

BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN
Fachbereich Bauingenieur- und Geoinformationswesen

Masterarbeit

Orientierung von Schrägluftbildern aus UAV-Aufnahmen mit Amateurkameras

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science

vorgelegt von
Karsten Stebner
Matr.nr.: 754155

Studiengang: Geodatenerfassung und -visualisierung
Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Michael Breuer
Dipl.-Ing. Bernhard Strackenbrock

27. Oktober 2010

Zusammenfassung

Die Photogrammetrie ließ sich bisher in die zwei Hauptanwendungsgebiete Luftbildphotogrammetrie und terrestrische bzw. Nahbereichsphotogrammetrie einteilen. Der technische Fortschritt macht es möglich, diese zwei Gebiete für verschiedene Anwendungen zusammenzufassen, indem mit Hilfe von autonom fliegenden Flugmodellen Bilder aus der Luft in der Nähe zum zu erfassenden Objekt gemacht werden können. Aufgrund eines begrenzten Gewichtes werden zu diesem Zweck oft handelsübliche Kompaktkameras eingesetzt.

In dieser Arbeit wird der Einsatz von Amateurkameras für diese neue Art der photogrammetrischen Anwendung untersucht. Es wird auf verschiedene nachteilige Eigenschaften der modernen Kameraplattformen näher eingegangen, die eine Orientierung der Bilddaten erheblich erschweren bzw. verhindern können. In diesem Zusammenhang wird ein automatisierter Lösungsansatz analysiert, der die Nachteile der Kameraplattformen kompensieren kann, wodurch eine absolute Orientierung der Bilddaten erst möglich wird.

Abstract

Photogrammetry used to be divided into two main application areas: aerial photogrammetry and close range photogrammetry. In the course of the technical progress these two areas can now be integrated and applied for a multitude of applications. By using unmanned aircraft vehicles images can be made in close distance from the object. For reasons of weight limitations, standard compact cameras are often used for this purpose.

The objective of this work is to analyze the utilization of amateur compact cameras for this new photogrammetric application. It is specifically being discussed how disadvantageous characteristics of modern aircraft systems can negatively affect or reduce the orientation of image data. In this context, an automated solution is being analyzed that allows to compensate the drawbacks of these systems and thus allow an absolute orientation of image data.

Vorwort

Wie die Thematik der vorliegenden Masterarbeit zeigt, hat man es als studentischer Mitarbeiter in der Abteilung Sensorkonzepte und Anwendungen am Institut für Robotik und Mechatronik des DLR in Berlin Adlershof auch oft mit nicht ganz alltäglichen photogrammetrischen Aufgabenstellungen zu tun. Ich möchte mich deshalb an erster Stelle beim Abteilungsleiter Herrn F. Lehmann dafür bedanken, dass er mir die Möglichkeit gab, mein photogrammetrisches Wissen auch neben dem Studium beruflich einsetzen zu können, mich weiter zu entwickeln und meine Masterarbeit am DLR zu schreiben.

Ich danke allen Kollegen für das gezeigte Interesse an meiner Masterarbeit sowie den hilfreichen und aufmunternden Kommentaren. Besonders erwähnt seien Herr A. Wieden, Herr H. Meißner, Herr S. Pless, Frau S. Kaufhold und mein Betreuer Herr B. Strackenbrock, die trotz des alltäglichen Stresses immer zu konstruktiven Diskussionen bereit waren. Für die Kamerakalibrierungen im Labor und der ergiebigen Zusammenarbeit danke ich den Mitarbeitern der Abteilung Informationsverarbeitung optischer Systeme.

Außerdem bedanke ich mich bei dem Piloten der Air Tempelhof GmbH Herrn H. Lueg für die Bereitschaft zu einem solch außergewöhnlichen Bildflug mit dem Helikopter, bei dem Piloten des UAVK. Scheele und bei den Mitarbeitern der Luftaufsichtsstelle des Finower Flughafens für den Zuspruch zu diesen Flügen.

Bei Herrn D. Band von der VermCad GmbH bedanke ich mich für seine schnelle Hilfe und seiner Geduld, mir die Grundzüge der Software VermCad telefonisch zu vermitteln.

Herrn Prof. Dipl.-Ing. M. Breuer danke ich dafür, dass er mir mit seinem Fachwissen aber auch objektiven Ansätzen hilfreich als betreuende Lehrkraft bei der Bewerksstellung der Arbeit zur Seite stand.

Schließlich danke ich meinen Eltern, meinem Bruder und seiner Familie sowie allen übrigen Verwandten und Freunden, die während der Masterarbeit häufig auf mich verzichten mussten, für ihr großes Verständnis und den geleisteten Beistand.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Freundin dafür, dass sie mich mit sehr viel Geduld immer wieder unterstützt hat und mir den Alltag während der Bearbeitungszeit erleichtert hat.

Berlin, im Oktober 2010

KARSTEN STEBNER

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielstellung	2
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Kamerakalibrierung	5
2.1.1	Testfeldkalibrierung	6
2.1.2	Kalibrierung mit diffraktiven optischen Elementen	7
2.2	Relative Orientierung	10
2.2.1	Merkmalsbasiertes Matchingverfahren	11
2.2.2	Flächenbasiertes Matchingverfahren	11
2.2.3	SIFT	13
2.3	Epipolargeometrie	14
2.4	Alternativer Ansatz der relativen Orientierung	16
3	Datenerfassung	17
3.1	Projektvorbereitung	17
3.1.1	Rechtlicher Rahmen für die Verwendung von UAVs in Deutschland	17
3.1.2	Befliegungsziel	19
3.1.3	Verwendete Kameras	20
3.1.4	Kameraträger	26
3.2	Flugplanung	29
3.2.1	Flugplanung für die Helikopterbefliegung	32
3.2.2	Flugplanung für die UAV-Befliegung	34
3.3	Kalibrierung der Kameras	38
3.4	Arbeiten vor Ort	39
3.4.1	Netzmessung	39
3.4.2	Bildaufnahme	40

4	Auswertung und Analyse	43
4.1	Vergleich der Kalibrierverfahren	43
4.2	Stabilität der inneren Geometrie der Kameras	51
4.3	Netzausgleichung	53
4.4	photogrammetrische Auswertung der Befliegungen	55
4.4.1	Visuelle Kontrolle der Bilddaten	55
4.4.2	Orientierung der Bilddaten	56
5	Visualisierung der Bilddaten	71
6	Fazit	73
7	Ausblick	77
	Tabellenverzeichnis	80
	Abbildungsverzeichnis	81
	Literaturverzeichnis	83
	Anhang	89
A	Aufgabenstellung	89
B	Kurzbeschreibung des Ausgleichungsprogramms CAP	91
C	Kalibrierprotokolle für die Canon EOS 5D Mark II	93
C.1	Kalibrierung mit A_1 und A_2 für $R_0 = 0$	93
C.2	Kalibrierung mit A_1 , A_2 und A_3 für $R_0 = 0$	94
C.3	Kalibrierung mit A_1 , A_2, A_3 , B_1 , B_2 , C_1 und C_2 für $R_0 = 0$	95
C.4	Kalibrierung mit A_1 und A_2 für $R_0 = 14.4$	96
C.5	Kalibrierung mit A_1 , A_2 und A_3 für $R_0 = 14.4$	97
D	Projektbegleitende Kalibrierung Canon EOS 5D Mark II	98
E	Protokolle der Netzmessung	99
E.1	Lagenetzausgleichung	99
E.2	Höhennetzausgleichung	103
E.3	Koordinatenliste	106

1 Einleitung

Bei dem Wort Drohne, denkt ein jeder an das unbemannte Flugobjekt, das vornehmlich zu militärischen Zwecken zum Einsatz kommt. Der bislang eng mit dem Militär verbundene Aufklärungscharakter sowie der unbemannte Einsatz von Waffen ist es vielleicht, der der Drohne immer etwas Negatives abgewinnen lässt.

In dieser Arbeit soll ein anderer Begriff aus dem englischen Sprachgebrauch im Vordergrund stehen – 'Unmanned Aerial Vehicle'¹. Weiter sei darauf hingewiesen, dass ausschließlich UAVs mit einem maximalen Abfluggewicht bis zu etwa fünf Kilogramm behandelt werden.

Das Aufgabenfeld von UAVs reicht von Bauwerksinspektionen für Windkraftanlagen, Brücken, Straßenschäden, zur luftgestützten Beobachtung von Gefahrengebieten, wie Waldbrände und eine resultierende exaktere Koordination von Einsatzkräften oder die Suche nach Vermissten [AscTec 2010b], bis hin zur Dokumentation von Bauwerken und Immobilien. UAVs sind keine Grenzen gesetzt. Spätestens seit sie auch kommerziell verkauft werden [vgl. z.B. microdrones 2009], sind sie nicht mehr länger nur ein Privileg für Militär und Polizei.

Ebenso vielschichtig wie die Anwendungsmöglichkeiten sind auch die Ausprägungen von UAV-Systemen. Diese werden sehr ausführlich in der Dissertation von *Henri Eisenbeiß* [Eisenbeiß 2009] an der *Eidgenössische Technische Hochschule² Zürich* zur *UAV-Photogrammetrie* beschrieben, eine der führenden Hochschulen in der Erforschung und Entwicklung von Mini-UAV-Systemen und Anwendungen in Europa. *Henri Eisenbeiß* führt den Begriff *UAV-Photogrammetrie*, der UAV-gestützten hochauflösenden Luftaufnahme für fernerkundliche Zwecke bzw. photogrammetrischen Auswertungen, erstmalig ein. Dabei stehen Mini-UAV-Systeme im Vordergrund, die für Flächenbefliegungen, in der Nahbereichsphotogrammetrie und zunehmend in einer Kombination aus beidem Anwendung finden. Diese Kombination des klassischen Luftbildes mit den neuen Möglichkeiten der UAV-Photogrammetrie im photogrammetrischen Nahbereich bildet einen Schwerpunkt dieser Arbeit.

Hinsichtlich der Aufgabenstellung dieser Arbeit (vgl. Anhang A) bleibt der Einsatz eines UAV im Titel unerwähnt. Weiterhin wird der Begriff „*Kleinformatsensoren*“ verwendet. Da die Bezeichnung Amateurkamera treffender ist, wurde sich dazu entschieden, den Titel der Arbeit anzupassen. Die Kameras sind, im Gegensatz zu Messkameras, nicht herstellereitig kalibriert. Die photogrammetrische Definition für Amateurkameras ist damit für beide Kameras gegeben [Kraus 1996: S. 469].

¹kurz: UAV

²kurz: ETH

Die photogrammetrische Ansiedlung der Arbeit setzt ein Grundverständnis für verschiedene mathematische Zusammenhänge voraus. Wichtige, jedoch nicht sämtliche Grundlagen der Photogrammetrie, die dem Verständnis der Arbeit dienen, werden beschrieben.

Erfasste und gespeicherte Daten, die nicht im Verlauf der Arbeit dargestellt oder dem Anhang hinzugefügt sind, befinden sich auf der beigefügten DVD.

1.1 Motivation und Zielstellung

Die Fachabteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* des *Institutes für Robotik und Mechatronik* des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt* führt in enger Zusammenarbeit mit ihren Nachbarabteilungen vielfältige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durch. Dabei liegt der Schwerpunkt in der Definition und Entwicklung neuer Kamerasensoren, der Verarbeitung der Datenprodukte sowie der Entwicklung von Anwendungen.

Pilotprojekte werden in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern aus Industrie, Forschungseinrichtungen und Universitäten durchgeführt. Diese Projekte erstrecken sich von der gemeinsamen Grundlagenforschung über die Planung und Durchführung von Flugkampagnen bis hin zur Datenprozessierung und Auswertung [RM-AK 2009].

Zunehmend werden im Rahmen der Sensor- sowie Anwendungsentwicklung am Standort Berlin Adlershof auch UAVs eingesetzt, um den Anforderungen aus Wirtschaft, Wissenschaft und Forschung fortwährend gerecht zu werden. Dabei steht die photogrammetrische Verwendung von UAVs im Vordergrund. Der neuartige Einsatz von UAVs macht es, ebenso wie die klassische Luftbildaufnahme, möglich, Objekte aus der Luft zu erfassen. Der Vorteil gegenüber flugzeuggestützter Fernerkundung und Photogrammetrie besteht darin, dass Aufnahmen aus nahezu beliebiger Nähe zum Objekt gemacht werden können und dadurch bereits mit einfachen Kompaktkameras hochaufgelöste Bilddaten entstehen. Durch schnelle und langsame Flugbewegungen bis hin zum Schwebeflug sind UAVs in der Lage, ebenso wie Helikopter, entsprechend des aufzunehmenden Objektes, flexibel einsetzbar zu sein. Von Detailaufnahmen sowie der Möglichkeit der Umfliegung von Objekten sind UAVs keine Grenzen gesetzt. Jedoch bleibt bei der Verwendung einer herkömmlichen Kompaktkamera die Stabilität der inneren Geometrie fraglich und damit eine mögliche photogrammetrische Auswertung.

In dieser Arbeit sollen zwei unterschiedliche Sensoren miteinander verglichen werden, die die Abteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* besitzt und die für einen Einsatz am UAV Verwendung finden können. Zu diesem Zweck wird ein mehrstöckiges Gebäude mit einer Spiegelreflexkamera aus einem Helikopter und einer kleineren Kompaktkamera an einem UAV aufgenommen. Dabei sollen Senkrecht- sowie Schrägaufnahmen mit Hilfe der

Kameraträger und zusätzlich terrestrische Aufnahmen vom Gebäude gemacht werden. Da vergleichbare UAV-Aufnahmen eines Objektes im städtischen Bereich durch Nachbarbauten oder umliegender Vegetation behindert werden können, stellen Schrägaufnahmen dabei ein notwendiges Mittel zur vollständigen Erfassung eines Gebäudes dar.

Der Helikopter bietet zu diesem Zeitpunkt die einzige kurzfristige Möglichkeit für die Abteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen*, einen Sensor mit dem Gewicht einer Spiegelreflexkamera in den Anwendungsbereichen der UAV-Photogrammetrie zu testen, vielleicht stellt aber auch der Helikopter eine mögliche Alternative im Einzelfall für diese Art der photogrammetrischen Anwendung dar, wenn nicht auf ein UAV-System zurückgegriffen werden kann.

Ein Ziel dieser Arbeit ist daher die automatische Orientierung der terrestrischen und UAV-basierten Bilddaten für die Kompaktkamera sowie der terrestrischen und Helikopter-basierten Aufnahmen für die schwerere Spiegelreflexkamera in einem jeweiligen Bildverband. Dabei stellt sich für die Abteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* zunächst die generelle Frage, ob die zur Verfügung stehenden Amateurkameras für photogrammetrische Anwendungen geeignet sind und eine Orientierung dieser Bilddaten mit den der Abteilung zur Verfügung stehenden Mitteln in einer angesetzten Auflösung am Objekt von 0.5 bis 1 Zentimeter realisierbar ist. Vorweggenommen sei an dieser Stelle die Tatsache, dass sämtliche Bilddaten ohne brauchbare Näherungswerte der äußeren Orientierung vorliegen. Eine manuelle Orientierung solcher Bilddaten ist in der Photogrammetrie bereits seit Jahrzehnten gelöst und wird zudem im Hinblick auf personelle Ressourcen der Abteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* nicht angestrebt. Es sind daher zunächst vorrangig automatisierte Ansätze zu finden, um die relative Orientierung der Bilder wieder herzustellen.

Im Hinblick auf eine mögliche Orientierung der Aufnahmen sind Vor- und Nachteile der Sensoren im Bezug auf die Genauigkeit der jeweiligen Triangulation zu diskutieren sowie mögliche Einflüsse der verschiedenen Aufnahmeplattformen auf die Orientierungsergebnisse herauszustellen.

Die Kalibrierung der Amateurkameras stellt eine wesentliche Voraussetzung für die photogrammetrische Auswertbarkeit der Bilddaten dar. Die Fachabteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* verfügt über kein klassisches Testfeld zur Kalibrierung ihrer Kameras bzw. Kamerasysteme. Hierzu wurden bislang andere, zum Teil am Institut entwickelte, Verfahren angewendet, um Kameras im Labor zu kalibrieren. Eines dieser Verfahren, die Kalibrierung mit diffraktiven optischen Elementen³, zu der in der klassischen photogrammetrischen Literatur recht wenig zu finden ist, wird in dieser Arbeit vorgestellt.

Da sich bei der photogrammetrischen Auswertung verschiedener Projekte vereinzelt Probleme

³kurz: DOE

ergaben, sollen die Ergebnisse einer Testfeldkalibrierung und einer DOE-Kalibrierung für die Spiegelreflexkamera evaluiert und miteinander verglichen werden, um gegebenenfalls Rückschlüsse auf eine fehlerhafte Kalibrierung am DOE ziehen bzw. ausschließen zu können.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Kamerakalibrierung

In diesem Abschnitt sollen zwei Verfahren zur Kamerakalibrierung beschrieben werden, die in Verbindung mit der Bewerksstellung dieser Arbeit Anwendung fanden – die Testfeldkalibrierung und die Kalibrierung mit diffraktiven optischen Elementen. Dabei soll das methodische Vorgehen dieser Verfahren grundsätzlich im Mittelpunkt der Betrachtung stehen.

Um die Lage und Form von Objekten aus Fotografien rekonstruieren zu können, müssen verschiedene Informationen zur Kamera selbst bekannt sein, die über die Kalibrierung einer Kamera bestimmt werden können. Diese nennt man in der Photogrammetrie bekanntermaßen die Elemente der inneren Orientierung einer Kamera. Dazu gehören zunächst die Lage des Bildhauptpunktes und die Kammerkonstante. Diese Größen legen das Projektionszentrum eines räumlichen Strahlenbündels in Bezug zur Bildebene fest [Kraus 2004: S. 19]. Mit Hilfe der Kollinearitätsbeziehung, eine in der photogrammetrischen Bildauswertung genutzte funktionale Beschreibung der Zentralprojektion, bei der ein Objektpunkt, der zugehörige Bildpunkt und das Projektionszentrum auf einer Geraden liegen müssen, wird der fundamentale Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten hergestellt und mit

$$x' = x_0 - c_k \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

bzw.

$$y' = y_0 - c_k \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

mathematisch formuliert. Dabei kennzeichnen x', y' die Koordinaten eines Bildpunktes P' , x_0, y_0 die Lage des Bildhauptpunktes, c_k die Kammerkonstante, X_0, Y_0, Z_0 die Lage des Projektionszentrums im übergeordneten Koordinatensystem, die Elemente r_i die Rotation der Bildebene im übergeordneten Koordinatensystem und X, Y, Z die Koordinaten des Raumpunktes P im übergeordneten dreidimensionalen System.

Ein weiteres Element der inneren Orientierung einer Kamera bilden die Verzeichnungsparameter. Im photogrammetrischen Zusammenhang lassen sich diese in die radial-symmetrische sowie radial-asymmetrische und tangentiale Verzerrung unterteilen. Während die radial-symmetrische Verzerrung vorwiegend auf eine Brechungsänderung an den Linsen eines Objektivs zurückzuführen ist, rühren radial-asymmetrische und tangentiale Verzerrungen vor

allem von Zentrierfehlern der Linsen im Objektiv her und sind in der Regel um eine Größenordnung kleiner als die radiale Verzeichnung [Kraus 2004: S. 52]. Nicht für Messzwecke vorgesehene einfache Kameras bzw. Objektive besitzen jedoch häufig signifikant schief oder dezentriert montierte Linsen, wodurch die optische Achse innerhalb des Systems gekrümmt und radial-symmetrische Abbildungsfehler von tangentialen und asymmetrischen Anteilen überlagert werden [Luhmann 2010: S. 45].

Affinitäts- und Scherungsparameter sind ebenfalls bestimmbare Größen einer Kamerakalibrierung. Sie beschreiben die Abweichung des Bildkoordinatensystems von der Orthogonalität und Gleichmaßstäbigkeit der Koordinatenachsen, die bei digitalen Aufnahmesystemen auf eine ungleichmäßige Anordnung der Sensorelemente zuzuführen ist [Luhmann 2000: S. 122].

2.1.1 Testfeldkalibrierung

Bei der Testfeldkalibrierung wird ein signalisiertes Passpunktfeld mit bekannten Koordinaten oder Strecken von mehreren Kamerastandpunkten aus formatfüllend und mit einer ausreichenden Strahlenschnittgeometrie aufgenommen. Insbesondere ist daher auf eine geeignete Aufnahmeanordnung zu achten, wie sie beispielsweise Abbildung 2.1 zeigt. Es genügen insgesamt acht Aufnahmen, die sowohl frontal als auch schräg auf das räumliche Testfeld gerichtet und zusätzlich jeweils um 90 Grad um die Aufnahmeachse gewälzt werden [Luhmann 2000: S. 491]. Die Kantungen der zur kalibrierenden Kamera dienen dabei vor allem der Bestimmbarkeit der Lage des Bildhauptpunktes sowie der Affinität eines Sensors [Luhmann 2000: S. 492]. In den Aufnahmen werden anschließend die Bildkoordinaten der Passpunkte für

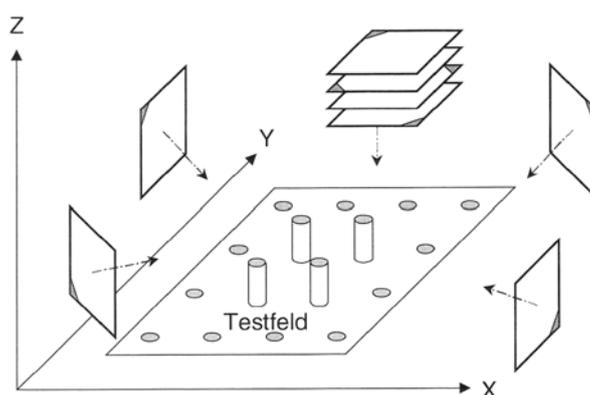


Abb. 2.1: Aufnahmeanordnung zur Testfeldkalibrierung (Quelle: Luhmann [2000: S. 491])

jedes Bild ermittelt. Über die angeführten Gleichungen der Zentralprojektion können sowohl die Elemente der äußeren⁴ als auch die der inneren Orientierung über die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte innerhalb einer Bündelblockausgleichung bestimmt werden. Hinlängliche

⁴die drei Objektkoordinaten des Projektionszentrums sowie drei Drehungen eines Bildes um die Raumachsen des Objektkoordinatensystems

mathematische Ansätze zur Bündelausgleichung liefern z.B. *Kraus* [Kraus 2004: S. 299 ff. und 492 ff.] oder *Luhmann* [Luhmann 2000: S. 260 ff.], wobei die Gleichungen der Zentralperspektive (vgl. Abschnitt 2.1) um die zusätzlichen Polynomkoeffizienten zur Beschreibung der Objektivverzeichnung erweitert werden können [Kraus 1996: S. 143].

2.1.2 Kalibrierung mit diffraktiven optischen Elementen

Die Kalibration mit diffraktiven optischen Elementen ist vorrangig eine Entwicklung der Fachabteilung *Informationsverarbeitung optischer Systeme*, die ebenfalls dem *Institut für Robotik und Mechatronik* untergeordnet ist. Ebenso wie die Testfeldkalibrierung verwendet die geometrische Kalibrierung am DOE hoch genau bekannte Testfelder. Das grundlegende Prinzip der DOE-Kalibrierung wird nachfolgend beschrieben.

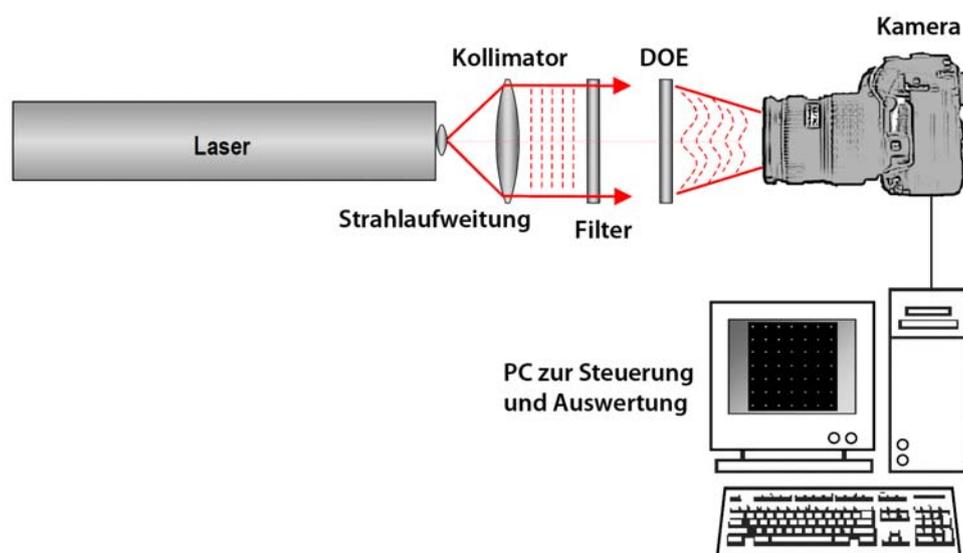


Abb. 2.2: Prinzipaufbau einer DOE-Kalibrierstation (Quelle: nach Jahn et al. [2004])

Konzeption der Kalibrierstation Die Hauptkomponenten einer DOE-Kalibrierstation sind in der Abbildung 2.2 dargestellt. Dabei wird der Lichtstrahl eines He-Ne-Lasers⁵ zunächst entsprechend der Apertur der zur kalibrierenden Kamera aufgeweitet und anschließend mit einer Kollimatoroptik zu einem parallelen Strahlenbündel geformt. Die dadurch erzeugte ebene Lichtwelle trifft auf das DOE, einem Glasträger mit bestimmten optischen Eigenschaften. Diese sind ausschlaggebend dafür, dass die ebene Lichtwelle gebeugt wird. Bei der Modulation des Lichtstrahls entstehen Lichtbündel mit definierten und hochgenau bekannten Beugungswinkeln α und β . Die gebeugte Lichtwelle trifft auf die Eingangsoptik der zur kalibrierenden Kamera. In der Fokalebene des Sensors entsteht dann das gewünschte Beugungsbild, das gespeichert wird.

