \cdot 10^{-4}$	$(77,62 \pm 5,08) \cdot 10^{-4}$	$(-18,520 \pm 0,031) \cdot 10^{-4}$	$(-32,782 \pm 0,574) \cdot 10^{-4}$
A_2	$(1,497 \pm 0,089) \cdot 10^{-6}$	$(1,845 \pm 0,136) \cdot 10^{-6}$	$(-220,8 \pm 16,85) \cdot 10^{-6}$	$(4,944 \pm 0,039) \cdot 10^{-6}$	$(7,844 \pm 0,351) \cdot 10^{-6}$
A_3	$(-5,015 \pm 0,413) \cdot 10^{-9}$	$(-5,075 \pm 0,738) \cdot 10^{-9}$	$(3254,0 \pm 213,6) \cdot 10^{-9}$	$(-8,234 \pm 0,132) \cdot 10^{-9}$	$(-6,883 \pm 0,528) \cdot 10^{-9}$
B_1	$(2,749 \pm 0,253) \cdot 10^{-5}$	$(2,955 \pm 0,296) \cdot 10^{-5}$	$(38,41 \pm 7,82) \cdot 10^{-5}$	$(2,130 \pm 0,203) \cdot 10^{-5}$	$(49,283 \pm 9,505) \cdot 10^{-5}$
B_2	$(0,696 \pm 0,189) \cdot 10^{-5}$	$(0,859 \pm 0,224) \cdot 10^{-5}$	$(-5,23 \pm 6,47) \cdot 10^{-5}$	$(0,310 \pm 0,149) \cdot 10^{-5}$	$(-33,311 \pm 5,930) \cdot 10^{-5}$
C_1	$(-2,445 \pm 3,097) \cdot 10^{-5}$	$(-2,484 \pm 3,360) \cdot 10^{-5}$	$(-135,8 \pm 71,2) \cdot 10^{-5}$	$(-1,721 \pm 2,966) \cdot 10^{-5}$	$(-114,2 \pm 269,9) \cdot 10^{-5}$
C_2	$(6,109 \pm 2,846) \cdot 10^{-5}$	$(6,503 \pm 3,101) \cdot 10^{-5}$	$(36,1 \pm 68,0) \cdot 10^{-5}$	$(4,756 \pm 2,707) \cdot 10^{-5}$	$(254,3 \pm 241,9) \cdot 10^{-5}$

Tabelle 5.8: Im räumlichen Rückwärtsschnitt geschätzte Parameter

Wie vermutet, unterscheiden sich die Werte der radial-symmetrischen Verzeichnung beim äquidistanten und raumwinkelgleichen Modell sehr stark, da sie verschiedenen große Resteffekte, die aus den Abweichungen zum jeweiligen geometrischen Modell resultieren, kompensieren müssen. Dies wird in der nachfolgenden Grafik (Abbildung 5.10), welche die Verzeichnungskurven für das verwendete Fisheye-Objektiv unter Anwendung aller entwickelter geometrischer Fisheye-Modelle zeigt, besonders deutlich. Während die Kurve unter Nutzung des raumwinkelgleichen Modells den geringsten Ausschlag zeigt, erreichen die anderen Kurven deutlich größere Werte.

Der Radius des auf dem Sensor abgebildeten Bildkreises beträgt etwa 12 mm (im Diagramm gekennzeichnet). An dieser Stelle beträgt die verbleibende Verzeichnung nach Anwendung des raumwinkelgleichen Modells etwa 0,3 mm (35 Pixel), des äquidistanten Modells 0,9 mm (105 Pixel), des stereografischen Modells 2,3 mm (280 Pixel) und des zentralperspektiven Modells 3,8 mm (460 Pixel). Die Rest-Verzeichnung am Bildrand beim orthografischen Modell liegt bei (theoretischen) 70 mm. Es ist anzumerken, dass das Verzeichnungspolynom die Modellabweichungen unter Nutzung des zentralperspektiven Modells nicht vollständig kompensieren kann. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit nach Berücksichtigung der radial-symmetrischen Verzeichnung im räumlichen Rückwärtsschnitt beträgt beim zentralperspektiven Modell noch 13 Pixel, während dieser Wert bei dem äquidistanten, raumwinkelgleichen und stereografischen Modell nur 0,13 Pixel beträgt (vgl. Tabelle 5.7).

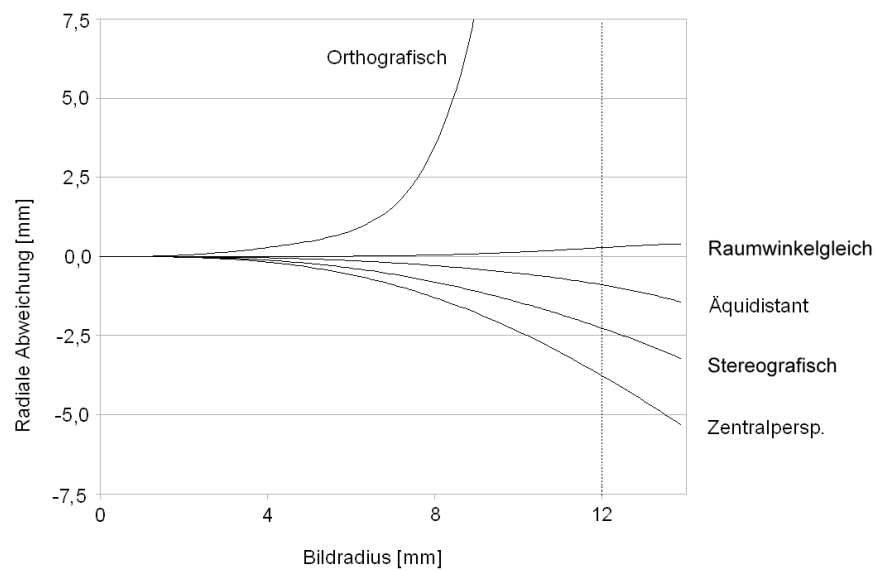


Abbildung 5.10: Radial-symmetrische Verzeichnung unter Nutzung verschiedener geometrischer Fisheye-Modelle

Das Hinzufügen weiterer Zusatzparameter (B_1 , B_2 , C_1 , C_2) zu den unterschiedlichen geometrischen Grundmodellen bewirkt lediglich eine geringe Genauigkeitsverbesserung (Tabelle 5.7, vorletzte und letzte Zeile), der Einfluss dieser Zusatzparameter auf die Gesamtgenauigkeit ist im Vergleich zur radial-symmetrischen Verzeichnung sehr gering.

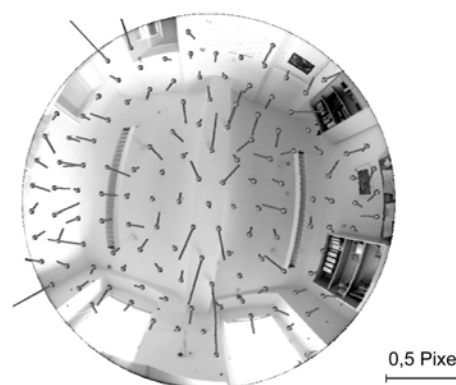


Abbildung 5.11: Verbleibende Residuen im Fisheye-Bild nach Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes

Durch die Anwendung des äquidistanten Modells in Kombination mit Zusatzparametern werden insgesamt die besten Genauigkeiten erreicht (Gewichtseinheitsfehler 0,102 Pixel). Nur geringfügig schlechtere Ergebnisse ergeben sich durch die Nutzung des raumwinkelgleichen Fisheye-Modells (Gewichtseinheitsfehler 0,106 Pixel). Allerdings hat dabei das Grundmodell die geringsten Abweichungen zum physikalischen Kameramodell, weshalb die Zusatzparameter hier die kleinsten Werte erhalten.

Überträgt man das Genauigkeitspotenzial im Bildraum von 0,1 Pixel in den Objektraum, entspricht dies einer lateralen Genauigkeit von 0,3 mm in einer Entfernung von 3 Metern (durchschnittliche Objektpunktentfernung im Kalibrierraum). Das bedeutet, dass die verbleibenden Residuen (Abbildung 5.11) bereits den Einfluss der Genauigkeit der Objektpunkte widerspiegeln könnten. Dies soll im Folgenden durch die Berechnung einer Bündelblockausgleichung als freies Netz überprüft werden.

5.2.3 Bündelblockausgleichung

Die vorangegangenen Ergebnisse sollen im Rahmen einer Bündelblockausgleichung mit 8 weiteren im gleichen Kalibrierraum aufgenommenen Bildern weiter untersucht und verifiziert werden. Insbesondere soll der Frage nachgegangen werden, ob durch die Berechnung ohne Limitierung auf die Genauigkeit vorhandener Passpunkte noch höhere Genauigkeiten erzielt werden können. Die folgende Abbildung zeigt die Anordnung der verwendeten 9 Kamerastandpunkte. Die Aufnahmerichtungen der einzelnen Bilder sind konvergent.

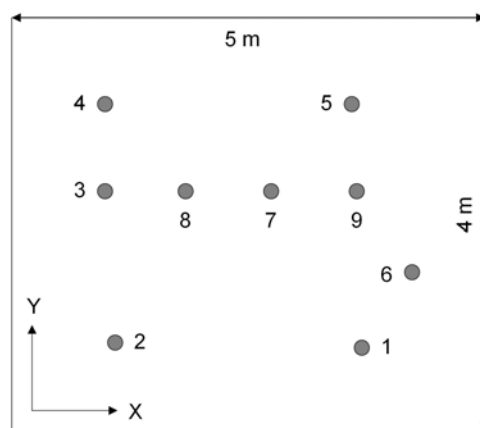


Abbildung 5.12: Anordnung der Fisheye-Bilder im Kalibrierraum für die Bündelblockausgleichung

Zuerst wurden unter Anwendung der verschiedenen geometrischen Fisheye-Modelle und zum Vergleich auch des zentralperspektiven Modells eine Bündelblockausgleich als freie Netzausgleichung berechnet. Es wurden dabei die Koordinaten von 131 Objektpunkten bestimmt, die innere Orientierung der verwendeten Objektiv-Kamera-Kombination und die äußere Orientierung jedes Bildes. Zusatzparameter wurden vorerst nicht geschätzt. Die folgende Tabelle (Tabelle 5.9) zeigt die Standardabweichung der Gewichtseinheit und die mittleren Standardabweichungen der ermittelten Objektpunktkoordinaten (*RMS*) als Ergebnisse der Berechnungen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass das Grundmodell der raumwinkelgleichen Abbildung die Konstruktion des verwendeten Objektives am besten beschreibt. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit beträgt bei Verwendung dieses Modells 1,3 Pixel, die mittleren Standardabweichungen der Objektkoordinaten betragen ca. 1 - 3 mm. Die Grundmodelle der orthografischen, der stereografischen Projektion und natürlich das zentralperspektive Modell eignen sich am wenigsten.

	$\hat{S}_0$	RMS_x	RMS_y	RMS_z
äquidistant	4,034 Pixel	5,15 mm	5,57 mm	8,37 mm
raumwinkelgleich	1,304 Pixel	1,66 mm	1,78 mm	2,71 mm
orthografisch	19,036 Pixel	23,28 mm	24,18 mm	38,72 mm
stereografisch	13,455 Pixel	17,31 mm	18,83 mm	26,81 mm
zentralperspektiv	38,635 Pixel	44,25 mm	47,71 mm	64,11 mm

Tabelle 5.9: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung (Berechnung ohne Berücksichtigung von Zusatzparametern)

Anschließend wurden die gleichen Berechnungen durchgeführt, wobei jedoch alle Zusatzparameter (Objektivverzeichnung, Affinität, Scherung) mit bestimmt wurden (Tabelle 5.10). Es zeigt sich auch hier, dass die Zusatzparameter, insbesondere die Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung, Abweichungen zwischen dem geometrischen Modell der äquidistanten, der raumwinkelgleichen und der stereografischen Abbildung von dem realen Aufbau des Objektivs in gleicher Weise kompensieren können. Die Ergebnisse sind bei allen drei Modellen nahezu identisch. Damit werden die nach der Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes getroffenen Aussagen bestätigt. Allerdings ist die aus der Bündelblockausgleichung resultierende Standardabweichung der Gewichtseinheit mit ca. 0,3 Pixel größer als beim räumlichen Rückwärtsschnitt (0,1 Pixel).

	$\hat{S}_0$	RMS_x	RMS_y	RMS_z
äquidistant	0,280 Pixel	0,37 mm	0,39 mm	0,51 mm
raumwinkelgleich	0,282 Pixel	0,37 mm	0,39 mm	0,52 mm
orthografisch	1,958 Pixel	2,53 mm	2,70 mm	3,56 mm
stereografisch	0,284 Pixel	0,37 mm	0,40 mm	0,52 mm
zentralperspektiv	10,087 Pixel	12,21 mm	13,05 mm	17,50 mm

Tabelle 5.10: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung (Berechnung mit Berücksichtigung von Zusatzparametern)

Wenn der limitierende Faktor für die Genauigkeit der Ergebnisse des räumlichen Rückwärtsschnittes die Objektpunktkoordinaten sind, sollte die Berechnung einer Bündelblockausgleichung ohne Passpunkte höhere Genauigkeiten liefern. Weil dies aber nicht der Fall ist, ist die Ursache für die schlechtere Genauigkeit der Ergebnisse der Bündelblockausgleichung im Vergleich zum räumlichen Rückwärtsschnitt möglicherweise darin zu suchen, dass die Werte der inneren Orientierung oder der Zusatzparameter, insbesondere die Koordinaten des Bildhauptpunktes nicht stabil bleiben, sich also bei jeder Aufnahme ändern.

Um diesen Zusammenhang zu untersuchen, wurde die Berechnung der Bündelblockausgleichung unter Anwendung des raumwinkelgleichen geometrischen Fisheye-Modells erneut durchgeführt, jedoch mit bild-varianten Parametern der inneren Orientierung. Das bedeutet, es werden für jedes der verwendeten Bilder separate Werte für die innere Orientierung entsprechend [Maas & Niederöst, 1997] geschätzt.

Tabelle 5.11 listet die in der Bündelblockausgleichung ermittelten Werte der inneren Orientierung für jedes einzelne Bild auf. Dabei sind deutliche Unterschiede in den Werten zu erkennen. So variiert die Kamera-konstante im Bereich von 20 μm , der Bildhauptpunkt in horizontaler Bildkoordinatenrichtung um 20 μm (entspricht ca. 2,5 Pixel) und der Bildhauptpunkt in vertikaler Bildkoordinatenrichtung sogar um 65 μm (entspricht ca. 8 Pixel). Dies bestätigt die Notwendigkeit der Einführung einer bild-varianten inneren Orientierung. Für die Standardabweichung der Gewichtseinheit dieser Bündellösung wurde ein Wert von 0,154 Pixel ermittelt. Nachdem zusätzlich ein Ausreißertest nach [Baarda, 1968] angewendet wurde, bei dem etwa 2 Bildpunkte pro Bild aus der Bündellösung entfernt wurden, konnte die Standardabweichung auf 0,095 Pixel gesteigert werden.

Bild	Objektpunkte	Kamerakonstante c	Bildhauptpunkt x_0'	Bildhauptpunkt y_0'
1	93	$8,0176 \pm 0,0048$ mm	$-0,1608 \pm 0,0032$ mm	$-0,0574 \pm 0,0032$ mm
2	91	$8,0156 \pm 0,0047$ mm	$-0,1534 \pm 0,0031$ mm	$-0,0581 \pm 0,0031$ mm
3	95	$8,0089 \pm 0,0040$ mm	$-0,1516 \pm 0,0024$ mm	$-0,0594 \pm 0,0031$ mm
4	103	$8,0131 \pm 0,0046$ mm	$-0,1446 \pm 0,0028$ mm	$-0,0662 \pm 0,0031$ mm
5	96	$8,0257 \pm 0,0048$ mm	$-0,1512 \pm 0,0027$ mm	$-0,0811 \pm 0,0031$ mm
6	96	$8,0230 \pm 0,0051$ mm	$-0,1536 \pm 0,0028$ mm	$-0,0786 \pm 0,0033$ mm
7	79	$8,0151 \pm 0,0039$ mm	$-0,1476 \pm 0,0017$ mm	$-0,0216 \pm 0,0020$ mm
8	108	$8,0292 \pm 0,0039$ mm	$-0,1402 \pm 0,0029$ mm	$-0,0173 \pm 0,0020$ mm
9	113	$8,0249 \pm 0,0041$ mm	$-0,1481 \pm 0,0029$ mm	$-0,0153 \pm 0,0020$ mm

Tabelle 5.11: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung mit bild-varianten Parametern

Das im räumlichen Rückwärtsschnitt ermittelte laterale Genauigkeitspotenzial für das geometrische Modell der Fisheye-Abbildung von ca. 0,1 Pixel für die verwendete Objektiv-Kamera-Kombination konnte durch die Berechnung der Bündelblockausgleichung mit einer bild-varianten Parametrisierung bestätigt werden.

5.2.4 Weitere Anwendungen der geometrischen Fisheye-Modelle

In der praktischen Anwendung ist für jedes Fisheye-Objektiv das geeignetste geometrische Fisheye-Modell zu verwenden. Dies kann entweder aus den Spezifikationen des Objektivs bekannt sein, oder es ist durch eine Kalibrierung zu ermitteln. In den meisten Fällen werden entweder das äquidistante geometrische Modell oder das raumwinkelgleiche Modell (besonders bei Vollformat-Fisheye-Objektiven) in Frage kommen. Solange die radial-symmetrische Verzeichnung als Zusatzparameter zum Grundmodell berücksichtigt wird, sind die Unterschiede zwischen diesen beiden Modellen ohnehin minimal.

Die geometrischen Modelle können dann für verschiedene Anwendungen von Fisheye-Objektiven genutzt werden. Unter anderem können sie für die interaktive Stereoauswertung von Fisheye-Bildern, beispielsweise zur dreidimensionalen Modellierung von Innenraumgeometrien verwendet werden. Dazu ist es sinnvoll, die Kernliniengeometrie der Fisheye-Abbildung anzuwenden. Die analytische Herleitung der Kernliniengeometrie bei Fisheye-Objektiven ist in [Abraham & Förstner, 2005] beschrieben. Die Kernliniengeometrie lässt sich algorithmisch am einfachsten durch eine Rückprojektion einer Kette von Objektpunkten realisieren, wie bereits in Kapitel 5.1.3.1 (Kernliniengeometrie bei Panoramakameras) erläutert wurde.

Außerdem lassen sich Ausschnitte aus einem hemisphärischen Fisheye-Bild in zentralperspektive Ansichten entzerren. Dazu wird ähnlich der in Kapitel 5.1.3.2 beschriebenen Panorama-Tangentialprojektion eine Tangentialebene rechnerisch an eine beliebige Stelle der 'Fisheye-Halbkugel' gelegt und die Bildinformation auf diese Ebene projiziert (beispielsweise durch indirekte Entzerrung in Verbindung mit bilinearer Interpolation).

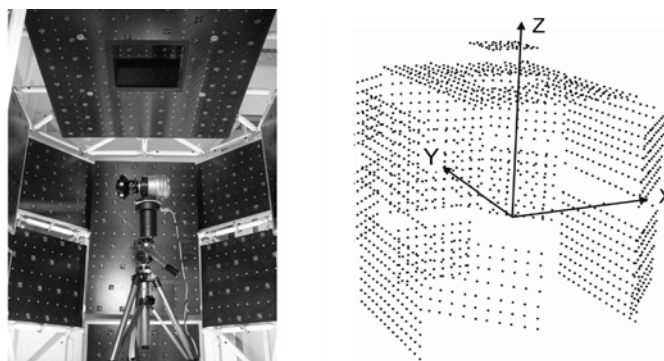
Aus der Rückprojektion von Objektpunkten ins Fisheye-Bild unter Nutzung der Beschreibung des geometrischen Modells als Abhängigkeit der Bildkoordinaten von den Objektkoordinaten, sowie der Orientierungs- und Kameraparameter, lassen sich weitere Anwendungen ableiten, beispielsweise die Kolorierung und Texturierung von Laserscanner-Punktwolken.

5.3 Vollsphärisches Panorama

5.3.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

5.3.1.1 Kalibrierraum

Für die Untersuchung des geometrischen Modells für Panoramakamera-Fisheye-Kombinationen eignen sich die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Kalibrierräume nur bedingt, da die Objektpunkte das vollsphärische Bild nur teilweise abdecken. Deshalb sollte ein Kalibrierraum verwendet werden, der an der Decke und an den umliegenden Wänden bis zum Boden ausreichend Referenzpunkte besitzt. Ein solcher Kalibrierraum (Abbildung 5.13) wurde freundlicherweise von der Firma Aicon 3D Systems bereit gestellt. Dieser Raum ist ca. $2,5 \times 1,8 \times 2,0 \text{ m}^3$ groß und besteht aus 430 retro-reflektierenden Zielmarken mit einer durchschnittlichen Koordinatengenauigkeit von 0,01 bis 0,07 mm.



*Abbildung 5.13: Kalibrierraum für vollsphärische Panoramakameras
(zur Verfügung gestellt von der Fa. Aicon 3D Systems)*

5.3.1.2 Aufnahme

Das geometrische Modell wurde anhand von zwei verschiedenen Kameras untersucht [Schwalbe & Schneider 2005]. Zum einen wurde die Panoramakamera EYESCAN MM1 der Firma Kamera & System Technik Dresden in Verbindung mit dem in Kapitel 5.2 untersuchten Fisheye-Objektiv (Nikkor 8 mm) verwendet und zum anderen die Panoramakamera SpheroCam HDR der Firma Spheron [Bonnet, 2004] in Kombination mit einem 14 mm Fisheye-Objektiv. Die erste Kamera ist mit einem Zeilensensor mit 3600 Pixel ausgestattet (ergibt 24 Megapixel für ein 360°-Panorama), die zweite mit einem Zeilensensor mit 5300 Pixel (ergibt 56 Megapixel für ein 360°-Panorama).

Zur Ausleuchtung des Kalibrierraumes und für die Nutzung des retro-reflektierenden Effektes der Zielmarken wurden drei einfache Scheinwerfer in der Nähe des Kamerastandpunktes platziert. Die Aufnahme erfolgte jeweils etwa aus der Mitte des Raumes.

5.3.1.3 Berechnung und Ergebnisse

Das in Kapitel 4.4 entwickelte geometrische Modell für vollsphärische Panoramakameras wurde im räumlichen Rückwärtsschnitt getestet. Da die Art der Projektion für die verwendeten Objektive unbekannt ist, wurde vom äquidistanten Modell in vertikaler Bildkoordinatenrichtung ausgegangen. In Kapitel 5.2 wurde gezeigt, dass die Verwendung dieses Modells für Objektive mit raumwinkelgleicher oder stereografischer Projektion möglich ist, weil die Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung Unterschiede zwischen den Modellen vollständig kompensieren können.

Die Auswirkung zusätzlicher Parameter auf die Standardabweichung der Gewichtseinheit der Ausgleichung des räumlichen Rückwärtsschnittes unter Nutzung der in einem vollsphärischen Panoramabild der SpheroCam gemessenen Bildkoordinaten zeigt Tabelle 5.12. Dabei ist zu erkennen, dass die Standardabweichung der Gewichtseinheit durch die Anwendung entsprechender Zusatzparameter um den Faktor 200 von 31 Pixel auf 0,15 Pixel verbessert werden konnte. Entscheidend für die Genauigkeit sind vor allem der Bildhauptpunkt, die Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung, sowie die Neigung und Kantung des Zeilensensors.

Parameter		$\hat{s}_0$ [Pixel]
Äußere Orientierung, Kamerakonstante, Affinität	$X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, c, A_h$	31,131
+ Bildhauptpunkt vertikal	y_0'	10,177
+ Exzentrizität Projektionszentrum-Rotationsachse	e	9,464
+ Radial-symmetrische Verzeichnung	A_1, A_2, A_3	0,260
+ Neigung / Kantung des Zeilensensors	N, K	0,151

Tabelle 5.12: Verringerung der Standardabweichung der Gewichtseinheit (in Pixel) durch Hinzufügen zusätzlicher Parameter

Durch Übertragung des ermittelten Genauigkeitswertes in den Objektraum ergibt sich eine laterale Punktgenauigkeit von 0,1 mm (Entfernung von 1 m) bzw. 1 mm (Entfernung 10 m) für die SpheroCam. Für die EYESCAN MM1 wurde im Bildraum eine Standardabweichung der Gewichtseinheit von 0,20 Pixel erreicht. Dies entspricht wegen der etwas geringeren Auflösung dieser Kamera einer Objektraumgenauigkeit von 0,22 mm (Entfernung 1 m) bzw. 2,2 mm (Entfernung 10 m).

Abbildung 5.14 zeigt die verbleibenden Residuen der Bildkoordinaten nach Berücksichtigung der genannten Zusatzparameter. Die noch vorhandenen (lokalen) Restsystematiken können auf mechanische Instabilitäten und äußere Effekte (z.B. Vibrationen) während der Kamerarotation zurückgeführt werden.

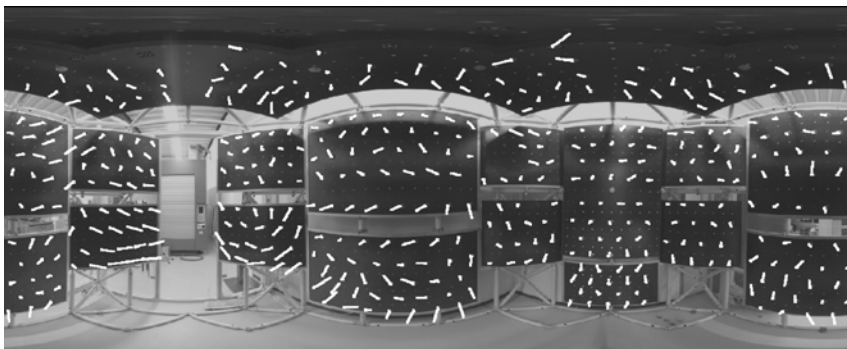


Abbildung 5.14: Vollsphärisches Panorama und Residuen nach Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes

5.3.2 Weitere Anwendungen des geometrischen Modells

Die Anwendungsmöglichkeiten des geometrischen Modells für vollsphärische Panoramen entsprechen denen der Modelle der zylindrischen Panorama-Abbildung und der Fisheye-Abbildung. Die Erläuterungen in den Kapiteln 5.1.3 und 5.2.4 gelten deshalb in gleicher Weise für dieses geometrische Modell.

5.4 Terrestrischer Laserscanner

5.4.1 Kalibrierräume

Die Überprüfung des geometrischen Modells für terrestrische Laserscanner erfolgte unter Nutzung zweier verschiedener Kalibrierräume unterschiedlicher Dimensionen. Zum einen wurde der gleiche Kalibrierraum wie für die Analyse der geometrischen Modelle für Fisheye-Objektive (Kapitel 5.2.1) mit möglichen Aufnahmeentfernungen bis zu 5 m verwendet und zum anderen eine 360°-Testumgebung in einem Innenhof auf dem Campus der TU Dresden, der im Folgenden als 'Kalibrierhof' bezeichnet wird (Abbildung 5.15).

Dieser Innenhof ist ca. $45 \times 45 \text{ m}^2$ groß; an die etwa 20 m hohen Fassaden der angrenzenden Gebäude wurden ca. 100 kreisrunde retro-reflektierende Zielmarken mit einem Durchmesser von 5 cm verteilt. Darstellungen des Testfeldes befinden sich auch im Anhang A.6.1.



Abbildung 5.15: 360°-Panorama des verwendeten Testfeldes für terrestrische Laserscanner ('Kalibrierhof')

Zur Bereitstellung eines übergeordneten Koordinatensystems wurden die Koordinaten der Zielmarken vorab mit einem Tachymeter bestimmt [Teschke, 2004]. Diese Referenzkoordinaten wurden sowohl als (sehr genaue) Näherungswerte für die Bündelblockausgleichung zur Linearisierung der Verbesserungsgleichungen verwendet als auch zum nachträglichen Vergleich der in der Ausgleichung berechneten Objektpunktkoordinaten mit den Referenzkoordinaten (Kontrollpunkte) zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit genutzt.

Für die Referenzmessungen stand ein Tachymeter TCR1103 der Firma Leica zur Verfügung. Die Genauigkeit der Streckenmessung beträgt nach den Herstellerspezifikationen $2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$. Die Winkelmessgenauigkeit des TCR1103 wird mit $1,0 \text{ mgon}$ angegeben. Die Bestimmung des Referenznetzes erfolgte in zwei voneinander unabhängigen Messungen. In einer vorher durchgeführten Instrumentenprüfung wurden die vorhandenen Instrumentenfehler bestimmt und durch die geräteinterne Software an die Beobachtungen angebracht. Eventuelle Restfehler wurden durch Messungen in zwei Fernrohrlagen eliminiert. Um bei der Bestimmung des Referenznetzes eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten, wurden auch die meteorologischen Parameter wie Temperatur und Luftdruck beachtet. Obwohl deren Einfluss auf die Streckenmessung bis 30 Meter gering ist, wurden während der Aufnahmen kontinuierlich Temperatur und Druck überprüft und Änderungen sofort berücksichtigt. Die Unterschiede zwischen den beiden unabhängigen Referenzmessungen betragen sowohl in der Lage als auch in der Höhe weniger als 2 mm.

Um eine einfache Zuordnung der Punktnummern zu den in den Laserscanner- und Bilddaten gemessenen Zielmarken zu ermöglichen, wurde ein einheitliches Punktnummernformat ' $ABxyz$ ' festgelegt (A : Nummerierung der vier Fassaden (1-4), B : Nummerierung der fünf Etagen (0-5), xyz : fortlaufende Punktnummerierung).

5.4.2 Aufnahme

Für die Analyse des Modells wurden mit dem in Kapitel 3.5.3 vorgestellten terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i 6 Scans in dem Fisheye-Kalibrierraum und 3 Scans im Kalibrierhof aufgenommen. Aus den Punktwolken wurden anschließend die sphärischen Koordinaten der Passpunkte ermittelt.

5.4.2.1 Fisheye-Kalibrierraum

Der terrestrische Laserscanner Riegl LMS-Z420i wurde in jeder Ecke des Kalibrierraumes sehr niedrig aufgestellt und um 45° nach oben verschwenkt (Abbildung 5.16, links), um die Aufnahme von Objektpunkten an der Decke des Raumes zu ermöglichen. Zwei weitere Scans wurden aus der Raummitte mit einem um 90° verschwenkten Laserscanner aufgenommen (Abbildung 5.16, rechts). Zwischen diesen beiden Scans wurde der Laserscanner horizontal um 90° gedreht. Die Aufnahmekonfiguration der 6 Standpunkte ist in Abbildung 5.17 dargestellt.



Abbildung 5.16: Terrestrischer Laserscanner im Fisheye-Kalibrierraum: um 45° verschwenkt (links), um 90° verschwenkt (rechts)

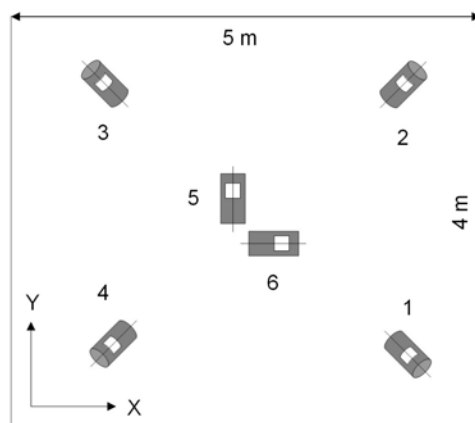


Abbildung 5.17: Anordnung der Laserscanner-Standpunkte im Fisheye-Kalibrierraum

Als Winkelauflösung wurden $0,030^\circ$ gewählt, was einem Punktabstand von 2 mm in 4 m Entfernung entspricht. Für die manuelle Messung der Zielmarkenkoordinaten wurde die Software des Laserscannerherstellers (RiScan Pro) genutzt. Da es sich bei den Zielmarken um schwarze Kreise (Durchmesser 10 mm) auf weißen Hintergrund handelt, sind diese gut erkennbar im Intensitätsbild des Laserscanners. Deshalb wurde das Intensitätsbild zur Koordinatenbestimmung durch manuelle Auswahl des Zielmarkenzentrums (auf ganze Pixel genau) und automatische Zuordnung der zugehörigen sphärischen Koordinaten verwendet. Die Zielmarken-Codierung kann nicht genutzt werden, da die Qualität des Intensitätsbild die Interpretation des Codes nicht erlaubt. Da eine automatische Messung des Zielmarkenmittelpunktes mit Subpixel-Operatoren nicht möglich war, hängt insbesondere die Lagegenauigkeit der mit dem Laserscanner ermittelten Koordinaten stark von der eingestellten Winkelauflösung ab.

Das Zielmarkendesign (schwarz auf weißem Hintergrund) hat sich als nicht optimal herausgestellt, da die Intensitätswerte des Markenmittelpunktes sehr gering waren, was meist zu schlechten Genauigkeiten der Di-

stanzmessung führte. In einigen Fällen war der Laserscanner nicht in der Lage, überhaupt ein reflektiertes Signal vom Zielmarkenzentrum zu erfassen.

5.4.2.2 Kalibrierhof

Die 3 Laserscanner-Standpunkte in dem etwa $45 \times 45 \times 20 \text{ m}^3$ großen Innenhof haben einen Abstand von ca. 7 m und bilden ein gleichseitiges Dreieck (Abbildung 5.18). Von jedem Standpunkt wurde zuerst ein 'Overview'-Scan mit geringer Auflösung aufgenommen. In diesen Scans wurde durch die Laserscanner-Software automatisch nach Punkten mit sehr hohem Kontrast gesucht. Auf diese Weise konnte die Position der retro-reflektierenden 5 cm großen Zielmarken näherungsweise bestimmt werden. Anschließend wurde für jede dieser Positionen ein kleines Scan-Fenster definiert und dieses im 'Fine'-Scan-Modus mit der höchstmöglichen Winkelauflösung aufgenommen. Durch eine intensitäts-gewichtete Interpolation bestimmt die Software automatisch das jeweilige Markenzentrum. Die sphärischen Koordinaten dieser Markenzentren dienen als Beobachtungen für die im Folgenden beschriebenen Analysen.

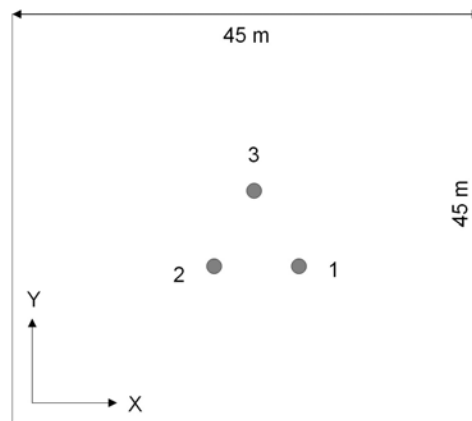


Abbildung 5.18: Anordnung der Laserscanner-Standpunkte im Kalibrierhof

Die Aufnahmeentfernungen in diesem Kalibrierhof betragen bis zu 40 m. Damit wird auch hier der Distanzbereich der meisten terrestrischen Laserscanner, insbesondere das des untersuchten Scanners Riegl-LMS Z420i mit einer Reichweite bis zu 800 m nicht abgedeckt. Dies ist bei der Untersuchung von Zusatzparametern zur Distanzmessung zu berücksichtigen. Während der Fisheye-Kalibrierraum eine hemisphärische Passpunktabdeckung (umliegende Wände und Decke) aufweist, sind die Passpunkte im Kalibrierhof nur an den umgebenden Fassaden angebracht.

5.4.3 Berechnung und Ergebnisse

Die Analyse des geometrischen Modells terrestrischer Laserscanner soll in der gleichen Weise erfolgen wie die Überprüfung der geometrischen Kameramodelle in den vorangegangenen Kapiteln. Das bedeutet, dass die in der Photogrammetrie übliche Vorgehensweise Verwendung finden soll, bei der systematische Abweichungen als Zusatzparameter im Rahmen einer vermittelnden Ausgleichung geschätzt werden. Statt der Bildkoordinaten dienen hier die sphärischen Koordinaten von Objektpunkten als Beobachtungen. Die photogrammetrischen Verfahren räumlicher Rückwärtsschnitt, Testfeldkalibrierung bzw. Bündelblockausgleichung lassen sich analog auch auf terrestrische Laserscanner-Aufnahmen anwenden. Bei einem räumlichen Rückwärtsschnitt werden die Position und Ausrichtung des Laserscanners sowie mögliche Kalibrierparameter mittels der von einem Standpunkt aufgenommenen Scandaten und der in einem übergeordneten Koordinatensystem gegebenen Objektpunktkoordinaten ermittelt. Werden mehrere Scanner-Standpunkte für die Berechnung der Kalibrierparameter herangezogen, können gleichzeitig die Koordinaten der Objektpunkte als Unbekannte geschätzt werden (Bündelblockausgleichung), wodurch oft eine Genauigkeitssteigerung der Kalibrierung er-

reicht wird, weil die Genauigkeit der Ausgleichung dann nicht mehr durch die Genauigkeit vorhandener Passpunkte beschränkt wird.

Die sonst in der Geodäsie gebräuchliche Methodik zur Bestimmung von Kalibrierparametern tachymetrischer Messinstrumente, bei der spezielle Messanordnungen genutzt werden, um einzelne Modellabweichungen zu bestimmen, wird durch die in der Photogrammetrie üblichen Verfahren, u. a. die Bündelblockausgleichung ersetzt. Als Nachteil gegenüber konventionellen geodätischen Verfahren ist dabei zu sehen, dass sich die Werte der Parameter bei deren simultaner Bestimmung gegenseitig stark beeinflussen können. Deshalb lässt sich nur eingeschränkt auf die tatsächliche Größe mechanischer Instrumentenfehler schließen.

Als Besonderheit ist zu beachten, dass unterschiedliche Typen von Beobachtungen gleichzeitig ausgeglichen werden (Distanzen, Winkel), weshalb das Berechnungsergebnis in besonderem Maße von der gewählten Gewichtung abhängig ist. Aus diesem Grund wird für die Festlegung des stochastischen Modells in den im Folgenden vorgestellten Berechnungen das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung Anwendung finden. Damit lassen sich auch Aussagen über die unterschiedliche Auswirkung zusätzlicher Parameter auf die Beobachtungstypen (Strecke, Horizontalwinkel und Vertikalwinkel) treffen. Die geschätzte Standardabweichung der Gewichtseinheit kann dann nicht mehr als Kriterium zur Beurteilung der Genauigkeit der Ausgleichungsergebnisse herangezogen werden. Stattdessen werden die geschätzten Standardabweichungen der Beobachtungen für diesen Zweck verwendet. Die Methode der Varianzkomponentenschätzung wird in Kapitel 7.3 detailliert erläutert.

Alle folgenden Berechnungen wurden sowohl mit festen Passpunktkoordinaten als auch als freie Ausgleichung berechnet. Das bedeutet, dass kein Zwang durch die Objektkoordinaten auf das Netz ausgeübt wird. Die Kalibrierergebnisse waren in beiden Fällen nahezu identisch, weshalb im Folgenden nur die Ergebnisse der freien Ausgleichung vorgestellt werden. Die mittleren Koordinatengenauigkeiten der Objektpunkte (*RMS*) dienen bei der freien Ausgleichung als zusätzliches Kriterium zur Beurteilung des geometrischen Modells in Verbindung mit dem verwendeten Laserscanner (innere Genauigkeit). Die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse erfolgt getrennt nach Fisheye-Kalibrierraum und Kalibrierhof. Zur Berechnung wurde die Software verwendet, die im Anhang A.1 näher vorgestellt wird.

5.4.3.1 Fisheye-Kalibrierraum

In einem ersten Berechnungsdurchgang wurden die in Kapitel 4.5.2 und 4.5.3 vorgeschlagenen Zusatzparameter zunächst einzeln dem geometrischen Grundmodell hinzugefügt und entsprechend ihrer Auswirkung auf die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse (speziell *RMS* der Standardabweichungen der Objektkoordinaten) sortiert. Die Zusatzparameter wurden anschließend in einem zweiten Berechnungsdurchgang schrittweise in das geometrische Modell integriert (Tabelle 5.13), wobei die im vorangegangenen Schritt eingeführten Parameter ebenfalls als Unbekannte im Modell berücksichtigt blieben. Zusatzparameter mit der größten (positiven) Auswirkung auf das Ausgleichungsergebnis wurden zuerst in die Berechnung eingeführt. Jeder Berechnung liegen jeweils 6 Laserscanner-Positionen und 117 Objektpunkte zugrunde.

Berechnung	Zusatzparameter	$\hat{s}_D$ [mm]	$\hat{s}_\alpha$ [mgon]	$\hat{s}_\beta$ [mgon]	<i>RMS</i> _{XYZ} [mm]
0	— —	13,28	16,28	21,02	1,44
1	+ c_{T1} , c_{T2} Teilkreisexzentrizität vertikal	13,03	16,19	15,78	1,22
2	+ c_E Exzentrizität zw. Ziel- u. Kippachse	12,92	16,05	15,40	1,19
3	+ a_i Maßstab der Distanzmessung	8,81	16,02	15,33	1,16
4	+ a_o Additionsanteil der Distanzmessung	8,75	16,03	15,32	1,16
5	+ (b_{T1}), b_{T2} Teilkreisexzentrizität horizontal	8,79	15,47	15,30	1,15
6	+ b_E Exzentrizität zw. Ziel- u. Stehachse	8,73	15,01	15,21	1,13
7	+ b_Z Zielachsabweichung	8,74	14,81	15,25	1,13

Tabelle 5.13: Verringerung der Standardabweichungen der Beobachtungen durch Hinzufügen zusätzlicher Parameter und *RMS* der Standardabweichungen der geschätzten Objektpunktkoordinaten

Zuerst wurden die Zusatzparameter c_{T1} und c_{T2} (in allgemeiner Fourier-Notation, vgl. Kapitel 4.5.3.1) im Modellansatz zur Kompensation einer eventuellen vertikalen Teilkreisexzentrizität berücksichtigt. Wie zu erwarten, wird dadurch vor allem eine Verringerung der geschätzten Standardabweichung der Vertikalwinkel-messung bewirkt, wodurch sich auch die Koordinaten der Objektpunkte mit höherer Genauigkeit ($RMS_{XYZ} = 1,22$ mm) bestimmen lassen. Es ist jedoch anzumerken, dass nur der Parameter c_{T1} (Amplitude des Sinus-Terms) signifikant bestimmt werden konnte, c_{T2} (Amplitude des Kosinus-Terms) wurde deshalb bei den folgenden Berechnung nicht mehr als Unbekannte mitgeschätzt.

Die ermittelte Standardabweichung der Distanzbeobachtung konnte durch Hinzufügen des Maßstabsparameters a_1 oder den konstanten Anteil der Nullpunktkorrektur a_0 deutlich verringert werden. Dies bestätigt die Tatsache, dass sich eine Nullpunktabweichung besonders bei kurzen Distanzen, wie hier vorhanden, auswirkt. Werden die Parameter a_0 und a_1 gleichzeitig geschätzt, sind diese aufgrund der geringen Entfernungsunterschiede stark korreliert (97,4 %). Es ist deshalb ausreichend, nur einen der beiden Parameter zu berücksichtigen. Andere zusätzliche Parameter der Distanzbeobachtung konnten nicht signifikant bestimmt werden. Dies betrifft insbesondere Parameter, die zyklische Distanzabweichungen modellieren, da der verwendete terrestrische Laserscanner nach dem Impulslaufzeitverfahren arbeitet und außerdem die vorhandenen Entfernungen nur einen sehr geringen Ausschnitt des maximalen Distanzmessbereichs abdecken. Eine Abhängigkeit vom Auftreffwinkel des Laserstrahls auf die Objektoberfläche (a_{I0}) wird nicht modelliert.

Anschließend wurden mehrere Zusatzparameter der Horizontalwinkel-messung zusätzlich in das Modell eingeführt. Dabei hat die Berücksichtigung der Parameter zur Modellierung der horizontalen Teilkreisexzentrizität, die Exzentrizität zwischen Zielachse und Stehachse und die Zielachsabweichung einen positiven Einfluss auf die geschätzte Standardabweichung des Horizontalwinkels. Die geschätzten Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten können dagegen nicht mehr wesentlich verringert werden.

Insgesamt wurden die geschätzten Standardabweichungen der Beobachtungen durch die Berücksichtigung von Zusatzparametern um 34 % (Distanz), 9 % (Horizontalwinkel) und 27 % (Vertikalwinkel) reduziert. Während die aus der Berechnung ohne Zusatzparameter resultierenden a-posteriori Genauigkeiten der Horizontalwinkel höher sind als die der Vertikalwinkel, gleichen sich die Werte unter Verwendung von Zusatzparametern aneinander an. Die Untersuchung der Residuen der Distanz, des Horizontal- und Vertikalwinkels auf entsprechende Systematiken in einer Grafik zeigte offensichtliche Abhängigkeiten der Distanzresiduen von der Distanz und der Vertikalwinkelresiduen vom Vertikalwinkel. Durch Berücksichtigung der Zusatzparameter a_1 bzw. c_{T1} , wurden diese Systematiken weitestgehend beseitigt.

Der Vergleich der für die Scans verwendeten Winkelauflösung von 33 mgon mit den ermittelten Werten für die Genauigkeit der interaktiven Winkel-messung im Intensitätsbild von ca. 15 mgon zeigt, dass die Winkel für signalisierte Punkte im Intensitätsbild im Vergleich zur Winkelauflösung mit höherer Genauigkeit abgegriffen werden können.

Parameter			Wert	Standardabweichung	Signifikanz
Distanz	Additionskorrektur	a_0	4,91 mm	1,75 mm	99 %
	Maßstab	a_1	0,00148	0,00050	99 %
Horizontalwinkel	Zielachsabweichung	b_z	-0,00064 rad	0,00025 rad	99 %
	Exzentrizität Zielachse	b_E	1,69 mm	0,42 mm	99,9 %
	Teilkreisexzentrizität	b_{T2}	-0,00053 rad	0,00018 rad	99 %
	Nicht-orthog. Encoder	b_4	-0,00071 rad	0,00048 rad	80 %
	empir. (evtl. Taumeln)	b_6	0,00034 rad	0,00022 rad	80 %
Vertikalwinkel	Exzentrizität Zielachse	c_E	2,78 mm	0,81 mm	99,9 %
	Teilkreisexzentrizität	c_{T1}	0,00086 rad	0,00006 rad	99,9 %

Tabelle 5.14: In der Bündelblockausgleichung geschätzte Zusatzparameter (Fisheye-Kalibrierraum)

Tabelle 5.14 zeigt alle Zusatzparameter, die in der Bündelblockausgleichung signifikant geschätzt werden konnten. Darin enthalten sind auch Parameter, für die zwar eine geringe Signifikanz ermittelt wurde, welche allerdings keinerlei Einfluss auf die geschätzte Standardabweichung der Beobachtungen oder der Objektkoordinaten haben, wie beispielsweise b_4 und b_6 . Während für b_4 in [Lichti, 2007] eine physikalische Ursache genannt wird (vgl. Kapitel 4.5.3.2), ist b_6 eher als empirischer Parameter zu verstehen, der möglicherweise durch Taumeleinflüsse der Kippachse begründet ist. Für die Schätzung des Parameters b_6 wurden unterschiedliche Perioden für die zugrunde liegende Schwingung getestet, wobei eine 120°-Periode das beste Ergebnis lieferte.

Zusätzlich wurden die Signifikanzniveaus der einzelnen Parameter ermittelt. Demnach sind die Exzentrizitäten der Zielachse und die vertikale Teilkreisexzentrizität hochsignifikant (99,9 %), die Zusatzparameter der Distanzmessung, die Zielachsabweichung und die horizontale Teilkreisexzentrizität signifikant (99,0 %) und die Parameter b_4 und b_6 nur gering signifikant (80 %).

Um Aussagen über die Richtigkeit und Stabilität der ermittelten Werte für die Zusatzparameter treffen zu können, werden die hier vorgestellten Berechnungen mit den im Kalibrierhof gewonnenen Laserscannerdaten wiederholt. Daran anschließend (Kapitel 5.4.4) werden die gewonnen Erkenntnisse anhand von Einzeluntersuchungen verifiziert, beispielsweise der Bestimmung der Additionskorrektur durch das geodätische Verfahren der 'Streckenmessung in allen Kombinationen'.

5.4.3.2 Kalibrierhof

Die gleichen Untersuchungen wie im Fisheye-Kalibrierraum wurden auch mit den im Kalibrierhof gemessenen Daten durchgeführt. Insgesamt wurden dafür die beobachteten sphärischen Koordinaten von 62 Objektpunkten, die von den 3 Laserscanner-Positionen aus gemessen wurden, in die Berechnung eingeführt. Zuerst wurde wieder eine Bündelblockausgleichung ohne Zusatzparameter durchgeführt (Tabelle 5.15). Gleichzeitig wurde auch hier die Varianzkomponentenschätzung angewendet, um von den Startgewichten unabhängige Schätzungen der Standardabweichungen der Beobachtungen, getrennt nach Distanz, Horizontalwinkel und Vertikalwinkel zu erhalten.

Berechnung	Zusatzparameter	$\hat{s}_D$ [mm]	$\hat{s}_\alpha$ [mgon]	$\hat{s}_\beta$ [mgon]	RMS_{xyz} [mm]
0	— —	4,89	5,95	3,17	3,12
1	+ c_{T1} , (c_{T2}) Teilkreisexzentrizität vertikal	4,64	5,63	3,00	3,12
2	+ a_0 / a_1 Additionsanteil oder Maßstab	4,46	5,86	3,09	2,91
3	+ (b_{T1}), b_{T2} Teilkreisexzentrizität horizontal	4,28	5,36	2,94	2,78
4	+ b_3 Nicht-orthog. Encoder	4,27	5,16	2,92	2,81
5	+ c_H Höhenindexabweichung	4,13	5,17	2,85	2,92
6	+ c_4 empir. (evtl. Taumeln)	4,08	4,92	2,81	2,84

Tabelle 5.15: Verringerung der Standardabweichungen der Beobachtungen durch Hinzufügen zusätzlicher Parameter und RMS der Standardabweichungen der geschätzten Objektpunktkoordinaten

Es wurden nacheinander die gleichen Zusatzparameter in die Berechnung der Bündelblockausgleichung eingeführt, wie im vorangegangenen Kapitel. Dadurch konnte die Schätzung der Standardabweichung der Beobachtungen der Distanz und des Horizontalwinkels um 17 % und des Vertikalwinkels um 11 % verringert werden. Die mittlere Standardabweichung (RMS_{xyz}) der geschätzten Objektpunktkoordinaten konnte um 9 % reduziert werden. Damit ist die Wirkung zusätzlicher Parameter im Modellansatz hier deutlich schwächer als bei den Berechnungen mittels der im Fisheye-Kalibrierraum aufgenommen Daten. Lediglich die Standardabweichung der Horizontalwinkelmessung konnte hier durch die Berücksichtigung zusätzlicher Parameter stärker verringert werden.

Im Unterschied zu den vorangegangenen Berechnungen konnten die Achsexzentritäten b_E und c_E nicht mehr signifikant geschätzt werden. Es wird vermutet, dass die Ursache dafür in den unterschiedlichen Entfernungsbereichen zu suchen ist, die für die Berechnungen genutzt wurden: die im Kalibrierhof gemessenen Distanzen variieren im Verhältnis zur jeweiligen Maximaldistanz in geringerem Umfang (20 bis 30 m) als im Fisheye-Kalibrierraum (1 bis 5 m). Die Achsexzentritäten sind hier deshalb stärker mit anderen Parametern, z. B. mit der Höhenindexabweichung c_H korreliert.

Ebenso wie für die Achsexzentritäten konnte kein Wert für die Zielachsabweichung b_Z ermittelt werden. Dies liegt darin begründet, dass die Beträge der für die Berechnung verwendeten Vertikalwinkel im Durchschnitt deutlich geringer sind. Besonders das Fehlen von steilen Visuren nach oben und nach unten muss als Grund genannt werden.

Weiterhin wurde eine geringfügige Steigerung der Beobachtungsgenauigkeiten (Tabelle 5.15) durch das Hinzufügen der Parameter b_3 und c_4 erreicht. Die bereits im vorangegangenen Kapitel festgestellte hohe Korrelation zwischen den Distanz-Zusatzparametern a_0 (Additionsanteil) und a_1 (Maßstab) betrug hier sogar 100 %, weshalb keine gleichzeitige Schätzung beider Parameter möglich war, sondern nur einer der beiden Parameter im geometrischen Modell verwendet werden konnte.

Parameter			Wert	Standardabweichung	Signifikanz
Distanz	Additionskorrektur	a_0	-2,11 mm	0,34 mm	99,9 %
	Maßstab	a_1	0,00011	0,00004	98 %
Horizontalwinkel	Teilkreisexzentrität	b_{T2}	-0,00036 rad	0,00005 rad	99,9 %
	Nicht-orthog. Encoder	b_3	0,00011 rad	0,00003 rad	99,8 %
Vertikalwinkel	Teilkreisexzentrität	c_{T1}	0,00082 rad	0,00029 rad	99 %
	Höhenindexabweichung	c_H	0,00072 rad	0,00017 rad	99,9 %
	empir. (evtl. Taumeln)	c_4	0,00005 rad	0,00001 rad	99,9 %

Tabelle 5.16: In der Bündelblockausgleichung geschätzte Zusatzparameter (Kalibrierhof)

Tabelle 5.16 listet alle in der Ausgleichung nacheinander oder gleichzeitig geschätzten Parameter, sowie deren Standardabweichungen und Signifikanzniveaus auf. Obwohl die Parameter signifikant bzw. teilweise hochsignifikant bestimmt werden konnten, ist die Größenordnung der ermittelten Werte sehr gering.

5.4.3.3 Vergleich der Ergebnisse

Die geschätzten Standardabweichungen der Beobachtungen im Kalibrierhof sind deutlich geringer als die entsprechenden Werte, die mit Hilfe der Messungen aus dem Fisheye-Kalibrierraum bestimmt worden sind. Dies ist damit zu begründen, dass die Bestimmung der Laserscanner-Messwerte (sphärische Koordinaten der Mittelpunkte der Zielmarken) durch die Berechnung eines intensitäts-gewichteten Schwerpunktes sehr vieler Laserscannerpunkte erfolgte. Die Messwerte im Fisheye-Kalibrierraum hingegen wurden nur durch die manuelle Auswahl eines einzelnen Laserscannerpunktes gewonnen. Hinzu kommt, dass die Zielmarken-Scans, die der automatischen Bestimmung des Markenmittelpunktes zugrunde liegen, lokal eine sehr viel höhere Winkelauflösung besitzen als die Punktwolken für die Koordinatenmessung im Fisheye-Kalibrierraum.

Vergleicht man die geschätzten Werte für die Zusatzparameter aus Tabelle 5.16 (Kalibrierhof) mit denen aus Tabelle 5.14 (Fisheye-Kalibrierraum), zeigen sich deutliche Unterschiede bei den Zusatzparametern der Distanz. Es ist davon auszugehen, dass diese Abweichungen nicht auf tatsächliche instrumentelle Veränderungen zurückzuführen sind, sondern dass sie eher in den unterschiedlichen Distanzbereichen begründet liegen oder durch die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Zielmarkenoberfläche (vgl. Kapitel 5.4.4) verursacht werden. Unterschiede in den atmosphärischen Bedingungen (Temperatur, Luftdruck) hingegen und damit verbundene Unterschiede in der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserimpulses sollten sich in diesem Entfernungs- und Genauigkeitsbereich nicht auswirken.

Genau genommen sind die ermittelten Distanz-Zusatzparameter nur für den bei der Bestimmung zugrunde liegenden Entfernungsbereich gültig. Reale Werte für Additionskorrektur und Maßstab können nur dann bestimmt werden, wenn Messwerte über den gesamten Distanzbereich des verwendeten Laserscanners zur Verfügung stehen. Ein räumliches Testfeld, welches Strecken bis 800 m über den gesamten Horizontal- und Vertikalwinkelbereich zur Verfügung stellt, ist praktisch kaum realisierbar.

Die im Fisheye-Kalibrierraum verwendeten Zielmarken sind auf weißes Papier gedruckte schwarze Kreise, die Reflektivität der schwarzen Flächen ist sehr gering. Im Gegensatz dazu bestehen die im Kalibrierhof verwendeten Zielmarken aus retro-reflektierendem Material mit einer extrem hohen Reflektivität. Bei der Laufzeitmessung des Laserimpulses kann es dadurch zu Abweichungen kommen, die Unterschiede im mm-Bereich der Distanzmessung verursachen und damit die Bestimmung der Distanz-Zusatzparameter stark beeinflussen.

Die Zusatzparameter für die horizontale und vertikale Teilkreisexzentrizität b_{T2} und c_{T1} sind im Unterschied zu den Distanz-Zusatzparameter bei beiden Untersuchungen vergleichbar, der Unterschied beider Werte ist nicht signifikant. Deshalb kann hier eine instrumentenspezifische Abweichung vermutet werden. Allerdings kann eine gesicherte Aussage darüber erst durch mehrere unabhängige Vergleichsmessungen abgeleitet werden. An dieser Stelle sei wiederholend darauf hingewiesen, dass der Begriff der Teilkreisexzentrizität bei terrestrischen Laserscannern nicht unbedingt zutreffend ist, da die Richtungsbestimmung des Laserstrahls direkt durch den Schrittmotor erfolgt und nicht durch einen Winkelabgriff an einem Teilkreis. Dennoch kann es zu ähnlich wirkenden Abweichungen kommen (vgl. Kapitel 4.5.3.1).

Alle anderen ermittelten Zusatzparameter können zwischen den Untersuchungen im Fisheye-Kalibrierraum und im Kalibrierhof nicht verglichen werden, weil die berücksichtigten Parameter entweder nur bei der ersten oder nur bei der zweiten Untersuchung signifikant bestimmt werden konnten.

5.4.4 Bewertung der Ergebnisse

Der genaue Aufbau und die tatsächliche Funktionsweise terrestrischer Laserscanner sind dem Nutzer meist nicht bekannt. Darüber hinaus werden die Messwerte bereits im Messgerät korrigiert, die dafür zugrunde liegenden Korrekturmodelle sind ebenso unbekannt. Hinzu kommt, dass die Qualität der Messwerte von zahlreichen mechanischen, optischen und elektronischen Komponenten des Messgerätes, sowie durch weitere Faktoren (Form und Material der Objektoberfläche, Temperatur, Umgebungshelligkeit) beeinflusst wird (vgl. z.B. [Kern, 2003; Reshetyuk, 2006]). Aus den genannten Gründen ist es sehr schwierig, systematische Abweichungen signifikant nachzuweisen und von den ermittelten Abweichungen direkt auf entsprechende Gerätefehler zu schließen.

Um Aussagen zur Genauigkeit terrestrischer Laserscanner treffen zu können, wurden zahlreiche Untersuchungen verschiedener terrestrischer Laserscanner in Forschungsinstitutionen durchgeführt und publiziert. Ergebnisse daraus sollen zur Beurteilung der im vorangegangenen Kapitel ermittelten Werte herangezogen werden. Von besonderem Interesse sind die an der TU Dresden durchgeführten Untersuchungen durch [Teschke, 2004] und [Walter, 2006], da dafür derselbe terrestrischer Laserscanner verwendet wurde wie für die im Kapitel 5.4.3 beschriebenen Analysen.

5.4.4.1 Abweichungen der Distanz

Zur Bestimmung von Distanzfehlern erfolgt meist ein Vergleich der mit einem terrestrischen Laserscanner ermittelten Strecken und bekannten, mit übergeordneter Genauigkeit gemessenen Soll-Strecken. Die Zielpunkte werden oft durch ebene Flächen realisiert, die orthogonal zur Messrichtung aufgestellt wurden. In die Punktwolke wird dann eine ausgleichende Ebene eingepasst, damit die Bestimmung der Distanzen auf einer möglichst hohen Redundanz beruht und so zufällige Messfehler (Streuung der Punktwolke) das Ergebnis so wenig wie möglich beeinflussen.

Das in der Geodäsie bekannte Verfahren der „Streckenmessung in allen Kombinationen“ zur Bestimmung von Additionsanteil der Nullpunktkorrektur und Maßstab ist bei Verwendung eines terrestrischen Laserscanners mit einem verhältnismäßig hohen Aufwand verbunden und scheitert oft daran, dass keine Möglichkeit

der Zwangszentrierung existiert oder nur schwer zu realisieren ist. Um dies zu umgehen, werden in [Böhler & Marbs, 2004] nur Streckendifferenzen zwischen zwei Zielen in Messrichtung verwendet, wodurch allerdings kein Additionsanteil bestimmt werden kann. Die Abweichungen zwischen bekannten und gemessenen Strecken liegen hier im Bereich mehrerer Millimeter bei Distanzen bis zu 50 m, für einen Laserscanner Riegl LMS-Z420i wurden Abweichungen von durchschnittlich 2,7 mm bestimmt.

Durch [Walter, 2006] wurde mit demselben Laserscanner Riegl LMS-Z420i, der auch für die vorangegangenen Untersuchungen verwendet wurde, ein Soll-Ist-Vergleich mehrerer Distanzmessungen durchgeführt. Dazu wurde eine Vorrichtung gebaut, die annähernd eine Zwangszentrierung bezogen auf die Rotationsachse des Laserscanners erlaubt und somit einen absoluten Vergleich mit den mit einem Tachymeter gemessenen Referenzstrecken zulässt. Die Genauigkeit des für die Bestimmung der Vergleichsstrecken verwendeten Tachymeters wird vom Hersteller mit $1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ angegeben. Es wurden in sieben verschiedenen Entfernungen von 5 bis 50 m Zieltafeln in Form einer weißen, ebenen Fläche in einem geodätischen Dreifuß montiert. Dabei wurde auf jedem der sieben Zielpunkte die Zieltafel in 20° -Schritten rotiert, um zusätzlich die Abhängigkeit vom Auftreffwinkel zu untersuchen. Durch eine vermittelnde Ausgleichung konnten dadurch die Parameter Additionskorrektur a_0 , Maßstab a_1 und der Parameter a_{10} zur Modellierung der Abhängigkeit vom Auftreffwinkel (vgl. Kapitel 4.5.2.3) bestimmt werden (Tabelle 5.17):

Parameter			Wert	Standardabweichung
Distanz	Additionskorrektur	a_0	-2,63 mm	1,70 mm
	Maßstab	a_1	0,00018	0,00007
	Auftreffwinkel-Abhängigkeit	a_{10}	-0,00031	0,00013

Tabelle 5.17: Unabhängig bestimmte Distanz-Zusatzparameter [Walter, 2006]

Diese hier ermittelten Werte für a_0 und a_1 zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den entsprechenden Werten aus Tabelle 5.16. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass die zugehörigen Standardabweichungen in Tabelle 5.17 wegen der deutlich geringeren Redundanz größer sind und dass die beiden Parameter in der Tabelle 5.16 zugrunde liegenden Berechnung nicht gleichzeitig geschätzt wurden, was die Aussagekraft dieses Vergleichs erheblich einschränkt. Gegen eine eindeutige Interpretation der ermittelten Distanz-Zusatzparameter sprechen auch die Abweichungen zu den Werten aus Tabelle 5.14, also die Ergebnisse, die im Fisheye-Kalibrierungsraum im Entfernungsbereich bis 4 m gewonnen wurden.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass die Bestimmung von Kalibrierwerten, die unter verschiedenen Messbedingungen und über einen langen Zeitraum gültig sind, nicht möglich ist. Vielmehr erscheint es sinnvoll, für die jeweils vorliegenden Messbedingungen (Entfernungsbereich, Oberflächenbeschaffenheit, etc.) individuelle Werte zu bestimmen, sofern die Messbedingungen weitestgehend homogen sind. Dies spricht dafür, die Kalibrierung nach Möglichkeit direkt am eigentlichen Messobjekt vorzunehmen, wie es auch in der photogrammetrischen Praxis bei der Kalibrierung von Kameras üblich ist (auch 'On-the-job-Kalibrierung' oder *Simultankalibrierung*). Die Auswirkung der Einflüsse der Objektoberfläche und der Zielgeometrie auf die Distanzmessung soll im Folgenden kurz vorgestellt werden.

- Objektoberfläche

Die Oberfläche, auf der der Laserstrahl reflektiert wird, beeinflusst in hohem Maße die Distanzmessung. Unterschiedliche Eigenschaften der Objektoberfläche können die ermittelten Distanzwerte sowohl systematisch verfälschen als auch sich auf die zufälligen Messwertschwankungen auswirken. Das wichtigste Kriterium ist dabei die Reflektivität der Oberfläche, die unterschiedliche Intensitäten des zurückkehrenden Laserimpulses verursacht. Die Reflektivität wiederum wird von Faktoren wie der Farbe, dem Material und der Rauigkeit der Oberfläche bestimmt.

In [Teschke, 2004] werden mehrere ebene Materialproben in gleichem Abstand vom Laserscanner positioniert und die Charakteristik der entsprechenden mit dem Riegl-Laserscanner aufgenommenen Punktwolken analysiert. Untersucht wurden Pappe, Holz, Kunststoff und verschiedene Stein- und Betonoberflächen. In jede der Punktwolken wurde eine Ebene eingepasst und der Abstand der Ebene von einer einheitlichen Bezugsebene berechnet. Dabei traten Schwankungen der Distanz zwischen den unterschiedlichen Material-Oberflächen bis zu 2 mm bei einer Messdistanz von 5 m und bis zu 4 mm bei einer Messdistanz von 30 m auf.

Aus diesen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass die ermittelten Distanz-Zusatzparameter, wie vermutet, von der reflektierenden Oberfläche abhängig sind. Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang bei der Verwendung von retro-reflektierenden Zielmarken. Hier sind Distanzunterschiede bereits durch bloßes Betrachten der Punktwolke von mehreren Millimetern erkennbar. [Schulz & Ingensand, 2004] beschreibt die Analyse der Messungen auf unterschiedlichen Oberflächenmaterialien mit einem terrestrischen Laserscanners Imager 5003 (Zoller + Fröhlich), der im Unterschied zum Riegl LMS-Z420i Distanzen mittels Phasenvergleichsverfahren misst. Dabei wird festgestellt, dass der Laserstrahl bei einigen Materialien wie Styropor oder Holz in die Oberfläche eindringen und die Streckenmessung dadurch bis zu 20 mm verfälschen kann.

- Zielgeometrie

Auch die Geometrie des Zieles kann die Distanzmessung wesentlich beeinflussen. Dies betrifft hauptsächlich die Ausrichtung der Reflexionsfläche gegenüber der Aufnahmerichtung. In Kapitel 4.5.2.3 wurde bereits ein Zusatzparameter zur Distanzmessung vorgeschlagen, der diese Eigenschaft berücksichtigt. Weiterhin führt die Reflexion des Laserstrahls an Kanten oder an in Aufnahmerichtung hintereinander liegenden Zielen zu Verfälschungen der Distanzmessung [Kern, 2003]. Die dadurch auftretenden Abweichungen sind umso stärker bzw. häufiger, je größer die Strahldivergenz und die Aufnahmeentfernung, also der Durchmesser des Laserstrahls am reflektierenden Objekt, ist.

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Distanzmessung von der Ausrichtung der Reflexionsfläche wurde durch [Teschke, 2004] mit dem Laserscanner Riegl LMS-Z420i eine ebene Fläche in unterschiedlichen Entfernungen bis 30 m aufgenommen und diese systematisch um definierte Winkelbeträge gegenüber der Aufnahmerichtung gedreht. Dabei wurde festgestellt, dass sich das Messrauschen von 7 - 11 mm (Standardabweichung der ausgeglichenen Ebene) bei orthogonaler Ausrichtung der Oberfläche zur Aufnahmerichtung auf 6 - 8 mm bei einer Ausrichtung von 45° reduziert.

Ähnliche Ergebnisse wurden auch durch die in [Kersten et. al., 2004] beschriebenen Untersuchungen mit einem Laserscanners Mensi GS100 erzielt: die Datensätze der Aufnahme einer bezüglich der Aufnahmerichtung verschwenkten Oberfläche werden als homogener und genauer charakterisiert. Als mögliche Ursache wird angegeben, dass bei kurzen Entfernungen die durch die Winkelmessung bestimmte laterale Genauigkeit höher ist als die Distanzmessgenauigkeit. Bei größeren Entfernungen müsste sich der Effekt dann umkehren, weil die Auswirkung einer ungenauen Winkelmessung linear mit der Distanz zunimmt, hingegen die Distanzmessgenauigkeit nur geringfügig größer wird. Jedoch liegen keine vergleichbaren Untersuchungen für größere Entfernungen vor.

[Runne, 1993] beweist experimentell, dass insbesondere bei Messgeräten, die Distanzen mittels Impulslaufzeitverfahren messen, nicht zu vernachlässigende Distanzabweichungen in Abhängigkeit von der Zielgeometrie auftreten können. [Kern, 2003] begründet diese Tatsache mit einer Veränderung der Intensitätsverteilung der Laserwellenfront zugunsten der kürzeren Reflexionsteilfläche. Damit wird eine verkürzte Laufzeit und somit auch eine zu kurze Distanz registriert. Die Auswirkung dieses Effektes ist abhängig vom Auftreffwinkel und der Strahldivergenz.

Auch die in [Walter, 2006] durchgeführte Untersuchung (Tabelle 5.17) bestätigt das Vorhandensein systematischer Abweichungen der Distanzmessung durch eine schräge Reflexionsfläche und zeigt gleichzeitig, dass es möglich ist, die Größe des Effektes durch eine vermittelnde Ausgleichung zu bestimmen. Der mit dem Laserscanner Riegl-LMS Z420i ermittelte Wert für a_{10} bedeutet eine Abweichung von 2 mm bei einer Entfernung von 10 m. Der Effekt wächst proportional zur Distanz. Der Auftreffwinkel auf die Objektoberfläche kann nach der in Kapitel 4.5.2.3 vorgeschlagenen Gleichung im geometrischen Modell berücksich-

tigt werden, wenn es gelingt, zuverlässige Werte für den Auftreffwinkel aus der Punktwolke für jeden Messpunkt abzuleiten. Dies kann beispielsweise durch die Analyse der benachbarten Punkte der Punktwolke erfolgen.

5.4.4.2 Abweichungen der Horizontal- und Vertikalwinkel

Auch die aus den Messungen im Fisheye-Kalibrierraum und im Kalibrierhof ermittelten Ergebnisse für die Zusatzparameter der Horizontal- und Vertikalwinkelmessung unter Nutzung des in Kapitel 4.5 vorgestellten geometrischen Modells sollen durch Vergleich mit anderen Untersuchungen bewertet werden.

- Achsabweichungen und Höhenindex

[Lichti, 2007] bestimmt in den Untersuchungen eines terrestrischen Laserscanners Faro 880, die in ähnlicher Weise durchgeführt wurden wie das in Kapitel 5.4.3 beschriebene Verfahren, sowohl Kippachsabweichung (b_K), Zielachsabweichung (b_Z) sowie Höhenindexabweichung (c_H) signifikant. Es wird festgestellt, dass besonders die Berücksichtigung der Zusatzparameter für Zielachs- und Höhenindexabweichung zu einer Steigerung der ermittelten Gesamtgenauigkeit beiträgt. Dies kann durch die Untersuchungen des Riegl-Laserscanners in den vorangegangenen Kapiteln nicht bestätigt werden, jedoch haben die für den Faro- und den Riegl-Scanner ermittelten Werte dieser Parameter ähnliche Größenordnungen. Eine Kippachsabweichung konnte für den Riegl-Scanner im Unterschied zum Faro-Scanner nicht signifikant nachgewiesen werden. Es wird anhand mehrerer innerhalb von einem Jahr durchgeführter Tests gezeigt, dass die Kippachsabweichung des Faro-Scanners sehr großen zeitlichen Schwankungen unterliegt.

Mit dem in [Rietdorf, 2005] beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Achsabweichungen und der Höhenindexabweichung (vgl. Kapitel 4.5.4.1), werden für einen terrestrischen Laserscanner Imager 5003 (Zoller + Fröhlich) keine dieser Abweichungen tatsächlich nachgewiesen. [Neitzel, 2006] bestimmt Zielachs- und Kippachsabweichung für einen Laserscanner des gleichen Typs signifikant durch Messungen in zwei Fernrohrlagen (vgl. Kapitel 4.5.4.2).

- Exzentrizitäten

Die Exzentrizität der Zielachse gegenüber der Stehachse (b_E) und gegenüber der Kippachse (c_E) konnte für den Riegl-LMS Z420i nur bei den Auswertungen der Daten des Fisheye-Kalibrierraumes signifikant bestimmt werden. Die Werte für diese Parameter liegen im Bereich bis zu 2,8 mm, was durchaus als realistisch eingeschätzt werden kann, vor allem wenn der Laserstrahl durch ein rotierendes Polygonrad ausgeleitet wird. Bei den Untersuchungen im Kalibrierhof konnte keiner der beiden Parameter nachgewiesen werden, was durch die Verwendung unterschiedlicher Distanzbereiche begründet ist (vgl. Kapitel 5.4.3.2). Während in [Lichti, 2007] diese Parameter nicht im geometrischen Modell berücksichtigt werden, ermittelt [Rietdorf, 2005] beide Parameter signifikant für den Laserscanner Imager 5003 in vergleichbarer Größenordnung von 0,5 mm (b_E) und 1,5 mm (c_E). Auch durch [Neitzel, 2006] konnte für einen Laserscanner Imager 5003 eine Zielachsexzentrizität durch Messung in zwei Fernrohrlagen bestimmt werden.

Die Effekte, die durch die horizontale und vertikale Teilkreisexzentrizität hervorgerufen werden, wurden durch eine Schwingung mit 360°-Periode in allgemeiner Form einer Fourierreihe mit einem Sinus- und einem Kosinus-Term modelliert. Dabei konnte jeweils einer der beiden Terme signifikant und mit in beiden Testumgebungen ähnlichen Werten bestimmt werden. In [Lichti, 2007] wird erläutert, dass eine horizontale Teilkreisexzentrizität für den untersuchten Laserscanner Faro 880 nicht nachgewiesen werden konnte, jedoch für die vertikale Teilkreisexzentrizität der Sinus-Term erfolgreich und mit einer signifikanten Wirkung auf die Gesamtgenauigkeit der Kalibrierung bestimmt wurde. Der Kosinus-Term der vertikalen Teilkreisexzentrizität wurde aufgrund starker Korrelationen mit den Elementen der äußeren Orientierung weggelassen. Weiterhin wird festgestellt, dass gerade dieser Parameter sehr großen zeitlichen Variationen unterliegt, was sich besonders stark nach einer Wartung des Laserscanners beim Hersteller äußerte, nach welcher der Wert dieses Parameters sogar sein Vorzeichen änderte.

- Taumelverhalten

Entsprechend dem von [Lichti, 2007] vorgeschlagenen Korrekturmodell wurden zwei Parameter b_6 und b_7 zur Kompensation von Restfehlern des Horizontalwinkels als Funktion des Vertikalwinkels berücksichtigt, für die als mögliche Ursache das Taumelverhalten der Kippachse genannt wird und für die durch die beschriebene Untersuchung des Laserscanners Faro 880 signifikante Werte bestimmt werden konnten. Bei den mit dem Riegl-LMS Z420i durchgeführten Tests wurde lediglich für b_6 im Fisheye-Kalibrierraum ein Wert ermittelt, dessen Signifikanz jedoch sehr gering ist und der auch keinerlei Auswirkung auf die Genauigkeit der Ausgleichung zeigt. Auch andere Perioden für die dem Parameter zugrunde liegende Schwingung führen zu keinen eindeutigeren Ergebnissen.

Des Weiteren verwendet auch [Lichti, 2007] die zwei Parameter c_3 und c_4 zur Kompensation von Restfehlern des Vertikalwinkels als Funktion des Horizontalwinkels. Sie beschreiben eine sinusförmige Schwingung mit einer 120°-Periode, die aus der Analyse der Vertikalwinkel-Residuen nach Auswertung der Daten des Faro-Scanners erkannt wurde. Die gleiche Schwingung konnte für die Daten des Riegl-Scanners mit ähnlicher Amplitude im Kalibrierhof bestimmt werden. Nach [Deumlich & Staiger, 2002] sind Perioden des Taumelfehlers von 120° auf unzureichende Kugellager zurückzuführen.

Zur Untersuchung des Taumelverhaltens des selben Laserscanners verwendet [Teschke, 2004] einen optoelektronischen Neigungsmesser (Leica NIVEL20) mit einer Genauigkeit von 0,005 mrad. Während einer 360°-Aufnahme mit dem Laserscanner registrierte der auf dem Scanner montierte Neigungsmesser mit einer Frequenz von 4 Hz 1400 Neigungswerte. Aufgrund der vorhandenen Restneigung der Stehachse zeigen die Neigungswerte einen periodischen Verlauf mit einer Periode von 360°. Deshalb wurde eine ausgleichende Sinusfunktion zur Korrektur der Stehachsneigung berechnet. Die verbleibenden Residuen zeigen das Taumelverhalten des Riegl-Laserscanners. In den Residuen wurde visuell eine Sinus-Schwingung mit einer Periode von ca. 140°, einer Amplitude von 0,04 mrad und einer Phasenlage von 90° festgestellt. Vergleicht man diese Ergebnisse mit dem im Kalibrierhof ermittelten Wert für den Parameter c_4 von 0,05 mrad, zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Diesem Parameter liegt eine Kosinus-Schwingung mit einer Periode von 120° und einer Phasenlage von 0° zugrunde. Weil Sinus- und Kosinusfunktion eine um 90° verschobene Phasenlage aufweisen, decken sich die mit dem Neigungssensor und die durch Bündelblockausgleichung ermittelte Schwingung sehr gut. Es kann deshalb vermutet werden, dass es sich um das tatsächliche Taumelverhalten des untersuchten Laserscanners handelt. Das Taumelverhalten konnte zwar signifikant nachgewiesen werden, die Amplitude der Abweichung ist allerdings sehr gering. Dies ist vermutlich auch der Grund dafür, dass der Parameter c_4 aus den etwas ungenaueren Messungen des Fisheye-Kalibrierraumes nicht ermittelt werden konnte.

5.5 Fazit

Das geometrische Modell für Panoramakameras wurde anhand der EYESCAN M3D metric in zwei verschiedenen 360°-Kalibrierräumen sowohl durch räumlichen Rückwärtsschnitt als auch durch eine Panorama-Bündelblockausgleichung analysiert. Durch das schrittweise Hinzufügen zusätzlicher Parameter zum Grundmodell konnte die Genauigkeit im Bildraum auf 0,24 bzw. 0,22 Pixel reduziert werden, dies entspricht einer Relativgenauigkeit von 1: 40000. Dabei wurde festgestellt, dass die Berücksichtigung der Parameter der Neigung und Kantung des Zeilensensors, die radial-symmetrische Verzeichnung des Objektivs, sowie die Affinität der Bildkoordinatenachsen besonders wichtig sind.

Für Kameras mit Fisheye-Objektiv wurden unterschiedliche geometrische Modelle mit den in einem speziellen Kalibrierraum aufgenommenen Bildern analysiert. Es hat sich herausgestellt, dass das raumwinkelgleiche Modell das verwendete Nikkor-Fisheye-Objektiv am besten beschreibt. Allerdings können die Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung die Abweichungen zum äquidistanten und stereografischen Modell vollständig kompensieren. Diese drei Modelle können also als gleichwertig angesehen werden, solange die Verzeichnungsparameter berücksichtigt werden. Die aus der Berechnung eines räumlichen Rückwärtsschnittes und einer Bündelblockausgleichung resultierenden Genauigkeiten (0,1 Pixel) sind nur dann identisch,

wenn eine bild-variante Parametrisierung verwendet wird, weil die Zusatzparameter für die verwendete Objektiv-Kamera-Kombination nicht stabil sind.

Aus den eigenen und in der Literatur beschriebenen Untersuchungen verschiedener terrestrischer Laserscanner kann geschlossen werden, dass es grundsätzlich schwierig ist, zuverlässige und miteinander vergleichbare Kalibrierwerte für Zusatzparameter zu bestimmen. Die Signifikanz ermittelter Parameter befindet sich oft an der Nachweisgrenze, oder sie können überhaupt nicht signifikant nachgewiesen werden. Die bei geodätischen Tachymetern übliche Vorgehensweise, Modellabweichungen in regelmäßigen Abständen zu bestimmen und bei verschiedenen Messbedingungen an die Messwerte anzubringen, scheint bei terrestrischen Laserscannern momentan nicht sinnvoll. Vielmehr ist bei jedem Laserscannerprojekt individuell zu entscheiden, ob es sinnvoll oder möglich ist, Kalibrierparameter vorab oder simultan zu bestimmen und bei der eigentlichen Auswertung zu berücksichtigen. Das liegt zum einen daran, dass bereits Vorkorrekturen im Laserscanner an die ausgegebenen Messwerte angebracht werden, und zum anderen reicht oft die Genauigkeit der für die Kalibrierung verwendeten Messgrößen nicht aus, um die Parameter signifikant zu bestimmen.

Die Gesamtgenauigkeit der Auswertung konnte durch Berücksichtigung zusätzlicher Parameter im geometrischen Modell für terrestrische Laserscanner dennoch um bis zu 30 % gesteigert werden. Um gesicherte Aussagen zum Verhalten und der Effektivität der Kalibrierparameter treffen zu können, müssen zahlreiche Mehrfachmessungen unter gleichen und verschiedenen Messbedingungen durchgeführt werden. Wünschenswert wäre darüber hinaus, dass die Hersteller terrestrischer Laserscanner ihre Kalibriermodelle dem Nutzer offenlegen und dadurch eine Standardisierung der Kalibrierung möglich ist. Anwender von Laserscannern benötigen eine verlässliche Möglichkeit, die Ergebnisse ihrer Messungen hinsichtlich der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Stabilität bewerten zu können.

6 Integrierte Bündelblockausgleichung

Nachdem in Kapitel 4 die geometrischen Modelle verschiedener Aufnahmegeräte vorgestellt und in Kapitel 5 deren Verifikation durch photogrammetrische Auswertemethoden und Anwendungen beschrieben wurde, sollen die Modelle nun in geeigneter Weise zu einem gemeinsamen funktionalen Modell kombiniert und in einer gemeinsamen Berechnungsroutine verwendet werden. Als Grundlage dient dazu das Verfahren der Bündelblockausgleichung (Kapitel 2.2.3). Dieses photogrammetrische Standardverfahren stellt eine spezielle Anwendung der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Ausgleichsrechnung dar.

Die Erweiterung der Bündelblockausgleichung für die gemeinsame Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten unterschiedlicher Geometrie wird in diesem Kapitel dargestellt. Dabei wird besonders auf mathematische und strukturelle Aspekte eingegangen, die Software-Implementation wird im Anhang beschrieben.

Das stochastische Modell für die integrierte Bündelblockausgleichung wird gesondert in Kapitel 7 erläutert. Die Verifikation der integrierten Bündelblockausgleichung anhand zahlreicher Beispieldaten erfolgt in Kapitel 8.

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.1.2 ist zuerst der funktionale Zusammenhang zwischen den Beobachtungen und den Unbekannten herzuleiten. Dieser Zusammenhang bildet die Grundlage der Ausgleichsrechnung. Die Berechnung entspricht grundsätzlich der Methode der vermittelnden Ausgleichung, wobei für bestimmte Berechnungsvarianten zusätzliche Bedingungsgleichungen eingeführt werden.

6.1 Beobachtungen

Aufgabe der integrierten Bündelblockausgleichung ist die gemeinsame Ausgleichung verschiedener Beobachtungstypen. Diese sind zum einen zweidimensionale Bildkoordinaten (x' , y') mit unterschiedlicher zugrunde liegender Kamerageometrie und zum anderen dreidimensionale Kugelkoordinaten (D , α , β) diskreter Objektpunkte, gemessen mit einem terrestrischen Laserscanner oder einem anderen Messgerät mit tachymetrischem Messprinzip. Die in Bildern gemessenen Koordinaten werden je nach zugrunde liegendem geometrischen Modell nochmals untergliedert und zur besseren Unterscheidung mit einem Index versehen (Abbildung 6.1). Umgekehrt erfordert jede der in Abbildung 6.1 aufgelisteten Beobachtungen ein anderes geometrisches Modell zum Aufstellen der jeweiligen Beobachtungsgleichung.

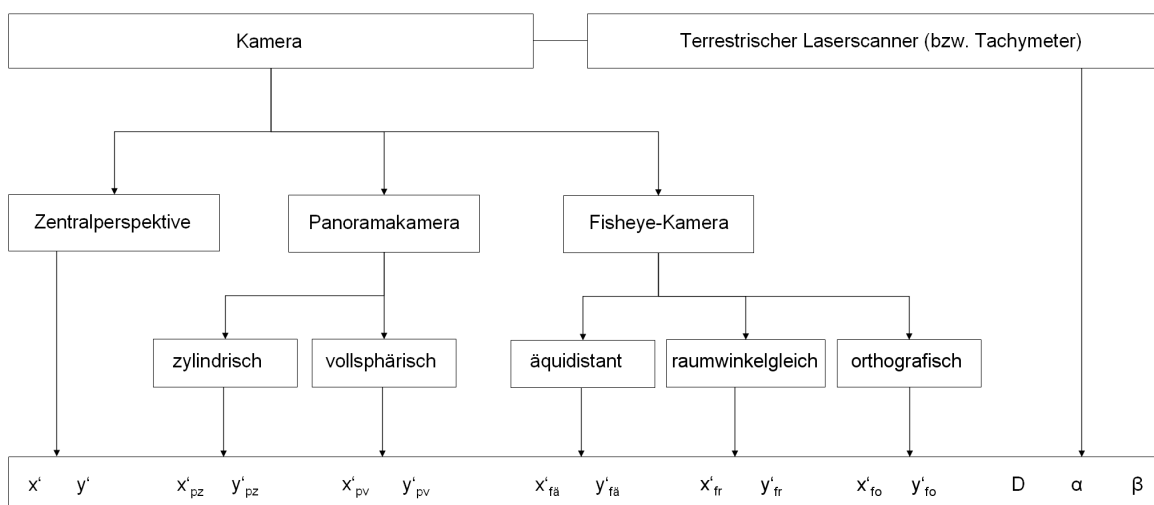


Abbildung 6.1: Beobachtungen in der integrierten Bündelblockausgleichung

Berücksichtigung in der zur Berechnung der Bündelblockausgleichung entwickelten Software finden die geometrischen Modelle für zentralperspektive Kameras (Kapitel 4.1), zylindrisch (Kapitel 4.2) oder vollsphärisch (Kapitel 4.4) abbildende Panoramakameras, Kameras mit äquidistantem, raumwinkelgleichem oder orthografischem Fisheye-Objektiv (Kapitel 4.3) und das geometrische Laserscannermodell (Kapitel 4.5).

Zu Testzwecken ist darüber hinaus das geometrische Modell der stereografischen Fisheye-Abbildung implementiert, wird hier jedoch nicht mehr mit aufgeführt, da es keine realen Objektive mit dieser Abbildungsgeometrie gibt. Für die Beobachtungen einer vollsphärischen Panoramakamera wird ebenfalls nach der Geometrie des mit der Panoramakamera kombinierten Fisheye-Objektives unterschieden.

Die sphärischen Beobachtungen Distanz, Horizontal- und Vertikalwinkel können anstelle mit einem terrestrischen Laserscanner auch mit einem Tachymeter gemessen werden, wobei hier bewusst nicht wie sonst in der Literatur üblich von 'zusätzlichen geodätischen Beobachtungen' (z.B. [Wester-Ebbinghaus, 1985]) gesprochen wird, weil diese hier in gleicher Weise wie die Bildkoordinaten am Ausgleichungsprozess beteiligt werden.

Die Programmierung ist derartig gestaltet, dass eine Berücksichtigung anderer Beobachtungstypen durch Hinzufügen weiterer geometrischer Modelle auf einfache Weise möglich ist. Die Einheiten der Beobachtungen sind Millimeter für alle Bildkoordinaten, Meter für die Distanzbeobachtungen und Gon für die Winkelbeobachtungen.

Durch die Anzahl der insgesamt an der Berechnung beteiligten Beobachtungen ist die Anzahl der Zeilen der Koeffizientenmatrix festgelegt. Durch jede Zeile der Koeffizientenmatrix wird genau eine Beobachtung dargestellt (vgl. Kapitel 6.4).

6.2 Unbekannte Parameter

Im Folgenden werden Bilder und Laserscans verallgemeinernd als Aufnahmen bzw. Kamera und Laserscanner als Aufnahmegeräte bezeichnet. Die in der Ausgleichung zu schätzenden Unbekannten beziehen sich dann entweder auf das jeweilige Aufnahmegerät (aufnahme-invariante Parameter der inneren Orientierung und Zusatzparameter) oder auf die jeweils zugehörigen Aufnahmen (äußere Orientierung). Gegebenenfalls lassen sich einzelne Parameter der inneren Orientierung oder Zusatzparameter auch einer Aufnahme zuordnen, es wird dann von aufnahme-varianten Parametern gesprochen. Weiterhin können die dreidimensionalen Koordinaten von Objektpunkten als unbekannte Parameter behandelt werden können.

Mögliche unbekannte Parameter in der integrierten Bündelblockausgleichung sind zusammengefasst:

- Aufnahmegerät (Kamera, Panoramakamera, Laserscanner):
Innere Orientierung und Zusatzparameter
- Aufnahme (Bild, Panorama, Laserscan):
Äußere Orientierung, ggf. aufnahme-variante innere Orientierung und Zusatzparameter
- Objektpunkt: Dreidimensionale Koordinaten

Grundsätzlich wird durch die Anzahl der unbekannten Parameter die Anzahl der Spalten der Koeffizientenmatrix festgelegt. Da der funktionale Zusammenhang zwischen den Beobachtungen und den Unbekannten meist nicht-linearer Natur ist, müssen zur Linearisierung der Verbesserungsgleichungen Näherungswerte zur Verfügung gestellt werden. In der Software-Realisierung kann jeder Parameter, der als Unbekannte geschätzt werden kann, alternativ auch als fester Parameter in der Ausgleichungsberechnung berücksichtigt werden. Der als Näherung vorgesehene Wert wird dann als Konstante verwendet.

Die unbekannten oder festen Parameter lassen sich hierarchisch strukturieren: Es können mehrere geometrische Modelle in der Ausgleichung verwendet werden. Jedem geometrischen Modell ist eine bestimmte Anzahl unterschiedlicher Aufnahmegeräte zugeordnet und für jedes dieser Aufnahmegeräte kann eine beliebige Anzahl von Aufnahmen vorliegen. Es ist sinnvoll, diese Struktur durch entsprechende Indizes zu verdeutlichen, auf die in den folgenden Kapiteln zurückgegriffen wird:

- Objektpunkt i
- Geometrisches Modell bzw. Aufnahmegerät-Typ m
- Aufnahmegerät g
- Aufnahme j

Beispielsweise tragen die Parameter der äußeren Orientierung der j -ten Aufnahme des g -ten Aufnahmegerätes, dem das geometrische Modell m zugrunde liegt, den Index m, g, j . Im den folgenden Kapiteln sollen die einzelnen Parameter der Übersicht halber aufgelistet werden.

6.2.1 Innere Orientierung und Zusatzparameter

Die innere Orientierung ist der Zusammenhang zwischen dem Gerätekoordinatensystem und dem System, in dem die Beobachtungen definiert sind (Kapitel 2.2.1.3). Zusatzparameter werden verwendet, wenn das geometrische Modell die physikalische Realität nicht hinreichend genau beschreibt (Kapitel 2.2.1.4). Weil die Parameter der inneren Orientierung und Zusatzparameter sich hinsichtlich ihrer Verwendung in der Bündelblockausgleichung nicht unterscheiden, werden sie im Folgenden zusammengefasst.

In Tabelle 6.1 sind die wichtigsten in der integrierten Bündelblockausgleichung berücksichtigten Parameter der Aufnahmegeräte zusammengestellt, die entweder geschätzt werden oder mit einem konstanten Wert in die Berechnung eingehen können. Weitere Parameter, wie beispielsweise Parameter zur Kompensation des Taumelverhaltens von Panoramakamera und Laserscanner oder zyklische Phasenfehler der Distanzmessung bei Laserscannern können ebenfalls in der Ausgleichung geschätzt werden.

Aufnahmegerät	Parameter	
Zentralperspektive Kamera und Fisheye-Kamera	c	Kamerakonstante
	x_0', y_0'	Bildhauptpunktkoordinaten
	A_1, A_2, A_3	Radial-symmetrische Verzeichnung
	B_1, B_2	Rad.-asym. und tangentielle Verzeichnung
	C_1, C_2	Affinität und Scherung
Panoramakamera (zylindrisch und vollsphärisch)	r'	Zylinder- bzw. Kugelradius
	e	Exzentrizität Projektionszentrum
	y_0'	Bildhauptpunktkoordinate
	K, N	Neigung und Kantung der Sensorzeile
	A_1, A_2, A_3	Radial-symmetrische Verzeichnung
	C_1 bzw. A_h	Affinität des Bildkoordinatensystems
Terrestrischer Laserscanner (bzw. Tachymeter)	a_0	Additionskorrektur der Distanz
	a_1	Maßstabskorrektur der Distanz
	b_z, b_K	Zielachs- und Kippachsabweichung
	c_H	Höhenindexabweichung
	b_E, c_E	Zielachsexzentrizität horizontal und vertikal
	b_{T1}, b_{T2}	Teilkreisexzentrizität horizontal
	c_{T1}, c_{T2}	Teilkreisexzentrizität vertikal

Tabelle 6.1: Parameter der inneren Orientierung und Zusatzparameter für die integrierte Bündelblockausgleichung

Alle inneren Orientierungs- und Zusatzparameter lassen sich wahlweise dem Aufnahmegerät (aufnahme-invariant) oder der Aufnahme (aufnahme-variant) zuordnen. Letzteres ist sinnvoll, wenn der entsprechende Parameter nicht stabil ist und sich von Aufnahme zu Aufnahme unterscheiden kann.

6.2.2 Äußere Orientierung

Jeder Aufnahme müssen Parameter der äußeren Orientierung zugeordnet werden (Kapitel 2.2.1.2). Das ist die dreidimensionale Position (Translation) und die Ausrichtung (Rotation) des Gerätekoordinatensystems zum Zeitpunkt der Aufnahme im übergeordneten Objektkoordinatensystem. Die Position wird durch die Koordinaten X_0, Y_0, Z_0 (Ursprung des Gerätekoordinatensystems) und die Ausrichtung durch die drei Winkel ω, φ, κ beschrieben. Alternativ kann die Rotation auch durch die Quaternionen a, b, c, d beschrieben werden (Kapitel 2.1.1.3). Werden die vier Quaternionen als Unbekannte in der Ausgleichung geschätzt, liegt eine Überparametrisierung vor, die durch Einführung einer zusätzlichen Bedingungsgleichung (entsprechend Gleichung 2.6) für jede Aufnahme beseitigt werden kann.

6.2.3 Objektpunktkoordinaten

Grundsätzlich können die dreidimensionalen Koordinaten von Objektpunkten als Unbekannte geschätzt werden, wenn sie in mindestens zwei Aufnahmen, von zwei unterschiedlichen Positionen aus beobachtet wurden. Allerdings sind zwei Aufnahmen nicht ausreichend, wenn keine Passpunkte vorliegen und gleichzeitig die innere Orientierung und Zusatzparameter bestimmt werden sollen. Werden Beobachtungen eines Laserscanners oder Tachymeters mit ausgeglichen, reduziert sich die Anzahl der notwendigen Aufnahmen, weil jeder Punkt drei Beobachtungen liefert, während ein in einem Bild oder Panoramabild gemessener Punkt nur zwei Beobachtungen liefert.

Für jede Objektpunktcoordinate kann festgelegt werden, ob sie als Unbekannte geschätzt wird, oder als fester Wert in die Ausgleichung eingeht. Es handelt sich entsprechend um einen Neupunkt oder einen Passpunkt. Alternativ können auch nur einzelne Koordinaten eines Objektpunktes geschätzt werden.

6.2.4 Anzahl der unbekannten Parameter

Die Anzahl der in der Ausgleichung zu schätzenden unbekannten Parameter kann nach der folgenden Gleichung (6.1) ermittelt werden:

$$u = \sum_{m=1}^{n_M} \left[\sum_{g=1}^{n_G^m} \left(u_{inv}^{m,g} + \sum_{j=1}^{n_A^{m,g}} (6 + u_{var}^{m,g,j}) \right) \right] + \sum_{i=1}^{n_P} u^i \quad (6.1)$$

Mit:

u	= maximale Anzahl der Unbekannten
n_M	= Anzahl der verwendeten unterschiedlichen Arten geometrischer Modelle
m	= fortlaufende Nummer des geometrischen Modells
n_G^m	= Anzahl der verwendeten Aufnahmegeräte mit geometrischem Modell m
g	= fortlaufende Nummer des Aufnahmegerätes
$n_A^{m,g}$	= Anzahl der verwendeten Aufnahmen vom Aufnahmegerät g
j	= fortlaufende Nummer der Aufnahme
n_P	= Anzahl der zu schätzenden Neupunkte
i	= fortlaufende Nummer des Neupunktes
$u_{inv}^{m,g}$	= Anzahl der aufnahme-invarianten Zusatzparameter und Parameter der inneren Orientierung für das Aufnahmegerät g
$u_{var}^{m,g,j}$	= Anzahl der aufnahme-varianten Zusatzparameter und Parameter der inneren Orientierung für die Aufnahme j
u^i	= Anzahl der unbekannten Koordinaten für den Punkt i (maximal 3)

Gleichung (6.1) geht davon aus, dass für jede Aufnahme alle 6 Parameter der äußeren Orientierung und für jeden Neupunkt alle 3 Koordinaten als Unbekannte geschätzt werden. Die Anzahl der Parameter reduziert sich, wenn einzelne Parameter nicht als Unbekannte geschätzt werden, sondern als Konstante behandelt werden.

Ein synthetisches Beispiel (Tabelle 6.2) soll die Berechnung der Anzahl der Unbekannten verdeutlichen. In diesem Beispiel kommen 2 verschiedene terrestrische Laserscanner mit je 3 Scans von unterschiedlichen Standpunkten, eine Panoramakamera mit je 2 Aufnahmen und 3 verschiedene zentralperspektive Kameras mit je 8 Aufnahmen zur Berechnung von 100 Objektpunkten zum Einsatz. Alle in Tabelle 6.1 aufgeführten Parameter werden im Beispiel wegen der besseren Übersichtlichkeit als aufnahme-invariant ($u_{var}^{m,g,j} = 0$) behandelt:

Geom. Modell $n_{Modelle} = 3$	n_G^m	Aufnahmegerät g	$u_{inv}^{m,g}$	$n_A^{m,g}$	Parameter äuß. Ori.	u
TLS ($m = 1$)	2	Terr. Laserscanner A ($g = 1$)	$u_{inv}^{1,1} = 11$	3	$3 \cdot 6$	29
		Terr. Laserscanner B ($g = 2$)	$u_{inv}^{1,2} = 11$	3	$3 \cdot 6$	29
Panorama ($m = 2$)	1	Panoramakamera A ($g = 1$)	$u_{inv}^{2,1} = 9$	2	$2 \cdot 6$	21
Zentralpersp. Kamera ($m = 3$)	3	Zentralpersp. Kamera A ($g = 1$)	$u_{inv}^{3,1} = 10$	8	$8 \cdot 6$	58
		Zentralpersp. Kamera B ($g = 2$)	$u_{inv}^{3,2} = 10$	8	$8 \cdot 6$	58
		Zentralpersp. Kamera C ($g = 3$)	$u_{inv}^{3,3} = 10$	8	$8 \cdot 6$	58
100 Neupunkte (jeweils mit X, Y, Z als Unbekannte)						300
Anzahl der Unbekannten (Gesamt)						553

Tabelle 6.2: Anzahl der Unbekannten für ein synthetisches Berechnungsbeispiel

Das Beispiel in Tabelle 6.2 demonstriert zugleich die bei der Realisierung der integrierten Bündelblockausgleichung zu berücksichtigende Komplexität der zu definierenden Datenstrukturen (vgl. Anhang A.3).

6.3 Verbesserungsgleichungen

6.3.1 Ursprüngliche Verbesserungsgleichungen

Jede Beobachtung (vgl. Kapitel 6.1) liefert eine Verbesserungsgleichung entsprechend den in Kapitel 4 vorgestellten geometrischen Modellen. Der gemessene Wert plus eine kleine Verbesserung v wird als Funktion der unbekannten Parameter beschrieben.

Für zentralperspektive Kameras und Kameras mit Fisheye-Objektiv werden folgende Verbesserungsgleichungen definiert. Dabei liegt je nach Objektiv (Zentralperspektiv oder Art des Fisheye-Objektives) ein anderer geometrischer Zusammenhang zugrunde:

$$x'_{m,g,j,i} + vx'_{m,g,j,i} = f[(X, Y, Z)_i, (X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)_{m,g,j}, (x'_0, y'_0, c, \Delta x')_{m,g}] \quad (6.2)$$

$$y'_{m,g,j,i} + vy'_{m,g,j,i} = f[(X, Y, Z)_i, (X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)_{m,g,j}, (x'_0, y'_0, c, \Delta y')_{m,g}] \quad (6.3)$$

Für Panoramakameras gelten folgende Verbesserungsgleichungen, wobei je nach Verwendung einer Panoramakamera mit zylindrischer oder vollsphärischer Aufnahmegeometrie ein anderer geometrischer Zusammenhang besteht:

$$x'_{m,g,j,i} + vx'_{m,g,j,i} = f[(X, Y, Z)_i, (X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)_{m,g,j}, (y'_0, r', \Delta x')_{m,g}] \quad (6.4)$$

$$y'_{m,g,j,i} + vy'_{m,g,j,i} = f[(X, Y, Z)_i, (X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)_{m,g,j}, (y'_0, r', \Delta y')_{m,g}] \quad (6.5)$$

Für die Beobachtungen eines terrestrischen Laserscanners bzw. eines anderen Aufnahmegerätes mit tachymetrischem Messprinzip werden diese Verbesserungsgleichungen verwendet:

$$D_{m,g,j,i} + vD_{m,g,j,i} = f[(X, Y, Z)_i, (X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)_{m,g,j}, (\Delta D)_{m,g}] \quad (6.6)$$

$$\alpha_{m,g,j,i} + v\alpha_{m,g,j,i} = f[(X, Y, Z)_i, (X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)_{m,g,j}, (\Delta \alpha)_{m,g}] \quad (6.7)$$

$$\beta_{m,g,j,i} + v\beta_{m,g,j,i} = f[(X, Y, Z)_i, (X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)_{m,g,j}, (\Delta \beta)_{m,g}] \quad (6.8)$$

6.3.2 Linearisierte Verbesserungsgleichungen

Bei den Verbesserungsgleichungen (6.2) bis (6.8) handelt es sich um nicht-lineare Gleichungen. Die Gleichungen müssen zur Nutzung in einer vermittelnden Ausgleichung durch Entwicklung in einer TAYLOR-Reihe und Abbruch nach dem ersten Glied für jeden zu schätzenden Parameter an der Stelle eines vorgegebenen Näherungswertes linearisiert werden. Demnach lauten die linearisierten Verbesserungsgleichungen für alle Bildbeobachtungen:

$$\begin{aligned} vx'_i &= \left(\frac{\partial x'}{\partial X} \right)^0 dX + \left(\frac{\partial x'}{\partial Y} \right)^0 dY + \left(\frac{\partial x'}{\partial Z} \right)^0 dZ \\ &+ \left(\frac{\partial x'}{\partial X_0} \right)^0 dX_0 + \left(\frac{\partial x'}{\partial Y_0} \right)^0 dY_0 + \left(\frac{\partial x'}{\partial Z_0} \right)^0 dZ_0 + \left(\frac{\partial x'}{\partial \omega} \right)^0 \omega + \left(\frac{\partial x'}{\partial \phi} \right)^0 \phi + \left(\frac{\partial x'}{\partial \kappa} \right)^0 \kappa \\ &+ \dots - (x'_i - x_i^0) \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} vy'_i &= \left(\frac{\partial y'}{\partial X} \right)^0 dX + \left(\frac{\partial y'}{\partial Y} \right)^0 dY + \left(\frac{\partial y'}{\partial Z} \right)^0 dZ \\ &+ \left(\frac{\partial y'}{\partial X_0} \right)^0 dX_0 + \left(\frac{\partial y'}{\partial Y_0} \right)^0 dY_0 + \left(\frac{\partial y'}{\partial Z_0} \right)^0 dZ_0 + \left(\frac{\partial y'}{\partial \omega} \right)^0 \omega + \left(\frac{\partial y'}{\partial \phi} \right)^0 \phi + \left(\frac{\partial y'}{\partial \kappa} \right)^0 \kappa \\ &+ \dots - (y'_i - y_i^0) \end{aligned} \quad (6.10)$$

Die Indizes für die Zuordnung der Beobachtungen zu einem Modell, einem Aufnahmegerät oder einer Aufnahme wurden in den vorangegangenen Gleichungen der Übersichtlichkeit halber weggelassen. Die Gleichungen beinhalten nur die Ableitungen nach den Objektpunktkoordinaten eines Punktes und nach den unbekannten Parametern der äußeren Orientierung einer Aufnahme. Die Gleichungen können jedoch in gleicher Weise um die Ableitungen der unbekannten Parameter der inneren Orientierung und der Zusatzparameter erweitert werden. Je nach zugrunde liegendem geometrischem Modell gelten die Gleichungen (6.9) und (6.10) für zentralperspektive Bilder, Panoramabilder oder Bilder, die mit einem Fisheye-Objektiv aufgenommen worden sind. Die Zusatzparameter, um die die Gleichungen bei Bedarf erweitert werden können, unterscheiden sich dann entsprechend.

Analog dazu können die linearisierten Verbesserungsgleichungen auch für die Beobachtungen eines terrestrischen Laserscanners aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} vD_i &= \left(\frac{\partial D}{\partial X} \right)^0 dX + \left(\frac{\partial D}{\partial Y} \right)^0 dY + \left(\frac{\partial D}{\partial Z} \right)^0 dZ \\ &+ \left(\frac{\partial D}{\partial X_0} \right)^0 dX_0 + \left(\frac{\partial D}{\partial Y_0} \right)^0 dY_0 + \left(\frac{\partial D}{\partial Z_0} \right)^0 dZ_0 + \left(\frac{\partial D}{\partial \omega} \right)^0 \omega + \left(\frac{\partial D}{\partial \phi} \right)^0 \phi + \left(\frac{\partial D}{\partial \kappa} \right)^0 \kappa \\ &+ \dots - (D_i - D_i^0) \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned}
v\alpha_i = & \left(\frac{\partial \alpha}{\partial X}\right)^0 dX + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial Y}\right)^0 dY + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial Z}\right)^0 dZ \\
& + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial X_0}\right)^0 dX_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial Y_0}\right)^0 dY_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial Z_0}\right)^0 dZ_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \omega}\right)^0 \omega + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \phi}\right)^0 \phi + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \kappa}\right)^0 \kappa \\
& + \dots - (\alpha_i - \alpha_i^0)
\end{aligned} \tag{6.12}$$

$$\begin{aligned}
v\beta_i = & \left(\frac{\partial \beta}{\partial X}\right)^0 dX + \left(\frac{\partial \beta}{\partial Y}\right)^0 dY + \left(\frac{\partial \beta}{\partial Z}\right)^0 dZ \\
& + \left(\frac{\partial \beta}{\partial X_0}\right)^0 dX_0 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial Y_0}\right)^0 dY_0 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial Z_0}\right)^0 dZ_0 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega}\right)^0 \omega + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \phi}\right)^0 \phi + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \kappa}\right)^0 \kappa \\
& + \dots - (\beta_i - \beta_i^0)
\end{aligned} \tag{6.13}$$

In den Gleichungen (6.9) bis (6.13) sind x'_i , y'_i , D_i , α_i , β_i die beobachteten Größen sowie x_i^0 , y_i^0 , D_i^0 , α_i^0 , β_i^0 die mit Näherungswerten der Unbekannten berechneten Werte für die Beobachtungen eines Punktes i . Die Differenzen zwischen gemessener und berechneter Beobachtung (Klammerausdruck am Ende der Gleichungen) bilden die Elemente des Beobachtungsvektors $\mathbf{l}$. Die Ableitungen der funktionalen Modelle nach den unbekannten Parametern (Differentialquotienten) werden in der Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}$ zusammengefasst. Damit lassen sich die linearisierten Verbesserungsgleichungen entsprechend Kapitel 2.1.2.1 in Matrizenschreibweise zusammenfassen:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \tag{6.14}$$

Im nächsten Kapitel soll auf die Struktur der Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}$ näher eingegangen werden, da sie die Basis des zu lösenden Ausgleichungsproblem (allgemeines Modell der vermittelnden Ausgleichung) darstellt.

6.4 Struktur der Koeffizientenmatrix

Abbildung 6.2 zeigt die allgemeine Struktur der Koeffizientenmatrix für die integrierte Bündelblockausgleichung. Die Anzahl der Spalten der Matrix entspricht der Anzahl der zu schätzenden Unbekannten und die Anzahl der Zeilen der Anzahl der Beobachtungen. Jedes Element dieser Matrix stellt die Ableitung der jeweiligen Beobachtungsgleichung nach der jeweiligen Unbekannten (Differentialquotient) dar. Durch Berücksichtigung der Näherungswerte der Unbekannten wird für jeden Differentialquotienten ein diskreter Wert berechnet. In der Abbildung sind Elemente grau hinterlegt, denen entsprechende Differentialquotienten zugeordnet werden.

Es werden n_M unterschiedliche geometrische Modelle verwendet, denen jeweils n_G Aufnahmegeräte zugeordnet sind. Jedem dieser Aufnahmegeräte sind wiederum n_A Aufnahmen zugeordnet. Insgesamt werden die Koordinaten von n_P Neupunkten als Unbekannte geschätzt, die in jeder Aufnahme als Beobachtungen vorkommen können. Handelt es sich um Beobachtungen in einem Bild (zentralperspektiv, Fisheye-Bild oder Panorama) liefert jeder Punkt maximal zwei Beobachtungen, die zwei Zeilen in der Koeffizientenmatrix darstellen, handelt es sich um Beobachtungen eines Laserscanners liefert jeder (diskrete) Objektpunkt maximal drei Beobachtungen (bzw. Zeilen der Koeffizientenmatrix).

Die in Abbildung 6.2 dargestellte Struktur geht von der Vereinfachung aus, dass die Parameter der inneren Orientierung und die Zusatzparameter aufnahme-invariant definiert sind, wobei deren Anzahl (u_{mv}) abhängig vom geometrischen Modell m und dem jeweiligen Aufnahmegerät g variieren kann. Für jede Aufnahme werden 6 Parameter der äußeren Orientierung geschätzt und für jeden Neupunkt 3 Koordinaten.

Modell	Aufnahme- gerät	Aufnahme	$u_{inv}^{1,1}$	6 ... 6	...	$u_{inv}^{1,g}$	6 ... 6	...	$u_{inv}^{m,1}$	6 ... 6	...	$u_{inv}^{m,g}$	6 ... 6	3 ... 3	Neupunkt
$m=1$	$g=1$	$j=1$	■	■	■									■	$i=1$
		$j=n_A^{1,1}$	■	■	■									■	$i=n_p$
	$g=n_G^1$	$j=1$				■	■	■						■	$i=1$
		$j=n_A^{1,g}$				■	■	■						■	$i=n_p$
	$\vdots$	$j=1$			■									■	$i=1$
		$j=n_A^{1,g}$			■									■	$i=n_p$
$m=n_M$	$g=1$	$j=1$							■	■	■			■	$i=1$
		$j=n_A^{m,1}$							■	■	■			■	$i=n_p$
	$g=n_G^m$	$j=1$										■	■	■	$i=1$
		$j=n_A^{m,g}$										■	■	■	$i=n_p$
	$\vdots$	$j=1$												■	$i=1$
		$j=n_A^{m,g}$												■	$i=n_p$

Abbildung 6.2: Struktur der Koeffizientenmatrix für die integrierte Bündelblockausgleichung (vereinfacht)

Abbildung 6.2 macht deutlich, dass die Struktur der Koeffizientenmatrix sehr komplex ist und deren programmiertechnische Umsetzung für eine flexible Anzahl von zu verwaltenden geometrischen Modellen, Aufnahmegegeräten, Aufnahmen und Neupunkten besonders fehleranfällig sein kann. Deshalb ist bei der Programmierung auf eine übersichtliche Klassen- und Objektstruktur zu achten (Details im Anhang A.1 bzw. A.3).

Zur Veranschaulichung der allgemeinen Struktur der Koeffizientenmatrix wird diese im Folgenden für ein synthetisches Beispiel konkretisiert (Abbildung 6.3). In diesem Beispiel werden 3 unterschiedliche geometrische Modelle verwendet. Mit einem terrestrischen Laserscanner wurden 2 Scans, mit 2 unterschiedlichen zentralperspektiven Kameras wurden je 3 Bilder und mit einer Panoramakamera wurden 3 Panoramabilder aufgenommen. Insgesamt werden hier die Koordinaten von 8 Objektpunkten berechnet. Es ist zu beachten, dass nicht in jeder Aufnahme alle 8 Objektpunkte beobachtet wurden.

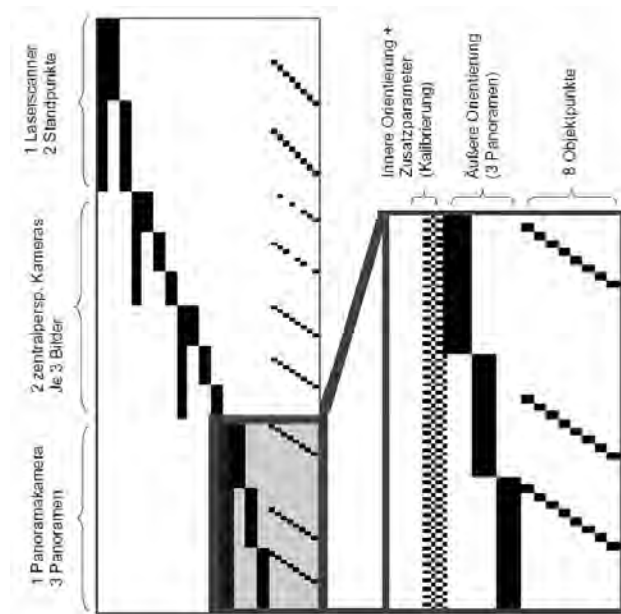


Abbildung 6.3: Struktur der Koeffizientenmatrix für ein synthetisches Beispiel

6.5 Datumsfestlegung

Die Festlegung eines Datums ist ein zentrales Thema bei der Bündelblockausgleichung. Insbesondere bei der Interpretation der Ausgleichungsergebnisse muss die Art der Datumsfestlegung berücksichtigt werden. Unter einem Datum ist ein übergeordnetes Koordinatensystem zu verstehen, in dem alle Koordinaten der Objektpunkte und die äußere Orientierung aller beteiligter Aufnahmen definiert sind (vgl. Kapitel 2.2.3). Wird kein Datum definiert, besitzt das zu lösende Gleichungssystem einen Rangdefekt, der im speziellen Fall als Datumsdefekt bezeichnet wird. Dieser Datumsdefekt kann bei einem dreidimensionalen Ausgleichungsproblem durch sieben zusätzliche Informationen behoben werden, d.h. durch die Festlegung des Koordinatenursprungs (3 Translationen) durch die Festlegung der Orientierung der Koordinatenachsen (3 Rotationen) und durch die Festlegung eines Maßstabes. In den meisten Fällen wird die Datumsfestlegung über Passpunkte oder eine freie Ausgleichung realisiert.

Für die integrierte Bündelblockausgleichung von Beobachtungen unterschiedlicher Messinstrumente kommen die gleichen mathematischen Verfahren zur Datumsdefinition zum Einsatz wie bei einer konventionellen Bündelblockausgleichung. Bei der gleichzeitigen Verwendung einer Laserscanner-Aufnahme mit annähernd bekannter äußerer Orientierung besteht jedoch der Vorteil, dass bereits sehr gute Näherungswerte für die Koordinaten diskreter Objektpunkte bestimmt werden können, die dann entweder als Passpunkte (z.B. für die Definition eines minimalen Datums) oder für eine freie Netzausgleichung genutzt werden.

6.5.1 Passpunkte

Passpunkte sind Objektpunkte, die als fehlerfrei angenommen werden. Sie werden im Rahmen der Bündelblockausgleichung nicht geschätzt und deshalb wird für diese auch keine Standardabweichung berechnet. Am einfachsten lässt sich dies realisieren, indem die Koordinaten dieser Punkte nicht als Unbekannte berücksichtigt werden und die entsprechenden Spalten in der Koeffizientenmatrix gelöscht werden, während die Beobachtungen dieser Punkte (Zeilen in der Koeffizientenmatrix) unverändert bleiben. Die Anzahl der Spalten der Koeffizientenmatrix verringert sich dann entsprechend.

Die Passpunkte können aber auch als beobachtete Größen berücksichtigt werden. In diesem Fall wird die Koeffizientenmatrix um eine Zeile je Passpunktcoordinate erweitert, wobei nur die zu diesem Punkt gehörende Spalte der Koeffizientenmatrix mit einem Wert (Eins) besetzt wird, alle anderen Elemente dieser Zeile

bleiben Null. Der Vorteil dieser Methode ist, dass den Passpunktkoordinaten ein ihrer Genauigkeit entsprechendes Gewicht zugeordnet werden kann.

Beide genannten Varianten führen zur selben Gesamtredundanz des Ausgleichungsproblems (Anzahl Beobachtungen minus Anzahl der Unbekannten). Während bei der ersten Variante die Anzahl der Unbekannten reduziert wird, wird bei der zweiten Variante die Anzahl der Beobachtungen erweitert.

Werden alle Koordinaten eines Passpunktes zur Datumsfestlegung genutzt, handelt es sich um einen Vollpasspunkt. Es können aber auch nur eine oder zwei Koordinaten des Passpunktes zur Datumsfestlegung verwendet werden. Je nach Ausrichtung des Koordinatensystems werden diese Punkte auch als Lagepasspunkte oder Höhenpasspunkte bezeichnet. Werden genau 6 Koordinateninformationen und eine Maßstabsstrecke zur Beseitigung des Datumsdefektes verwendet, handelt es sich um ein 'minimales Datum'. Bei Verwendung eines 'minimalen Datums' treten keine Netzspannungen auf.

6.5.2 Freie Netzausgleichung

Bei der freien Netzausgleichung wird die Datumsfestlegung durch Lagerung des Koordinatensystems auf die Näherungskordinaten der Neupunkte realisiert, das Koordinatensystem wird also optimal in die näherungsweise bekannten Objektpunkte eingepasst.

Mit dieser Methode der Datumsdefinition erfolgt eine zwangsfreie Einpassung der in der Ausgleichung geschätzten Objektpunkte in das System der Näherungskordinaten. Ein Vorteil gegenüber der Verwendung von Passpunkten ist die gleichmäßigere Verteilung und realistischere Bestimmung der Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten.

Der Datumsdefekt wird bei der freien Netzausgleichung behoben, indem das Gleichungssystem um zusätzliche Bedingungen zwischen den Unbekannten erweitert wird. Dabei wird entsprechend Kapitel 2.1.2.5 eine Matrix $\mathbf{B}$ mit 7 Zeilen und einer der Anzahl der Unbekannten entsprechenden Anzahl von Spalten definiert, und zum Normalgleichungssystem hinzugefügt. Diese 7 Bedingungsgleichungen setzen sich aus drei Gleichungen zur Definition der Translation, drei Gleichungen zur Definition der Rotation und einer Gleichung zur Maßstabsdefinition zusammen (Kapitel 6.6.1). Je nachdem, ob alle oder nur ausgewählte unbekannten Neupunkte zur Datumsfestlegung genutzt werden, unterscheidet man zwischen Gesamt- und Teilspurminimierung.

6.6 Zusätzliche Bedingungsgleichungen

Der in den Kapiteln 6.3 und 6.4 vorgestellte Ansatz zur vermittelnden Ausgleichung unterschiedlicher Beobachtungstypen muss in bestimmten Fällen um zusätzliche Bedingungsgleichungen erweitert werden. Dies ist zum Beispiel notwendig, wenn die Datumsfestlegung durch eine freie Netzausgleichung definiert wird oder wenn für die äußere Orientierung einer Aufnahme vier Quaternionen anstelle der drei Euler-Winkel verwendet werden. Darüber hinaus kann es weitere Gründe für die Definition zusätzlicher Bedingungsgleichungen geben. Dazu gehört die Berücksichtigung geometrischer Bedingungen zwischen den Unbekannten in Form von geodätischen Beobachtungen (Strecken, Winkel, etc.) oder die Kenntnis der Anordnung von Objektpunkten auf einer bestimmten geometrischen Form (Ebene, Zylinder, etc.).

Methodisch wird dabei unterschieden zwischen Bedingungsgleichungen als zusätzliche Beobachtungen mit einer entsprechenden Standardabweichung und 'echten' Bedingungsgleichungen mit festem Zwang. Im ersten Fall wird lediglich die Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}$ um eine Zeile pro Bedingung erweitert und gleichzeitig die Standardabweichung in der Gewichtsmatrix berücksichtigt, im zweiten Fall wird das Normalgleichungssystem wie in Kapitel 2.1.2.5 erläutert um eine Bedingungsmatrix $\mathbf{B}$ erweitert. Im Folgenden sollen zwei Beispiele ($\mathbf{B}_F$ und $\mathbf{B}_{Q,j}$) für die Struktur solcher Bedingungsmatrizen vorgestellt werden, die auch zu einer Matrix $\mathbf{B}$ zusammengefasst werden können:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_F \\ \mathbf{B}_{Q,j} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

6.6.1 Bedingungsgleichungen für die freie Netzausgleichung

Erfolgt die Datumsfestlegung durch Berechnung einer freien Netzausgleichung (Kapitel 6.5.2) werden zusätzliche Bedingungen für Translation (Gleichungen 6.16), Rotation (Gleichungen 6.17) und Maßstab (Gleichungen 6.18) aufgestellt [Zinndorf, 1985; Kraus, 1996]. Die folgenden Gleichungen beinhalten die Terme für die äußere Orientierung einer Aufnahme j und für die Koordinaten eines Neupunktes i . Die Gleichungen müssen entsprechend der Anzahl der Aufnahmen und der Anzahl der Neupunkte erweitert werden.

$$\begin{aligned} 0 &= dX_{0,j} + \dots + dX_i + \dots \\ 0 &= dY_{0,j} + \dots + dY_i + \dots \\ 0 &= dZ_{0,j} + \dots + dZ_i + \dots \end{aligned} \quad (6.16)$$

$$\begin{aligned} 0 &= Y_{0,j} dZ_{0,j} - Z_{0,j} dY_{0,j} + \dots + Y_i dZ_i - Z_i dY_i + \dots \\ 0 &= Z_{0,j} dX_{0,j} - X_{0,j} dZ_{0,j} + \dots + Z_i dX_i - X_i dZ_i + \dots \\ 0 &= X_{0,j} dY_{0,j} - Y_{0,j} dX_{0,j} + \dots + X_i dY_i - Y_i dX_i + \dots \end{aligned} \quad (6.17)$$

$$0 = X_{0,j} dX_{0,j} + Y_{0,j} dY_{0,j} + Z_{0,j} dZ_{0,j} + \dots + X_i dX_i + Y_i dY_i + Z_i dZ_i + \dots \quad (6.18)$$

Die Bedingungsmatrix $\mathbf{B}$ hat dann die Struktur entsprechend Gleichung (6.19). Für die Berechnung der einzelnen Matrixelemente werden Näherungswerte der äußeren Orientierung und der Neupunktkoordinaten verwendet. Werden alle Neupunkte i in der aufgezeigten Form berücksichtigt, handelt es sich um eine Gesamtspurminimierung.

$$\mathbf{B}_F = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} \text{äußere Orientierung der Aufnahme } j & & & & & \end{array} \\ \begin{array}{cccccc} \text{Koordinaten des Neupunktes } i & & & & & \end{array} \\ \left[\begin{array}{cccccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots \\ 0 & -Z_{0,j} & Y_{0,j} & r_{11,j} & r_{21,j} & r_{31,j} & \dots & 0 & -Z_i & Y_i & \dots \\ Z_{0,j} & 0 & -X_{0,j} & r_{12,j} & r_{22,j} & r_{32,j} & \dots & Z_i & 0 & -X_i & \dots \\ -Y_{0,j} & X_{0,j} & 0 & r_{13,j} & r_{23,j} & r_{33,j} & \dots & -Y_i & X_i & 0 & \dots \\ X_{0,j} & Y_{0,j} & Z_{0,j} & 0 & 0 & 0 & \dots & X_i & Y_i & Z_i & \dots \end{array} \right] \end{array} \quad (6.19)$$

6.6.2 Bedingungsgleichungen bei Nutzung von Quaternionen

Werden für die Ausrichtung des Koordinatensystems einer Aufnahme (Scan, Bild oder Panorama) vier Quaternionen (a, b, c, d) anstelle der drei Euler-Winkel (ω, φ, κ) genutzt, ergibt sich ein Rangdefekt der durch eine zusätzliche Bedingungsgleichung für jede Aufnahme in der folgenden Form beseitigt werden kann:

$$0 = a_j^2 + b_j^2 + c_j^2 + d_j^2 - 1 \quad (6.20)$$

Da die Bedingungsgleichung nicht linear ist, muss diese mittels TAYLOR-Entwicklung linearisiert werden. Die linearisierten Bedingungsgleichungen für eine Aufnahme lauten demnach:

$$0 = 2a_j da_j + 2b_j db_j + 2c_j dc_j + 2d_j dd_j - 1 + w \quad (6.21)$$

$$\text{mit } w = a_j^2 + b_j^2 + c_j^2 + d_j^2 - 1 \quad (6.22)$$

Für jede Aufnahme j wird somit eine neue Zeile der Bedingungsmatrix $\mathbf{B}$ und ein entsprechendes Element des Vektors der Widersprüche $\mathbf{w}$ in der folgenden Form definiert:

$$\mathbf{B}_{Q,j} = [\dots \ 2a_j \ 2b_j \ 2c_j \ 2d_j \ \dots] \quad \text{und} \quad \mathbf{w}_j = [a_j^2 + b_j^2 + c_j^2 + d_j^2 - 1] \quad (6.23)$$

6.7 Fazit

Die Bündelblockausgleichung bezeichnet ursprünglich die Ausgleichung in zentralperspektiven Bildern gemessener Bildkoordinaten zur Bestimmung der Orientierung der Bilder und der Objektkoordinaten. In diesem Kapitel wurde die Erweiterung dieses Ansatzes für die Berücksichtigung verschiedener geometrischer Modelle in einem geschlossenen funktionalen Modell beschrieben.

Neben den zentralperspektiven Bildkoordinaten können zylindrische und sphärische Panoramabildkoordinaten, Fisheye-Bildkoordinaten und vor allem auch die mit einem terrestrischen Laserscanner oder einem anderen Gerät mit tachymetrischem Messprinzip gemessenen sphärischen Koordinaten diskreter Objektpunkte simultan ausgeglichen werden. Die dabei zu beachtenden Besonderheiten bezüglich der Strukturierung des Ausgleichungsansatzes wurden erörtert.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Software zur Berechnung der integrierten Bündelblockausgleichung wird im Anhang A.1 bis A.5 vorgestellt. Die an diese Software in der Einleitung dieser Arbeit (Kapitel 1.5) gestellten Anforderungen konnten umgesetzt werden.

Das für die integrierte Bündelblockausgleichung notwendige stochastische Modell der Beobachtungen wurde aus diesem Kapitel ausgespart. Es wird wegen der besonderen Bedeutung für die gemeinsame Auswertung unterschiedlicher Beobachtungen im nächsten Kapitel gesondert betrachtet.