⁵Wellenlänge 633 nm (rot)

Die Passpunktfelder der DOE-Kalibrierung können mit geringem Aufwand an das Bildfeld eines jeweiligen Sensors angepasst werden. Das ermöglicht eine sehr flexible und optimale Abdeckung der Bildebene mit Passpunkten und stellt eine gute Ausgangssituation für die geometrische Kamerakalibration dar [Bauer et al. 2006: S. 303].

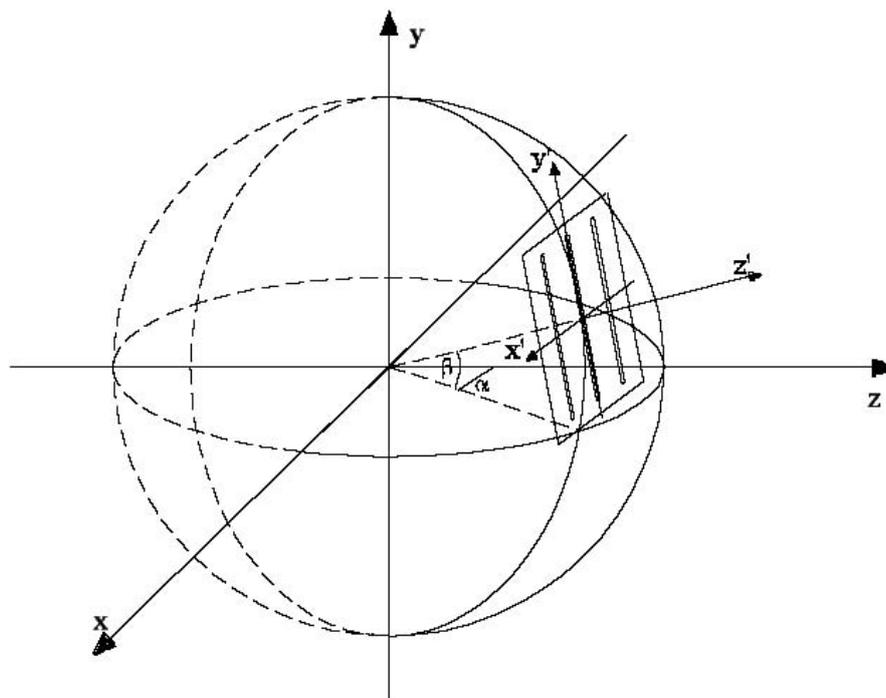


Abb. 2.3: Raumstrahlen im Kugelkoordinatensystem (Quelle: Schuster und Braunecker [2000])

Bestimmung der Elemente der Inneren Orientierung Die Beugungswinkel α und β legen die Objektkoordinaten eines Punktes im Kugelkoordinatensystem des DOE fest (vgl. Abbildung 2.3). Die geometrische Abbildungsgleichung einer idealen Lochkamera in diesem System lautet

$$\vec{p} = \vec{p}_0 + m \cdot R \cdot \vec{p}'$$

[Meißner 2007: S. 22]

wobei $\vec{p} = [X, Y, Z]$ einem Objektpunkt, $\vec{p}_0 = [X_0, Y_0, Z_0]$ dem Projektionszentrum, m dem Maßstabsfaktor, R der Drehmatrix und $\vec{p}' = [x', y', -f]$ dem zugehörigen Bildvektor entsprechen. Aus den unendlich weit entfernten Objektpunkten des DOE folgt die Herleitung idealer Bildkoordinaten im Kamerakoordinatensystem aus α und β für ein Lochkameramodell mit

$$x' = f \cdot \frac{\tan \alpha}{\cos \beta} \quad y' = -f \cdot \tan \alpha.$$

[Meißner 2007: S. 21]

Die realen Bildkoordinaten der Beugungspunkte, denn ein Lochkammermodell liegt beim Standardfall der Kamerakalibrierung nicht vor, werden automatisch ermittelt. Dazu werden die Schwerpunktkoordinaten der einzelnen Beugungsfiguren mit Hilfe eines Gauß-Fit-Algorithmus⁶, auf Subpixelgenauigkeit bestimmt. Danach werden jedem ermittelten Bildpunkt seine entsprechenden Idealkoordinaten innerhalb einer vorgegebenen Umgebung in der Bildebene zugeordnet (vgl. Abbildung 2.4), indem der geringste Abstand zu den bekannten idealen Orten der Beugungspunkte errechnet wird. Für den Fall eines nicht verzeichnungsfreien Objektivs, folgt aus der Messung der realen Bildkoordinaten (i, j) ein eindeutiger Zusammenhang zwischen gemessenen Bildkoordinaten und seinem idealen Ort mit

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\delta \\ j\delta \\ -f \end{bmatrix} + \overrightarrow{\Delta k}.$$

[Meißner 2007: S. 24]

Der Pixelabstand im Bildsensor wird hierbei mit δ bezeichnet. Der Lagekorrekturvektor $\overrightarrow{\Delta k} = [\Delta x'(i, j), \Delta y'(i, j), 0]$ muss für jedes gemessene Bildpixel (i, j) bestimmt werden. Die Korrektur der radialen Verzeichnungen aller Beugungspunkte erfolgt durch die ermittelten Punktabweichungen von ihren Idealwerten.

Ein Polynomialfit liefert über eine bestmögliche Anpassung aller identifizierten Punkte an ihre Ideallage nach der Methode der kleinsten Quadrate die Transformation vom Originalbild in das kalibrierte Bild.

Eine exakte mathematische Beschreibung, die fundierte Aussagen über die Bestimmung der Elemente der inneren Orientierung am DOE zulassen, kann aufgrund der Aktualität des Verfahrens an dieser Stelle nicht wiedergegeben werden. Die Kalibrierung mit diffraktiven optischen Elementen erinnert jedoch an eine klassische Laborkalibrierung wie sie *Kraus* [Kraus 2004: S. 49 ff.] beschreibt und bei der mit Hilfe eines Goniometers ebenfalls hochgenaue Richtungen oder Winkel zuvor erzeugter Raumstrahlen durch das Objektiv der Kamera hindurch gemessen werden. Der große Vorteil der DOE-Kalibrierung ist der, dass alle Strahlen durch das DOE auf einmal erzeugt werden können und nicht jedes einzelne Pixel nacheinander belichtet und anschließend beobachtet werden muss. Der wesentliche Unterschied zur Testfeldkalibrierung ist die direkte Bestimmung radialer und tangentialer Verzeichnungsanteile mit Hilfe von Richtungsmessungen [Luhmann 2010: S. 20].

⁶vgl. Schnelle und genaue Methode zur Schwerpunktfindung in Messreihen [Weißhaar et al. 2003: S. 46]

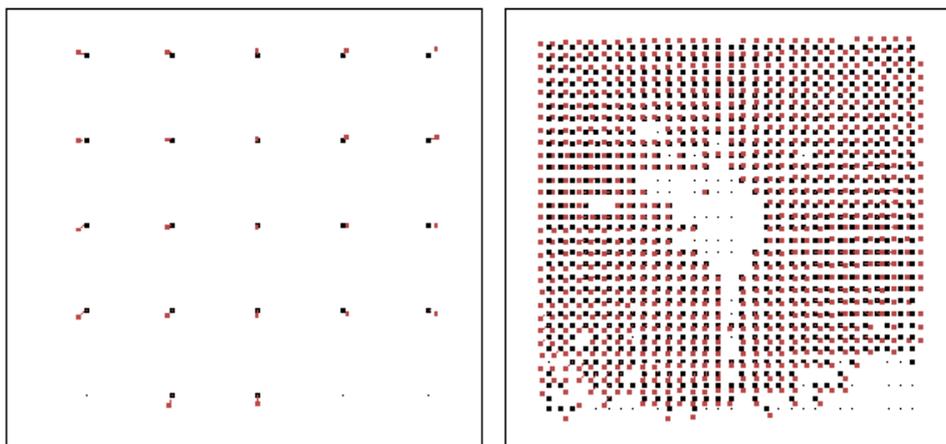


Abb. 2.4: Zuordnung von extrahierten (rot) und idealen (schwarz) Koordinaten, links: Passpunktfeld 5×5, rechts: Passpunktfeld 31×31 (Quelle: nach Bauer et al. [2006: S. 307])

2.2 Relative Orientierung

„Die relative Orientierung von zwei einander überlappenden Messbildern ist eine zentrale Aufgabe in Photogrammetrie und Computer-Vision.“ [Kraus 2004: S. 375]

Die gegenseitige Lage zwischen zwei Bildern kann aufgrund der Komplanaritätsbedingung der Photogrammetrie auf fünf Unbekannte⁷ zurückgeführt werden. Damit lässt sich die relative Lage zweier Bilder im Modellraum durch Strahlenpaare in mindestens fünf homologen Modellpunkten beschreiben [Kraus 2004: S. 214]. Zur Realisierung der relativen Orientierung dienen die Bildkoordinaten korrespondierender Punkte zwischen den Messbildern. Die Messung dieser Bildkoordinaten konnte für viele Anwendungsbereiche der photogrammetrischen Bildauswertung weitestgehend automatisiert werden, wie der Luftbildphotogrammetrie, bei der vorrangig Bilddaten ausgewertet werden, die den Normalfall der Photogrammetrie repräsentieren. Dabei kommen Bildmatchingverfahren zum Einsatz, mit deren Hilfe korrespondierende Bildpunkte automatisch extrahiert und einander zugeordnet werden.

Das maschinelle Sehen⁸ beschreibt computergestützte Lösungen zu Aufgabenstellungen, die sich an die komplexe Wahrnehmungsaufgabe des menschlichen Sehens orientieren. Diese Aufgaben umfassen unter anderem die Bildverarbeitung, Mustererkennung und Merkmalsextraktion [Albertz und Wiggenhagen 2009: S. 208]. Daher stehen die Verfahren des Fachgebietes Computer Vision in enger Verwandtschaft zu den automatisierten photogrammetrischen Methoden und bieten weitere Ansätze zur gegenseitigen Orientierung zweier Messbilder.

⁷Drehungen ω', ϕ', κ' und ϕ'', κ''

⁸Computer Vision

Im Folgenden werden zwei gängige Bildmatchingalgorithmen beschrieben, die in der Photogrammetrie Anwendung finden – das merkmals- und flächenbasierte⁹ Verfahren. Des Weiteren werden Algorithmen aufgezeigt, deren Ursprünge im Bereich Computer Vision liegen und für verschiedene Anwendungen der Nahbereichsphotogrammetrie von großem Interesse im Hinblick auf eine automatisierte relative Orientierung sein können.

2.2.1 Merkmalsbasiertes Matchingverfahren

Dieses Bildzuordnungsverfahren¹⁰ basiert auf der Übereinstimmung zwischen Bildmerkmalen, wie beispielsweise Punkte oder Kanten. Diese werden mit Hilfe von Kantendetektoren oder Interestoperatoren voneinander unabhängig in den Bildern extrahiert. Informativ seien an dieser Stelle die bekannten Interest-Operatoren von *Moravec (1977)*, *Förstner (1987)* sowie der *Plessey-Punkt-Detektor (1988)* genannt. *Köthe* [Koethe 2003] gibt eine umfassende Übersicht aktuellerer Verfahren zur Extraktion von Punktmerkmalen. Die Merkmalsextraktion findet dabei in verschiedenen Auflösungsstufen einer Bildpyramide statt. Über eine grobe Merkmalerkennung in den niedrig aufgelösten Stufen, erfolgt eine feinere Zuordnung der Merkmale in höheren Auflösungsstufen. Durch die Nutzung der Interestoperatoren entstehen so zwei unabhängige Listen von Fenstern zwischen zwei Bildern [Kraus 1996: S. 198]. Die merkmalsbasierte Zuordnung dieser Fenster ist der schwierigste Schritt im Bildmatching-Prozess und hängt wesentlich von der Gestalt der Objektszene ab [Luhmann 2000: S. 418]. Eine mögliche gegenseitige Zuordnung dieser Fenster kann über verschiedene Verfahren erfolgen, die durch *Luhmann* [Luhmann 2000: S. 423 ff.] beschrieben sind. Generell kann gesagt werden, dass das merkmalsbasierte Bildmatching weniger genau ist [Baltsavias 2002: S. 29] als das flächenbasierte Zuordnungsverfahren. Nach der Bildzuordnung liegen vielmehr Näherungswerte homologer Bildelemente vor [Luhmann 2000: S. 418].

2.2.2 Flächenbasiertes Matchingverfahren

Das flächenbasierte Bildzuordnungsverfahren legt die Übereinstimmung zwischen zwei Bildbereichen nach der Ähnlichkeit ihrer Intensitäts- bzw. Grauwerte fest. Sie bildet zumeist die verfeinerte Zuordnung homologer Strukturen des merkmalsbasierten Verfahrens [Luhmann 2000: S. 419]. Dabei wird eine Mustermatrix¹¹ $f(x, y)$ des Referenzbildes f sukzessiv über ein Fenster des Suchbildes g verschoben (vgl. Abbildung 2.5), um ein Korrespondenzmuster¹²

⁹auch intensitätsbasiertes Matching

¹⁰Feature Based Matching (kurz: FBM)

¹¹auch Template

¹²auch Patch

zu suchen. Als Ähnlichkeitsmaß wird für jede Position $g(x, y)$ ein Korrelationskoeffizient ρ_{fg} nach

$$\rho_{fg} = \frac{\sum [(f_i - \bar{f}) \cdot (g_i - \bar{g})]}{\sqrt{\sum (f_i - \bar{f})^2 \cdot \sum (g_i - \bar{g})^2}}$$

bestimmt [Albertz und Wiggenhagen 2009: S. 194]. Der maximale Wert ρ kennzeichnet den Grad der höchsten Übereinstimmung zwischen der Mustermatrix und einer entsprechenden Matrix im Suchfenster des Suchbildes. Da das Verfahren nach diesem Vorgehen nur auf ganzzahlige Pixelwerte beschränkt ist, werden die Subpixelwerte für die Bestimmung identischer Bildpunkte zwischen zwei Bildern durch das Maxima der Interpolation zwischen den ermittelten Kreuzkorrelationskoeffizienten in Zeilen- und Spaltenrichtung ermittelt [Albertz und Wiggenhagen 2009: S. 195]. „In der Praxis schließt sich an die Kreuzkorrelation oft eine Kleinste-Quadrate-Zuordnung für hohe Genauigkeit an“ [Albertz und Wiggenhagen 2009: S. 195], da die Kreuzkorrelation nur die Translation der Mustermatrix im Suchbereich berücksichtigt und keine anderen geometrische Unterschiede. Für viele Softwareprodukte in der Photogrammetrie wird das flächenbasierte Matchingverfahren daher auch unter dem Begriff Least-Square-Matching¹³ zusammengefasst¹⁴. Das Ziel des LSM ist es, die Intensitätsunterschiede zwischen dem Referenz- und dem Suchbild zu minimieren. Eine vermittelnde Ausgleichung führt zur Minimierung der Grauwertdifferenzen zwischen dem Template und dem Suchpatch [Urbansky et al. 2010]. Die Kleinste-Quadrate-Zuordnung bestimmt dadurch die bestmögliche Transformation zwischen Template und dem Patch bzw. die Anpassung des Ausgangsmusters in Lage und Form an das vorliegende Korrespondenzmuster.

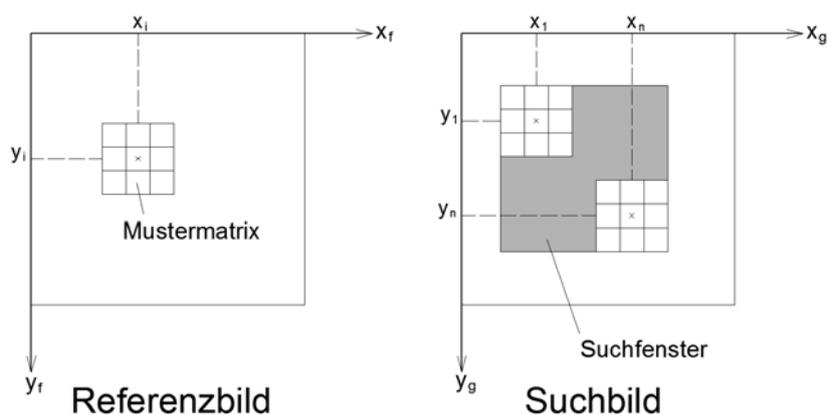


Abb. 2.5: Schematische Darstellung des Kreuzkorrelationsverfahrens (Quelle: nach Albertz und Wiggenhagen [2009: S. 194])

¹³kurz: LSM

¹⁴z.B. bei Match-AT der INPHO GmbH

2.2.3 SIFT

SIFT¹⁵ ist ein Interestoperator, dessen extrahierte Merkmale invariant gegenüber Translationen, Rotationen und Maßstabsunterschieden sind. In der Entwicklung photogrammetrischer Software hat der Operator des Computer Vision bislang jedoch keine große Bedeutung erlangt. Er wird daher neben den klassischen Verfahren vorgestellt, wengleich er dem merkmalsbasierten Bildmatching-Verfahren zuzuordnen ist.

Der Operator wurde von *David G. Lowe* erstmals im Jahre 1999 veröffentlicht. Das Patent für dieses Verfahren besitzt die *University of British Columbia* in Vancouver, Canada, an der *Lowe* als Dozent am *Computer Science Department* beschäftigt ist. Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass aufgrund des Patents der Operator nur in wenigen bekannten Bildanalyseprogrammen integriert ist.

Bei SIFT werden die Bilddaten in verschiedenen Auflösungen mit Gaußfiltern geglättet. Die Differenz der geglätteten Bilder wird anschließend analysiert. Dabei deuten lokale Extremwerte zwischen Differenzbildern einzelner Auflösungsstufen auf punktförmige Merkmale hin [Albertz und Wiggenhagen 2009: S. 197]. Um die Charakteristik eines Merkmals zu beschreiben, werden

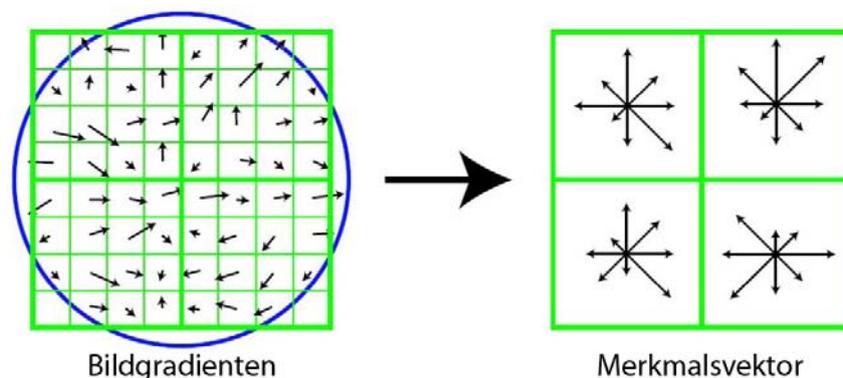


Abb. 2.6: 2x2x8-dimensionaler Merkmalsvektor (rechts), der eine 8x8 Merkmalsumgebung (links) beschreibt (Quelle: nach Lowe [2004: S. 104])

die Bildgradienten in der lokalen Nachbarschaft des Merkmals bestimmt und in einzelnen Merkmalsvektoren zusammengefasst. Die Gradienten kennzeichnen dabei die Richtung des größten Helligkeitsanstiegs. Die Abbildung 2.6 zeigt diesen Zusammenhang. Auf der linken Seite werden die Gradienten in ihrer berechneten Ausdehnung und Orientierung für jedes Bildpixel in der 8x8 Pixelumgebung des Merkmals dargestellt. Die Gewichtung der einzelnen Gradienten ist durch den blauen Kreis beschrieben. Die Pixelumgebung wird in 4x4 Unterregionen auf der rechten Seite zusammengefasst. Dabei wird in acht Hauptrichtungen unterschieden. Die Länge der einzelnen Vektoren spiegelt dabei den Einfluss der verschiedenen Bildgradienten auf

¹⁵Scale-invariant feature transform (kurz: SIFT, engl.: skaleninvariante Merkmalstransformation)

der linken Seite wider. Das rechte Bild beschreibt einen 32-dimensionalen Merkmalsvektor¹⁶. SIFT verwendet einen 128-dimensionalen Merkmalsvektor, der über 4×4 Subregionen berechnet wird, die sich aus einer 16×16 Pixelumgebung ableiten [Lowe 2004: S. 104].

Die Invarianz gegen die Translation ergibt sich dabei aus der konsistenten Anordnung gleicher Merkmale zwischen zwei Bildern. Rotationen können über die einzelnen Bildgradienten der Merkmalsvektoren berücksichtigt werden. Dabei zeigt der größte Bildgradient jeweils die Hauptorientierung eines Merkmals an. Zwei Bilder, bei denen der Bildinhalt gegeneinander verdreht ist, haben übereinstimmende Merkmale bzw. den gleichen Merkmalsvektor aber eine unterschiedliche Hauptorientierung, über die eine mögliche Drehung beschrieben werden kann. Maßstabsunterschiede werden durch die Betrachtung in den einzelnen Auflösungsstufen kompensiert.

Die Verwendung von Merkmalsvektoren bringt eine weitere Eigenschaft der SIFT mit sich. Das Verfahren wird robust gegen Beleuchtungsänderungen und Bildrauschen, da nicht die Ähnlichkeiten der Intensitätswerte primär betrachtet werden, sondern vielmehr die Änderung dieser in eine bestimmte Richtung im Bild. Weiter wird das Verfahren damit unempfindlicher gegenüber kleinen geometrischen Deformationen, wie sie bei der Aufnahme eines Objektes von verschiedenen Standpunkten in der Nahbereichsphotogrammetrie auftreten [Albertz und Wiggenhagen 2009: S. 197].

Für die Objekterkennung kann man die Daten von mehreren, zufällig gewählten Merkmalspunkten verschiedener Bilder auf Übereinstimmung mit Hilfe des RANSAC-Algorithmus überprüfen. Dieses Verfahren, das an dieser Stelle nur genannt sei, dient der Schätzung eines Modells innerhalb einer Reihe von Messwerten mit groben Fehlern.

2.3 Epipolargeometrie

Die Nahbereichsphotogrammetrie ist in den meisten Fällen insbesondere durch beliebig angeordnete konvergente Aufnahmen von stark geformten Objekten, wie z.B. Gebäuden, charakterisiert. Bei konvergenten Aufnahmen erhöht sich die Komplexität der relativen Orientierung gegenüber genäherten Senkrechtaufnahmen unter anderem aufgrund zusätzlicher Rotationen um die x - bzw. y -Achse des Bildkoordinatensystems und einer damit verbundenen Änderung des Bildinhaltes von Bild zu Bild.

Gibt es einen homologen Objektpunkt P zwischen zwei Bildern, so können grundlegende Beziehungen mittels der Epipolargeometrie beschrieben werden. Dieser Zusammenhang wird in der Abbildung 2.7 anhand zweier Bilder (links, rechts) gekennzeichnet.

¹⁶ 2×2 Subregionen $\times 8$ Richtungen

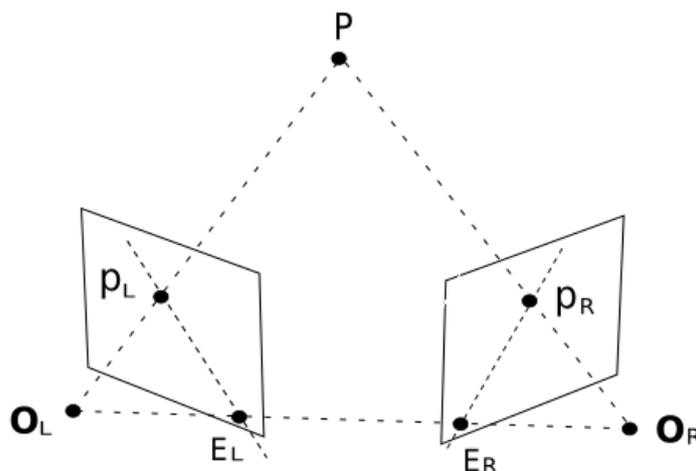


Abb. 2.7: Epipolargeometrie (Quelle: WMF [2006])

Als Basislinie wird die Verbindungsgerade der beiden Projektionszentren O_L und O_R bezeichnet. Ihr Durchstoßpunkt durch die Bildebene nennt man Epipol E . Somit stellt der Epipol E_L die Abbildung des Projektionszentrums O_R in der Bildebene des linken Bildes dar. Um für den Bildpunkt p_L die Position im rechten Bild zu bestimmen, lässt sich die Suche auf der Epipolarlinie $p_R E_R$ beschränken, die durch den Schnitt der Bildebene des rechten Bildes mit der Epipolarebene $O_L O_R P$ beschrieben wird. Das Einstellen der Epipolarebene kennzeichnet an dieser Stelle noch einmal die allgemeine Schnitt- bzw. Komplanaritätsbedingung der Photogrammetrie, bei der die Projektionszentren O_L und O_R und der Objektpunkt P in einer Ebene liegen müssen.

Durch diesen geometrischen Zusammenhang folgt die Einschränkung des Suchraums (vgl. Abschnitt 2.2.2) für die Zuordnung korrespondierender Punkte zwischen zwei Bildern auf einen eindimensionalen Fall, wodurch der Suchraum erheblich reduziert wird, denn nur Punkte, die auf der Epipolarlinie liegen, sind mögliche Partner. Diese Theorie lässt sich ebenso auf mehrere verschiedene Kamerastandpunkte und damit weiteren Bildern erweitern. Die Verwendung weiterer Bilder hat den Vorteil zusätzlicher Messungen, die die Genauigkeit der Auswertung erhöhen können [Kraus 1996: S. 429 ff.]. Der Suchbereich beschränkt sich dann nicht mehr auf eine Epipolarlinie, sondern theoretisch auf einen Punkt, wobei sich die Epipolarlinien aufgrund unvermeidbarer Unsicherheiten bei der Messung homologer Punkte im Bild nicht unmittelbar in diesem schneiden.