7 Stochastisches Modell für die integrierte Bündelblockausgleichung

Für alle Ausgleichungsaufgaben ist es notwendig, neben dem funktionalen Modell, welches den Zusammenhang zwischen den Beobachtungen und den zu schätzenden Unbekannten beschreibt, auch ein stochastisches Modell zu definieren. Das stochastische Modell wird aus den bekannten Genauigkeiten der Beobachtungen und aus bekannten Korrelationen zwischen den Beobachtungen aufgestellt und geht in Form einer Gewichtsmatrix in die Berechnung ein. In vielen Fällen kann von gleichgenauen, unkorrelierten Beobachtungen ausgegangen werden. Die Gewichtsmatrix ist dann eine Einheitsmatrix und kann deshalb für die Berechnung unberücksichtigt bleiben.

Bei der gemeinsamen Ausgleichung verschiedener Typen von Beobachtungen, die mit unterschiedlichen Instrumenten aufgenommen wurden oder eine unterschiedliche Genauigkeit haben, ist die Festlegung eines stochastischen Modells, welches die Heterogenität des Beobachtungsmaterials berücksichtigt, unabdingbar. Werden die Beobachtungen dennoch als gleichgenau angesehen, werden einzelne Beobachtungen meist zu stark und andere zu gering am Ausgleichungsprozess beteiligt, worunter die Qualität der Ausgleichungsergebnisse meist stark leidet. Deshalb sollte ein der a-priori Genauigkeit der jeweiligen Beobachtung entsprechendes Gewicht angesetzt werden. Für die in der integrierten Bündelblockausgleichung einbezogenen Beobachtungen terrestrischer Laserscanner, zentralperspektiver Kameras, Panoramakameras und Kameras mit Fish-eye-Objektiv wird die Festlegung von Beobachtungsgewichten in Kapitel 7.2 behandelt.

Neben den unbekannten Parametern des funktionalen Modells wird im gewöhnlichen Ausgleichungsansatz die Standardabweichung der Gewichtseinheit als einzige globale Größe des stochastischen Modells geschätzt. Dadurch wird der Informationsgehalt des Beobachtungsmaterials nicht ausgeschöpft. Das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung bietet die Möglichkeit, für jeden Beobachtungstyp eine individuelle Varianz bzw. Standardabweichung zu schätzen. Dies führt häufig zu einer Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse [Welsch, 1984]. Insbesondere bei der Berechnung hochredundanter Ausgleichungsprobleme können diese zusätzlichen Parameter eines erweiterten stochastischen Modells signifikant bestimmt werden [Sieg & Hirsch, 2000a]. Kapitel 7.3 bzw. Anhang A.2 stellt die Implementation der Varianzkomponentenschätzung in die integrierte Bündelblockausgleichung vor.

7.1 Stochastische Informationen

Stochastische Informationen sind die Standardabweichungen bzw. Varianzen der Beobachtungen und der unbekannten Parameter, sowie Korrelationen zwischen den Beobachtungen und Korrelationen zwischen den unbekannten Parametern. Vor der eigentlichen Ausgleichung wird das stochastische Modell auf Basis der

- a-priori Standardabweichungen der (ursprünglichen) Beobachtungen und
- ggf. bekannten Korrelationen zwischen den Beobachtungen

aufgestellt. Nach der Ausgleichungsberechnung stehen zahlreiche stochastische Informationen zur Beurteilung der Ausgleichungsergebnisse zur Verfügung:

- Standardabweichung der Gewichtseinheit
- a-posteriori Standardabweichungen der ursprünglichen Beobachtungen
- (a-posteriori) Standardabweichung der ausgeglichenen Beobachtungen
- Standardabweichungen der unbekannten Parameter
- Korrelationen zwischen den unbekannten Parametern

In den folgenden Kapiteln werden die Matrizen, welche die stochastischen Informationen beinhalten, kurz vorgestellt. Für die Herleitung der Matrizen wird auf die Kapitel 2.1.2 und 2.1.3 verwiesen. Weitere stochastische Informationen zur Analyse der Ausgleichungsergebnisse, die aus diesen Matrizen abgeleitet werden können (u. a. Signifikanz, Bestimmbarkeit, Zuverlässigkeit, Redundanz und Redundanzanteile, normierte Verbesserungen zur Ausreißerdetektion) werden ebenfalls im Kapitel 2.1.3 (Grundlagen) erläutert.

7.1.1 Kovarianzmatrix der ursprünglichen Beobachtungen

Die Kovarianzmatrix der Beobachtungen Σ_{LL} ist der Träger des stochastischen Modells (Gleichung 2.13). Die Dimension dieser quadratischen Matrix entspricht der Anzahl der an der Ausgleichung beteiligten Beobachtungen n . Die Hauptdiagonalelemente sind die Quadrate der vorgegebenen a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen (d. h. die Varianz), die auf Basis empirischer Werte für die jeweilige Messgröße oder aufgrund von Herstellerangaben festgelegt werden. Diese Werte sind in vielen Fällen nicht sicher bekannt und können aufgrund unterschiedlicher Aufnahmebedingungen und -parameter stark variieren.

Meistens wird für jede Beobachtung des gleichen Typs die gleiche a-priori Standardabweichung angesetzt. Beispielsweise werden für alle Distanzmesswerte eines terrestrischen Laserscanners die gleichen Werte vorgegeben. In diesem Fall wird von Gruppenvarianzen gesprochen. Es kann jedoch auch sinnvoll sein, die Gruppenvarianzen weiter aufzuspalten, unter anderem wenn unterschiedliche Fehleranteile (z. B. konstante und streckenabhängige Anteile der Distanzmessung) zu unterschiedlichen a-priori Standardabweichungen eines Beobachtungstyps führen. Es handelt sich dann um adaptive Varianzkomponenten [Sieg & Hirsch, 2000a]. In den Nebendiagonalelementen der Kovarianzmatrix können Informationen über a-priori Korrelationen zwischen den Beobachtungen berücksichtigt werden. Weil jedoch Korrelationen zwischen den Beobachtungen meistens entweder nicht vorliegen oder nicht bekannt sind, werden die Korrelationskoeffizienten zu Null. Die Beobachtungen werden dann als unabhängig voneinander angesehen, und die Kovarianzmatrix wird eine Diagonalmatrix.

Das folgende Beispiel soll den Aufbau der Kovarianzmatrix verdeutlichen: Unter der Annahme, dass drei unterschiedliche Beobachtungstypen (z. B. Distanz D , Horizontalwinkel α , Vertikalwinkel β) gemeinsam ausgeglichen werden und davon ausgehend, dass alle Beobachtungen unabhängig voneinander sind, hat die Kovarianzmatrix folgende Blockdiagonalstruktur, wobei die einzelnen Beobachtungstypen in Submatrizen zusammengefasst werden können:

$$\Sigma_{LL} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{D_1}^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_{D_n}^2 \end{bmatrix} & & \\ & \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha_1}^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_{\alpha_n}^2 \end{bmatrix} & & \\ & & \begin{bmatrix} \sigma_{\beta_1}^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_{\beta_n}^2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{DD} & & \\ & \Sigma_{\alpha\alpha} & \\ & & \Sigma_{\beta\beta} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Wird in Gleichung 7.1 für alle Distanzbeobachtungen D_i , für alle Beobachtungen des Horizontalwinkels α_i , sowie für alle Beobachtungen des Vertikalwinkels β_i , jeweils eine einheitliche a-priori Standardabweichung bzw. Varianz festgelegt, sind das die Gruppenvarianzen σ_D^2 , σ_α^2 und σ_β^2 . Dieser Ansatz lässt sich selbstverständlich auf die Berücksichtigung weiterer Beobachtungstypen (z. B. Bildkoordinaten) erweitern. Sind die Standardabweichungen für jede Distanzbeobachtung unterschiedlich ($\sigma_{D,1} \neq \sigma_{D,2} \neq \dots \neq \sigma_{D,n}$), können

adaptive Varianzkomponenten definiert werden. Dies kann je nach Erfordernis ebenso für alle anderen Beobachtungstypen erfolgen. Die Reihenfolge der einzelnen Beobachtungen kann im konkreten Fall anders sortiert sein, weil sie der Reihenfolge der Beobachtungen in der Koeffizientenmatrix A entsprechen muss, damit in der Ausgleichungsberechnung die Zuordnung zwischen der Beobachtung und ihrer Standardabweichung korrekt erfolgt.

7.1.2 Kofaktormatrix der ursprünglichen Beobachtungen und Gewichtsmatrix

Werden die Elemente der Kovarianzmatrix durch die Konstante σ_0^2 geteilt, erhält man die Kofaktormatrix Q_{LL} (Gleichung 2.14). Die Konstante σ_0 ist die (wahre) a-priori Standardabweichung einer Beobachtung mit dem Gewicht 1 (Gewichtseinheit). In der Praxis wird σ_0^2 meist so gewählt, dass die Elemente der Kofaktormatrix um den Wert 1 schwanken. Die Festlegung der Standardabweichung der Gewichtseinheit hat keinen Einfluss auf die numerischen Werte der ausgeglichenen Unbekannten.

Der Unterschied zwischen σ_0 und der in der Ausgleichung empirisch geschätzten a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit $\hat{s}_0$ (Gleichung 2.24) zeigt später, ob die Standardabweichungen der einzelnen Beobachtungen σ_i zu pessimistisch oder zu optimistisch veranschlagt wurden:

$$\begin{aligned}\hat{s}_0 < \sigma_0 &\rightarrow \text{zu pessimistisch} \\ \hat{s}_0 > \sigma_0 &\rightarrow \text{zu optimistisch}\end{aligned}\tag{7.2}$$

Eine zu optimistische Festlegung der Standardabweichung der Beobachtungen kann auch auf ein ungenügendes funktionales Modell hindeuten (z.B. vorhandene Restsystematiken) oder auf grobe Fehler im Beobachtungsmaterial. Multipliziert man die Kofaktormatrix mit der empirisch ermittelten Varianz der Gewichtseinheit $\hat{s}_0^2$ ergibt sich die a-posteriori Kovarianzmatrix der Beobachtungen, welche die a-posteriori Varianzen der ursprünglichen Beobachtungen auf der Hauptdiagonalen enthält.

Durch Invertieren der Kofaktormatrix Q_{LL} erhält man die Gewichtsmatrix P . Bei gleichgenauen und unkorrelierten Beobachtungen (z.B. bei einem rein photogrammetrischen Netz mit einer Kamera) ist die Kofaktormatrix und die Gewichtsmatrix eine Einheitsmatrix, dadurch wird $\hat{s}_0$ direkt interpretierbar (z.B. bei einem photogrammetrischen Netz als die ermittelte Gesamtgenauigkeit im Bildraum in Abhängigkeit von der Qualität der Beobachtungen und dem funktionalen Modell).

Die Gewichtsmatrix P geht schließlich in die Ausgleichungsberechnung entsprechend Kapitel 2.1.2.4 ein. In der praktischen Realisierung des stochastischen Modells in einem Computerprogramm wird meist auf das Aufstellen der Kovarianz- und Kofaktormatrix verzichtet, stattdessen wird direkt die Gewichtsmatrix gebildet, deren Elemente dann durch den Quotienten der a-priori festgelegten Varianz der Gewichtseinheit σ_0^2 und der a-priori Varianz der einzelnen Beobachtungen σ_i^2 gegeben sind:

$$p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}\tag{7.3}$$

7.1.3 Kofaktormatrix und Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten

Die Kofaktormatrix der Unbekannten Q_{XX} bzw. die Varianz-Kovarianz-Matrix Σ_{XX} steht nach der Ausgleichungsberechnung zur Beurteilung der Genauigkeiten und Signifikanz der geschätzten Werte der unbekannten Parameter des funktionalen Modells sowie zur Analyse von Korrelationen zwischen den Unbekannten zur Verfügung. Die Dimension beider quadratischer Matrizen entspricht der Anzahl der zu schätzenden Unbekannten.

Die Kofaktormatrix ist die Inverse der Normalgleichungsmatrix N . Die Varianz-Kovarianz-Matrix ergibt sich durch Multiplikation der Kofaktormatrix mit der in der Ausgleichung geschätzten a-posteriori Varianz der Gewichtseinheit $\hat{s}_0^2$ (Gleichung 2.18) und hat dann folgende diagonalsymmetrische Struktur:

$$\Sigma_{XX} = \begin{bmatrix} \hat{s}_1^2 & \cdots & \rho_{1u} \hat{s}_1 \hat{s}_u \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{u1} \hat{s}_u \hat{s}_1 & \cdots & \hat{s}_u^2 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Die geschätzte Standardabweichung einer Unbekannten ergibt sich aus der Wurzel der in der Hauptdiagonalen der Varianz-Kovarianz-Matrix stehenden Varianz der Unbekannten (bzw. nach Gleichung 2.27 aus der Kofaktormatrix). Aus den Nebendiagonalelementen der Varianz-Kovarianz-Matrix lassen sich die Korrelationen zwischen den Unbekannten ermitteln (Nebendiagonalelement geteilt durch die Wurzel des Produktes der entsprechenden Hauptdiagonalelemente, in gleicher Weise wie aus der Kofaktormatrix entsprechend Gleichung 2.30).

Aus diesen stochastischen Informationen über die unbekannten Parameter lassen sich anschließend weitere Größen, wie beispielsweise die Bestimmbarkeit (Kapitel 2.1.3.6) und die Signifikanz (Kapitel 2.1.3.8) der Unbekannten ableiten.

7.1.4 Kofaktormatrix und Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Beobachtungen

Wird die Kofaktormatrix der Unbekannten bzw. die Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten mit dem funktionalen Modell unter Berücksichtigung der ermittelten Werte für die unbekannten Parameter in der folgenden Form multipliziert, erhält man die Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{\hat{L}\hat{L}}$ bzw. die Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{L}\hat{L}}$ der ausgeglichenen Beobachtungen:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{\hat{L}\hat{L}} &= \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{XX} \mathbf{A} \\ \Sigma_{\hat{L}\hat{L}} &= \mathbf{A}^T \Sigma_{XX} \mathbf{A} \end{aligned} \quad (7.5)$$

Beide Matrizen unterscheiden sich wiederum nur durch den Faktor $\hat{s}_0^2$. Die Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{L}\hat{L}}$ der ausgeglichenen Beobachtungen enthält explizit die Varianzen der ausgeglichenen Beobachtungen auf der Hauptdiagonalen. Die Wurzeln dieser Elemente sind die Standardabweichungen der ausgeglichenen Beobachtungen. Diese sollten in der Regel geringer sein als die a-priori und a-posteriori Standardabweichungen der ursprünglichen Beobachtungen. Außerdem lassen sich aus den Nebendiagonalelementen Korrelationen zwischen den ausgeglichenen Beobachtungen ableiten.

7.2 Festlegung von Beobachtungsgewichten

Für alle Beobachtungstypen müssen Gewichte entsprechend ihrer individuellen Genauigkeit festgelegt werden. Entscheidend ist die Abschätzung der a-priori Standardabweichung der Beobachtungstypen, die in den nachfolgenden Kapiteln für die unterschiedlichen Beobachtungstypen erläutert werden soll. Daraus werden dann entweder feste Gewichte ermittelt (Gleichung 7.3), die unmittelbar in die Ausgleichungsberechnung eingehen, oder sie dienen als Startwerte für die Varianzkomponentenschätzung. Die Standardabweichungen der Beobachtungen sind immer in der Einheit zu definieren, in der auch die Beobachtungen selbst vorliegen.

Grundsätzlich gilt, dass die Werte für a-priori Standardabweichung bzw. a-priori Gewicht der einzelnen Beobachtungstypen nicht direkt für die Verteilung der Verbesserung auf die unterschiedlichen Beobachtungsgruppen verantwortlich sind. Maßgebend ist nur das Verhältnis der Standardabweichungen bzw. Gewichte der einzelnen Beobachtungsgruppen untereinander:

$$p_D : p_\alpha : p_\beta : p_{x'} : p_{y'} : \dots = \sigma_0^2 \cdot \left(\frac{1}{\sigma_D^2} : \frac{1}{\sigma_\alpha^2} : \frac{1}{\sigma_\beta^2} : \frac{1}{\sigma_{x'}^2} : \frac{1}{\sigma_{y'}^2} : \dots \right) \quad (7.6)$$

Bei anderen Werten, aber gleichen Gewichtsverhältnissen, ändert sich lediglich die geschätzte a-priori Standardabweichung der Gewichtseinheit $\hat{s}_0$, die dann zeigt, ob die Gewichte insgesamt entweder zu optimis-

tisch oder zu pessimistisch veranschlagt wurden (vgl. Gleichung 7.2). Die Ergebnisse der Ausgleichungsrechnung (z.B. geschätzte Werte der Unbekannten) werden in diesem Fall nicht beeinflusst.

7.2.1 Zentralperspektive Bildkoordinaten

Die Bildkoordinaten (x' , y') in digitalen Bildern werden am Bildschirm interaktiv oder automatisch im Pixelkoordinatensystem gemessen und meistens unter Verwendung des bekannten Pixelabstandes in das Bildkoordinatensystem mit der Einheit Millimeter umgerechnet.

Generell muss bei der Festlegung einer a-priori Standardabweichung danach unterschieden werden, was gemessen wird und wie gemessen wird. Gemessen werden können natürliche Objektpunkte (z.B. Fensterecken einer Fassade), signalisierte Punkte (z.B. retro-reflektierende runde Zielmarken), oder es werden bestimmte, mit einem Musterbild übereinstimmende, Bildmerkmale gesucht. Die Messung kann entweder interaktiv am Bildschirm erfolgen, automatisch mit Bildmessoperatoren (z.B. Schwerpunktoperator, Ellipsenoperator bei kreisförmigen Zielmarken, Ring-Operator bei kreuzförmigen Zielmarken) oder automatisch mit Korrelations- und Matchingverfahren.

Eine Angabe von konkreten Werten für die a-priori Standardabweichungen der Bildkoordinaten ($\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$) lässt sich nicht pauschal treffen, weil sie von zahlreichen Faktoren abhängig ist. Zu den Einflussgrößen auf die Bildmessgenauigkeit zählen unter anderem die Bildqualität (Rauschen), der Dynamikumfang des Sensors, der Zielmarkenkontrast, die Größe der Zielmarke, die Struktur der Bildmerkmale bei Messung mit LSM oder das Vorhandensein von Verdeckungen bzw. Störungen. Unter optimalen Bedingungen sind folgende Genauigkeiten möglich (z.B. [Luhmann et. al., 2006]):

- Interaktive Messung nicht-signalisierter Punkte: $\sigma_{x',y'} = 0,3 - 0,5$ Pixel
- Automatische Messung signalisierter Punkte mit Schwerpunktoperator: $\sigma_{x',y'} = 0,03 - 0,05$ Pixel
- Automatische Messung signalisierter Punkte mit Ellipsen oder Ring-Operator: $\sigma_{x',y'} = 0,02 - 0,05$ Pixel
- Kreuzkorrelation mit Subpixel-Interpolation: $\sigma_{x',y'} = 0,03 - 0,10$ Pixel
- Kleinste-Quadrate-Anpassung (LSM): $\sigma_{x',y'} = 0,01 - 0,04$ Pixel
- Theoretische Grenze der Messauflösung bei synthetischen Testbildern: $\sigma_{x',y'} = 0,001 - 0,002$ Pixel

Horizontale (x') und vertikale (y') Bildkoordinaten haben in der Regel die gleiche a-priori Genauigkeit. Eine Trennung horizontaler und vertikaler Koordinaten in unterschiedliche Beobachtungsgruppen mit verschiedener Genauigkeit ist nur in Einzelfällen sinnvoll, beispielsweise wenn die zu messenden Zielmarken unterschiedliche Dimensionen in horizontaler und vertikaler Richtung haben, wenn die Pixel in horizontaler und vertikaler Koordinatenrichtung unterschiedliche Abstände haben, also nicht quadratisch sind oder wenn der Bildbereich, in dem durch Kleinste-Quadrate-Anpassung (LSM) eines Musterbildes gemessen wird, bestimmte horizontal oder vertikal verlaufende Strukturen aufweist. In den genannten Fällen ist zwar eine unterschiedliche Genauigkeit in x' - und y' -Richtung zu erwarten, der tatsächliche Genauigkeitsunterschied ist jedoch meistens nicht bekannt, was die Festlegung unterschiedlicher a-priori Gewichte erschwert.

Die entsprechenden (Sub-) Kovarianzmatrizen lauten wie folgt, wobei meist $\sigma_{x'} = \sigma_{y'}$ definiert wird:

$$\Sigma_{x'x'} = \sigma_{x'}^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad \text{bzw.} \quad \Sigma_{y'y'} = \sigma_{y'}^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

7.2.2 Fisheye-Bildkoordinaten

Für die Messung in Fisheye-Bildern gelten im Prinzip die gleichen Aussagen wie für die Messung in zentralperspektivischen Bildern. Allerdings sollte in der Regel von etwas geringeren a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen ausgegangen werden, weil die Qualität der Abbildung, insbesondere im Randbereich, meist schlechter ist als bei Bildern, die mit zentralperspektivisch abbildenden Objektiven aufgenommen wurden. Außerdem beschreibt das geometrische Modell die tatsächliche Physik der Abbildung meist nicht vollständig, wodurch die Genauigkeit zusätzlich eingeschränkt wird. Die in Kapitel 5.2 durch räumlichen Rückwärtsschnitt ermittelte mittlere Koordinatengenauigkeit im Bildraum beträgt beispielsweise für ein mit einer 14-Megapixel-Kamera mit Nikkor-Fisheye-Objektiv in einem mit signalisierten Zielmarken ausgestatteten Testfeld aufgenommenes Fisheye-Bild ca. 0,1 Pixel. Deshalb ist auch bei einer Bildkoordinatenmessung signalisierter Punkte mit Schwerpunkt- oder Ellipsenoperator bzw. bei Messung mit Korrelations- und Matchingverfahren die Festlegung höherer a-priori Genauigkeiten nicht sinnvoll.

7.2.3 Panoramabildkoordinaten

Im Unterschied zu der Koordinatenmessung in einem Bild, welches mit einem Flächensensor aufgenommen wurde, sind durch die Verwendung von Zeilensensoren zur Bildaufnahme unterschiedliche Genauigkeiten in horizontaler und vertikaler Bildkoordinatenrichtung begründet. Insbesondere bei Rotationszeilen-Panoramakameras sind Unterschiede zu erwarten, weil das Bild in horizontaler Richtung durch den sich über einen gewissen Zeitraum drehenden Zeilensensor und in vertikaler Richtung durch die feste zentralperspektive Geometrie des Zeilensensors bestimmt wird. Dennoch lässt sich nicht sicher vorhersagen, ob Bildkoordinaten in horizontaler oder vertikaler Richtung eine höhere Genauigkeit haben, weil sich Ungenauigkeiten der Kamerarotation auf beide Koordinatenrichtungen anders auswirken. Es wird deshalb von gleichen a-priori Standardabweichungen ausgegangen, allerdings ist es aus den genannten Gründen sinnvoll, im Rahmen einer Varianzkomponentenschätzung unterschiedliche Gewichte für x' und y' -Beobachtungen zu schätzen.

Für die reine Bildkoordinatenmessung sind die gleichen Genauigkeiten möglich wie bei der Messung in zentralperspektivischen Bildern. Allerdings muss die tatsächlich erreichbare Genauigkeit der Beobachtungen aufgrund der Kamerarotation und damit zusammenhängenden Instabilitäten während der Aufnahme eingeschränkt werden. Mit der Panoramakamera KST EYESCAN M3D wurden sowohl durch räumlichen Rückwärtsschnitt als auch durch die Berechnung einer Bündelblockausgleichung basierend auf der Messung runder Zielmarken mit Schwerpunkt- und Ellipsenoperator Standardabweichungen zwischen 0,2 und 0,3 Pixel erreicht (Kapitel 5.1). Von geringeren a-priori Standardabweichungen zur Definition von Beobachtungsgewichten sollte deshalb nicht ausgegangen werden.

7.2.4 Distanzmessung terrestrischer Laserscanner

7.2.4.1 Definition fester Gewichte

Die a-priori Standardabweichung einer elektrooptischen Distanzmessung D wird in der Regel durch einen konstanten $\sigma_{D,k}$ und einen entfernungsabhängigen Anteil $\sigma_{D,e}$ nach folgender Beziehung bestimmt [Möser et. al., 2000; Sieg & Hirsch, 2000a]:

$$\sigma_D = \sigma_{D,k} + \sigma_{D,e} \cdot D \quad (7.8)$$

Die entsprechende Submatrix Σ_{DD} der Kovarianzmatrix der Beobachtungen (vgl. Gleichung 7.1) kann dann nach Anwendung der ersten binomischen Formel auf Gleichung 7.8 aus drei Teilmatrizen zusammengesetzt werden:

$$\Sigma_{DD} = \sigma_{D,k}^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix} + \sigma_{D,k} \sigma_{D,e} \cdot \begin{bmatrix} 2D_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2D_n \end{bmatrix} + \sigma_{D,e}^2 \cdot \begin{bmatrix} D_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & D_n^2 \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

Die Genauigkeitsangabe eines Tachymeters von z.B. 3 mm + 2 ppm für die Messung auf einen Reflektor resultiert in den Anteilen der a-priori Standardabweichung $\sigma_{D,k} = 0,003$ m und $\sigma_{D,e} = 2 \cdot 10^{-6}$. Diese Vorgehensweise kann im Prinzip auch auf die Distanzmessung terrestrischer Laserscanner übertragen werden, allerdings sind dafür meistens keine genauen Herstellerangaben verfügbar, außerdem hängt die tatsächliche Distanzmessgenauigkeit bei der reflektorlosen Distanzmessung von einer Reihe weiterer Faktoren ab, die nur schwierig quantifizierbar sind. Diese Faktoren sind unter anderem (vgl. Kapitel 5.4.4.1):

- Art des Ziels (z.B. flache Zielmarke oder geometrischer Körper wie Kugel oder Zylinder)
- Methode der Bestimmung der Distanz (z.B. intensitäts-gewichtetes Mittel mehrerer Distanzmessungen auf eine Zielmarke oder manueller Abgriff im Intensitätsbild)
- Scanauflösung
- Strahldivergenz
- Reflektivität bzw. Beschaffenheit der Oberfläche (Material, Farbe, Rauigkeit)
- Auftreffwinkel auf die Oberfläche
- Wellenlänge des Lasers

Erfahrungswerte zeigen, dass mit terrestrischen Laserscannern, die nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeiten, Genauigkeiten zwischen 2 bis 8 mm (z.B. [Meckelke et. al., 2008]) und terrestrischen Laserscannern, die mit dem Impulslaufzeitverfahren messen, Genauigkeiten zwischen 6 bis 10 mm im Entfernungsbereich bis 100 Meter möglich sind (z.B. [Mulsow et. al., 2004; Böhler & Marbs, 2004]). Impulslaufzeit-Laserscanner haben meist eine größere Reichweite, die Genauigkeit nimmt bis 1000 m etwa um die Hälfte ab und beträgt dann nur noch 12 bis 20 mm (vgl. Kapitel 3.5.2.1), entsprechend kann der entfernungsabhängige Anteil der Distanzfehlers abgeleitet werden. Diese Werte gehen davon aus, dass keine systematischen (Nullpunkt- oder Maßstabs-) Fehler vorliegen bzw. diese durch das geometrische Modell aufgefangen werden, d.h. sie beschreiben das zufällige Messrauschen.

[Teschke, 2004] beschreibt die Untersuchung des Messrauschens mit dem terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i in Abhängigkeit von der Messdistanz durch das Scannen einer ebenen Platte. Es wird zwischen einer Innenraumaufnahme mit Messdistanzen bis 30 m und einer Außenaufnahme mit einem Messbereich zwischen 50 und 1000 m unterschieden. In die Punktwolken der in verschiedenen Distanzen gescannten Platte wurde eine ausgleichende Ebene eingepasst. Die Standardabweichung der Ebenenausgleichung wurde als Wert für die Distanzmessgenauigkeit des Laserscanners interpretiert. Es wurden empirisch folgende Standardabweichungen ermittelt:

$$\begin{aligned}\sigma_D &= 7,0 \text{ mm} + 100 \text{ ppm (Distanzbereich 2 - 30 m)} \\ \sigma_D &= 9,9 \text{ mm} + 10 \text{ ppm (Distanzbereich 50 - 1000 m)}\end{aligned}\quad (7.10)$$

Die in den verschiedenen Untersuchungen ermittelten Genauigkeitswerte beziehen sich meist auf optimale Testbedingungen. Je nach tatsächlichen Bedingungen sollte die a-priori Standardabweichung in der Praxis tendenziell etwas höher angesetzt werden.

7.2.4.2 Näherungswerte für die Varianzkomponentenschätzung

Soll ein konstanter und ein entfernungsabhängiger Fehleranteil eines adaptiven stochastischen Modells innerhalb einer Varianzkomponentenschätzung ermittelt werden, wird zur Vereinfachung die mittlere Teilmatrix in Gleichung 7.9 weggelassen. Das stochastische Modell ist dann wie folgt definiert [Sieg & Hirsch, 2000a] und unterscheidet sich von Gleichung 7.8 nur darin, dass die beiden Fehleranteile sich nicht auf die Standardabweichungen, sondern auf die Varianzen beziehen:

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_{D,k}^2 + \sigma_{D,e}^2 \cdot D^2} \quad (7.11)$$

Ob es überhaupt möglich ist, neben dem konstanten Fehleranteil auch einen entfernungsabhängigen Anteil zu schätzen, hängt davon ab, inwieweit eine ausreichende Anzahl unterschiedlich langer Strecken, verteilt über den gesamten Messbereich des Laserscanners, zur Verfügung steht.

Alternativ ist es auch möglich, die Verhältnisse der Genauigkeiten zwischen den einzelnen Distanzbeobachtungen fest vorzugeben, und nur das Genauigkeitsniveau der gesamten Beobachtungsgruppe zu schätzen. Für jede Distanzbeobachtung D_i wird eine Standardabweichung m_i vorab festgesetzt, geschätzt wird nur die Varianz σ_D^2 :

$$\Sigma_{DD} = \sigma_D^2 \cdot \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & \ddots & \\ & & m_n \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

7.2.5 Winkelmessung terrestrischer Laserscanner

7.2.5.1 Festlegung fester Gewichte

Auch die a-priori Standardabweichung der Horizontal- und Vertikalwinkelmessung wird bei Theodoliten bzw. Tachymetern aus zwei Komponenten zusammengesetzt, der Genauigkeit der Winkelmessung des Messgerätes und einer Zentrier- und Anzielgenauigkeit [Möser et. al., 2000]:

$$\sigma_\alpha = \sigma_{\alpha,k} + \frac{\sigma_{\alpha,e}}{D} \cdot \rho \quad \text{bzw.} \quad \sigma_\beta = \sigma_{\beta,k} + \frac{\sigma_{\beta,e}}{D} \cdot \rho \quad \text{mit} \quad \rho = \frac{200 \text{ gon}}{\pi} \quad (7.13)$$

Der von der Distanz D umgekehrt proportional abhängige Fehleranteil ist bei Messung diskreter Punkte mit einem terrestrischen Laserscanner in Frage zu stellen, da keine Anzielung durch einen Beobachter erfolgt. Dennoch kann es z. B. bei der Messung einer signalisierten Zielmarke durch eine automatische intensitäts-gewichtete Mittelbildung mehrerer Punkte einer Punktwolke zu einem mit der Distanz variierenden Fehleranteil kommen. Allerdings fällt die quantitative a-priori Abschätzung der Fehleranteile und des Gesamtfehlers schwer, weil diese wie auch bei der Distanzmessung von sehr vielen verschiedenartigen Faktoren abhängig ist.

Bei einem terrestrischen Laserscanner ist, wie auch bei einer Rotationszeilen-Panoramakamera, die Zuordnung unterschiedlicher Genauigkeiten für die Horizontal- und Vertikalwinkelmessung durchaus sinnvoll, weil für die jeweilige Messung unterschiedliche Messeinrichtungen verantwortlich sind. Beispielsweise erfolgt die Vertikalwinkelmessung bei dem Laserscanner Riegl LMS-Z420i durch einen Winkelabgriff an einem sehr schnell rotierenden Polygonrad, während die Horizontalwinkelmessung durch elektronischen Abgriff an dem wesentlich langsamer rotierenden Instrumentenoberbau erfolgt (vgl. Kapitel 3.5.3.1).

Die Genauigkeit der Winkelmessung hängt unter anderem von der Winkelauflösung des Laserscanners ab. Die kleinste einstellbare Winkelauflösung beträgt beispielsweise beim Riegl LMS-Z420i in horizontaler und vertikaler Richtung $0,004^\circ$ ($0,070 \text{ mrad}$). Die maximale Auflösung des Winkelabgriffs beträgt für den Horizontalwinkelabgriff $0,002^\circ$ ($0,035 \text{ mrad}$) und für den Vertikalwinkelabgriff $0,0025^\circ$ ($0,044 \text{ mrad}$). Berücksichtigt werden muss außerdem die Strahldivergenz von $0,014^\circ$ ($0,25 \text{ mrad}$), die bei zunehmender Messdistanz zu einem größeren Laserspot auf der Objektoberfläche führt [Riegl, 2007].

Eine von [Teschke, 2004] durchgeführte Untersuchung dieses Riegl-Laserscanners zeigt die tatsächlich erreichbaren Genauigkeiten der Winkelmessung. Dafür wurden mehrere horizontale und vertikale, senkrecht zur Aufnahme- und Ausrichtung angeordnete Distanzen mehrfach durch Koordinatendifferenzen bestimmt, indem die Mittelpunkte der retro-reflektierenden Endpunkte der Strecken durch eine intensitäts-gewichtete Schwerpunktbestimmung ermittelt wurden. Die Wiederholgenauigkeit der Streckenbestimmung wird als Standardabweichung der Winkelmessung interpretiert. Der Wert bezieht sich allerdings auf die Winkelmessung an beiden Endpunkten, deshalb muss dieser noch durch $\sqrt{2}$ geteilt werden, um die einfache Winkelmessgenauigkeit ableiten zu können. Die Standardabweichung der Horizontalwinkelmessung wurde mit $0,019 \text{ mrad}$ und die der Vertikalwinkelmessung mit $0,017 \text{ mrad}$ bestimmt. Das zeigt, dass durch die Nutzung der Redundanz bei Anwendung eines Schwerpunktoperators auf die Punktwolke einer Zielmarke eine höhere Genauigkeit als die

eingestellte Winkelauflösung möglich ist, ähnlich wie bei der Subpixel-Koordinatenmessung in digitalen Bildern. Der Vergleich der ermittelten Distanzen mit Soll-Strecken zeigt allerdings deutlich größere Abweichungen, insbesondere bei der Vertikalwinkelmessung wird die Abweichung zur Soll-Distanz umso größer, je steiler die Visur ist. Dies deutet auf einen systematischen Fehlereinfluss hin, der durch Zusatzparameter im geometrischen Modell (z.B. Parameter der vertikalen Teilkreisexzentrizität c_{TI}) kompensiert werden kann (vgl. Kapitel 4.5.3).

Mit den angeführten Herstellerangaben bezüglich der Winkelmessung und den durchgeführten Tests zur Winkelmessgenauigkeit wird die Schwierigkeit deutlich, eine a-priori Standardabweichung abzuschätzen. In der Praxis ist es empfehlenswert, von der verwendeten Winkelauflösung auszugehen und je nach Signalisierung und Messmethode eine geringere (z.B. 1/3 der Scanauflösung bei intensitäts-gewichteter Schwerpunktbestimmung) oder höhere Standardabweichung (z.B. 2-fache Scanauflösung bei manueller Messung im Intensitätsbild) anzusetzen. Die Einheit der Winkelbeobachtungen und deren Standardabweichungen ist entweder Radiant oder Grad bzw. Gon, ggf. muss im stochastischen Modell der Umrechnungsfaktor ρ berücksichtigt werden (Gleichung 7.13).

7.2.5.2 Näherungswerte für die Varianzkomponentenschätzung

[Sieg & Hirsch, 2000a] schlägt für die Messung mit Tachymetern das folgende stochastische Modell (analog zu Gleichung 7.11) für die Varianzkomponentenschätzung vor, bei dem sich der konstante und der entfernungsabhängige Fehleranteil im Gegensatz zu Gleichung 7.13 auf die Varianzen anstatt auf die Standardabweichungen beziehen:

$$\sigma_{\alpha} = \sqrt{\sigma_{\alpha,k}^2 + \frac{\sigma_{\alpha,e}^2}{D^2} \cdot \rho^2} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{\beta} = \sqrt{\sigma_{\beta,k}^2 + \frac{\sigma_{\beta,e}^2}{D^2} \cdot \rho^2} \quad (7.14)$$

Damit lässt sich die Submatrix für die Horizontalwinkelmessung Σ_{aa} (und in gleicher Weise für die Vertikalwinkelmessung $\Sigma_{\beta\beta}$) wie folgt in zwei Teilmatrizen unterteilen:

$$\Sigma_{aa} = \sigma_{\alpha,k}^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix} + \sigma_{\alpha,e}^2 \cdot \begin{bmatrix} D_1^{-2} \rho^2 & & \\ & \ddots & \\ & & D_n^{-2} \rho^2 \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

Die Trennung in einen konstanten und entfernungsabhängigen Anteil ist für die Winkelmessung terrestrischer Laserscanner nicht unbedingt sinnvoll, kann allerdings innerhalb eines adaptiven Ansatzes für die Varianzkomponentenschätzung getestet werden, wenn genügend unterschiedliche Distanzen zur Verfügung stehen.

In jedem Fall sollte die Varianzkomponentenschätzung die Aufspaltung der horizontalen und vertikalen Beobachtungen in unterschiedliche Beobachtungsgruppen erlauben, für die dann jeweils eine individuelle Standardabweichung bzw. ein Beobachtungsgewicht geschätzt wird. Die weitere Aufspaltung entsprechend Gleichung (7.15) kann optional, zumindest zu Testzwecken, vorgenommen werden. Ein alternativer Ansatz wie bei den Distanzbeobachtungen entsprechend Gleichung (7.12) ist ebenfalls möglich.

7.3 Varianzkomponentenschätzung

Werden ausschließlich Beobachtungen des gleichen Typs und mit gleicher Genauigkeit ausgeglichen, ist es ausreichend, als Gewichtsmatrix eine Einheitsmatrix zu definieren und die in der Ausgleichung ermittelte a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit $\hat{s}_0$ zur Beurteilung der Genauigkeit der Beobachtungen zu verwenden. Diese Verfahrensweise ist allerdings bei der gemeinsamen Ausgleichung verschiedener Messgrößen mit unterschiedlichen Genauigkeiten nicht sinnvoll, weil einzelne Beobachtungen zu stark oder zu gering an der Ausgleichungsberechnung beteiligt werden. Das kann dazu führen, dass die Ausgleichung entweder überhaupt nicht konvergiert oder die Ausgleichungsergebnisse das Genauigkeitspotenzial der Beobach-

tungen nicht ausschöpfen. Deshalb müssen Gewichte entsprechend der tatsächlichen Genauigkeitsverhältnisse der einzelnen Beobachtungstypen festgelegt werden (Kapitel 7.2). Das Problem dabei ist, dass diese a-priori Genauigkeiten meist nur unzureichend bekannt sind und außerdem sehr stark von den aktuellen Messbedingungen und nicht quantifizierbaren Faktoren abhängen, wodurch meist auch die Festlegung fester Gewichte nicht zu optimalen Ausgleichungsergebnissen führt [Welsch, 1984].

Eine Lösung bietet hier das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung, bei der anstelle der a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit als einzige globale Größe des stochastischen Modells bei gewöhnlichen Ausgleichungsansätzen, mehrere Varianzkomponenten geschätzt werden. Jeder Gruppe von gleichgenauen Beobachtungen kann dabei eine Varianzkomponente zugeordnet werden, deren Wert ermittelt wird. Erst dadurch wird der Informationsgehalt – insbesondere bei stark heterogenen Beobachtungsmaterial – vollständig genutzt, was zu optimalen Ausgleichungsergebnissen führt. Dies gilt vor allem auch für die Kombination terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten, deren Potenzial in einer gemeinsamen Ausgleichung, welches aus der Komplementarität ihrer Eigenschaften hervorgeht, erst durch die Integration der Varianzkomponentenschätzung in die Bündelblockausgleichung ausgereizt werden kann.

Um die zusätzlichen Parameter eines erweiterten stochastischen Modells durch eine Varianzkomponentenschätzung zu ermitteln, wird vorausgesetzt, dass genügend redundante Informationen vorliegen. Dies sollte bei den meisten photogrammetrischen und geodätischen Netzen der Fall sein.

Die Aufteilung in unterschiedliche Beobachtungsgruppen mit einer individuell zu schätzenden Varianzkomponente kann insbesondere sinnvoll sein, bei der gemeinsamen Ausgleichung von:

- Beobachtungen unterschiedlichen Typs (z.B. Distanzen, Winkel, Bildkoordinaten)
- Beobachtungen mit unterschiedlichen zugrunde liegenden geometrischen Modellen,
- Beobachtungen des gleichen Typs, aber unterschiedlicher Genauigkeit der Messgeräte (z.B. bei Kameras mit unterschiedlicher Auflösung),
- Beobachtungen unterschiedlicher Messgeräte des gleichen Typs,
- Beobachtungen unterschiedlicher Objektpunkte (natürliche, signalisierte Punkte) oder
- unterschiedlichen Beobachtungen eines Messgerätes, mit individueller Charakteristik (z.B. Aufteilung der Horizontal- und Vertikalwinkelmessung oder Trennung der x' - und y' -Koordinaten bei Rotationszeilenkameras).

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 7.2 können die Varianzen bestimmter Beobachtungstypen auf verschiedene Fehleranteile zurückzuführen sein. In diesem Fall ist die Schätzung eines erweiterten stochastischen Modells mit adaptiven Varianzkomponenten möglich. Dabei werden die Kovarianzmatrizen eines Beobachtungstyps in weitere Teilmatrizen aufgeteilt, z.B. bei der getrennten Schätzung einer konstanten und entfernungsabhängigen Varianzkomponente der Distanzmessung (Kapitel 7.2.4.2) oder der Winkelmessung (Kapitel 7.2.5.2).

Für die Schätzung der Varianzkomponenten werden Näherungswerte benötigt. Deshalb sollte für jede Beobachtungsgruppe vorab entsprechend Kapitel 7.2 eine a-priori Standardabweichung bestimmt werden, die dann allerdings nicht unmittelbar zur Berechnung eines Beobachtungsgewichtes herangezogen wird, sondern nur als Startwert für die Varianzkomponentenschätzung dient. Aus den geschätzten Varianzkomponenten wird dann eine Gewichtsmatrix abgeleitet, die in der Ausgleichungsberechnung verwendet wird.

Die aus den geschätzten Varianzkomponenten abgeleiteten Standardabweichungen entsprechen bei einer konvergierenden Varianzkomponentenschätzung (per Definition) den a-posteriori Standardabweichungen der ursprünglichen Beobachtungen nach der Ausgleichungsberechnung. Diese lassen eine realistische Beurteilung der Genauigkeit der Beobachtungen zu. Dadurch ist beispielsweise ein Genauigkeitsvergleich unterschiedlicher Messgeräte möglich oder die Untersuchung der Abhängigkeit der Genauigkeit einzelner Beobachtungen von bestimmten Faktoren. Ohne Varianzkomponentenschätzung wäre das Verhältnis zwischen den a-posteriori-

ri Standardabweichungen und den empirisch festgelegten a-priori Standardabweichungen immer gleich, was deren Aussagekraft erheblich einschränken würde.

Für die qualitative Beurteilung des stochastischen Modells ist es auch möglich, Genauigkeitsmaße für die Varianzkomponenten mitzuschätzen. Damit lässt sich die Signifikanz der einzelnen Varianzkomponenten der Beobachtungsgruppen überprüfen. Dies ist bei der Analyse bestimmter Fehleranteile in einem erweiterten stochastischen Modell mit adaptiven Varianzkomponenten sinnvoll, beispielsweise bei der Untersuchung der Frage, ob die Genauigkeit der Distanzmessung von der Distanz abhängig ist, also ob ein entfernungsabhängiger Fehleranteil existiert.

Für die theoretische Herleitung der Varianzkomponentenschätzung sei auf die entsprechende Literatur verwiesen. Erste Ansätze werden in [Kubik, 1967; Ebner, 1972] beschrieben. Diese wurden durch [Grafarend, 1978] aufgegriffen und weiter spezifiziert und in [Förstner, 1979; Oswald, 1992] optimiert. Eine detaillierte Herleitung ist darüber hinaus z.B. in [Welsch, 1984] und [Koch, 2004] zu finden. Die praktische Anwendung der Varianzkomponentenschätzung findet man in zahlreichen Veröffentlichungen, z.B. in [Sieg & Hirsch, 2000b] bei der Anwendung in ingenieurgeodätischen Netzen, in [Klein, 2001] für die Feldprüfung geodätischer Instrumente und in [Rietdorf, 2005] bei der Untersuchung eines terrestrischen Laserscanners. Die Berücksichtigung einer Varianzkomponentenschätzung in einer photogrammetrischen Bündelblockausgleichung, namentlich dem Programmpaket BINGO, wird in [Kruck, 1983] beschrieben.

7.3.1 Modell der Varianzkomponentenschätzung

In diesem Kapitel soll das Modell der Varianzkomponentenschätzung (VKS) vorgestellt werden, insbesondere soll auf das Prinzip und das Berechnungsschema näher eingegangen werden. Es ist theoretisch möglich, neben den Varianzkomponenten auch Kovarianzkomponenten zu schätzen, um daraus Korrelationen zwischen den Beobachtungen ableiten zu können. Nach [Sieg & Hirsch, 2000] ist das Schätzen von Kovarianzen in der Praxis allerdings nicht sinnvoll, zum einen, weil die Struktur der Kovarianzmatrix zu großen Teilen bereits a-priori bekannt sein müsste, was oft nicht der Fall ist, und zum anderen, weil sehr viele Messwerte benötigt werden. Deshalb wird im Folgenden nur die Schätzung von Varianzkomponenten erläutert.

Ziel der Varianzkomponentenschätzung ist es, Werte für die Varianzkomponenten σ_i^2 der einzelnen in Kapitel 7.2 vorgestellten Teilmatrizen Σ_{ii} zu bestimmen. Der Index i steht dabei jeweils für eine Gruppe gleichgenauer Beobachtungen bzw. im erweiterten stochastischen Modell auch für jeweils einen bestimmten Fehleranteil einer Beobachtungsgruppe. Beispielsweise kann sich

- $i = 1$ auf den konstanten Fehleranteil der Laserscanner-Distanzmessung ($\sigma_1^2 = \sigma_{D,k}^2$),
- $i = 2$ auf den entfernungsabhängigen Fehleranteil der Laserscanner-Distanzmessung ($\sigma_2^2 = \sigma_{D,e}^2$),
- $i = 3$ auf die Horizontalwinkelmessung des Laserscanners ($\sigma_3^2 = \sigma_\alpha^2$),
- $i = 4$ auf die Vertikalwinkelmessung des Laserscanners ($\sigma_4^2 = \sigma_\beta^2$),
- $i = 5$ auf die horizontalen und Bildkoordinaten in einem Panoramabild ($\sigma_5^2 = \sigma_{x'}^2$),
- $i = 6$ auf die vertikalen Bildkoordinaten in einem Panoramabild ($\sigma_6^2 = \sigma_{y'}^2$) und
- $i = 7$ auf die horizontalen und vertikalen Bildkoordinaten in einem zentralperspektiven Bild ($\sigma_7^2 = \sigma_{x',y'}^2$)

beziehen. Die Liste kann je nach beteiligten Aufnahmegeräten und entsprechenden Fehleranteilen beliebig erweitert werden, u.a. für die gleichzeitige Nutzung mehrerer (zentralperspektiver) Kameras mit unterschiedlicher Genauigkeit. Allerdings erfordert das Schätzen sehr vieler Varianzkomponenten eine hohe Anzahl von Beobachtungen in jeder Beobachtungsgruppe.

Die einzelnen Teilmatrizen Σ_{ii} (vgl. Gleichung 7.1) werden so zu einer Matrix V_i erweitert, dass ihre Dimension der Anzahl aller Beobachtungen entspricht, wobei die Hauptdiagonalelemente der zugehörigen Be-

obachtungen einen Wert entsprechend ihrem stochastischen Modell (z.B. Eins) erhalten und die der anderen Beobachtungsgruppen Null gesetzt werden (Gleichung 7.16):

$$V_i = \begin{bmatrix} \Sigma_{ii} & 0 \end{bmatrix} = \sigma_i^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 0 & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

Alle Matrizen V_i haben damit die gleiche Dimension und die Summe aller Matrizen V_i entspricht dann der Kovarianzmatrix der Beobachtungen (Gleichung 7.17). Werden für die einzelnen Varianzkomponenten σ_i^2 Näherungswerte als Startwerte für die Varianzkomponentenschätzung eingesetzt, so ergibt sich die genäherte Kovarianzmatrix der Beobachtungen:

$$\Sigma_{LL} = \sum_{i=1}^k V_i \quad (7.17)$$

Die Varianzkomponentenschätzung wird iterativ durchgeführt (Gleichung 7.18). In der 1. Iteration dienen $(\sigma_i^2)_1$ als Näherungswerte für die Schätzungen $(\hat{\sigma}_i^2)_1$. Tatsächlich werden allerdings nur die Faktoren $(\hat{\alpha}_i^2)_1$ geschätzt, mit denen die ursprünglichen Näherungswerte multipliziert werden. Diese Produkte sind dann die Schätzungen $(\hat{\sigma}_i^2)_1$ der Varianzkomponenten und gehen als neue Näherungswerte $(\sigma_i^2)_2$ in die 2. Iteration ein. Für den Fall, dass die Berechnung konvergiert, wird dieser Vorgang so lange wiederholt, bis die geschätzten Faktoren $\hat{\alpha}_i^2$ den Wert Eins hinreichend genau erreichen. Der Wert Eins bedeutet, dass die Schätzungen der Varianzkomponenten den Näherungswerten vor der letzten Iteration entsprechen. Es findet keine Änderung mehr statt. Das Ergebnis sind dann die Varianzkomponenten der iterierten Schätzung $\hat{\sigma}_i^2$.

$$\begin{aligned} 1. \text{ Iteration: } (\sigma_i^2)_1 & \rightarrow \text{VKS} \rightarrow (\hat{\alpha}_i^2)_1 \\ 2. \text{ Iteration: } (\sigma_i^2)_2 = (\hat{\sigma}_i^2)_1 = (\hat{\alpha}_i^2)_1 \cdot (\sigma_i^2)_1 & \rightarrow \text{VKS} \rightarrow (\hat{\alpha}_i^2)_2 \\ 3. \text{ Iteration: } (\sigma_i^2)_3 = (\hat{\sigma}_i^2)_2 = (\hat{\alpha}_i^2)_2 \cdot (\sigma_i^2)_2 & \rightarrow \text{VKS} \rightarrow (\hat{\alpha}_i^2)_3 \\ \vdots & \\ n. \text{ Iteration: } (\sigma_i^2)_n = (\hat{\sigma}_i^2)_{n-1} = (\hat{\alpha}_i^2)_{n-1} \cdot (\sigma_i^2)_{n-1} & \rightarrow \text{VKS} \rightarrow (\hat{\alpha}_i^2)_n \\ \vdots & \\ \text{Abbruch nach N Iterationen: } (\hat{\alpha}_i^2)_N \sim 1 & \rightarrow \hat{\sigma}_i^2 = (\sigma_i^2)_N \end{aligned} \quad (7.18)$$

Fasst man diese iterative Berechnung in einer einzigen Gleichung zusammen, ergeben sich die Varianzkomponenten $\hat{\sigma}_i^2$ der iterierten Schätzung durch das Produkt aller Faktoren $\hat{\alpha}_i^2$ der einzelnen Iterationen multipliziert mit dem ursprünglichen Näherungswert $(\sigma_i^2)_1$ (Gleichung 7.19). Durch die iterative Vorgehensweise bei der Schätzung der Varianzkomponenten können die Varianzen unabhängig von den gewählten Näherungswerten bestimmt werden.

$$\hat{\sigma}_i^2 = (\sigma_i^2)_N = (\sigma_i^2)_1 \cdot \prod_{n=1}^{N-1} (\hat{\alpha}_i^2)_n \quad (7.19)$$

Anders als in der Literatur (z.B. [Koch, 1997]) werden die $\hat{\alpha}_i^2$ in dieser Arbeit nicht als Varianzkomponenten, sondern als Faktoren interpretiert, mit denen die Varianzkomponenten σ_i^2 schrittweise zu multiplizieren sind. Diese Interpretation wird vom Autor als konsistenter und damit als besser nachvollziehbar bewertet und äußert sich in der Beschreibung des Berechnungsschemas praktisch in einem Vertauschen der Variablen σ und α .

7.3.2 Berechnungsschema

Zuerst wird die symmetrische Matrix W aus der genäherten Kovarianzmatrix der Beobachtungen Σ_{LL} und der Koeffizientenmatrix A , die das funktionale Modell mit den aktuell verfügbaren Parametern enthält, berechnet:

$$W = \Sigma_{LL}^{-1} - \Sigma_{LL}^{-1} A \cdot (A^T \Sigma_{LL}^{-1} A)^{-1} \cdot A^T \Sigma_{LL}^{-1} \quad (7.20)$$

Anschließend werden die Hilfsgrößen

$$S = \begin{bmatrix} sp(W V_1 W V_1) & sp(W V_1 W V_2) & \cdots & sp(W V_1 W V_k) \\ & sp(W V_2 W V_2) & \cdots & sp(W V_2 W V_k) \\ & & \ddots & \vdots \\ \text{symmetrisch} & & & sp(W V_k W V_k) \end{bmatrix} \quad (7.21)$$

und der Vektor

$$q = \begin{bmatrix} l^T W V_1 W l \\ l^T W V_2 W l \\ \vdots \\ l^T W V_k W l \end{bmatrix} \quad (7.22)$$

zur Verfügung gestellt. Die geschätzten Faktoren $\hat{\alpha}_i^2$ errechnen sich aus den Hilfsgrößen S und q wie folgt:

$$\hat{\alpha} = S^{-1} \cdot q \quad \text{wobei} \quad \hat{\alpha} = [\hat{\alpha}_1^2 \quad \hat{\alpha}_2^2 \quad \cdots \quad \hat{\alpha}_k^2]^T \quad (7.23)$$

Die Matrizen V_i bzw. die Varianzkomponenten σ_i^2 werden durch Multiplikation mit den geschätzten Faktoren $\hat{\alpha}_i^2$ aktualisiert und dienen als neue Näherungswerte für die nächste Iteration:

$$(V_i)_{n+1} = (\hat{\alpha}_i^2)_n \cdot (V_i)_n \quad \text{bzw.} \quad (\sigma_i^2)_{n+1} = (\hat{\alpha}_i^2)_n \cdot (\sigma_i^2)_n \quad (7.24)$$

Aus den neuen Matrizen V_i werden für die nächste Iteration wieder eine genäherte Kovarianzmatrix der Beobachtungen Σ_{LL} (Gleichung 7.17) erstellt und die Berechnungsschritte (Gleichungen 7.20 bis 7.24) mit den aktualisierten Werten wiederholt durchgeführt. Die Konvergenz ist erreicht, wenn die Elemente des Vektors $\hat{\alpha}$ sich ausreichend dem Wert Eins angenähert haben (nach $n = N$ Iterationen). Dafür wird in der Regel ein Abbruchkriterium eingeführt, wie zum Beispiel:

$$1 - 10^{-4} < \hat{\alpha}_i^2 < 1 + 10^{-4} \quad (7.25)$$

Die Varianzkomponenten der iterierten Schätzung $\hat{\sigma}_i^2$ sind dann die gesuchten Ergebnisse, die für die Festlegung der Gewichtsmatrix P entsprechend Gleichung (7.3) genutzt werden können. Für die a-priori Varianz der Gewichtseinheit σ_0^2 kann dann ein beliebiger Wert (üblicherweise Eins) vorgegeben werden, der per Definition dem Schätzwert der Varianz der Gewichtseinheit nach der Ausgleichung $\hat{s}_0^2$ entsprechen muss. Ist dies der Fall, wurde die Varianzkomponentenschätzung richtig durchgeführt, d.h. es wurden Beobachtungsgewichte in die Ausgleichung eingeführt, die weder zu optimistisch noch zu pessimistisch sind.

Es ist auch möglich, für die einzelnen Varianzkomponenten $\hat{\sigma}_i^2$ deren Varianzen V bzw. deren Standardabweichungen $\sqrt{V}$ als Genauigkeitsmaß mitzuschätzen. Die Varianzen der Varianzkomponenten ergeben sich nach [Koch, 1997] aus den Diagonalelementen der invertierten Matrix S und können zur Beurteilung des verwendeten stochastischen Modells herangezogen werden:

$$\begin{aligned} \hat{V}\{\hat{\sigma}_i^2\} &= \hat{V}\{(\hat{\alpha}_i^2)_N (\sigma_i^2)_N\} = (\sigma_i^2)_N^2 \hat{V}\{(\hat{\alpha}_i^2)_N\} \\ \text{mit} \quad \hat{V}\{\hat{\alpha}_i^2\} &= 2s_{ii} \quad \text{und} \quad S^{-1} = (s_{ij}) \end{aligned} \quad (7.26)$$

7.3.3 Alternative Schätzung für die ersten Iterationen

Die Schätzung nach Gleichung (7.23) kann bei ungünstig gewählten Näherungswerten für σ_i^2 negative Werte annehmen [Koch, 1981]. Um das zu verhindern, wird durch [Förstner, 1979] eine alternative Schätzung, insbesondere für die ersten Iterationen, vorgeschlagen:

$$\hat{\alpha} = H^{-1} \cdot q_H \quad (7.27)$$

Die Matrix H ist im Unterschied zu S nicht nur symmetrisch, sondern auch eine Diagonalmatrix:

$$H = \begin{bmatrix} sp(W V_1) & & & 0 \\ & sp(W V_2) & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & sp(W V_k) \end{bmatrix} \quad (7.28)$$

Zur Berechnung des Vektors q_H wird anstelle der Hilfsmatrix W die genäherte Kovarianzmatrix Σ_{LL} verwendet:

$$q_H = \begin{bmatrix} l^T \Sigma_{LL}^{-1} V_1 \Sigma_{LL}^{-1} l \\ l^T \Sigma_{LL}^{-1} V_2 \Sigma_{LL}^{-1} l \\ \vdots \\ l^T \Sigma_{LL}^{-1} V_k \Sigma_{LL}^{-1} l \end{bmatrix} \quad (7.29)$$

Im Falle der Konvergenz liefert diese Schätzung die gleichen Ergebnisse wie Gleichung (7.23). Jedoch ergeben sich hier auch bei ungünstigen Startwerten immer positive Werte. Außerdem ist der Rechenaufwand geringer, weil nur die Diagonalelemente der Matrix W genutzt werden müssen. Für diese Vorteile ist ein langsames Konvergenzverhalten in Kauf zu nehmen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, nur die erste(n) Iteration(en) mit Gleichung (7.27) zu berechnen und anschließend mit dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Berechnungsschema fortzufahren. Auf jeden Fall sollte zumindest die Berechnung der letzten Iteration mit Gleichung (7.23) erfolgen, weil aus der Matrix S auch Standardabweichungen für die geschätzten Varianzkomponenten abgeleitet werden können (Gleichung 7.26).

7.4 Fazit

Das stochastische Modell hat für die gemeinsame Ausgleichung unterschiedlicher Datentypen eine wesentliche Bedeutung. In diesem Kapitel wurde das stochastische Modell für die gemeinsame Ausgleichung der Daten von terrestrischen Laserscannern, zentralperspektiven Kameras und Fisheye-Kameras, sowie Panoramakameras erläutert. Dazu wurden zuerst alle theoretischen Aspekte als Erweiterung zu den bereits in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen dargelegt. Anschließend wurden für alle verwendeten Datentypen individuelle stochastische Modelle vorgeschlagen. Dabei wurden in Abhängigkeit von der Art der Datengewinnung (z.B. automatisch oder interaktiv) und von der Art der Objektsignalisierung konkrete Zahlenwerte für a-priori Standardabweichungen genannt. Für die Distanz- und Winkelbeobachtungen von Laserscannern wurde auf die von Tachymetern bekannten Ansätze der stochastischen Modellierung zurückgegriffen und deren Übertragbarkeit auf die Messdaten terrestrischer Laserscanner diskutiert.

Die Kombination der stochastischen Modelle der einzelnen Beobachtungstypen wird als stochastisches Modell für die integrierte Bündelblockausgleichung bezeichnet. Dabei ist vor allem das Verhältnis der Gewichte von Interesse, mit denen die Beobachtungstypen an der Ausgleichung beteiligt werden, da dieses die Ausgleichungsergebnisse in hohem Maße beeinflusst. Als sinnvoll wird in diesem Zusammenhang die Integration einer Varianzkomponentenschätzung in die Ausgleichungsberechnung erachtet, mit der Standardab-

weichungen der Beobachtungen zur Festlegung von Beobachtungsgewichten aus den Messdaten selbst ermittelt werden können. Dies führt zu einem optimalen Verhältnis der Gewichtung der Beobachtungstypen in Bezug auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ausgleichungsergebnisse.

Die Varianzkomponentenschätzung wurde aus der entsprechenden Fachliteratur, in der das Verfahren meist sehr theoretisch beschrieben wird, so aufgearbeitet, dass sie leicht in praktische Anwendungen implementiert werden kann. Die Integration der Varianzkomponentenschätzung in die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Software zur Berechnung der integrierten Bündelblockausgleichung wird im Anhang A.2 beschrieben.

8 Verifikation der integrierten Bündelblockausgleichung

Nachdem in den vorangegangenen beiden Kapiteln die integrierte Bündelblockausgleichung und die dafür notwendige Festlegung des stochastischen Modells erläutert wurden, soll die integrierte Bündelblockausgleichung in diesem Kapitel anhand von Daten terrestrischer Laserscanner und photogrammetrischer Bilddaten analysiert werden. Dabei wird unterschieden zwischen der Kombination terrestrischer Laserscannerdaten mit Panoramabilddaten (Kapitel 8.1) und der Kombination terrestrischer Laserscannerdaten mit Fisheye-Bilddaten (Kapitel 8.2). In Kapitel 8.1 wird darüber hinaus ein Berechnungsbeispiel aus der geologischen Praxis vorgestellt, bei dem terrestrische Laserscannerdaten mit Daten einer hyperspektralen Panoramakamera kombiniert werden.

In allen Berechnungsbeispielen werden die Ergebnisse hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte beleuchtet, so werden beispielsweise die Genauigkeit der berechneten Objektkoordinaten in Abhängigkeit von der Anzahl der beteiligten Aufnahmen genauso wie die Ergebnisse der Selbstkalibrierung der beteiligten Aufnahmegeräte analysiert und damit die Vorteile der Kombination verschiedenen Messinstrumente untersucht. Außerdem wird die Auswirkung unterschiedlicher stochastischer Modelle, insbesondere die Auswirkung der Varianzkomponentenschätzung auf die Berechnungsergebnisse verifiziert.

8.1 Integration terrestrischer Laserscannerdaten und Panoramabilddaten

In diesem Kapitel soll ein Berechnungsbeispiel vorgestellt werden, bei dem Daten eines terrestrischen Laserscanners, einer Panoramakamera, sowie zusätzliche zentralperspektive Bilddaten in einer gemeinsamen Bündelblockausgleichung ausgeglichen werden.

8.1.1 Datengrundlage

8.1.1.1 Testfeld

Für dieses Berechnungsbeispiel wurden Daten in dem in Kapitel 5.4.1 vorgestellten 'Kalibrierhof' aufgenommen. Die Dimensionen dieses Testfeldes sind $45 \times 45 \times 20 \text{ m}^3$. An den Fassaden der umliegenden Gebäude sind etwa 100 kreisrunde (Durchmesser: 5 cm) retro-reflektierende Zielmarken befestigt.

8.1.1.2 Laserscannerdaten

Zur Aufnahme der Laserscanner-Beobachtungen wurde der in Kapitel 3.5.3 vorgestellte terrestrische Laserscanner Riegl LMS-Z420i verwendet. Die Beobachtungen von insgesamt drei Standpunkten und die Ermittlung der Zielmarkenzentren durch Schwerpunktoperator-Messung im Intensitätsbild unter Verwendung der zum Scanner gehörenden Software RiScan Pro entspricht den Erläuterungen in Kapitel 5.4.2.2.

Die für die Bestimmung der Markenzentren verwendete Winkelauflösung beträgt horizontal $0,006^\circ$ und vertikal $0,004^\circ$. Das entspricht in einer Entfernung von 20 m einem Scan-Punktabstand am Objekt von 2,1 mm (horizontal) und 1,4 mm (vertikal). Allerdings muss dabei noch der Strahldurchmesser berücksichtigt werden, der ca. 15 mm beträgt bei einem angenommenen Durchmesser beim Verlassen des Gerätes von 10 mm und einer Strahldivergenz des Lasers von 0,25 mrad. Dadurch überlappen sich die Laserspots auf der Objektoberfläche. Aus diesem Grund lässt sich die eingestellte Winkelauflösung nicht direkt in einen Wert für die (erwartete) laterale Genauigkeit überführen.

8.1.1.3 Panoramabilddaten

Es wurden 4 hochauflösende Panoramabilder von quadratisch angeordneten Aufnahmestandpunkten im Abstand von ca. 7 m aufgenommen und ein weiteres Panorama aus der Mitte dieses Quadrates. Dazu wurde

die in Kapitel 3.2.3 vorgestellte 360°-Panoramakamera KST EYESCAN M3D metric in Verbindung mit einem 35-mm-Objektiv verwendet.

Die Größe eines Pixels im Objektraum in 20 m Distanz ergibt sich durch Multiplikation der Entfernung mit dem Verhältnis aus Pixelgröße auf dem Sensor und Brennweite des Objektivs und beträgt 4 mm. Obwohl die retro-reflektierenden Zielmarken mit einer sich mit der Kamera drehenden Beleuchtung aktiv beleuchtet wurden, war der Kontrast der Marken im Bild meistens zu gering, um mit automatisch arbeitenden Subpixel-Operatoren das Markenzentrum zu messen. Vielmehr musste der Markenmittelpunkt dann manuell gemessen werden, die geschätzte Genauigkeit beträgt etwa 0,5 bis 1 Pixel also 2 bis 4 mm in 20 m Distanz.

8.1.1.4 Zentralperspektive Bilddaten

Zusätzlich zu den Laserscanner- und Panoramabilddaten sollen auch zentralperspektive Aufnahmen in die Berechnung einbezogen werden. Es wurden mehrere Bilder mit einer digitalen Spiegelreflexkamera Kodak DCS 14n mit 28-mm-Objektiv von unterschiedlichen Standpunkten, unter Berücksichtigung einer guten Strahlenschnittgeometrie, aufgenommen. Dazu zählen auch Aufnahmen aus den Fenstern der Gebäude in Richtung der jeweils gegenüberliegenden Fassaden, um auch vertikale Strahlenschnitte zu erreichen.

Des Weiteren wurden mehrere Bilder mit der direkt auf dem Laserscanner montierten Kamera Nikon D100 mit 14-mm-Objektiv auf allen drei Standpunkten des Laserscanners aufgenommen und in die Berechnung integriert. Die Pixelgröße am Objekt in 20 m Entfernung beträgt unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Brennweiten der verwendeten Objektive für die Kodak-Kamera 6 mm und für die Nikon-Kamera 11 mm. Trotz Verwendung des Kamera-Blitzes zur aktiven Beleuchtung der retro-reflektierenden Zielmarken war der Kontrast zwar gering aber meistens ausreichend, um eine automatische Messung mit Subpixel-Operatoren durchzuführen. Wegen des geringen Kontrastes und den oft sehr kleinen Markendurchmessern im Bild wird die Genauigkeit auf 0,1 bis 0,5 Pixel geschätzt, das entspricht 0,6 bis 3 mm (Kodak-Kamera) und 1,1 bis 5,5 mm (Nikon-Kamera).

8.1.2 Aufnahmekonfigurationen und Ergebnisse

8.1.2.1 Auswertung einer Fassade

Die folgenden Berechnungsbeispiele zeigen die Bestimmung der räumlichen Koordinaten von insgesamt 10 Objektpunkten an einer Fassade des im Kapitel 5.4.1 beschriebenen Testfeldes in einer Bündelblockausgleichung, in der die Beobachtungen von insgesamt zwei Scans und zwei Panoramen gemeinsam verwendet werden [Schneider, 2007; Schneider & Maas, 2007]. Die einzelnen Scans und Panoramen wurden von unterschiedlichen Standpunkten aufgenommen (vgl. Abbildung 8.1). Alle anderen Objektpunkte, insbesondere Punkte an den benachbarten und der gegenüberliegenden Fassade, wurden als Passpunkte verwendet. Dadurch wird ein Zwang auf das Netz ausgeübt.

Die Berechnung der Bündelblockausgleichung wurde mehrfach wiederholt, wobei die o.g. Aufnahmen in unterschiedlichen Kombinationen in die Berechnung integriert wurden (Tabelle 8.1). Innerhalb der Berechnung wurde eine Selbstkalibrierung der beteiligten Messgeräte (terrestrischer Laserscanner und Panoramakamera) durchgeführt.

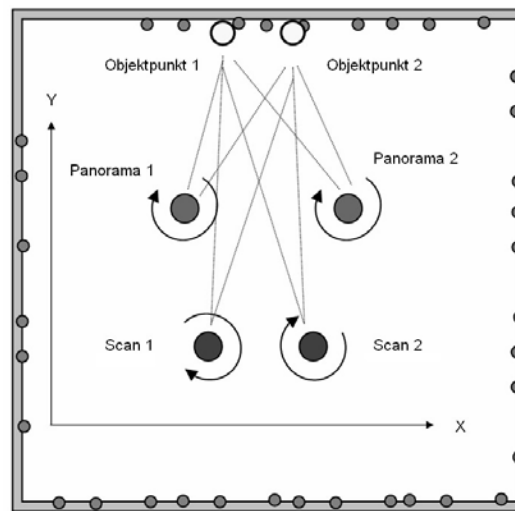


Abbildung 8.1: Aufnahmekonfiguration:
Neupunktberechnung an einer Fassade

Die Festlegung des stochastischen Modells erfolgte durch eine Varianzkomponentenschätzung. Aus diesem Grund sind in Tabelle 8.1 die geschätzten Standardabweichungen der Beobachtungstypen Distanz, Winkel und Panoramabildkoordinaten aufgeführt. Es sind für alle Berechnungen ähnliche a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen geschätzt worden, die deshalb eine Aussage über die Genauigkeit des verwendeten Aufnahmegerätes in Abhängigkeit von den konkreten Messbedingungen (z.B. Verwendung signalisierter Punkte) zulassen. Die Streckenmessgenauigkeit des Laserscanners beträgt ca. 6 mm, die Winkelmessgenauigkeit beträgt ca. 5 mgon (entspricht 1,6 mm in 20 m Entfernung). Die geschätzte Standardabweichung der Panoramabildkoordinaten beträgt ca. 0,6 Pixel (entspricht unter Berücksichtigung der Pixelgröße und der Kamerakonstante 2,4 mm in 20 m Entfernung). Die in den Kapitel 8.1.1.2 und 8.1.1.3 prognostizierten Genauigkeiten für die Laserscanner- und Panoramabildkoordinatenmessung werden damit bestätigt.

Scans	Panoramas	Unbekannte	Beobachtungen	$\hat{S}_D$ [mm]	$\hat{S}_{\alpha, \beta}$ [mgon]	$\hat{S}_{x', y'}$ [Pixel]	RMS _x [mm]	RMS _y [mm]	RMS _z [mm]	RMS _{xyz} [mm]
-	2	48	294	-	-	0,55	4,18	14,15	4,99	15,58
1	-	38	222	6,04	5,54	-	3,04	5,60	3,23	7,14
2	-	44	423	6,87	6,30	-	2,53	4,83	2,95	6,20
1	1	50	363	5,56	4,85	0,59	2,25	5,07	2,61	6,13
1	2	56	513	5,84	4,88	0,62	1,96	4,81	2,51	5,77
2	1	56	600	6,48	5,65	0,68	2,12	4,47	2,51	5,55
2	2	62	737	6,21	5,54	0,65	1,91	4,33	1,88	5,09

Tabelle 8.1: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung (Berechnung von 10 Neupunkten an einer Fassade)

Tabelle 8.1 zeigt darüber hinaus die quadratischen Mittelwerte der geschätzten Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten der 10 Neupunkte (RMS), getrennt nach den Koordinatenrichtungen. Das Koordinatensystem wurde in der Weise festgelegt, dass die Y-Richtung für alle Neupunkte die Tiefenrichtung darstellt, während die Koordinaten in X- und Z-Richtung laterale Koordinaten sind.

Es ist zu erkennen, dass die Verwendung von nur 2 Panoramabildern zu schlechten Genauigkeiten in Tiefenrichtung führt, weil die Tiefengenauigkeit unmittelbar von der Strahlenschnittgeometrie abhängig ist (Zeile

1). Die Verwendung von ein oder zwei Laserscans von unterschiedlichen Positionen resultiert in deutlich besseren Tiefengenauigkeiten, weil durch die zusätzliche Distanzmessung die durch schlechte Strahlenschnitte hervorgerufene geometrische Unsicherheit kompensiert werden kann (Zeile 2 und 3). Ähnliche Ergebnisse werden auch durch die Kombination einer Laserscanner-Aufnahme und eines Panoramabildes erzielt (Zeile 4), wobei hier angemerkt werden muss, dass das Genauigkeitspotenzial der hochauflösenden Panoramakamera nicht ausgenutzt werden konnte, weil die retro-reflektierenden Zielmarken nicht aktiv beleuchtet wurden. Dennoch konnte die Genauigkeit in lateraler Koordinatenrichtung geringfügig verbessert werden, während die Genauigkeit in Tiefenrichtung im Vergleich zur vorangegangenen Berechnung etwas geringer ist. Eine weitere Panoramaaufnahme führt genauso wie zusätzliche Laserscanner-Positionen zu geringeren Standardabweichung der geschätzten Objektpunktkoordinaten (Zeilen 5 – 7). Dabei verbessern zusätzliche Scans eher die Tiefengenauigkeiten und zusätzliche Panoramastandpunkte eher die Lagegenauigkeit der Neupunkte.

8.1.2.2 Auswertung einer 360°-Umgebung mit Passpunkten

Dieses Berechnungsbeispiel soll zeigen, ob zusätzliche zentralperspektive Bilder, die mit einer frei gehaltenen Spiegelreflexkamera unter Beachtung einer guten Strahlenschnittgeometrie aufgenommen wurden, eine Genauigkeitssteigerung ermöglichen [Schneider, 2007; Schneider & Maas, 2007]. Dazu wurden neben 3 Laserscans und 4 Panoramabildern insgesamt 18 Bilder mit der Kamera Kodak DCS 14n aufgenommen. Abbildung 8.2 zeigt die Aufnahmeanordnung schematisch, wobei nur einige der zentralperspektiven Bilder exemplarisch dargestellt sind. Weitere 18 zentralperspektive Bilder wurden mit der Kamera Nikon D100, die fest auf dem Laserscanner montiert wurde, aufgenommen (vgl. Abbildung 3.32).

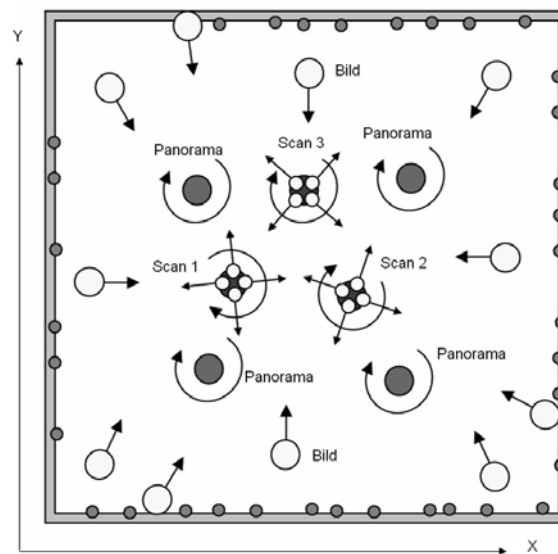


Abbildung 8.2: Aufnahmeanordnung:
Neupunktberechnung in einer 360°-Umgebung

Die in Tabelle 8.2 dargestellten Ergebnisse basieren auf den Beobachtungen von insgesamt 70 Objektpunkten, von denen 35 im Raum verteilte Punkte als Neupunkte geschätzt und 35 Punkte als Passpunkte verwendet wurden. Das Ausgleichsergebnis ist deshalb unter anderem von der Genauigkeit der Passpunkte abhängig. Für die Festlegung von Beobachtungsgewichten durch Varianzkomponentenschätzung wurden die Panorama-Bildkoordinaten und die zentralperspektiven Bildkoordinaten jeweils einer Beobachtungsgruppe mit gleichen stochastischen Eigenschaften zugeordnet. Aus diesem Grund wurden für Panorama- und zentralperspektive Bildkoordinaten unabhängige Standardabweichungen geschätzt. Für die Distanz- und Winkelbeobachtungen sowie die Panoramabeobachtungen wurden Standardabweichungen geschätzt, die mit den Ergebnissen im vorangegangenen Kapitel (vgl. Tabelle 8.1) vergleichbar sind.

Die Genauigkeit der in Bildern der Kodak-Kamera gemessenen Bildkoordinaten wurde mit ca. 0,3 Pixel bestimmt (entspricht unter Berücksichtigung von Pixelgröße und Kamerakonstante 1,7 mm in 20 m Entfernung), in Bildern der auf dem Laserscanner montierten Nikon-Kamera gemessenen Bildkoordinaten mit ca. 0,2 Pixel (entspricht 2,2 mm in 20 m Entfernung). Die Genauigkeiten von Kodak- und Nikon-Kamera haben bezogen auf den Objektraum eine ähnliche Größenordnung.

Scans	Panoramas	Bilder Kodak	Bilder Nikon	Unbekannte	Beobachtungen	Redundanz	Distanz $\hat{S}_D$ [mm]	Winkel $\hat{S}_{\alpha, \beta}$ [mgon]	Pano. $\hat{S}_{x', y'}$ [Pixel]	Zentr. $\hat{S}_{x', y'}$ [Pixel]	RMS _{XYZ} [mm]
1	-	-	-	111	249	138	5,40	8,17	-	-	7,7
3	-	-	-	123	711	588	5,22	5,62	-	-	3,61
3	-	18	-	238	1351	1113	5,27	5,76	-	0,30	3,19
3	-	-	18	238	1479	1241	5,19	5,70	-	0,18	3,12
3	4	-	-	154	1319	1165	5,19	5,45	0,59	-	2,82
3	4	18	-	269	1959	1690	5,23	5,55	0,59	0,29	2,48
3	4	-	18	269	2087	1818	5,20	5,63	0,60	0,19	2,47

Tabelle 8.2: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung (Berechnung von 35 Neupunkten in 360°-Umgebung)

In Tabelle 8.2 sind als Berechnungsergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung die mittleren quadratischen Abweichungen der Neupunkte aufgeführt. Da diese Punkte in der gesamten 360°-Umgebung verteilt sind, ist eine eindeutige Zuordnung zwischen der (kartesischen) Koordinatenrichtung und der Tiefen- bzw. Lagerichtung nicht global möglich, sondern kann nur getrennt nach den vier Fassaden des Testfeldes oder für alle Punkte individuell erfolgen. Aus diesem Grund ist in der Tabelle nur das quadratische Mittel der Standardabweichungen aller Koordinatenrichtungen zusammengefasst aufgeführt (RMS_{XYZ}), das im Folgenden zur Beurteilung der Ausgleichungsergebnisse herangezogen werden soll. Es wurden mehrere Berechnungen durchgeführt, wobei die Aufnahmen der verschiedenen Aufnahmegeräte schrittweise hinzugefügt wurden. Für die ersten beiden Berechnungen (Zeilen 1 und 2) wurden lediglich die 1 bzw. 3 Laserscans von unterschiedlichen Positionen verwendet. Bei der dritten Berechnung wurden zusätzlich 18 gut verteilte mit der Kodak-Kamera aufgenommene zentralperspektive Bilder hinzugefügt, wodurch sich der quadratische Mittelwert der Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten etwas verbesserte. Das ist besonders auf die höhere Redundanz des zu lösenden Gleichungssystems zurückzuführen und weniger auf die damit verbundene Optimierung der Strahlenschnittgeometrie, was dadurch deutlich wird, dass das Hinzufügen der Bilder der auf dem Scanner montierten Nikon-Kamera (Zeile 4) ein ähnliches Ergebnis liefert. Werden hingegen die Beobachtungen der 3 Laserscans mit den Beobachtungen von 4 Panoramakamera-Positionen gemeinsam ausgeglichen (Zeile 5), wird eine Steigerung der Objektpunktgenauigkeit erreicht, trotz vergleichbarer Redundanz des Gleichungssystems. Die letzten beiden Zeilen (Zeile 6 und 7) zeigen, dass eine weitere Genauigkeitssteigerung der geschätzten Neupunktkoordinaten durch Hinzufügen zusätzlicher zentralperspektiver Bilder möglich ist.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass keine freie Netzausgleichung erfolgte, sondern dass die Lösung in das System vieler Passpunkte 'gezwungen' wurde, deren Genauigkeiten nicht eindeutig bekannt sind.

8.1.2.3 Auswertung einer 360°-Umgebung als freie Ausgleichung

Weil die Ergebnisse im vorangegangenen Kapitel von der Qualität der zur Datumsfestlegung verwendeten Passpunkte abhängig sind, wurden weitere Berechnungen durchgeführt, bei denen die Datumsfestlegung zwangsfrei durch eine freie Netzausgleichung erfolgte [Schneider & Maas, 2007]. Dabei wurden die 3D-Koordinaten von insgesamt 75 Objektpunkten bestimmt. Es wurden 2 bzw. 4 Laserscanner-Standpunkte, 2 Panoramakamera-Standpunkte, sowie 8 gut im Raum verteilte Bilder der Kodak-Kamera und 8 Bilder der auf dem Laserscanner montierten Nikon-Kamera schrittweise in die Berechnung integriert.

Scans	Pano- ramas	Bilder Kodak	Bilder Nikon	Unbe- kannte	Beobach- tungen	Redun- danz	Distanz $\hat{S}_D$ [mm]	Winkel $\hat{S}_{\alpha, \beta}$ [mgon]	Pano. $\hat{S}_{x', y'}$ [Pixel]	Zentr. $\hat{S}_{x', y'}$ [Pixel]	RMS_{XYZ} [mm]
2	-	-	-	239	393	154	1,71	5,68	-	-	4,09
4	-	-	-	251	813	562	1,71	5,68	-	-	2,71
2	2	-	-	257	651	394	1,70	5,68	0,49	-	2,27
2	2	8	-	310	1001	691	1,71	5,68	0,48	0,29	1,92
2	2	-	8	312	940	628	1,71	5,68	0,49	0,29	1,99
2	2	8	8	365	1313	948	1,70	5,68	0,49	0,29	1,87

Tabelle 8.3: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung (75 Neupunkte, freie Netzausgleichung)

In Tabelle 8.3 sind verschiedene Resultate der Berechnungen in unterschiedlichen Kombinationen der Aufnahmen dargestellt. Dazu gehören die durch Varianzkomponentenschätzung ermittelten Standardabweichungen der Beobachtungstypen Distanz, Winkel, Panorama-Bildkoordinaten und zentralperspektive Bildkoordinaten, sowie die quadratischen Mittelwerte der Standardabweichung der ermittelten Neupunktkoordinaten.

Zuerst wurden lediglich 2 Laserscans von unterschiedlichen Standpunkten zur Berechnung der 75 Neupunktkoordinaten genutzt. Die durchschnittliche Standardabweichung der Koordinaten (RMS_{XYZ}) wurde mit 4,09 mm bestimmt. Durch die Nutzung von 4 Laserscans von unterschiedlichen Standpunkten konnte der Wert auf 2,71 mm verringert werden. Werden stattdessen die Beobachtungen von 2 Scans und 2 Panoramabildern gemeinsam ausgeglichen, ergibt sich trotz geringerer Redundanz eine höhere Genauigkeit der geschätzten Neupunktkoordinaten (2,27 mm). Obwohl das Genauigkeitspotenzial der Panoramakamera nicht vollständig genutzt werden konnte, führt die Kombination von Laserscanner und Panoramakamera zu einer Steigerung der Genauigkeit. Der quadratische Mittelwert der Standardabweichungen der Neupunkte wurde weiter reduziert durch die Berücksichtigung zusätzlicher zentralperspektiver Aufnahmen der Kodak-Kamera bzw. der auf dem Laserscanner montierten Nikon-Kamera. Werden die Beobachtungen aller Aufnahmen simultan ausgeglichen (Tabelle 8.3, letzte Zeile) beträgt die durchschnittliche Standardabweichung der Neupunktkoordinaten ca. 1 mm in jede Koordinatenrichtung.

Die geschätzten Standardabweichungen der Beobachtungen haben, abgesehen von der Standardabweichung für die Distanzmessung, die gleiche Größenordnung wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln. Auffallend ist, dass die Werte bei allen Berechnungen sehr konstant sind. Dies zeigt, dass die durch Varianzkomponentenschätzung ermittelten Werte in Kombination mit einer freien Netzausgleichung durchaus als realistische Genauigkeiten für die Beobachtungen angesehen werden können, während die Werte in Tabelle 8.1 und 8.2 durch den Passpunktzwang 'verwaschen' werden.

Besonders die ermittelte Standardabweichung für die Messung der Distanz zur Messmarke (Markenzentrum durch Schwerpunktoperator) ist deutlich geringer als die entsprechenden Werte bei den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Berechnungen, bei denen die Datumsfestlegung durch Passpunkte 'erzwungen' wurde. Dieser Unterschied deutet auf eine Diskrepanz zwischen dem Maßstab des Referenzkoordinatensystems und dem durch die Streckenmessung des Laserscanners festgelegten Maßstabes hin. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in allen Berechnungen ein Maßstabsfaktor für die Distanzmessung als zusätzliche Unbekannte geschätzt wurde, der jedoch nur in den als freie Netzausgleichung durchgeführten Berechnungen signifikant bestimmt werden konnte.

Zwei weitere Berechnungen sollen demonstrieren, inwieweit sich die geschätzte Neupunktgenauigkeit verbessert, wenn in ein photogrammetrisches Netz, bestehend aus Panorama- und zentralperspektiven Bildern, Laserscans integriert werden (Tabelle 8.4). Die deutliche Verbesserung des RMS_{XYZ} ist zum einen auf die höhere Redundanz und zum anderen auf die Stärkung der Netzgeometrie, insbesondere hervorgerufen durch die Distanzmessung des Laserscanners, zurückzuführen.

Scans	Pano- ramas	Bilder Kodak	Bilder Nikon	Unbe- kannte	Beobach- tungen	Redun- danz	Distanz $\hat{S}_D$ [mm]	Winkel $\hat{S}_{\alpha, \beta}$ [mgon]	Pano. $\hat{S}_{x', y'}$ [Pixel]	Zentr. $\hat{S}_{x', y'}$ [Pixel]	RMS_{xyz} [mm]
-	2	16	-	323	938	615	-	-	0,47	0,29	3,15
2	2	16	-	337	1279	942	1,70	5,66	0,48	0,28	1,91

Tabelle 8.4: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung mit und ohne Laserscanner-Standpunkte (68 Neupunkte, freie Netzausgleichung)

Betrachtet man die in der Ausgleichung geschätzte Standardabweichung einzelner Neupunkte individuell und getrennt nach den Koordinatenrichtungen X, Y und Z , wird der im vorangegangenen Kapitel beschriebene Trend bestätigt, dass zusätzliche Scanner-Standpunkte besonders die Tiefengenauigkeit verbessern können und zusätzliche Panoramen oder zentralperspektive Bilder die Lagegenauigkeit. Abgesehen davon bewirkt die Verwendung unterschiedlicher Beobachtungstypen, insbesondere das Einbeziehen der Laserscanner-Distanzmessung in das photogrammetrische Netz, eine Steigerung der Zuverlässigkeit, wodurch das Erkennen von Ausreißern erleichtert wird.

8.1.3 Kalibrierung der Aufnahmegeräte

Im Folgenden werden drei unterschiedliche Berechnungen vorgestellt, in die eine Selbstkalibrierung der beteiligten Messgeräte integriert wurde, d.h. die Kalibrierparameter wurden als zusätzliche Unbekannte geschätzt. Für den Laserscanner wurden nur Zusatzparameter für die Distanz, jedoch keine Winkel-Zusatzparameter berücksichtigt.

In Tabelle 8.5 sind die geschätzten Werte der Zusatzparameter für den verwendeten terrestrischen Laserscanner, die Panoramakamera und zwei zentralperspektive Kameras, sowie deren Standardabweichungen und Signifikanzniveaus als Resultat dieser drei Berechnungen dargestellt:

- Für Berechnung a) wurden nur 2 Scans und 2 Panoramabilder genutzt (vgl. Kapitel 8.1.2.1).
- Für Berechnung b) wurden zusätzlich 16 zentralperspektive Aufnahmen verwendet, außerdem liegt den Ergebnissen eine freie Netzausgleichung zugrunde (vgl. Kapitel 8.1.2.3).
- In Berechnung c) wurden die meisten Aufnahmen in die Berechnung integriert, die Redundanz des Ausgleichungssystems ist hier am größten (vgl. Kapitel 8.1.2.2).

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass sich die Kalibrierparameter aller Messgeräte in den unterschiedlichen Berechnungsvarianten nicht signifikant unterscheiden. Die Genauigkeit der Parameter und damit deren Signifikanz ist in den meisten Fällen umso höher, je größer die Anzahl der für die Berechnung der Parameter herangezogenen Beobachtungen des jeweiligen Aufnahmegerätes ist. Aus diesem Grund sind die Standardabweichungen der Parameter in Berechnung c) am geringsten. Allerdings können Parameter, die einen Einfluss auf die Skalierung des Punktnetzes haben (Distanz-Maßstab a_l , Panorama-Kamerakonstante c), bei Berechnung einer freien Netzausgleichung genauer ermittelt werden (Berechnung b).

	a)	b)	c)
Laserscanner	2 Scans	2 Scans	3 Scans
a_0 [10^{-3} mm]	$-6,96 \pm 3,03$ (95 %)	$-5,72 \pm 2,08$ (98 %)	$-5,82 \pm 2,68$ (98 %)
a_1 [10^{-3}]	$0,13 \pm 0,11$ (80 %)	$0,24 \pm 0,08$ (99 %)	$0,23 \pm 0,09$ (99 %)
Panoramakamera	2 Panoramas	2 Panoramas	4 Panoramas
c [mm]	$35,0650 \pm 0,0023$	$35,0688 \pm 0,0016$	$35,0690 \pm 0,0034$
y_0' [mm]	$-0,6431 \pm 0,0033$ (99,9 %)	$-0,6358 \pm 0,0028$ (99,9 %)	$-0,6451 \pm 0,0025$ (99,9 %)
A_1 [10^{-5}]	$2,382 \pm 0,068$ (99,9 %)	$2,096 \pm 0,031$ (99,9 %)	$2,118 \pm 0,028$ (99,9 %)
A_2 [10^{-8}]	$-2,621 \pm 0,073$ (99,9 %)	$-2,302 \pm 0,027$ (99,9 %)	$-1,533 \pm 0,031$ (99,9 %)
C_1 [10^{-4}]	$1,26 \pm 0,12$ (99,9 %)	$1,12 \pm 0,07$ (99,9 %)	$1,09 \pm 0,08$ (99,9 %)
K [10^{-3} rad]	$10,673 \pm 0,051$ (99,9 %)	$10,674 \pm 0,032$ (99,9 %)	$10,675 \pm 0,037$ (99,9 %)
N [10^{-3} rad]	$19,26 \pm 1,93$ (99,9 %)	$18,20 \pm 1,03$ (99,9 %)	$18,52 \pm 1,75$ (99,9 %)
Nikon-Kamera		8 Bilder	18 Bilder
c [mm]	-	$14,1634 \pm 0,0098$	$14,1626 \pm 0,0053$
x_0' [10^{-3} mm]	-	$22,31 \pm 5,42$ (99,9 %)	$28,74 \pm 2,94$ (99,9 %)
y_0' [10^{-3} mm]	-	$66,95 \pm 3,43$ (99,9 %)	$66,75 \pm 1,53$ (99,9 %)
A_1 [10^{-4}]	-	$-4,089 \pm 0,032$ (99,9 %)	$-4,061 \pm 0,020$ (99,9 %)
A_2 [10^{-6}]	-	$1,082 \pm 0,017$ (99,9 %)	$1,070 \pm 0,009$ (99,9 %)
C_1 [10^{-4}]	-	$-5,30 \pm 0,97$ (99,9 %)	$-3,67 \pm 0,53$ (99,9 %)
C_2 [10^{-4}]	-	$0,13 \pm 0,88$ (-)	$1,31 \pm 0,45$ (99,0 %)
Kodak-Kamera		8 Bilder	18 Bilder
c [mm]	-	$28,2542 \pm 0,0063$	$28,2609 \pm 0,0063$
x_0' [10^{-3} mm]	-	$0,28 \pm 2,17$ (-)	$-1,28 \pm 2,87$ (-)
y_0' [10^{-3} mm]	-	$-93,00 \pm 3,68$ (99,9 %)	$-91,85 \pm 4,62$ (99,9 %)
A_1 [10^{-4}]	-	$-0,8197 \pm 0,0085$ (99,9 %)	$-0,8283 \pm 0,0085$ (99,9 %)
A_2 [10^{-6}]	-	$0,1249 \pm 0,0024$ (99,9 %)	$0,1305 \pm 0,0024$ (99,9 %)
C_1 [10^{-4}]	-	-	$1,27 \pm 0,69$ (90 %)
C_2 [10^{-4}]	-	-	$-0,27 \pm 0,61$ (-)

Tabelle 8.5: Aus der integrierten Bündelblockausgleichung resultierende Zusatzparameter für Laserscanner, Panoramakamera und zwei zentralperspektive Kameras

Es wurde an dieser Stelle nicht analysiert, inwiefern sich einzelne Parameter bzw. die Anwendung der Selbstkalibrierung insgesamt auf die Genauigkeit der Ausgleichungsergebnisse auswirken. Dies wurde bereits in Kapitel 5 untersucht, allerdings für terrestrischen Laserscanner und Panoramakamera separat. Dabei hatte sich gezeigt, dass sich durch das schrittweise Hinzufügen zusätzlicher Parameter zum geometrischen Modell die Genauigkeit der Ausgleichungsergebnisse, insbesondere der berechneten Koordinaten von Objektpunkten, beim terrestrischen Laserscanner um bis zu 20 % steigern ließ (Kapitel 5.4.3) und bei der Panoramakamera sogar um das Zwanzigfache (Kapitel 5.1.1.3). Die Größenordnung des Genauigkeitsgewinns kann auf die integrierte Bündelblockausgleichung übertragen werden. Sind allerdings Kalibrierwerte bereits vorab bekannt, können diese in die Berechnung als feste Größen eingehen, die Steigerung der Genauigkeit durch eine Selbstkalibrierung hängt dann von der Stabilität des Aufnahmegerätes und der Konstanz der Aufnahmebedingungen ab.

Das Einbeziehen einer Selbstkalibrierung in den Ausgleichungsprozess durch die Berücksichtigung zusätzlicher Parameter kann also sinnvoll sein, um die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse zu erhöhen, um die Kalibrierwerte eines Aufnahmegerätes mit hoher Genauigkeit unter den aktuellen Messbedingungen zu ermitteln oder beides gleichzeitig. Um optimale Ergebnisse zu erhalten, sollten möglichst viele Beobachtungen aus mehreren Aufnahmen in die Berechnung einbezogen werden, außerdem sollte die Berechnung als freie Netzausgleichung durchgeführt werden. Die Aufnahme-Standpunkte sollten gut im Raum verteilt sein, um eine gute Strahlenschnittgeometrie zu erreichen. Auf die Analyse von Korrelationen zwischen den Parametern

wird an dieser Stelle verzichtet. Die Kombination unterschiedlicher Aufnahmegeräte bewirkt eine Erhöhung der Zuverlässigkeit des Netzes und damit auch der ermittelten Kalibrierparameter.

8.1.4 Äußere Genauigkeit

In den bisherigen Untersuchungen der Berechnungsergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung wurden hauptsächlich die geschätzten Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten herangezogen. Diese Werte spiegeln jedoch lediglich die innere Genauigkeit der Ergebnisse wieder und sagen nicht direkt etwas über die 'Richtigkeit' der Ergebnisse aus. Die äußere Genauigkeit wird normalerweise aus dem Vergleich der ermittelten Werte mit gegebenen, meist genaueren Referenzdaten abgeleitet.

Als Referenzdaten sollen im Folgenden die mit dem Tachymeter TCR1103 ermittelten Objektpunktkoordinaten dienen (vgl. Kapitel 5.4.1). Die Genauigkeit der Streckenmessung wird mit 2 mm + 2 ppm und die Winkelmessgenauigkeit mit 1,0 mgon angegeben. Überträgt man die Winkelmessgenauigkeit in eine laterale Genauigkeit in 20 m Entfernung, ergibt sich ein Wert von 0,3 mm. Dieser Wert ist jedoch nicht realistisch, weil die Anzielgenauigkeit der kreisrunden Zielmarken ohne gekennzeichneten Mittelpunkt auf etwa 1 bis 2 mm geschätzt wird. Die Genauigkeit der Referenzkoordinaten insgesamt wird deshalb mit ca. 2 mm angenommen.

Die mit den Referenzdaten zu vergleichenden Daten sollen die geschätzten Neupunktkoordinaten der Ausgleichsberechnung aus Tabelle 8.3 (letzte Zeile) sein, bei der die Koordinaten von 75 Objektpunkten basierend auf den Beobachtungen von 2 Laserscans, 2 Panoramaaufnahmen und 16 zentralperspektiven Bildern in einer freien Netzausgleichung ermittelt wurden. Die mittlere quadratische Abweichung der Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten (RMS_{XYZ}) wurde mit 1,87 mm geschätzt. Dieser Wert zeigt, dass die Genauigkeit der Referenzkoordinaten nicht als übergeordnet genau angesehen werden kann. Weil es sich um unabhängige Messverfahren handelt, können die Unterschiede dennoch als Kriterium zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit herangezogen werden. Jedoch lässt sich dann nicht aussagen, welcher Datensatz genauer bzw. 'richtiger' ist.

Um die Koordinaten der 75 Objektpunkte vergleichen zu können, wurden die in der Bündelblockausgleichung ermittelten Daten mittels einer 3D-HELMERT-Transformation in das Koordinatensystem der Referenzdaten übertragen. Die quadratischen Mittelwerte der verbleibenden Koordinatendifferenzen ($RMS \Delta$), sowie die Maximalwerte der Koordinatendifferenzen ($MAX \Delta$) in jede Koordinatenrichtung sind in Tabelle 8.6 dargestellt. Der quadratische Mittelwert $RMS \Delta_{XYZ}$ ist größer als die geschätzte mittlere Abweichung der Neupunktkoordinaten, die als Maß für die innere Genauigkeit dient.

	X	Y	Z	XYZ
$RMS \Delta$	3,1 mm	2,7 mm	2,4 mm	4,8 mm
$MAX \Delta$	11,2 mm	10,8 mm	8,9 mm	17,9 mm

Tabelle 8.6: Vergleich der ermittelten Objektpunktkoordinaten mit Referenzkoordinaten (äußere Genauigkeit)

Abbildung 8.3 zeigt die Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen in Form von Vektoren in einer Grundrissdarstellung des verwendeten Testfeldes. Dabei ist keine systematische Abhängigkeit zwischen der Richtung der Koordinatendifferenzen von der Position im Grundriss zu erkennen. Die verbleibenden Koordinatenunterschiede sind eher zufällig verteilt.

Die Aussagekraft dieser Untersuchung ist dadurch limitiert, dass keine übergeordnet genauen Referenzkoordinaten vorliegen. Deshalb kann die äußere Genauigkeit nur durch den Vergleich von Objektkoordinaten erfolgen, die durch unabhängige Berechnungen unter Verwendung unterschiedlicher Aufnahmekonfigurationen bzw. unterschiedlicher Messgeräte ermittelt worden sind.

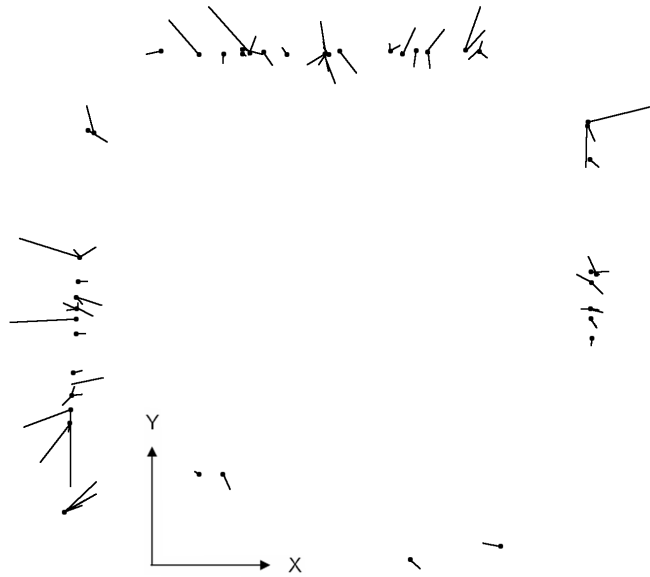


Abbildung 8.3: Vergleich der ermittelten Koordinaten mit Referenzkoordinaten (Differenzvektoren im Grundriss, Überhöhung 1:750)

8.1.5 Vergleich unterschiedlicher stochastischer Modelle

Das Ziel der folgenden Berechnungsbeispiele ist es, die Abhängigkeit der Ausgleichungsergebnisse vom verwendeten stochastischen Modell zu untersuchen. Dazu wurden die gleichen Beobachtungen (vgl. Kapitel 8.1.1) unter Verwendung unterschiedlicher stochastischer Modelle, sowohl mit als auch ohne Varianzkomponentenschätzung, in einer integrierten Bündelblockausgleichung ausgeglichen.

Es sei vorweggenommen, dass es nicht möglich war, mehrere Fehleranteile für die Laserscanner-Distanzmessung in einem erweiterten stochastischen Modell mit adaptiver Varianzkomponentenschätzung zu bestimmen. Der Grund dafür ist darin zu suchen, dass in den untersuchten Fällen keine ausreichende Anzahl unterschiedlich langer Distanzen zur Verfügung standen.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Berechnungsbeispiele beziehen sich auf die in Kapitel 8.1.2.2 vorgestellte Aufnahmekonfiguration, bei der 35 Objektpunkte einer 360°-Umgebung (Kalibrierhof) als Neupunkte geschätzt und 35 Objektpunkte als Datumspunkte verwendet wurden. Bei jeder Berechnung wurden die Beobachtungen von 3 Standpunkten eines terrestrischen Laserscanners, 4 Panorama- und 13 zentralperspektiven Bildern gemeinsam ausgeglichen. In die Berechnung wurde eine Selbstkalibrierung von Panorama- und zentralperspektiver Kamera integriert, jedoch keine Kalibrierparameter für den terrestrischen Laserscanner geschätzt.

In Kapitel 8.1.5.1 wird die Ausgleichung ohne Integration der Varianzkomponentenschätzung, aber mit unterschiedlichen Ansätzen für die Gewichtung der Beobachtungen durchgeführt. In Kapitel 8.1.5.2 wird die Varianzkomponentenschätzung in die Ausgleichung integriert, wobei eine unterschiedliche Aufteilung der Beobachtungen in Gruppen vorgenommen wurde.

Für die a-priori Standardabweichung der Gewichtseinheit wird in allen Berechnungsbeispielen $\sigma_0 = 1$ definiert. Für die Festlegung der Gewichte der einzelnen Beobachtungsgruppen bzw. als Näherungswerte für die Varianzkomponentenschätzung werden folgende a-priori Angaben als realistische Werte angesehen:

- a-priori Standardabweichung der Distanzmessung des terrestrischen Laserscanners Riegl LMS-Z420i: $\sigma_D = 7,5 \text{ mm}$
- a-priori Standardabweichung der Winkelmessung des terrestrischen Laserscanners Riegl LMS-Z420i: $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 7,5 \text{ mgon}$ (0,12 mrad) (berücksichtigt wurden folgende Parameter: eingestellte Winkelauflösung 0,07 mrad, Strahldivergenz 0,25 mrad, ca. 20 m Distanz, intensitäts-gewichte Schwerpunktbestimmung, vgl. Kapitel 8.1.1.2)
- a-priori Standardabweichung der Panoramabildkoordinaten: $\sigma_{x'} = \sigma_{y'} = 0,5 \text{ Pixel}$ (berücksichtigt wurde manuelle Messung der Zielmarkenzentren, sehr gute Qualität der Abbildung, vgl. Kapitel 8.1.1.3)
- a-priori Standardabweichung der zentralperspektiven Bildkoordinaten: $\sigma_{x'} = \sigma_{y'} = 0,2 \text{ Pixel}$ (berücksichtigt wurde Verwendung eines Blitzlichts in Kombination mit retro-reflektierenden Zielmarken, trotzdem geringer Kontrast und relativ geringer Markendurchmesser, Messung mit Schwerpunktoperator, vgl. Kapitel 8.1.1.4)

8.1.5.1 Berechnung mit unausgewogenen a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen

Mit diesen Berechnungen soll simuliert werden, dass a-priori Standardabweichungen für die unterschiedlichen Beobachtungstypen nicht genau bekannt sind und deshalb das Gewicht einzelner Beobachtungstypen zu optimistisch und anderer zu pessimistisch veranschlagt wird. Dies wird in der Praxis sehr oft der Fall sein, weil die Herstellerangaben unter den gegebenen Messbedingungen möglicherweise nicht realistisch sind und auch sonst keine Ergebnisse von vorangegangenen Genauigkeitsuntersuchungen vorliegen. Es wird hier keine Varianzkomponentenschätzung durchgeführt, um im anschließenden Kapitel 8.1.5.2 zu demonstrieren, dass die unausgewogene Festlegung von Beobachtungsgewichten durch das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung behoben werden kann.

In Berechnung a) geht die Distanz-Messung des Laserscanners, in Berechnung b) die Horizontal- und Vertikalwinkelmessung des Laserscanners, in Berechnung c) die Bildkoordinaten der Panoramabilder und in Berechnung d) die Bildkoordinaten der zentralperspektiven Bilder mit zu hohem Gewicht (zu optimistisch) in die Ausgleichung ein, während jeweils die anderen Beobachtungstypen mit zu geringem Gewicht (zu pessimistisch) eingehen. Nur Berechnung e) berücksichtigt als realistisch angesehene Werte entsprechend den Ausführungen im übergeordneten Kapitel 8.1.5.

Tabelle 8.7a zeigt die a-priori Standardabweichungen der Beobachtungsgruppen zur Festlegung der Gewichte und die geschätzten a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungen für diese 4 Berechnungsbeispiele. Das Verhältnis der a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungsgruppen untereinander ändert sich in der Ausgleichungsberechnung nicht, es findet nur eine Skalierung entsprechend dem Verhältnis der a-priori zu a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit (Tabelle 8.7b) statt. Das bedeutet, die a-posteriori Standardabweichungen bleiben zu optimistisch bzw. zu pessimistisch und lassen deshalb keine Schlussfolgerung auf die realen Genauigkeiten der beteiligten Messgeräte unter den aktuellen Messbedingungen zu.

	Gewichtung	a-priori				a-posteriori			
		Distanz σ_D [mm]	Winkel $\sigma_{\alpha, \beta}$ [mgon]	Pano. $\sigma_{x', y'}$ [Pixel]	Zentr. $\sigma_{x', y'}$ [Pixel]	Distanz $\hat{\sigma}_D$ [mm]	Winkel $\hat{\sigma}_{\alpha, \beta}$ [mgon]	Pano. $\hat{\sigma}_{x', y'}$ [Pixel]	Zentr. $\hat{\sigma}_{x', y'}$ [Pixel]
a)	Distanz zu optimistisch	2,0	10,0	1,00	0,50	2,6	13,1	1,31	0,65
b)	Winkel zu optimistisch	10,0	2,0	1,00	0,50	14,8	3,0	1,48	0,74
c)	Panorama-Koordinaten zu optimistisch	10,0	10,0	0,25	0,50	13,2	13,2	0,38	0,66
d)	Zentralpersp. Bildkoord. zu optimistisch	10,0	10,0	1,00	0,12	10,6	10,6	1,06	0,13
e)	Alle realistisch angenommen	7,5	7,5	0,5	0,2	8,27	8,27	0,55	0,22

Tabelle 8.7a: Integrierte Bündelblockausgleichung (Laserscanner / Panoramakamera) mit unausgewogenen stochastischen Modellen: a-priori und a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungstypen

	Gewichtung	$\hat{\sigma}_0$	RMS_x [mm]	RMS_y [mm]	RMS_z [mm]	RMS_{xyz} [mm]
a)	Distanz zu optimistisch	1,309	1,78	1,78	2,03	3,23
b)	Winkel zu optimistisch	1,479	2,03	2,62	1,33	3,57
c)	Panorama-Koordinaten zu optimistisch	1,320	2,12	2,31	1,32	3,40
d)	Zentralpersp. Bildkoord. zu optimistisch	1,061	2,68	3,05	1,94	4,50
e)	Alle realistisch angenommen	1,103	1,87	2,10	1,31	3,10

Tabelle 8.7b: Integrierte Bündelblockausgleichung (Laserscanner / Panoramakamera) mit unausgewogenen stochastischen Modellen: durchschnittliche Genauigkeit der geschätzten Objektpunktkoordinaten (RMS)

Tabelle 8.7b listet neben den a-posteriori Standardabweichungen der Gewichtseinheit für die Berechnungsbeispiele die RMS der geschätzten Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten auf. Diese durchschnittlichen Genauigkeiten müssen als nicht optimal bewertet werden und können – wie Berechnung e) zeigt – durch eine realistische Gewichtung der Beobachtungen verbessert werden. Allerdings wird auch deutlich, dass zwischen den RMS -Fehlern der einzelnen Koordinatenrichtungen unterschieden werden muss. Insbesondere die Tiefenrichtung (je nach Raumrichtung X - oder Y -Richtung) wird durch eine Überbetonung der Distanzmessung genauer bestimmt, während die Genauigkeit der Lagekoordinaten (in allen Fällen Z -Richtung, je nach Raumrichtung auch X - oder Y -Richtung) deutlich schlechter ist. Für alle anderen Beobachtungen (Winkel und Bildkoordinaten) gilt dieser Zusammenhang umgekehrt, weil die Tiefenrichtung nur durch den Schnitt der Winkel- oder Bildstrahlen bestimmt wird und die entsprechenden Schnittwinkel bei der verwendeten Aufnahmekonfiguration meist klein sind.

8.1.5.2 Berechnung mit Varianzkomponentenschätzung

Die 5 in diesem Kapitel vorgestellten Berechnungsbeispiele sollen das Potenzial der Varianzkomponentenschätzung demonstrieren. Die Berechnungen f) bis j) unterscheiden sich nur in der unterschiedlichen Gruppierung der Beobachtungstypen. Während für Berechnung f) jeweils Horizontal- und Vertikalwinkel, horizontale und vertikale Panoramabildkoordinaten, sowie horizontale und vertikale zentralperspektive Bildkoordinaten in einer Gruppe zusammengefasst werden, werden diese Beobachtungen in den folgenden Berechnungen voneinander getrennt und in unterschiedlichen Beobachtungsgruppen zusammengefasst (vgl. Tabelle 8.8a).

Unabhängig von der a-priori Festlegung der Standardabweichungen der Beobachtungen werden innerhalb der Varianzkomponentenschätzung ausgewogene a-posteriori Standardabweichungen geschätzt, deren Verwendung in der Ausgleichungsberechnung in optimalen Genauigkeiten für die Ausgleichungsergebnisse resultiert. Dies wird besonders durch den Vergleich der erreichten RMS der Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten mit denen der Berechnungen a) bis d) aus dem vorangegangenen Kapitel deutlich (Tabelle 8.8b).

	Beobach- tungs- gruppen	a-priori				a-posteriori			
		Distanz	Winkel	Pano.	Zentr.	Distanz	Winkel	Pano.	Zentr.
		s_D [mm]	s_α s_β [mgon]	s_x , s_y [Pixel]	s_x , s_y [Pixel]	$\hat{s}_D$ [mm]	$\hat{s}_\alpha$ $\hat{s}_\beta$ [mgon]	$\hat{s}_x$, $\hat{s}_y$ [Pixel]	$\hat{s}_x$, $\hat{s}_y$ [Pixel]
f)	4	7,5	7,5	0,50	0,20	5,23	5,57	0,60	0,24
g)	5	7,5	7,5 7,5	0,50	0,20	5,21	4,23 6,61	0,60	0,24
h)	5	7,5	7,5	0,50 0,50	0,20	5,24	5,58	0,52 0,66	0,24
i)	6	7,5	7,5 7,5	0,50 0,50	0,20	5,22	4,21 6,64	0,52 0,66	0,24
j)	7	7,5	7,5 7,5	0,50 0,50	0,20 0,20	5,23	4,21 6,64	0,52 0,66	0,26 0,23

Tabelle 8.8a: Integrierte Bündelblockausgleichung (Laserscanner / Panoramakamera) mit Varianzkomponentenschätzung: a-priori und a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungstypen

	Beobachtungs- gruppen	$\hat{s}_0$	RMS_x [mm]	RMS_y [mm]	RMS_z [mm]	RMS_{xyz} [mm]
f)	4	1,000	1,51	1,64	1,13	2,50
g)	5	1,000	1,56	1,68	1,04	2,52
h)	5	1,000	1,47	1,60	1,16	2,46
i)	6	1,000	1,52	1,63	1,05	2,46
j)	7	1,000	1,52	1,63	1,19	2,46

Tabelle 8.8b: Integrierte Bündelblockausgleichung (Laserscanner / Panoramakamera) mit Varianzkomponentenschätzung: durchschnittliche Genauigkeit der geschätzten Objektpunktkoordinaten (RMS)

Die Werte für die a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungen können zur realistischen Beurteilung der Genauigkeiten der Beobachtungen herangezogen werden und damit auch zur Beurteilung der Genauigkeiten der verwendeten Aufnahmegерäte unter den aktuellen Aufnahmebedingungen, die durch zahlreiche Faktoren beeinflusst werden (z.B. eingestellte Scanauflösung des Laserscanners, Stabilität der Aufnahmegерäte während der Aufnahme, Bildkoordinatenmessungen interaktiv oder automatisch). Die geschätzten a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungen zeigen, dass die als realistisch angenommenen a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen (vgl. übergeordnetes Kapitel 8.1.5 und Berechnung e) in Kapitel 8.1.5.1) noch nicht vollständig ausgewogen sind. Auch die deutliche Verringerung des RMS der Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten von 3,1 mm auf 2,5 mm bestätigt dies.

A-priori und a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit müssen nach der Ausgleichungsrechnung per Definition identisch sein. Ist das nicht der Fall, ist davon auszugehen, dass die Varianzkomponentenschätzung vorher nicht korrekt durchgeführt worden ist. Die in der Varianzkomponentenschätzung ermittelten Standardabweichungen der Beobachtungen werden durch die Ausgleichung nicht verändert und entsprechen deshalb den a-posteriori Standardabweichungen.

Die unterschiedliche Gruppierung der Beobachtungen hat kaum einen Einfluss auf die Ausgleichungsergebnisse, die Unterschiede in den RMS der Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten sind sehr gering. Allerdings ist es möglich, durch die Trennung von Horizontal- und Vertikalwinkelmessung des Laserscanners auch Genauigkeitsunterschiede zwischen diesen beiden Beobachtungstypen zu erkennen und damit Rückschlüsse auf die Genauigkeit der unterschiedlichen Messmethode (z.B. Methode der Strahlauslenkung, Geschwindigkeit der Strahlauslenkung) zu ziehen. Gleiches gilt auch für die Bildkoordinaten einer Panoramakamera. In beiden Fällen ist die Horizontalkomponente unter den gegebenen Bedingungen genauer als die Vertikalkomponente (vgl. Tabelle 8.8a, z.B. Berechnung i). Dies könnte den Herstellern Hinweise für die Weiterentwicklung ihrer Geräte geben.

8.1.5.3 Auswertung der Ergebnisse

Der Vergleich der Berechnungen a) bis j) macht die Vorteile der Varianzkomponentenschätzung innerhalb der integrierten Bündelblockausgleichung deutlich. Insgesamt kann die Genauigkeit der Ausgleichungsergebnisse (z.B. Objektpunktkoordinaten, Kalibrierparameter) verbessert werden, dies gilt vor allem dann, wenn die Genauigkeit der beteiligten Aufnahmegерäte unter den aktuellen Aufnahmebedingungen vorab nicht ausreichend bekannt ist, was in der Regel der Fall ist.

Im Zuge der Varianzkomponentenschätzung werden Varianzkomponenten bzw. Standardabweichungen der Beobachtungen geschätzt, die zum einen realistisch sind, und damit zur Beurteilung und zum Vergleich der verwendeten Aufnahmegерäte herangezogen werden können, und zum anderen zu optimal ausgewogenen Gewichten für die sich anschließende Ausgleichungsberechnung führen.

Darüber hinaus ist es möglich, Rückschlüsse auf die individuelle Charakteristik unterschiedlicher Aufnahme- und Messmethoden zu ziehen, zum Beispiel auf Unterschiede zwischen der Genauigkeit der Horizontal- und Vertikalwinkelmessung eines Laserscanners oder auf Unterschiede zwischen horizontalen und vertikalen Bildkoordinaten bei einer Rotationszeilen-Panoramakamera.

Weil die in der Varianzkomponentenschätzung ermittelten a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungen weitgehend unabhängig von den Näherungswerten (den a-priori Standardabweichungen) sind, kann von vornherein auf die Ableitung realistischer Werte aus Herstellerangaben oder Vergleichsmessungen verzichtet werden. Vielmehr ist es ausreichend, Standardwerte nur grob zu definieren. Für den Fall, dass die Schätzung konvergiert, ist das Ergebnis unabhängig von den Startwerten immer das gleiche.

8.1.6 Anwendungsbeispiel aus der Geologie

Neben den typischen Anwendungen terrestrischer Laserscanner in der Architektur oder in der Industrie werden diese verstärkt auch in anderen Bereichen wie beispielsweise der Geologie eingesetzt [Buckley et. al., 2008]. Im Kontrast zu den vorangegangenen Kapiteln, in denen mehrere Berechnungsbeispiele mit kombinierten Laserscanner- und Panoramakameradaten vorgestellt wurden, die in einer extra für diesen Zweck hergestellten Testumgebung aufgenommen worden sind, soll im Folgenden die Kombination mehrerer terrestrischer Laserscanner-Aufnahmen und Panoramabilder anhand eines praxisorientierten Beispiels aus der Geologie erfolgen.

8.1.6.1 Hintergrund

Die Untersuchung geologischer Aufschlüsse (Bereiche mit gut sichtbaren und unbedeckten Gesteinen) bietet Geologen die Möglichkeit, zahlreiche Informationen über die geologische Entwicklung und die Gesteins-Struktur zu gewinnen. Beispielsweise geben die an der Oberfläche sichtbaren Gesteine Hinweise auf Kohlenstoffreservoirs oder Grundwasser unter der Oberfläche. Durch herkömmliche Methoden, bei denen stichprobenartig Bohrproben aus dem Gestein entnommen werden, kann die geologische Heterogenität meist nicht erfasst werden. Deshalb werden verstärkt auch terrestrische Laserscanner eingesetzt, da sie die Geologie an der Oberfläche mit hoher räumlicher Auflösung und geometrischer Genauigkeit repräsentieren.

Aus den mit terrestrischen Laserscannern aufgenommen Daten werden oft virtuelle Aufschlüsse (z.B. durch Vermaschung und Texturierung) erzeugt, welche dann zur Ableitung relevanter räumlicher Informationen genutzt werden [Bellian et. al., 2005]. Besonders die Texturierung von Oberflächenmodellen mit Bildern digitaler Kameras führt zu einfach zu interpretierbaren Daten für die geologische Praxis [Buckley et. al., 2006]. Die Möglichkeiten der Interpretation sind jedoch meist auf die Nutzung sichtbarer Wellenlängen des Lichtspektrums beschränkt. Erst durch die Verwendung hyperspektraler Sensoren, die über das sichtbare Licht hinaus auch im Infrarot-Bereich empfindlich sind, können bestimmte Gesteine oder Gesteins-Entwicklungsstadien überhaupt erst unterschieden werden [van der Meer, 1996].

Aus diesem Grund wird für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen eine hyperspektrale Rotationszeilen-Panoramakamera mit zylindrischer Aufnahmegeometrie in Kombination mit den geometrischen Daten eines terrestrischen Laserscanners verwendet, um das Stadium der Dolomitisierung von Kalkstein (Umbildung zu Dolomit-Gestein) an einem geologischen Aufschluss zu untersuchen. Im Gegensatz zum Einsatz luft-

oder satellitengestützter Hyperspektralaufnahmen für großräumige Analysen ist die Methode der terrestrischen Hyperspektralaufnahme ein relativ neues Betätigungsfeld für die geologische Forschung. Bisher sind nur wenige Sensoren, die mit geeigneten Wellenlängen arbeiten, verfügbar. Im nächsten Kapitel wird die verwendete hyperspektrale Panoramakamera kurz vorgestellt.

Notwendig für die kombinierte geometrische und semantische Interpretation der Daten ist die exakte gemeinsame Referenzierung der verschiedenen Hyperspektral- und Laserscanner-Aufnahmen. In jedem Fall ist dazu die Nutzung eines geometrischen Modells (Kapitel 4.2) für zylindrische Panoramakameras unumgänglich. Damit ist es bereits möglich, durch einfachen räumlichen Rückwärtsschnitt die Panoramabilder zu den Laserscannerdaten mit Hilfe von Verknüpfungspunkten zu orientieren. Darüber hinaus sollen die Vorteile einer integrierten Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung und Varianzkomponentenschätzung an diesem Praxis-Beispiel untersucht werden.

8.1.6.2 Hyperspektrale Panoramakamera

Die erst vor kurzem vom norwegischen Hersteller Norsk Elektro Optikk AS entwickelte hyperspektrale Kamera HySpex SWIR-320m (Abbildung 8.4, links) ist eine Kamera mit zylindrischer Aufnahmegeometrie, wobei der rotierende Zeilensensor für kurzwelliges Infrarot (SWIR) mit einem Spektrum von 1,3 bis 2,5 μm empfindlich ist [Kurz et. al., 2008]. Dieser Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums ist besonders wichtig für viele geologische Untersuchungen, da sich hier Absorptionsbänder für verschiedene Minerale wie Kohlenstoffe oder Silikate befinden.

	Detektor	Mercury Cadmium Telluride (HgCdTe)
	Spektralbereich	1,3 – 2,5 μm
	Pixelanzahl Zeilensensor	320
	Pixelabstand	30 μm
	Vertikales Gesichtsfeld	14°
	Pixel-Gesichtsfeld	~ 0,75 mrad
	Spektrale Auflösung	5 nm
	Spektralbänder	256
	Radiometrische Auflösung	14 bit

Abbildung 8.4: Hyperspektrale Rotationszeilen-Panoramakamera HySpex SWIR-320m [Kurz et. al., 2008]

Die Besonderheit dieser Kamera liegt in der hohen spektralen Auflösung von 256 Spektralbändern mit einer Breite von jeweils 5 nm. Die geometrische Auflösung von nur 320 Pixel ist deutlich kleiner als die heutiger Digitalkameras, allerdings wird hier mit einer Steigerung der Auflösung in den nächsten Jahren bei zukünftigen Kameramodellen gerechnet. Die technischen Daten der Kamera sind in Abbildung 8.4 zusammengefasst.

Die Kombination terrestrischer hyperspektraler Daten mit terrestrischen Laserscannerdaten ist ein relativ neuer, aber viel versprechender Ansatz für die geologische Forschung, weil die Integration dieser Daten zu einer hohen räumlichen und spektralen Abdeckung geologischer Untersuchungsgebiete führt. Deshalb ist davon auszugehen, dass beide Aufnahmegерäte in Zukunft immer stärkere Verbreitung in der Geologie finden.

8.1.6.3 Datengrundlage

Die hier genutzten Daten wurden vom Centre for Integrated Petroleum Research (University Bergen, Norwegen) aufgenommen und freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Sie stammen von einem Pilotprojekt zur

Untersuchung der Eignung der hyperspektralen Panoramakamera anhand eines geologischen Aufschlusses im 'Manystones' Steinbruch im Peak District (Großbritannien) [Kurz et. al., 2008].

Es wurden mehrere hyperspektrale Panoramen und mehrere Laserscans aufgenommen, von denen 4 Panoramen und 3 Scans für die im nächsten Kapitel beschriebenen Berechnungen verwendet wurden. Die Distanz zur Oberfläche des Aufschlusses beträgt zwischen 20 und 50 m. Im Anhang A.6.2 (Abbildung A.18) sind zwei Falschfarbenbilder dargestellt, die aus drei Spektralkanälen der Panoramakamera abgeleitet wurden. Je ein Spektralbereich wird in den Farben Rot (1,720 μm), Grün (2,009 μm) und Blau (1,563 μm) abgebildet.

Der verwendete terrestrische Laserscanner ist ein Riegl LMS-Z420i (vgl. Kapitel 3.5.3), jedoch ein anderes Gerät als der für die Auswertungen in Kapitel 8.1.2 genutzte Laserscanner.

Für die Verknüpfung der unterschiedlichen Aufnahmen wurden zum einen retro-reflektierende Zielmarken und zum anderen natürliche punktförmige Objektmerkmale genutzt. Während die retro-reflektierenden Zielmarken in den Laserscans automatisch mit einem intensitäts-gewichteten Schwerpunktoperator gemessen werden konnten, wurden die natürlichen Punkte interaktiv im Intensitätsbild markiert. In den (Falschfarben-) Panoramen der hyperspektralen Panoramakamera wurden alle Punkte interaktiv gemessen.

8.1.6.4 Ergebnisse der gemeinsamen Referenzierung

Die in den Scans und Panoramabildern gemessenen sphärischen Koordinaten und Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte wurden in verschiedenen Berechnungsvarianten prozessiert (vgl. Tabelle 8.9). Dazu wurde die im Anhang A.1 vorgestellte Software verwendet.

Art der Berechnung	(Selbst-) Kalibrierung	Varianzkomponentenschätzung	a-posteriori Standardabweichung der Beobachtungen			Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten			
			Dist. $\hat{S}_D$ [mm]	Winkel $\hat{S}_{\alpha, \beta}$ [mgon]	Hyperspektr. Panorama $\hat{S}_{x', y'}$ [Pixel]	RMS_x [m]	RMS_y [m]	RMS_z [m]	RMS_{xyz} [m]
Räumlicher Rückwärtsschnitt	nein	nein	-	-	3,35	-	-	-	-
	Panoramakamera	nein	-	-	1,73	-	-	-	-
	Panoramakamera	ja	-	-	1,43 2,15	-	-	-	-
Panorama-Bündelblockausgleichung	nein	nein	-	-	2,44	0,261	0,432	0,081	0,511
	Panoramakamera	nein	-	-	0,81	0,154	0,317	0,050	0,356
	Panoramakamera	ja	-	-	0,66 0,99	0,165	0,315	0,059	0,360
Integrierte Bündelblockausgleichung	Panoramakamera	nein	19,7	197	1,97	0,046	0,032	0,038	0,068
	beide Geräte	nein	9,9	99	0,99	0,020	0,018	0,022	0,035
	beide Geräte	ja	4,5	126	0,63 0,95	0,015	0,014	0,022	0,030

Tabelle 8.9: Ergebnisse unterschiedlicher Berechnungsvarianten zur Orientierung der hyperspektralen Panoramen

Zuerst wurde die übliche Vorgehensweise nachgeahmt, bei der die Laserscanner-Aufnahmen schrittweise zueinander referenziert werden und die mit dem Laserscanner gemessenen Objektpunkte anschließend als Passpunkte für die Orientierung der Panoramen durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt genutzt werden. In der ersten Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes wurden (außer der Kamerakonstante) keine weiteren Parameter der inneren Orientierung oder sonstige Zusatzparameter mitgeschätzt. Das geometrische Modell der Panoramakamera wurde lediglich für die Berechnung der äußeren Orientierung verwendet. Die a-posteriori Standardabweichung der Beobachtungen (Bildkoordinaten im Panorama) wurde mit 3,35 Pixel geschätzt. Dies ist die im Durchschnitt zu erwartende Genauigkeit, mit der beispielsweise die Punktwolke mit den hyperspektralen Informationen unter Anwendung der durch diese Berechnung ermittelten Ergebnisse koloriert werden könnte.