Die Epipolargeometrie setzt Näherungswerte der relativen Orientierung voraus, die bei einem Bildflug zumeist aus der Kombination von GPS- und Inertialdaten-Aufzeichnungen abgeleitet werden. Mit den Formeln nach *Luhmann* [Luhmann 2000: S. 245] kann die Epipolarlinie $p_R E_R$ eines Bildpunktes p_L berechnet werden. Liegt lediglich eine hierarchische Anordnung von Bildern vor, kann die relative Orientierung zwischen zwei Bildern in den meisten Programmen zur photogrammetrischen Auswertung auch durch die manuelle Bildpunktmessung mindestens

fünf homologer Objektpunkte P_i näherungsweise bestimmt werden. Ist auch diese Möglichkeit nicht gegeben, so kann die relative Orientierung einer Bildhierarchie alleinig aus den oben beschriebenen Verfahren zum Bildmatching abgeleitet werden. Dadurch vergrößern sich jedoch die Suchbereiche im Suchbild und damit der Aufwand und die Dauer des rechnergestützten Prozesses. Daher sind Programme, die nach dieser Methodik verfahren, zumeist mit effektiven Algorithmen zum Testen von Ausreißern verbunden, wie sie bereits fürs SIFT-Verfahren genannt wurden.

2.4 Alternativer Ansatz der relativen Orientierung

Wie bereits erläutert wurde, nimmt die konvergente Aufnahmekonfiguration eine wesentliche Rolle in der Nahbereichsphotogrammetrie ein. Neben der Verdeckung verschiedener Objektdetails, sind zusätzlich hohe projektive Verzerrungen eines Objektes zwischen zwei Bildern problematisch. Wenn eine rechtwinklige extrahierte Kante aus dem Referenzbild im Suchbild nicht gefunden werden kann, da sie nicht winkeltreu abgebildet wird, stellt das besonders hohe Anforderungen an den Auswerteprozess, der mit den Standardverfahren der Photogrammetrie nicht zu lösen ist. Das Fachgebiet Computer Vision macht sich daher die projektive Geometrie zu Nutze, mit der die projektive Abbildungsvorschrift zwischen den Bildern beschrieben werden kann.

Während bei der klassischen euklidischen Geometrie metrische Größen, wie Längenverhältnisse, Winkel oder Parallelitäten, nach einer euklidischen Transformation (Translation, Rotation, Skalierung) erhalten bleiben, ist dies für die projektive Geometrie nicht der Fall [Rodehorst 2004: S. 57]. Die projektive Geometrie macht sich ebenfalls die Epipolargeometrie zunutze, die durch die Fundamentalmatrix beschrieben wird. Diese lässt sich aus acht homologen Bildpunkten ohne Kenntnis der inneren Kameraorientierung ableiten. Ist die Fundamentalmatrix zwischen zwei Bildern bestimmt, können aus ihr zwei Projektionsmatrizen abgeleitet werden. Diese beschreiben die perspektivische Abbildung eines Objektpunktes P an die Bildposition p_L im ersten bzw. p_R im zweiten Bild (vgl. Abbildung 2.7). Weiterhin beinhalten die Projektionsmatrizen die vollständige Definition der Kameraeigenschaften. Sind diese im Vorhinein genähert bekannt, genügen fünf homologe Punkte, um die Fundamentalmatrix aus zwei Bildern abzuleiten. Die verschiedenen Methoden zur Korrespondenzanalyse schließen sich an.

An dieser Stelle sei auf den Nutzen des Computer Vision für die Nahbereichsphotogrammetrie verwiesen. Eine nicht vorausgesetzte innere Orientierung sowie die Einführung verschiedener Kameras für einen Folgebildverband machen das Verfahren flexibel für den Einsatz von nicht kalibrierten sowie instabilen Amateurkameras. Der vollständige mathematische Sachverhalt zwischen den beschriebenen Größen kann z.B. durch Rodehorst [Rodehorst 2004: S. 57 ff.] nachvollzogen werden.

3 Datenerfassung

Für eine erfolgreiche Durchführung der Arbeit im Sinne der Aufgabenstellung waren verschiedene Faktoren für die Datenerfassung zu berücksichtigen. Der Prozess der Datenerfassung gliedert sich daher in die Projektvorbereitung, die Flugplanung, die Kamerakalibrierung, die Vermessung der Passpunkte vor Ort sowie die Bildaufnahme selbst.

3.1 Projektvorbereitung

Innerhalb der Projektvorbereitung war zunächst ein Befliegungsziel (vgl. Abschnitt 3.1.2) zu definieren. Die Abbildung 3.1 kennzeichnet die verschiedenen Flugzonen über Berlin und dem Berliner Umland. Für das Bundesland Berlin (rot unterlegte Fläche) gilt neben der Flugverbotszone *ED-R 146* bis 5000 Fuß MSL¹⁷ über dem Regierungsviertel (Kreis), dass sämtliche Flüge unter 2500 Fuß MSL beantragt werden müssen. Ausgenommen von dieser Regelung sind Starts und Landungen. Der Buchstabe *D* kennzeichnet eine Kategorie des kontrollierten Luftraumes, für den bestimmte Flugregeln gelten. Ein Flug mit einem Helikopter über Berlin muss daher beantragt werden. Doch nicht nur für die Befliegung mit einem Helikopter müssen verschiedene rechtliche Rahmenbedingungen eingehalten werden, auch der Betrieb von UAVs in Deutschland unterliegt Gesetzen, die es bei der Projektvorbereitung zu berücksichtigen galt.

3.1.1 Rechtlicher Rahmen für die Verwendung von UAVs in Deutschland

Das Luftverkehrsgesetz (LuftVG) [LuftVG 2010] regelt das Luftrecht der Bundesrepublik Deutschland. Nach §1 LuftVG Absatz 1 ist die Benutzung des Luftraums durch Luftfahrzeuge frei, *„soweit sie nicht durch dieses Gesetz, durch die zu seiner Durchführung erlassenen Rechtsvorschriften, durch im Inland anwendbares internationales Recht, durch Verordnungen des Rates der Europäischen Union und die zu deren Durchführungen erlassenen Rechtsvorschriften beschränkt wird.“* Weiterhin wird im Absatz 2 festgelegt bei welchen Objekten es sich um Luftfahrzeuge handelt. *„Flugmodelle“* sowie *„sonstige für die Benutzung des Luftraums bestimmte Geräte, sofern sie in Höhen von mehr als dreißig Metern über Grund oder Wasser betrieben werden können“*, gelten per LuftVG als Luftfahrzeuge. Der *AscTec Falcon 8* ist demnach als Luftfahrzeug einzustufen, unterliegt den Luftfahrtgesetzen, benötigt jedoch keine gesonderte Zulassung nach §1 LuftVZO, da das verwendete UAV ein Gesamtgewicht von 25 Kilogramm unterschreitet. Bezogen auf die Flugzonen Berlins gelten damit jedoch gleiche

¹⁷ mean sea level

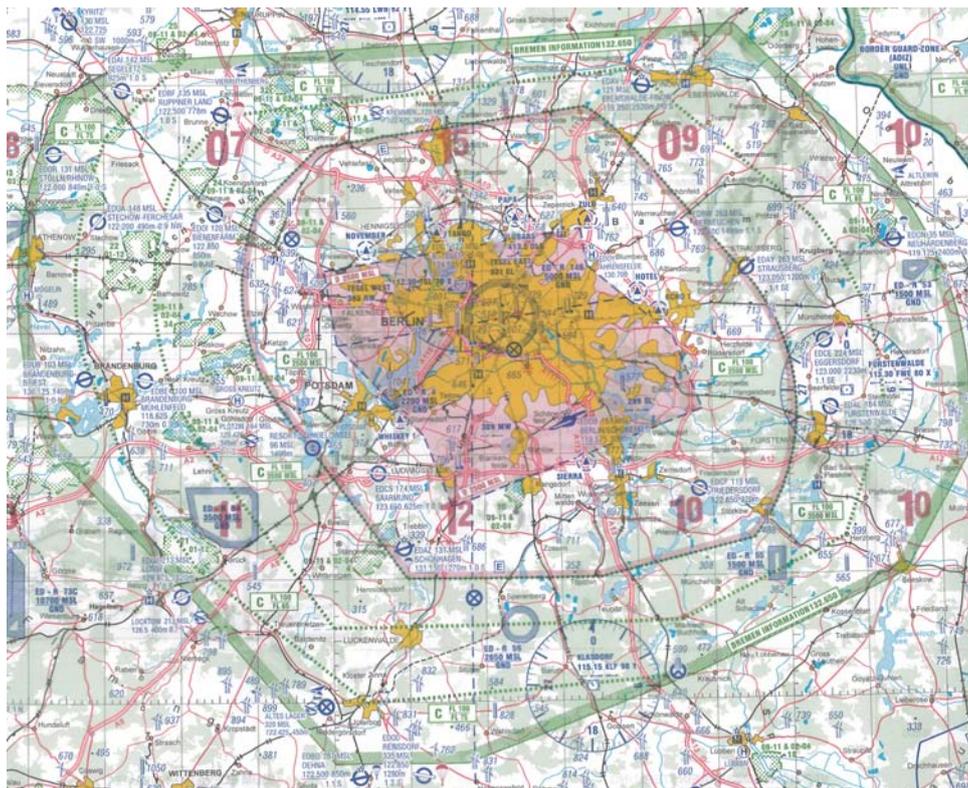


Abb. 3.1: Ausschnitt einer Luftfahrtkarte für den Raum Berlin (Quelle: Deutsche Flugsicherung (DFS) GmbH und Büro der Nachrichten für Luftfahrer [2009])

Bestimmungen, wie für einen Helikopter.

Da es derzeit jedoch weder national noch international ein gesondertes Regelwerk gibt, welches sich auf die Eigenarten von autonom fliegenden, führerlosen Luftfahrzeugen bezieht [Siebert et al. 2009: S. 377], hat sich unter anderem der *UAV DACH e.V.*¹⁸ gegründet. Dieser macht es sich in erster Linie zur Aufgabe, „Lösungsansätze zur Zertifizierung von UA Systemen (UAS) und deren Einbringung in den Luftraum in enger Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden zu prüfen, zu erproben und abschließend zu bewerten“ [UAV-DACH 2010: S. 2]. „Die UAV DACH hat sich zum Ziel gesetzt, in Zusammenarbeit mit den entsprechenden Behörden ihre Erfahrung bei der Formulierung der nötigen Vorschriften und Verfahren für die Zulassung und den Einsatz ziviler UA Systeme einzubringen“ [UAV-DACH 2010: S. 2]. Bis zu einer endgültigen Festlegung sind UAVs unter dem aktuellen Recht allgemein als Modellflugzeuge anzusehen und müssen daher nach Sichtflugregeln¹⁹ betrieben werden [Siebert et al. 2009: S. 378], womit sichergestellt sein muss, dass eine Sichtverbindung zum UAV grundlegend über die gesamte Dauer des Fluges bestehen muss.

¹⁸Deutschsprachiger Verein für Unbemannte Luftfahrzeuge; **D** Deutschland, **A** Österreich, **CH** Schweiz

¹⁹„See and avoid“ (engl.: sehen und ausweichen)

Darüber hinaus legt §16 LuftVO die erlaubnisbedürftige Nutzung des Luftraums für Flugmodelle fest. So ist die Nutzung nach Absatz 1a für Flugmodelle mit einer Gesamtabflugmasse von mehr als fünf Kilogramm erlaubnisbedürftig. Da das verwendete UAV ein Abfluggewicht von zwei Kilogramm nicht überschreitet [AscTec 2010c: S. 2], war die Erlaubnisbedürftigkeit nach §16 Absatz 1a nicht gegeben. Nach §16 LuftVO Absatz 1d gilt, dass das Betreiben „von Flugmodellen aller Art in einer Entfernung von weniger als 1.5 Kilometern von der Begrenzung von Flugplätzen“ ebenso erlaubnisbedürftig ist. Auf „Flugplätzen bedarf der Betrieb von Flugmodellen darüber hinaus der Zustimmung der Luftaufsichtsstelle oder Flugleitung“. Weiterhin kann nach Absatz 5 die Erteilung dieser Erlaubnis „vom Nachweis der Zustimmung des Grundstückseigentümers oder sonstigen Nutzungsberechtigten abhängig gemacht werden“, die für Start und Landung in jedem Fall benötigt wird.

Nach §43 LuftVG Absatz 2 ist der Halter eines UAVs verpflichtet, „zur Deckung seiner Haftung auf Schadenersatz nach diesem Unterabschnitt eine Haftpflichtversicherung in einer durch Rechtsverordnung zu bestimmenden Höhe zu unterhalten.“ Die Versicherung des Piloten war durch das DLR gewährleistet.

Alle genannten Paragraphen des LuftVG und deren Verordnungen sind mit dem Stand vom 30. Juni 2010 erhoben. Es wird darauf hingewiesen, dass der Betrieb von UAVs weiteren Einschränkungen unterliegt, die unter anderem den Eigenschaften eines UAV zuzuordnen sind. Es wurde daher vorwiegend auf die für das Projekt notwendigen rechtlichen Bedingungen eingegangen.

3.1.2 Befliegungsziel

Bei der Festlegung des Befliegungsziels wurde sich für den Tower (vgl. Abbildung 3.2) des Flugplatzes in Finow im Landkreis Barnim entschieden. Es konnte kein Objekt gefunden werden, für das ein Grundstückseigner Überflüge ohne Weiteres erlaubt hätte. Der Vorteil des Flugplatzes Finow lag zum einen darin, dass es dort die Möglichkeit gab, einen Helikopter zu chartern, zum anderen war der unmittelbare Kontakt zur Luftaufsichtsstelle gegeben, die der Durchführung des Projektes positiv gegenüberstand und ihre Zustimmung für den UAV-Flug nach §16 LuftVO Absatz 1d gab. Man kam damit nicht umhin, eine Flugerlaubnis zu beantragen.



Abb. 3.2: Tower des Flugplatzes Finow

3.1.3 Verwendete Kameras

In diesem Kapitel erfolgt eine Beschreibung der verwendeten Amateurkameras. Es wird darauf hingewiesen, dass überwiegend Kameraeigenschaften diskutiert werden, die im photogrammetrischen Zusammenhang stehen. Die Kameras besitzen wesentlich mehr spezifische Eigenschaften. Für die Aufnahmen des Finower Towers standen die digitale Spiegelreflexkamera *Canon EOS 5D Mark II* und die digitale Kompaktkamera *Ricoh GR digital III* zur Verfügung.

	Canon EOS 5D Mark II	Ricoh GR Digital III
Sensorauflösung	21.1 Megapixel (5616 x 3744 Px)	10 Megapixel (3648 x 2736 Px)
Sensorgroße	36 x 24 mm (Vollformat)	1/1,7" = 7.6 x 5.7 mm
Brennweite	35 mm (Festbrennweite)	6 mm (Festbrennweite)

Tab. 3.1: Kameraeigenschaften

Zu den für die photogrammetrische Auswertung relevanten Daten der Kameras zählen u.a. die Auflösung und Größe des Sensors sowie die Brennweite, die abhängig ist von den verwendeten Objektiven. In der nachfolgende Tabelle 3.1 sind diese Größen für beide Kameras zusammengefasst.



Abb. 3.3: *Canon EOS 5D Mark II* (Quelle: Barnett et al. [2009])



Abb. 3.4: *Ricoh GR Digital III* (Quelle: Uncrate [2009])

Der Tabelle 3.1 ist zu entnehmen, dass die Größenangabe des Sensors der *Ricoh GR Digital III* in einem zunächst unüblichen Maß erfolgt. Das Maß 1/1.7 Zoll kennzeichnet dabei die Länge der Diagonale einer Bildaufnahmeöhre, eine Entwicklung aus den 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts. Da damals aber nur etwa zwei Drittel des Durchmessers der Bildaufnahmeöhre für die Bilderzeugung genutzt wurden [Helmerts 2010], folgt mit $1'' = 25.4\text{mm}$ für die Umrechnung der Sensordiagonalen SD

$$SD = \frac{2}{3} \cdot \frac{25.4}{1.7}\text{mm} = 9.96\text{mm}.$$

Bei einem Sensorformat der *Ricoh GR Digital III* von $4a:3a$ ergibt sich a über den Satz des Pythagoras mit

$$(4a)^2 + (3a)^2 = 9.96\text{mm}^2$$

zu

$$a = \sqrt{\frac{9.96^2}{25}}\text{mm} = 1.99\text{mm}.$$

Damit berechnet sich die ungefähre Sensorbreite mit $4 \times a$ zu 7.96 Millimeter und die Sensorhöhe mit $3 \times a$ zu 5.98 Millimeter. Die genauen Maße eines Sensors, der mit einer Angabe von 1/1.7 Zoll beschrieben wird, kann z.B. auf www.dpreview.com [Bockeaert 2010] nachvollzogen werden, einer bekannten britischen Internetplattform für Digitalkameras.

Die Bezeichnung Vollformatsensor für die *Canon EOS 5D Mark II* kennzeichnet Bildsensoren mit dem Seitenverhältnis 3:2, deren Bildformat dem des Kleinbildfilms, also 36×24 Millimeter, entspricht. Im Gegensatz dazu verfügt die Kamera des Herstellers *Ricoh* über einen wesentlich kleineren Sensor. Die folgende Abbildung gibt das Größenverhältnis der Sensoren beider Kameras wieder. Die Sensorgröße spielt insbesondere bei der Lichtausbeute eine wesentliche

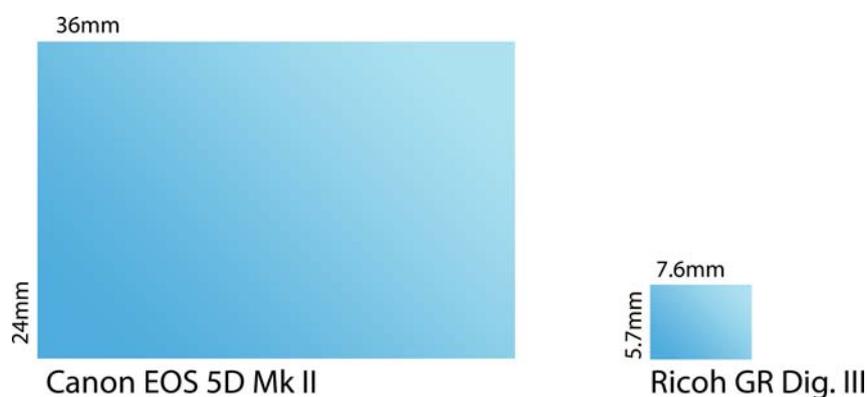


Abb. 3.5: Größenverhältnis der Sensoren

Rolle. „Immer mehr Hersteller gehen dazu über, Vollformatsensoren [...] zu verbauen“ [Freeman 2008: S. 150]. Die Größe des Sensors wirkt sich direkt auf die Größe der einzelnen Fotozellen eines Sensors aus. Größere Fotozellen können mehr Lichtphotonen einfangen. Die höhere Lichtempfindlichkeit des Vollformatsensors führt gegenüber kleineren Sensoren zu rauschärmeren Bildern bei nicht optimalen Lichtbedingungen. Große Rauscheffekte in den Bildern können nachteilig sein für die automatisierte Verknüpfungspunktsuche im Überlappungsbereich verschiedener Bilder. Die Lichtempfindlichkeit eines Sensors kann mit dem ISO-Wert einer digitalen Kamera beeinflusst werden. Dabei hat eine Erhöhung des ISO-Werts um eine Stufe, z.B. von ISO 400 auf ISO 800, den gleichen Effekt, wie die Verdopplung der Verschlusszeit oder der Wechsel auf die nächst größere Blende [Vertical 2010]. Die optimalen Einstellungen für die Bildbelichtung werden im Abschnitt 3.4.2 genannt, da diese maßgeblich von der Sonneneinstrahlung bzw. Belichtungssituation vor Ort abhängig sind.

Den unterschiedlichen Sensorgrößen und resultierenden möglichen Bildrauscheffekten stehen die unterschiedlichen Sensortypen zunächst entgegen. Während in der *Ricoh GR Digital III* ein CCD²⁰-Sensor verbaut ist, verfügt die *Canon EOS 5D Mark II* über einen CMOS²¹-Sensor. CMOS-Sensoren unterscheiden sich im Aufbau wesentlich von CCD-Sensoren. An dieser Stelle sollen die Vor- und Nachteile der verschiedenen Sensoren für den Benutzer im Vordergrund stehen.

Ein Vorteil von CMOS-Sensoren gegenüber CCD-Sensoren ist der, dass eine Signalverstär-

²⁰Charge-Coupled Device

²¹Complementary Metal Oxide Semiconductor

kung schon auf dem Sensor selbst erfolgen kann, da jedes einzelne Sensorelement einen eigenen Verstärker besitzt, während CCD-Sensoren zusätzliche Verstärkerelemente benötigen [Schwabe 2010: S. 19]. Laut des Herstellers *Canon*, beschleunigt dieses besondere Design „die Datenverarbeitung und das Auslesen des Sensors deutlich, was der möglichen Bildfolge zugute kommt. Der frühere Nachteil, dass durch die Einzelverstärkung CMOS-Sensoren generell etwas stärker rauschen als CCD-Sensoren, gilt inzwischen als überholt“ [Schwabe 2010: S. 19].

Ein weiterer Nachteil vieler CCD-Sensoren ist der Blooming-Effekt. Dieser ist auf eine Überbelichtung der Sensorelemente zurückzuführen. Diese können nur eine begrenzte Ladungsmenge aufnehmen. Wird ein Bildelement zu stark belichtet, gelangen überschüssige Ladungen zu angrenzenden Nachbarzellen und verursachen im Bereich des überbelichteten Pixels ein fehlerhaftes Bild [Göhring 2002: S. 23]. Litwiller relativiert diesen Nachteil in seinem Artikel in der *Photonics Spectra* [Litwiller 2001: S. 156] und unterscheidet zwischen Kameras für Privatanwender und der Wissenschaft. Höherwertige-CCD-Sensoren verfügen demnach über sogenannte Drains²², über die die überschüssige Ladung abgeleitet werden kann. Es bleibt zu prüfen, ob sich dieser Effekt bei der Kompaktkamera des Herstellers *Ricoh* einstellen wird.

Zum Nachteil von CMOS-Sensoren gehören die Uneinheitlichkeit von gleichfarbigen Bereichen²³. Da jeder Bildpunkt die Umwandlung der gesammelten Ladungen selbst vollzieht und einzelne Bauelemente nicht gänzlich identisch arbeiten, kann es zu herstellungsbedingten Schwankungen des Ladungs-pro-Spannungsverhältnisses kommen [Göhring 2002: S. 33]. Die Uniformität eines Bildes nimmt dadurch ab. Dave Litwiller schränkt auch hier frühere Nachteile von CMOS-Sensoren ein und begründet dies mit neuen Umwandlungsverfahren für die AD-Wandlung bei CMOS-Sensoren.

Für die Planung einer photogrammetrischen Aufnahme sind die Auflösung des Sensors und die verwendete Brennweite von großer Bedeutung. Sie bestimmen im Wesentlichen den Abstand zwischen der Aufnahmeposition und dem aufzunehmenden Objekt. Mit zunehmendem Abstand eines Objektes zum Projektionszentrum der Kamera nimmt die Bildauflösung ab. Der Begriff Bildauflösung kennzeichnet an dieser Stelle das Verhältnis zwischen der realen Größe eines Objektes und seiner Ausdehnung im Bild. Im weiteren Verlauf wird daher auch von der Objektauflösung im Bild gesprochen, die in Zentimeter pro Pixel angegeben wird. Die Tabelle 3.2 kennzeichnet diese Überlegungen für die verwendeten Kameras. Die Objektauflösungen berechnen sich aus dem Verhältnis

$$\frac{\text{Brennweite}}{\text{Pixelgröße}} = \frac{\text{Aufnahmeentfernung}}{\text{Objektauflösung}}$$

²²engl.: Abflüsse

²³Uniformität = Einheitlichkeit von gleichfarbigen Bereichen

Abstand zum Objekt [m]	Objektauflösung [cm/Px]	
	Canon EOS 5D Mark II	Ricoh GR Digital III
5	0.1	0.2
10	0.2	0.3
15	0.3	0.5
20	0.4	0.7
25	0.5	0.9
30	0.5	1.0
40	0.7	1.4
50	0.9	1.7
60	1.1	2.1

Tab. 3.2: Bildauflösungen in Abhängigkeit vom Objektabstand

Gute Kameras zeichnen sich nicht nur durch eine hohe Auflösung des CCD- oder CMOS-Sensors aus, vielmehr ist das Objektiv einer Kamera für die Qualität der Bilder entscheidend. Schlechte Objektive führen, abgesehen von Randunschärfen im Bild und anderen Effekten, die im Bild als störend empfunden werden, zu sehr hohen Verzeichnungen und damit zu geometrischen Abbildungsfehlern eines Objektes im Bild. Für photogrammetrische Aufnahmen sind solche Objektive daher nicht geeignet. Es empfiehlt sich, bei der photogrammetrischen Aufnahme mit Festbrennweiten zu arbeiten. Diese führen in der Regel zu einer besseren Abbildungsqualität, denn fast alle Zoomobjektive weisen sichtbare Verzeichnungen auf [Schüngel 1999].

Wie der Tabelle 3.1 zu entnehmen ist, wurde zu der Kamera des Herstellers *Canon* ein 35mm-Weitwinkelobjektiv benutzt. Dieser Tatsache liegt eine Überlegung zu Grunde, die im Zusammenhang mit einer möglichen Nutzung am UAV steht – das Gewicht. Kleinere Wechselobjektive, Objektive kürzerer Brennweite, sind leichter als Objektive mit einer längeren Brennweite. Die Kamera hat mit Objektiv und Batterie ein Gesamtgewicht von etwa 1200g [CamCat 2010a, b].