Durch die Berücksichtigung des Bildhauptpunktes und weiterer Zusatzparameter im Modellansatz konnte die Standardabweichung auf 1,73 Pixel reduziert werden. Auf die Kalibrierparameter, die dabei signifikant ermittelt werden konnten, wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

Wird in den räumlichen Rückwärtsschnitt zusätzlich eine Varianzkomponentenschätzung integriert, wobei für die horizontalen und die vertikalen Bildkoordinaten unabhängige a-posteriori Standardabweichungen geschätzt werden, zeigt sich, dass die Horizontalkomponente ($1,43 \pm 0,26$ Pixel) genauer ist als die Vertikalkomponente ($2,15 \pm 0,38$ Pixel). Die Standardabweichungen der Beobachtungen, die aus den Berechnungen des räumlichen Rückwärtsschnittes resultieren, sind größer als 1 Pixel. Für ein optimales Ergebnis zur Interpretation der geologischen Gegebenheiten wäre eine Genauigkeit besser als 1 Pixel wünschenswert.

Aus diesem Grund wurde nun untersucht, ob durch die Berechnung einer Bündelblockausgleichung unter Nutzung der Panoramabildkoordinaten höhere Genauigkeiten erreichbar sind. Die mit dem Laserscanner gemessenen Objektpunkte dienen nur als Näherungswerte und zur Festlegung des Koordinatensystems für eine freie Netzausgleichung. Die a-posteriori Standardabweichungen sind in allen 3 Berechnungsvarianten (ohne Selbstkalibrierung, mit Selbstkalibrierung, mit Selbstkalibrierung und Varianzkomponentenschätzung) geringer ermittelt worden als durch die Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes. Die in der freien Ausgleichung geschätzten mittleren Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten (*RMS*) liegen allerdings im Dezimeterbereich und sind damit verhältnismäßig hoch, was auf eine relativ schlechte Strahlenschnittgeometrie der hyperspektralen Panoramabilder zurückzuführen ist. Demzufolge sind auch die Parameter der äußeren Orientierung nur mehrere Dezimeter genau. Eine optimale Referenzierung der Panoramabilder zu den Laserscannerdaten ist durch die sequentielle Berechnung (erst Verknüpfung der Laserscannerstandpunkte danach Panorama-Bündelblockausgleichung) noch nicht gewährleistet.

Abschließend wurde deshalb eine integrierte Bündelblockausgleichung berechnet, wobei neben den Panoramabildkoordinaten auch die mit dem terrestrischen Laserscanner ermittelten sphärischen Koordinaten der Objektpunkte als Beobachtungen ausgeglichen wurden. Die mittleren Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten sowie auch die Standardabweichungen der Elemente der äußeren Orientierung für alle Scans und Panoramabilder wurden nun mit Zentimetergenauigkeit bestimmt. Das Potenzial der Kombination beider Daten in einem gemeinsamen Berechnungsschritt kann jedoch erst durch die richtige Gewichtung innerhalb der Ausgleichung genutzt werden. Es ist davon auszugehen, dass die a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen zur Festlegung geeigneter Beobachtungsgewichte unter den gegebenen Aufnahmebedingungen nicht bekannt sind. Dies wird durch die Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse bei Berücksichtigung einer Varianzkomponentenschätzung deutlich, bei der für alle Beobachtungen optimale Gewichte geschätzt werden. Die a-posteriori Standardabweichungen der Panoramabildkoordinaten liegen für Horizontal- ($0,63 \pm 0,20$ Pixel) und Vertikalkomponente ($0,95 \pm 0,31$ Pixel) im Subpixel-Bereich. Bei der Bestimmung dieser Werte wurden Zusatzparameter für den terrestrischen Laserscanner im Ausgleichungsansatz berücksichtigt (vgl. Kapitel 8.1.6.5).

Insgesamt ist festzuhalten, dass eine optimale und in sich konsistente Orientierung der Laserscanner- und Panoramakamera-Standpunkte erst durch eine integrierte Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung der beteiligten Aufnahmegeräte und Varianzkomponentenschätzung möglich wird. Neben den höchsten Genauigkeiten der Ausgleichungsergebnisse im Vergleich zu den anderen Berechnungsvarianten können dadurch außerdem aktuelle Kalibrierparameter für Laserscanner und hyperspektrale Panoramakamera, sowie realistische Genauigkeiten für die beteiligten Beobachtungen ermittelt werden. Beispielsweise beträgt die Standardabweichung der Winkelmessung des Laserscanners 126 mgon, das entspricht etwa 6 cm bei einer Entfernung von 30 m. Dieser hohe Wert ist vor allem auf die interaktive Messung von unscharf definierten natürlichen Punkten im Intensitätsbild des Laserscanners zurückzuführen.

8.1.6.5 Kalibrierung

In Tabelle 8.10 sind die Kalibrierparameter für den terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i und die hyperspektrale Panoramakamera HySpex SWIR-320m aufgelistet, die innerhalb der integrierten Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung und Varianzkomponentenschätzung signifikant ermittelt wurden.

Für den terrestrischen Laserscanner sind das der Höhenindexfehler c_H , sowie die Parameter der horizontalen Teilkreisexzentrizität b_{T1} und b_{T2} in allgemeiner Fourierform. Alle Parameter wurden hoch signifikant bestimmt, das Signifikanzniveau ist in der Tabelle in Klammern angegeben. Andere Parameter konnten nicht gleichzeitig signifikant bestimmt werden, aufgrund hoher Korrelationen zwischen den Parametern untereinander. Durch Berücksichtigung der Parameter c_H , b_{T1} und b_{T2} konnten die Ausgleichungsergebnisse (Standardabweichungen der Objektkoordinaten und der äußeren Orientierung, sowie a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungen) mit etwa doppelter Genauigkeit bestimmt werden. Der Grund dafür, warum genau diese 3 Parameter signifikant sind, obwohl sie in den im Kapitel 5.4.3 beschriebenen Untersuchungen eines anderen Laserscanners des gleichen Typs kaum oder überhaupt nicht signifikant nachgewiesen werden konnten, kann nicht geklärt werden.

Terrestrischer Laserscanner	
c_H [10^{-3} mm]	$150,39 \pm 5,55$ (99,9 %)
b_{T1} [10^{-3} rad]	$-101,26 \pm 1,37$ (99,9 %)
b_{T2} [10^{-3} rad]	$-36,81 \pm 2,45$ (99,9 %)
Hyperspektrale Panoramakamera	
c [mm]	$39,5148 \pm 0,08477$
y_0' [mm]	$0,5468 \pm 0,1466$ (99,9 %)
K [10^{-3} rad]	$7,47 \pm 4,35$ (90 %)
N [10^{-3} rad]	$496,05 \pm 8,72$ (99,9 %)

Tabelle 8.10: Ergebnisse der Selbstkalibrierung für hyperspektrale Panoramakamera und terrestrischen Laserscanner

Für die hyperspektrale Panoramakamera wurden die Kamerakonstante c , die vertikale Komponente des Bildhauptpunktes y_0' , sowie die Neigung N und Kantung K der Sensorzeile bezüglich der Rotationsachse signifikant ermittelt. Auffallend sind dabei die relativ geringen Genauigkeiten (z.B. Standardabweichung der vertikalen Bildhauptpunkt Komponente 5 Pixel), der besonders hohe Wert für die Neigung der Sensorzeile ($496 \text{ mrad} \approx 28^\circ$) und dass keine Objektiv-Verzeichnung nachgewiesen werden konnte.

Die Ergebnisse zeigen, dass das geometrische Modell der Rotationszeilen-Panoramakamera die tatsächliche Geometrie der hyperspektralen Kamera noch nicht optimal beschreibt. Aufgrund der relativ geringen Anzahl von Beobachtungen in den Panoramen wurden diesbezüglich keine weiteren Untersuchungen durchgeführt.

Der um 28° nach oben geneigte Sensor beschreibt bei seiner Rotation eher einen Kegel- als einen Zylindermantel. Durch diese konstruktive Maßnahme kann der vertikale Öffnungswinkel von 14° besser ausgenutzt werden kann (vgl. Kapitel 3.4.3, Rotationszeilenkamera mit Kegelgeometrie).

8.1.6.6 Resultate für die Geologie

Die gemeinsame Referenzierung der Laserscanner- und hyperspektralen Panoramadaten ist die Basis für die weitere Prozessierung der Daten, um für die Geologie interpretierbare Ergebnisse zu erhalten. Weitere Verarbeitungsschritte der hyperspektralen Bilder sind unter anderem deren radiometrische Kalibrierung anhand von speziellen Kalibriertafeln, die gleichzeitig in die aufgenommene Szene gestellt wurden, und die Anwendung einer 'Maximum Likelihood' Klassifizierung zur Extraktion geologischer Merkmale aus den Spektralbildern. Das Klassifizierungsergebnis ist ein thematisches Bild, welches geometrisch dem Originalbild vollständig entspricht. Aus diesem Grund ist es möglich, die thematischen Bilder zum Kolorieren der Punktwolke oder zur Texturierung von Oberflächenmodellen zu nutzen.

Anhang A.6.2 (Abbildungen A.19 und A.20) zeigt die Anwendung eines solchen thematischen Bildes, in dem der Fortschritt der Dolomitisierung von Kalkstein an der Oberfläche des geologischen Aufschlusses farb-

codiert dargestellt ist. In Abbildung A.19 wurde das Klassifizierungsergebnis zum Einfärben der Laserscanner-Punktwolke und in Abbildung A.20 zur Texturierung eines Oberflächenmodells genutzt, welches durch Vermaschung der Laserscanner-Punktwolke generiert worden ist. Die durch die Kombination geometrischer Laserscannerdaten und hyperspektraler Bilddaten erzeugten Produkte können von Geologen interpretiert und validiert werden und ermöglichen dadurch interessante Schlussfolgerungen für die geologische Forschung [Buckley et. al., 2008; Kurz et. al., 2008].

8.2 Integration terrestrischer Laserscannerdaten und Fisheye-Bilddaten

Für viele Anwendungen ist die Kombination terrestrischer Laserscannerdaten mit Bilddaten, die mit einer Kamera mit Fisheye-Objektiv aufgenommen worden sind, von besonderem Interesse, weil die Gesichtsfelder von Panorama-view-Scannern (vgl. Kapitel 3.5.2.2) und Fisheye-Objektive vergleichbare Größe besitzen können. Einige Hersteller terrestrischer Laserscanner bieten deshalb die Option an, eine Kamera mit Fisheye-Objektiv direkt am Laserscanner zu montieren. Softwareseitig wird bisher meist nur die Kolorierung von Laserscanner-Punktwolken mit Hilfe der Fisheye-Farbbilder oder die Texturierung von 3D-Modellen angeboten. Dafür ist jedoch eine strenge Referenzierung zwischen den Datensätzen notwendig, die bisher meist durch einfache Anwendung eines räumlichen Rückwärtsschnittes gelöst wird.

Mit den folgenden Berechnungsbeispielen [Schneider & Schwalbe, 2008] soll das Potenzial einer gemeinsamen Bündelblockausgleichung von Beobachtungen eines terrestrischen Laserscanners und einer Fisheye-Kamera untersucht werden, wobei beide Geräte als gleichrangig betrachtet werden. Das bedeutet, dass die Beobachtungen beider Aufnahmegeräte in gleicher Weise für die Berechnung von Neupunktkoordinaten im Rahmen einer freien Netzausgleichung herangezogen werden. Gleichzeitig werden die Orientierungselemente der beteiligten Scans und Bilder bestimmt, sowie die Kalibrierung der Aufnahmegeräte durchgeführt.

8.2.1 Datengrundlage

8.2.1.1 Testfeld

Als Testfeld zur Aufnahme der für die Berechnungen verwendeten Messdaten dient der bereits in Kapitel 5.2.1 vorgestellte Kalibrierraum für Fisheye-Objektive. In diesem etwa $4 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ großen Raum, in dem sich 141 signalisierte und codierte Objektpunkte befinden, wurden mehrere Laserscans und Fisheye-Bilder aufgenommen. Für die Berechnungen wurden nicht alle Objektpunkte genutzt, sondern nur Objektpunkte, die in möglichst vielen Aufnahmen gleichzeitig sichtbar sind. Die bekannten Koordinaten der Objektpunkte wurden lediglich als Näherungswerte in die Ausgleichung eingeführt. Damit definieren sie auch das übergeordnete Koordinatensystem. Die X - Y -Ebene dieses Systems ist eine Horizontalebene, die Z -Achse zeigt senkrecht nach oben.

8.2.1.2 Laserscannerdaten

Es wurden die gleichen 6 Laserscanner-Positionen verwendet, die bereits in Kapitel 5.4.2.1 vorgestellt worden sind. Die in diesem Kapitel genannten Ausführungen zur Zielmarkenmessung gelten in gleicher Weise. Die eingestellte Winkelauflösung beträgt $0,030^\circ$, das entspricht 2 mm Punktabstand in einer Entfernung von 4 m. Die Messung der sphärischen Koordinaten der Zielmarkenmittelpunkte erfolgte durch interaktiven Abgriff im Intensitätsbild.

8.2.1.3 Fisheye-Bilddaten

Im gleichen Kalibrierraum wurden insgesamt 5 Bilder mit der 14-Megapixel-Kamera Kodak DCS 14n Pro mit einem 8 mm Nikkor Fisheye-Objektiv von den Ecken bzw. aus der Mitte des Raumes aufgenommen. Überträgt man die Pixelgröße des Sensors von $8 \mu\text{m}$ in den Objektraum, ergibt sich eine Objektauflösung von 4 mm in 4 m Distanz. Aus den RGB-Fisheye-Bildern wurde der Grünkanal verwendet, um die Bildkoordinaten mit Subpixel-Operatoren zu messen und die Punktcodierung auszuwerten (Software Aicon 3D Studio).

8.2.2 Aufnahmekonfigurationen und Ergebnisse

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Resultate der integrierten Bündelblockausgleichung unter Verwendung unterschiedlicher Laserscanner- und Fisheye-Kamera-Konfigurationen vorgestellt und analysiert. Um eine optimale Nutzung der unterschiedlichen Beobachtungstypen zu erreichen, wurde eine Varianzkomponentenschätzung für das Aufstellen des stochastischen Modells angewendet (vgl. Kapitel 7.3). Alle vorgestellten Konfigurationen wurden als freie Netzausgleichung berechnet, außerdem wurde eine Selbstkalibrierung der beteiligten Messgeräte, terrestrischer Laserscanner und Fisheye-Kamera, integriert.

8.2.2.1 Scans aus der Mitte des Raumes

Zuerst wurden zwei Laserscanner-Standpunkte aus der Mitte des Raumes (Abbildung 8.5, Konfiguration a) und zusätzlich ein Fisheye-Bild (Konfiguration b) genutzt, um die dreidimensionalen Koordinaten der in allen Aufnahmen gleichzeitig beobachteten Objektpunkte zu berechnen. Die Kombination der beiden Scans bietet annähernd das gleiche Gesichtsfeld wie das hemisphärische Fisheye-Bild.

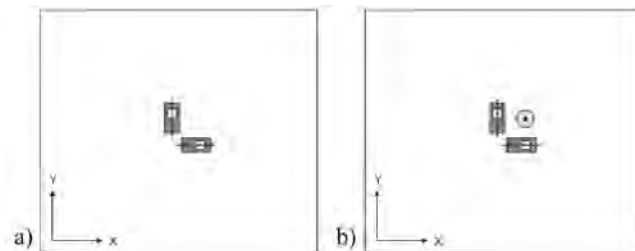


Abbildung 8.5: Aufnahme-Konfigurationen a) und b)
(Scans aus der Mitte des Raumes)

Für die Objektpunkte, die sich an der Decke des Raumes befinden, können die X - und Y -Koordinatenrichtungen als laterale Richtungen und die Z -Richtung als die Tiefenrichtung angesehen werden. Tabelle 8.11 zeigt, dass die Genauigkeit der in der Ausgleichung geschätzten Neupunktkoordinaten (RMS) durch die Verwendung des zusätzlichen Fisheye-Bildes erwartungsgemäß verbessert wird. Dies ist neben der höheren Redundanz des Normalgleichungssystems darauf zurückzuführen, dass die Fisheye-Bildkoordinaten mit Subpixel-Operatoren gemessen wurden (während die Laserscanner-Beobachtungen durch Messung im Intensitätsbild mit ganzzahliger Pixel-Genauigkeit ermittelt wurden). Die aus Berechnung b) resultierenden Werte für die Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten liegen in der Größenordnung des Punktabstandes in 4 m Distanz (entsprechend der am Laserscanner eingestellten Winkelauflösung).

	Scans	Fisheye-Bilder	Unbekannte	Beobachtungen	Redundanz	Neupunkte	RMS_x [mm]	RMS_y [mm]	RMS_z [mm]	RMS_{xyz} [mm]
a)	2	-	217	339	122	66	5,00	3,25	7,58	9,64
b)	2	1	233	457	224	66	2,69	2,00	4,47	5,59

Tabelle 8.11: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung für die Konfigurationen a) und b)

8.2.2.2 Zwei gegenüberliegende Scans

Der Zweck der im Folgenden vorgestellten Berechnungen ist es, zu analysieren, ob Laserscanner-Positionen, die einen optimalen Schnittwinkel mit den Neupunkten einschließen, zu einer Verbesserung der geschätzten Genauigkeiten führen. Dazu wurden zwei Scans von gegenüberliegenden Standpunkten aufgenom-

men (Abbildung 8.6, Berechnungen c und d). Bei den Berechnungen d) und f) wurden zusätzliche Fisheye-Bilder von jeder Laserscanner-Position aus aufgenommen. Im Gegensatz dazu wurden für die Berechnungen g) und h) jeweils zwei Laserscans und zwei Fisheye-Bilder genutzt, die in den vier Ecken des Testraumes verteilt sind, um eine optimale Strahlenschnittgeometrie zu gewährleisten.

Tabelle 8.12 fasst die Resultate der Berechnungen der in Abbildung 8.6 dargestellten Konfigurationen zusammen. Dabei ist zu beachten, dass die Berechnungen c) und d) aufgrund von Verdeckungen im Objekt auf einer geringeren Anzahl korrespondierender Objektpunkte basieren. Die sich aus diesen Berechnungen ergebenden mittleren quadratischen Abweichungen der Objektpunktkoordinaten sind deutlich geringer im Vergleich zu den Berechnungen a) und b). Diese Tatsache bestätigt, dass die Messungen konvergenter Laserscanner-Positionen, die in einer gemeinsamen Ausgleichung verarbeitet werden, zu einer Verbesserung der Genauigkeit der berechneten Objektkoordinaten führt. Dies ist damit zu begründen, dass ein Objektpunkt nicht nur durch die einfache redundante Messung der sphärischen Koordinaten bestimmt wird, sondern auch der Schnitt der Messstrahlen, die durch die auf jedem Standpunkt gemessenen Horizontal- und Vertikalwinkel aufgespannt werden, zur Bestimmung der Objektpunktkoordinaten genutzt wird (räumlicher Vorwärtsschnitt mit Winkeln). Darüber hinaus bewirkt die Berücksichtigung zusätzlicher (Fisheye-) Bilder auf jedem Laserscanner-Standpunkt eine weitere Steigerung der Genauigkeit (Berechnung e und f). Die Standardabweichung der Neupunktkoordinaten wird durch die Aufnahmekonfigurationen g) und h) nur noch wenig verringert.

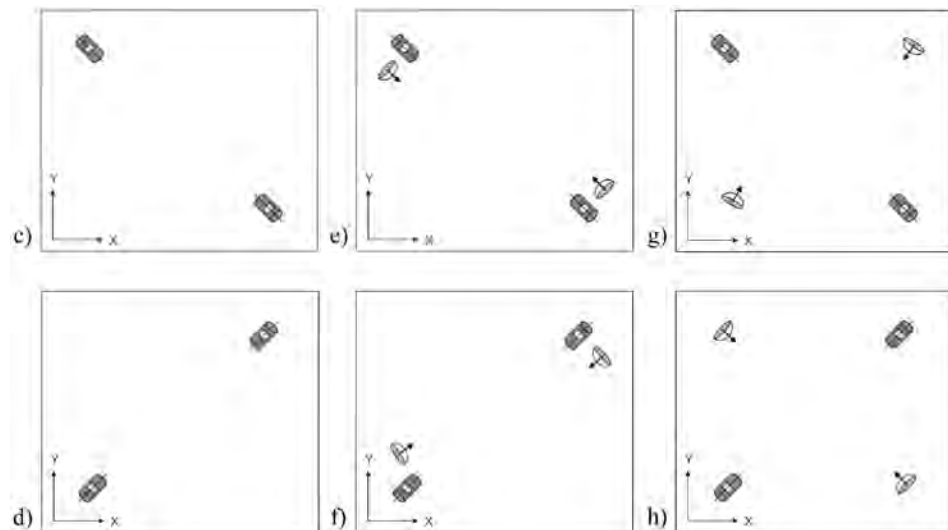


Abbildung 8.6: Aufnahme-Konfigurationen c) bis h)
(zwei gegenüberliegende Scans)

	Scans	Fisheye-Bilder	Unbekannte	Beobachtungen	Redundanz	Neupunkte	RMS_x [mm]	RMS_y [mm]	RMS_z [mm]	RMS_{xyz} [mm]
c)	2	-	178	318	140	53	1,20	1,16	1,43	2,20
d)	2	-	172	306	134	51	0,97	1,00	1,22	1,85
e)	2	2	239	605	366	66	0,66	0,55	0,88	1,23
f)	2	2	239	585	346	66	0,61	0,60	0,67	1,09
g)	2	2	239	580	341	66	0,62	0,57	0,79	1,15
h)	2	2	239	582	343	66	0,54	0,49	0,68	1,00

Tabelle 8.12: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung für die Konfigurationen c) bis h)

Diese Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass es durchaus sinnvoll ist, zusätzliche Bilder in einer Bündelblockausgleichung mit den Beobachtungen eines terrestrischen Laserscanners zu kombinieren, auch um eine höhere Genauigkeit der gegenseitigen Referenzierung und der Kalibrierung der beteiligten Geräte zu erreichen. Dies gilt vor allem wenn die Möglichkeit besteht, Verknüpfungspunkte mit Subpixel-Genauigkeit zu messen. Für den Fall, dass die Kamera mechanisch fest mit dem Laserscanner verbunden ist, ist es besonders einfach, die damit aufgenommen Bilder in die Berechnung einzubeziehen, da dann bereits meist sehr genaue Näherungswerte für die Referenzierung zwischen Kamera und Laserscanner bekannt sind.

8.2.2.3 Mehrere Scans aus den Raumecken

Um das Potenzial der gemeinsamen Ausgleichung von Beobachtungen eines terrestrischen Laserscanners und einer Kamera mit Fisheye-Objektiv zu demonstrieren, wurden weitere Aufnahmen in die Berechnung integriert (Abbildung 8.7). Zu diesem Zweck wurden zuerst die Beobachtungen von 4 (Berechnung i) und 6 Laserscans (Berechnung j) und zum Vergleich die Beobachtungen von 4 (Berechnung k) und 5 Fisheye-Bildern (Berechnung l) separat ausgeglichen. Die Berechnungen m) und n) kombinieren die Laserscans und Fisheye-Bilder in einer integrierten Bündelblockausgleichung.

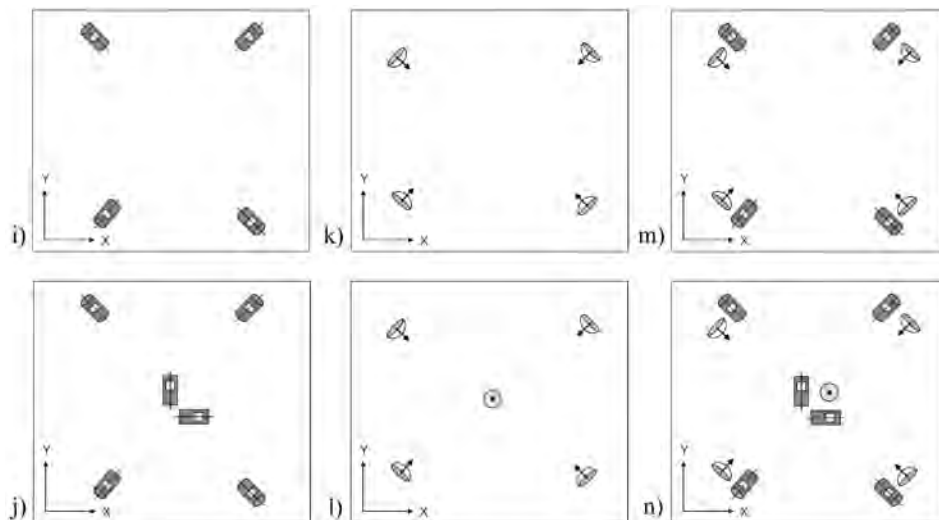


Abbildung 8.7: Aufnahme-Konfigurationen i) bis n)
(mehrere Scans aus den Raumecken)

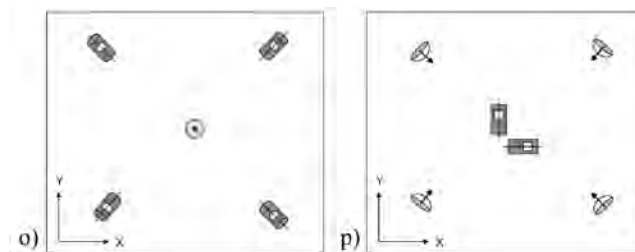
Die Anwendung der Konfigurationen i) und j), in denen ausschließlich Laserscanner-Beobachtungen ausgeglichen wurden, resultiert in einer etwas höheren Genauigkeit in Bezug auf die Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten (*RMS*) im Vergleich zu den Berechnungsbeispielen k) und l), in denen nur Fisheye-Bildkoordinaten zur Schätzung der dreidimensionalen Objektpunktkoordinaten genutzt wurden (Tabelle 8.13). Eine signifikante Steigerung der Genauigkeit ergibt sich durch die Kombination beider Aufnahmegeräte (Berechnung m und n), zum einen aufgrund der höheren Redundanz und zum anderen durch die Stärkung der Netzgeometrie durch die unterschiedliche Charakteristik der verwendeten Beobachtungen. Diese beiden Berechnungen zeigen das Potenzial der gemeinsamen Auswertung von Laserscanner- und Fisheye-Beobachtungen.

	Scans	Fisheye-Bilder	Unbekannte	Beobachtungen	Redundanz	Neupunkte	RMS_x [mm]	RMS_y [mm]	RMS_z [mm]	RMS_{xyz} [mm]
i)	4	-	223	696	473	64	0,53	0,54	0,63	0,98
j)	6	-	245	1014	769	66	0,47	0,51	0,64	0,96
k)	-	4	232	472	240	66	0,75	0,72	0,59	1,20
l)	-	5	238	568	330	66	0,64	0,57	0,63	1,06
m)	4	4	263	1157	894	66	0,29	0,30	0,40	0,58
n)	6	5	285	1534	1249	66	0,28	0,27	0,36	0,53

Tabelle 8.13: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung für die Konfigurationen i) bis n)

8.2.2.4 Effiziente Aufnahme-Konfigurationen in der Praxis

Abschließend sollen zwei weitere Berechnungen vorgestellt werden, die als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Effektivität angesehen werden können und damit in der Praxis unter realistischen Bedingungen (z.B. begrenzte Zeit für die Aufnahmen) eingesetzt werden könnten. Das Beispiel o) geht davon aus, dass 4 Scans aus den Ecken des Raumes ohnehin aufgenommen werden müssen, um den gesamten Raum ohne Verdeckungen zu erfassen (Abbildung 8.8). Zusätzlich wird nur ein einziges Fisheye-Bild aus der Raummitte aufgenommen. Die daraus resultierenden mittleren Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten (Tabelle 8.14) sind etwas geringer als die entsprechende Berechnung ohne die Fisheye-Aufnahme (vgl. Beispiel i). Sollte dieses Fisheye-Bild sowieso aufgenommen werden müssen, beispielsweise für die Kolorierung der Punktwolke, kann es auch gleichzeitig für die Bestimmung der Objektpunktkoordinaten verwendet werden, was außerdem zu einer optimalen Referenzierung des Bildes bezüglich der Laserscanner-Punktwolken führt.

Abbildung 8.8: Aufnahme-Konfigurationen o) und p)
(effiziente Konfigurationen in der Praxis)

	Scans	Fisheye-Bilder	Unbekannte	Beobachtungen	Redundanz	Neupunkte	RMS_x [mm]	RMS_y [mm]	RMS_z [mm]	RMS_{xyz} [mm]
o)	4	1	242	804	562	65	0,48	0,47	0,60	0,90
p)	2	4	251	787	536	66	0,34	0,34	0,51	0,70

Tabelle 8.14: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung für die Konfigurationen o) und p)

Berechnung p) basiert auf Konfiguration a), bei der lediglich 2 Scans aus der Mitte des Raumes genutzt wurden, um den Raum vollständig zu erfassen. In der Praxis sind 1 Scan (bei vollsphärischen Scannern) oder 2 zueinander verschwenkte Scans (bei Geräten ohne vollsphärisches Gesichtsfeld) oft ausreichend, wenn der aufzunehmende Raum nur wenige Verdeckungen aufweist. Zusätzliche wurden 4 Bilder aus den Raumecken

aufgenommen, welche praktisch mit weniger Aufwand zu realisieren sind als zusätzliche Laserscanner-Standpunkte. Dabei ist aufgrund der höheren Redundanz und der optimalen Schnittgeometrie in Verbindung mit der Subpixel-Messgenauigkeit der Bildkoordinaten eine deutliche Steigerung der Genauigkeiten im Vergleich zu Berechnung a) festzustellen.

8.2.3 Kalibrierung der Aufnahmegeräte

Bei den in Kapitel 8.2.2 vorgestellten Berechnungen wurden zusätzliche Parameter der beteiligten Aufnahmegeräte geschätzt. Tabelle 8.15 zeigt die in den Berechnungsbeispielen j), l) und n) signifikant ermittelten Kalibrierparameter für den verwendeten Laserscanner Riegl LMS-Z420i und die Kamera Kodak DSC 14n mit einem Nikkor-Fisheye-Objektiv. Während bei j) und l) Laserscanner und Fisheye-Kamera separat kalibriert werden, integriert Berechnung n) beide Geräte in eine gemeinsame Berechnung. Zusätzlich zu den Parameterwerten sind deren Standardabweichungen und Signifikanzniveaus (in Klammern) angegeben.

Für den terrestrischen Laserscanner konnten nur einige der zusätzlichen Parameter (vgl. Kapitel 4.5.2 und 4.5.3) signifikant bestimmt werden: Die Amplitude der Sinusfunktion zur Modellierung der vertikalen Teilkreisexzentrizität in allgemeiner Fourierform (c_{Tl}) ist der Parameter mit der höchsten Signifikanz in Berechnung j). Die horizontale und vertikale Zielachsexzentrizität (b_E , c_E) konnte auf einem Signifikanzniveau von 99 % bestimmt werden, mit Berechnung n) konnte deren Signifikanz auf 99,9 % gesteigert werden. Während die Kippachsabweichung (b_K) und die vertikale Höhenindexabweichung (c_H) überhaupt nicht signifikant ermittelt werden konnten, wurde die Zielachsabweichung (b_Z) auf einem niedrigen Signifikanzniveau (80 %) bestimmt. Zusatzparameter zur Kompensation systematischer Distanzabweichungen (Additionskorrektur a_0 und Maßstab a_l) wurden ebenfalls berücksichtigt. Aufgrund der sehr hohen Korrelation zwischen diesen beiden Parametern ist deren Signifikanz sehr gering. Zur Vermeidung dieser Korrelationen müssten Entfernungsmesswerte über den gesamten Messbereich vorliegen, was in diesem Kalibrierraum jedoch nicht realisierbar ist.

Laserscanner	j)	n)
a_0 [10^{-3} mm]	$4,00 \pm 2,23$ (90 %)	$5,09 \pm 2,18$ (98 %)
a_l [10^{-3}]	$1,60 \pm 0,64$ (98 %)	$1,37 \pm 0,63$ (95 %)
b_Z [10^{-3} rad]	$-2,91 \pm 1,79$ (80 %)	$-1,94 \pm 1,54$ (-)
b_E [10^{-3} mm]	$1,50 \pm 0,51$ (99,0 %)	$1,58 \pm 0,46$ (99,9 %)
c_E [10^{-3} mm]	$2,86 \pm 1,02$ (99,0 %)	$3,97 \pm 0,88$ (99,9 %)
c_{Tl} [10^{-3} rad]	$0,85 \pm 0,09$ (99,9 %)	$0,97 \pm 0,08$ (99,9 %)
Fisheye-Kamera	l)	
c [mm]	$7,998 \pm 0,015$	$8,007 \pm 0,004$
x_0' [10^{-3} mm]	$-152,3 \pm 1,9$ (99,9 %)	$-153,4 \pm 1,9$ (99,9 %)
y_0' [10^{-3} mm]	$-77,6 \pm 6,7$ (99,9 %)	$-75,6 \pm 3,2$ (99,9 %)
A_1 [10^{-4}]	$0,132 \pm 0,044$ (98 %)	$0,122 \pm 0,028$ (99,0 %)
A_2 [10^{-6}]	$2,20 \pm 1,11$ (90 %)	$2,01 \pm 0,90$ (95 %)
A_3 [10^{-9}]	$-10,96 \pm 10,83$ (-)	$-9,09 \pm 9,10$ (-)
B_1 [10^{-5}]	$1,95 \pm 0,38$ (98 %)	$1,99 \pm 0,31$ (99,0 %)
B_2 [10^{-5}]	$0,94 \pm 0,38$ (99,0 %)	$0,72 \pm 0,24$ (99,0 %)
C_1 [10^{-5}]	$-2,60 \pm 2,50$ (-)	$-2,24 \pm 2,10$ (-)
C_2 [10^{-5}]	$3,59 \pm 7,65$ (-)	$6,28 \pm 7,06$ (-)

Tabelle 8.15: Aus der integrierten Bündelblockausgleichung resultierende Zusatzparameter für Laserscanner und Fisheye-Kamera

Außerdem wurden auch Kalibrierparameter (innere Orientierung und Zusatzparameter) der Kamera mit Fisheye-Objektiv unter Verwendung des raumwinkelgleichen geometrischen Fisheye-Modells geschätzt. Die ermittelten Standardabweichungen der Kamerakonstante und der Bildhauptpunktcoordinate y_0' konnte durch

die kombinierte Ausgleichung in Berechnung n) gegenüber Berechnung l) verringert werden. Dies gilt ebenso für die meisten Zusatzparameter (Verzeichnung, Affinität und Scherung). Bei einigen der Parameter konnte deren Signifikanz erhöht werden (A_1 , A_2 , B_1), andere Parameter wiederum wurden bei beiden Berechnungen nicht signifikant bestimmt (A_3 , C_1 , C_2). Eine bild-variante Parametrisierung zeigte im Unterschied zu den in Kapitel 5.2.3 beschriebenen Untersuchungen eines Fisheye-Objektivs keine nennenswerten Unterschiede.

Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und Fisheye-Bilddaten (Berechnung n) zu Kalibrierwerten führt, die eine höhere Genauigkeit und damit größere Signifikanz haben, verglichen mit der separaten Prozessierung der Laserscannerdaten (Berechnung j) und der Bilddaten (Berechnung l). Das heißt, Laserscanner und Kamera unterstützen sich gegenseitig im Kalibrierprozess, wobei die Unterstützung der Kalibrierung der Kamera durch Einbeziehen des Laserscanners stärker ist als umgekehrt.

8.2.4 Äußere Genauigkeit

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Berechnungsergebnisse der Integration terrestrischer Laserscannerdaten und Fisheye-Bilddaten zeigen nur die innere Genauigkeit des ausgeglichenen Beobachtungsnetzes. Eine realistischere Beurteilung der Genauigkeiten ist durch die Analyse der äußeren Genauigkeit des Netzes gegeben, z.B. durch den Vergleich der berechneten Objektkoordinaten mit übergeordnet genauen Referenzkoordinaten (vgl. auch Kapitel 8.1.4 bezüglich der Kombination terrestrischer Laserscannerdaten und Panoramabilddaten).

Die als Unbekannte geschätzten Objektpunktkoordinaten aus Berechnung n) (Kapitel 8.2.2.3) sollen dazu im Folgenden mit den Referenzkoordinaten, die aus einer konventionellen Bündelblockausgleichung unter Nutzung der Beobachtungen aus etwa 100 zentralperspektiven Aufnahmen resultieren, verglichen werden. Die Standardabweichung der Referenzkoordinaten ist aufgrund der automatischen Messung mit Subpixel-Operatoren und der hohen Redundanz des photogrammetrischen Netzes sehr gering und beträgt zwischen 0,02 mm bis 0,23 mm, während die aus der integrierten Bündelblockausgleichung resultierenden Standardabweichungen zwischen 0,20 mm bis 0,50 mm liegen. Die Objektpunktkoordinaten der Referenzdaten sind also im Vergleich zu den Ergebnissen der Berechnung n) durchschnittlich etwa dreimal genauer und können daher zur Analyse der äußeren Genauigkeit herangezogen werden. Außerdem handelt es sich um ein unabhängiges Messverfahren mit einem anderen Aufnahmegerät und einer anderen Aufnahmekonfiguration.

Die Koordinaten der 66 in der integrierten Bündelblockausgleichung berechneten Objektpunkte wurden über eine 3D-HELMERT-Transformation in das Koordinatensystem der Referenzkoordinaten transformiert und anschließend die Koordinatendifferenzen analysiert (Tabelle 8.16). Dabei ist zu erkennen, dass die meisten dieser Differenzen ebenso wie die inneren Genauigkeitswerte im Bereich zwischen 0,20 mm bis 0,50 mm liegen. Die Koordinatendifferenzen von 2 Objektpunkten sind größer als 0,75 mm ($MAX \Delta$).

	X	Y	Z	XYZ
<i>RMS Δ</i>	0,29 mm	0,36 mm	0,34 mm	0,57 mm
<i>MAX Δ</i>	0,64 mm	0,93 mm	0,86 mm	1,42 mm

Tabelle 8.16: Vergleich der ermittelten Objektpunktkoordinaten mit Referenzkoordinaten (äußere Genauigkeit)

Die Werte zur Beurteilung der inneren Genauigkeit (Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten) sind vergleichbar mit den Werten zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit (Koordinatendifferenzen bezogen auf Referenzdaten), was die Korrektheit des geometrischen und stochastischen Modells bestätigt. Die ermittelten Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten können deshalb zur realistischen Abschätzung des Genauigkeitspotenzials in dem untersuchten Fall verwendet werden.

8.2.5 Vergleich unterschiedlicher stochastischer Modelle

In diesem Kapitel wird die Verwendung der Varianzkomponentenschätzung bei der integrierten Bündelblockausgleichung von terrestrischen Laserscannerdaten und Fisheye-Bilddaten gesondert untersucht. Für die folgenden Berechnungen wurden die Aufnahmekonfigurationen, die in Kapitel 8.2.2.3 (Berechnungen j, l, n) vorgestellt worden sind, genutzt.

Die Beobachtungen von 6 Laserscanner-Positionen (4 in den Raumecken und 2 in der Raummitte) sowie 5 konvergenten Fisheye-Bildern wurden zur Bestimmung von 66 Neupunkten in einer freien Netzausgleichung gemeinsam ausgeglichen. In alle Berechnungsbeispiele wurde eine Selbstkalibrierung der beteiligten Aufnahmegeräte integriert (vgl. Kapitel 8.2.3).

Das stochastische Modell wird a-priori wie folgt festgelegt:

- a-priori Standardabweichung der Gewichtseinheit $\sigma_0 = 1$
- a-priori Standardabweichung der Distanzmessung des terrestrischen Laserscanners Riegl LMS-Z420i: $\sigma_D = 10 \text{ mm}$
- a-priori Standardabweichung der Winkelmessung des terrestrischen Laserscanners Riegl LMS-Z420i: $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 25 \text{ mgon}$ (0,40 mrad) (berücksichtigt wurden folgende Parameter: eingestellte Winkelauflösung 0,50 mrad, Strahldivergenz 0,25 mrad, ca. 4 m Distanz, interaktive Messung des Zielmarkenzentrums, vgl. Kapitel 8.2.1.2)
- a-priori Standardabweichung der Fisheye-Bildkoordinaten: $\sigma_{x'} = \sigma_{y'} = 1 \text{ }\mu\text{m}$ (0,125 Pixel) (berücksichtigt wurde automatische Messung der Zielmarkenzentren mit Schwerpunktoperator, vgl. Kapitel 8.2.1.3)

Es wurden mehrere Berechnungen durchgeführt. In den ersten 3 Berechnungen wurden nur die Laserscanner-Beobachtungen ausgeglichen, anschließend wurden nur die Fisheye-Bildbeobachtungen ausgeglichen und in den letzten 5 Berechnungen wurden alle Beobachtungen kombiniert (Tabelle 8.17a). Bei der jeweils ersten Berechnung wurde keine Varianzkomponentenschätzung durchgeführt, die o.g. a-priori Standardabweichungen wurden dabei als feste Werte zur Definition von Beobachtungsgewichten genutzt. In den anderen Berechnungen wurde eine Varianzkomponentenschätzung integriert, wobei die Beobachtungen in eine unterschiedliche Anzahl von Beobachtungsgruppen aufgeteilt wurden. Die jeweils letzte Zeile entspricht den Berechnungen j), l) und n) aus Kapitel 8.2.2.3.

Aus Tabelle 8.17a geht hervor, dass die vorgegebenen a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen nicht optimal für die Festlegung der Beobachtungsgewichte sind. Für die Laserscanner-Distanzmessung werden a-posteriori ca. 8,5 mm (statt 10 mm), für die Laserscanner-Winkelmessung ca. 15 mgon (statt 25 mgon) und für die Fisheye-Bildkoordinaten ca. 0,14 Pixel (statt 0,125 Pixel) geschätzt. Diese Werte werden zum einen unabhängig von den Näherungswerten und zum anderen nahezu unabhängig von der verwendeten Aufteilung der Beobachtungen in Beobachtungsgruppen in der Varianzkomponentenschätzung erhalten.

In Tabelle 8.17a sind neben den geschätzten a-posteriori Standardabweichungen auch die Standardabweichungen der Varianzkomponenten dargestellt. Damit lässt sich die Signifikanz der a-posteriori Standardabweichung beurteilen und deren Richtigkeit qualitativ bestätigen.

Wird beispielsweise die Beobachtungsgruppe der Laserscanner-Winkelmessungen in eine Gruppe mit den Horizontalwinkelmessungen und eine mit den Vertikalwinkelmessungen aufgeteilt, vergrößert sich die dazugehörige Standardabweichung der Varianzkomponente für den Horizontal- und den Vertikalwinkel von 1,03 mgon auf 1,54 mgon (α) und 1,39 mgon (β). Dies ist mit einer geringeren Redundanz, d. h. mit der geringeren Anzahl an Beobachtungen zur Schätzung der Varianzkomponente, zu begründen. Im speziellen Fall ist der Unterschied zwischen den geschätzten a-posteriori Standardabweichungen von 15,27 mgon (α) und 13,80 mgon (β) nur gering signifikant. Die Untergliederung der Beobachtungsgruppe ist deshalb nicht unbedingt notwendig.

Diese Ausführungen gelten ebenso für die Aufteilung der horizontalen und vertikalen Bildkoordinaten der Fisheye-Bilder in unterschiedliche Beobachtungsgruppen, deren physikalische Begründung von vornherein schwer fällt. Bei diesen Beobachtungen wird besonders deutlich, dass die getrennte Behandlung der beiden Bildkoordinatenrichtungen und deren automatische Gewichtung durch Varianzkomponentenschätzung keine Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse bewirkt (Tabelle 8.17b).

Aufnahmen	Gewichtung / Beobachtungsgruppen	a-posteriori Standardabweichung der Beobachtungen			Standardabweichung der Varianzkomponente		
		Distanz	Winkel	Fisheye	Distanz	Winkel	Fisheye
		$\hat{S}_D$ [mm]	$\hat{S}_{\alpha, \beta}$ [mgon]	$\hat{S}_{x', y'}$ [Pixel]	$\sqrt{\hat{V}\{\hat{\sigma}_D^2\}}$ [mm]	$\sqrt{\hat{V}\{\hat{\sigma}_{\alpha, \beta}^2\}}$ [mgon]	$\sqrt{\hat{V}\{\hat{\sigma}_{x', y'}^2\}}$ [Pixel]
6 Laserscans	fest (keine VKS)	7,42	18,56	-	-	-	-
	2	8,78	14,58	-	0,86	1,03	1,03
	3	8,77	15,27 13,80	-	0,86	1,54 1,39	-
5 Fisheye-Bilder	fest (keine VKS)	-	-	0,141	-	-	-
	2	-	-	0,133 0,148	-	-	0,014 0,015
6 Laserscans und 5 Fisheye-Bilder kombiniert	fest (keine VKS)	7,99	19,97	0,100	-	-	-
	3	8,52	14,28	0,140	0,83	1,01	0,010
	4	8,52	15,17 13,33	0,140	0,83	1,52 1,34	0,010
	4	8,62	14,45	0,134 0,149	0,83	1,01	0,013 0,015
	5	8,62	15,35 13,49	0,134 0,149	0,83	1,52 1,34	0,013 0,015

Tabelle 8.17a: Integrierte Bündelblockausgleichung (Laserscanner / Fisheye-Kamera) mit Varianzkomponentenschätzung: a-posteriori Standardabweichung der Beobachtungen und Standardabweichung der Varianzkomponenten

Aufnahmen	Gewichtung / Beobachtungsgruppen	$\hat{S}_0$	RMS_x [mm]	RMS_y [mm]	RMS_z [mm]	RMS_{xyz} [mm]
6 Laserscans	fest (keine VKS)	0,74	0,67	0,67	0,83	1,26
	2	1,0	0,53	0,53	0,66	1,00
	3	1,0	0,47	0,51	0,64	0,96
5 Fisheye-Bilder	fest (keine VKS)	1,13	0,64	0,58	0,62	1,06
	2	1,0	0,64	0,57	0,63	1,06
6 Laserscans und 5 Fisheye-Bilder kombiniert	fest (keine VKS)	0,80	0,31	0,30	0,40	0,59
	3	1,0	0,28	0,27	0,37	0,54
	4	1,0	0,28	0,27	0,37	0,54
	4	1,0	0,28	0,28	0,38	0,54
	5	1,0	0,28	0,27	0,36	0,53

Tabelle 8.17b: Integrierte Bündelblockausgleichung (Laserscanner / Fisheye-Kamera) mit Varianzkomponentenschätzung: durchschnittliche Genauigkeit der geschätzten Objektpunktkoordinaten (RMS)

Insbesondere die Ergebnisse der kombinierten Ausgleichung der 6 Laserscans und 5 Fisheye-Bilder zeigen, dass durch diese Kombination die in der Ausgleichung geschätzten Parameter des funktionalen Modells die geringsten Standardabweichungen haben. Das gilt sowohl für die Objektkoordinaten (Tabelle 8.17b) als auch für die Kalibrierwerte (Kapitel 8.2.3). Das Potenzial, welches sich aus der Kombination ergibt, kann jedoch erst durch eine Varianzkomponentenschätzung zur Gewichtslegung vollständig genutzt werden, weil die a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen in der Regel nur näherungsweise bekannt sind. Dies wird auch aus Tabelle 8.17b deutlich. Wird keine Varianzkomponentenschätzung durchgeführt, sind die Ge-

wichte nicht optimal aufeinander abgestimmt, was zu geringeren Genauigkeiten der Ausgleichungsergebnisse führt (hier insbesondere *RMS* der Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten).

8.3 Fazit

In diesem Kapitel wurden zahlreiche Ausgleichungsberechnungen mit verschiedenen Kombinationen von Laserscanner- und Bilddaten durchgeführt, wobei die Ergebnisse nach unterschiedlichen Kriterien analysiert und bewertet wurden. Zur Berechnung wurde die in Kapitel 6 und im Anhang A.1 beschriebene Software genutzt, in der die in Kapitel 4 hergeleiteten geometrischen Modelle sowie das in Kapitel 7 vorgestellte stochastische Modell der Varianzkomponentenschätzung integriert sind. Anhand von Messdaten aus verschiedenen Testfeldern konnte das Potenzial der Kombination von Laserscanner- und Bilddaten in einer integrierten Bündelblockausgleichung hinsichtlich Datenreferenzierung, Gerätekalibrierung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit gezeigt werden.

Darüber hinaus wurde ein Projekt aus dem Bereich der Geologie vorgestellt, bei dem Daten eines terrestrischen Laserscanners mit Daten einer hyperspektralen Panoramakamera kombiniert wurden. Damit wurde die Relevanz der vorgestellten Methode für die Praxis nachgewiesen.

Im Folgenden wird die Kombination von Laserscanner- und Panoramabilddaten (vgl. Kapitel 8.1), sowie die Kombination von Laserscanner- und Fisheye-Bilddaten (vgl. Kapitel 8.2) zusammenfassend diskutiert.

- Terrestrischer Laserscanner und Panoramakamera

Dass sich terrestrische Laserscannerdaten und Bilddaten in vielen Anwendungen optimal ergänzen, gilt insbesondere für die Kombination aus einem Panorama-view-Scanner mit 360°-Gesichtsfeld und einer 360°-Panoramakamera. Beide Geräte können je nach verwendetem Objektiv den gleichen Aufnahmebereich abdecken. Im Vergleich zu zentralperspektiven Bildern ist bei einem Panorama nur eine Aufnahme nötig, wodurch sich auch die Anzahl der Orientierungsunbekannten reduziert. Außerdem haben Panoramen durch Verwendung von Zeilensensoren oft eine sehr hohe Auflösung, was eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse der Auswertung ermöglicht.

Die Panoramabilder können dann nicht nur zur Kolorierung von Laserscanner-Punktwolken und zur Texturierung von 3D-Modellen genutzt werden, sondern auch innerhalb einer integrierten Bündelblockausgleichung für die Koordinatenbestimmung diskreter Objektpunkte verwendet werden. Die ermittelten Koordinaten sind entweder unmittelbar in der Anwendung von Interesse, oder sie dienen nur als Verknüpfungspunkte, um eine optimale gegenseitige Referenzierung der Datensätze von Laserscanner und Panoramakamera zu erreichen. Wird darüber hinaus eine Selbstkalibrierung der verwendeten Aufnahmegeräte in die Berechnung implementiert, können die Geräte simultan unter den aktuellen Bedingungen kalibriert und dadurch die Genauigkeit der aufgenommenen Daten, der Referenzierung und der ermittelten Objektpunktkoordinaten weiter gesteigert werden.

Die Aufnahme mehrerer Panoramen ist durch die Notwendigkeit eines stabilen Stativaufbaus und die meist längere Aufnahmedauer oft zeitaufwendig und im Vergleich zu zentralperspektiven Bildern eher unflexibel. Außerdem können oft nicht alle Objektdetails von den gewählten Panoramakamera-Standpunkten erfasst werden. Aus diesen beiden Gründen bietet es sich in der Praxis an, die Aufnahmekonfiguration durch zusätzliche zentralperspektive Aufnahmen zu erweitern. Dadurch kann die Genauigkeit der Ausgleichungsergebnisse weiter verbessert werden.

Betrachtet man die Laserscannerdaten als Ergänzung eines photogrammetrischen Netzes bestehend aus Panoramen und zentralperspektiven Bildern, beispielsweise in industriellen Anwendungen, bei denen oft die Bestimmung von Koordinaten diskreter Objektpunkte im Vordergrund steht, können die Laserscannerdaten (insbesondere die Distanzmessungen) die Zuverlässigkeit des Netzes stärken. Außerdem kann die Ermittlung von für die Ausgleichung notwendigen Näherungswerten für die Objektpunktkoordinaten und die äußeren Orientierungselemente vereinfacht werden.

Eine hardwareseitige Kombination von Laserscanner und Panoramakamera ist ebenfalls denkbar, tatsächlich aber nur wenig realisiert. Damit könnte der Aufwand für den Aufbau von Laserscanner und Panoramakamera reduziert werden und, eine gute Näherungsorientierung zwischen beiden Geräte wäre bereits vorhanden. Die Geräte könnten außerdem durch eine gemeinsame Steuersoftware bedient werden.

- Terrestrischer Laserscanner und Kamera mit Fisheye-Objektiv

Terrestrische Laserscanner und Kameras mit Fisheye-Objektiv ergänzen sich ebenfalls in vielen Anwendungen sehr gut innerhalb einer gemeinsamen Auswertung. In Bezug auf die eigentliche Anwendung werden terrestrische Laserscanner hauptsächlich zur Erfassung von 3D-Oberflächen und -Geometrien basierend auf einer zufälligen Punktverteilung eingesetzt, während Kameras eher für die Koordinatenbestimmung diskreter Objektpunkte sowie zur Kolorierung von Laserscannerpunktwolken oder zur Texturierung von 3D-Modellen genutzt werden.

Die simultane Bündelblockausgleichung von Laserscanner- und Fisheye-Bildbeobachtungen hat zahlreiche Vorteile. Ein Vorteil dieses Ansatzes ist, dass Laserscanner und Kamera am Messort in einem Guss orientiert und kalibriert werden können, was eine optimale Referenzierung zwischen beiden Datensätzen erlaubt. Darüber hinaus kann die Kamera nicht nur verwendet werden, um zusätzlich Farbinformation zur Verfügung zu stellen, sondern kann ebenso an der Bestimmung von Objektgeometrien beteiligt werden. Abhängig von der Auflösung des Bildes und der Stabilität der Kamera können die Bilddaten auch zu einer Genauigkeitssteigerung der dreidimensionalen Objektpunkte im Vergleich zu einer reinen Laserscannermessung führen und dadurch die Selbstkalibrierung des Laserscanners unterstützen. Durch die Möglichkeit der Selbstkalibrierung kann die Genauigkeit der Laserscannerdaten insgesamt verbessert werden.

Die aus den vorgestellten Ergebnissen gewonnenen Erkenntnisse treffen ebenso auch auf zentralperspektive Bilder zu, jedoch mit der Einschränkung eines kleineren Gesichtsfeldes im Vergleich zu den Fisheye-Bildern. Das Gesichtsfeld eines Fisheye-Objektives deckt in vielen Anwendungen den Scan-Bereich eines terrestrischen Laserscanners vollständig ab, während für den gleichen Aufnahmebereich meist mehrere zentralperspektive Bilder aufgenommen werden müssten. Als Nachteile der Verwendung von Fisheye-Objektiven im Vergleich zur Nutzung zentralperspektiver Objektive sind die oft geringere Abbildungsqualität und die geringere geometrische Auflösung in Bezug auf den Objektraum zu nennen.

In praktischen Anwendungen ist es empfehlenswert, die Laserscanner-Standpunkte im Hinblick auf eine optimale Sichtbarkeit auf die aufzunehmenden Objektdetails ohne Verdeckungen auszuwählen und einige Fisheye-Bilder zusätzlich aufzunehmen. Die Kamera kann sich dafür entweder unmittelbar nahe der Scanner-Position befinden (z.B. wenn die Kamera direkt am Laserscanner befestigt ist) oder an verschiedenen Positionen die zusammen mit den Laserscanner-Standpunkten gute Strahlenschnittwinkel bilden.

9 Zusammenfassung

Die Eigenschaften von mit terrestrischen Laserscannern und Kameras erzeugten Daten sind weitgehend komplementär. Laserscanner nehmen dreidimensionale Punktwolken bestehend aus Millionen einzelner Punkte auf, die eine Objektoberfläche zuverlässig repräsentieren. Die Auswertung der Punktwolken ist in vielerlei Hinsicht automatisierbar, beispielsweise für die automatische Extraktion einfacher Objektgeometrien. Sollen allerdings komplexe Objekte dreidimensional modelliert werden, ist die Interaktion durch einen Operateur notwendig, der Wissen über das Objekt einbringt. Der Interpretationsgehalt der Punktwolke, insbesondere in zweidimensionalen Auswertumgebungen ist dabei beschränkt. Hinzu kommt, dass bestimmte Objektmerkmale nicht direkt gemessen werden können, weil die Punktwolke eine zufällige Punktverteilung aufweist. Diese Nachteile können durch das Einbeziehen von Bildern in die Auswertung kompensiert werden. Bilder entsprechen im Gegensatz zu Punktwolken der gewohnten Sichtweise des Nutzers, und Objektmerkmale wie diskrete Punkte oder Kanten können direkt und mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Eine dreidimensionale Messung wie bei Laserscannerdaten ist hingegen nur durch Verwendung mehrerer Bilder von unterschiedlichen Standpunkten möglich. Bei einer geringen Anzahl von Standpunkten ist die Zuverlässigkeit der 3D-Koordinatenbestimmung eingeschränkt.

Seit einigen Jahren ist bei der Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten deshalb die Tendenz zu beobachten, dass immer häufiger Bilddaten in die Auswertung einbezogen werden. Es ergeben sich daraus vielfältige Möglichkeiten hinsichtlich der automatischen und interaktiven Auswertung, sowie für die Qualität der Endprodukte. Außerdem lassen sich durch die Kombination terrestrischer Laserscannerdaten mit Bilddaten neue Anwendungsgebiete erschließen. Das wird durch zahlreiche Publikationen der letzten Jahre bestätigt. Einige Hersteller terrestrischer Laserscanner bieten dem Anwender aus den gleichen Gründen die Möglichkeit, Kameras in ihre Laserscannersysteme zu integrieren.

Für die Kombination der unterschiedlichen Daten ist in jedem Fall eine konsistente gegenseitige Referenzierung notwendig. Um eine hohe Genauigkeit der aus der kombinierten Auswertung resultierenden Ergebnisse zu erreichen, ist darüber hinaus auch die Kalibrierung der Aufnahmegeräte unabdingbar. Die Kalibrierwerte terrestrischer Laserscanner und vieler für die Auswertung genutzter Kameras sind jedoch von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren abhängig und zudem häufig nicht stabil. Die meisten Laserscannersysteme gehen meist von vorab kalibrierten Aufnahmegeräten aus und orientieren die Bilddaten einseitig zu den Laserscannerdaten. Die sich aus dieser Vorgehensweise ergebenden Genauigkeiten spiegeln meist nicht das sich aus der Kombination der komplementären Datentypen ergebende Potenzial wider.

Das Ziel dieser Arbeit war es deshalb, ein Verfahren zu entwickeln, welches das Potenzial der gemeinsamen Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten optimal ausschöpft. Dafür wurde das aus der Photogrammetrie bekannte Verfahren der Bündelblockausgleichung aufgegriffen und für die integrierte Ausgleichung unterschiedlicher Datentypen erweitert. Damit soll eine konsistente Referenzierung der unterschiedlichen und von mehreren Standpunkten aufgenommenen Daten möglich sein. Außerdem bietet diese Methode die Möglichkeit, eine Selbstkalibrierung der beteiligten Aufnahmegeräte einzubeziehen. Damit können für die jeweilige Messaufgabe optimale Kalibrierwerte geschätzt werden.

Aus der Kombination der Daten in einer integrierten Bündelblockausgleichung ergeben sich weitere Vorteile. Beispielsweise können gleichzeitig mit hoher Genauigkeit und hoher Zuverlässigkeit die dreidimensionalen Koordinaten von Objektpunkten bestimmt werden. Die höhere Genauigkeit ist damit zu begründen, dass die individuellen Eigenschaften der Datentypen, wie beispielsweise die hohe laterale Genauigkeit der Bildkoordinaten oder die hohe Genauigkeit der Distanzmessungen eines Laserscanners bei größeren Entfernungen im Vergleich zur Winkelmessung, im Ausgleichungsprozess automatisch berücksichtigt werden. Durch die Heterogenität der Beobachtungen ist zudem eine gute Kontrolliertheit der Daten untereinander gewährleistet, wodurch mögliche Ausreißer im Beobachtungsmaterial einfacher detektiert werden können, und damit die Zuverlässigkeit der Koordinaten- und Parameterbestimmung gestärkt wird.

Die meisten auf dem Markt erhältlichen terrestrischen Laserscanner sind Panorama-view-Scanner und haben ein sphärisches Gesichtsfeld von 360° in horizontaler Richtung und bis zu 180° in vertikaler Koordinatenrichtung. Um diesen Winkelbereich mit zentralperspektiven Aufnahmen abdecken zu können, müssen viele Bilder aufgenommen werden, wodurch sich die Anzahl der Orientierungselemente im Ausgleichungsprozess

wesentlich erhöht. Deshalb bietet sich hier die Verwendung von Panoramakameras mit rotierendem Zeilen-sensor an, mit denen horizontal die Abbildung des gleichen Winkelbereiches von 360° in einem Panorama möglich wird. Diese Kameras zeichnen sich zudem durch eine im Vergleich zu Flächensensoren sehr hohe geometrische Auflösung und Farbqualität aus. In vielen Fällen werden Laserscannerdaten auch mit den Daten eines mit einem Fisheye-Objektiv aufgenommenen Bildes kombiniert, welches einen Öffnungswinkel von 180° oder mehr bietet. Die Kombination einer Rotationszeilenkamera mit einem Fisheye-Objektiv erlaubt sogar die Aufnahme vollsphärischer Panoramen.

Die genannten Möglichkeiten zur Erweiterung des Gesichtsfeldes haben gemeinsam, dass die den Daten zugrunde liegende Geometrie nicht dem bekannten Prinzip der Zentralperspektive entspricht. Deshalb wurden geometrische Modelle für die genannten Kameratypen entwickelt. Diese Modelle bestehen – wie bei den bekannten Kollinearitätsgleichungen für zentralperspektive Abbildungen üblich – aus einem Grundmodell und Zusatzparametern, die Abweichungen zum Grundmodell kompensieren. Die Zusatzparameter für Panoramakameras wurden schrittweise durch die Analyse der mit einer solchen Kamera aufgenommenen Bilddaten entwickelt und auf Signifikanz überprüft. Für Fisheye-Objektive wurden unterschiedliche aus der Fachliteratur bekannte Projektionsgeometrien verifiziert.

Schließlich wurde in gleicher Weise ein geometrisches Modell für terrestrische Laserscanner hergeleitet. Das Modell basiert auf einem sphärischen Koordinatensystem, um die ursprünglichen Messwerte Distanz, Horizontalwinkel und Vertikalwinkel in einer integrierten Bündelblockausgleichung verarbeiten zu können. Für die Beschreibung sinnvoller Zusatzparameter wurde zum einen auf von Theodoliten und Tachymetern bekannte Korrekturmodelle zurückgegriffen, weil terrestrische Laserscanner diesen in ihrem Aufbau und ihrer Funktionsweise ähnlich sind. Zum anderen wurden eigene und in wissenschaftlichen Veröffentlichungen beschriebene Untersuchungen terrestrischer Laserscanner detailliert ausgewertet. Unter Nutzung des entwickelten geometrischen Modells für terrestrische Laserscanner konnte in verschiedenen Untersuchungen mit einem Laserscanner Riegl LMS-Z420i eine Steigerung der Genauigkeit der Messergebnisse um bis zu 30 % erreicht werden.

Die geometrischen Modelle der einzelnen Messgeräte wurden in einem funktionalen Modell für eine gemeinsame Bündelblockausgleichung zusammengefasst. Die damit verbundenen Besonderheiten hinsichtlich der Strukturierung des Ausgleichungsansatzes wurden dargelegt. Dabei wurde auf die Struktur der Koeffizientenmatrix, genauso wie auf die Definition zusätzlicher Bedingungsgleichungen für die freie Netzausgleichung und die Verwendung von Quaternionen zur Beschreibung der äußeren Orientierung der Aufnahmegeräte, eingegangen.

Ein Schwerpunkt der Arbeit ist die Beschreibung des stochastischen Modells für die integrierte Bündelblockausgleichung. Weil verschiedene Typen von Beobachtungen mit unterschiedlichen zugrunde liegenden geometrischen Modellen und unterschiedlichen stochastischen Eigenschaften gemeinsam ausgeglichen werden, muss den Daten ein geeignetes, d.h. der jeweiligen Charakteristik entsprechendes Gewicht zugeordnet werden. Die sich aus der Komplementarität der verschiedenen Datentypen ergebenden Synergieeffekte können in der integrierten Ausgleichung nur dann optimal genutzt werden, wenn das Verhältnis der Beobachtungsgewichte richtig festgelegt wird. Die a-priori Genauigkeiten der Beobachtungen sind meist nicht ausreichend genau bekannt. Deshalb wurde in dieser Arbeit das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung, mit dem die Varianzen der Beobachtungen zur Festlegung von Gewichten aus den Messdaten selbst ermittelt werden können und damit gleichzeitig Informationen über die Genauigkeitscharakteristik der beteiligten Messgeräte erhalten werden können, vorgeschlagen und beschrieben. Dabei wurde weniger auf die theoretischen Hintergründe sondern eher auf die praktische Umsetzung für die konkrete Aufgabenstellung eingegangen.

Eine weitere Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war die Programmierung einer Software, mit der die Kombination terrestrischer Laserscannerdaten (sphärische Punktkoordinaten) und photogrammetrischer Bilddaten (zentralperspektive, Panorama- und/oder Fisheye-Bildpunktkoordinaten) in einer integrierten Bündelblockausgleichung realisiert werden kann. Das entwickelte Programm erlaubt unter anderem die flexible Festlegung der Durchführung der Berechnung und die Anwendung der hergeleiteten geometrischen Modelle zur simultanen Berechnung der äußeren Orientierungen der beteiligten Aufnahmen, der Zusatzparameter zur Kalibrierung der Aufnahmegeräte und der dreidimensionalen Koordinaten homologer Objektpunkte. Darüber hinaus wurde die Varianzkomponentenschätzung für unterschiedliche Daten-Kombinationen implementiert,

genauso wie ein einfacher Ausreißertest und die Möglichkeit der Berechnung einer freien Netzausgleichung. Insgesamt ist damit eine Software entstanden, mit der das Potenzial der Kombination terrestrischer Laserscannerdaten und Bilddaten anhand konkreter Daten ausgiebig validiert werden kann. Das Programm wurde so strukturiert, dass eine über diese Arbeit hinausgehende Nutzung in anderen Anwendungen möglich ist.

Es wurden mehrere Testfelder, bestehend aus jeweils 100 bis 200 Zielmarken, zur Verifikation der geometrischen Modelle und zur Verifikation der Vorteile der Datenkombination in einer integrierten Bündelblockausgleichung verwendet. Ein Testfeld ist speziell für die Untersuchung von Fisheye-Objektiven geeignet, ein anderes für die Untersuchung zylindrischer Panoramakameras, sowie ein Testfeld für die Untersuchung terrestrischer Laserscanner. Es hat sich als grundsätzlich schwierig herausgestellt, Testfelder einzurichten, die hinsichtlich Zielmarkenverteilung, Zielmarkengröße und -design für die Aufnahme und Auswertung mehrerer Datentypen gleichermaßen geeignet sind. Bei der Kombination unterschiedlicher Aufnahmegерäte in einem Testfeld müssen oft Kompromisse in Bezug auf die Genauigkeit der Beobachtungen eingegangen werden. Zur Untersuchung der Kombination terrestrischer Laserscannerdaten mit Panoramabilddaten wurden mehrere Scans und Panoramen im Testfeld für terrestrische Laserscanner aufgenommen und zur Untersuchung der Kombination terrestrischer Laserscannerdaten mit Fisheye-Bilddaten wurden mehrere Scans und Fisheye-Bilder im Testfeld für Fisheye-Objektive aufgenommen. Die Daten wurden durch zahlreiche Aufnahmen zentralperspektiver Kameras ergänzt.

Die in den Testfeldern aufgenommenen Datensätze wurden unter Nutzung der entwickelten Software prozessiert. Dabei wurden verschiedene Kombinationen der Datentypen und verschiedene Aufnahmekonfigurationen untersucht. Außerdem wurden unterschiedliche Datumsdefinitionen angewendet, die Auswirkung der Verwendung unterschiedlicher stochastischer Modelle analysiert und in diesem Zusammenhang auch das Potenzial der Berücksichtigung der Varianzkomponentenschätzung bewertet.

Durch die Analyse der Daten konnten die genannten Vorteile der kombinierten Auswertung bestätigt werden. Im Vergleich zur separaten Auswertung der Datentypen wurden höhere Genauigkeiten der Ausgleichungsergebnisse, insbesondere höhere Genauigkeiten der Objektpunktkoordinaten, geschätzt. Die Objektpunktkoordinaten wurden auch mit Referenzkoordinaten verglichen, um Rückschlüsse auf die äußere Genauigkeit der ermittelten Objektkoordinaten ziehen zu können. Es wurde festgestellt, dass die äußeren Genauigkeiten von den ermittelten inneren Genauigkeiten nicht wesentlich abweichen. Deshalb kann von der Richtigkeit der Ausgleichungsergebnisse und der verwendeten geometrischen und stochastischen Modelle ausgegangen werden. Darüber hinaus konnten durch die Kombination der Datentypen Ausreißer im Datenmaterial einfacher detektiert und die Qualität der gegenseitigen Referenzierung verbessert werden. Durch die Berücksichtigung der Varianzkomponentenschätzung konnten die individuellen und weitestgehend komplementären Eigenschaften der Beobachtungstypen optimal ausgeschöpft und außerdem realistische Standardabweichungen für die an der Ausgleichung beteiligten Beobachtungen bestimmt werden.

Die in der integrierten Bündelblockausgleichung implementierte Selbstkalibrierung resultierte in Kalibrierwerten für den verwendeten terrestrischen Laserscanner und die verwendeten Kameras mit einer höheren Signifikanz verglichen mit der voneinander unabhängigen Kalibrierung der Aufnahmegерäte. Während die Berücksichtigung von Zusatzparametern für zentralperspektive Kameras, Panoramakameras und Kameras mit Fisheye-Objektiv zu einer deutlichen Verbesserung der Genauigkeiten der Ausgleichungsergebnisse führte, war der Effekt für terrestrischer Laserscanner geringer. Das liegt hauptsächlich daran, dass durch die Hersteller dieser Messgeräte bereits Korrekturen an die Messdaten angebracht werden. Außerdem unterschieden sich die in verschiedenen Testfeldern ermittelten Zusatzparameter für den verwendeten Laserscanner. Das bedeutet, dass die ermittelten Kalibrierwerte von den aktuell genutzten Aufnahmeparametern (z. B. Scan-Auflösung, Distanzbereich, Art der Objektpunktsignalisierung) abhängig sind.

Das Anwendungsspektrum der integrierten Bündelblockausgleichung erstreckt sich auf alle Bereiche, in denen die Kombination terrestrischer Laserscanner- und photogrammetrischer Bilddaten realisiert wird und dabei besonderer Wert auf hohe Genauigkeiten der Auswertergebnisse gelegt wird. Das sind beispielsweise Anwendungen in der Architektur und der Industrie. Einen Überblick über die Vielfalt der Einsatzgebiete bietet die Einleitung in diese Arbeit (Kapitel 1.3). Exemplarisch wurde die Nutzung der beschriebenen Berechnungsmethode an einem Praxisbeispiel aus dem Bereich der Geologie analysiert, bei dem die Kombination der Daten eines terrestrischen Laserscanners und einer hyperspektralen Panoramakamera zur geologischen

Analyse genutzt wurden. Die gegenseitige Orientierung der in einem Steinbruch aufgenommenen Daten wurde auf verschiedene Art und Weise berechnet: angefangen bei der Berechnung eines räumlichen Rückwärtsschnittes, wobei die Panoramadaten einseitig zu den Laserscannerdaten referenziert wurden, bis hin zur Berechnung einer integrierten Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung und Varianzkomponentenschätzung. Die bereits mehrfach genannten Vorteile der entwickelten Methode für die kombinierte Auswertung konnten auch durch dieses Anwendungsbeispiel nachgewiesen werden.

Das vorgestellte Verfahren zur Datenkombination kann zukünftig hinsichtlich mehrerer Aspekte erweitert werden. Zwei dieser Aspekte werden im Folgenden genannt. Weil die in der integrierten Bündelblockausgleichung verwendeten geometrischen Modelle keinen linearen Zusammenhang zwischen den Beobachtungen und den Unbekannten aufweisen, müssen die Beobachtungsgleichungen an der Stelle von Näherungswerten linearisiert werden. Das heißt, der Algorithmus setzt grundsätzlich Näherungswerte für die äußeren Orientierungen der beteiligten Aufnahmen, sowie für die Zusatzparameter der Aufnahmegeräte und die Objektpunktkoordinaten voraus. Während die Näherungswerte für die Kalibrierwerte auf einfache Weise aus vorangegangenen Kalibrierungen abgeleitet werden können, ist die Bestimmung von Näherungswerten für die Elemente der äußeren Orientierungen und für die Objektpunktkoordinaten aufwendiger. In der Fachliteratur werden bereits Verfahren zur automatischen Ableitung von Näherungswerten für die kombinierte Auswertung von Laserscanner- und Bilddaten beschrieben. Exemplarisch soll hier die simultane Orientierung unter Nutzung von automatisch aus Laserscanner-Intensitätsbildern, Punktwolken und Bilddaten extrahierten Objektraum-Merkmalen genannt werden [Wendt, 2008]. Eine Kombination der integrierten Bündelblockausgleichung mit einem solchen Verfahren würde die Effektivität der gemeinsamen Auswertung unterschiedlicher Datentypen in der praktischen Anwendung erhöhen.

Bisher können in der Ausgleichung nur die Beobachtungen diskreter Objektpunkte berücksichtigt werden. Dies gilt sowohl für die Beobachtungen terrestrischer Laserscannerdaten als auch für alle Bilddaten. Dazu müssen geeignete natürliche Objektpunkte bzw. geeignete Oberflächenstruktur vorhanden sein, oder es müssen geeignete Zielmarken am Objekt angebracht bzw. in der aufgenommenen Szene positioniert werden. Aus diesem Grund ist die Erweiterung des Ausgleichungsansatzes um die Möglichkeit der Berücksichtigung von Linien als Beobachtungen sinnvoll. Zum einen sind Linien bzw. Kanten an vielen Objekten von vornherein vorhanden und zum anderen existieren bereits zahlreiche Ansätze zur automatischen Extraktion von Kanten aus Punktwolken terrestrischer Laserscanner (z.B. [Vosselmann et. al., 2004; Briese, 2006]). Sind die gleichen Kanten in entsprechenden Bilddaten sichtbar, können diese mit Werkzeugen der Bildanalyse ebenfalls erfasst werden. Dabei ist zu beachten, dass beispielsweise Geraden in den Panoramen und Fisheye-Bildern in den meisten Fällen stark gekrümmt abgebildet werden. Die Herstellung der Korrespondenz zwischen den Kanten aus Laserscanner-Punktwolken und den Linien aus zugehörigen Bildern kann interaktiv oder gegebenenfalls auch automatisch erfolgen. Schließlich müssen, basierend auf den in dieser Arbeit entwickelten geometrischen Modellen, erweiterte Modellansätze entwickelt werden. Diese Modellansätze berücksichtigen die mathematische Beschreibung von Linien, im einfachsten Fall von Geraden, so dass diese als Beobachtungen in die integrierte Bündelblockausgleichung einfließen können. Beispielsweise werden in [Meierhold et. al., 2008] verschiedene Varianten für die Berücksichtigung von Geraden im geometrischen Modell zentralperspektiver Kameras untersucht. Dabei wurden die geometrischen geraden-basierten Modelle genutzt, um die gegenseitige Referenzierung zwischen Bildern und Laserscanner-Punktwolken durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt herzustellen. Für die Verwendung von Linien als Beobachtungen im funktionalen Ansatz der integrierten Bündelblockausgleichung als Ergänzung zu den Beobachtungen diskreter Objektpunkte sind mehrere strukturelle Erweiterungen und Anpassungen des Algorithmus und der entwickelten Software notwendig.

Insgesamt soll die Arbeit einen Beitrag für die derzeitige Entwicklung darstellen, bei der in vielen geodätischen bzw. photogrammetrischen Anwendungen terrestrische Laserscannerdaten mit Bilddaten unterschiedlicher Aufnahmegeometrie kombiniert werden. Es wurde gezeigt, dass das Potenzial dieser Datenkombination über die heute übliche Praxis, der Nutzung von Bilddaten für die Kolorierung von Punktwolken und Texturierung von 3D-Modellen, deutlich hinausgeht.

Literaturverzeichnis

- (1) **ABDELHAFIZ, A., RIEDEL, B., NIEMEIER, W., 2005:**
“3D Image” as a result from the combination between the laser scanner point cloud and the digital photogrammetry. Grün, A; Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII.
- (2) **ABDELHAFIZ, A., NIEMEIER, W., 2006:**
Developed technique for automatic point cloud texturing using multi images applied to a complex site. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (3) **ABRAHAM, S., FÖRSTNER, W., 2005:**
Fisheye-stereo calibration and epipolar rectification. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 59 (2005): 278 – 288.
- (4) **AGUILERA, D.G., LAHOZ, J.G., 2006:**
Laserscanning or image-based modelling? A comparative through the modelization of San Nicolas Church. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (5) **AL-MANASIR, K., FRASER, C., 2006:**
Registration of terrestrial laserscanner data using imagery. The Photogrammetric Record, Volume 21 (115), pp. 255-268, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK.
- (6) **ALSHAWABKEH, Y., HAALA, N., FRITSCH, D., 2007:**
Registrierung terrestrischer Bild- und LIDAR-Daten für die Dokumentation von Kulturdenkmälern. PFG - Organ der deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), Heft 3, 2007, pp. 197-206.
- (7) **AMIRI PARIAN, J. & GRÜN, A., 2004:**
A refined sensor model for panoramic cameras. Panoramic Photogrammetry Workshop. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- (8) **AMIRI PARIAN, J., GRÜN, A., 2005:**
Integrated laser scanner and intensity image calibration and accuracy assessment. Laser scanning 2005. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 3/W19.
- (9) **AMIRI PARIAN, J., 2007:**
Sensor modelling, terrestrial panoramic camera calibration and close-range photogrammetric network analysis. Dissertation ETH Zürich.
- (10) **BAARDA, W., 1968:**
A testing procedure for use in geodetic networks. Netherlands Geodetic Commission, Vol. 2, No. 5, Delft.
- (11) **BACKSTEIN, H., PAJDLA, T., 2002:**
Panoramic Mosaicing with a 180° Field of View Lens. Proceedings of the IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, pp. 60-67, IEEE press.
- (12) **BARBER, D., MILLS, J., BRYAN, P.G., 2001:**
Laser scanning and Photogrammetry: 21st century metrology. Proceedings of 18th International Symposium CIPA 2001. Potsdam, pp. 360-366.
- (13) **BARNEA, S., FILIN, S., 2007:**
Registration of terrestrial laser scans via image based features. ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser, Espoo, Finland, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI 3/W52.
- (14) **BECKER, R., BENNING, W., EFFKEMANN, C., 2004:**
3D-Monoplotting – Kombinierte Auswertung von Laserscannerdaten und photogrammetrischen Aufnahmen. ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 5, Band 129, pp. 347 - 355
- (15) **BECKER, S., HAALA, N., 2007:**
Combined feature extraction for façade reconstruction. ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser, Espoo, Finland, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI 3/W52.

- (16) **BEERS, B.J., 1997:**
3-D landsurveying using the FRANK method: CycloMedia Mapper. In: Gruen/Kahmen: Optical 3-D Measurement Techniques IV. Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 283-290
- (17) **BELLIAN, J.A., KERANS, C., JENNETTE, D.C., 2005:**
Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning LIDAR technology in stratigraphic modeling. Journal of Sedimentary Research, 75(2), pp. 166-176.
- (18) **BENNING, W., BECKER, R., EFFKEMANN, C., 2004:**
Extraktion von Ecken, Kanten und Profilen aus Laserscannerdaten, gestützt durch photogrammetrische Aufnahmen. Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 213-220.
- (19) **BERALDIN, J.-A., 2004:**
Integration of laser scanning and close-range Photogrammetry – the last decade and beyond. XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXV-B5.
- (20) **BESL, P., MCKAY, N., 1992:**
A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14 (2), pp. 239–256.
- (21) **BIENERT, A., 2006:**
Glättung von aus Laserscannerpunktwolken extrahierten Profilen. Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik –Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (22) **BLAIS, F., 2004:**
Review of 20 years of range sensor development. Journal of Electronic Imaging, Volume 13 (1), pp. 231-240.
- (23) **BÖHLER, W., MARBS, A., 2004:**
Vergleichende Untersuchungen zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Laserscanner. Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (24) **BÖHM, J., BECKER, S., HAALA, N., 2007:**
Model refinement by integrated processing of laser scanning and photogrammetry. 3D-Arch 2007: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5/W47.
- (25) **BÖHM, J., 2007:**
Kamera-Navigation in Punktwolken. Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik –Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007: 172-179, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (26) **BONNET, G., 2004:**
SPHERON – Panoramic cameras and processing of panoramic data. Panoramic Photogrammetry Workshop, Dresden, Germany. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- (27) **BOUROUMAND M., STUDNICKA N., 2004:**
The Fusion of Laser Scanning and Close Range Photogrammetry In Bam Laser-photogrammetric Mapping of Bam Citadel (arg-e-bam)/iran. XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXV-B5.
- (28) **BRIESE, C., 2006:**
Structure line modelling based on terrestrial laserscanner data. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (29) **BRINGMANN, O., 2007:**
PointCloud – Laserscannerdaten in AutoCAD auswerten. Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (30) **BROWN, D., 1971:**
Close-Range Camera Calibration. Photogrammetric Engineering, Vol. 37, No. 8, pp. 855-866.

- (31) **BUCKLEY, S.J., HOWELL, J.A., ENGE, H.D., LEREN L.S., KURZ, T.H., 2006:**
Integration of terrestrial laser scanning, digital photogrammetry and geostatistical methods for high-resolution modelling of geological outcrops. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (32) **BUCKLEY, S.J., HOWELL, J.A., ENGE, H.D., KURZ, T.H., 2008:**
Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. Journal of the Geological Society, London, 165(3), pp. 625-638.
- (33) **CHEN, Y., MEDIONI, G., 1991:**
Object modeling by registration of multiple range images. In: International Conference on Robotics and Automation, pp. 2724-2729.
- (34) **DEUMLICH, F., STAIGER, R., 2002:**
Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (35) **DOLD, C., BRENNER, K., 2006:**
Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (36) **EBNER, H., 1972:**
A posteriori Varianzschätzungen für die Koordinaten unabhängiger Modelle. Zeitschrift für Vermessungswesen, 97, pp. 166-172.
- (37) **EFFKEMANN, C., 2003:**
Integrierte Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen und Laserscannerdaten mit Phidias. In „Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik“, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 203-208.
- (38) **EL-HAKIM, S., 1986:**
Real-Time Image Meteorology with CCD Cameras. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 11, pp. 1757 - 1766.
- (39) **FARO EUROPE GMBH & Co. KG, 2005:**
Brochure FARO Laser Scanner LS. http://www.faro.com/coloroption/pdf/FARO_Brochure_LaserScanner.pdf (accessed 23 April 2008)
- (40) **FÖRSTNER, W., 1979:**
Ein Verfahren zur Schätzung von Varianz- und Kovarianzkomponenten. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Nr. 86, pp. 446-453.
- (41) **GRAFAREND, E., 1978:**
Schätzung von Varianz und Kovarianz der Beobachtungen in geodätischen Ausgleichungsmodellen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 85, pp. 41-49.
- (42) **GUARNIERI, A., REMONDINO, F., VETTORE, A., 2006:**
Digital Photogrammetry and TLS Fusion applied to cultural heritage 3D modeling. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (43) **HAALA, N., REULKE, R., THIES, M., ASCHOFF, T., 2004:**
Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigations in forest applications and tree species recognition. Panoramic Photogrammetry Workshop. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- (44) **HAGGREN, H., HYYPÄ, H., JOKINEN, O., KUKKO, A., NUIKKA, M., PITKÄNEN, T., PÖNTINEN, P., RÖNNHOLM, P., 2004:**
Photogrammetric application of spherical imaging. Panoramic Photogrammetry Workshop, Dresden, Germany. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- (45) **HEIKKINEN, J., 2005:**
The circular imaging block in close-range photogrammetry. Dissertation an der Helsinki University of Technology, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing.

- (46) **HELLMEIER, H.-J., 1983:**
Fisheye-Objektive in der Nahbereichsphotogrammetrie - Theoretische und praktische Untersuchungen. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, DGK-C Nr. 286, München.
- (47) **HINSKEN, L., 1987:**
Algorithmen zur Beschaffung von Näherungswerten für die Orientierung von beliebig im Raum angeordneten Strahlenbündeln. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, DGK-C Nr. 333, München.
- (48) **HOSKE, P., KUNZE, G., 2004:**
Possible applications of panoramic Photogrammetry concerning construction machines and building sites. Panoramic Photogrammetry Workshop. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- (49) **HUANG, F., WEI, S.K., KLETTE, R., 2002a:**
Calibration of Line-based Panoramic Cameras. Conference on Image and Vision Computing '02, Proceedings pp. 107-111, University of Auckland, New Zealand.
- (50) **HUANG, F., WEI, S.K., KLETTE, R., GIMEL'FARB, G., 2002b:**
Cylindrical Panoramic Cameras – From Basic Design to Applications. Conference on Image and Vision Computing '02, Proceedings pp. 101-106, University of Auckland, New Zealand.
- (51) **INGENSAND, H., 1988:**
TPM—Ein neues Gerät zur vollautomatischen Prüfung von Teilkreisen in elektronischen Theodoliten. X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Technische Universität München.
- (52) **JANSA, J., STUDNICKA, N., FORKERT, G., HARING, A., KAGER, H., 2004:**
Terrestrial laserscanning and photogrammetry – acquisition techniques complementing one another. XX ISPRS Congress, Istanbul 2004, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXV, Part B5.
- (53) **JOECKEL, R., STOBER, M., 1999:**
Elektronische Entfernungsmessung. 4., neubearbeitete und erweiterte Auflage Wittwer Verlag, Stuttgart (Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 18).
- (54) **KERN, F., THOMSEN, S., MITTELSTÄDT, D., GAY, O., 2002:**
Integrierte Auswertung von Laserscanner- und Bilddaten für das Facility Management. Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik –Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2002, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (55) **KERN, F., 2003:**
Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laser-Scanner-Daten. Dissertation TU Braunschweig, 2003.
- (56) **KERSTEN, T., STERNBERG, H., MECHELKE, K., ACEVEDO PARDO, C., 2004:**
Terrestrischer Laserscanner Mensi GS100/GS200 - Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg. Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik –Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (57) **KERSTEN, T., STERNBERG, H., MECHELKE, K., 2005:**
Investigations into the accuracy behaviour of the terrestrial laser scanning system MENSİ GS100. Grün, A; Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII.
- (58) **KLEIN, B., 2001:**
Untersuchungen zur Feldprüfung geodätischer Instrumente mittels Varianzkomponentenschätzung. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, unveröffentlicht.
- (59) **KLEIN, B., 2005:**
Modeling an uncertainty measure to laser scanner measurements. Grün, A; Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII.
- (60) **KLEMMANN, C., 2005:**
'As-built'-Dokumentation eines Pumpwerkes mit terrestrischen Laserscannerdaten und Bilddaten. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- (61) **KLETTE, R., SCHEIBE, K., 2005:**
Combinations of range data and panoramic images – New opportunities in 3D scene modeling. Proceedings of the Computer Graphics, Imaging and vision: New Trends (CGIV'05).

- (62) **KO SHU-PUI, P., 1994:**
Small Matrix Toolbox for C Programmers. Version 0.42, Hong Kong, Internet:
<http://archives.math.utk.edu/software/msdos/numerical.analysis/matrix04/> (Download: 21.07.2002)
- (63) **KOCH, K.-R., 1981:**
Varianz- und Kovarianzkomponentenschätzung für Streckenmessungen auf Eichlinien. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Nr. 88, pp. 125–132.
- (64) **KOCH, K.-R., 2000:**
Einführung in die Bayes-Statistik. Springer-Verag, Berlin, Heidelberg, New York.
- (65) **KOCH, K.-R., 2004:**
Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. Dümmler Verlag, Bonn, 4. Auflage.
- (66) **KRAUS, K., 1996:**
Photogrammetrie – Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Band 2, 3. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- (67) **KRAUS, K., 2004:**
Photogrammetrie – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Band 1, Walter de Gruyter Verlag, Berlin.
- (68) **KRUCK, E., 1983:**
Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalen Modell. Dissertation an der Universität Hannover.
- (69) **KRÜGER, S., SCHEELE, M., SCHUSTER, R., 2005:**
New calibration scheme for panoramic line scanners. 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, 5/W8.
- (70) **KUBIK, K., 1967:**
Schätzung der Gewichte der Fehlergleichungen beim Ausgleichungsproblem nach vermittelnden Beobachtungen. Zeitschrift für Vermessungswesen, 92, pp. 173–178.
- (71) **KURZ, T.H., BUCKLEY, S.J., HOWELL, J.A., SCHNEIDER, D., 2008:**
Geological outcrop modelling and interpretation using ground based hyperspectral and laser scanning data fusion. XXIIth ISPRS Congress, Beijing, China, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII-B5.
- (72) **LEE, I., CHOI, Y., 2004:**
Fusion of terrestrial laser scanner data and images for building reconstruction. XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXV-B5.
- (73) **LICHTI, D., FRANKE, J., 2005:**
Self-calibration of the IQSun880 laser scanner. Grün, A; Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII.
- (74) **LICHTI, D., LICHT, M.G., 2006:**
Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (75) **LICHTI, D., 2007:**
Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 61, pp. 307-324.
- (76) **LISOWSKI, W., WIEDEMANN, A., 1998:**
Auswertung von Bilddaten eines Rotationszeilenscanners. DGPF-Jahrestagung, München, Publikationen der DGPF, Band 7, pp. 183-189.
- (77) **LUHMANN, T., 2003:**
Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 2. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (78) **LUHMANN, T., TECKLENBURG, W., 2004:**
3-D object reconstruction from multiple-station panorama imagery. Panoramic Photogrammetry Workshop. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.

- (79) **LUHMANN, T., 2004:**
A historical review on panorama photogrammetry. Panoramic Photogrammetry Workshop, Dresden, Germany, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- (80) **LUHMANN, T., TECKLENBURG, W., 2005:**
High-resolution image rectification and mosaicing – a comparison between panorama camera and digital camera. 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop, Berlin, Germany. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, 5/W8.
- (81) **LUHMANN, T., HASTEDT, H., TECKLENBURG, W., 2006:**
Modelling of chromatic aberration for high precision photogrammetry. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (82) **LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S., HARLEY, I., 2006:**
Close range photogrammetry – Principles, Methods and Applications. Whittles Publishing, UK.
- (83) **MAAS, H.-G., 1992:**
Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik. Dissertation an der ETH Zürich - Nr. 9665, Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, Nr. 50.
- (84) **MAAS, H.-G., NIEDERÖST, M., 1997:**
The accuracy potential of large format stillvideo cameras. Videometrics V, El-Hakim (Eds.): SPIE Proceedings Series Vol. 3174.
- (85) **MAAS, H.-G., 2005:**
Akquisition von 3D-GIS Daten durch Flugzeuglaserscanning. Kartographische Nachrichten, Vol. 55, Heft 1, pp. 3-11.
- (86) **MAAS, H.-G., BIENERT, A., SCHELLER, S., KEANE, E., 2008:**
Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. International Journal of Remote Sensin, Vol. 29, No. 5, pp. 1579–1593.
- (87) **MECHELKE, K., LINDSTAEDT, M., KERSTEN, T., 2008:**
Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuester terrestrischer Laserscanningsysteme – Leica ScanStation 2 und Z+F IMAGER 5006. Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik –Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (88) **MEIERHOLD, N., BIENERT, A., SCHMICH, A., 2008:**
Line-based referencing between images and laser scanner data for image-based point cloud interpretation in a CAD-environment. XXIth ISPRS Congress, Beijing, China, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII-B5.
- (89) **MÖSER, M., MÜLLER, G., SCHLEMMER, H., WERNER, H., (HRSG.), 2000:**
Handbuch Ingenieurgeodäsie – Grundlagen. 3., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (90) **MULSOW, C., SCHNEIDER, D., ULLRICH, A., STUDNICKA, N., 2004:**
Untersuchungen zur Genauigkeit eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamerasystems. Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik –Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004: 108-113, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (91) **NEITZEL, F., 2006:**
Investigations of axes errors of terrestrial laser scanners. 5th International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days, Berlin.
- (92) **NEUBAUER, W., DONEUS, M., STUDNICKA, N., RIEGL, J., 2005:**
Combined high resolution laser scanning and photogrammetrical documentation of the pyramids at Giza. CIPA 2005 XX International Symposium, Torino, Italy.
- (93) **NEUBAUER, W., 2006:**
Test-Dokumentation 3D Laser Scanner: Leipzig – Petersstraße 33, Grabung L103. Bericht an das Sächsische Landesamt für Archäologie.
- (94) **NIEMEIER, W., 2002:**
Ausgleichsrechnung. Verlag de Gruyter, Berlin - New York.

- (95) **OSWALD, W., 1992:**
Zur kombinierten Ausgleichung heterogener Beobachtungen in hybriden Netzen. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 44.
- (96) **PAAR, G., BAUER, A., KONTRUS, H., 2005:**
Texture-based fusion between laser scanner and camera for tunnel surface documentation. Grün, A; Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII.
- (97) **PFEIFER, N., BRIESE, C., 2007:**
Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser, Espoo, Finland, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI 3/W52.
- (98) **PRENZEL, W.-D., 1986:**
Entwicklungstendenzen der fotografischen Optik. Bild und Ton – wissenschaftliche Zeitschrift für visuelle und auditive Medien. Ausgabe 1/1986. Fotokinoverlag Leipzig.
- (99) **PRZYBILLA, H.-J., 2006:**
Fusion of terrestrial laser scanning and digital photogrammetry. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (100) **PU, S., VOSSELMANN, G., 2006:**
Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (101) **RABBANI, T., VAN DEN HEUVEL, F., 2005:**
Efficient hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds. Laser scanning 2005. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 3/W19.
- (102) **RAY, S. F., 1994:**
Applied photographic optics – lenses and optical systems for photography, film, video and electronic imaging. 2nd Edition, Focal Press.
- (103) **REGENSBURGER, K., 1990:**
Photogrammetrie – Anwendungen in Wissenschaft und Technik. 1. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- (104) **REISSMANN, G., 1976:**
Die Ausgleichungsrechnung – Grundlagen und Anwendungen in der Geodäsie. 4. Auflage, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- (105) **REMONDINO, F., BÖRLIN, N., 2004:**
Photogrammetric calibration of image sequences acquired with a rotating camera. Panoramic Photogrammetry Workshop, Dresden, Germany. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- (106) **REULKE, R., WEHR, A., 2004:**
Mobile panoramic mapping using CCD-Line camera and Laser scanner with integrated position and orientation system. Panoramic Photogrammetry Workshop, Dresden, Germany, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- (107) **RESHETYUK, Y., 2006:**
Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. Licentiate thesis in Geodesy. Department of Transport and Economics, Division of Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- (108) **RESSL, C., 2005:**
Reconstruction of the Pegasus statue on top of the state opera house in Vienna using Photogrammetry and terrestrial and close-range laser scanning. Grün, A; Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII.
- (109) **RIEGL LASER MEASUREMENT GMBH, 2007:**
Data Sheet LMS-Z420i – Long range & high accuracy 3D terrestrial laser scanner system.
http://www.riegl.com/terrestrial_scanners/lms-z420i_/datasheet_lmsz420i.pdf (accessed 23 April 2008).
- (110) **RIETDORF, A., 2005:**
Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip. Dissertation TU Berlin. Deutsche Geodätische Kommission. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

- (111) **RÖNNHOLM, P., HONKAVAARA, E., LITKEY, P., HYYPÄ, H., HYYPÄ, J., 2007:**
Integration of laser scanning and photogrammetry. ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser, Espoo, Finland, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI 3/W52.
- (112) **RÜGER, W., PIETSCHNER, J., REGENSBURGER, K., 1987:**
Photogrammetrie – Verfahren und Geräte zur Kartenherstellung. 5. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- (113) **RUNNE, H., 1993:**
Geodätische Datengewinnung für Gebäudeinformationssysteme unter Anwendung reflektorloser tachymetrischer Verfahren. Dissertation, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Heft 11.
- (114) **SALEMI, G., ACHILLI, V., CERVATO, C., 2005:**
Data acquisition for cultural heritage navigation: integration of panoramic imaging, terrestrial laser scanning and anaglyphs. 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop, Berlin, Germany, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, 5/W8.
- (115) **SCHEIBE, K., KORSITZKY, H., REULKE, R., SCHEELE, M., SOLBRIG, M., 2001:**
EYESCAN – A High Resolution Digital Panoramic Camera. In: Klette R., Peleg S., Sommer (Hrsg.): Robot Vision 2001, LNCS 1998. Springer Verlag, Berlin, pp. 87-83.
- (116) **SCHEIBE, K., SCHEELE, M., KLETTE, R., 2004:**
Data fusion and visualization of panoramic images and laser scans. Panoramic Photogrammetry Workshop, Dresden, Germany, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- (117) **SCHELLER, S., SCHNEIDER, D., 2006:**
Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktwolken zur Rekonstruktion von Tragwerken. Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (118) **SCHENK, H., DÜRR, P., KUNZE, D., LAKNER, H., KÜCK, H., 2000:**
An electrostatically excited 2D-micro-scanning-mirror with an in-plane configuration of the driving electrodes. 13th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp 473–478.
- (119) **SCHMIDT, H., 1997:**
Was ist Genauigkeit? Zum Einfluss systematischer Abweichungen auf Mess- und Ausgleichungsergebnisse. Vermessungswesen und Raumordnung, Heft 4(1997), Band 59, pp. 173-184, Dümmler Verlag Bonn.
- (120) **SCHNEIDER, D., 2002:**
Geometrische Modellierung einer digitalen Rotationszeilenkamera für die Nutzung als photogrammetrisches Messsystem. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- (121) **SCHNEIDER, D., MAAS, H.-G., 2003:**
Geometric Modelling and Calibration of a High Resolution Panoramic Camera. Grün, A., Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VI, Zürich, Vol. II, pp. 122-129.
- (122) **SCHNEIDER, D., MAAS, H.-G., 2004:**
Development and Application of an Extended Geometric Model for High Resolution Panoramic Cameras. XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol XXXV, Part B.
- (123) **SCHNEIDER, D., MAAS, H.-G., 2005:**
Combined bundle adjustment of panoramic and central perspective images. 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5/W8.
- (124) **SCHNEIDER, D., PÖTZSCH, M., MAAS, H.-G., 2005:**
Accuracy and application potential of the 94 megapixel RGB macro-scanning camera Pentacon Scan 5000. CIPA Symposium, Turin, Italien. CIPA Archives for Documentation of Cultural Heritage, Volume XX-2005 & ISPRS International Archives, Volume XXXVI-5/C34.
- (125) **SCHNEIDER, D., 2006:**
Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams. H. Kahmen, A. Chrzanowski (Eds.): Proceedings of the 3rd IAG Symposium of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, Baden, Austria.

- (126) **SCHNEIDER, D., MAAS, H.-G., 2006:**
A geometric model for linear-array-based terrestrial panoramic cameras. The Photogrammetric Record, 21(115): 198-210, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK.
- (127) **SCHNEIDER, D., 2007:**
Kombinierte Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung bei der Fusion terrestrischer Laserscannerdaten, Panorama- und zentralperspektivischer Bilddaten. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, 27. DGPF-Jahrestagung Muttentz/Basel (Dreiländertagung), Band 16, pp. 465-474.
- (128) **SCHNEIDER, D., MAAS, H.-G., 2007:**
Integrated Bundle Adjustment of Terrestrial Laser Scanner Data and Image Data with Variance Component Estimation. The Photogrammetric Journal of Finland, Volume 20/2007, pp. 5 – 15.
- (129) **SCHNEIDER, D., SCHWALBE, E., 2008:**
Integrated processing of terrestrial laser scanner data and fisheye-camera image data. XXith ISPRS Congress, Beijing, China. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVII, Part B5.
- (130) **SCHRÖDER, G., 1981:**
Technische Fotografie – Grundlagen und Anwendungen in Technik und Wissenschaft. Kamprath Reihe, Vogel Verlag, Würzburg.
- (131) **SCHULZ, T., INGENSAND, H., 2004:**
Laserscanning – Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen. Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 90-97.
- (132) **SCHWALBE, E., SCHNEIDER, D., 2005:**
Design and testing of mathematical models for a full-spherical camera on the basis of a rotating linear array sensor and a fisheye lens. Grün, A; Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII. Vol. I: 245-254.
- (133) **SCHWALBE, E., 2005:**
Geometric Modelling and calibration of fisheye lens camera systems. Panoramic Photogrammetry Workshop. 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, 5/W8.
- (134) **SCHWALBE, E., MAAS, H.-G., 2006:**
Ein Ansatz zur Elimination der chromatischen Aberration bei der Modellierung und Kalibrierung von Fisheye-Aufnahmesystemen. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006, pp. 122-129.
- (135) **SCHWALBE, E., MAAS, H.-G., KENTER, M., WAGNER, S., 2006:**
Profile based sub-pixel-classification of hemispherical images for solar radiation analysis in forest ecosystems. Remote Sensing: From Pixels to Processes, ISPRS Mid-term Symposium Com. VII, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 7.
- (136) **SCHWERMANN, R., EFFKEMANN, C., 2004:**
Kombiniertes Monoplotting in Laserscanner- und Bilddaten mit PHIDIAS. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, 122-129.
- (137) **SEIDL, K., 2001:**
Aufbau und experimentelle Untersuchung des Präzisionsrotationsantriebes für die hochauflösende Panorama-messkamera „EYESCAN – M2 metric“. Projektarbeit am Gymnasium Dresden-Blasewitz „Martin Anderson Nexö“, Dresden.
- (138) **SEIDL, K., KNOBBE, J., SCHNEIDER, D., SCHÖNHERR, H.-J., LAKNER, H., 2006:**
Opto-mechanical combination of a line scanning camera and a micro laser scanner system. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- (139) **SIEG, D., HIRSCH, M., 2000a:**
Varianzkomponentenschätzung in ingenieurgeodätischen Netzen; Teil 1: Theorie. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 3/2000: 82-90.
- (140) **SIEG, D., HIRSCH, M., 2000b:**
Varianzkomponentenschätzung in ingenieurgeodätischen Netzen; Teil 2: Anwendungen. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 4/2000: 122-137.

- (141) **STAHLBERG, C., 1997:**
Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung. ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 5, Band 122, pp. 225-235.
- (142) **STRACKENBROCK, B., TSUCHIYA, B., SCHEIBE, K., 2005:**
3D-Modelling and Visualisation from 3D-Laser Scans and Panoramic Images. 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop, Dresden, Germany, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, 5/W8.
- (143) **SVOBODA, T., 1999:**
Central Panoramic Cameras: Design, Geometry, Egomotion for Machine Perception. Dissertation an der Czech Technical University, Prag
- (144) **SVOBODA, T., PAJDLA, T., 2000:**
Panoramic cameras for 3D computation. Proceedings of the Czech Pattern Recognition Workshop, Czech Society for Pattern Recognition, pp. 63-70
- (145) **SVOBODA, T., PAJDLA, T., 2002:**
Epipolar Geometry for Central Catadioptric Cameras. International Journal of Computer Vision 49(1), pp. 23-37, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- (146) **TECKLENBURG, W., LUHMANN, T., 2002:**
Verfahrensentwicklung zur automatischen Orientierung von Panoramabildverbänden als Grundlage der geometrischen Erfassung von Innenräumen. Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie und Laserscanning – Anwendung für As-built-Dokumentation und Facility Management. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2002, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (147) **TESCHKE, A., 2004:**
Genauigkeitsuntersuchung des terrestrischen Laserscanners Riegl LMS-Z420i. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- (148) **TOURNAS, L., TSAKIRI, M., 2005:**
Point cloud registration using orthophotos. Grün, A; Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII.
- (149) **ULLRICH, A., SCHWARZ, R., KAGER, H., 2003:**
Multistationsausgleichung für ein Laserscanner-System mit aufgesetzter Kamera. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang (2003), 4: 281-287.
- (150) **VAN DEN HEUVEL, F., VERWAAL, R., BEERS, B., 2007:**
Automated calibration of fisheye camera systems and the reduction of chromatic aberration. PFG - Organ der deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), Heft 3, 2007, pp. 157-166.
- (151) **VAN DER MEER, F., 1996:**
Spectral mixture modelling and spectral stratigraphy in carbonate lithofacies mapping. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 51(3), pp. 150-162.
- (152) **Vetters, K., 1996:**
Formeln und Fakten – Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Leipzig.
- (153) **VOSSELMAN, G., GORTE, B.G.H., SITHOLE, G., RABBANI, T., 2004:**
Recognising structure in laser scanner point clouds. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 46, part 8/W2, Freiburg, Germany, pp. 33-38.
- (154) **WALTER, S., 2005:**
Genauigkeitsuntersuchungen zur Orthophotoerstellung in der Software RiScan Pro. Studienarbeit an der Technischen Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- (155) **WALTER, S., 2006:**
Voruntersuchungen zur Kalibrierung terrestrischer Laserscanner. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- (156) **WELSCH, W., 1984:**
Grundlagen, Gebrauchsformeln und Anwendungsbeispiele der Schätzung von Varianzkomponenten. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Band 82, pp. 296-301, Baden-Dättwil, Schweiz.

- (157) **WENDT, A., HEIPKE, C., 2006:**
Area-based orientation of brightness, range and intensity images. PFG - Organ der deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), Heft 3, 2007, pp. 187-196.
- (158) **WENDT, A., 2008:**
Objektraumbasierte simultane multisensorale Orientierung. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover.
- (159) **WESTER-EBBINGHAUS, W., 1985:**
Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischen Beobachtungen. Zeitschrift für Vermessungswesen, 110 (3), pp. 101-111.
- (160) **WITTE, B., SCHMIDT, H., 2000:**
Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik im Bauwesen. 4. neubearbeitete Auflage, Wittwer Verlag, Stuttgart (Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 17).
- (161) **WOLF, H., 1975:**
Ausgleichungsrechnung I und II : Formeln zur praktischen Anwendung. Dümmler Verlag. Bonn.
- (162) **ZINNDOF, S., 1985:**
Freies Netz – Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 4/1985, pp. 109-114.

Abkürzungen

2D / 3D	Zweidimensional / Dreidimensional
A/D	Analog/Digital
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
C/C++	C/C++ - Programmiersprache
CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DSNU	Dark-Signal Non-Uniformity (Dunkelsignalungleichförmigkeit eines Digitalsensors)
EDM	Elektronisches Distanzmessgerät
GB	Gigabyte
GPS	Global Positioning System
HTML	Hypertext Markup Language (Standard-Beschreibungssprache für Webseiten)
ICP	Iterative Closest Point (Algorithmus zur Registrierung von Punktwolken)
INS	Inertiales Navigationssystem
LSM	Least Squares Matching
MFC	Microsoft Foundation Classes (Klassenbibliothek für Windows-Benutzeroberflächen)
MKQ	Methode der kleinsten Quadrate
PRNU	Photo-Response Non-Uniformity (Hellsignalungleichförmigkeit eines Digitalsensors)
RANSAC	Random Sample Consensus (robuster Algorithmus zur Ausreißerdetektion)
RGB	Rot, Grün, Blau
RMS	Rout Mean Square Error
SLR	Single Lens Reflex (Spiegelreflexkamera)
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TIFF	Tag Image File Format
TLS	Terrestrischer Laserscanner
VKS	Varianzkomponentenschätzung
VRML	Virtual Reality Modelling Language (Beschreibungssprache für 3D-Szenen)
WLAN	Wireless Local Area Network (Drahtloses lokales Funknetz)

Formelzeichen

Manche Formelzeichen haben mehrere Bedeutungen und es sind nicht alle verwendeten Formelzeichen in der Liste enthalten. Einige der hier aufgeführten Formelzeichen werden in einzelnen Kapiteln in einem anderen Zusammenhang verwendet. Sie werden in diesen Kapiteln gesondert definiert.

A	Koeffizientenmatrix
A_1, A_2, A_3	Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung eines Objektivs
A_h, A_v	horizontale und vertikale Auflösung
α, β	Eintritts- und Austrittswinkel bei Objektiven; Horizontal- und Vertikalwinkel im Laserscannermodell
$\Delta\alpha, \Delta\beta$	Abweichungen des Horizontal- und Vertikalwinkels
a, b, c, d	Quaternionen zur Beschreibung einer räumlichen Rotation
a, b, c	Parameter trigonometrischer Funktionen beim Panoramakameramodell (Amplitude, Frequenz, Phase)
a_i, b_i, c_i	Zusatzparameter zu Distanz, Horizontal- und Vertikalwinkel bei einem Laserscanner
a_0	Parameter zur Modellierung des konstanten Additionsanteils bei der Distanzmessung
a_1	Parameter zur Modellierung der Maßstabsabweichung bei der Distanzmessung
B	Bedingungsmatrix
B_1, B_2	Parameter der radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnung eines Objektivs
b	Basis zwischen zwei Aufnahmen
b_z	Parameter zur Modellierung der Zielachsabweichung
b_K	Parameter zur Modellierung der Kippachsabweichung
b_E	Parameter zur Modellierung der Exzentrizität der Zielachse bezüglich der Stehachse
b_{T1}, b_{T2}	Parameter zur Modellierung der horizontalen Teilkreisexzentrizität
c	Kamerakonstante
c_H	Parameter zur Modellierung der Höhenindexabweichung
c_E	Parameter zur Modellierung der Exzentrizität der Zielachse bezüglich der Kippachse
c_{T1}, c_{T2}	Parameter zur Modellierung der vertikalen Teilkreisexzentrizität
C_1, C_2	Parameter der Affinität und Scherung eines Bildes
$D, \Delta D$	Distanz, Abweichungen der Distanz
e	Exzentrizität zwischen Projektionszentrum und Rotationsachse bei Rotationszeilenkameras
g, i, j, k	Laufindizes (unterschiedliche Verwendung)
H'	Bildhauptpunkt
K	Kantung der Sensorzeile einer Panoramakamera
K'	Kernlinie
I	Beobachtungsvektor
N	Neigung der Sensorzeile einer Rotationszeilenkamera
N	Normalgleichungsmatrix
n	Anzahl Beobachtungen
NV	normierte Verbesserungen der Beobachtungen
O	Projektionszentrum
P	Gewichtsmatrix
P, P'	Punkt im Objekt- und im Bildkoordinatensystem

$\mathbf{Q}_{LL}, \mathbf{Q}_{XX}, \mathbf{Q}_{vv}$	Kofaktormatrix der Beobachtungen, der Unbekannten, der Verbesserungen
r	Radius; Redundanz; Anzahl der Bedingungsgleichungen
$r', \Delta r'$	Bilddradius, radialer Versatz
r_0	zweiter Nulldurchgang der radial-symmetrischen Verzeichnungskurve
r, ζ, z	Koordinaten eines zylindrischen Koordinatensystems
r, ζ, φ	Koordinaten eines sphärischen Koordinatensystems
$\mathbf{R}, r_{ij}$	Rotationsmatrix und Rotationselemente
$\mathbf{R}_{LL}, r_i$	Redundanzmatrix und Redundanzanteile
RMS_{XYZ}	RMS der Standardabweichungen der Objektkoordinaten
ρ_{ij}	Korrelationskoeffizient
σ	Standardabweichung
σ_0	Standardabweichung der Gewichtseinheit
$\hat{s}$	(empirische) a-posteriori Standardabweichung
$\hat{s}_0$	(empirische) a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit
Σ_{LL}	Kovarianzmatrix der Beobachtungen
Σ_{XX}	Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten
τ	Auftreffwinkel des Laserstrahles auf die Objektoberfläche
u	Anzahl Unbekannte
u, v	Pixelkoordinaten
U, V	Anzahl der Spalten und Zeilen des Digitalsensors
$\mathbf{v}$	Verbesserungsvektor
$\mathbf{w}$	Widerspruchsvektor
$\hat{\mathbf{x}}$	Vektor der Unbekanntenzuschläge
X, Y, Z	kartesische Koordinaten im Objektkoordinatensystem
X_0, Y_0, Z_0	Position eines Aufnahmegerätes im Objektkoordinatensystem
x, y, z	kartesische Koordinaten Gerätekoordinatensystem
x', y', z'	kartesische Koordinaten eines Bildpunktes im Gerätekoordinatensystem
x', y'	Bildkoordinaten (bzw. Panoramabild- oder Fisheye-Bildkoordinaten)
x'_0, y'_0	Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes
$\Delta x', \Delta y'$	Korrekturterme der Bildkoordinaten
ω, φ, κ	Drehwinkel um X-, Y- und Z-Achse

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Gegenüberstellung der Eigenschaften von Laserscanner- und Bilddaten	14
Tabelle 3.1: EYESCAN M3D metric: Aufnahmedaten für verschiedene Objektive	40
Tabelle 5.1: Verringerung der Standardabweichung der Gewichtseinheit durch Zusatzparameter	106
Tabelle 5.2: Im räumlichen Rückwärtsschnitt geschätzte Zusatzparameter für die Panoramakamera	107
Tabelle 5.3: Im räumlichen Vorwärtsschnitt berechnete Objektpunktgenauigkeiten	109
Tabelle 5.4: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung: Objektpunktgenauigkeiten	110
Tabelle 5.5: Abweichungen zwischen berechneten Objektpunkten und Referenzkoordinaten	110
Tabelle 5.6: Ergebnisse der Orientierung des Panoramas im Gerätekoordinatensystem des Laserscanners	114
Tabelle 5.7: Verringerung der Standardabweichung der Gewichtseinheit Zusatzparameter	115
Tabelle 5.8: Im räumlichen Rückwärtsschnitt geschätzte Parameter für die Fisheye-Kamera	116
Tabelle 5.9: Bündelblockausgleichung (Berechnung ohne Berücksichtigung von Zusatzparametern)	119
Tabelle 5.10: Bündelblockausgleichung (Berechnung mit Berücksichtigung von Zusatzparametern)	119
Tabelle 5.11: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung mit bild-varianten Parametern	120
Tabelle 5.12: Verringerung der Standardabweichung der Gewichtseinheit durch Zusatzparameter	122
Tabelle 5.13: Verringerung der Standardabweichungen der Beobachtungen durch Zusatzparameter	126
Tabelle 5.14: In der Bündelblockausgleichung geschätzte Zusatzparameter (Fisheye-Kalibrierraum)	127
Tabelle 5.15: Verringerung der Standardabweichungen der Beobachtungen durch Zusatzparameter	128
Tabelle 5.16: In der Bündelblockausgleichung geschätzte Zusatzparameter (Kalibrierhof)	129
Tabelle 5.17: Unabhängig bestimmte Distanz-Zusatzparameter	131
Tabelle 6.1: Innere Orientierung und Zusatzparameter für die integrierte Bündelblockausgleichung	138
Tabelle 6.2: Anzahl der Unbekannten für ein synthetisches Berechnungsbeispiel	140
Tabelle 8.1: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung (10 Neupunkte an einer Fassade)	165
Tabelle 8.2: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung (35 Neupunkte in 360°-Umgebung)	167
Tabelle 8.3: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung (75 Neupunkte, freie Netzausgleichung)	168
Tabelle 8.4: Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung mit und ohne Laserscanner-Standpunkte	169
Tabelle 8.5: Aus der integrierten Bündelblockausgleichung resultierende Zusatzparameter	170
Tabelle 8.6: Vergleich der ermittelten Objektpunktkoordinaten mit Referenzkoordinaten (äußere Genauigkeit)	171
Tabelle 8.7a: Integrierte Bündelblockausgleichung mit unausgewogenen stochastischen Modellen: a-priori und a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungstypen	174
Tabelle 8.7b: Integrierte Bündelblockausgleichung mit unausgewogenen stochastischen Modellen: durchschnittliche Genauigkeit der geschätzten Objektpunktkoordinaten (RMS)	174
Tabelle 8.8a: Integrierte Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung: a-priori und a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungstypen	175
Tabelle 8.8b: Integrierte Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung: durchschnittliche Genauigkeit der geschätzten Objektpunktkoordinaten (RMS)	175
Tabelle 8.9: Ergebnisse der Orientierung der hyperspektralen Panoramen	178

Tabelle 8.10:	Ergebnisse der Selbstkalibrierung für hyperspektrale Panoramakamera und Laserscanner	180
Tabelle 8.11:	Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung für die Konfigurationen a) und b)	182
Tabelle 8.12:	Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung für die Konfigurationen c) bis h)	183
Tabelle 8.13:	Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung für die Konfigurationen i) bis n)	185
Tabelle 8.14:	Ergebnisse der integrierten Bündelblockausgleichung für die Konfigurationen o) und p)	185
Tabelle 8.15:	Aus der integrierten Bündelblockausgleichung resultierende Zusatzparameter	186
Tabelle 8.16:	Vergleich der ermittelten Objektpunktkoordinaten mit Referenzkoordinaten (äußere Genauigkeit)	187
Tabelle 8.17a:	Integrierte Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung: a-posteriori Standardabweichung der Beobachtungen und Standardabweichung der Varianzkomponenten	189
Tabelle 8.17b:	Integrierte Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung: durchschnittliche Genauigkeit der geschätzten Objektpunktkoordinaten (RMS)	189

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Camera obscura und Exa Rheinmetall, die erste (1952) in Großserie produzierte SLR-Kamera	35
Abbildung 3.2:	360°-Panorama eines historischen Innenhofes	37
Abbildung 3.3:	Grundprinzipien analoger Panoramakameras	38
Abbildung 3.4:	Aufnahmeprinzip einer Rotationszeilenkamera	39
Abbildung 3.5:	Panoramakamera EYESCAN M3D metric und schematische Darstellung	39
Abbildung 3.6:	Prinzip der Orthobilderstellung aus einem 360°-Panorama	42
Abbildung 3.7:	Tangententialprojektion eines Panoramas in eine zentralperspektive Ansicht	42
Abbildung 3.8:	Panoramaausschnitt ca. 90°, Tangentialbild, ebene Entzerrung	43
Abbildung 3.9:	Projektion auf eine Ebene orthogonal zur Rotationsachse	43
Abbildung 3.10:	Prinzip der Schattenwurfmethode und Panorama aus einem Baggerführerhaus	44
Abbildung 3.11:	Stereo-Aufnahmeanordnung für Panoramabilder: horizontale Basis und vertikale Basis	44
Abbildung 3.12:	"Off-Axis"-Stereo-Anordnung für Panoramabilder	45
Abbildung 3.13:	Panorama-Kernliniengeometrie	46
Abbildung 3.14:	Prinzip der Mehrbildauswertung mit Panoramabildern	47
Abbildung 3.15:	Genauigkeitspotenzial (lateral) der Panoramakamera EYESCAN M3D metric	48
Abbildung 3.16:	Fisheye-Objektiv Nikkor 8 mm und Fisheye-Bild	48
Abbildung 3.17:	Rundbild-Fisheye und Vollformat-Fisheye	49
Abbildung 3.18:	Fisheye-Bild in der Forstwissenschaft: Kronendach eines Waldbestandes	50
Abbildung 3.19:	Prinzip des Panorama-Stitching	51
Abbildung 3.20:	Spiegel-Panorama-Prinzip, Spezialobjektiv, Originalbild, umgewandeltes 360°-Panoramabild	52
Abbildung 3.21:	Prinzip einer Rotationszeilenkamera mit Kegelgeometrie	53
Abbildung 3.22:	Aufnahmeprinzip terrestrischer Laserscanner, Riegl LMS-Z420i, Leica HDS 3000	54
Abbildung 3.23:	Beispiel einer Laserscanner-Punktwolke	54
Abbildung 3.24:	Prinzip des Impulslaufzeitverfahrens	56
Abbildung 3.25:	Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens	57
Abbildung 3.26:	Prinzip des Triangulationsverfahrens	58
Abbildung 3.27:	Laserscanner FARO LS - vertikale Strahlauslenkung mit elliptischem Spiegel	58
Abbildung 3.28:	Aufbau des Laserscanners Riegl LMS-Z420i	59
Abbildung 3.29:	Synthetisches Beispiel eines Horizontalschnittes durch eine Punktwolke	61
Abbildung 3.30:	Punktwolke einer Pumpenanlage (links) und 3D-CAD-Modell (rechts)	62
Abbildung 3.31:	Panoramakamera EYESCAN M1 mit Fisheye-Objektiv und vollsphärisches Panorama	63
Abbildung 3.32:	Hardware-Kombinationen aus Laserscanner und Kamera	64
Abbildung 3.33:	Opto-mechanische Kombination aus Laserscanner und Panoramakamera	65
Abbildung 4.1:	Geometrisches Modell der Zentralperspektive	67
Abbildung 4.2:	Geometrisches Modell einer Panoramakamera	69
Abbildung 4.3:	Kartesisches und zylindrisches Kamerakoordinatensystem	70
Abbildung 4.4:	Definition des Bild- und Pixelkoordinatensystems im Panoramabild	71

Abbildung 4.5:	Teiltransformationen zur Herleitung eines geometrischen Modells für Panoramakameras	72
Abbildung 4.6:	Horizontale Darstellung des Zylinderkoordinatensystems	73
Abbildung 4.7:	Vertikale Darstellung des Zylinderkoordinatensystems	74
Abbildung 4.8:	Zylinderkoordinaten und Pixelkoordinaten	74
Abbildung 4.9:	Neigung der Sensorzeile	76
Abbildung 4.10:	Auswirkung der Sensorneigung auf vertikale Bildkoordinaten	76
Abbildung 4.11:	Kantung der Sensorzeile	77
Abbildung 4.12:	Auswirkung der Sensorkantung auf horizontale und vertikale Bildkoordinaten	78
Abbildung 4.13:	Auswirkung der Exzentrizität auf vertikale Bildkoordinaten	79
Abbildung 4.14:	Veranschaulichung des Winkelpositionierungsfehlers	80
Abbildung 4.15:	Zentralperspektive und Fisheye-Abbildung im Vergleich	82
Abbildung 4.16:	Geometrisches Modell einer Fisheye-Kamera	83
Abbildung 4.17:	Geometrisches Modell einer vollsphärischen Panoramakamera	86
Abbildung 4.18:	Teiltransformationen zur Herleitung des geometr. Modells für vollsphärische Panoramakameras	86
Abbildung 4.19:	Geometrie der Kombination von Panoramakamera und Fisheye-Objektiv	88
Abbildung 4.20:	Geometrisches Modell terrestrischer Laserscanner	90
Abbildung 4.21:	Schematische Darstellung möglicher Modellabweichungen der Distanzmessung	94
Abbildung 5.1:	Kalibrierraum für Panoramakameras	104
Abbildung 5.2:	Panoramakamera im Kalibrierraum und Streifenlichtbeleuchtung	105
Abbildung 5.3:	Panoramabild zur Untersuchung des geometrischen Modells	105
Abbildung 5.4:	Grundriss des Kalibrierraumes: Kamerapositionen und Objektpunktgenauigkeiten	108
Abbildung 5.5:	Kalibrierraum und Aufnahmeconfiguration für die Panorama-Bündelblockausgleichung	110
Abbildung 5.6:	Anwendung des geometrischen Modells für Panoramakameras in der Stereoauswertung	112
Abbildung 5.7:	Anwendung des geometrischen Modells für Panoramakameras zur Tangentialbilderstellung	112
Abbildung 5.8:	Laserscanner und Panoramakamera nacheinander auf gleichem Stativ	113
Abbildung 5.9:	Kalibrierraum für Fisheye-Objektive	115
Abbildung 5.10:	Radial-symmetrische Verzeichnung unter Nutzung verschiedener geometrischer Fisheye-Modelle	117
Abbildung 5.11:	Verbleibende Residuen im Fisheye-Bild nach Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes	117
Abbildung 5.12:	Anordnung der Fisheye-Bilder im Kalibrierraum für die Bündelblockausgleichung	118
Abbildung 5.13:	Kalibrierraum für vollsphärische Panoramakameras	121
Abbildung 5.14:	Vollsphärisches Panorama und Residuen nach Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnittes	122
Abbildung 5.15:	360°-Panorama des verwendeten Testfeldes für terrestrische Laserscanner ("Kalibrierhof")	123
Abbildung 5.16:	Terrestrischer Laserscanner im Fisheye-Kalibrierraum	124
Abbildung 5.17:	Anordnung der Laserscanner-Standpunkte im Fisheye-Kalibrierraum	124
Abbildung 5.18:	Anordnung der Laserscanner-Standpunkte im Kalibrierhof	125
Abbildung 6.1:	Beobachtungen in der integrierten Bündelblockausgleichung	136
Abbildung 6.2:	Struktur der Koeffizientenmatrix für die integrierte Bündelblockausgleichung	143
Abbildung 6.3:	Struktur der Koeffizientenmatrix für ein synthetisches Beispiel	144

Abbildung 8.1:	Aufnahmekonfiguration: Neupunktberechnung an einer Fassade	165
Abbildung 8.2:	Aufnahmekonfiguration: Neupunktberechnung in einer 360°-Umgebung	166
Abbildung 8.3:	Vergleich der ermittelten Koordinaten mit Referenzkoordinaten (Differenzvektoren im Grundriss)	172
Abbildung 8.4:	Hyperspektrale Rotationszeilen-Panoramakamera HySpex SWIR-320m	177
Abbildung 8.5:	Aufnahme-Konfigurationen a) und b) (Scans aus der Mitte des Raumes)	182
Abbildung 8.6:	Aufnahme-Konfigurationen c) bis h) (zwei gegenüberliegende Scans)	183
Abbildung 8.7:	Aufnahme-Konfigurationen i) bis n) (mehrere Scans aus den Raumecken)	184
Abbildung 8.8:	Aufnahme-Konfigurationen o) und p) (effiziente Konfigurationen in der Praxis)	185

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften an der Technischen Universität Dresden. Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die mich in dieser Zeit unterstützt, fachlich begleitet und gefördert haben.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas. Durch sein wissenschaftliches Engagement auf den Gebieten der Nahbereichsphotogrammetrie und des terrestrischen Laserscannings hat er mich ständig motiviert. Er hat mich in jeder Hinsicht unterstützt und mir viele Möglichkeiten eingeräumt, mich weiter zu entwickeln. Es ist mir ein besonderes Anliegen, ihm für diese Unterstützung zu danken, insbesondere auch für die nützlichen fachlichen Diskussionen, die vielen Anregungen zum Inhalt der Arbeit und auch die praktischen Hinweise, die dem Entstehen dieser Arbeit überaus dienlich waren.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Möser und Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann für das Lesen der Arbeit und die Übernahme der Gutachtertätigkeit bedanken.

Mein Dank gilt auch allen Kollegen am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden, die mir ständig mit Rat und Tat zur Seite standen. In den letzten Jahren führten wir zahlreiche konstruktive Diskussionen, hatten einen regen Erfahrungsaustausch und ein sehr angenehmes Arbeitsklima, was für das Gelingen dieser Arbeit sehr wichtig war. In der Schlussphase haben mir meine Kollegen andere Arbeiten abgenommen, damit ich mich uneingeschränkt auf das Schreiben dieser Dissertation konzentrieren konnte.

Der Firma Kamera & System Technik (KST), vor allem Hans-Jörg Schönherr, möchte ich zum einen dafür danken, dass mir die Panoramakamera EYESCAN M3D metric für zahlreiche Untersuchungen zur Verfügung gestellt wurde, und zum anderen für die gute Zusammenarbeit.

Der Firma SPHERON-VR AG danke ich für die Bereitstellung der Daten einer vollsphärischen Panoramakamera und der Firma AICON 3D Systems GmbH danke ich dafür, dass ich für die Untersuchung von Panoramakameras zwei unterschiedliche 360°-Kalibrierräume nutzen konnte.