Weiterhin ist die verwendete Brennweite ausschlaggebend für den darstellbaren Bildausschnitt. Wie der Tabelle 3.2 entnommen werden kann, ist die Vorgabe 0.5 Zentimeter des Objektes pro Pixel aufzulösen, für die Spiegelreflexkamera bei ca. 25 Meter erfüllt. Aus dieser Forderung lässt sich eine im Bild erfassbare Objektausdehnung in Abhängigkeit vom Objektabstand nach den Verhältnissen

$$\frac{\text{Brennweite}}{\text{Sensorbreite}} = \frac{\text{Aufnahmeentfernung}}{\text{Objektbreite}}$$

für die Ausdehnung des Objektes in der Breite und

$$\frac{\text{Brennweite}}{\text{Sensorhöhe}} = \frac{\text{Aufnahmeentfernung}}{\text{Objekthöhe}}$$

in der Höhe bestimmen (vgl. Tabelle 3.3). Somit steigt bei Verwendung des Weitwinkelobjektives auch die Flexibilität bei der Aufnahme des Objektes, da davon ausgegangen werden konnte, dass das aufzunehmende Gebäude mit jedem gemachten Bild der *Canon EOS 5D Mark II* vollständig erfasst würde (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Für gleiche Auflösungsbereiche am Objekt muss für die Kamera des Herstellers *Ricoh* ein

Abstand zum Objekt [m]	Canon EOS 5D Mark II		Ricoh GR Digital III	
	Breite [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Höhe [m]
5	5.1	3.4	6.3	4.8
10	10.3	6.9	12.7	9.5
15	15.4	10.3	19.0	14.3
20	20.6	13.7	25.3	19.0
25	25.7	17.1	31.7	23.8
30	30.9	20.6	38.0	28.5
40	41.1	27.4	50.7	38.0
50	51.4	34.3	63.3	47.5

Tab. 3.3: Erfassbare Objektgrößen in Abhängigkeit von der Aufnahmeentfernung

wesentlich kürzerer Objektabstand von ca. 15 Meter (vgl. Tabelle 3.2) gewählt werden. Damit verringert sich der Bildausschnitt um etwa 7×3 Meter (vgl. Tabelle 3.3). Mit einem Gewicht von nur etwa 200 Gramm und damit nur ein Sechstel des Gewichts der Spiegelreflexkamera, ist sie im Hinblick auf ein verwendbares UAV sehr flexibel einsetzbar (vgl. Abschnitt 3.1.4).

Um die innere Stabilität der Kamera im Bezug auf die Elemente der inneren Orientierung zu erhöhen, wurde das Wechselobjektiv der Spiegelreflexkamera zusätzlich zum Objektivbajonett-Anschluss mit Gewebeband fixiert. Die Kompaktkamera verfügt zwar über ein Festbrennweitenobjektiv, dieses fährt jedoch beim Einschalten der Kamera, ähnlich wie ein Zoomobjektiv, heraus und konnte daher nicht entsprechend zusätzlich fixiert werden. Für die photogrammetrische Anwendung ergibt sich daraus der entscheidende Nachteil, dass sich insbesondere die Kammerkonstante bei jeder Anwendung ändern kann (vgl. Abschnitt 4.2), aber auch eine Änderung des Bildhauptpunktes ist aus diesem Grund denkbar. Gelangt beim Einfahren des Objektivs Staub oder andere Verschmutzungen in die Mechanik des Objektivs, kann sich die optische Achse der Kamera ändern. Eine augenscheinliche Bewegung der Objektivteile durch zu großer Bewegungsfreiheit zwischen den Bauteilen des Objektivs, konnte zunächst nicht festgestellt werden.

Die Wahl der Blende fiel für die *Canon EOS 5D Mark II* auf 5.6 und für die *Ricoh GR Digital III* auf 4.0. Diese Größe kann nach einer Kalibrierung nicht geändert werden, da unterschiedliche Einstellungen für die Blende zu einer veränderten Lichtbrechung am Objektiv führen.

Mit der Blende werden die Stärke der Belichtung und die Schärfentiefe geregelt, sowie das Auflösungsvermögen beeinflusst. Je größer die Blendenzahl ist, desto kleiner ist die Blendenöffnung und umgekehrt. Die Schärfentiefe, der Bereich vor und hinter der eingestellten Schärfeebene, der im Bild noch als scharf erscheint, nimmt mit dem Schließen der Blende zu. Dann treten allerdings Effekte der Beugungsunschärfe auf, die bei der Beugung der Lichtstrahlen am Rand einer Blende entsteht und den möglichen Gewinn an Schärfentiefe wieder kompensiert [Kindermann 2008: S. 70]. Wird die Blende geöffnet, nimmt das Auflösungsvermögen zu, gleichzeitig jedoch auch mögliche Aberrationsunschärfen – Abbildungsfehler, die auf ungleicher Brechung des Lichtes unterschiedlicher Wellenlänge an den Linsen eines Objektivs zurückzuführen sind.

Da bei ersten Untersuchungen der *Ricoh GR Digital III* schon ab einer Blendenzahl >4 Beugungsunschärfen festzustellen waren, fiel für diese Kamera die Wahl der Blende auf 4. Bei der *Canon EOS 5D Mark II* erhöhte sich die optische Leistung mit dem Schließen der Blende nicht sichtbar. Aus diesem Grund und um mit möglichst kurzen Belichtungszeiten arbeiten zu können, die bei Aufnahmen aus der Bewegung unabdinglich sind, um scharfe Aufnahmen zu erreichen, wurde sich für die Spiegelreflexkamera ebenfalls für eine etwas weiter geöffnete Blende entschieden. Für beide Kameras konnte mit diesen Einstellungen eine Schärfentiefe im Bereich der berechneten Aufnahmeabstände bis unendlich realisiert werden.

Es gibt jedoch noch weitere Kameraeigenschaften, die für den photogrammetrischen Einsatz der Amateurkameras beachtet werden mussten. So wurde der Autofokus für beide Kameras deaktiviert. Durch Umfokussierung bei jeder Aufnahme würde dieser zu einer stetigen Änderung der Kammerkonstante führen.

In der *Canon EOS 5D Mark II* ist zudem ein Sensorreinigungssystem integriert. Bei der piezogesteuerten Reinigung werden über hochfrequente Vibrationen etwaige Staubrückstände auf dem Sensor entfernt [Canon 2010b]. Dies kann sich jedoch auch auf die Lage des Sensors im Kameragehäuse und damit auf die Bildhauptpunktlage auswirken. Daher wurde die Sensorreinigung für die photogrammetrische Anwendung deaktiviert.

3.1.4 Kameraträger

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Kameraträger beschrieben. Darunter sind die eingesetzten Fluggeräte zu verstehen, mit deren Hilfe die verschiedenen Aufnahmen aus der Luft möglich waren. Für die Befliegung des Towers des Finowsee Flughafens standen der Helikopter *Bell 47* des Betreibers *Air Tempelhof* und der *Falcon 8* der Firma *Ascending Technologies* zur Verfügung.

AscTec Falcon 8 Der *AscTec Falcon 8* ist ein Fluggerät, das speziell für die Anforderungen von professionellen Luftbild- bzw. Filmaufnahmen entwickelt wurde. Durch seine acht Rotoren verspricht der Hersteller, die *Ascending Technologies GmbH*, selbst bei Windgeschwindigkeiten von bis zu zehn Meter pro Sekunde eine hohe Flugstabilität. Aufgrund der acht kleinen Rotoren, anstelle von wenigen großen Rotoren, wie sie beispielsweise beim Quadrocopter²⁴ *md4-1000* der *microdrones GmbH* [microdrones 2009] verbaut sind, lässt sich das Gerät auch beim Ausfall einer Rotor/Motor-Kombination noch fliegen und landen [AscTec 2010c: S. 2]. Diese hohe Redundanz des Octocopters²⁵ wird insbesondere dann wichtig, wenn man die Anschaffungskosten von etwa 20000 Euro berücksichtigt.



Abb. 3.6: *AscTec Falcon 8* (Quelle: AscTec [2009: S. 1])

Ein neuartiges, zum Patent angemeldetes Konzept – die V-Form mit spezieller Kamerahalterung – ermöglicht das Durchschwenken der Kamera von vertikal nach oben bis vertikal nach unten, ohne dass störende Objekte, wie Rahmenteile oder Propeller, im späteren Bild zu sehen sind. Hierbei ist zu beachten, dass die Kamera vor der Landung wieder in eine horizontale Position gebracht werden muss, um diese nicht zu beschädigen.

Als Steuerungseinheit kommt der *AscTec AutoPilot* zum Einsatz. Der *AscTec AutoPilot* verarbeitet dabei die Daten von drei Gyroskopen, drei Beschleunigungssensoren, drei Magnetfeldsensoren, Luftdruck- und Temperaturmesser sowie einem GPS-Empfänger. Dadurch hält der *AscTec Falcon 8* ohne Steuereingriffe autonom seine Orientierung, Position und Höhe bei. Nach Angaben des Herstellers²⁶ beträgt die Genauigkeit des GPS-Systems ± 2.5 bis 3 Meter. Die Winkelfehler der Sensoren betragen etwa 3 Grad. Die direkte Übertragung der Navigationsdaten des UAV auf die Kamera erfordert zudem ein hohes Maß an Genauigkeit bei der Fertigung sowie beim Befestigen der Kamera am *AscTec Falcon 8*, die nicht gewährleistet werden kann.

²⁴UAV mit vier Rotoren

²⁵UAV mit acht Rotoren, UAVs mit mehreren Rotoren werden auch Multicopter genannt

²⁶Informationen aus Telefonat mit Dipl.-Ing. Jan Stumpf, Ascending Technologies, 31. August 2010

Für die Auswertungen von Aufnahmen im Nahbereich sind diese niedrigen Genauigkeiten der Sensoren hinderlich. Vielmehr werden die Daten unbrauchbar für eine weitere photogrammetrische Bearbeitung.

Die Steuerung selbst erfolgt entweder über die vor Fremdzugriff geschützte Fernsteuerung oder autonom mit Hilfe einer Wegpunktplanungssoftware [AscTec 2010a]. Diese wird im weiteren Verlauf bei der Flugplanung für den Einsatz des *AscTec Falcon 8* im Abschnitt 3.2.2 besprochen. Durch die Fernsteuerung wird ein Einsatz im abgeschatteten GNSS-Signalebereich, z.B. unter Brücken oder im Indoorbereich, möglich.

Die maximale Flugdauer des *AscTec Falcon 8* beträgt laut Hersteller-Angaben bis zu 20 Minuten. Unter Ausnutzung der maximalen Zuladung von 500 Gramm oder bei Wind, verkürzt sich diese um fünf Minuten. Daraus folgt, dass ein Bildflug gegebenenfalls unterbrochen werden muss. Es wird zudem ersichtlich, dass am *AscTec Falcon 8* nur die zur Verfügung stehende *Ricoh GR Digital III* mit einem Gewicht von rund 200 Gramm [CamCat 2010c] eingesetzt werden kann und ein Flug mit einer *Canon EOS 5D Mark II* ausgeschlossen ist. Mit einem Gewicht dieser Kamera von etwa 1200 Gramm könnte dieses Vorhaben mit dem *AscTec Falcon 12* realisiert werden. Dieser besitzt ebenfalls acht Rotoren. Die Zahl in der Modellreihe *AscTec Falcon* beschreibt die Länge der Rotoren von 8 bzw. 12 Zoll. Der *AscTec Falcon 12* ist mit einer maximalen Nutzlast von 1500 Gramm [Brandl 2009] in der Lage, die *Canon EOS 5D Mark II* unter Verwendung eines 35mm-Objektives zu transportieren (vgl. Abschnitt 3.1.3). Hier stellt sich jedoch schnell die Frage nach der Flugstabilität dieses UAV, da die Payload damit nah am Maximum läge. Doch zunächst bleibt die Eignung der verwendeten Sensoren für die UAV-Photogrammetrie zu prüfen.

Helikopter - Bell 47 Gemäß dem Helikopterbetreiber [Dudzus 2010] ist der eingesetzte Helikopter *Bell 47* der preiswerteste zu charternde Hubschrauber im Raum Berlin und den neuen Bundesländern. Dabei kostet die Flugstunde ca. 200 Euro. Der Mehrzweckhubschrauber bietet Platz für zwei Passagiere und dem Piloten. In dem Modell der *Air Tempelhof Fluggesellschaft mbH & Co. KG* können die Türen recht zügig demontiert werden, sodass das Fotografieren aus dem Cockpit heraus möglich wird.

Mit einer maximalen Länge von 11.30 Meter bei drehendem Rotor [Bredow 2010] wird schnell klar, dass der Helikopter im photogrammetrischen Nahbereich wesentlich unflexibler agieren kann, als ein Mini-UAV. Eine Umfliegung von Gebäuden in urbanen Gebieten stellt damit eher die Ausnahme dar.

Obwohl der Vorteil nahe liegt sei erwähnt, dass eine maximale Nutzlast von 500 Kilogramm im Rahmen der aktuellen Kamera- bzw. Messkameraentwicklung liegt. Es können demnach weitaus schwerere Kameras als die *Canon EOS 5D Mark II* verwendet werden.



Abb. 3.7: Helikopter *Bell 47* (Quelle: Bredow [2010])

3.2 Flugplanung

Wie bei jeder photogrammetrischen Auswertung ist im Voraus zu klären, zu welchem Zweck die Bilddaten orientiert werden und welche Produkte daraus abgeleitet werden sollen. Mit Hilfe der Photogrammetrie ist man in der Lage, für verschiedene Elemente eines Gebäudes 3D-Punkte zu generieren, solange diese in mindestens zwei Bildern sichtbar sind bzw. die Bilder sich entsprechend überlappen. Einzelne markante Punkte können hierbei genutzt werden, um verschiedene Gebäudedetails, wie Fenster, Vorsprünge oder den Grundriss eines Gebäudes, zu modellieren. Bei dieser Vorgehensweise fehlen jedoch sämtliche Tiefeninformationen zu Gebäudeteilen, die nicht modelliert werden. Im Hinblick auf die Architektur eines Gebäudes, z.B. aus Denkmalschutzgründen, kommt es aber durchaus auf feine Strukturen an. Eine detaillierte Modellierung dieser Gebäudeelemente aus den reinen Bilddaten wäre jedoch sehr zeitaufwendig. Mit Hilfe von Laserscan-Verfahren könnte man diesem Nachteil gerecht werden. Doch insbesondere bei hochgelegenen und daher schwer zu erreichenden Punkten, wie bei der Inspektion einer Windkraftanlage oder dem Dach eines Kirchturms, bietet die UAV-Photogrammetrie eine flexiblere Einsatzmöglichkeit als Scan-Verfahren. Die Fachabteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* strebt daher die 3D-Punktwolkengenerierung mit Hilfe der UAV-Photogrammetrie an. Die Befliegung des Towers in Finow liefert für diese Aufgabe erste Testdaten. Um möglichst dichte Punktwolken aus orientierten Bildverbänden zu generieren und abgeschattete Bereiche zu vermeiden, sollte der Überlappungsbereich für die Befliegung des Towers deshalb bei etwa 90 Prozent in Flugrichtung und 70 Prozent quer dazu liegen. Möglichst hohe Bildfolgen wurden zudem wegen fehlender Orientierungsdaten angestrebt.

Bei der Flugplanung für beide Plattformen war die absolute Lage im Landeskoordinatensystem ETRS89 und relative Höhen des Gebäudes sowie umliegender erhöhter Objekte, wie beispielsweise Bäume, unabdinglich, um vor allem Kollisionen des *AscTec Falcon 8* mit dem Tower zu vermeiden. Es wurden zunächst sieben Punkte mit dem *GPS-System 1200* der Firma *Leica* mit

einer Genauigkeit von ± 1 bis 2 Zentimeter in der Lage und ca. ± 5 bis 6 Zentimeter in der Höhe vermarktet. Diese sollten zum einen als Anschluss für die Gebäudeaufnahme dienen, sowie die Möglichkeit geben, das spätere Vermessungsnetz ins Landeskoordinatensystem transformieren zu können.

Anschließend wurden markante Punkte des Towers, wie Gebäudeecken und Dachüberstände sowie Baumkronen, in Lage und Höhe von zwei freien Standpunkten S1 und S2 unter Berücksichtigung der vermarkten Punkte mit einem Tachymeter der *Leica 1200er Serie* aufgenommen. Die Abbildung 3.8 zeigt die CAD-Zeichnung, die aus den Daten der tachymetrischen Aufnahme sowie den GPS-Messungen erstellt wurde. Die Punkte S1 und S2 kennzeichnen dabei die Tachymeterstandpunkte. Die relative Höhe des Gebäudes lag bei ca. 10 Meter und die Höhe der Bäume bei 15 bis 17 Meter.

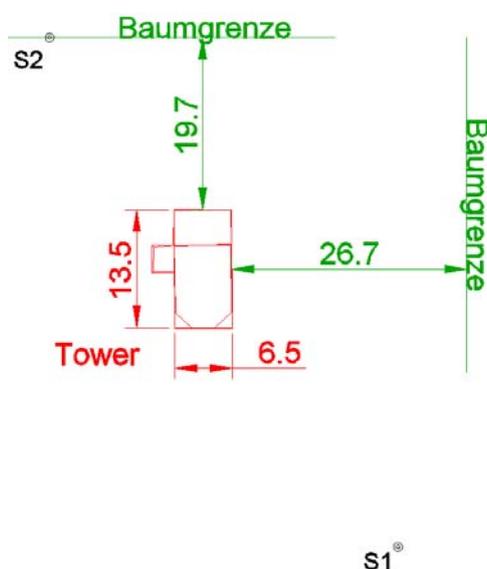


Abb. 3.8: CAD-Zeichnung des Finower Towers und angrenzenden Bäumen

Die Transformationen der Standpunktbeobachtungen erfolgten über zwei räumliche Helmerttransformationen²⁷ mit dem Programm MathCad 14.0 nach

$$x_{\text{Zielsystem}} = \Delta x_{Q/Z} + q \cdot R \cdot x_{\text{Quellsystem}},$$

wobei q den Maßstabsfaktor, $\Delta x_{Q/Z}$ den Verschiebungsvektor und R die Drehmatrix zwischen Quell- und Zielsystem kennzeichnen (Bursa-Wolf-Modell [Hehl 2006: S. 118 ff.]). Es wurde zunächst der Standpunkt S2 über die sieben vermarkten Passpunkte 1001-1007 in den lokalen Standpunkt S1 und anschließend das System S1 ebenfalls über die sieben Passpunkte in das übergeordnete Landessystem transformiert. Hohe Genauigkeiten der Koordinaten waren nicht

²⁷auch räumliche Ähnlichkeitstransformation oder 7-Parameter-Transformation

erforderlich, da es vordergründig darum ging, den Tower auf Zentimetergenauigkeit zu verorten. Daher wurden keine Standardabweichungen für mehrfach gemessene Punkte bestimmt. Eine Kontrolle des Verfahrens erfolgte über die Prüfung der Rechtwinkligkeit des Gebäudes sowie Streckenvergleiche zwischen den Standpunkten zu verschiedenen Gebäudepunkten im CAD-Programm und den gemessenen tachymetrischen Strecken.



Abb. 3.9: Situation vor Ort

3.2.1 Flugplanung für die Helikopterbefliegung

Der Pilot des Helikopters versicherte, dass eine klassische Flugplanung mit genauen Anflugpunkten bzw. Flugstreifen bei der Steuerung des Helikopters wenig nütze, da für diese Anforderungen zum einen das Target viel zu klein sei und zum anderen die Windverhältnisse am Aufnahmetag durchaus kurzfristige Umplanungen nach sich ziehen könnten. Die Navigation sollte demnach on-the-job erfolgen, wenn klar wäre, wie sich der Helikopter *Bell 47* am Flugtag in der Luft verhielte. Weiterhin sicherte der Pilot zu, dass ein Heranfliegen an die Baumkronen in der Höhe auf drei Meter möglich sei. Ein Flug zwischen Tower und Bäume hindurch wurde aufgrund des zu geringen Abstandes (vgl. Abbildungen 3.8 und 3.9) von ca. 20 Meter als zu gefährlich eingestuft und verworfen.

Zwar verzichtete der Helikopterpilot nach einer ersten Absprache auf eine klassische Flugplanung, dennoch entschied man sich dazu, diese zumindest im Ansatz zu skizzieren. Dabei standen keine genauen Koordinaten im Vordergrund, sondern vielmehr topographische Aspekte, an die man sich während des Fluges orientieren sollte. Aus den Überlegungen zur verwendeten Kamera (vgl. Abschnitt 3.1.3) sollte ein minimaler Abstand des Hubschraubers bzw. der Kamera von 25 Meter eingehalten werden. Dieser Abstand entsprach beispielsweise der Entfernung der Bäume für die Ostseite des Towers. Weiterhin wurde sich dazu entschlossen, mit der vollständigen Planung etwa 3m über dem Horizont der Baumkronen zu bleiben, was einer ungefähren Flughöhe von 20m über Grund entspricht.

Aus den Anforderungen zur Bildüberlappung ergaben sich für den Überflug in einer Entfernung von 25 Meter über der Dachfläche eine Konfiguration, wie sie in Abbildung 3.10 zu sehen ist. Der Abstand der Projektionszentren in Flugrichtung S_L berechnet sich mit der Tabelle 3.3 nach

$$S_L = \frac{17.1m \cdot (100 - 93)\%}{100\%}$$

zu

$$S_L \approx 1.2m$$

und in Querrichtung S_Q mit

$$S_Q = \frac{25.7m \cdot (100 - 70)\%}{100\%}$$

zu

$$S_Q \approx 7.7m.$$

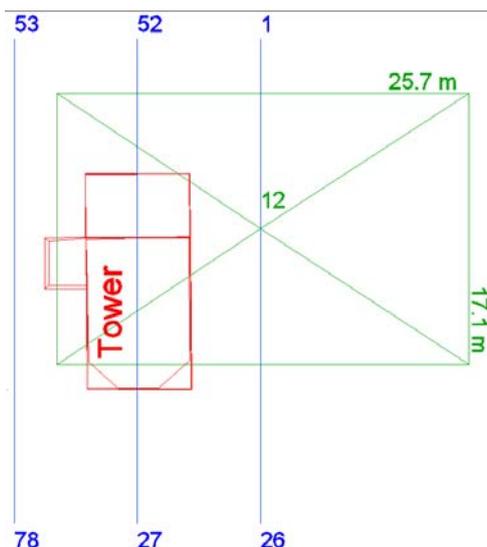


Abb. 3.10: Flugplanung des Helikopterüberfluges

Die maximale Aufnahmefrequenz der *Canon EOS 5D Mark II* beträgt ein Bild pro Sekunde. Daraus ergibt sich eine Helikoptergeschwindigkeit von 1.2 Meter pro Sekunde, also rund 4.5 Kilometer pro Stunde.

Der Tower sollte, wie in Abbildung 3.11 zu sehen ist, zudem in drei unterschiedlichen Höhen umflogen werden. Um die Aufnahme der Bilder zu erleichtern, sah die Planung vor, dass für die Umrundung des Towers verschiedene Linien in der Bildmitte fixiert werden sollten. Für die Umfliegung in 20 Meter Höhe über Grund war diese Linie etwa die halbe Höhe des Towers und für die restlichen zwei Umfliegungen die Dachkante.

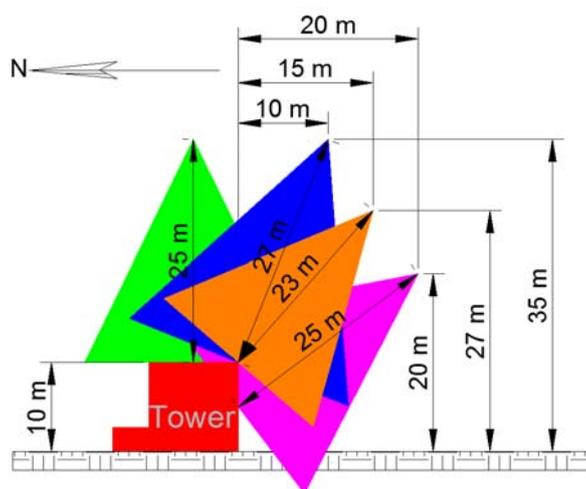


Abb. 3.11: Flugplanung Umflüge mit *Bell 47*

Es musste darauf geachtet werden, dass die Kamera im Gegensatz zum Überflug eine entgegengesetzte Kantung in Flugrichtung und entsprechend quer dazu aufwies (vgl. Abbildung 3.12). Dadurch vergrößert sich der Abstand der Projektionszentren in Flugrichtung auf 1.8 Meter.

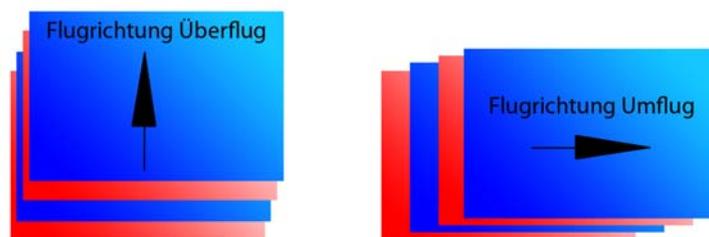


Abb. 3.12: Kameraausrichtung in verschiedenen Flugrichtungen

Weiterhin gestaltet sich eine geplante Überlappung der Aufnahmen in Querrichtung für Schrägaufnahmen nicht so leicht. Wie die Abbildung 3.11 jedoch zeigt, sollte sich diese in einem hohen Maße einstellen.

Zusammen mit terrestrischen Aufnahmen in etwa zwei Metern Höhe und 25 Metern Abstand zum Tower stellten sich in den beschriebenen Konfigurationen Höhenwinkeldifferenzen von Umflug zu Umflug zwischen 10 bis 20 Gon ein. Für den Übergang vom höchsten Umflug zum Überflug ergab sich ebenfalls ein Winkel in dieser Größenordnung um 22 Gon. Größer war diese Winkeldifferenz zwischen den terrestrischen zu den Helikopteraufnahmen. Dieser betrug ca. 40 Gon und konnte aufgrund einer sicherheitsbedingten Aufnahmehöhe von mindestens 20 Meter nicht unterschritten werden.

3.2.2 Flugplanung für die UAV-Befliegung

Die Flugplanung für das UAV gestaltete sich aufgrund der Softwareunterstützung zur Wegpunktplanung wesentlich genauer. Mit den Informationen aus Tabelle 3.2 war der Abstand zum Objekt mit etwa 15 Meter vorgegeben um eine nahezu gleiche Auflösungsstufe von ca. 0.5 Zentimeter am Objekt zu erreichen. In der Planungssoftware zum *AscTec Falcon 8*, der *AscTec AutoPilot Control* in der Version 1.50, gab es zwei unterschiedliche Methoden Wegpunkte zu generieren. Es konnten 2D-Koordinaten angegeben werden oder Punkte direkt von einem georeferenzierten Bild digitalisiert werden. Da die manuelle Eingabe der Wegpunkte nicht über das Einladen einer Koordinatenliste im Programm erfolgen konnte und zudem in der Angabe von ellipsoidischen Koordinaten, hätte zunächst eine Transformation geplanter Wegpunkte in geozentrische ellipsoidische Koordinaten gerechnet und anschließend in einem aufwendigen Drag-and-Drop-Verfahren²⁸ dem Programm zugeführt werden müssen. Um dem Aufwand zu entgehen, entschloss man sich zunächst, die Planung vollständig in *AutoCAD 2010* durchzuführen und eine entstehende CAD-Zeichnung im Programm *AscTec AutoPilot Control* später abdigitalisieren.