Außerdem danke ich Dr. Simon Buckley und Tobias Kurz von der Universität Bergen in Norwegen, die mir Daten einer hyperspektralen Panoramakamera und terrestrische Laserscannerdaten eines Anwendungsbeispiels aus der Geologie bereitgestellt haben.

Schließlich möchte ich der Firma Riegl Laser Measurement Systems GmbH danken. Stellvertretend für die gesamte Firma sei hier Nikolaus Studnicka genannt, der mir bei Fragen zu dem in der Arbeit verwendeten terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i stets schnelle und kompetente Auskunft gegeben hat.

Anhang

A.1 Software-Implementation: Integrierte Bündelblockausgleichung	A - 3
A.1.1 Programmablauf	A - 3
A.1.2 Datenstruktur	A - 5
A.1.3 Importfunktionen	A - 6
A.1.4 Exportfunktionen	A - 7
A.1.5 Programmbibliothek Bündelblockausgleichung	A - 10
A.1.6 Benutzeroberfläche	A - 13
A.1.7 Ausgewählte Berechnungsmöglichkeiten	A - 15
A.2 Software-Implementation: Varianzkomponentenschätzung	A - 18
A.2.1 Integration in die Programmbibliothek Bündelblockausgleichung	A - 18
A.2.2 Realisierung der Varianzkomponentenschätzung	A - 19
A.2.3 Berechnungsmöglichkeiten	A - 20
A.3 Software-Implementation: Datenstrukturen und Parameter	A - 21
A.3.1 Zentrale Parameter	A - 21
A.3.2 Laserscanner- und Scan-Parameter	A - 23
A.3.3 Kamera- und Bild-Parameter	A - 24
A.3.4 Panoramakamera- und Panorama-Parameter	A - 26
A.4 Software-Implementation: Benutzerschnittstellen	A - 28
A.4.1 Importdateien	A - 28
A.4.2 Exportdateien	A - 30
A.4.3 Statusdatei	A - 31
A.4.4 Benutzeroberfläche	A - 32
A.5 Flussdiagramme	A - 35
A.5.1 Programmbibliothek Bündelblockausgleichung	A - 35
A.5.2 Ablauf der Varianzkomponentenschätzung	A - 36
A.6 Kombination von Laserscanner- und 360°-Panoramabildern	A - 37
A.6.1 Kolorierung und Texturierung von Laserscannerpunktwolken	A - 37
A.6.3 Anwendungsbeispiel aus der Geologie	A - 37

A.1 Software-Implementation: Integrierte Bündelblockausgleichung

Zur Berechnung der integrierten Bündelblockausgleichung wurde ein Programmpaket in der Programmiersprache C/C++ entwickelt, die in diesem Kapitel näher vorgestellt werden soll. Die Software ist weitestgehend objektorientiert gestaltet und erlaubt vielfältige Berechnungsmöglichkeiten. Es wird streng getrennt nach Modulen für den Datenimport und -export, Benutzeroberfläche und der eigentlichen Programmbibliothek. Damit ist es auch möglich, die Programmbibliothek in andere Programme zu integrieren. Als Schnittstelle zwischen den Modulen dient eine Klassen-Datenstruktur, die sämtliche Daten und Parameter enthält. Im Folgenden sollen einige Kernfunktionalitäten der Software aufgelistet werden, auf die später in diesem Kapitel näher eingegangen wird.

- Berechnung von räumlichem Rückwärtsschnitt, räumlichem Vorwärtsschnitt und Bündelblockausgleichung
- Verwaltung unterschiedlicher geometrischer Modelle (momentan terrestrischer Laserscanner, Panoramakamera, zentralperspektive Kamera, verschiedene Fisheye-Modelle) und Möglichkeit zur Erweiterung um andere geometrische Modelle
- Berücksichtigung diverser Zusatzparameter für jedes Modell (physikalische und empirische Parameter) zur Gerätekalibrierung und Möglichkeit zur Erweiterung um andere Zusatzparameter
- Berechnung der Koeffizientenmatrix analytisch oder numerisch
- Äußere Orientierung mit Euler-Winkeln oder Quaternionen
- Datumsfestlegung durch Passpunkte oder Berechnung als freie Ausgleichung
- Eingabemöglichkeit für das stochastische Modell (insbesondere a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen)
- Varianzkomponentenschätzung mit unterschiedlichen Gruppierungen der Beobachtungen
- Ausreißerdetektion und -elimination: Data Snooping
- Ausgabe einer Protokolldatei im HTML-Format
- Berechnung und Ausgabe statistischer Größen zur Ergebnisinterpretation (Standardabweichungen der Beobachtungen, Standardabweichungen der Unbekannten, Korrelationen, Redundanzanteile, normierte Verbesserungen, etc.)
- Ausgabemöglichkeit einer VRML-Datei zur Visualisierung der Näherungswerte (Kontrolle auf Plausibilität und zur Visualisierung der Ergebnisse)
- Ausgabemöglichkeit einzelner Matrizen als Text- oder Bilddatei

A.1.1 Programmablauf

Das in Abbildung A.1 dargestellte Flussdiagramm zeigt den prinzipiellen Aufbau der Software. Die einzelnen Module werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.

Die Projektdatei enthält die Verknüpfungen zu der Beobachtungs-, Unbekannten-, Objektpunkt- und Steuerparameterdatei (vgl. Anhang A.1.3). Wird die Projektdatei geladen, werden diese Dateien ausgelesen und die enthaltenen Daten in der Datenstruktur (vgl. Anhang A.1.2) gespeichert. Es besteht die Möglichkeit, noch vor der Durchführung der Ausgleichungsberechnung die Näherungswerte in eine VRML-Datei zur 3D-Visualisierung auszugeben und dadurch auf Plausibilität zu prüfen (vgl. Anhang A.1.4).

Die Programmbibliothek zur Berechnung der integrierten Bündelblockausgleichung ist das zentrale Element der Software, die erhaltenen Ergebnisse werden ebenfalls in der Datenstruktur gespeichert (vgl. Anhang A.1.5). Während der Berechnung der Bündelblockausgleichung können einzelne Matrizen als Bild- oder

Textdatei ausgegeben werden, außerdem wird der aktuelle Berechnungs-Fortschritt in eine Statusdatei geschrieben.

Nach erfolgreicher Berechnung können die in der Datenstruktur gespeicherten Werte und Ergebnisse in Form einer Protokolldatei und VRML-Datei ausgegeben werden. Dieser Berechnungsablauf wurde in eine Benutzeroberfläche (vgl. Anhang A.1.6) eingebettet, die zum einen den Aufruf der Import-, Berechnungs- und Exportfunktionen erlaubt und zum anderen alle in der Datenstruktur enthaltenen Werte und Parameter übersichtlich darstellt und deren Änderung zulässt.

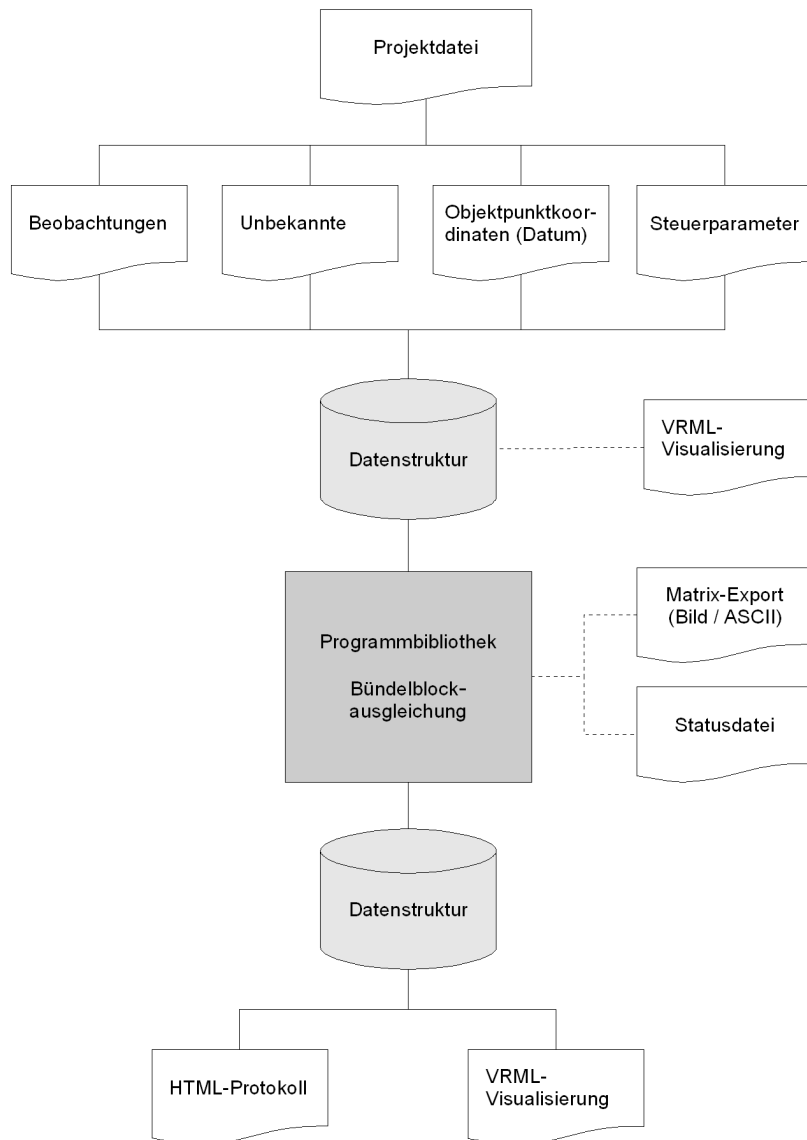


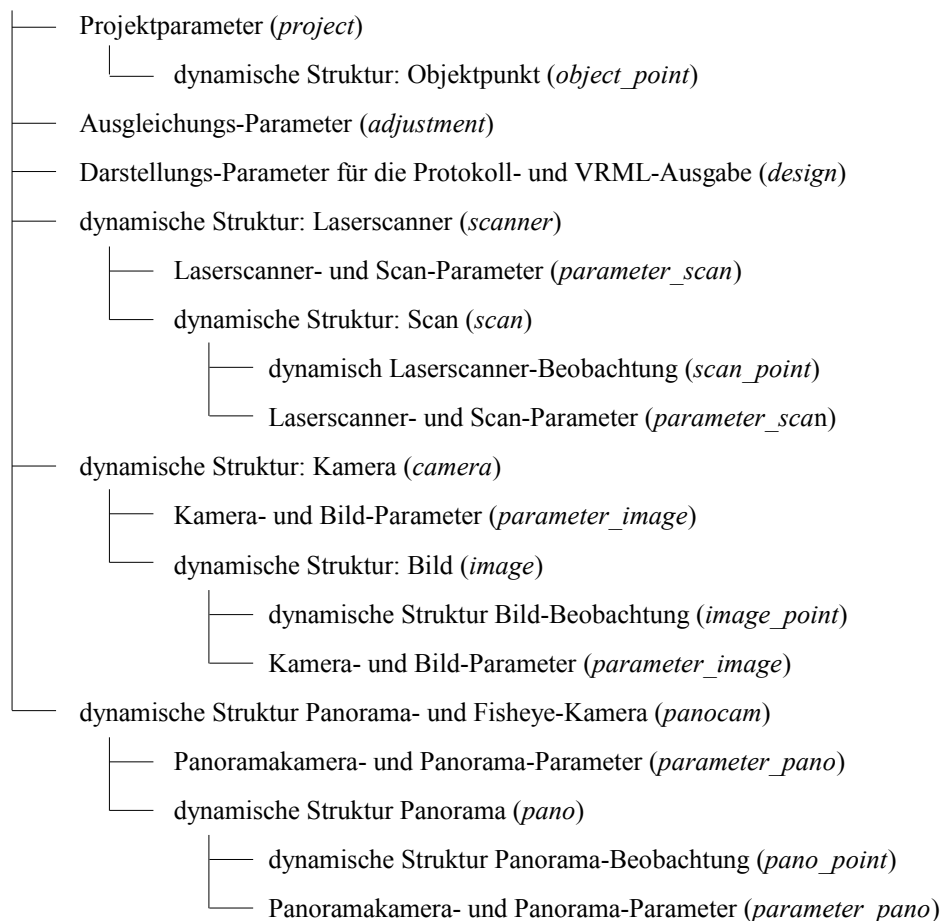
Abbildung A.1: Flussdiagramm der Software zur integrierten Bündelblockausgleichung

Die Berechnung ist jedoch streng unabhängig von der Benutzeroberfläche, damit die Berechnungsroutine auch in anderen Anwendungsprogrammen verwendet werden kann. Stehen die notwendigen Daten dort bereits in einer anderen Form zur Verfügung, können die Importfunktionen auch ausgetauscht oder ganz weglassen werden.

A.1.2 Datenstruktur

Alle für die Berechnung notwendigen Daten, Parameter und Resultate werden in Form von Strukturen (Verbund von Parametern unterschiedlichen Datentyps) in einer Header-Datei verwaltet. Die Datenstruktur ist hierarchisch aufgebaut und dient als Schnittstelle zwischen den einzelnen Programmfunktionen. Die meisten darin enthaltenen Strukturen sind dynamisch ausgelegt, d.h. die Anzahl der einzelnen Instanzen dieser Struktur wird erst zur Laufzeit des Programms definiert und der entsprechende Speicher bereitgestellt. Zentrale Projektparameter, Steuerparameter für die Ausgleichungsberechnung sowie Parameter für den Aufbau der Protokoll- und VRML-Datei werden in unterschiedlichen Strukturen verwaltet. Alle Strukturen werden in einer übergeordneten Datenstruktur (*data*) gebündelt. Dadurch ist es ausreichend, als Übergabeparameter zwischen unterschiedlichen Funktionen einen Zeiger (Pointer) auf diese Struktur zu definieren, damit immer alle Daten und Parameter zur Verfügung stehen. Die Struktur-Hierarchie ist wie folgt aufgebaut, wobei der Name der jeweiligen Datenstruktur in Klammern steht:

Daten (*data*)



Die hier dargestellte Struktur-Hierarchie stellt eine Vereinfachung dar, die Datenstrukturen sind teilweise in weitere Sub-Strukturen untergliedert. In der Datenstruktur *project* werden unter anderem alle Informationen über die Objektpunkte abgelegt. Dazu gehört die Anzahl der Punkte, deren Verwendung (Passpunkt, Neupunkt, ungenutzter Punkt), die Koordinaten, die Standardabweichungen und weitere Parameter.

Die Daten der geometrischen Modelle für Laserscanner, zentralperspektive Kamera und Panoramakamera (inkl. Fisheye-Kamera) werden in unterschiedlichen Strukturen verwaltet. Die entsprechenden Datenstrukturen (*parameter_scan*, *parameter_image*, *parameter_pano*) enthalten sowohl die Parameter für die äußere

Orientierung einer Aufnahme als auch für die innere Orientierung und Zusatzparameter. Diese Strukturen sind jeweils dem Aufnahmegerät und einer Aufnahme zugeordnet. Während die Zuordnung der äußeren Orientierung nur für Aufnahmen sinnvoll ist, können die Parameter der inneren Orientierung und Zusatzparameter wahlweise bezüglich des Aufnahmegerätes berücksichtigt werden (aufnahme-invariante Parameter) oder bezüglich einer Aufnahme (aufnahme-variante Parameter).

Die Datenstrukturen zur Speicherung der Beobachtungen (*scan_point*, *image_point*, *pano_point*) beinhalten neben den Beobachtungen (Distanz, Horizontalwinkel, Vertikalwinkel, Bildkoordinaten) auch stochastische Informationen, wie z.B. Standardabweichungen, Verbesserungen und Redundanzanteile. Eine vollständige Auflistung aller Strukturen und der darin enthaltenen Parameter befindet sich im Anhang A.3.

A.1.3 Importfunktionen

Die Programmfunktionen zum Datenimport (Auslesen von ASCII-Dateien) sind in der Datei „*import.c*“ zusammengefasst. Diese Datei kann auch unabhängig von der eigentlichen Programmbibliothek zur Bündelblockausgleichung verwendet werden und dient lediglich zum Bereitstellen aller erforderlichen Daten (Füllen der Datenstruktur).

Vorausgesetzt wird, dass die Daten in einzelnen Dateien vorliegen, deren Aufbau im Folgenden kurz vorgestellt werden soll. Für jede Datei existiert eine unabhängige Importfunktion (Funktionsname ist in Klammern angegeben). Beispiele für die Inputdateien befinden sich im Anhang A.4.1.

- Projektdatei (*read_project*)

Die Projektdatei enthält lediglich die Bezeichnungen der anderen Inputdateien, inklusive deren Verzeichnispfade. Wird diese Datei geladen, können deshalb alle Funktionen zum Auslesen der übrigen Inputdateien automatisch ausgeführt werden. Es ist somit ausreichend nur die Projektdatei zu öffnen, anschließend kann unmittelbar die Berechnung ausgeführt werden.

- Beobachtungsdateien (*read_scanner*, *read_image* und *read_pano*)

Jeweils eine Datei enthält alle Beobachtungen diskreter Objektpunkte gemessen mit Laserscanner, zentralperspektiver Kamera und Panoramakamera. In jeder der drei Dateien können die Beobachtungen mehrerer Aufnahmegeräte und Aufnahmen stehen, die Zuordnung erfolgt über den der Beobachtung vorangestellten Namen des Aufnahmegerätes und den Namen (oder Nummer) der Aufnahme. Jede Beobachtung kann aktiviert (*Flag* = 0) oder deaktiviert (*Flag* = 1) werden.

Die in einem Bild oder Panorama gemessenen Bildkoordinaten bzw. in einem Scan gemessenen sphärischen Koordinaten diskreter Objektpunkte stehen jeweils in einer Zeile der Datei mit folgender Formatierung:

Kameraname | *Aufnahme* | *Flag* | *Punktnummer* | *x'* [mm] | *y'* [mm]

Laserscanner | *Scanposition* | *Flag* | *Punktnummer* | *Distanz* [m] | *Hz-Winkel* [gon] | *V-Winkel* [gon]

Die Funktionen *read_scanner*, *read_image* und *read_pano* durchlaufen jeweils zweifach die Inputdateien. Beim ersten Mal wird die Anzahl der vorhandenen Aufnahmegeräte, die Anzahl der zugehörigen Aufnahmen und die Anzahl der Beobachtungen pro Aufnahme gezählt und daraufhin der notwendige Speicher bereitgestellt, das heißt die Anzahl der Strukturinstanzen festgelegt. Beim zweiten Durchlauf werden die Daten ausgelesen und schrittweise die Datenstruktur mit Werten gefüllt.

- Objektpunktdatei (*read_object*)

Die Objektpunktdatei enthält die kartesischen Koordinaten der im Projekt genutzten Objektpunkte. Je nach Art der Berechnung werden die Objektkoordinaten als feste Werte (Rückwärtsschnitt oder Passpunkte bei Bündelblockausgleichung) oder als Näherungswerte (Vorwärtsschnitt oder Neupunkt bei Bündelblockausgleichung) verwendet. Die Festlegung, ob ein Objektpunkt als Passpunkt oder unbekannter Neupunkt berücksichtigt wird, erfolgt über eine den Koordinaten vorangestellte Markierung (*Flag*). Eine Zeile der Objektkoordinatendatei hat folgendes Aussehen:

Flag (0=aus, 1=Neupunkt, 2=Passpunkt) | Punktnummer | X | Y | Z

Die Einheit der Objektkoordinaten ist nicht vorgegeben, sie muss allerdings mit der Einheit der Translationsparameter der äußeren Orientierung übereinstimmen.

- Parameterdatei (*read_parameter*)

Schließlich muss für alle Aufnahmegeräte und Aufnahmen festgelegt werden, welche Parameter der inneren und äußeren Orientierung bzw. welche Zusatzparameter in der Ausgleichung als Unbekannte geschätzt werden sollen und welche dieser Parameter als Konstante berücksichtigt werden. Entsprechend müssen Näherungswerte bzw. feste Werte zur Verfügung gestellt werden. Diese Aufgabe übernimmt die Parameterdatei in Verbindung mit der entsprechenden Programmfunktion *read_parameter*. Wird ein Parameter als Unbekannte geschätzt, folgt dem entsprechenden Wert in der Parameterdatei ein Fragezeichen („?“), ansonsten ein Ausrufezeichen („!“).

Jedes Aufnahmegerät und jede Aufnahme kann mittels einer Markierung aktiviert oder deaktiviert werden. Wird ein Aufnahmegerät deaktiviert, werden automatisch auch alle damit aufgenommenen Bilder bzw. Scans deaktiviert. Während für terrestrischer Laserscanner und zentralperspektive Kamera das geometrische Modell per Definition vorgegeben ist, kann für jede verwendete Panoramakamera zwischen zylindrischer, vollsphärischer und Fisheye-Geometrie mit Hilfe einer weiteren Markierung unterschieden werden. Für die Fisheye-Geometrie kann noch zwischen äquidistantem, raumwinkelgleichem, orthografischem und stereografischem Modell differenziert werden.

Darüber hinaus enthält die Parameterdatei alle weiteren erforderlichen Steuerparameter, dazu gehören:

- Parameter für die Ausgleichung (Abbruchkriterium für die Ausgleichungsberechnung; maximale Anzahl an Iterationen, Schwellwert für die normierten Verbesserungen zur Ausreißerelimination (Data Snooping), Festlegung der Option 'Freie Ausgleichung'; Festlegung, in wie vielen Aufnahmen ein Punkt beobachtet sein muss, damit er überhaupt berücksichtigt wird – für einen räumlichen Rückwärtsschnitt mit einem Bild wird dieser Wert auf '1' gesetzt)
- Informationen zum stochastischen Modell (a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen zur Berechnung von Gewichten bzw. als Startwerte für die Varianzkomponentenschätzung; Festlegung der Option 'Varianzkomponentenschätzung'; Festlegung der Beobachtungsgruppen für die Varianzkomponentenschätzung)
- Darstellungs-Optionen für die 3D-Visualisierung (z.B. Größe der dargestellten Elemente – vgl. VRML-Datei im nächsten Kapitel)

A.1.4 Exportfunktionen

Die Datei „*export.c*“ bietet mehrere Möglichkeiten zum Export der Ergebnisse. Sie beinhaltet eine Funktion zum Erstellen einer Protokolldatei, eine Funktion zum Erstellen einer VRML-Datei zur 3D-Visualisierung der Ergebnisse, weitere Funktionen zum Ausgeben von Matrizen als Bild- oder ASCII-Datei und eine Funktion zur Ausgabe des Status der Berechnung, die während der Berechnung permanent aktualisiert wird.

- Protokolldatei (*write_html*)

Die Funktion '*write_html*' schreibt alle Daten zur Analyse der Ergebnisse in eine Ergebnisdatei namens '*results.html*'. Da es sich um sehr viele Daten handeln kann, wurde ein HTML-Ausgabeformat gewählt. Damit ist es möglich, Sprungziele innerhalb der Datei zu definieren, die eine einfache Navigation zwischen den unterschiedlichen Daten erlaubt. Beispielsweise steht im Kopf der Datei ein Inhaltsverzeichnis, von dem aus direkt auf die einzelnen Ergebnisse zugegriffen werden kann. Die Datei kann mit jedem Web-Browser betrachtet werden (vgl. Anhang A.4.2, Abbildung A.8).

Die in der Protokolldatei dargestellten Daten sind:

- Allgemeine Daten der Ausgleichsberechnung (Datum/Uhrzeit; Dauer der Berechnung; benötigte Iterationen bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums; Standardabweichung der Gewichtseinheit; Anzahl Unbekannte; Anzahl der Beobachtungen)
- Objektpunkte (Passpunkt oder Neupunkt; Koordinaten; geschätzte Standardabweichungen der Koordinaten; Anzahl der zugehörigen Beobachtungen; RMS der Standardabweichungen der Koordinaten)
- für alle Unbekannten (Objektpunktkoordinaten, innere und äußere Orientierung, Zusatzparameter): Parameterwert inkl. geschätzte Standardabweichung, Wert des letzten Zuschlags, deren Bestimmbarkeit und Signifikanz
- Korrelationen zwischen den Unbekannten (als Liste für alle Korrelationsfaktoren über 0,7)
- für alle Beobachtungen (Distanz, Winkel, Bildkoordinaten): Beobachtungswert inkl. Verbesserung, geschätzte a-priori und a-posteriori Standardabweichungen, Redundanzanteile und normierte Verbesserungen, Differenz zu den mit Näherungswerten der Unbekannten berechneten Beobachtungen (l-Vektor) vor und nach der Ausgleichung; RMS der Verbesserungen und Standardabweichungen, Gewichte der Beobachtungen
- Auflistung der als Ausreißer eliminierten Beobachtungen
- alle Inputparameter (vgl. 'Parameterdatei' im vorangegangenen Kapitel)
- Informationen zum Ablauf der Berechnung (vgl. 'Status der Berechnung')

- VRML-Datei (*write_vrml*)

Diese Datei dient der dreidimensionalen Visualisierung der Daten. Dazu muss die Datei in einer geeigneten VRML-Viewer-Software (z.B. Right Hemisphere – Deep Exploration) geöffnet werden. Im Anhang A.4.2 (Abbildung A.9) ist eine Ansicht einer VRML-Datei dargestellt. Die Sichtbarkeit der in der Datei abgelegten 3D-Objekte kann in der Viewer-Software ein- und ausgeschaltet werden, damit nur die den Nutzer interessierenden Informationen angezeigt werden. Alle 3D-Objekte sind in dieser Datei hierarchisch geordnet.

Die VRML-Datei kann folgende Objekte enthalten:

- Achsen des übergeordneten Objektkoordinatensystems
- Objektpunkte (farblich unterschieden nach Passpunkt, Neupunkt und sonstigen Punkten)
- Fehlervektoren der in der Ausgleichung geschätzten Neupunkte in alle Koordinatenrichtungen in einem vorab gewählten Vergrößerungs-Maßstab
- Positionen aller Aufnahmegерäte (farblich unterschieden nach Laserscanner, zentralperspektiver Kamera und Panoramakamera inkl. Fisheye-Kamera)
- Vektoren für die Blickrichtung der zentralperspektiven Bilder

Diese Datei kann bereits vor der Ausgleichsrechnung unter Berücksichtigung der Näherungswerte der Unbekannten erstellt werden. Damit eignet sie sich auch für die Kontrolle der Plausibilität der Näherungswerte. Nach der Bündelblockausgleichung ist die 3D-Ansicht unter anderem sinnvoll zur visuellen Analyse der Aufnahmekonfiguration (Strahlenschnitte) oder zur Analyse der Standardabweichungen der Neupunkte und deren Verteilung (Vergleich Tiefenkoordinate mit lateralen Koordinaten oder zum Erkennen von Restsystematiken).

- Ausgabe von Matrizen (*matrix_img* und *matrix_txt*)

Es besteht die Möglichkeit, sich während der Laufzeit des Programms mit den Funktionen '*matrix_img*' und '*matrix_txt*' die verwendeten Matrizen und Vektoren als geordnete ASCII-Datei oder Bilddatei (im TIFF-Format) ausgeben zu lassen. Die Funktionen können auf beliebige Matrizen angewendet werden, unabhängig von deren Größe und Dimension. Die damit erstellten ASCII-Dateien enthalten alle Informationen und eignen sich deshalb für die (nachträgliche) automatische Analyse bestimmter Sachverhalte (z.B. Korrelationen). Die erstellten Bilddateien eignen sich besonders für eine schnelle visuelle Interpretation der Zwischen- und Endergebnisse, sie können entweder binär (schwarz/weiß) oder durch diskrete Grau- bzw. Farbstufen codiert werden. Ein Beispiel für eine binäre Ausgabe einer Koeffizientenmatrix wurde bereits in Abbildung 6.3 vorgestellt. Die Matrix-Bilder können mit einer Bildbetrachter-Software angezeigt und die Pixelkoordinaten eines bestimmten Elementes abgegriffen werden. Die Pixelkoordinaten lassen sich eindeutig einer Unbekannten oder Beobachtung (je nach dargestellter Matrix) zuweisen.

Die Ausgabe von Matrizen kann beispielsweise hilfreich sein bei:

- der Analyse des Beobachtungsvektors I vor der Ausgleichung (Aufdecken von Fehlern des geometrischen Modells in der Entwicklungsphase; Erkennen schlechter Näherungswerte für die Unbekannten und besonders zur Detektion von Ausreißern in den Beobachtungen),
- der Analyse der Koeffizientenmatrix A bzw. Normalgleichungsmatrix N (Überprüfung der richtigen Matrix-Besetzung in der Entwicklungsphase des Programms; Analyse der Redundanz und der geometrischen Konfiguration bez. der Verknüpfungen zwischen den Aufnahmen und Objektpunkten),
- der Visualisierung der Korrelationen (farbcodierte Ausgabe der Korrelationskoeffizienten zwischen den Unbekannten bei der Analyse des geometrischen Modells, insb. der Zusatzparameter) oder
- der Veranschaulichung der Struktur der Matrizen für Lehrzwecke.

- Status der Berechnung (*write_status*)

Die Funktion '*write_status*' erlaubt das Ausgeben von Statusinformationen zur Berechnung während der Laufzeit des Programms. Dabei wird die Datei permanent aktualisiert. Dies ist vor allem bei Berechnungen sinnvoll, die sehr lange dauern. Im Falle von nicht konvergierenden Lösungen kann die Berechnung vorzeitig abgebrochen werden. Wurde der Berechnungsdurchgang erfolgreich beendet, liegt schließlich der Ablauf der Berechnung mit folgenden Informationen vor (ein Beispiel einer Statusdatei ist im Anhang A.4.3 zu finden):

- Markierung für die Art einzelner Berechnungen ('VKS' – Varianzkomponentenschätzung, 'MKQ' – Ausgleichungsberechnung, 'F' – Freie Ausgleichung)
- Nummer des Iterationsschrittes
- Standardabweichung der Gewichtseinheit, Summe der Unbekanntenzuschläge und Nummer der Unbekannten mit dem größtem Zuschlag für jeden Iterationsschritt
- Information, ob eine Beobachtung als Ausreißer eliminiert wurde und die entsprechende normierte Verbesserung (NV)

A.1.5 Programmbibliothek Bündelblockausgleichung

Die Programmbibliothek ist in der Programmiersprache C geschrieben und ist damit weitestgehend kompatibel zu unterschiedlichen Rechner-Plattformen. Damit ist es auf einfache Weise möglich, die Bibliothek in anderen speziellen Programmen und Anwendungen zu nutzen. Sie ist als statische Bibliothek ('lib'-Datei) kompiliert und wird deshalb beim Kompilieren des ausführenden Programms mit in dieses eingebunden. Die Daten-Schnittstelle für die Programmbibliothek bildet die Header-Datei '*adjustment.h*' (vgl. Anhang A.1.1), deshalb ist die Programmbibliothek immer in Kombination mit dieser Header-Datei zu verwenden.

Die Bibliothek beinhaltet zahlreiche Funktionen, die entweder in einer vordefinierten Abfolge (Funktion '*adjustment*') automatisch ausgeführt werden oder auf die bei Bedarf auch einzeln zugegriffen werden kann. Die Funktion '*adjustment*' arbeitet die einzelnen Funktionen wie in dem im Anhang A.5.1 dargestellten Flussdiagramm ab. Die in diesem Schema enthaltenen Funktionen werden in den nachfolgenden Kapiteln kurz vorgestellt.

A.1.5.1 Funktionen zur Verwaltung der geometrischen Modelle

In der Datei '*modell.c*' werden die verwendbaren geometrischen Modelle verwaltet. Sie beinhaltet zum einen Funktionen zur Berechnung der Beobachtungen (Modellfunktionen) und zum anderen Funktionen zur Berechnung der Differentialquotienten (Ableitungsfunktionen).

- Modellfunktionen

Die geometrischen Modelle von terrestrischem Laserscanner, Panoramakamera, Fisheye-Kamera und zentralperspektiver Kamera werden durch die Funktionen '*modell_laser*', '*modell_pano*', '*modell_fisheye*' und '*modell_image*' repräsentiert. An die Funktionen werden die Koordinaten eines Objektpunktes, die innere und äußere Orientierung sowie Zusatzparameter einer Aufnahme bzw. des Aufnahmegerätes übergeben. Rückgabewerte sind die berechneten Beobachtungen. Die Funktionen für Panoramamodell und für Fisheye-Modell enthalten unterschiedliche Modellgleichungen, die je nach Art der verwendeten Panoramakamera (zylindrisch oder vollsphärisch) bzw. des verwendeten Fisheye-Objektives ausgewählt werden können. Die Funktionen werden unter anderem zum Erstellen des Beobachtungsvektors verwendet.

- Ableitungsfunktionen

Die Ableitungsfunktionen '*derivation_laser*', '*derivation_pano*', '*derivation_fisheye*' und '*derivation_image*' werden beim Erstellen der Koeffizientenmatrix aufgerufen. Innerhalb dieser Funktionen kann zwischen numerischer Ableitung und symbolischer Ableitung gewählt werden.

Sollen die Ableitungen numerisch gebildet werden, werden die Modellfunktionen zweifach aufgerufen. Dabei wird dem Wert für den Parameter, nach welchem abgeleitet werden soll, einmal ein kleiner Wert hinzugefügt ($+\varepsilon/2$) und einmal abgezogen ($-\varepsilon/2$) und anschließend die aus den Modellfunktionen berechneten Beobachtungen nach Gleichung (2.23) zur Berechnung des entsprechenden Elementes der Koeffizientenmatrix verwendet. Wird die Option für das symbolische Differenzieren gewählt, werden die in der Funktionen enthalten Gleichungen für die Differentialquotienten berechnet. Die Vor- und Nachteile beider Varianten wurden bereits in Kapitel 2.1.2.6 diskutiert. Rückgabewerte der Funktionen sind in beiden Fällen die Werte für die Ableitungen der Beobachtungsgleichungen nach den unbekannten Parametern.

- Rotationsmatrizen

Die verwendeten Rotationsmatrizen und deren Ableitungen werden in separaten Funktionen verwaltet, welche von den Modell- und Ableitungsfunktionen aufgerufen werden. Neben der besseren Übersichtlichkeit bringt das vor allem den Vorteil, dass die Rotationsmatrizen auf einfache Weise ausgetauscht und damit an unterschiedliche Anwendungen angepasst werden können. Sollen beispielsweise Daten aus einer externen Software mit der Programmbibliothek verarbeitet werden, kann die Definition der Rotationsmatrix aus dieser Software übernommen werden, und die dazugehörigen Winkel müssen nicht verändert werden. Die

Funktion '*rotation_matrix*' stellt aus den Winkeln (ω , φ , κ) die Rotationsmatrix auf, die Funktion '*derivation_rotation_matrix*' berechnet die partiellen Ableitungen nach diesen drei Winkeln. Entsprechend dienen die Funktionen '*rotation_matrix_quat*' und '*derivation_rotation_matrix_quat*' zum Erstellen der Rotationsmatrix aus Quaternionen bzw. der Berechnungen der partiellen Ableitungen nach a , b , c und d . Darüber hinaus sind in der Datei '*quaternion.c*' Funktionen zur gegenseitigen Umrechnung zwischen Winkeln und Quaternionen enthalten.

A.1.5.2 Funktionen zur Verwaltung der Beobachtungen

Die Dateien '*activeobserv.c*' und '*cleanobserv.c*' enthalten unterschiedliche Funktionen zur Verwaltung und Vorverarbeitung der importierten Beobachtungen. Dazu gehört eine Funktion zum Zählen der aktiven Beobachtungen je Aufnahme, je Aufnahmegerät und je geometrischem Modell genauso wie eine Funktion zum Zählen der Beobachtungen je Objektpunkt (in wie vielen Aufnahmen ein bestimmter Objektpunkt beobachtet wurde). Je nach Vorgabe der minimalen Anzahl der Aufnahmen pro Objektpunkt (Festlegung in der Parameterdatei), werden Objektpunkte deaktiviert, die in weniger Aufnahmen beobachtet wurden. Soll ein räumlicher Rückwärtsschnitt mit einer Einzelaufnahme berechnet werden, muss dieser Wert natürlich auf '1' gesetzt werden. Eine weitere Funktion deaktiviert alle Beobachtungen von Objektpunkten, die bei der Berechnung ignoriert werden sollen (Objektpunktdatei: Punkte mit *Flag* = 0).

A.1.5.3 Funktionen zum Aufstellen der benötigten Matrizen

Das Erstellen der für die Berechnung der Ausgleichung notwendigen Matrizen wird durch jeweils eine Funktion realisiert, die im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen. Für alle Matrizen muss vorab deren Dimension festgelegt werden, um den benötigten Speicher reservieren zu können. Dafür wird die Anzahl der Unbekannten und die Anzahl der Beobachtungen ermittelt.

- Koeffizientenmatrix (*a_matrix*)

Nach der Bereitstellung des Speichers werden die einzelnen Elemente der Koeffizientenmatrix durch Aufrufen der Ableitungsfunktionen (Anhang A.1.5.1) berechnet. Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung des Programms stellt hier die Zuordnung der Elemente zur richtigen Zeile und Spalte der Matrix dar. Zur Kontrolle kann die Matrix durch die in der Funktion enthaltenen Aufrufe der entsprechenden Exportfunktionen (Anhang A.1.4) als ASCII- oder Bilddatei ausgegeben werden.

- Beobachtungsvektor (*l_matrix*)

Der Beobachtungsvektor wird erstellt, indem für jedes Element die Differenz zwischen dem gemessenen Wert einer Beobachtung und dem mit Näherungswerten der Unbekannten berechneten Wert ermittelt wird. Dazu wird je nach zugrunde liegendem geometrischen Modell die entsprechende Modellfunktion aufgerufen. Auch der Beobachtungsvektor kann durch Aufruf der Exportfunktion in eine separate Datei geschrieben werden.

- Bedingungsmatrix (*b_matrix*)

Die Anzahl der Zeilen der Bedingungsmatrix entspricht der Anzahl der Bedingungsgleichungen, welche vorab ermittelt werden muss. Derzeit werden die Bedingungsgleichungen für eine freie Netzausgleichung (maximal 7) und jeweils eine Bedingungsgleichung für jede Aufnahme, bei der für die äußere Orientierung mit Quaternionen gearbeitet wird, aufgestellt. Die Berechnung der Elemente der Bedingungsmatrix erfolgt unmittelbar in der Funktion.

- Zuschlagsvektor (*dx_matrix*)

Das Ergebnis der eigentlichen Ausgleichungsberechnung sind kleine Zuschläge zu den Näherungswerten der Unbekannten. Die Funktion '*adjustment*' erstellt unter anderem den Zuschlagsvektor. Die Funktion '*dx_matrix*' ist daran anschließend zum einen dafür verantwortlich, diese Zuschläge in die Datenstruktur zu

übertragen, damit diese auch anderen Funktionen und zum Erstellen der Protokolldatei zur Verfügung stehen, und zum anderen dafür, die Näherungswerte der Unbekannten um die Zuschläge zu korrigieren. Für letzteres muss eine Zuordnung zwischen dem jeweiligen Vektorelement und der dazugehörigen Unbekannten erfolgen.

- Matrizenbibliothek

Alle Matrizenoperationen verwenden die „Small Matrix Toolbox for C programmers“ in der Version 0.42 [Ko Shu-Pui, 1994]. Diese Funktionen-Sammlung enthält Funktionen u.a. zum Invertieren und Multiplizieren von Matrizen. Methoden zum Einsparen von Rechenzeit und Speicherplatz (z.B. Sparse-Technik) wurden bisher nicht implementiert, lassen sich aber nachträglich in die Matrizenbibliothek einarbeiten.

A.1.5.4 Funktionen zur Berechnung des stochastischen Modells

- Gewichtsmatrix (*p_matrix*)

Die Gewichtsmatrix wird durch die Funktion '*p_matrix*' erstellt. Entsprechend Gleichung 2.14 werden die vorgegebenen oder die im Rahmen einer Varianzkomponentenschätzung geschätzten a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen, sowie die vorgegebene Standardabweichung der Gewichtseinheit verwendet, um die Diagonalelemente der Matrix zu berechnen. Es wird davon ausgegangen, dass keine a-priori Informationen über Korrelationen zwischen den Beobachtungen bekannt sind, deshalb werden alle Elemente außerhalb der Hauptdiagonalen Null gesetzt.

- Varianzkomponentenschätzung (*vks*)

Ist die Option der Varianzkomponentenschätzung ausgewählt, wird die Funktion '*vks*' der Erstellung der Gewichtsmatrix vorangestellt. Die in der Parameterdatei vorgegebenen a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen dienen dann nur als Startwerte für die Varianzkomponentenschätzung. Eine detailliertere Beschreibung der Funktion wird in Anhang A.2.2 vorgenommen.

A.1.5.5 Funktionen zur Auswertung der Ergebnisse

Im Folgenden werden alle Funktionen vorgestellt, die zwar nicht unmittelbar für die Ausgleichungsrechnung notwendig, jedoch für die Interpretation der Ergebnisse wichtig sind. Es handelt sich dabei vor allem um die Berechnung statistischer Größen.

- Standardabweichung der Gewichtseinheit (*sigma*)

Die Standardabweichung der Gewichtseinheit (vgl. Kapitel 2.1.3.3) wird nach jedem Iterationsschritt berechnet und in die Statusdatei geschrieben. Auf diese Weise lässt sich die Konvergenz der Ausgleichungsrechnung beurteilen. Der ermittelte Wert lässt sich nur bei der Ausgleichung gleichartiger Beobachtungen interpretieren, bei der gemeinsamen Ausgleichung unterschiedlicher Beobachtungstypen dient er lediglich als Zwischenergebnis für die Berechnung der Standardabweichungen der Beobachtungen und der Unbekannten.

- Geschätzte Standardabweichungen der Beobachtungen (*sigma_observations*)

Mit Hilfe zweier unterschiedlicher Funktionen (*sigma_observations_a* und *sigma_observations_b*) lassen sich die geschätzten Standardabweichungen der ursprünglichen bzw. der ausgeglichenen Beobachtungen (vgl. Kapitel 2.1.3.4) berechnen. Die ermittelten Standardabweichungen werden in die Datenstruktur kopiert und später mit der Protokolldatei ausgegeben. Bei der gemeinsamen Ausgleichung unterschiedlicher Beobachtungstypen werden die Standardabweichungen der ursprünglichen Beobachtungen anstelle der Standardabweichung der Gewichtseinheit zur Interpretation der Ausgleichungsergebnisse herangezogen.

- Geschätzte Standardabweichungen der Unbekannten (*sigma_unknowns*)

Diese Funktion berechnet die Standardabweichungen der Unbekannten unter Verwendung der Kofaktormatrix der Unbekannten (vgl. Kapitel 2.1.3.5), ordnet diese den einzelnen Unbekannten zu und übergibt die ermittelten Werte an die Datenstruktur. Die Standardabweichungen der geschätzten Koordinaten der unbekannten Objektpunkte werden darüber hinaus in den mittleren quadratischen Abweichungen (RMS) zusammengefasst.

- Korrelationen zwischen den Unbekannten (*correlation*)

Die Kofaktormatrix der Unbekannten enthält die Korrelationen zwischen den Unbekannten (vgl. Kapitel 2.1.3.7). Die Funktion '*correlation*' geht die Elemente dieser Matrix schrittweise durch und schreibt alle Korrelationen inklusive der zugehörigen Bezeichnungen der Unbekannten, die über einem bestimmten Grenzwert liegen, geordnet in eine temporäre Liste. Das Unbekannten-Paar mit dem (betragsmäßig) größten Korrelationskoeffizienten steht ganz oben. Als Grenzwert hat sich ein Wert von $\rho > |0,7|$ als zweckmäßig herausgestellt. Die temporäre Liste wird am Ende der Berechnung in die Protokolldatei geschrieben.

- Bestimmbarkeit der Unbekannten (*determinability*) und Signifikanz der Zusatzparameter (*significance*)

Für jede Unbekannte wird ein Wert für die Bestimmbarkeit (vgl. Kapitel 2.1.3.6) und die Signifikanz berechnet (vgl. Kapitel 2.1.3.8) und anschließend in der Datenstruktur abgespeichert. Für die Berechnung der Signifikanz sind in der dafür vorgesehenen Funktion die Werte der t-Verteilung für insgesamt acht verschiedene Signifikanzstufen hinterlegt. Aus dem geschätzten Wert des unbekannten Parameters, dessen Standardabweichung und der Redundanz des Ausgleichungsproblems wird die Prüfgröße ermittelt, die mit dem entsprechenden Wert der t-Verteilung verglichen wird. Rückgabewert der Funktion ist die Nummer der Signifikanzstufe (1: nicht signifikant; 2: 80 %; 3: 90 %; 4: 95 %; 5: 98 %; 6: 99 %; 7: 99,8 %; 8: 99,9 %) entsprechend [Vetters, 1996].

- Redundanzanteile (*reliability*)

Die Redundanzanteile der Beobachtungen (vgl. Kapitel 2.1.3.9) zeigen, wie gut eine Beobachtung durch andere Beobachtungen kontrolliert ist, d.h. in welchem Maße ein grober Fehler aufgedeckt werden kann. Sie werden in der Funktion '*reliability*' berechnet, in der Datenstruktur den Beobachtungen zugeordnet und in die Protokolldatei geschrieben.

- Data Snooping (*datasnooping*)

Ist die Option „Data Snooping“ aktiviert, werden zuerst die normierten Verbesserungen aller Beobachtungen berechnet (vgl. Kapitel 2.1.3.10). Anschließend wird die Beobachtung mit der größten normierten Verbesserung gesucht und aus der Berechnung der Ausgleichung im darauf folgenden Iterationsschritt ausgeschlossen. Diese Beobachtung wird jedoch nur dann deaktiviert, wenn die normierte Verbesserung größer ist als ein vorher festgelegter Grenzwert (z.B. 4,0).

A.1.6 Benutzeroberfläche

Um den Berechnungsablauf komfortabel und effektiv steuern zu können, wurde eine Benutzeroberfläche in Form eines MFC-Dialogfeldes in C++ entwickelt (Darstellung im Anhang A.4.4). Die Benutzeroberfläche ist vollständig unabhängig von den Import- und Exportfunktionen sowie von der Programmbibliothek programmiert. Sie dient lediglich zum Starten von Funktionen, zum Anzeigen der in der Datenstruktur gespeicherten Werte (vor und nach der Ausgleichungsberechnung), zum Modifizieren bestimmter Werte und Steuerparameter und zum Starten externer Programme zum Anzeigen der Ergebnisdateien. Ausgewählte Funktionalitäten der Benutzeroberfläche werden im Folgenden kurz vorgestellt.

- Datenimport und Ausführen der Berechnung
 - Das Auswählen der Projektdatei erfolgt durch Aufruf des Windows-Standard-Dialogfeldes '*Datei Öffnen*'. Durch Bestätigen der ausgewählten Projektdatei wird der Pfad und der Dateiname an die Funktion '*read_project*' übergeben. Anschließend werden automatisch die in der Projektdatei angegebenen Beobachtungsdateien, die Objektpunktdatei und die Steuerdatei ausgelesen und alle Werte und Einstellungen an die Datenstruktur übergeben.
 - Mit jeweils einem Windows-Button '*Anzeigen*' werden die Inputdateien an den im System voreingestellten Standard-Texteditor übergeben und deren Inhalt angezeigt.
- Kontrolle der in der Datenstruktur gespeicherten Daten auf Plausibilität und Richtigkeit
 - Bereits vor Ausführen der Berechnung können die in der Datenstruktur gespeicherten (Näherungs-) Werte in die Protokolldatei oder die VRML-Datei zur Visualisierung geschrieben werden. Werden die entsprechenden Buttons '*Protokoll*' und '*VRML-Modell*' angeklickt, werden die Dateien erzeugt, an den im System eingestellten Standard-Web-Browser bzw. das mit VRML-Dateien verknüpfte Programm übergeben und dadurch direkt angezeigt.
 - Die meisten in der Datenstruktur gespeicherten Daten können direkt auf der Benutzeroberfläche angezeigt werden. Dazu gehören die Steuerparameter für die Ausgleichungsberechnung (Konvergenzkriterium, Grenzwert für das Data Snooping, Einstellungen für die Varianzkomponentenschätzung, etc.), die Koordinaten aller Objektpunkte (als 'Dropdown'-Liste), die Parameter aller Aufnahmegeräte und Aufnahmen (verteilt auf mehreren Registerkarten, siehe Anhang A.4.4, Abbildung A.11 bis A.16), sowie die Zuordnung der beteiligten Aufnahmen zu einem Aufnahmegerät und die Zuordnung der Aufnahmegeräte zu einem geometrischem Modell.
- Möglichkeit der Modifikation von Daten und Einstellungen
 - Die Benutzeroberfläche erlaubt die Modifikation unterschiedlicher Einstellungen und Werte. Beispielsweise können über je eine Checkbox die Optionen '*Freie Ausgleichung*', '*Ausreißer eliminieren*', '*Varianzkomponentenschätzung*', sowie alle Aufnahme- und Geräteparameter (äußere, innere Orientierung und Zusatzparameter) als Unbekannte aktiviert bzw. deaktiviert werden. Ebenso können Aufnahmen, Aufnahmegeräte und Objektpunkte aktiviert bzw. deaktiviert werden.
 - Weiterhin beinhaltet die Benutzeroberfläche Eingabefelder zum Ändern verschiedener Werte. Das sind unter anderem die (Näherungs-) Werte für die Aufnahme- und Geräteparameter, Objektpunktkoordinaten, sowie Werte für die Steuerparameter der Ausgleichungsberechnung.
 - Für jede verwendete Panoramakamera kann über Optionsfelder (Radio-Button) die Zuordnung zu dem zugrunde liegende geometrische Modell (zylindrisches oder sphärisches Panorama, äquidistante, raumwinkelgleiche, orthografische oder stereografische Fisheye-Projektion) modifiziert werden.
 - Ist der Schalter '*Varianzkomponentenschätzung*' aktiviert, kann über weitere Optionsfelder die Gruppierung der unterschiedlichen Beobachtungstypen festgelegt werden (vgl. Anhang A.2.3).
- Ausführen der Berechnung
 - Wird der Button für das Ausführen der Berechnung angeklickt, wird die Funktion '*adjustment*' (Programm-bibliothek) gestartet.
 - Die angezeigten (Näherungs-) Werte der Aufnahme- und Geräteparameter werden nach der Berechnung aktualisiert und die Näherungswerte werden durch die Endergebnisse ersetzt.
 - Es werden Informationen zur Berechnung angezeigt, wie beispielsweise die benötigte Anzahl an Iterationsschritten, die Redundanz des Ausgleichungsproblems und die benötigte Rechenzeit.

- Nach Ausführen einer Berechnung können die Einstellparameter verändert und die Berechnung erneut gestartet werden. Die Ergebnisse der letzten Berechnung werden dann als neue Näherungswerte für die Unbekannten verwendet. Wird die Anzahl der Iterationen auf '1' gestellt, können die Ergebnisse nach jedem Iterationsschritt betrachtet werden.
- Exportmöglichkeiten
 - Nach Beendigung der Ausgleichungsberechnung werden alle Ergebnisse automatisch in die Protokoll-datei geschrieben und gleichzeitig die VRML-Datei zur Visualisierung der Ergebnisse erstellt. Mit den entsprechenden Buttons werden die Dateien direkt an die damit verknüpften Programme (Browser bzw. VRML-Viewer) übergeben und angezeigt.
 - Die während der Berechnung erzeugte Statusdatei kann per Tastendruck im Standard-Texteditor ange-sehen werden.
 - Mit den Buttons '*A-Matrix (Text)*' und '*A-Matrix (Bild)*' kann die beim letzten Iterationsschritt erzeugte Koeffizientenmatrix direkt an einen Texteditor bzw. Bild-Betrachter übergeben und angezeigt werden. Mit einer weiteren Taste '*I-Matrix*' kann ebenso der Beobachtungsvektor zur Anzeige gebracht werden. Bei nicht konvergierenden Berechnung bietet es sich oft an, die Anzahl der Iterationen auf '1' zu stel-len, die Berechnung zu starten und anschließend die Koeffizientenmatrix oder den Beobachtungsvektor zu analysieren, um nach der Ursache für das Scheitern der Berechnung zu suchen.
 - Es sind weitere Buttons vorgesehen, die im Programm-Quellcode auf einfache Weise mit weiteren Funktionen (z.B. Export anderer Matrizen) belegt werden können.

A.1.7 Ausgewählte Berechnungsmöglichkeiten

Die hier vorgestellte Software lässt sich für vielfältige Berechnungsvarianten nutzen. Neben der integrierten Bündelblockausgleichung kann die Software auch zur Berechnung räumlicher Rückwärts- oder Vorwärts-schnitte oder zur Testfeldkalibrierung (mit festen Objektpunktkoordinaten) genutzt werden.

Für alle Parameter der äußeren und inneren Orientierung, alle Zusatzparameter sowie alle Objektpunkte kann individuell festgelegt werden, ob diese als Unbekannte in der Ausgleichung geschätzt werden oder als feste Werte bzw. Passpunkte verwendet werden. Die Berechnungsvariante wird ausschließlich dadurch vorge-gaben, dass die entsprechenden Parameter als Unbekannte gekennzeichnet werden. Damit kann die Software, insbesondere die Programmbibliothek, weitestgehend flexibel in unterschiedlichen Anwendungen genutzt werden.

Die Festlegung, ob ein Parameter fest oder unbekannt ist, kann bereits in den Importdateien durch Setzen einer entsprechenden Markierung oder vor dem Ausführen der Berechnung auf der Benutzeroberfläche erfol-gen. Es ist auch möglich, mit Hilfe zusätzlicher Funktionen die in der Datenstruktur gespeicherten Festlegun-gen automatisch so zu verändern, dass anschließend eine bestimmte Berechnungsvariante ausgeführt werden kann.

Im Folgenden sollen einige typische Berechnungsmöglichkeiten sowie die dafür notwendigen Einstellun-gen vorgestellt werden. Der im Anhang A.5.1 dargestellte Berechnungsablauf gilt für alle Berechnungsvarian-ten gleichermaßen.

A.1.7.1 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Werden alle Objektpunkte als Passpunkte definiert (*Flag* = 2) und die Elemente der äußeren Orientierung einer einzigen Aufnahme als unbekannt gekennzeichnet, kann ein räumlicher Rückwärtsschnitt berechnet (vgl. Kapitel 2.2.2.1) und damit die Position und Ausrichtung des Laserscanners, der Panoramakamera oder zentralperspektiven Kamera im übergeordneten Koordinatensystem bestimmt werden. Die Koeffizientenma-trix besteht dann aus 6 Spalten. Es können auch bestimmte Elemente der äußeren Orientierung fixiert werden

oder Parameter der inneren Orientierung bzw. Zusatzparameter für das verwendete Aufnahmegerät als Unbekannte berücksichtigt werden.

Weitere Einstellungen zur Berechnung eines räumlichen Rückwärtsschnittes müssen vorgenommen werden: der Wert für die minimale Anzahl an Aufnahmen pro Objektpunkt muss auf '1' gesetzt und die Option 'Freie Ausgleichung' muss deaktiviert werden. Eine Varianzkomponentenschätzung zur Ableitung des stochastischen Modells ist nur in einigen bestimmten Fällen sinnvoll, dazu gehört der räumliche Rückwärtsschnitt für Laserscanneraufnahmen (gemeinsame Verwendung unterschiedlicher Beobachtungen) oder für Panoramabilder, bei denen unterschiedliche Genauigkeiten für die horizontalen und vertikalen Bildkoordinaten begründet sind.

A.1.7.2 Räumlicher Vorwärtsschnitt

Beim räumlichen Vorwärtsschnitt (vgl. Kapitel 2.2.2.2) werden alle Parameter der beteiligten Aufnahmen und Aufnahmegeräte (äußere, innere Orientierung und Zusatzparameter) als fest definiert und demnach nicht in der Ausgleichung geschätzt. Die Werte für diese Parameter müssen jedoch hinreichend genau vorgegeben werden, meist geht dieser Berechnung deshalb ein räumlicher Rückwärtsschnitt für jede Aufnahme voraus.

Streng genommen werden beim räumlichen Vorwärtsschnitt die Koordinaten *eines* Objektpunktes als Unbekannte geschätzt, die Koeffizientenmatrix hat dann genau drei Spalten. Es können aber auch die Koordinaten mehrerer Neupunkte gleichzeitig geschätzt werden, was jedoch zu längeren Rechenzeiten führt. Es ist deshalb sinnvoll, alle zu bestimmenden Neupunkte in einer separaten Berechnung zu berücksichtigen, indem die Programmbibliothek in einer Schleife solange ausgeführt wird, bis die Koordinaten aller Neupunkte berechnet worden sind.

A.1.7.3 Testfeldkalibrierung mit festen Objektpunktkoordinaten

Die Testfeldkalibrierung mit festen Objektpunktkoordinaten stellt eine Erweiterung des räumlichen Rückwärtsschnittes dar, bei der die innere Orientierung und Zusatzparameter eines Aufnahmegerätes (Kalibrierung) unter Nutzung mehrerer Aufnahmen von verschiedenen Positionen bestimmt werden. Die Elemente der äußeren Orientierungen der beteiligten Aufnahmen werden als Unbekannte geschätzt, während alle Objektpunkte als bekannte Passpunkte berücksichtigt werden (deshalb wird diese Berechnung auch als 'Multi-Rückwärtsschnitt' bezeichnet).

Soll die Kalibrierung mehrerer Aufnahmegeräte ermittelt werden, ist es möglich, für jedes Aufnahmegerät eine separate Berechnung durchzuführen oder die Kalibrierwerte aller Geräte gleichzeitig zu berechnen.

Werden mehrere Aufnahmen in einer gemeinsamen Berechnung verwendet, können einzelne Objektpunkte auch als Neupunkte berücksichtigt werden. Diese Berechnung stellt dann eine Kombination aus räumlichem Rückwärts- und Vorwärtsschnitt dar und kann für Kontrollzwecke sinnvoll sein. In diesem Fall handelt es sich per Definition bereits um die Berechnung einer Bündelblockausgleichung.

A.1.7.4 Bündelblockausgleichung mit minimalem Datum

Wenn alle Objektpunkte, abgesehen von 6 Koordinateninformationen und einem Maßstab, als Neupunkte berücksichtigt, gleichzeitig die Elemente der äußeren Orientierungen der beteiligten Aufnahmen sowie die Elemente der inneren Orientierungen der Aufnahmegeräte und deren Zusatzparameter als Unbekannte geschätzt werden, wird von einer Bündelblockausgleichung mit minimalem Datum gesprochen (vgl. Kapitel 2.2.3 bzw. Kapitel 6.5.1).

A.1.7.5 Bündelblockausgleichung als freie Netzausgleichung

Das gleichzeitige Schätzen der inneren und äußeren Orientierung der beteiligten Aufnahmegeräte und Aufnahmen und aller beobachteten Objektpunkte als Neupunkte in der Bündelblockausgleichung führt zu einem Datumsdefekt, der durch Berücksichtigung zusätzlicher Bedingungsgleichungen gelöst werden kann (vgl. Kapitel 2.2.3 bzw. Kapitel 6.5.2).

Mit Bezug auf das im Anhang A.5.1 dargestellte Flussdiagramm wird demnach von vornherein eine Bedingungsmatrix aufgestellt und die Berechnung als freie Netzausgleichung durchgeführt, wenn alle Objektpunktkoordinaten die Markierung ($Flag = 1$) besitzen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, einige gut verteilte Objektpunkte, deren Koordinaten hinreichend genau bekannt sind, vorerst als Passpunkte ($Flag = 2$) zu berücksichtigen und dennoch den Schalter für die Option 'Freie Ausgleichung' zu setzen. In diesem Fall iteriert die Ausgleichung ohne zusätzliche Bedingungsgleichungen für die Datumsfestlegung so lange, bis das Konvergenzkriterium erreicht wurde. Erst dann werden alle Objektpunkte als Neupunkte definiert und die Berechnung wird nun als freie Ausgleichung wiederholt, bis das Konvergenzkriterium zum zweiten Mal erreicht ist. Diese Vorgehensweise ist dann sinnvoll, wenn die freie Netzausgleichung ansonsten wegen schlechter Näherungswerte keine Konvergenz zeigen würde.

Momentan ist die Berechnung der freien Netzausgleichung nur durch Minimierung der Gesamtspur vorgesehen. Das heißt, es werden alle Neupunkte als Datumpunkte und damit beim Aufstellen der Bedingungsmatrix berücksichtigt. Eine Teilspurminimierung, bei der nur ein Teil der Neupunkte als Datumpunkte verwendet wird, ist mit der Programmbibliothek in der aktuellen Version nicht möglich.

A.2 Software-Implementation: Varianzkomponentenschätzung

A.2.1 Integration in die Programmbibliothek Bündelblockausgleichung

Alle für die Varianzkomponentenschätzung benötigten Funktionen wurden unmittelbar in die Programmbibliothek der integrierten Bündelblockausgleichung eingebunden (vgl. Flussdiagramm in Anhang A.1.1). Die benötigten Variablen sind in der zentralen Datenstruktur der integrierten Bündelblockausgleichung (Datei „*ausgleichung.h*“) enthalten (vgl. Anhang A.1.2). Das sind die a-priori und a-posteriori Standardabweichungen und Gewichte aller Beobachtungstypen, sowie Steuerparameter der Varianzkomponentenschätzung.

Die Werte für die a-priori Standardabweichungen und die Steuerparameter können vorab in die Input-Parameterdatei (Anhang A.1.3) geschrieben werden, welche durch die entsprechende Importfunktion ausgelesen und deren Daten in der Datenstruktur gespeichert werden können. Wird die Programmbibliothek in eine andere Software eingebettet, können die notwendigen Informationen auch anderweitig bezogen werden. Schnittstelle zur Programmbibliothek ist dann grundsätzlich die Datenstruktur. Weiterhin werden die Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung mit der Exportfunktion in die HTML-Protokolldatei geschrieben (Anhang A.1.4).

Wie in dem in Abbildung A.2 dargestellten Ausschnitt des Flussdiagramms der integrierten Bündelblockausgleichung (vgl. Anhang A.5.1) ersichtlich, erfolgt die Steuerparameter-Abfrage, ob eine Varianzkomponentenschätzung durchgeführt werden soll oder nicht, im Programmablauf direkt vor dem Aufbau der Gewichtsmatrix durch die Funktion '*p_matrix*' (Anhang A.1.5.4). Soll keine Varianzkomponentenschätzung durchgeführt werden, wird sofort die Gewichtsmatrix mit Hilfe der vorgegebenen a-priori Standardabweichungen der Beobachtungsgruppen erstellt. Ansonsten wird die Funktion '*vks*' ausgeführt, wobei die vorgegebenen a-priori Standardabweichungen nur als Näherungswerte dienen. Erst nach erfolgreicher Durchführung der Varianzkomponentenschätzung wird die Funktion '*p_matrix*' aufgerufen und die geschätzten Varianzkomponenten zum Erstellen der Gewichtsmatrix verwendet.

Für die Berechnung der integrierten Bündelblockausgleichung wird einerseits ein stochastisches Modell in Form einer Gewichtsmatrix $\mathbf{P}$ benötigt. Andererseits setzt das Aufstellen der Gewichtsmatrix mit Hilfe einer Varianzkomponentenschätzung ein funktionales Modell in Form der Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}$ und des Beobachtungsvektors $\mathbf{I}$ voraus. Das bedeutet, das Ausgleichungsmodell und das Modell der Varianzkomponentenschätzung bedingen sich gegenseitig. Es besteht das Problem, dass für die Schätzung der Varianzkomponenten die Parameter des funktionalen Modells nur näherungsweise bekannt sind, was zur Folge hat, dass die Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung nicht richtig ermittelt werden können. Deshalb müsste nach jeder Iteration der Ausgleichung eine neue Varianzkomponentenschätzung mit den aktuellen Parametern des funktionalen Modells durchgeführt werden. Es ist auch möglich, dass die Iterationen für Varianzkomponentenschätzung und die Iterationen für die vermittelnde Ausgleichung im Wechsel durchgeführt werden. Diese Abfolge hat sich in der Praxis als sinnvoll herausgestellt, weil sie einen guten Kompromiss aus Konvergenz und Berechnungsdauer darstellt. Je nach Qualität der Näherungswerte für die Parameter des funktionalen und des stochastischen Modells und je nach tatsächlichem Konvergenzverhalten kann im Einzelfall auch eine andere Abfolge in der Software festgelegt werden, beispielsweise zwei Iterationen VKS und anschließend eine Ausgleichungsiteration.

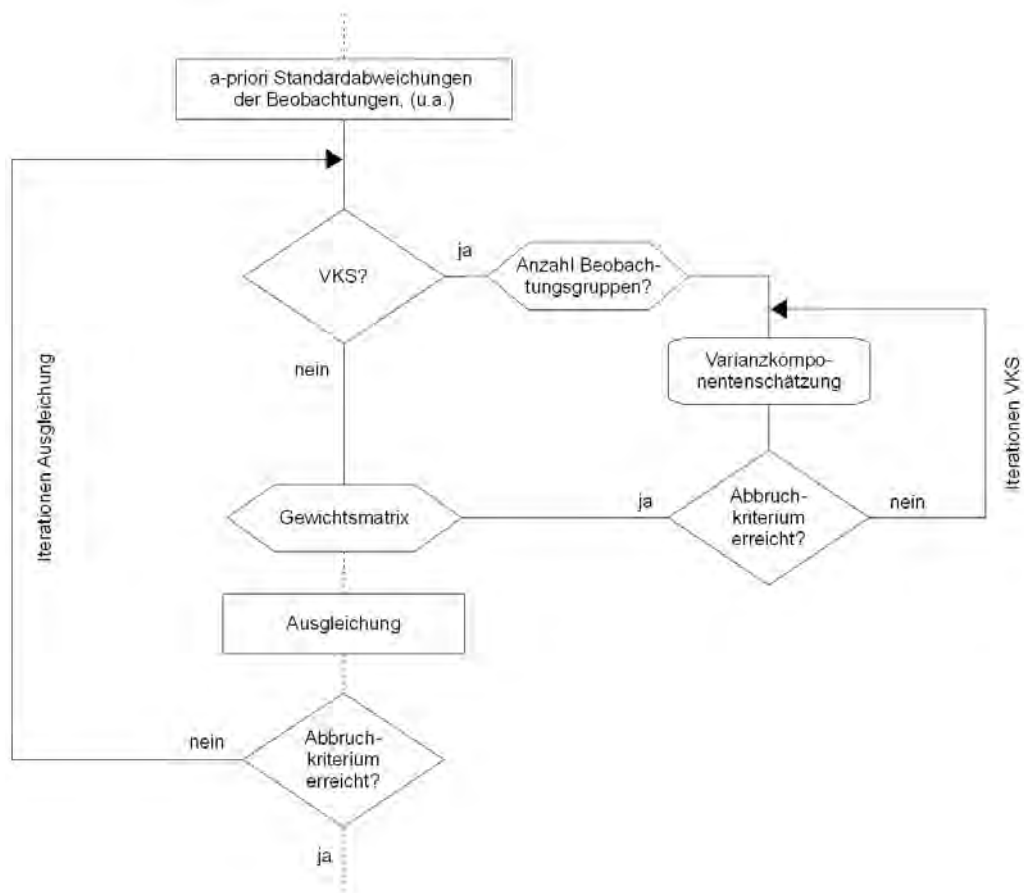


Abbildung A.2: Ausschnitt aus dem Flussdiagramm der Programmbibliothek der integrierten Bündelblockausgleichung

A.2.2 Realisierung der Varianzkomponentenschätzung

Die Varianzkomponentenschätzung wird durch Aufruf der Funktion 'vks' ausgeführt. Der Aufbau dieser Funktion ist in einem Flussdiagramm (Anhang A.5.2) dargestellt. Zuerst wird für jede Beobachtungsgruppe die Funktion 'v_matrix' aufgerufen, in der entsprechend Gleichung (7.17) aus den a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen die Matrizen V_i erstellt werden. Anschließend werden diese Matrizen summiert und durch Einbeziehen der Koeffizientenmatrix A mit den aktuell verfügbaren Werten für die Parameter des funktionalen Modells die Hilfsmatrix W berechnet.

Eine Zählvariable n , die nach jeder VKS-Iteration inkrementiert wird, wird nun abgefragt. Soll die erste oder die zweite Iteration berechnet werden, wird die alternative Schätzung nach [Förstner, 1979] durchgeführt (Kapitel 7.3.3), ansonsten die Schätzung entsprechend Kapitel 7.3.2. In beiden Fällen wird der Beobachtungsvektor l verwendet. Der Grenzwert für die Anzahl der alternativen Schätzungen kann als Steuerparameter vorab definiert werden, standardmäßig ist $n \leq 2$ voreingestellt.

Das Ergebnis beider Schätzungen sind die Faktoren $\hat{\alpha}_i^2$, mit denen die Näherungswerte für die Varianzkomponenten σ_i^2 zu multiplizieren sind. Sind die $\hat{\alpha}_i^2$ nicht nahe Eins, wird eine weitere VKS-Iteration berechnet. Gemäß den Ausführungen im vorangegangenen Kapitel kann optional mit den Zwischenergebnissen für die Varianzkomponenten erst eine Ausgleichungsberechnung durchgeführt werden und mit den geschätzten Parametern des funktionalen Modells eine neue Koeffizientenmatrix und ein neuer Beobachtungsvektor aufgestellt werden, welche dann in die nächste VKS-Iteration eingehen.

A.2.3 Berechnungsmöglichkeiten

In der derzeitigen Version der Software zur Bündelblockausgleichung ist die Einteilung der Beobachtungen in maximal sieben Beobachtungsgruppen möglich. Dabei entfällt jeweils eine Gruppe auf die Beobachtungstypen Distanz, Horizontalwinkel, Vertikalwinkel, horizontale und vertikale Panorama- oder Fisheye-Bildkoordinate, sowie horizontale und vertikale zentralperspektive Bildkoordinate. Die Gruppierung wird durch einen Steuerparameter '*vks_typ*' festgelegt, der aus der Input-Parameterdatei ausgelesen und mit Hilfe der Benutzeroberfläche (Anhang A.1.6) verändert werden kann. Folgende Werte kann der Steuerparameter momentan annehmen:

- *vks_typ* = 4: maximal 4 Beobachtungsgruppen (jeweils Horizontal- und Vertikalwinkel zusammen, alle Panorama- oder Fisheye-Bildkoordinaten zusammen, sowie alle zentralperspektiven Bildkoordinaten zusammen bilden eine gemeinsame Gruppe)
- *vks_typ* = 501 maximal 5 Beobachtungsgruppen (wie *vks_typ* = 4, aber Horizontal- und Vertikalwinkel sind in unterschiedliche Beobachtungsgruppen aufgeteilt)
- *vks_typ* = 502: maximal 5 Beobachtungsgruppen (wie *vks_typ* = 4, aber horizontale und vertikale Panorama-Bildkoordinaten sind in unterschiedliche Beobachtungsgruppen aufgeteilt)
- *vks_typ* = 6: maximal 6 Beobachtungsgruppen (es gelten *vks_typ* = 501 und *vks_typ* = 502)
- *vks_typ* = 7: maximal 7 Beobachtungsgruppen (wie *vks_typ* = 6, aber zusätzlich sind horizontale und vertikale zentralperspektive Bildkoordinaten in unterschiedliche Beobachtungsgruppen aufgeteilt)

Darüber hinaus können die Distanzbeobachtungen in zwei Fehleranteile, einen konstanten und einen entfernungsabhängigen Anteil (adaptiv) zerlegt werden, wobei für jeden Anteil eine Varianzkomponente geschätzt werden kann. Damit ist die Schätzung von insgesamt acht Varianzkomponenten (für sieben Beobachtungstypen) möglich.

Die Aufteilung in maximal sieben Beobachtungsgruppen ist für Testzwecke zur Analyse der geometrischen und stochastischen Modelle ausreichend, kann in der praktischen Anwendung allerdings zu Einschränkungen führen. Beispielsweise können damit noch nicht gleiche Aufnahmegeräte mit unterschiedlichen Genauigkeiten in verschiedene Beobachtungsgruppen aufgeteilt werden. Die dahingehende Erweiterung der Software ist vorgesehen. Außerdem muss angemerkt werden, dass das Optimierungspotenzial bezüglich eines schnellen und speichereffizienten Programmablaufs, was sich beispielsweise durch die zumeist einfache Struktur der VKS-Matrizen ergibt, noch nicht vollständig genutzt wurde. Die Aspekte einer effektiven numerischen Berechnung der Varianzkomponentenschätzung werden u.a. in [Sieg & Hirsch, 2000] detailliert behandelt.

A.3 Software-Implementation: Datenstrukturen und Parameter

Im folgenden werden alle in der Software zur integrierten Bündelblockausgleichung verwendeten Variablen-Strukturen und die darin enthaltenen Parameter vorgestellt (vgl. Anhang A.1.2).

A.3.1 Zentrale Parameter

- Struktur 'data'

Variable	Typ	Beschreibung
dsgn	Struktur 'design'	beinhaltet Parameter zum Design der VRML-Exportdatei
prj	Struktur 'project'	beinhaltet mehrere zentrale Projekt-Parameter
cameras	Integer	Anzahl der im Projekt verwendeten Kameras
panocams	Integer	Anzahl der im Projekt verwendeten Panoramakameras
scanner	Integer	Anzahl der im Projekt verwendeten terrestrischen Laserscanner
*cam	Dynamische Struktur 'camera'	beinhaltet alle Kamera-Parameter für jede Kamera
*pcam	Dynamische Struktur 'panocam'	beinhaltet alle Panoramakamera-Parameter für jede Panoramakamera
*sca	Dynamische Struktur 'scanner'	beinhaltet alle Laserscanner-Parameter für jeden Laserscanner
adj	Struktur 'adjustment'	beinhaltet verschiedene Steuerparameter für die Ausgleichung

Tabelle A.1: Strukturen und Parameter in der Struktur 'data'

- Struktur 'design'

Variable	Typ	Beschreibung
length_arrows	Double	VRML-Exportdatei: Länge der Pfeile für die Darstellung der Aufnahmerichtung
baseplane	Integer	VRML-Exportdatei: Darstellung der XY-Ebene als Fläche (1: ja, 0: nein)
error_scale	Double	VRML-Exportdatei: Maßstab für die Fehlervektoren für Objektpunkte
error_thickness	Double	VRML-Exportdatei: Dicke der Fehlervektoren für Objektpunkte
point_radius	Double	VRML-Exportdatei: Darstellungsgröße der Objektpunkte
instrument_radius	Double	VRML-Exportdatei: Darstellungsgröße der Aufnahmestandpunkte

Tabelle A.2: Strukturen und Parameter in der Struktur 'design'

- Struktur 'project'

Variable	Typ	Beschreibung
name	Characters	Name des Projektes
date	Characters	Datum des Projektes
object	Characters	Name und Pfad der Objektkoordinatendatei
laserscanner	Characters	Name und Pfad der Laserscanner-Beobachtungsdatei
panocamera	Characters	Name und Pfad der Panorama-Beobachtungsdatei
camera	Characters	Name und Pfad der Kamera-Beobachtungsdatei
control	Characters	Name und Pfad der Steuerparameter-Datei
temperature	Double	Ggf. Temperatur
pressure	Double	Ggf. Luftdruck
points	Integer	Anzahl der Objektpunkte im Projekt insgesamt
*pnt	Dynamische Struktur 'obj_point'	beinhaltet Parameter für Objektpunkte

Tabelle A.3: Strukturen und Parameter in der Struktur 'project'

- Struktur 'adjustment'

Variable	Typ	Beschreibung
<i>iterations</i>	Integer	Maximale Anzahl an Iterationen
<i>needed_iterations</i>	Integer	Tatsächlich benötigte Iterationen
<i>unknown</i>	Integer	Anzahl der unbekannten Parameter in der Ausgleichung
<i>observations</i>	Integer	Anzahl an Beobachtungen in der Ausgleichung
<i>points</i>	Integer	Anzahl der an der Ausgleichung beteiligten Objektpunkte
<i>vks</i>	Integer	Varianzkomponentenschätzung (1: ja, 0: nein)
<i>vks_typ</i>	Integer	Typ der Varianzkomponentenschätzung
<i>free_adjustment</i>	Integer	Freie Netzausgleichung (1: ja, 0: nein)
<i>sigma0_priori</i>	Double	A-priori Standardabweichung der Gewichtseinheit
<i>sigma0_posteriori</i>	Double	A-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit
<i>convergence</i>	Double	Abbruchkriterium für die iterative Ausgleichung
<i>outlier</i>	Integer	Ausreißerdetektion (1: ja, 0: nein)
<i>outlier_number</i>	Integer	Anzahl eliminierter Ausreißer
<i>NV_threshold</i>	Double	Schwellwert für die Ausreißerelimination (normierte Verbesserung)
<i>weight_xxx</i>	Double	Gewicht für jeden Beobachtungstyp xxx
<i>stabw_VK_xxx</i>	Double	Standardabweichung der Varianzkomponente für den Beobachtungstyp xxx
<i>RMSx, RMSy, RMSz</i>	Double	RMS der Standardabweichungen der Objektkoordinaten
<i>time</i>	Characters	Dauer der Berechnung
<i>min_img_scan</i>	Integer	Anzahl der Aufnahmen, in denen ein Punkt vorhanden sein muss

Tabelle A.4: Strukturen und Parameter in der Struktur 'adjustment'

- Struktur 'object_point'

Variable	Typ	Beschreibung
<i>flag</i>	Short	Objektpunkt-Art (0: ungenutzt, 1: Neupunkt, 2: Passpunkt)
<i>number</i>	Integer	Punktnummer
<i>X, Y, Z</i>	Double	Wert für X, Y, Z
<i>m_X, m_Y, m_Z</i>	Double	Standardabweichung für X, Y, Z
<i>b_X, b_Y, b_Z</i>	Double	Bestimmbarkeit von X, Y, Z
<i>z_X, z_Y, z_Z</i>	Double	Letzter Zuschlag zu X, Y, Z
<i>s_X, s_Y, s_Z</i>	Double	Signifikanz für X, Y, Z
<i>f_X, f_Y, f_Z</i>	Short	Koordinate unbekannt (1) oder fest (0)
<i>scans</i>	Integer	Anzahl der Scans, in denen der Punkt beobachtet wurde
<i>panos</i>	Integer	Anzahl der Panoramas, in denen der Punkt beobachtet wurde
<i>imgs</i>	Integer	Anzahl der Bilder, in denen der Punkt beobachtet wurde

Tabelle A.5: Strukturen und Parameter in der Struktur 'object_point'

A.3.2 Laserscanner- und Scan-Parameter

- Struktur 'scanner'

Variable	Typ	Beschreibung
<i>name</i>	Characters	Name des Laserscanners
<i>flag</i>	Integer	Scanner wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
<i>scans</i>	Integer	Anzahl der mit dem Scanner durchgeführten Scans
<i>*scn</i>	Dynamische Struktur 'scan'	beinhaltet Parameter für jede Scan-Aufnahme
<i>par</i>	Struktur 'parameter_scan'	beinhaltet Parameter für den Scanner (z.B. Kalibrierwerte)

Tabelle A.6: Strukturen und Parameter in der Struktur 'scanner'

- Struktur 'scan'

Variable	Typ	Beschreibung
<i>name</i>	Characters	Name / Nummer des Scans
<i>flag</i>	Integer	Scan wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
<i>points</i>	Integer	Anzahl der diskreten Objektpunkte im Scan
<i>*pnt</i>	Struktur 'scan_point'	beinhaltet Parameter für jede Scan-Punktbeobachtung
<i>par</i>	Struktur 'parameter_scan'	beinhaltet Parameter für jeden Scan (z.B. äußere Orientierung)
<i>RMS_D,</i> <i>RMS_Hz, RMS_V</i>	Double	RMS der (a-posteriori) Standardabweichungen der Beobachtungen für Distanz-, Horizontal- und Vertikalwinkelbeobachtung

Tabelle A.7: Strukturen und Parameter in der Struktur 'scan'

- Struktur 'parameter_scan'

Variable	Typ	Beschreibung
<i>X0, Y0, Z0, omega, phi, kappa</i>	Double	Elemente der äußeren Orientierung
<i>a, b, c, d</i>	Double	Quaternionen (alternativ zu omega, phi, kappa)
<i>m_X0, m_Y0, ...</i>	Double	Standardabweichung der Elemente der äußeren Orientierung
<i>b_X0, b_Y0, ...</i>	Double	Bestimmbarkeit der Elemente der äußeren Orientierung
<i>z_X0, z_Y0, ...</i>	Double	Letzter Zuschlag zu den Elementen der äußeren Orientierung
<i>s_X0, s_Y0, ...</i>	Double	Signifikanz der Elemente der äußeren Orientierung
<i>f_X0, f_Y0, ...</i>	Short	Parameter wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
<i>a0, a1, .., bZ, bK, .., cH, cE, ..</i>	Double	Zusatzparameter (Kalibrierparameter)
<i>m_xxx</i>	Double	Standardabweichung des Kalibrierparameters xxx
<i>b_xxx</i>	Double	Bestimmbarkeit des Kalibrierparameters xxx
<i>z_xxx</i>	Double	Letzter Zuschlag zum Kalibrierparameter xxx
<i>s_xxx</i>	Double	Signifikanz des Kalibrierparameters
<i>f_xxx</i>	Short	Parameter wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)

Tabelle A.8: Strukturen und Parameter in der Struktur 'parameter_scan'

- Struktur 'scan_point'

Variable	Typ	Beschreibung
<i>number</i>	Integer	Nummer des Scan-Punktes
<i>flag</i>	Integer	Scan-Punkt wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
<i>range, theta, phi</i>	Double	Sphärische Koordinaten des Scan-Punktes (Beobachtungen)
<i>X, Y, Z</i>	Double	Kartesische Koordinaten des Scan-Punktes
<i>v_range, v_theta, v_phi</i>	Double	Verbesserungen der Beobachtungen
<i>SuB_range, Sub_theta, Sub_phi</i>	Double	(a-posteriori) Standardabweichungen der ursprünglichen Beobachtungen
<i>SaB_range, Sab_theta, Sab_phi</i>	Double	(a-posteriori) Standardabweichungen der ausgeglichenen Beobachtungen
<i>r_range, r_theta, r_phi</i>	Double	Redundanzanteile der Beobachtungen
<i>NV_range, NV_theta, NV_phi</i>	Double	Normierte Verbesserungen der Beobachtungen

Tabelle A.9: Strukturen und Parameter in der Struktur 'scan_point'

A.3.3 Kamera- und Bild-Parameter

- Struktur 'camera'

Variable	Typ	Beschreibung
<i>name</i>	Characters	Name der Kamera
<i>flag</i>	Integer	Kamera wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
<i>images</i>	Integer	Anzahl der mit der Kamera aufgenommenen Bilder
<i>*img</i>	Dynamische Struktur 'image'	beinhaltet Parameter für jedes Bild dieser Kamera
<i>par</i>	Struktur 'parameter_image'	beinhaltet Parameter für die Kamera (z.B. Kalibrierwerte)
<i>columns</i>	Integer	Anzahl der Bildspalten des Sensors
<i>rows</i>	Integer	Anzahl der Bildzeilen des Sensors
<i>pixel</i>	Double	Pixelgröße bzw. -abstand

Tabelle A.10: Strukturen und Parameter in der Struktur 'camera'

- Struktur 'image'

Variable	Typ	Beschreibung
<i>name</i>	Characters	Name / Nummer des Bildes
<i>flag</i>	Integer	Bild wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
<i>points</i>	Integer	Anzahl der im Bild gemessenen Bildpunkte
<i>*pnt</i>	Struktur 'image_point'	beinhaltet Parameter für jede Punktbeobachtung im Bild
<i>par</i>	Struktur 'parameter_image'	beinhaltet Parameter für jedes Bild (z.B. äußere Orientierung)
<i>RMS_x, RMS_y</i>	Double	RMS der (a-posteriori) Standardabweichungen der Beobachtungen für x' und y'
<i>quaternionen</i>	Integer	Näherungswerte für Orientierung sind Quaternionen (1) oder Winkel (0)

Tabelle A.11: Strukturen und Parameter in der Struktur 'image'

- Struktur 'parameter_image'

Variable	Typ	Beschreibung
X0, Y0, Z0, omega, phi, kappa	Double	Elemente der äußeren Orientierung
a, b, c, d	Double	Quaternionen (alternativ zu omega, phi, kappa)
m_X0, m_Y0, ...	Double	Standardabweichung der Elemente der äußeren Orientierung
b_X0, b_Y0, ...	Double	Bestimmbarkeit der Elemente der äußeren Orientierung
z_X0, z_Y0, ...	Double	Letzter Zuschlag zu den Elementen der äußeren Orientierung
s_X0, s_Y0, ...	Double	Signifikanz der Elemente der äußeren Orientierung
f_X0, f_Y0, ...	Short	Parameter wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
ck, x0, y0, A1, A2, A3, B1, ...	Double	Parameter der inneren Orientierung und Zusatzparameter (Kalibrierparameter)
m_xxx	Double	Standardabweichung des Parameters xxx
b_xxx	Double	Bestimmbarkeit des Parameters xxx
z_xxx	Double	Letzter Zuschlag zum Parameters xxx
s_xxx	Double	Signifikanz des Parameters
f_xxx	Short	Parameter wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)

Tabelle A.12: Strukturen und Parameter in der Struktur 'parameter_image'

- Struktur 'image_point'

Variable	Typ	Beschreibung
number	Integer	Nummer des Bildpunktes
flag	Integer	Bildpunkt wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
x, y	Double	Bildkoordinaten des Bildpunktes (Beobachtungen)
v_x, v_y	Double	Verbesserungen der Beobachtungen
SuB_x, Sub_y	Double	(a-posteriori) Standardabweichungen der ursprünglichen Beobachtungen
SaB_x, Sab_y	Double	(a-posteriori) Standardabweichungen der ausgeglichenen Beobachtungen
r_x, r_y	Double	Redundanzanteile der Beobachtungen
NV_x, NV_y	Double	Normierte Verbesserungen der Beobachtungen

Tabelle A.13: Strukturen und Parameter in der Struktur 'image_point'

A.3.4 Panoramakamera- und Panorama-Parameter

- Struktur 'panocam'

Variable	Typ	Beschreibung
name	Characters	Name der Panoramakamera
flag	Integer	Panoramakamera wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
panos	Integer	Anzahl der mit der Panoramakamera aufgenommenen Panoramen
*pan	Dynamische Struktur 'pano'	beinhaltet Parameter für jedes Panorama dieser Panoramakamera
par	Struktur 'parameter_pano'	beinhaltet Parameter für die Panoramakamera (z.B. Kalibrierwerte)
columns	Integer	Anzahl der aufgenommenen Bildspalten
rows	Integer	Anzahl der Pixel auf dem Sensor bzw. Anzahl der Bildzeilen des Sensors (Fisheye)
pixel	Double	Pixelgröße bzw. -abstand
type	Character	Art der Kamera ('P': Rotationszeilenkamera, 'F': Fisheye-Kamera, 'V': Vollsphärische. Kamera)
fisheyemodel	Integer	Falls Fisheye-Kamera: Art des geometrischen Modells

*Tabelle A.14: Strukturen und Parameter in der Struktur 'panocam'
(Panoramakamera / Kamera mit Fisheye-Objektiv)*

- Struktur 'pano'

Variable	Typ	Beschreibung
name	Characters	Name / Nummer des Panoramas
flag	Integer	Panorama wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
points	Integer	Anzahl der im Panorama gemessenen Bildpunkte
*pnt	Struktur 'pano_point'	beinhaltet Parameter für jede Punktbeobachtung im Panorama
par	Struktur 'parameter_pano'	beinhaltet Parameter für jedes Panorama (z.B. äußere Orientierung)
RMS_x, RMS_y	Double	RMS der (a-posteriori) Standardabweichungen der Beobachtungen für x' und y'

Tabelle A.15: Strukturen und Parameter in der Struktur 'pano' (Panorama oder Fisheye-Bild)

- Struktur 'parameter_pano'

Variable	Typ	Beschreibung
X0, Y0, Z0, omega, phi, kappa	Double	Elemente der äußeren Orientierung
a, b, c, d	Double	Quaternionen (alternativ zu omega, phi, kappa)
m_X0, m_Y0, ...	Double	Standardabweichung der Elemente der äußeren Orientierung
b_X0, b_Y0, ...	Double	Bestimmbarkeit der Elemente der äußeren Orientierung
z_X0, z_Y0, ...	Double	Letzter Zuschlag zu den Elementen der äußeren Orientierung
s_X0, s_Y0, ...	Double	Signifikanz der Elemente der äußeren Orientierung
f_X0, f_Y0, ...	Short	Parameter wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
ck, v0, e, K, N, A1, ...	Double	Parameter der inneren Orientierung und Zusatzparameter (Kalibrierparameter)
m_xxx	Double	Standardabweichung des Parameters xxx
b_xxx	Double	Bestimmbarkeit des Parameters xxx
z_xxx	Double	Letzter Zuschlag zum Parameters xxx
s_xxx	Double	Signifikanz des Parameters
f_xxx	Short	Parameter wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)

Tabelle A.16: Strukturen und Parameter in der Struktur 'parameter_pano'

- Struktur 'pano_point'

Variable	Typ	Beschreibung
number	Integer	Nummer des Panorama-Bildpunktes
flag	Integer	Bildpunkt wird in der Ausgleichung berücksichtigt (1: ja, 0: nein)
x, y	Double	Bildkoordinaten des Bildpunktes (Beobachtungen)
v_x, v_y	Double	Verbesserungen der Beobachtungen
SuB_x, Sub_y	Double	(a-posteriori) Standardabweichungen der ursprünglichen Beobachtungen
SaB_x, Sab_y	Double	(a-posteriori) Standardabweichungen der ausgeglichenen Beobachtungen
r_x, r_y	Double	Redundanzanteile der Beobachtungen
NV_x, NV_y	Double	Normierte Verbesserungen der Beobachtungen

Tabelle A.17: Strukturen und Parameter in der Struktur 'scan_point'

A.4 Software-Implementation: Benutzerschnittstellen

A.4.1 Importdateien

```
% Name des Projektes
# 1 : Projektname

% Scankoordinaten
# 2 : Input\scan.dat

% Panoramakoordinaten
# 3 : Input\panorama.dat

% Bildkoordinaten
# 4 : Input\image.dat

% Objektkoordinaten
# 5 : Input\object.dat

% Steuer-Parameter und Näherungswerte
# 6 : Input\parameter.dat
```

Abbildung A.3: Beispiel für die Projektdatei (vgl. Anhang A.1.3)

Scannername	Scannname	Flag	Punktname	Range[m]	theta[gon]	phi[gon]
Riegl1	ScanPos01	1	25094	28.369	59.004	18.102
Riegl1	ScanPos01	1	20051	22.803	95.493	19.931
Riegl1	ScanPos02	1	22065	23.702	80.128	20.381
Riegl1	ScanPos02	1	24083	20.186	70.464	18.581
Riegl2	ScanPos03	1	23074	24.350	68.185	56.776
Riegl2	ScanPos03	0	24083	24.889	65.680	56.975
Riegl2	ScanPos03	1	24084	25.973	61.311	57.032
...						

Abbildung A.4: Auszug aus einer Laserscanner-Beobachtungsdatei (vgl. Anhang A.1.3)

Kameraname	Bildname	Flag	Punktnummer	x' [mm]	y' [mm]
NiD100	Img_001	1	24037	2.56983	-6.01908
NiD100	Img_001	1	15309	10.83780	-1.85356
NiD100	Img_001	1	24773	6.29643	-2.64726
NiD100	Img_002	1	24037	10.41675	1.31715
NiD100	Img_002	1	15309	8.51863	-2.31896
NiD100	Img_003	0	23518	-10.22206	-0.88609
NiD100	Img_003	1	23519	-6.81682	-1.84886
...					

Abbildung A.5: Auszug aus einer Bildkoordinaten-Beobachtungsdatei (vgl. Anhang A.1.3)

Flag	Punktnummer	X	Y	Z
1	22060	-11.246	20.935	6.479
1	22061	-4.403	20.983	6.575
2	22064	4.691	21.045	8.417
1	22066	9.284	21.078	8.536
1	22147	-20.000	20.000	10.000
0	23070	-13.545	20.841	9.771
...				

Abbildung A.6: Auszug aus einer Objektkoordinatendatei (vgl. Anhang A.1.3)

```

[Allgemeines]
-----

Iterationen 30
Konvergenz 0.0001
Freie Ausgleichung 1 (an/aus)
Ausreißer eliminieren 1 (an/aus)
NV-Grenze 4.5
Minimum Scan Bild/Pano 3

[Laserscanner]
-----

(Name m a bZ bK cH bE cE bT1 bT2 cT1 cT2 a2 a3 a4 a5 b3 b4 b5 c3 c4)
Riegl1 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ! 0 ! 0 ? 0 ? 0 ! 0 ? 0 ? 0 ! 0 ! 0 ! 0 ! 0 ! 0 ! 0 !
Riegl2 ! 0 ? 0 ! 0 ? 0 ! 0 ? 0 ? 0 ! 0 ! 0 ? 0 ? 0 ? 0 ! 0 ! 0 ! 0 ! 0 ! 0 !

[Scan]

(Name X0_m Y0_m Z0_m omega_gon phi_gon kappa_gon)

ScanPos01 ? 3 ? -2.0 ? -1 ? 30 ? 25 ? 140 ?
ScanPos02 ! 3 ? 1.0 ? -1 ? -30 ? 30 ? 60 ?
ScanPos06 ? 2 ? -0.5 ? -1 ? 100 ? 200 ? 100 ?

[Panoramakamera]
-----

(Name Art ck_mm e_mm PPy_mm Ah_gon/px Av_mm/px A1 A2 K N r0_fest Zeilen Spalten)
(Fisheye: Name Art c PPx PPy A1 A2 A3 B1 B2 C1 C2 r0 Pixelgröße Modell)
(Art: Panorama-P, Fisheye-F, Vollsphärisch-V)
(Fisheye-Modell: 1-äquidistant, 2-flächentreu, 3-orthograf., 4-stereograf.)

FishCam_D200 ! F 10 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 0.006 1
FishCam_14n ? F 8 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 0.008 2

[Panorama]

(Name X0_m Y0_m Z0_m omega_gon phi_gon kappa_gon)

FishImg_D200 ! 2 ? 0 ? -0.5 ? 200 ? 0 ? 0 ?
FishImg_14n_01 ? 3 ? -2 ? -0.5 ? 170 ? 20 ? -30 ?
FishImg_14n_03 ? 0 ? -2 ? -0.5 ? 170 ? -20 ? 40 ?
FishImg_14n_04 ! 0 ? 0 ? -0.5 ? 200 ? -40 ? 100 ?

[Kamera]
-----

(Name ck_mm PPx_mm PPy_mm A1 A2 A3 B1 B2 C1 C2 r0_fest Pixelgröße_mm)

NiD100 ? 14.1634 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 0 ! 0 ? 0 ? 0 ? 0 ? 8.79825 0.0078

[Bild]

(Name X0_m Y0_m Z0_m Winkel/Quat omega_gon/a phi_gon/b kappa_gon/c)

Img_001 ? 1.8 ? -0.7 ? -0.6 ? W 40 / 0 ? 100 / 0 ? 0 / 0 ?
Img_002 ? 1.8 ? -0.2 ? -0.6 ? W 40 / 0 ? 100 / 0 ? 0 / 0 ?
Img_003 ! 1.8 ? -0.2 ? -0.6 ? W 40 / 0 ? 80 / 0 ? 0 / 0 ?

[Stochastisches Modell]
-----

VKS 0 (an/aus)
VKS-Typ 51

Konstante 1.0 (a-priori Standardabweichung Gewichtseinheit)

Laserscan (D) 0.02 (D-ad) 0.00002 (Hz) 0.025 (V) 0.025
Panorama (x) 0.01 (y) 0.01
Bild (x) 0.005 (y) 0.005

angegeben werden a-priori Standardabweichungen
in D: m, Hz: gon, V: gon, x: mm, y: mm

[Darstellung]
-----

Länge der Kamera-Richtungspfeile (m) 0.75
Grundfläche ein/aus 0
Fehlervektoren Maßstab 500
Fehlervektoren Strichdicke 0.015
Punktgröße Kugelradius 0.05
Instrument Kugelradius 0.075

```

Abbildung A.7: Beispiel für eine Parameterdatei (vgl. Anhang A.1.3)

A.4.2 Exportdateien

Protokolldatei - Mozilla Firefox

Datei Bearbeiten Ansicht Chronik Lesezeichen Extras Hilfe

file:///D:/Berechnungsprotokolle/results.html

Protokolldatei

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Angaben	2. Objektpunkte	3. Zusammenfassung Unbekannte (Statistik)
4. Korrelationen	5. Ausreißer (Data Snooping)	6. Input-Parameterdatei
7. Statusdatei		

Laserscanner	Panoramakamera	Kamera
Riegl 2005	Eyescan M3 b	DCS14n
ScanPos01	Panorama P_05	Bild 6420 Bild 6421 Bild 6423
Laserscannerpunkte	Bildpunkte	Bild 6425 Bild 6428 Bild 6430
ScanPos02	Panorama P_08	Bild 6431 Bild 6433 Bild 6437
Laserscannerpunkte	Bildpunkte	Bild 6445 Bild 6446 Bild 6448
		Bild 6450 Bild 6452 Bild 6453
		Bild 6454

Allgemeine Angaben

Datum/Uhrzeit : 12/04/07 15:40:53
 Sigma0 : 0.00196
 Konvergenz : 0.00010
 Iterationen : 100
 benötigte Iterationen : 28
 Dauer der Berechnung : 4 min 27.22 sek

Unbekannte : 337
 Beobachtungen : 1279

[Zurück zum Anfang](#)

Objektpunkte

	nr.	X	Y	Z	sX	sY	sZ	Scan	Pano	Img			
[?]	10002	-27.26968 ?	-10.87722 ?	0.50712 ?	+/-	0.00167	+/-	0.00141	+/-	0.00132	1	2	1
[!]	10003	-27.19000 !	-9.62400 !	0.53300 !									
[?]	10004	-26.88121 ?	-4.06426 ?	0.63530 ?	+/-	0.00156	+/-	0.00118	+/-	0.00113	1	2	2
[?]	10005	-26.81338 ?	-2.78792 ?	0.65771 ?	+/-	0.00161	+/-	0.00118	+/-	0.00115	1	2	1
[?]	10006	-26.74518 ?	-1.75765 ?	0.67541 ?	+/-	0.00129	+/-	0.00110	+/-	0.00107	2	2	1
[?]	10007	-26.48635 ?	2.79536 ?	0.76677 ?	+/-	0.00119	+/-	0.00102	+/-	0.00102	2	2	4
[?]	10145	-25.83569 ?	14.17906 ?	1.00067 ?	+/-	0.00118	+/-	0.00110	+/-	0.00111	2	2	4
[!]	11009	-27.81000 !	-20.04500 !	4.01100 !									
[?]	11010	-27.21999 ?	-9.63421 ?	4.19953 ?	+/-	0.00134	+/-	0.00119	+/-	0.00112	2	2	2
[?]	11011	-26.77284 ?	-1.79620 ?	4.35199 ?	+/-	0.00117	+/-	0.00099	+/-	0.00089	2	2	5
[!]	13012	-27.85800 !	-20.04200 !	8.71500 !									
[!]	13013	-27.89600 !	-20.09800 !	10.66200 !									
[?]	13014	-27.42349 ?	-12.14686 ?	9.22559 ?	+/-	0.00132	+/-	0.00119	+/-	0.00109	2	2	3

Abbildung A.8: Anfang einer Ergebnis-Protokolldatei im Format HTML, angezeigt im Web-Browser (vgl. Anhang A.1.4)

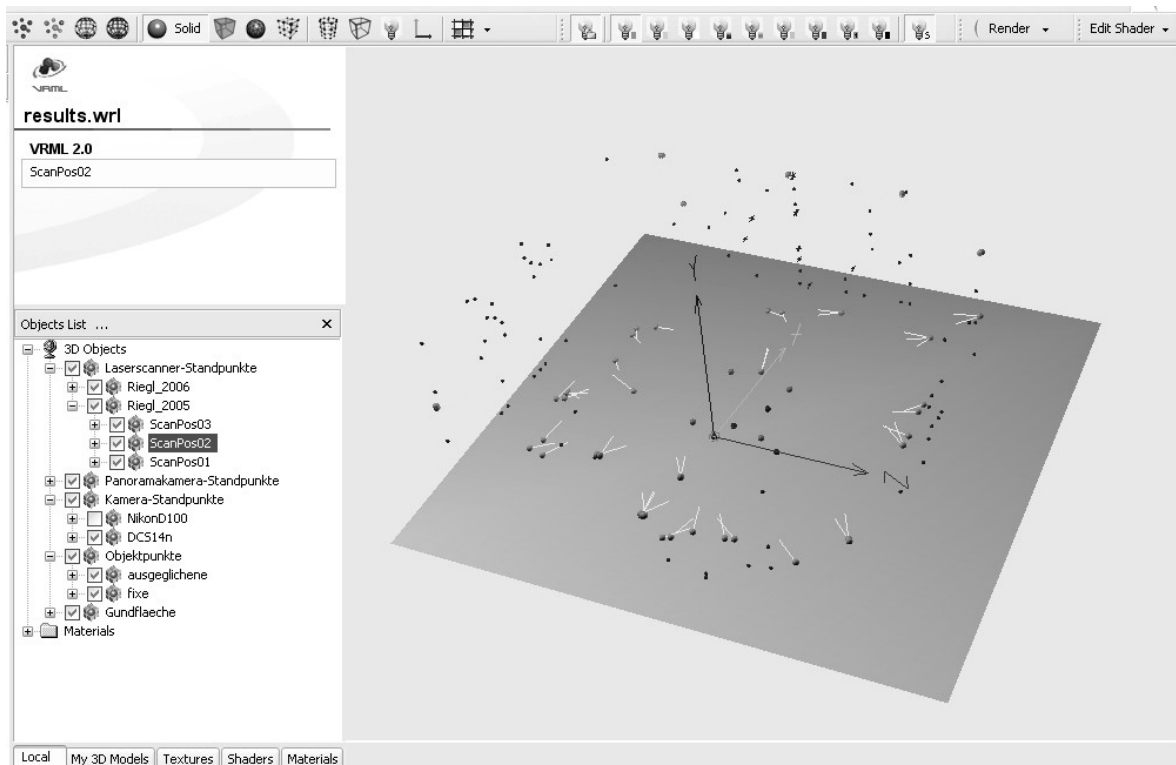


Abbildung A.9: Beispielanzeige einer VRML-Datei zur Visualisierung der Ergebnisse (vgl. Anhang A.1.4); Screenshot aus der Software 'Deep Exploration' (Right Hemisphere): Struktur der 3D-Objekte (links), 3D-Darstellung (rechts)

A.4.3 Statusdatei

```
Daten wurden eingelesen.

Vks | Iteration: 1 MKQ s0: 0.00988 | Zuschlag: 0.4115518 (78)
Vks | Iteration: 2 MKQ s0: 0.00994 | Zuschlag: 0.1402445 (14) | Ausreißer: 1 (NV= 6.47)
Vks | Iteration: 3 MKQ s0: 0.01000 | Zuschlag: 0.0096256 (37) | Ausreißer: 2 (NV= 6.52)
Vks | Iteration: 4 MKQ s0: 0.01000 | Zuschlag: 0.0004882 (45) | Ausreißer: 3 (NV= 6.70)
Vks | Iteration: 5 MKQ s0: 0.01000 | Zuschlag: 0.0002799 (44) | Ausreißer: 4 (NV= 6.58)
Vks | Iteration: 6 MKQ s0: 0.01000 | Zuschlag: 0.0001660 (45) | Ausreißer: 5 (NV= 5.48)
Vks | Iteration: 7 MKQ s0: 0.01000 | Zuschlag: 0.0001079 (45)
Vks | Iteration: 8 MKQ s0: 0.01000 | Zuschlag: 0.0000001 (45)
    | Iteration: F 9 MKQ s0: 0.00966 | Zuschlag: 0.0033611 (46)
    | Iteration: F 10 MKQ s0: 0.00966 | Zuschlag: 0.0000143 (44)

Berechnung erfolgreich!
```

Abbildung A.10: Beispiel für eine während der Berechnung geschriebene Statusdatei zur Kontrolle des aktuellen Status der Berechnung (vgl. Anhang A.1.4)

Die Statusdatei enthält folgende Informationen, die je nach durchgeführter Berechnung nacheinander in die Datei geschrieben werden: VKS - Varianzkomponentenschätzung, F - Freie Netzausgleichung, MKQ - Ausgleichungsberechnung, Nummer der Iteration, a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit, größter berechneter Unbekanntenzuschlag und Nummer der dazugehörigen Unbekannten, Elimination von Ausreißern mit der normierten Verbesserung NV.

A.4.4 Benutzeroberfläche

DR Ausgleichung

Input

Steuerdatei: D:\Berechnung\11_66\Laserscanner.ini Öffnen...

Scankoordinaten: D:\Berechnung\11_66\Input\scan.dat Anzeigen

Panokoordinaten: D:\Berechnung\11_66\Input\panorama.dat Anzeigen

Bildkoordinaten: D:\Berechnung\11_66\Input\image.dat Anzeigen

Objektkoordinaten: D:\Berechnung\11_66\Input\object_fish.dat Anzeigen

Startwerte: D:\Berechnung\11_66\Input\parameter.dat Anzeigen

Objektpunkte

Nummer: 99 Punkt ein-/ausschalten

X: 0.35865 m mX: 0.00000 m X ☐

Y: -0.02804 m mY: 0.00000 m Y ☐

Z: 1.33776 m mZ: 0.00000 m Z ☐

Statistik

Max. Iterationen: 30 Konvergenz: 0.0001 Beobachtungen: 1014 Ausreißer eliminieren NV Grenze

Status: Berechnung erfolgreich! Unbekannte: 241 ☒ 4.50

sigma_0: 0.00992 Berechnungsdauer: 1 min 9.97 s Freie Ausgleichung ☒

Iterationen: 6

Varianzkomponentenschätzung

VKS ☐ D | Hz V | x' y' | xp' yp' (4 Gruppen)

☒ D | Hz | V | x' y' | xp' yp' (5 Gruppen)

☐ D | Hz V | x' y' | xp' | yp' (5 Gruppen)

☐ D | Hz | V | x' y' | xp' | yp' (6 Gruppen)

☐ D | Hz | V | x' | y' | xp' | yp' (7 Gruppen)

Laserscanner | Scan | Panoramakamera | Panorama | Kamera | Bild

Nummer: Riegl Scanner ein-/ausschalten ☒

☒ Maßstabsabweichung	0.00156	+/-	0.00064
☒ Additionskorrektur	0.00414 m	+/-	0.00222 m
☒ Zielachsabweichung	-0.00021 rad	+/-	0.00034 rad
☐ Kippachsabweichung	0.00000 rad	+/-	0.00000 rad
☐ Höhenindexfehler	0.00000 rad	+/-	0.00000 rad
☒ Zielachsexzentrizität Hz	0.00169 mm	+/-	0.00050 mm
☒ Zielachsexzentrizität V	0.00310 mm	+/-	0.00097 mm
☐ Teilkreisexz. Hz (sin)	0.00000 rad	+/-	0.00000 rad
☒ Teilkreisexz. Hz (cos)	-0.00049 rad	+/-	0.00023 rad
☒ Teilkreisexz. V (sin)	0.00083 rad	+/-	0.00008 rad
☐ Teilkreisexz. V (cos)	0.00000 rad	+/-	0.00000 rad

Beenden

Abbildung A.11: Haupt-Benutzerdialog zur Steuerung und Berechnung der integrierten Bündelblockausgleichung (vgl. Anhang A.1.6), aktuelle Registerkarte: Laserscanner-Parameter

Laserscanner | Scan | Panoramakamera | Panorama | Kamera | Bild

Nummer: ScanPos01 Scan ein-/ausschalten ☒

Scanner: Riegl Scan ist Referenz ☐

☒ X0	3.50445 m	+/-	0.00071 m
☒ Y0	-2.08112 m	+/-	0.00082 m
☒ Z0	-1.17522 m	+/-	0.00083 m
☒ omega	41.58231 gon	+/-	0.01131 gon
☒ phi	32.47743 gon	+/-	0.00812 gon
☒ kappa	133.76474 gon	+/-	0.02908 gon
☐ Maßstab		+/-	
☐ Offset		+/-	

Beenden

Abbildung A.12: Registerkarte für Parameter einer Scanner-Aufnahme

Laserscanner		Scan		Panoramakamera		Panorama		Kamera		Bild									
Nummer		FishCam_14n		Kamera ein-/ausschalten		☒		R0		0.0 mm									
☒	ck	-8.01131 mm	+/-	0.00326 mm	Panorama-Typ ☐ Zylinder-Panorama ☒ Fisheye-Panorama ☐ Kugel-Panorama		 <table border="1"> <tr> <td>A-Matrix (txt)</td> <td>A-Matrix (Bild)</td> </tr> <tr> <td>I-Matrix (txt)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Protokoll</td> <td>VRML-Modell</td> </tr> <tr> <td>Statusanzeige</td> <td></td> </tr> </table> Beenden					A-Matrix (txt)	A-Matrix (Bild)	I-Matrix (txt)		Protokoll	VRML-Modell	Statusanzeige	
A-Matrix (txt)	A-Matrix (Bild)																		
I-Matrix (txt)																			
Protokoll	VRML-Modell																		
Statusanzeige																			
☒	e / PPx	-0.15489 mm	+/-	0.00305 mm															
☒	PPy	-0.08014 mm	+/-	0.00228 mm															
☒	A1	-4.1234e-005	+/-	3.381e-005															
☒	A2	3.3219e-006	+/-	1.1303e-006															
☒	A3	-2.0339e-008	+/-	1.1744e-008															
☒	Av / B1	1.5902e-005	+/-	5.2849e-006															
☒	Ah / B2	2.4167e-005	+/-	8.5231e-006															
☒	K / C1	0.00010333	+/-	9.99e-005															
☒	N / C2	-5.005e-005	+/-	0.00010749															

Abbildung A.13: Registerkarte für Panoramakamera- oder Fisheye-Parameter

Laserscanner		Scan		Panoramakamera		Panorama		Kamera		Bild									
Nummer		FishImg_14n		Panorama ein-/ausschalten		☒		Kamera		FishCam_14n									
☒	X0	3.46272 m	+/-	0.00043 m	Panorama-Typ ☐ Zylinder-Panorama ☒ Fisheye-Panorama ☐ Kugel-Panorama		 <table border="1"> <tr> <td>A-Matrix (txt)</td> <td>A-Matrix (Bild)</td> </tr> <tr> <td>I-Matrix (txt)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Protokoll</td> <td>VRML-Modell</td> </tr> <tr> <td>Statusanzeige</td> <td></td> </tr> </table> Beenden					A-Matrix (txt)	A-Matrix (Bild)	I-Matrix (txt)		Protokoll	VRML-Modell	Statusanzeige	
A-Matrix (txt)	A-Matrix (Bild)																		
I-Matrix (txt)																			
Protokoll	VRML-Modell																		
Statusanzeige																			
☒	Y0	0.91767 m	+/-	0.00037 m															
☒	Z0	-0.63546 m	+/-	0.00050 m															
☒	omega	220.29603 gon	+/-	0.02244 gon															
☒	phi	26.06119 gon	+/-	0.01939 gon															
☒	kappa	262.62890 gon	+/-	0.01140 gon															

Abbildung A.14: Registerkarte für Parameter eines Panoramas oder Fisheye-Bildes

Laserscanner		Scan		Panoramakamera		Panorama		Kamera		Bild	
Nummer	NID100	Kamera ein-/ausschalten	☒	R0	8.8 mm						
☒ ck	14.05191 mm	+/-	0.00132 mm								
☒ PPx	0.00634 mm	+/-	0.00143 mm								
☒ PPy	0.09256 mm	+/-	0.00111 mm								
☒ A1	-0.0004101	+/-	1.4068e-006								
☒ A2	1.0877e-006	+/-	9.3416e-009								
☐ A3	0	+/-	0								
☒ B1	-2.3858e-005	+/-	3.0608e-006								
☒ B2	3.1166e-006	+/-	2.4615e-006								
☒ C1	7.3216e-005	+/-	2.5893e-005								
☒ C2	6.7434e-005	+/-	2.9163e-005								




A-Matrix (txt)	A-Matrix (Bild)
I-Matrix (txt)	
Protokoll	VRML-Modell
Statusanzeige	

Beenden

Abbildung A.15: Registerkarte für Kamera-Parameter

Laserscanner		Scan		Panoramakamera		Panorama		Kamera		Bild	
Nummer	Img_035	Bild ein-/ausschalten	☒	Kamera	NID100						
☒ X0	1.82223 m	+/-	0.00008 m								
☒ Y0	-0.30474 m	+/-	0.00009 m								
☒ Z0	-0.58321 m	+/-	0.00017 m								
☒ omega	71.30479 gon	+/-	0.00324 gon								
☒ phi	-38.35945 gon	+/-	0.01323 gon								
☒ kappa	-6.64696 gon	+/-	0.01133 gon								



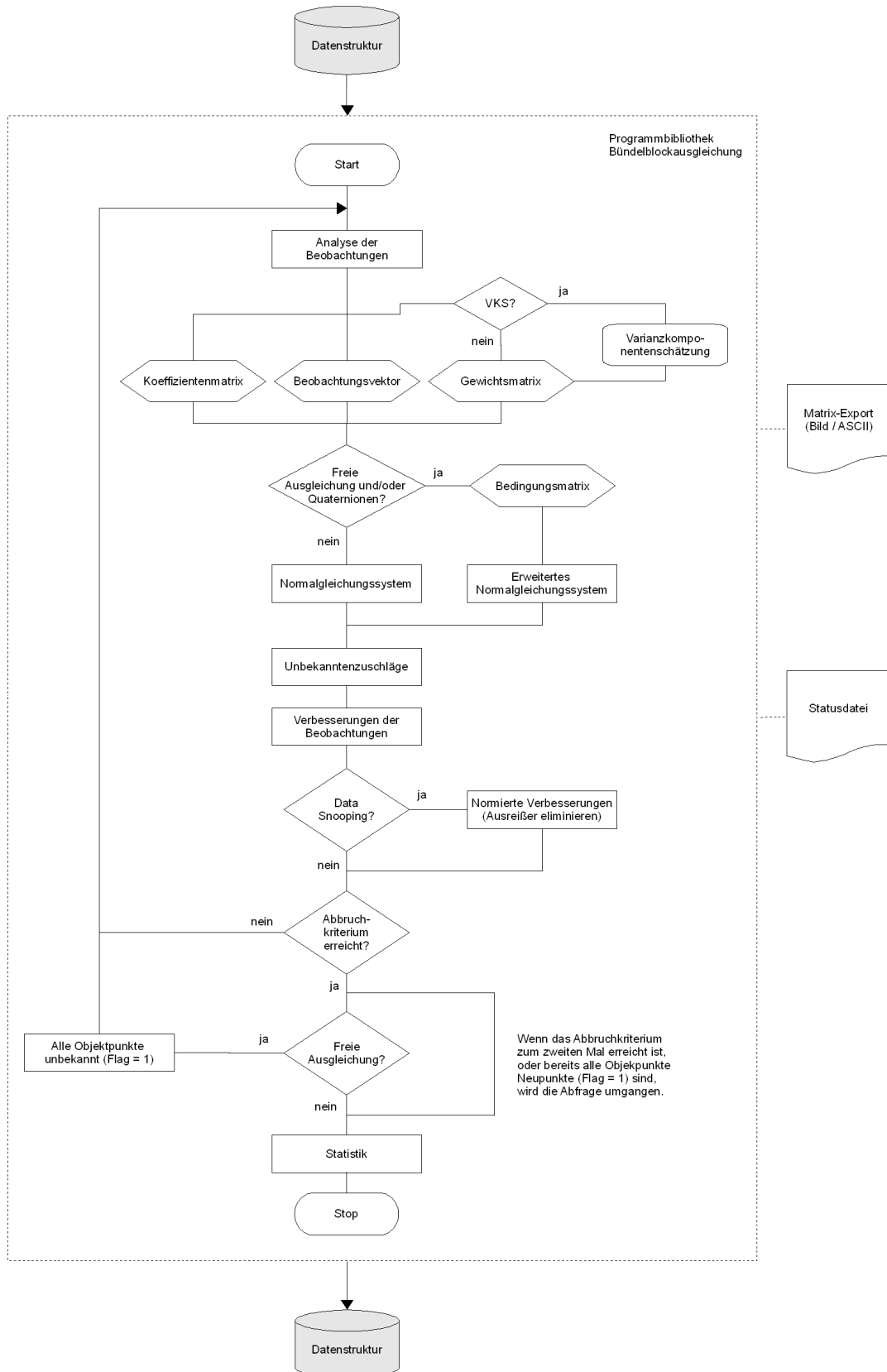

A-Matrix (txt)	A-Matrix (Bild)
I-Matrix (txt)	
Protokoll	VRML-Modell
Statusanzeige	

Beenden

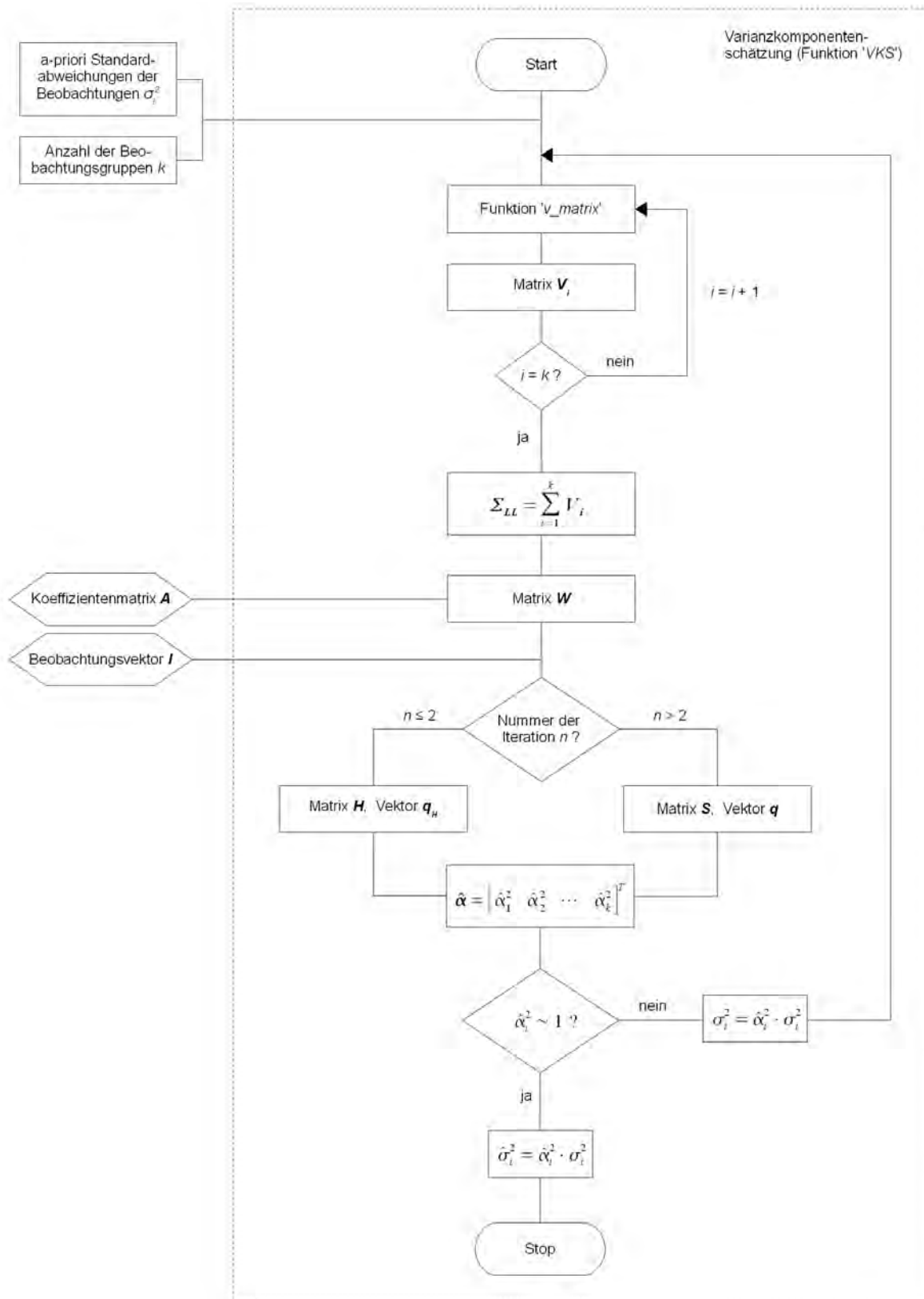
Abbildung A.16: Registerkarte für Bild-Parameter

A.5 Flussdiagramme

A.5.1 Programmbibliothek Bündelblockausgleichung (vgl. Anhang A.1.5)



A.5.2 Ablauf der Varianzkomponentenschätzung (vgl. Anhang A.2)



A.6 Kombination von Laserscanner- und 360°-Panoramabilddaten

A.6.1 Kolorierung und Texturierung von Laserscannerpunktwolken

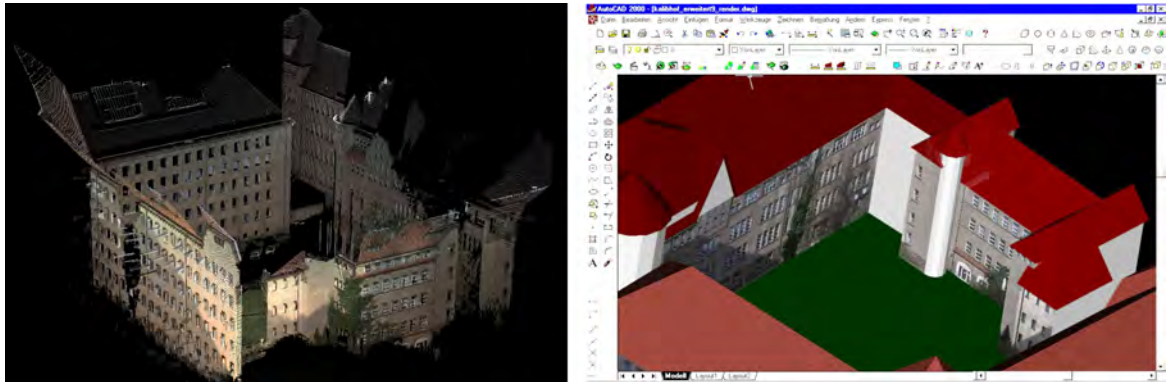


Abbildung A.17: Kolorierung einer Laserscanner-Punktwolke eines Innenhofes an der TU Dresden mit 360°-Panoramabildinformationen (links) und Generierung eines texturierten 3D-Modells mit AutoCAD (rechts) (vgl. Kapitel 5.1.3.3.)

A.6.2 Anwendungsbeispiel aus der Geologie

Die nachfolgenden Abbildungen beziehen sich auf die Anwendung der Kombination einer hyperspektralen Panoramakamera und einem terrestrischen Laserscanner (Kapitel 8.1.6).

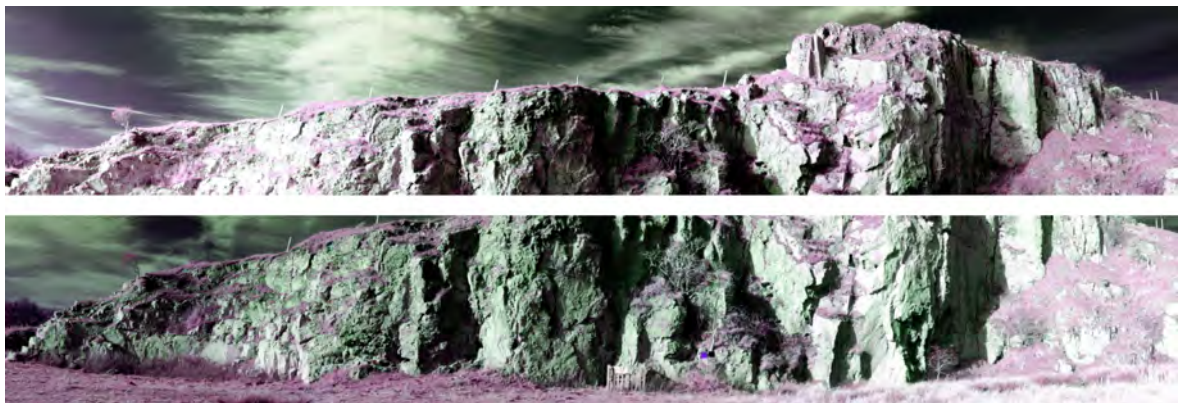


Abbildung A.18: Zwei Falschfarbenbilder (Rot: 1,720 μm , Grün: 2,009 μm , Blau: 1,563 μm), erzeugt aus den Daten der hyperspektralen Panoramakamera HySpex SWIR-320m (vgl. Kapitel 8.1.6.2), aufgenommen von zwei vertikal übereinander angeordneten Standpunkten im 'Manystones' Steinbruch, Peak District (Großbritannien) (vgl. Kapitel 8.1.6.3) [Kurz et. al., 2008]

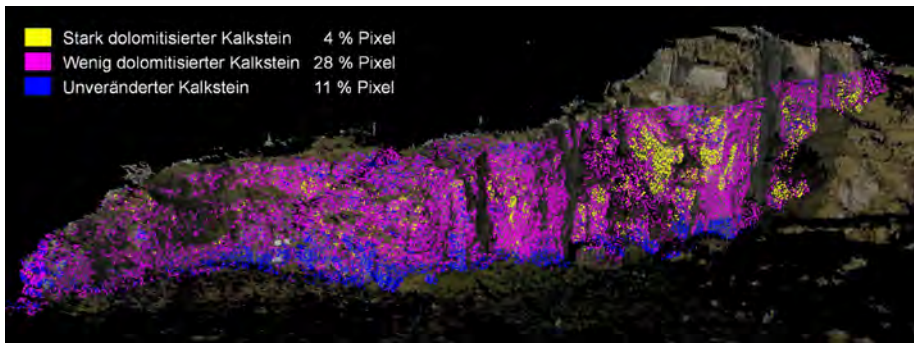


Abbildung A.19: Ergebnis für die geologische Interpretation: Punktwolke eingefärbt mit Klassifikationsergebnis der Hyperspektral-Panoramadaten, dargestellt über einem texturierten Oberflächenmodell (vgl. Kapitel 8.1.6.6) [Kurz et. al., 2008]

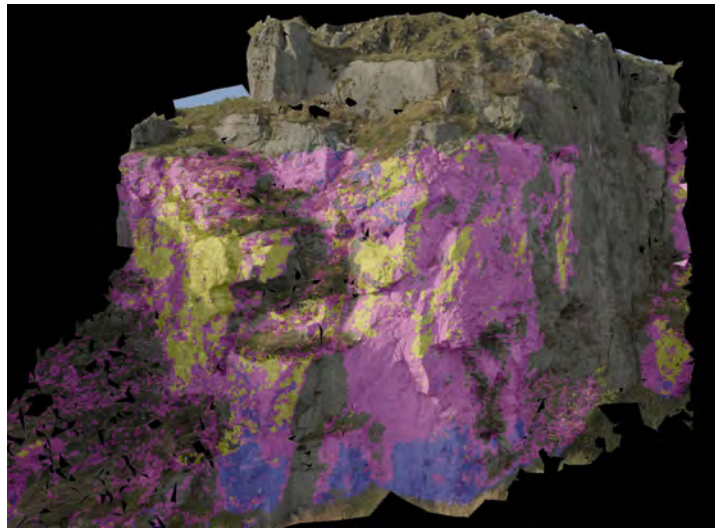


Abbildung A.20: Ergebnis für die geologische Interpretation: Oberflächenmodell texturiert mit zentralperspektiven Bilddaten und dem Klassifikationsergebnis der Hyperspektral-Panoramadaten (vgl. Kapitel 8.1.6.6) [Abbildung zur Verfügung gestellt von Dr. Simon Buckley]