Anders als bei der Flugplanung für den Helikopter wurden insgesamt sechs Umflüge in unterschiedlichen Höhen in *AutoCAD 2010* beplant (vgl. Abbildung 3.13). Man versprach sich von

²⁸Ausschneiden und Kopieren

dieser Vorgehensweise eine höhere Flexibilität vor Ort, da sich eine Änderung der Flugplanung am Flugtag schwierig gestaltet hätte. Jedem Punkt ist im Programm *AscTec AutoPilot Control* eine Höhe zugewiesen. Hätte man das Höhenlevel der einzelnen Umflüge im Nachhinein ändern wollen, wären sämtliche Wegpunkte manuell mit Hilfe der Software nachzueditieren gewesen, da das Ausgabeformat der Waypoints binär abgespeichert wird. Damit bliebe bei Komplikationen vor Ort lediglich die Änderung des Vertikalwinkels der Kamera eine sinnvolle Lösung.

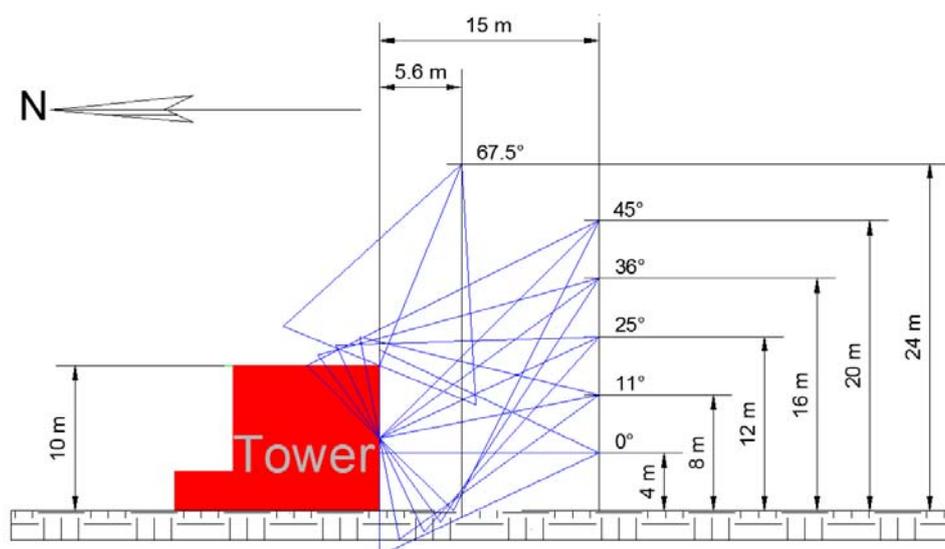


Abb. 3.13: Flugplanung Umflüge mit *AscTec Falcon 8*

Die Koordinaten der Wegpunkte für die Gebäudeumflüge wurden mit *AutoCAD* konstruiert. Um mit dem UAV eine 93/70-Überlappung zu gewährleisten wurden die Abstände der Projektionszentren in Flugrichtung mit 1.3 Meter berechnet und quer dazu mit 4.3 Meter. Die erstellte 2D-Grafik wurde sodann in die Wegpunktplanungssoftware von *Ascending Technologies* eingeladen. Zur Georeferenzierung wurden die Koordinaten des Bildes an der oberen linken sowie unteren rechten Ecke angegeben, die zuvor in *AutoCAD* ermittelt und mit einem Punktsymbol versehen wurden. Anschließend erfolgte die Digitalisierung der Wegpunkte aus der CAD-Vorlage in der Planungssoftware des UAVs (vgl. Abbildung 3.14).

Zusätzlich zur Position werden vier weitere Angaben zum Wegpunkt benötigt- das Heading²⁹, die Flughöhe über Grund, die maximal zu verweilende Zeit des *AscTec Falcon 8* am Wegpunkt sowie eine zu erreichende Positionsgenauigkeit des UAV (vgl. Abbildung 3.14), ab der die Kamera ausgelöst wird. Bei einer absoluten GPS-Genauigkeit von ± 3 Meter des *AscTec Falcon 8* sind Angaben unterhalb dieses Wertes nicht von großem Vorteil, da sie unter der Systemauflösung des GPS liegen würden.

Die Höhenangabe erfolgte relativ zum Gelände, da das UAV seine Flughöhe über eine

²⁹horizontale Ausrichtung des UAV

barometrische Höhenmessung bestimmt.

Da der *AscTec Falcon 8* in der Lage ist, seine horizontale Ausrichtung während des Fluges zu ändern, mussten hier für jeden Wegpunkt entsprechende Winkel angegeben werden, die zuvor in *AutoCAD* bestimmt wurden. Für einen Umflug ist diese Tatsache insofern wichtig, dass eine gleichmäßige Drehung während des Fluges um eine Gebäudeecke realisiert werden kann (vgl. Abbildung 3.14).

Weiter stimmt die Nordrichtung des magnetischen Sensors, der das Heading des UAV beeinflusst, bekanntermaßen nicht mit der Nordrichtung des UTM-Systems überein. Da die Nadelabweichung über die Deklination³⁰ und der Meridiankonvergenz³¹ bestimmbar ist, konnte diese bei der Flugplanung berücksichtigt werden, wenngleich bekannt war, dass die Auflösung des magnetischen Sensors in die gleiche Größenordnung fiel. Die Nadelabweichung betrug für einen Punkt in Finow am Aufnahmetag etwa 3.8 Grad.

Die Zeit, die der Octocopter an einem Wegpunkt verbringt ist ausschlaggebend für die Qualität der Aufnahmen. In der Hälfte dieser angegebenen Zeit schwingt sich das UAV am Wegpunkt ein³², um im verbleibendem Zeitraum die Aufnahme zu vollziehen. Bei sehr niedrigen Zeiten unter einer Sekunde würde die Kamera praktisch während des Fluges ausgelöst. Verschwommene Bilder könnten das Ergebnis sein. Um zusätzlich dem Octocopter während des Fluges um den Tower folgen und gegebenenfalls in Gefahrensituationen eingreifen zu können (vgl. Abschnitt 3.1.1, Sichtflugregeln), wurde die Zeit für sämtliche Wegpunkte auf drei Sekunden eingestellt.

Für den Überflug mit dem *AscTec Falcon 8* konnte ein weniger aufwendiges Verfahren gewählt werden- das Flight Matrix Setup der Wegpunktplanungssoftware (vgl. Abbildung 3.15). Unter Angabe eines Startpunktes, der Ausrichtung eines Rasters, der Anzahl von Wegpunkten in X- und Y-Richtung sowie deren Abstände erfolgte eine automatische Wegpunktgenerierung. Hierbei musste eine Drehungen der Kamera im Vergleich zum Umflug ebenfalls berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 3.12). Die Abstände der Projektionszentren der *Ricoh GR Digital III* berechneten sich damit zu einem Meter in Flugrichtung und 5.70 Meter quer dazu. Zusätzliche Informationen zu einem Wegpunkt wurden analog zu den Umflügen vorgenommen, wobei der Vorteil des Editors auch darin bestand, die Eingaben an dieser Stelle nur einmal tätigen zu müssen.

Die terrestrischen Aufnahmen wurden analog zu den Umflügen mit waagerechtem Blick in etwa zwei Metern Höhe zum Gebäude geplant.

³⁰berechnet mit Deklinationsrechner [McLean 2010]

³¹Näherungsweise mit $X = y'/R \cdot \tan \Phi$, Φ geografische Breite, y' Abstand zum Mittelmeridian, R mittl. Erdradius

³²Informationen aus Telefonat mit Dipl.-Ing. Jan Stumpf, Ascending Technologies, 31. August 2010

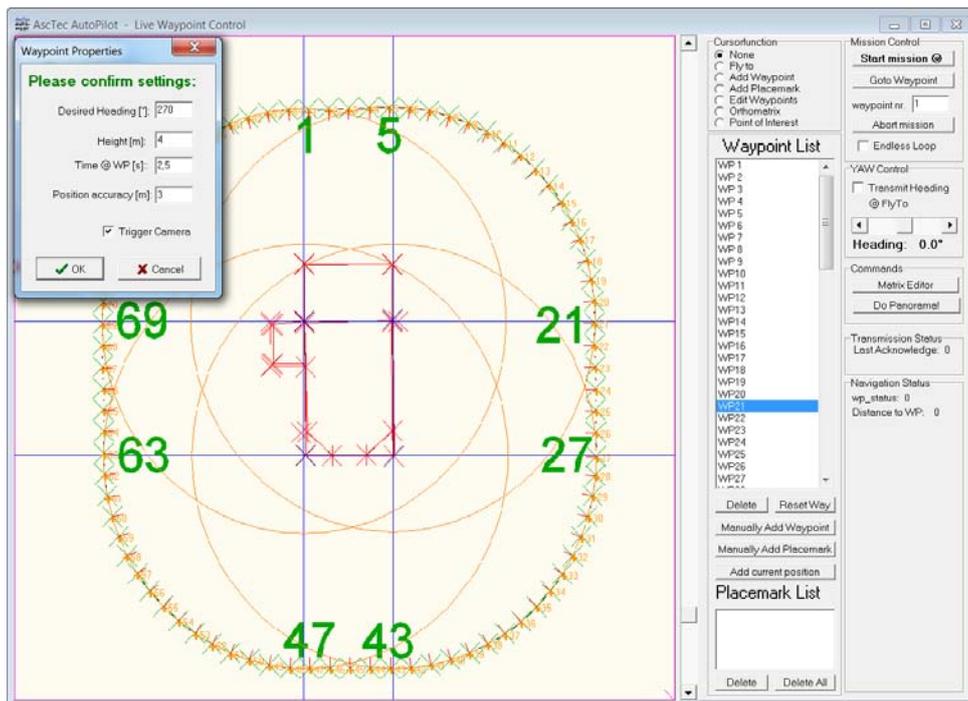


Abb. 3.14: Digitalisierung der Wegpunkte in der AscTec AutoPilot Control

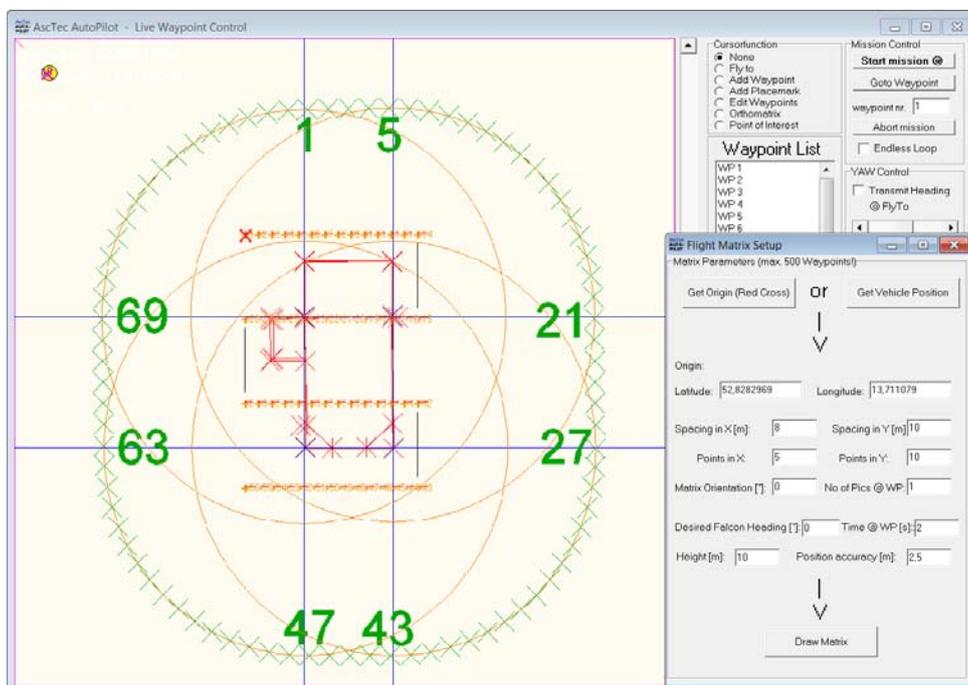


Abb. 3.15: Erstellen einer Flugmatrix mit AscTec AutoPilot Control

3.3 Kalibrierung der Kameras

Aus den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Gründen wurden beide Kameras durch die Fachabteilung *Informationsverarbeitung optischer Systeme* vor und nach der Befliegung am DOE kalibriert. Diese Vorgehensweise sollte dabei Aufschluss über die innere Stabilität beider verwendeter Amateurkameras über den Zeitraum der Aufnahme geben. Für die *Canon EOS 5D Mark II* erfolgte zusätzlich eine Testfeldkalibrierung vor der Befliegung, um die verschiedenen ermittelten Parameter der inneren Orientierung aus beiden Verfahren miteinander vergleichen zu können.

Zur Testfeldkalibrierung diente das Testfeld des *Fachbereiches III* der *Beuth Hochschule für Technik Berlin*, das wenige Tage nach den Aufnahmen langfristigen Umbaumaßnahmen weichen sollte. Aus diesem Grund wurden zur Sicherheit wesentlich mehr formatfüllende Aufnahmen in verschiedenen Kantungen der Kamera vom Testfeld gemacht, als die Mindestanforderung in Abschnitt 2.1.1 vorschreibt. Die Abbildung 3.16 kennzeichnet hierzu die örtliche Aufnahmegeometrie. Die maximalen Abstände der Kamerastandpunkte zum Testfeld betragen dabei etwa 35 Meter.

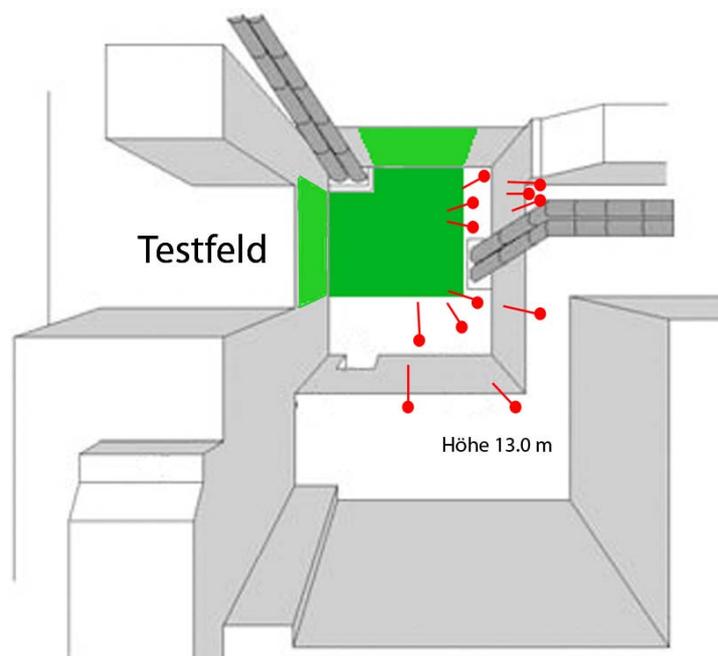


Abb. 3.16: örtliche Aufnahmegeometrie, (Quelle: nach Müller [2004: S. 17])

Die Festpunkte des räumlichen Testfeldes wurden durch codierte Punktmarken, die überwiegend an den Hauswänden befestigt waren, sowie stabilen Kugeln am Boden signalisiert. Die Kugeln lagen dabei auf im Boden verschraubte Stehbolzen, die eine genaue Zentrierung der Kugeln erlaubten. Zu den Passpunkten wurden weitere Marken ins Testfeld verbracht, die als zusätzliche Verknüpfungspunkte bei der späteren Bündelblockausgleichung dienen sollten.

3.4 Arbeiten vor Ort

Eine große Herausforderung bestand darin, dass beide Flüge am gleichen Tag stattfinden sollten, um sicherzustellen, dass die Aufnahmen mit beiden Kameras unter gleichen Bedingungen im Bezug auf die Wetterlage und dem lokalen Messungsrahmen erfolgen.

Die Durchführung der Flüge fand letztlich am 4. Juni 2010 statt. Das Wetter an diesem Tag war geprägt von zeitweisen stärkeren Winden bis hin zur Windstille. Nachteilig für die Bildaufnahme am 4. Juni war eine zu hohe Sonnenstrahlung, die zudem zeitweise von vereinzelt Quellwolken abrupt unterbrochen wurde. Für einen gleichmäßigen radiometrischen Übergang von Bild zu Bild, wäre eine leichte Hochbewölkung sicher von Vorteil gewesen.

3.4.1 Netzmessung

Zur Orientierung der Bilddaten sowie einer möglichen projektbegleitenden Kalibrierung wurden um den Finower Tower 40 Passmarken ausgelegt sowie weitere 40 Marken am Tower selbst befestigt.

Es wurde vor jeder Gebäudeseite ein Tachymeterstandpunkt eingerichtet, da die Marken reflektorlos gemessen und schleifende Schnitte an den Marken vermieden werden sollten. Diese hätten durch zu niedrige Einfallswinkel am zu messenden Objekt entstehen und nach Untersuchungen von *Schubert und Wehmann* [Schubert und Wehmann 2002: S. 173 ff.] mit etwa gleichwertigem Messequipment zu ungenaueren Ergebnissen in der reflektorlosen Streckenmessung führen können (vgl. Abbildung 3.17). Des Weiteren waren mehrere Standpunkte auch deshalb nötig, weil die Passpunkte nicht von einem Standpunkt erfassbar waren.

Für die Einmessung der Passpunktmarken vor Ort stand ein Tachymeter der 1200er Serie

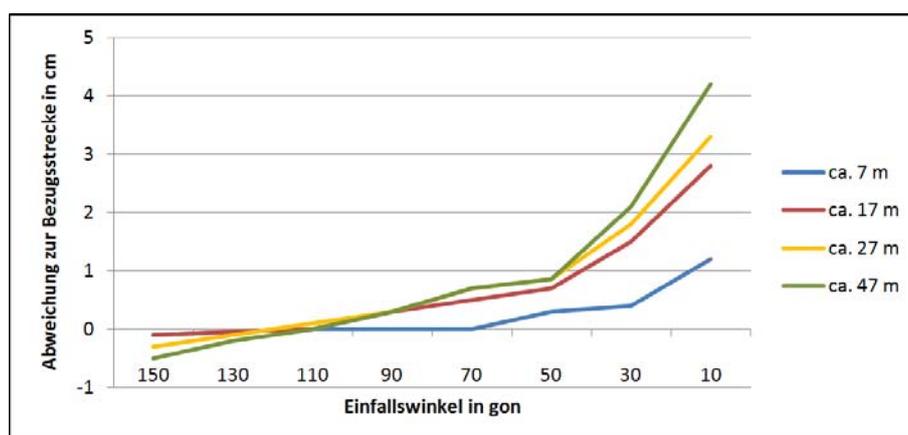


Abb. 3.17: Abhängigkeit der Messgenauigkeit vom Einfallswinkel bei der reflektorlosen Distanzmessung (Quelle: nach Schubert und Wehmann [2002: S. 175])

der Firma *Leica* zur Verfügung. Genauer kam das 1202+ zum Einsatz. Dabei steht die 2 für die Winkelmessgenauigkeit von zwei Sekunden horizontal sowie vertikal, die

umgerechnet 0.6 Milligon entsprechen. Für die Streckenmessgenauigkeit gibt der Hersteller bei Verwendung der Standardprismen eine absolute Genauigkeit von ± 1 Millimeter sowie relativ 1.5 ppm an. Bei reflektorlosen Messungen ergibt sich eine absolute Streckenmessgenauigkeit von ± 2 Millimeter absolut und 2 ppm relativ.

Vor Messungsbeginn wurde das Tachymeter auf allen vier Standpunkten horizontiert, um nachträgliche Korrekturen des Gerätehorizontes bei der Besetzung des jeweiligen Standpunktes zu vermeiden und eine Zwangszentrierung zu gewährleisten.

Es wurden Strecken und Winkel zwischen den benachbarten Standpunkten sowie einen Großteil aller sichtbaren Passpunktmarken gemessen. Nicht vermessene Marken sollten als Verknüpfungspunkte bei der Orientierung der Bilddaten dienen. Zusätzlich wurden von jedem Standpunkt alle sichtbaren vermarkten Festpunkte 1001 bis 1007 gemessen, um das Netz gegebenenfalls ins Landeskoordinatensystem transformieren zu können. Ein weiterer Grund für die Richtungs- und Streckenmessung zu den Festpunkten ist der, dass aus der Flugplanung bereits Richtungs- und Streckenmessblöcke von den Standpunkten S1 und S2 vorlagen. Somit erhielt man sich die Möglichkeit, diese Messungen in die Netzausgleichung mit zu integrieren und die Freiheitsgrade der Gesamtmessung zu erhöhen.

Mit dem Wissen einer hohen Überbestimmung aus einer Vielzahl von Messungen zu identischen Punkten von verschiedenen Standpunkten, wurde sich dazu entschieden die Messungen im reinen Messmodus des Tachymeters durchzuführen. Die Ausgleichung des Messungsnetzes sollte im Innendienst erfolgen (vgl. Abschnitt 4.3).

3.4.2 Bildaufnahme

Die Spiegelreflexkamera *Canon EOS 5D Mark II* konnte aus technischen Gründen nicht am Helikopter befestigt werden und sollte aus dem Helikopter heraus freihändig bedient werden. Ein großer Vorteil, der sich daraus ergibt, ist der, dass die Vibrationen des Helikopters nicht auf die Kamera übertragen werden, was sich negativ auf die Bildschärfe auswirken kann. Um weiterhin Kamerabewegungen bei der Betätigung des Auslösers der Kamera zu vermeiden, wurde die Kamera mit Hilfe eines Laptops über das Programm *EOS Utility*, der Standardsoftware des Kameraherstellers, automatisch ferngesteuert ausgelöst. Dabei war darauf zu achten, dass ein direktes Übertragen der Bilder auf den Laptop verhindert wird, da die *EOS Utility* sonst nur eine Bildfolge von fünf Sekunden für das Raw-Format zulässt. Damit konnte eine maximale Auslösefrequenz ein Mal pro Sekunde gewährleistet werden.

Für die Belichtung der Bilder wurde aus einem Test vor Ort eine optimale Belichtungszeit von

1/650 Sekunden festgelegt. Um mögliche Bildrauscheffekte zu unterdrücken, wurde der ISO-Wert auf 100 gesetzt. Andere mögliche Einstellungen der Kamera waren durch die Kalibrierung vorgegeben.



Abb. 3.18: Tower-Befliegung mit dem *Bell 47*

Die Navigation während des Bildfluges (vgl. Abbildung 3.18), ein gleichzeitiges Visieren des Towers im Sinne der Flugplanung, dem Starten und Anhalten des Aufnahmevorgangs sowie die Vermeidung der Ablichtung von Helikopterbauteilen gehörten zu den Hauptanforderungen beim Helikopterflug. Nach einer ersten Sichtung der Bilddaten konnte bereits prognostiziert werden, dass verschiedene Elemente der Flugplanung nicht eingehalten wurden, die zum Teil auf verschiedene Umstände zurückzuführen sind. So wurden die geplanten Bildmittenabstände in Flugrichtung nicht eingehalten, aufgrund einer zu hohen Geschwindigkeit. Diese war jedoch zeitweilig an diesem Tag erforderlich, um den Helikopter ruhig in der Luft zu halten. Für die Umflüge muss selbstkritisch gesagt werden, dass eine angedachte unterstützende Topographie vor Ort zur Navigation des Helikopters deshalb nicht ausreichte, da sie in der Wahrnehmung des unerfahrenen Navigators nur bedingt eine tragende Rolle spielte. So konnten die Abstände der Projektionszentren zum Tower auf einen Bereich zwischen 30 bis 60 Meter geschätzt werden. Bezogen auf die Auflösung am Objekt liege man damit bei 0.5 bis 1.3 Zentimeter.

Die Aufnahmen mit der *Ricoh GR Digital III* erfolgten mit einer Belichtungszeit von 1/1000 Sekunden. Der Wert für die Lichtempfindlichkeit des Sensors wurde ebenfalls auf 100 gesetzt, um den wechselnden Lichtbedingungen am Aufnahmetag gerecht zu werden.

Doch auch die Bedienung des *AscTec Falcon 8* verlief nicht reibungslos. Das eingestellte Heading für jeden einzelnen Wegpunkt wurde innerhalb des Fluges (vgl. Abbildung 3.19) nicht berücksichtigt. Für die Gebäudeseiten erfolgten die Aufnahmen deshalb rechtwinklig zu diesen. Um eine gleichmäßige Drehung beim Flug um eine Gebäudeecke zu realisieren, musste der autonome Flug kurzzeitig unterbrochen werden, der *AscTec Falcon 8* horizontal nachgeführt und entsprechende Wegpunkte erneut abgeflogen werden. Problematisch bei



Abb. 3.19: Tower-Befliegung mit dem *AscTec Falcon 8*

dieser Vorgehensweise war der Umstand, dass die Drehungen des UAV vom Empfinden des Piloten abhängig wurde, der abschätzen musste, wie weit das UAV jeweils gedreht werden musste, um homogene Bildübergänge für die Aufnahme zu garantieren. Zusätzlich kostete dies einen zeitlichen Mehraufwand, der die Octocopter-Mission stark einschränkte. Da eine Batterie nach einer Flugzeit von etwa 15 Minuten aufgebraucht war, mussten einige geplante Umflüge entfallen. Insgesamt wurde der Tower drei Mal in der Konstellation 25, 45 und 67.5 Grad (vgl. Abbildung 3.13) umflogen und wie geplant überflogen.

Die terrestrischen horizontalen Aufnahmen erfolgten mit einem Einbeinstativ in einer Höhe von ca. 1.90 Meter über Grund. Bildmittenabstände wurden hierbei abgeschritten. Die unterschiedlichen Aufnahmeentfernungen beider Kameras zum Tower wurden zu diesem Zweck in verschiedenen Punkten vor Ort signalisiert.

4 Auswertung und Analyse

Die erfassten Daten aus dem Abschnitt 3 werden in diesem Kapitel ausgewertet und analysiert. Dabei stehen die photogrammetrische Nutzung der verwendeten Amateurkameras sowie die automatisierte relative Orientierung der erfassten Bilddaten im Mittelpunkt der Betrachtung.

4.1 Vergleich der Kalibrierverfahren

Zum Vergleich beider Kalibrierverfahren standen 48 Aufnahmen der Testfeldkalibrierung für die *Canon EOS 5D Mark II* sowie bereits durch die Nachbarabteilung ausgewertete Ergebnisse (vgl. Tabelle 4.1) der DOE-Kalibrierung für diese Kamera zur Verfügung.

Da die berechneten Ergebnisse für die DOE-Kalibrierung nur pixelbasiert vorlagen, wurden die entsprechenden Werte in ein metrisches Maß umgerechnet. Es sei darauf hingewiesen, dass Verzeichnungskoeffizienten einheitslos sind, aber aus Gründen der Übersichtlichkeit den verschiedenen Systemen zugeordnet wurden. Weiterhin ist zu sagen, dass für die DOE-Kalibrierung keine Standardabweichung im photogrammetrischen Sinne für die Parameter der inneren Orientierung angegeben wird. Vielmehr gibt die Anzahl gefundener identischer Punkte (vgl. Abschnitt 2.1.2) und damit die Anzahl der Punkte, die an der Ausgleichung beteiligt sind, Aufschluss über die Genauigkeit des Gesamtverfahrens. Zusätzlich wird der Mittelwert (mean) über alle identischen Punkte berechnet, der die Restabstände der gefundenen belichteten Bildpunkte von ihrer Ideallage aufzeigt, sowie ein mittlerer Fehler (std), der die Abweichung eines Punktes vom Mittelwert kennzeichnet.

Damit spiegelten die Angaben zur DOE-Kalibrierung die Genauigkeit des mathematischen Modells wider, welches ermittelt wurde, um die Aufnahme in das kalibrierte Bild zu transformieren.

Zur Auswertung der Testfelddaten standen das Programm *Pictran-DE* der *Technet GmbH* sowie *CAP*³³ der Firma *K²-Photogrammetry* zur Verfügung, wobei *Pictran-DE* ein geeignetes Werkzeug zur Bildpunktmessung darstellte und in *CAP* die reine Berechnung der Daten der inneren Orientierung stattfand. Zwar liefert *Technet* mit *Pictran-B* auch ein Programm zur Bündelblockausgleichung, da zum einen aber die spätere Orientierung der Befliegungsdaten ebenfalls mit *CAP* realisiert werden sollte und zum anderen *Pictran-B* nur die ersten zwei Koeffizienten der radial-symmetrischen Verzeichnung bestimmt, die für die meisten Objektive zwar auch ausreichend sind [Luhmann 2000: S. 120], was für die verwendete Amateurkamera jedoch zunächst zu prüfen war, wurde sich an dieser Stelle für das Programm *CAP* entschieden. Einen Überblick über das Programmpaket *CAP*, das vorrangig für Anwendungen der Nahbereichsphotogrammetrie ausgelegt ist, liefert der Anhang B, der vollständig einer *VDV*-Schriftenreihe [Kotowski 1996: S. 29 ff.] entnommen ist.

³³Combined Adjustment Program

Der Vorteil von *Pictran-DE* bestand darin, dass die codierten Passmarken des Testfeldes mit diesem Programm generiert wurden und daher zum Teil auch automatisch in den Testfeldbildern gemessen werden konnten. Zusätzlich verfügt das Programm über die Möglichkeit einer halbautomatischen Bildpunktmessung. Hierbei können verschiedene symmetrische Pixelmuster vorgegeben werden, die unter Angabe eines Korrelationskoeffizienten und dem Navigieren des Messkreuzes zu einem vergleichbarem Muster im Messbild dazu führen, dass eine Bildpunktmessungen im Zentrum des symmetrischen Vergleichsmusters im Bild erfolgt. Diese halbautomatische Option führte ebenfalls zu einer Beschleunigung der Bildpunktmessung, da sie auf einen Großteil der Kugeln, den Bodenpasspunkten, angewendet werden konnte.

Bei einer ersten Ausgleichung zeigte sich, dass wenige Punkte des Testfeldes für die Auswertung ungeeignet waren, da sie zu groben Fehlern führten. Weil eine Kontrolle der Bildpunkte keine Rückschlüsse auf Fehlmessung dieser Punkte zuließ, wurden sie von den folgenden Ausgleichungen ausgeschlossen. Nachdem zusätzliche grobe Fehler durch Fehlmessungen oder falscher Punktzuordnungen mit Hilfe der Bündelblockausgleichung in *CAP* detektiert und anschließend korrigiert bzw. entfernt wurden, folgte eine fehlerfreie Ausgleichung. Für die Festpunkte des Testfeldes wurde dabei eine Genauigkeit von 0.5 Millimeter angegeben (vgl. Abschnitt 2.1). Der mittlere Fehler a priori für eine Bildpunktmessung wurde mit zwei Mikrometer³⁴ angenommen, wobei für die automatisch gemessenen Punkte eine Genauigkeit im höherem Subpixelbereich zu erwarten war. Die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung mit *CAP* sind in der Tabelle 4.2 dargestellt³⁵.

Innere Orientierung	DOE 1		
	Px	mm	Genauigkeit
c_k	5572.69	35.6652	Anzahl Punkte
X_0	2813.04	0.0323	2156
Y_0	1868.81	0.0204	Px
A_1	-8.80570E-02	-6.92268E-05	0.419968 (mean)
A_2	1.13917E-01	7.04059E-08	0.179040 (std)

Tab. 4.1: Ergebnisse der ersten DOE-Kalibrierung für die *Canon EOS 5D Mark II*

Wie zu sehen ist, wurden für die Ausgleichung zwei unterschiedliche stochastische Ansätze verfolgt. Dabei spielte der zweite Nulldurchgang r_0 der radial-symmetrischen Verzeichnungskurve des Objektivs eine wesentliche Rolle. Das Ansetzen eines zweiten Nulldurchganges hat sich in der klassischen Photogrammetrie bewährt. In der Praxis wird für r_0 ein Wert ermittelt, sodass sich eine ausgeglichene Verzeichnung über den gesamten Bildbereich einstellt. In der

³⁴ein Drittel der Pixelgröße [Kraus 2004: S. 268]

³⁵Kalibrierprotokolle für die Canon EOS 5D Mark II in allen Konfigurationen sind im Anhang C enthalten

Innere Orientierung	Testfeld ($r_0 = 0$ mm)				Testfeld ($r_0 = 14.4$ mm)			
	Px	mm	Standardabweichung		Px	mm	Standardabweichung	
			Px	μm			Px	μm
c_k	5560.37	35.6434	0.13	0.8	5497.88	35.2428	0.11	0.7
x_0	2811.06	0.0196	0.09	0.6	2811.06	0.0196	0.09	0.6
y_0	1871.72	0.0018	0.14	0.9	1871.70	0.0019	0.14	0.9
A_1	-8.56E-02	-6.74E-05	2.08E-04	1.64E-07	-8.66E-02	-6.97E-05	2.11E-04	1.70E-07
A_2	1.10E-01	6.80E-08	6.28E-04	3.89E-10	1.11E-01	7.19E-08	6.34E-04	4.11E-10
c_k	5560.18	35.6422	0.16	1.0	5497.89	35.2429	0.11	0.7
x_0	2811.06	0.0196	0.09	0.6	2811.07	0.0197	0.09	0.6
y_0	1871.73	0.0017	0.14	0.9	1871.72	0.0018	0.14	0.9
A_1	-8.46E-02	-6.66E-05	5.25E-04	4.13E-07	-8.56E-02	-6.89E-05	5.30E-04	4.27E-07
A_2	1.36E-36	6.35E-08	4.66E-38	2.18E-09	1.79E-36	6.71E-08	6.17E-38	2.31E-09
A_3	1.14E-05	7.09E-12	5.52E-06	3.42E-12	1.20E-05	7.77E-12	5.71E-06	3.70E-12

Tab. 4.2: Ergebnisse der Testfeldkalibrierung für die Canon EOS 5D Mark II

Regel liegt r_0 bei zwei Drittel des maximalen Bildradius' [Luhmann 2000: S.120]. Für die Canon EOS 5D Mark II berechnet sich ein zweiter Nulldurchgang r_0 damit zu

$$r_0 = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\left(\frac{36}{2}mm\right)^2 \cdot \left(\frac{24}{2}mm\right)^2} = 14.4mm.$$

Der grundlegende Gedanke für die Verwendung eines zweiten Nulldurchganges in der Photogrammetrie lag darin begründet, dass die Verzeichnung $\Delta r'$ über die Bildfunktion nach $\Delta r' = r' - c_k \cdot \tan \tau$ numerisch mit der Kammerkonstanten c_k korreliert ist [Luhmann 2000: S. 120]. Daher wurde in dem verwendeten Parametermodell ein linearer Anteil der Verzeichnungsfunktion (vgl. Abschnitt 2.1.1) abgespalten, wodurch die Kurve einen zweiten Nulldurchgang bei $r_0 = 14.4mm$ erhielt (vgl. Abbildungen 4.1 und 4.2) und die Verzeichnung aller Bildpunkte im Radius r_0 zum Bildhauptpunkt Null wurde. Mit diesem mathematischen Ansatz konnten die Verzeichnungsparameter A_1 , A_2 und die Kammerkonstante c_k unabhängig voneinander bestimmt bzw. optimiert werden. Diesen Zusammenhang zeigen die Tabellen 4.3 und 4.4. Die Abhängigkeit zwischen den betreffenden Größen verringerte sich.

	c_k	x_0	y_0	A_1	A_2
c_k	1				
x_0	-0.029	1			
y_0	-0.006	-0.036	1		
A_1	0.591	-0.011	-0.009	1	
A_2	-0.544	0.008	0.018	-0.963	1

Tab. 4.3: Korrelation zwischen den Parametern der inneren Orientierung für $r_0 = 0mm$

	c_k	x_0	y_0	A_1	A_2
c_k	1				
x_0	-0.021	1			
y_0	0.007	-0.035	1		
A_1	-0.247	-0.011	0.009	1	
A_2	0.199	0.008	-0.018	-0.963	1

Tab. 4.4: Korrelation zwischen den Parametern der inneren Orientierung für $r_0 = 14.4mm$

Die absoluten Verzeichnungswerte nahmen unter der Berücksichtigung des zweiten Nulldurchganges ebenfalls ab (vgl. Abbildung 4.2). Weiterhin war feststellbar, dass eine lineare Abhängigkeit bei nur einem Nulldurchgang der Verzeichnungskurve zu erheblich unterschiedlichen Ergebnissen bei der Berechnung der Kammerkonstanten c_k führte (vgl. Tabelle 4.2). Dabei lag die Differenz bei ca. 0.4 Millimeter. Ein Vergleich dieser Größe aus DOE- und Testfeldkalibrierung zeigte, dass sich die Werte ohne Berücksichtigung von r_0 wesentlich stärker annäherten. Da die Kompatibilität beider Systeme die Voraussetzung einer vergleichenden Analyse darstellte, ging man dazu über, nur die Ergebnisse aus der DOE-Kalibrierung und der Testfeldkalibrierung ohne zweiten Nulldurchgang gegenüberzustellen, da davon auszugehen war, dass im Ansatz gleiche stochastische Modelle vorlagen.

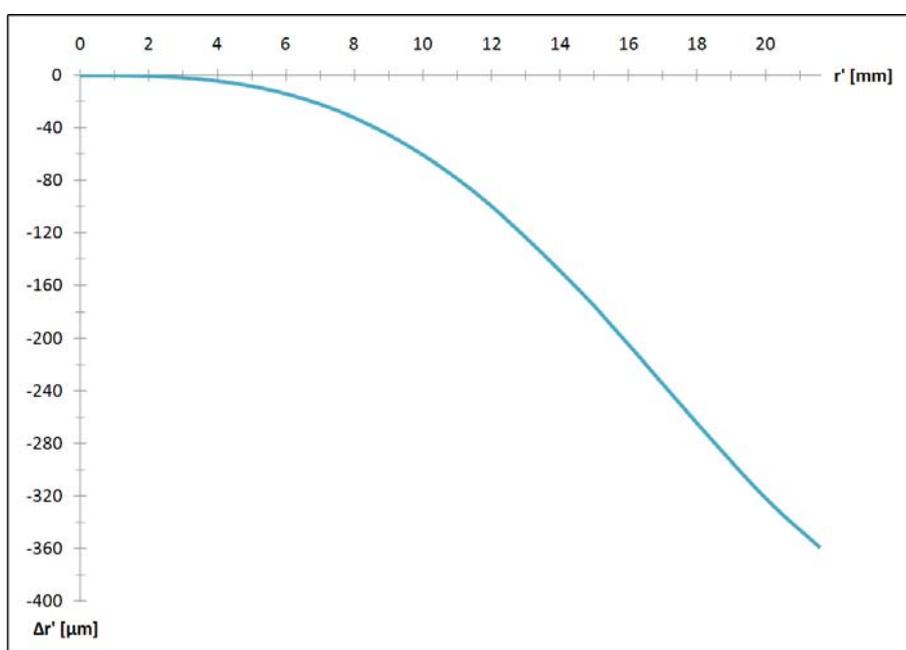


Abb. 4.1: Rad.-symmetrische Verzeichnungskurve für $r_0 = 0\text{mm}$

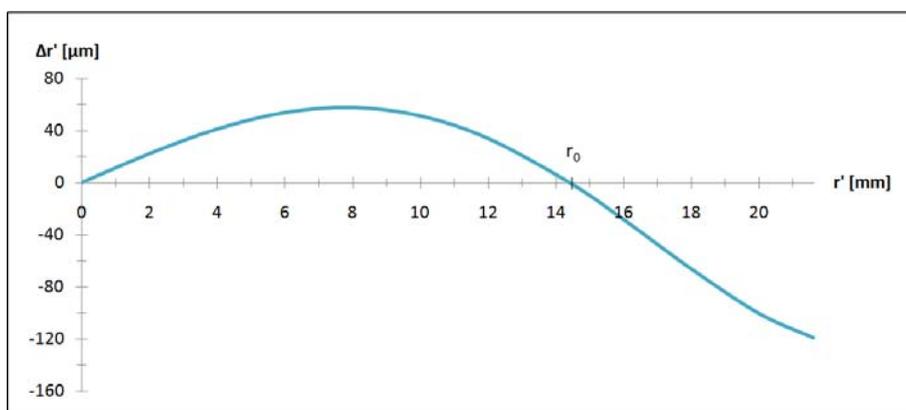


Abb. 4.2: Rad.-symmetrische Verzeichnungskurve für $r_0 = 14.4\text{mm}$

Bei der Betrachtung der Lage des Bildhauptpunktes aus DOE- und Testfeldkalibrierungen war ein signifikanter Unterschied von zwei Pixeln in x- und etwa drei Pixeln in y-Richtung des Sensorsystems erkennbar. Dieser konnte durchaus mit einer Instabilität der inneren Geometrie der *Canon EOS 5D Mark II* begründet werden (vgl. Abschnitt 4.2).

Der Vergleich der berechneten Kammerkonstanten zeigte, dass sie sich um rund 20 Mikrometer unterschieden. Eine lineare Abhängigkeit von der Bildhauptpunktlage lag bei der Testfeldkalibrierung nachweislich nicht vor (vgl. Abbildung 4.3). Die Pixelgröße wurde für beide Verfahren mit 6.4 Mikrometer festgelegt. Diese hängt von dem Verhältnis zwischen Bildauflösung und der metrischen Sensorgröße ab, die jedoch mit 36×24 Millimeter nur millimetergenau beschrieben war. Da eine Division der Größen kein ganzzahliges Ergebnis lieferte, wurde sich dazu entschieden, die Pixelgröße bis auf eine Nachkommastelle im Mikrometerbereich zu betrachten. Daraus ergab sich eine auf die Pixelgröße normierte metrische Sensorgröße in Breite B und Höhe H für die *Canon EOS 5D Mark II* zu

$$B = 5616Px \cdot 6.4\mu m = 35.9424mm$$

$$H = 3744Px \cdot 6.4\mu m = 23.9616mm.$$

Unterschiedliche Definitionen für die Größe eines Sensors würden zu einer fehlerhaften Umrechnung der pixelbasierten Werte der DOE-Kalibrierung sorgen, die in eine entsprechende Größenordnung von 20 Mikrometer fallen kann. Eine Kammerkonstante von 5570 Pixeln führt durch die Umrechnung mit den verschiedenen Pixelgrößen 6.4 und 6.41 Mikrometer gar zu einer Differenz von rund 55 Mikrometer. An dieser Stelle wird deutlich, wie wichtig deshalb die Sicherstellung konformer Systeme war, denn ein Unterschied von 0.01 Mikrometer in der Definition der Pixelgröße führt bereits zu groben Fehlern für die weitere Analyse.

Luhmann [Luhmann 2010: S. 88 ff.] zeigt mit verschiedenen Versuchen, wie die Bestimmung der Elemente der inneren Orientierung einer Amateurkamera von unterschiedlichen Anwendungen beeinflusst wird. Dabei stellt er fest, dass schon unterschiedliche Kantungen einer Kamera während der Aufnahme zu verschiedenen Ergebnissen für die Kammerkonstante im Bereich um wenige hundertstel Millimeter führen können. Während die Bündelblockausgleichung der Testfeldkalibrierung praktisch eine Mittellung verschiedener Kammerkonstanten für unterschiedliche Kantungen darstellte, hätte dieser Effekt bei der Kalibrierung in einer Kameralage nur in eine Richtung gewirkt. Um diesen Sachverhalt für die Spiegelreflexkamera des Herstellers *Canon* zu untersuchen, wurden die horizontalen und um 90 Grad gekanteten Aufnahmen sowie die Aufnahmen in den Kantungen um 180 Grad und 270 Grad getrennt ausgewertet. Aus der abnehmenden Zahl der Bilder und Kantungen stiegen dafür zwar die linearen Abhängigkeiten der zu bestimmenden Größen um einen geringen Betrag, es konnte jedoch gezeigt werden, dass die getrennte Auswertung der Aufnahmen unter anderem zu unterschiedlichen Berechnungen für die Bildhauptpunktlage und der Kammerkonstanten

fürte. Die Tabelle 4.5 kennzeichnet die Ergebnisse dieser Untersuchung und die vorangestellte Annahme mittlerer Werte für die Kammerkonstante bei einer gemeinsamen Ausgleichung aller Bilder. Die Differenz der Kammerkonstanten lag mit 5.7 Mikrometer bei fast einem Pixel, jedoch nicht im Bereich des signifikanten Unterschiedes beider Kalibrierverfahren. Eine zeitliche Änderung der inneren Orientierung über den Zeitraum der Testfeldaufnahmen

Parameter	Aufnahmen		
	0° + 90°	180° + 270°	jede
c_k	35.6400	35.6457	35.6432
x_0	0.0184	0.0178	0.0195
y_0	-0.0010	0.0034	0.0016

Tab. 4.5: Innere Orientierung bei unterschiedlichen Kantungen für die *Canon EOS 5D Mark II*

konnte nicht ermittelt werden, da eine Trennung der Bilder pro Aufnahmestandpunkt zu einer erheblichen Verschlechterung der Aufnahmeconfiguration und damit zu zweifelhaften Ergebnissen der Bündelblockausgleichung geführt hätte.

Für den Vergleich der radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter A_1 und A_2 beider Kalibrierungen, konnte gesagt werden, dass die berechneten Polynomkoeffizienten annähernd gleich groß waren. Zu beachten war hierbei, dass sich die Verzerrung auf den Bildhauptpunkt bezieht. Verändert sich dieser, so werden die Bildradien r' entsprechend größer oder kleiner, je nachdem, für welche Bilddiagonale die Verzerrung aufgetragen wird und in welche Richtung eine unterschiedliche Bildhauptpunktlage wirkt. Für die DOE- und Testfeldkalibrierung lag der Bildhauptpunkt im ersten Quadranten des Sensors, sodass sich die verwendete Bilddiagonale r' zum rechten oberen Bildrand verkürzte. Die Abbildung 4.3 kennzeichnet diesen Zusammenhang. Die Betrachtung der Verzerrungskurven darf daher nicht als Bezug zwischen identischen Pixeln eines Sensors angenommen werden, sondern kennzeichnet, in Abhängigkeit von der Bildhauptpunktlage, die Verzerrung eines Bildes im entsprechenden radialen Abstand zu diesem. Sofern die radialen Abstände auf den vier möglichen Bilddiagonalen abgetragen werden, ergeben sich z.B. vier vergleichbare Pixel in den Bildecken. Für die zwei Kalibrierungen zeigt die Tabelle 4.6, dass die Differenzen der maximalen absoluten Verzerrungswerte am Bildrand unabhängig von der unterschiedlich ermittelten Lage des Bildhauptpunktes zu je einem Pixel bestimmt werden konnten. Der Tabelle 4.2 ist weiterhin zu entnehmen, dass die *Canon EOS 5D Mark II* in unterschiedlichen Varianten mit zwei und drei radial-symmetrischen Verzerrungsparametern kalibriert wurde. Nach Auskunft der Nachbarabteilung wäre das mathematische System der DOE-Kalibrierung damit für diese Kamera überparametrisiert gewesen. Demzufolge lagen für die DOE-Kalibrierung nur die Verzerrungskoeffizienten A_1 und A_2 vor. Gleiches konnte für die Kalibrierung im Testfeld gesagt werden. Die Verwendung des dritten Verzerrungsparameters A_3 führte zwar numerisch zu einer Minimierung der maximalen Ver-

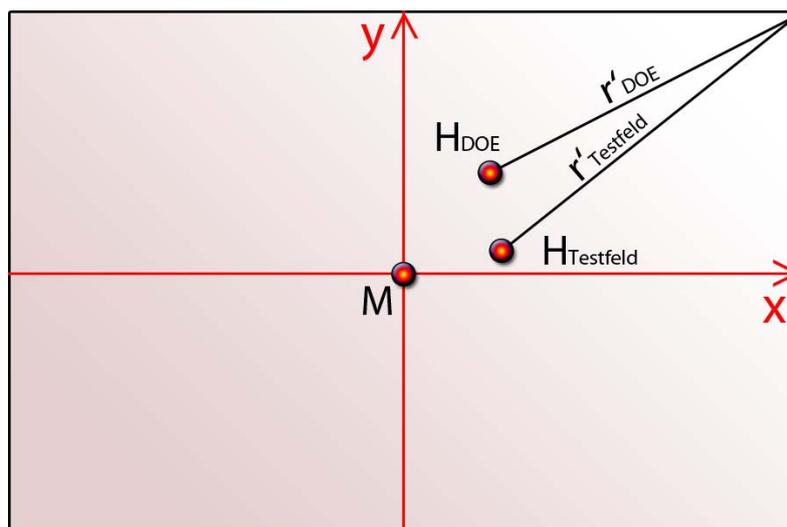


Abb. 4.3: Abhängigkeit des Bildradius' r' von der Bildhauptpunktlage H

zeichnungswerte am Bildrand von einem Pixel. Es zeigte sich jedoch, dass sich bis zu einem radialen Abstand von 18 Millimeter und damit bis etwa sechs Siebtel des gesamten Bildbereichs Differenzen der absoluten radial-symmetrischen Verzeichnungswerte von maximal einem siebtel Pixel einstellten. Zudem war die Standardabweichung des dritten Parameters aus der Testfeldkalibrierung annähernd halb so groß, wie der berechnete Wert selbst, womit dieser als nicht signifikant eingestuft werden musste. Daher ist die Bestimmung dieses zusätzlichen Parameters zur Beschreibung der radial-symmetrischen Verzeichnung für das verwendete Objektiv nicht ratsam.

Sowohl über die Testfeldkalibrierung als auch mit Hilfe der DOE-Kalibrierung konnten keine signifikanten Werte für die Parameter der radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnung sowie für Affinität und Scherung (vgl. Abschnitt 2.1.1) ermittelt werden (vgl. Anhang C.3).

Ein Vorteil, der bei der DOE-Kalibrierung zunächst gesehen wurde, ist die Bestimmung der Verzeichnungskoeffizienten über eine hohe Anzahl sehr gut verteilter Passpunkte. Zwar geht die Testfeldkalibrierung von formatfüllenden Aufnahmen aus, jedoch kann dies in der Realität nicht so gleichmäßig über den gesamten Bildbereich gewährleistet werden, wie für die DOE-Kalibrierung. Die Ergebnisse zeigen, dass dieser Nachteil keine Auswirkung auf die bestimmte radial-symmetrische Verzeichnung hat.

Die Punkte der Kalibrierung am DOE sind theoretisch unendlich weit entfernt und hoch genau bestimmt. Die räumliche Ausdehnung eines Testfeldes ist begrenzt, beschreibt aber ein zu erfassendes Objekt der Nahbereichsphotogrammetrie wesentlich besser. Die Objektkoordinaten werden jedoch ungenauer ermittelt als die äußeren Parameter der DOE-Kalibrierung.

Vergleicht man die Differenzen der Kammerkonstanten der ersten und zweiten DOE-Kalibrierung in Tabelle 4.7, so ist feststellbar, dass sich diese wenig unkritischer unterscheiden

	r'_{DOE}	$\Delta r'_{DOE}$		$r'_{Testfeld}$	$\Delta r'_{Testfeld}$		$\Delta r'_{Testfeld} - \Delta r'_{DOE}$	
	mm	μm	Px	mm	μm	Px	μm	Px
	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	-0.5	-0.1	2	-0.5	-0.1	0.0	0.0
	4	-4.3	-0.7	4	-4.2	-0.7	0.1	0.0
	6	-14.4	-2.2	6	-14.0	-2.2	0.3	0.1
	8	-33.0	-5.2	8	-32.3	-5.0	0.8	0.1
	10	-62.0	-9.7	10	-60.6	-9.5	1.4	0.2
	12	-101.8	-15.9	12	-99.5	-15.5	2.3	0.4
	14	-151.7	-23.7	14	-148.4	-23.1	3.4	0.5
	16	-209.3	-32.6	16	-204.8	-31.9	4.5	0.7
	18	-270.3	-42.2	18	-264.6	-41.3	5.7	0.9
Bildecken	20	-328.2	-51.2	20	-321.6	-50.2	6.6	1.0
oben rechts	21.56	-365.7	-57.0	21.58	-359.1	-56.0	6.5	1.0
unten rechts	21.58	-366.1	-57.1	21.58	-359.2	-56.0	7.0	1.1
unten links	21.64	-367.2	-57.3	21.62	-359.8	-56.1	7.4	1.2
oben links	21.61	-366.8	-57.2	21.61	-359.8	-56.1	7.0	1.1

Tab. 4.6: Berechnung der Verzeichnungsabweichungen aus DOE- und Testfeldkalibrierung

und die Differenz der Kammerkonstanten aus der ersten DOE-Kalibrierung und der Kalibrierung im räumlichen Testfeld nicht ausschließlich auf eine Instabilität der Kamera zurückzuführen war.

Durch unterschiedliche Messanordnungen innerhalb einer Testfeldkalibrierung sind Abweichungen im Mikrometerbereich nicht unüblich. Hierbei führen schon das Weglassen einzelner Bildpunktmessungen oder Festpunktinformationen zu leicht verschiedenen Ergebnissen bei der Berechnung der Elemente der inneren Orientierung. Die wesentlich unterschiedlich bestimmten Kammerkonstanten gehören in diesem Fall nicht dazu.

Abschließend muss gesagt werden, dass ein Vergleich beider Kalibrierverfahren aus einer einzigen Testfeldkalibrierung und einer wahrscheinlich instabilen zu kalibrierenden Amateurkamera keine endgültigen Rückschlüsse auf signifikante Unterschiede in der Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung erlaubt. Vielmehr kann über diesen Vergleich ein Ansatz gefunden werden, den es zukünftig mit photogrammetrischen Messkameras zu beweisen gilt. Über eine Kamerakalibrierung werden Parameter bestimmt, die das zugrunde liegende physikalische Kameramodell mathematisch beschreiben. Dabei kann es innerhalb verschiedener Ausgleichungsprozesse durchaus mehrere Lösungen geben. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass ein stochastisches Modell zur Beschreibung der inneren Orientierung einer Kamera über den Auswerteprozess beibehalten wird und keine Vermischung einzelner Parameter unterschiedlicher stochastischer Ansätze stattfindet.

4.2 Stabilität der inneren Geometrie der Kameras

Um die innere Stabilität beider Kameras zu überprüfen, sollten die DOE-Kalibrierungen vor und nach der Befliegung dienen. Diese Kontrolle gibt Aufschluss darüber, wie bzw. ob sich die innere Orientierung zwischen beiden Kalibrierungen geändert hat und eine projektbegleitende Kalibrierung für jede Befliegung mit den Kameras erforderlich wird, um die Bestimmung der Elemente der inneren Orientierung und die eigentliche Aufnahme zeitlich zusammenzulegen. Zwischen den Kalibrierungen lag ein Zeitraum von vier Monaten. Die Befliegungen mit beiden Kameras folgte unmittelbar nach der Testfeldkalibrierung. Die Kameras wurden zwischen den DOE-Kalibrierungen nur für die Befliegung sowie der Testfeldkalibrierung verwendet, um eventuelle Änderungen der inneren Geometrie auch nur auf diese Ereignisse zurückführen zu können.

Die Tabelle 4.7 kennzeichnet die Differenzen aus allen bestimmten Größen der ersten und zweiten DOE-Kalibrierung für beide Kameras. Bemerkenswert waren dabei die Kalibrierergeb-

Innere Orientierung	Canon EOS 5D Mark II		Ricoh GR Digital III	
	$\Delta \text{DOE}_{1,2}$		$\Delta \text{DOE}_{1,2}$	
	Px	μm	Px	μm
c_k	-0.5	-3.3	-0.9	-1.9
X_0	15.6	99.7	-1.3	-2.7
Y_0	-4.9	-31.3	0.7	1.5
A_1	5.0000E-05	2.6632E-08	1.7830E-03	4.4839E-05
A_2	6.1200E-04	4.0387E-10	-3.1430E-03	-2.0252E-06

Tab. 4.7: Differenzen berechneter Parameter aus erster und zweiter DOE-Kalibrierung für die verwendeten Kameras

nisse für die *Ricoh GR Digital III*, für die ebenfalls nur radial-symmetrische Verzeichnungswerte signifikant bestimmt werden konnten. Eine durch den Objektivaufbau erwartete veränderliche Kammerkonstante stellte sich aus den Ergebnissen für diese Kamera nicht ein. Es ist jedoch zu sagen, dass das Objektiv mit Hilfe größerer Messreihen überprüft werden sollte, bei der die Kamera mehrmals ein und ausgeschaltet wird, um den Einfluss des ausfahrbaren Objektivs nachhaltig zu validieren.

Die Befliegung sowie der Transport der Kamera hatten keinen erkennbaren Einfluss auf die Lage des Bildhauptpunktes. Dieser bewegte sich im Kalibrierzeitraum um etwa drei Mikrometer bzw. eineinhalb Pixel. Diese grundlegend stabilen Größen führten dazu, dass auch radial-symmetrische Verzeichnungseffekte praktisch unverändert blieben.

Die Spiegelreflexkamera von *Canon* blieb dagegen im Vergleich weit hinter den Erwartungen zurück. Wie man sieht, lag eine Verschiebung des Bildhauptpunktes von etwa 16 Pixeln vor. Die Ursachen dafür können in einer Sensorverschiebung oder in einer Änderung der optischen Achse der Kamera um 0.2 Gon liegen. Da verschiedene Vorkehrungen getroffen wurden (vgl.

Abschnitt 3.1.3), um die Lage des Sensors im Kameragehäuse nicht zu beeinflussen, lag die Vermutung nahe, dass sich die Bildhauptpunktverschiebung auf eine instabile Verbindung zwischen Wechselobjektiv und Kameragehäuse zurückführen lässt.

Derartige Veränderungen der inneren Geometrie können nach *Luhmann* [Luhmann 2010: S. 88] auf unterschiedlich einwirkende Schwerkrafteinflüsse bei z.B. gekanteten Aufnahmen, Deformationen des Kameragehäuses durch manuellen Druck oder Erwärmung, Vibrationen der Aufnahmeplattform, mechanische Sensorreinigungsvorgänge oder Bildstabilisation zurückzuführen sein. Die drei zuletzt genannten Einflüsse konnten für die Kamera aufgrund der Aufnahmeconfiguration und den Kamera- bzw. Objektiveigenschaften vernachlässigt werden. Da das Kameragehäuse der *Canon EOS 5D Mark II* aus einer sehr stabilen Magnesiumlegierung besteht [Canon 2010a] und keine hohen Temperaturunterschiede auf die Kamera wirkten, wurde der genannte Schwerkrafteinfluss auf das Objektiv als maßgebliche Einflussgröße bei der manuellen Kamerabedienung angenommen.

Der Vergleich der beiden DOE-Kalibrierungen ließ zunächst keine Rückschlüsse darauf zu, in welchem zeitlichen Rahmen sich die innere Geometrie der *Canon EOS 5D Mark II* verändert hat. Mit Hinzunahme der Testfeldkalibrierung wurde zumindest ersichtlich, dass sich maximale Veränderungen zwischen der Testfeldkalibrierung und der zweiten DOE-Kalibrierung einstellten und daher mit großer Wahrscheinlichkeit bei der Aufnahme des Objektes selbst. Die Abbildung 4.4 kennzeichnet diesen Sachverhalt. Damit konnte bereits an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich eine freihändige Aufnahme aus dem Helikopter heraus nachteilig auf die kalibrierte Kamera auswirkte und sich die innere Orientierung vermutlich während des Fluges änderte.

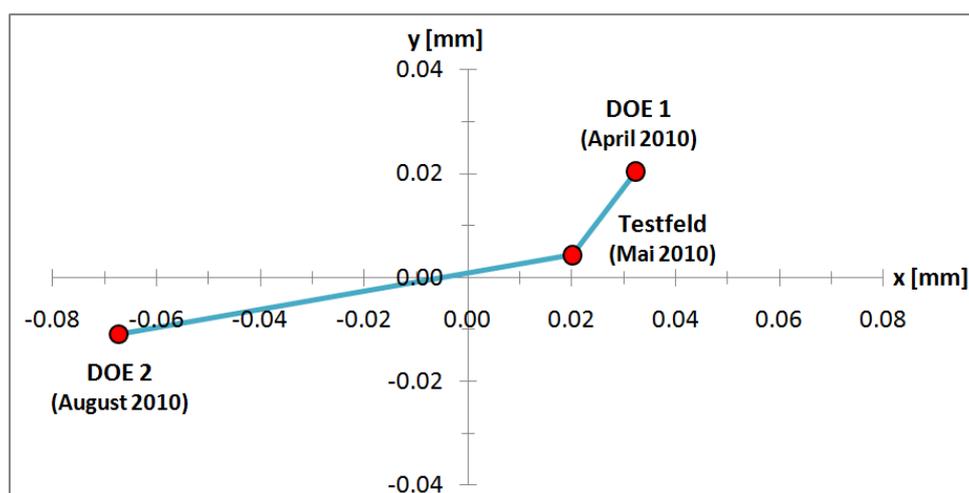


Abb. 4.4: Bildhauptpunktverschiebung zwischen erster und zweiter DOE-Kalibrierung für die *Canon EOS 5D Mark II*

Wenn die interne Kamerastabilität nicht ausreicht, um eine konstante Lage des Projektionszentrums im Bezug zum Bildkoordinatensystem sicherzustellen, schlägt *Luhmann* [Luhmann 2010: S. 88 ff.] eine bildvariante Kalibrierung vor, d.h. von einer kleinen Änderung der inneren Orientierung von Bild zu Bild bzw. einer beweglichen Lage des Projektionszentrums gegenüber der Sensorebene auszugehen. Dabei wird eine mögliche Verschiebung des Projektionszentrums von Bild zu Bild über zusätzliche Parameter beschrieben, die während der Bündelausgleichung mitgeschätzt werden. Weiterhin wird für die Kamera *Canon EOS 5D Mark II*, das Vorgängermodell der verwendeten Kamera, ebenfalls unter Verwendung eines 35mm-Objektivs gezeigt, wie diese zusätzlichen Parameter bei einem Rundum-Verband bestimmt werden können bzw. dass eine bildvariante Kalibrierung für einen signifikanten Genauigkeitsgewinn sorgt [Luhmann 2010: S. 124 ff.]. Da die meisten klassischen photogrammetrischen Auswerteprogramme jedoch von einer Verwendung reiner Messkameras ausgehen, so auch CAP, konnte eine bildvariante Kalibrierung im weiteren Verlauf der Bilddatenauswertung nicht erfolgen.

Aus den vorangestellten Ergebnissen zur *Canon EOS 5D Mark II* wird deutlich, dass eine projektbegleitende Kalibrierung in jedem Fall notwendig wird, da die innere Orientierung einer zeitlichen Änderung unterlag. Das Signalisieren und Einmessen von Passpunkten am zu vermessenden Objekt bleibt nach dieser Erkenntnis damit für diese Kamera unumgänglich.

4.3 Netzausgleichung

Für die Ausgleichung des Vermessungsnetztes wurde das Programm *VermCad* in der Version 3.2.2 der *VermCad GmbH* eingesetzt. Mit diesem sehr übersichtlichen Programm ist man, auch unter der Verwendung nicht standardisierter Eingangsdaten³⁶ schnell in der Lage, Netzmessungen auszugleichen, da die Möglichkeit besteht, mit vorgegebenen Tabellen zu arbeiten, in denen die Messelemente per Drag-and-Drop abgelegt werden können. Hierbei muss eine Differenzierung nach einzelnen Standpunkten bzw. Messblöcken erfolgen. Für die zusätzlich zu Netzpunkten gemessenen Punkte, generiert *VermCad* intern einen Messungsblock, der während der Ausgleichung berücksichtigt wird. Man muss die Beobachtungen vorher nicht mühsam trennen. Es besteht in *VermCad* aber auch die Möglichkeit, eigene Eingabeformate zu konfigurieren. Dies wird dann sinnvoll, wenn deutlich mehr Messungen vorliegen als für die Netzmessung in Finow.

Nachdem die Messungen ins Programm übertragen wurden, erfolgte die Einrichtung des verwendeten Tachymeters. Hierbei ist zu sagen, dass zwei verschiedene Instrumente konfiguriert werden mussten, denn aus Abschnitt 3.4.1 folgt, dass unterschiedliche Messgenauigkeiten für Streckenmessungen mit Reflektoren und reflektorlosen Messungen beachtet werden müssen.

³⁶z.B. R4,R5,M5,Rec500 (Geodimeter/Spectra Precision, Zeiss), GSI-8, GSI-16 (Leica/Wild)

Das lokale Netz konnte nur über zwei Startpunkte festgelegt werden. Aus den bekannten mathematischen Zusammenhängen der Vermessung hätte es genügt, den Ursprung des Netzes in einem der vier Gerätestandpunkte zu fixieren. Die programminterne Festlegung eines beliebigen Azimutes in Richtung einer Anschlussmessung würde dabei die Ausrichtung des lokalen Systems festlegen. In *VermCad* besteht zur Realisierung der Festlegung des lokalen Koordinatensystems eine andere Möglichkeit. Hierzu wurde aus einer doppelt gemessenen Streckenmessung der Standpunkt 20003 in den Koordinatenursprung gelegt und der Standpunkt 20002 im gemessenen Abstand dazu auf die positive x-Achse des Koordinatensystems. Der mittlere Fehler der doppelt gemessenen Horizontalstrecke betrug dabei 1.5 Millimeter. Diese wurden für die Genauigkeit a priori des Punktes 20002 berücksichtigt. Damit wurde das System fest im Standpunkt 20003 verankert, während das Netz über alle übrigen zur Verfügung stehenden Beobachtungen ausgeglichen wurde.

Für die Höhenausgleichung ging man ähnlich vor. Die Höhe des Standpunktes 20002 wurde dabei mit zwei Metern festgehalten. Über eine Höhenausgleichung wurden dann die Höhen der restlichen Netzpunkte relativ zur Starthöhe bestimmt.

Die Abbildung 4.5 kennzeichnet das gemessene Netz, welches zusätzlich um die Richtungs- und Streckensätze der Standpunkte S1 und S2 der Gebäudeaufnahme (vgl. Abschnitt 3.2) ergänzt wurde, um die Redundanz der Netzmessung zu erhöhen. Die Passpunkte konnten im Mittel auf zwei Millimeter in der Lage und 0.5 Millimeter in der Höhe bestimmt werden. Die Protokolle der Lage- und Höhennetausgleichung sowie eine Koordinatenliste aller Punkte mit der Angabe der mittleren Fehler befinden sich im Anhang E. Die Punktnummernbereiche gliedern sich in 1000er³⁷, 20000er³⁸ und 30000er³⁹ Punktnummern.

Die redundante Bestimmung aller Netzpunkte über die beschriebene Messanordnung konnte durch die Ausgleichungsprotokolle bestätigt werden. Als Testgröße zum Auffinden grober Fehler diente die normierte Verbesserung *NV*. Nach den Angaben in der Programmhilfe, liegt in *VermCad* bei einer berechneten normierten Verbesserung von 4.0 ein grober Fehler mit hoher Wahrscheinlichkeit vor. Für Werte zwischen 2.5 und 4.0 ist das Vorliegen eines groben Fehlers nicht auszuschließen. Um dennoch die Sicherheit der Ergebnisse abschätzen zu können, gibt in *VermCad* die Größe *EP* den Einfluss auf die relative Punktlage an. Das ist der Wert, um den der grobe Fehler die ausgeglichene Beobachtung verfälscht. Über diesen Zusammenhang konnte zusätzlich Sicherheit in der Beurteilung der Netzausgleichung gewonnen werden, da diese Einflüsse für sämtliche Beobachtungen sehr gering waren.

³⁷Anschlusspunkt

³⁸Standpunkt

³⁹Messpunkt

Nicht gleichmäßige Beleuchtungsbedingungen führten, wie erwartet, zu radiometrisch inhomogenen Bildern. Die Uniformität gleichfarbiger Bereiche für die Aufnahmen mit der Spiegelreflexkamera war gegeben. Eine teilweise hohe Sonneneinstrahlung hatte aber zur Folge, dass zur Sonne ausgerichtete Gebäudeseiten annähernd überbelichtet schienen. Da sämtliche Bilder jedoch im Roh-Format der Kameras aufgenommen wurden, konnte bei der Tif-Umwandlung festgestellt werden, dass auch diese Bereiche noch mit Farbinformationen besetzt waren. Die Umwandlung vom Rohformat ins gängige Tif⁴⁰-Format erfolgte mit 16 Bit pro Farbkanal für die *Canon EOS 5D Mark II* und acht Bit pro Kanal für die *Ricoh GR Digital III*. Die unterschiedliche Umwandlung rührt dabei von der Farbtiefe der Rohformate her, die bei der Spiegelreflexkamera bei 42 Bit und bei der Kompaktkamera bei 24 Bit liegt. Damit waren mit der *Canon EOS 5D Mark II* wesentlich mehr Farbabstufungen⁴¹ realisierbar, als mit der *Ricoh GR Digital III*⁴², was sich für die Zuordnung korrespondierender Merkmale jedoch nicht als Nachteil herausstellen sollte.

Blooming-Effekte konnten selbst für fast überbelichtete Bildbereiche nicht festgestellt werden. Ein minimales Bildrauschen für Aufnahmesituationen mit deutlich niedriger Umgebungsstrahlung stellte sich für die Aufnahmen mit der *Ricoh GR Digital III* ein. Es ließen sich keine ausgeprägten chromatischen Aberrationen an kontrastreichen Kanten für beide Aufnahmesysteme erkennen. Damit leisteten die Kameras, was die Hersteller auf ihren Websites versprechen- „geringes Rauschen und minimale chromatische Abberation“ [Ricoh 2010]. Daher wurde darauf verzichtet, nur den grünen Farbkanal der Bilddaten zu prozessieren, sondern sämtliche Farbinformationen zu verwenden. Die Vorteile, die normalerweise in diesem Kanal gesehen werden, sind ein minimaler Betrag der chromatischen Aberration sowie ein höherer Informationsgehalt gegenüber den anderen Farbkanälen.

4.4.2 Orientierung der Bilddaten

In einem ersten Schritt wurden mit einer am Institut entwickelten Software sämtliche Bilder auf ein Lochkameramodell gerechnet, d.h. die Verzeichnungswerte der DOE-Kalibrierung wurden auf die Bilder angewendet. Da aus photogrammetrischer Sicht recht hohe Verzeichnungswerte am Rand mit jeweils fast 60 Pixeln für beide Objektive vorlagen und nachfolgend genannte Programme des *DLR*, die Epipolarometrie zum Stereobildmatching ausnutzen, wurden die Bilder vorprozessiert. Hohe radial-symmetrische Verzeichnungswerte führen dazu, dass korrespondierende Punkte nicht entlang der Epipolarlinien gesucht werden können, da sie durch die Verzeichnung hohe Lagefehler im Bild aufweisen. Deshalb müsste an dieser

⁴⁰ Tagged Image File

⁴¹ 2⁴² Farben (Canon)

⁴² 2²⁴ Farben (Ricoh)

Stelle mit gekrümmten Epipolarlinien oder aber mit Epipolarbändern gearbeitet werden. Das Epipolarband kennzeichnet den Suchbereich um eine Epipolarlinie, dass durch beidseitige rechtwinklige Abstände von der Epipolarlinie entsteht, um einen identischen Punkt im weiträumigeren Abstand zur Epipolarlinie zu detektieren. Da die zur Verfügung stehenden Programme jedoch von einer Vorprozessierung der Daten und damit von einer niedrigen radial-symmetrischen Verzeichnung ausgehen, wurde sich zu diesem Schritt entschieden.

Der Bereich der Nahbereichsphotogrammetrie bzw. eine Bilddatenprozessierung, die nicht den Normalfall der Photogrammetrie repräsentiert, stellt für die Abteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* eine Erweiterung des Aufgabenfeldes dar. Die Auswertung von Befliegungsdaten einer Vielzahl verschiedener Sensoren aus Bildflügen oder Satellitenbildszenen bildeten bisher das Hauptspektrum der photogrammetrischen Auswertung. Die Abteilung verfügt zwar mit der Scanbox des Herstellers *illustrated architecture* über eine Software, die für die Bildpunktmessung im Nahbereich einsetzbar ist und gleichzeitig eine Schnittstelle zum Ausgleichsprogramm *CAP* beinhaltet, doch besitzt dieses Programm derzeit noch keine Bildmatchingalgorithmen bzw. eine automatische Verknüpfungspunktsuche. Aufgrund sich daraus ergebender Probleme, die nachfolgend beschrieben werden, sowie der Situation, dass keine Näherungswerte für die äußere Orientierung vorlagen, konnte nicht die gemeinsame Triangulation aller erfassten Bilddaten für ein Kamerasystem als Schwerpunkt der Arbeit im Vordergrund stehen. Vielmehr mussten mit den zur Verfügung stehenden Mitteln Algorithmen gefunden werden, die die gegenseitigen Beziehungen zwischen den Bildern wieder herstellten.

Aus der ersten Betrachtung der Bilddaten ließen sich dabei verschiedene Anforderungen an ein geeignetes Bildmatchingverfahren ableiten. So wurde nach einem robusten Algorithmus gesucht, der auch bei hohen Unterschieden der perspektivischen Abbildung des Towers, Maßstabsunterschieden sowie wechselnden Beleuchtungssituationen anwendbar bleibt.

Die erste Möglichkeit, die sich anbot, war die Ausnutzung relativ hoher Bildfolgen, um die perspektive Verzerrung zwischen den Bildern zu umgehen, da sich die Bildinhalte innerhalb einer hohen Bildfolge von Aufnahme zu Aufnahme nicht hochgradig ändern. Zu diesem Zweck nutzte man eine Kombination aus der Feature-Based-Matching-Methode und intensitätsbasiertem Matching in Verbindung mit einer Kreuzkorrelation für die Zuordnung korrespondierender Punkte.

Es stellte sich heraus, dass diese klassischen Ansätze der Photogrammetrie durchaus geeignet waren, um Verknüpfungspunkte zwischen Bildpaaren für den Helikopterflug automatisch zu generieren. Die Abbildung 4.6 zeigt gefundene Verknüpfungspunkte aus einem ersten Suchlauf für zwei aufeinander folgende Bilder. Anhand dieser Bilder wurden verschiedene



Abb. 4.6: FBM für eine Bildfolge aus einer Helikopterbefliegung

Einschränkungen bzw. Grenzen des angewandten Verfahrens bereits deutlich. Für die vom Projektionszentrum weiter entfernte Fläche des Geländes wurde eine Vielzahl guter korrespondierender Punkte gefunden, während das für den Tower, der aus dem Gelände herausragte und dem Projektionszentrum näher lag, nicht der Fall war. So war erkennbar, dass sich das Gelände links neben dem Tower in der Bilddarstellung nur geringfügig änderte, während der Tower bereits sichtbar verkippte. Dies führte für detektierte Bodenmerkmale, im Gegensatz zu korrespondierenden Gebäudemerkpunkten, zu einer geringfügigen Änderung ihrer Anordnung am Boden. Die Begründung dafür war in der projektiven Verzerrung zu finden, die bei höheren Entfernungen zum Aufnahmeort an Einfluss verliert. Eine Korrespondenzanalyse, die eine gleichmäßige Verteilung von Verknüpfungspunkten liefert, scheiterte damit bereits am euklidischen Ansatz des Verfahrens.

Gleiche Ursachen konnten für die Bildfolgen der UAV-Befliegung gefunden werden. Im Vergleich zur Helikopterbefliegung verstärkte sich der Effekt aufgrund eines kürzeren Aufnahmeabstandes. Dabei lag die projektive Verzerrung insbesondere in einer Instabilität der Aufnahmeplattform bzw. an der manuellen Nachsteuerung des Headings beim Umflug um die Gebäudeecken begründet.

Kleine Änderungen des Blickwinkels der Kamera zum Tower hatten bei der größeren Entfernung des Helikopters einen wesentlich niedrigeren Einfluss auf die projektive Verzerrung des Towers im Bild als die kürzeren Objektabstände des UAV. Aus den Eigenschaften des Matchingalgorithmus', geringfügige Maßstabsunterschiede, kleine Änderungen der Drehwinkel sowie Translationen zwischen zwei Bildern bewerkstelligen zu können, leitet sich der grundsätzliche Einsatz für die Luft- und Satellitenbildauswertung ab, die mit Hilfe von Senkrechtaufnahmen annähernd den Normalfall der Photogrammetrie repräsentieren. Dieses Bildmatchingverfahren war aus den genannten Gründen daher nur für die Bildfolgen der Helikopterbefliegung von Nutzen. Da hohe Bildfolgen für den Helikopter im Gegensatz zu den UAV-Aufnahmen nur partiell für einzelne Gebäudeansichten vorlagen (vgl. Abschnitt 3.4.2), konnte das Verfahren jedoch nicht auf sämtliche Helikopteraufnahmen angewendet werden.

Da man sich das Ziel gesetzt hatte, sämtliche Bilddaten zumindest semiautomatisch zu matchen, verzichtete man auf die Möglichkeit, die Einzelbilder der UAV-Befliegung einzig durch eine manuelle Bildpunktmessung zu verknüpfen. Der immens hohe Zeitaufwand dieses Verfahrens sprach ebenfalls dagegen. Deshalb wurde der Versuch unternommen, Verknüpfungspunkte mit Hilfe eines projektiven Ansatzes (vgl. Abschnitt 2.4) zu generieren. Hierzu stand ein Programm zur Verfügung, das zwar noch in der Abteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* entwickelt wurde, aber bereits den 8-Punkt-Algorithmus zur Berechnung der Fundamentalmatrix (vgl. Abschnitt 2.4) der projektiven Geometrie berücksichtigte. Mit dieser Methode konnten mit einem hohen Korrelationskoeffizienten keine homologen Punkte detektiert werden. Über die Herabsetzung des Koeffizienten wurde eine Vielzahl korrespondierender Punkte generiert, wobei die Anzahl von Ausreißern deutlich höher war, als die Menge echter detektierter homologer Punkte.

Bei genauerer Betrachtung des implementierten Algorithmus' konnte ein maßgeblicher Nachteil der Software ausgemacht werden. Mit Hilfe der projektiven Geometrie konnte zunächst eine Epipolargeometrie gefunden werden, die die perspektivische Abbildung verschiedener extrahierter Bildmerkmale berücksichtigte. Anschließend erfolgte die Suche korrespondierender Merkmale auf den Epipolarlinien jedoch mit Hilfe der Kreuzkorrelation. Wie bereits gezeigt wurde, ist diese nur begrenzt invariant gegenüber Bildverschiebungen, da sich die Perspektive herausragender Elemente in Richtung des Projektionszentrums stark ändern kann. Für die Verdeutlichung dieses Problems soll die Darstellung eines Fahnenmastes mit seinem Fundament in Abbildung 4.7 dienlich sein. Die Änderung der Perspektive für die Ansicht des

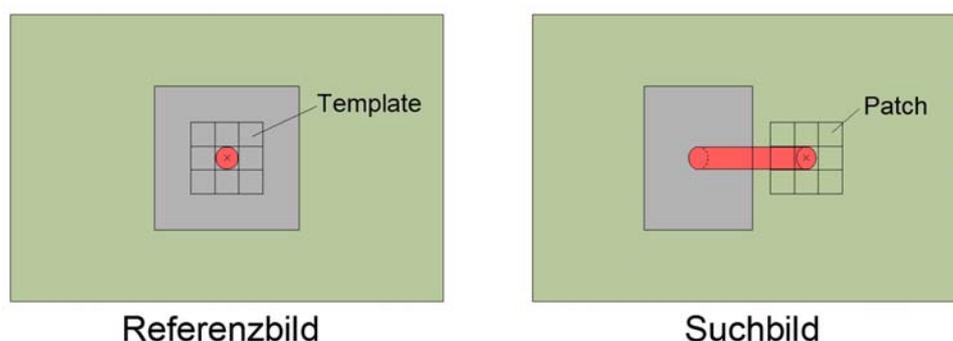


Abb. 4.7: Unterschiede zwischen Template und Patch bei starker perspektivischer Änderung

Fahnenmastes zwischen dem Referenz- und dem Suchbild führt dazu, dass der identische Punkt, der den Mittelpunkt am oberen Ende des Mastes kennzeichnet, mit Hilfe eines hohen Korrelationskoeffizienten selbst entlang einer Epipolarlinie nicht gefunden werden kann, da sich korrespondierende Merkmale bzw. das Template und das Patch erheblich unterscheiden. Das Herabsetzen der Mindestkorrelation zwischen Template und Patch hat zur Folge, dass ein niedrigerer Grad der Ähnlichkeit beider Intensitätsmatrizen akzeptiert und eine hohe Anzahl an

Falschzuordnungen für das Verfahren vorliegt. Eine Eliminierung der Ausreißer, z.B. mit Hilfe der RANSAC-Methode, kann für eine Verbesserung des Ergebnisses sorgen. Die Verteilung der Verknüpfungspunkte bleibt bei hohen perspektiven Änderungen von Bild zu Bild in jedem Fall fraglich, da das Programm aufgrund der Kreuzkorrelation dazu neigt, korrespondierende Punkte für Objekte zu bestimmen, die weiter entfernt vom Aufnahmeort liegen. So kam man zu der Erkenntnis, dass das Programm für die Anwendung im Nahbereich zum einen verbessert werden muss und zum anderen keine adäquate Lösung für die konvergente Aufnahmekonfiguration der UAV-Bilddaten liefert.

Die Suche nach einem Algorithmus, der unempfindlich gegenüber der geometrischen Deformation bzw. projektiven Verzerrungen ist sowie die weiteren bereits erwähnten Kriterien erfüllen kann, führte zum SIFT-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Eine nicht patentgeschützte Nachentwicklung namens SURF⁴³, welche die Gaußfilterung durch einen Mittelwertfilter ersetzt und den Algorithmus beschleunigt [Bay et al. 2008: S. 346 ff.] wurde im Jahre 2006 erstmals veröffentlicht. Die Umsetzung des SURF-Verfahrens in einen *MatLab*-Code konnte auf der Homepage des *MatLab*-Entwicklers *Mathworks* gefunden werden [Kroon 2010]. Da sich die Verfahren bis auf die Bildglättung gleichen, wird im weiteren Verlauf auf das SIFT-Verfahren verwiesen.



Abb. 4.8: Terrestrische Bildfolge mit der *Ricoh GR Digital III*

Eine Untersuchung des SIFT-Verfahrens sollte Aufschluss über die Möglichkeiten und Grenzen des Algorithmus' im Bezug auf die zugrunde liegenden Bilddaten der UAV-Befliegung bzw. der

⁴³Speeded Up Robust Features

terrestrischen Aufnahmen der *Ricoh GR Digital III* geben. Dazu wurde zunächst eine terrestrische Bildfolge gemäß der Abbildung 4.8 ausgewählt.

Da sowohl die terrestrische als auch die UAV-basierten Bildaufnahmen nicht in gleichmäßigen Abständen zueinander und folglich in inhomogenen Blickwinkeln zum Gebäude erfolgten, sollte der SIFT-Algorithmus auf verschiedene projektive Verzerrungen getestet werden. Um die Zunahme der perspektiven Änderung zwischen Bildern zu simulieren, wurde ein Bild als Referenzbild (Bild 2) festgelegt und mit dem Folgebild sowie deren Nachfolger die Verknüpfungspunktesuche vollzogen. Dabei hat man sich als Abbruchkriterium für die Suche auf 80 Punkte festgelegt, um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu wahren. Die Ergebnisse zeigen die nachfolgenden Abbildungen 4.9 bis 4.12. Das Referenzbild ist jeweils auf der rechten Seite dargestellt. Die farbigen Linien sorgen für einen schnellen Überblick und kennzeichnen die Verbindungen gefundener homologer Punkte.



Abb. 4.9: SIFT für Folgebilder (Bild 2 mit Bild 1)

Die Abbildung 4.9 spiegelt das Matchingresultat des Referenzbildes mit seinem Vorgängerbild wider. Zwischen diesen Bildern waren geometrische Unterschiede der Bildinhalte im Vergleich zu den anderen Bilddaten recht niedrig. Es wurden Punkte in der Umgebung als auch auf dem Gebäude gefunden, sodass im Rahmen des dargestellten Inhalts eine gute Verteilung dieser Punkte gegeben war. Betrachtet man die Fenster des ersten Gebäudegeschosses, so waren wenige Fehlzuordnungen zwar erkennbar, die Mehrheit der gefundenen Punkte waren jedoch echte homologe Punkte.

Die Abbildung 4.10 gibt das Ergebnis für das gleiche Bildpaar mit Hilfe des Feature-Based-Matchings wieder. Es wurden verschiedene Punkte gefunden, die fast ausschließlich in der Gebäudeebene lagen und eine mangelnde Verteilung aufwiesen. Fehlerhafte Zuordnungen konnten jedoch nicht erkannt werden.

In der Abbildung 4.11 ist das Resultat des SIFT-Algorithmus für das Referenzbild und seinem Folgebild sehen. Schräg durch die Bilder verlaufende Verbindungslinien zeigten dabei eindeutige Fehlzuordnungen der Merkmale auf. Weitere Ausreißer wurden wiederum an Punkten in der

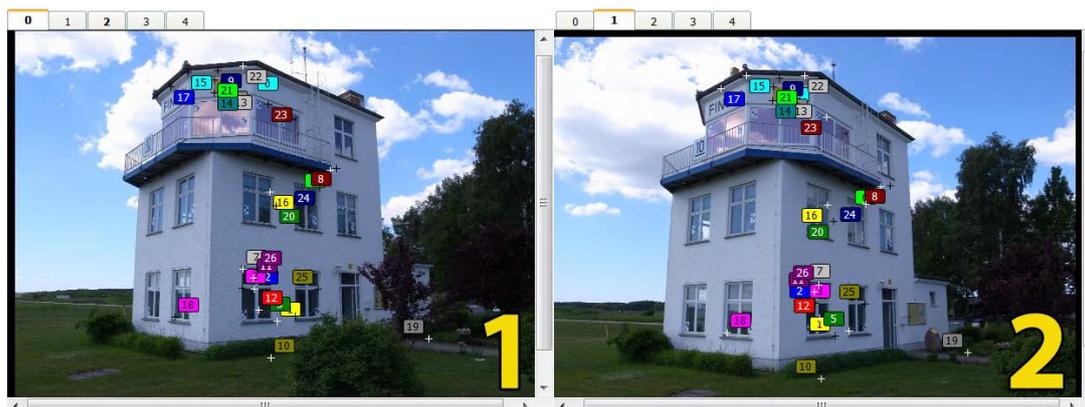


Abb. 4.10: FBM für Folgebilder (Bild 2 mit Bild 1)

Nähe der Fenster des ersten Stockwerkes sichtbar. Dennoch konnten weitere Matchingpunkte erkannt werden, die eine richtige Zuordnung vermuten ließen. Gleichzeitig wurde die Zunahme falscher Punkte deutlich, die auf eine hohe Änderung der perspektiven Ansicht des Towers in den Bildern zurückzuführen waren. Mit Hilfe des Feature-Based-Matchings konnten für dieses Bildpaar keine weiteren homologen Punkte automatisch detektiert werden.



Abb. 4.11: SIFT für Folgebilder (Bild 2 mit Bild 3)

Die letzte Abbildung 4.12 des ersten Beispiels kennzeichnet ein Bildpaar mit etwa 40 Grad unterschiedlichen perspektivischen Inhalts. Es wurden auch in dieser Konstellation echte homologe Punkte gefunden. Falsche Punktzuordnungen gab es mit den Fenstern erneut auf ähnlich strukturierten Elementen, die in gleichen Objektebenen lagen. Auffällig war, dass Fehlzuordnungen insbesondere an der in den Bildern erfassten Vegetation zunahmen.

Für ein fünftes Bild, eine etwa 45 Grad konvergente Aufnahme zum Referenzbild, konnte keine brauchbare Korrespondenzanalyse mit SIFT durchgeführt werden. Es wurden zwar homologe Punkte gefunden, die bei genauer Betrachtung im vollen Umfang als Fehlzuordnungen anzusehen waren.



Abb. 4.12: SIFT für Folgebilder (Bild 2 mit Bild 4)

Mit Hilfe dieses Beispiels konnte gezeigt werden, dass es grundsätzlich möglich ist, für einen ungleichmäßigen Bildverband, der in einem sehr dichten Abstand zum Tower aufgenommen wurde, Verknüpfungspunkte automatisch zu generieren, die die gegenseitige Lage der Bilder herstellen. Die Aufnahmen um die Gebäudeecken stellten aufgrund der beschriebenen Probleme bei der Bildaufnahme eine der größten Herausforderungen für die Aufgabe der relativen Bildorientierung in Flugrichtung bzw. in Richtung der Reihenfolge der Aufnahmestandpunkte dar.

Anhand eines zweiten Beispiels wurde der SIFT-Algorithmus für die UAV-Aufnahmen in Richtung der Querüberlappung untersucht. Dazu wurden fünf Aufnahmen der Hauseingangsseite aus dem Überflug, den drei Umflügen sowie der Bodenaufnahme gemäß der Abbildung 4.13 genutzt. Es zeigte sich, dass trotz hoher perspektiver Verzerrungen, Beleuchtungsvariationen



Abb. 4.13: UAV-Bilddaten für eine Gebäudeseite

und Maßstabsunterschieden richtige Verknüpfungspunkte zwischen dem ersten und letzten Bildpaar gefunden werden können (vgl. Abbildungen 4.14 und 4.15). Einzig für den Übergang

zwischen diesen Paaren konnte aufgrund zu verschiedener Bildinhalte kein sinnvolles Bildmatingergebnis im Zusammenhang mit dem mittleren Bild erzielt werden.



Abb. 4.14: Übergang Dach zu Fassade



Abb. 4.15: Übergang UAV- zu Bodenaufnahme

Die Resultate der zweiten Untersuchung bewiesen, dass man mit Hilfe des SIFT-Algorithmus' in der Lage wäre, verschieden schräge Aufnahmen des Towers mit Hilfe gefundener korrespondierender Punkte relativ zu orientieren. Das Weglassen geplanter UAV-Umflüge (vgl. Abschnitt 3.4.2) führte, wie die Untersuchung weiter aufzeigte, jedoch zu sehr hoch ausgeprägten Änderungen des Bildinhaltes zwischen den Bildern der Umflüge und damit zu teilweise unmöglich verknüpfbaren Bildkonstellationen.

Es ist kein Auswerteprogramm für die Nahbereichsphotogrammetrie bekannt, das sowohl die projektive Geometrie als auch den patentierten SIFT-Algorithmus bei einer automatischen Verknüpfungspunktsuche verwendet. Es gibt jedoch eine Reihe leistungsstarker Programme, wie *Photosynth* der *Microsoft Corporation* zur Panoramabilderstellung, die diese Methoden gemeinsam nutzen. Eine freie Software, die auch die Grundlage des Programms *Photosynth* bildet

[Birnbach et al. 2009: S. 3], ist *Bundler* vom Entwickler *Noah Snavely*. Das Programm *Bundler* basiert auf einer structure-from-motion-Methodik, die mit Hilfe des SIFT-Operators umgesetzt wird [Snavely et al. 2008: S.3]. Dabei werden dreidimensionale Strukturen eines Objekts durch die Analyse der Kamerabewegungen rekonstruiert. Die Abbildung einer solchen Struktur aus einer hohen Anzahl an Einzelpunkten stellt die Gesamtheit der gefundenen homologen Punkte im Modellraum zwischen allen beteiligten Bildern des Verfahrens dar. Zur Bestimmung der Fundamentalmatrizen nutzt *Bundler* einen 5-Punkt-Algorithmus [Snavely 2010]. Die erforderlichen Größen des 5-Punkt-Algorithmus' zur Beschreibung der inneren Orientierung der Kamera für jedes Einzelbild werden aus den Metadaten der Bilddateien ausgelesen.

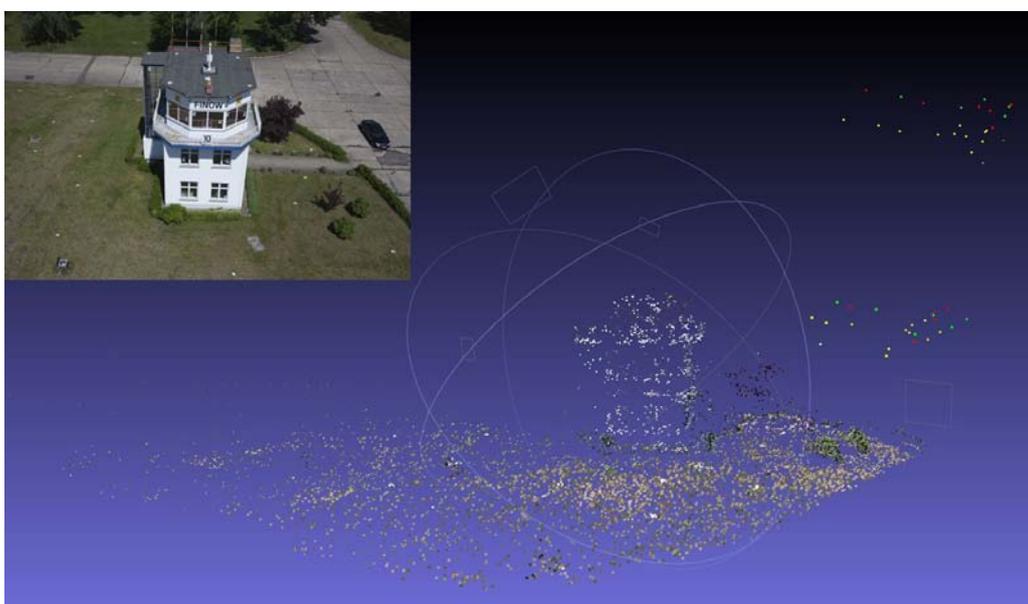


Abb. 4.16: homologe Punkte aus *Bundler* dargestellt in *MeshLab* (Ansicht 1)

Man war mit *Bundler* in der Lage, die relative Orientierung von 28 UAV-Bildern für zwei UAV-Umflüge um eine Hausecke automatisch abzuleiten. Die dabei ermittelten homologen Punkte sind in den Abbildungen 4.16 und 4.17 dargestellt. Einzelne Strukturen, wie das Gelände des Balkons, bildeten sich sehr deutlich ab. Es war keine Verkippung der einzelnen Ebenen des Geländes und der Towerfassade erkennbar.

Dass das Modell dennoch nicht frei von Modellfehlern sein konnte, wurde aus der Kontrolle des Ausgabeprotokolls deutlich. Hierbei stellte insbesondere die Einführung einer neuen Kamera für jedes aufgenommene Bild einen Gegensatz zum klassischen photogrammetrischen Ansatz dar, der von einer über die Bildaufnahme stabilen kalibrierten Kamera ausgeht. Die Abbildung 4.18 kennzeichnet einen Auszug aus dem Protokoll zur Orientierung der Bilddaten in *Bundler* für die UAV-Aufnahmen.

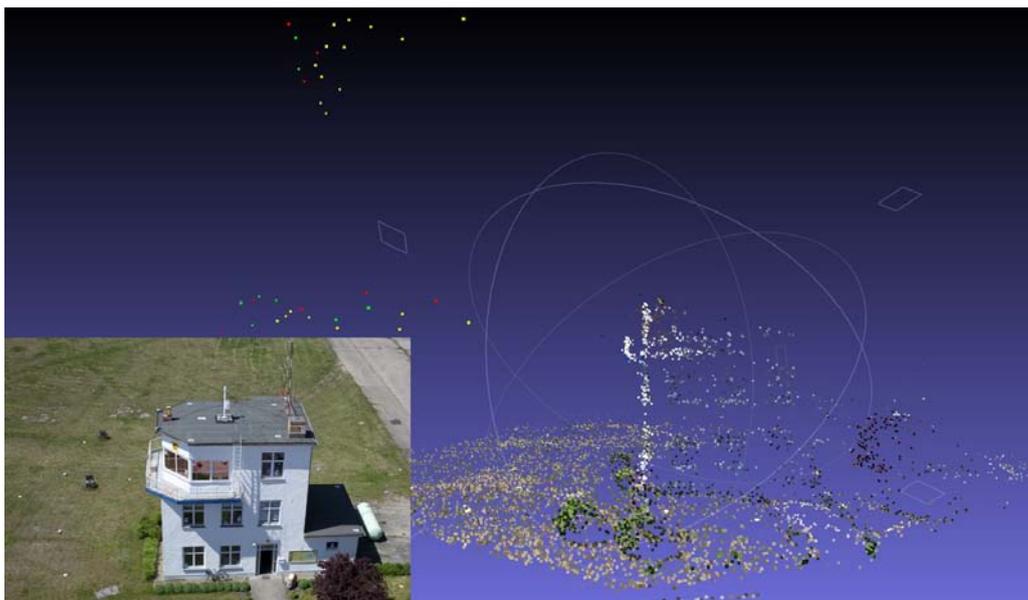


Abb. 4.17: homologe Punkte aus *Bundler* dargestellt in *MeshLab* (Ansicht 2)

Insgesamt wurden 10783 Punkte generiert. Zur besseren Übersicht wurden die einzelnen Kamerablöcke durch eine Leerzeile getrennt. Diese enthalten jeweils in der ersten Zeile die berechnete Kammerkonstante sowie zwei radial-symmetrische Verzeichnungsparameter des Objektivs. Die folgenden drei Zeilen kennzeichnen die Drehmatrix zur Beschreibung der Kamerarotation im Modellraum. Die letzte Zeile gibt die Lage des Projektionszentrums der Kamera wieder. Damit war die Kamera im photogrammetrischen Sinne nicht vollständig beschrieben, denn die Lage des Bildhauptpunktes wurde nicht angegeben. Unter der Annahme, dass die Bildhauptpunkt-lage in *Bundler* als Sensormitte angenommen wird, stellten sich weiterhin sehr hohe Differenzen für die berechneten Verzeichnungswerte ein.

Die Tabelle 4.8 kennzeichnet gleiche Erkenntnisse für die Berechnung der Kammerkonstanten. Neben dem Unterschied zur DOE-Kalibrierung von mehr als 40 Mikrometer, variierten die Kammerkonstante für die ersten fünf Bilder um bis zu 30 Mikrometer. Mit diesen

Bildnr.	$\frac{1}{3} C_k$ [Px] (Bundler)	C_k [Px]	C_k [mm]
Bild 1	981.49	2944.47	6.1834
Bild 2	980.35	2941.04	6.1762
Bild 3	982.46	2947.37	6.1895
Bild 4	984.81	2954.44	6.2043
Bild 5	985.63	2956.88	6.2095

Tab. 4.8: Unterschiedliche Kammerkonstanten aus dem Programm *Bundler*

Erkenntnissen wird eindeutig, dass sämtliche Restfehler des approximierten relativen Modells auf die innere Orientierung der Kamera zurückgeführt werden. Das zugrunde liegende relative

```
# Bundle file v0.3
28 10783
9.8149000407e+002 -3.3947720914e-002 2.1535377531e-002
9.7652475324e-001 1.9606282772e-001 -8.9211960460e-002
1.3546065154e-001 -2.3694341066e-001 9.6203338405e-001
1.6748079945e-001 -9.5153412326e-001 -2.5793990402e-001
4.4815893110e-001 -2.8638444361e+000 -3.0850300111e-001

9.8034807787e+002 -3.2183409038e-002 1.6246168505e-002
9.9599332016e-001 -2.9091997064e-002 8.4563360241e-002
4.8667136686e-002 9.6964580361e-001 -2.3962162953e-001
-7.5025435654e-002 2.4277699899e-001 9.6717656752e-001
-1.7145630542e-001 1.0906789475e+000 -2.0018230496e+000

9.8245766495e+002 -3.8502630981e-002 2.7850737599e-002
-9.9200490622e-001 -1.9991866624e-002 -1.2460574348e-001
-1.3864661901e-002 -9.6413093102e-001 2.6506474492e-001
-1.2543539049e-001 2.6467314393e-001 9.5614543334e-001
1.8159124591e-001 -1.1491254151e+000 -1.9817367966e+000

9.8481424322e+002 -5.3726218603e-002 5.5540871896e-002
-9.9383246518e-001 -2.0292122372e-003 -1.1087341179e-001
-2.6404935762e-002 -9.6674420654e-001 2.5437849453e-001
-1.0770241647e-001 2.5573721163e-001 9.6072819677e-001
8.6296353806e-002 -1.1497363116e+000 -1.9825986761e+000

9.8562792574e+002 -8.6258710966e-002 1.2990976157e-001
9.6789513408e-001 -2.0889027834e-001 -1.3979935996e-001
1.6747809453e-001 9.5069550255e-001 -2.6101561121e-001
1.8743024645e-001 2.2922240958e-001 9.5515809668e-001
4.2162624420e-001 1.1947789280e+000 -1.9271385857e+000
```

Abb. 4.18: Auszug aus dem Ergebnisprotokoll bundle.out

Modell des Algorithmus' wird über diesen Zusammenhang eindeutig bestimmbar, es bietet jedoch keinen realen Zusammenhang zur mathematischen Beschreibung des physikalischen Kameramodells. Die zu erwartenden Ergebnisse aus *Bundler* stellen demnach keine originalgetreue Abbildung der Realität dar. Damit kann *Bundler* aus photogrammetrischer Sicht als Hilfswerkzeug verstanden werden, mit dem man in der Lage ist, eine Vielzahl homologer Punkte zu bestimmen und die gegenseitige Lage von Bildern ohne Näherungswerte automatisch wieder herzustellen. Die Genauigkeit des *Bundler*-Algorithmus' bleibt zu prüfen. Ein erster Schritt kann in diesem Zusammenhang eine klassische photogrammetrische Bündelblockausgleichung unter Einbeziehung aller automatisch generierten Bildpunktmessungen darstellen.

Projektbegleitende Kalibrierung der *Canon EOS 5D Mark II* Mit der Analyse der Kalibrierungsdaten für die *Canon EOS 5D Mark II* kam man zu dem Ergebnis, dass die innere Orientierung der Kamera im Kalibrierzeitraum instabil war. Eine zeitliche Betrachtung der Kalibrierungen führte zu der wahrscheinlichen Erkenntnis, dass sich maximale Änderungen der inneren Geometrie der Kamera während der eigentlichen Bildaufnahme einstellten. Mit Hilfe der generierten homologen Punkte aus dem FBM-Verfahren sollte dennoch versucht werden, eine projektbegleitende Kalibrierung für die Kamera durchzuführen und gegebenenfalls den endgültigen Nachweis der unzumutbaren Verwendung der Amateurkamera *Canon EOS 5D Mark II* für photogrammetrische Anwendungsfälle zu erbringen.

Zu diesem Zweck wurden 72 Aufnahmen der Helikopterbefliegung sowie der Bodenaufnahme verwendet, die die Ost- und Südseite des Towers sowie das Dach gemäß der Abbildung 3.2 zeigten. Sämtliche sichtbare Pass- und Verknüpfungspunkte an und um dem Gebäude herum wurden manuell gemessen. Die Triangulation der einzelnen Bildverbände erfolgte in CAP. Dabei wurde die innere Orientierung der Kamera bei jeder Bündelausgleichung freigegeben, sodass eine angepasste Kameraorientierung für jede Bildfolge berechnet werden konnte. Grobe Fehler des FBM-Verfahrens wurden dabei erkannt und eliminiert. Man war sich bewusst, dass eine gegebene Kalibrierung dazu führen kann, dass weitere fehlerhafte Bildpunktmessungen detektiert werden können, doch aufgrund der vermuteten Änderung der inneren Kamerageometrie war man darauf bedacht, sämtliche Fehlereinflüsse in die Kamerakalibrierung zu rechnen. Ein Vergleich der berechneten Kalibrierungswerte zeigte bereits starke Schwankungen auf, wengleich gesagt werden muss, dass eine ausreichende Aufnahmeconfiguration zur Kamerabestimmung mit Hilfe einzelner Bildverbände nicht gegeben war. Daher sollte die anschließende gemeinsame äußere Orientierung aller 72 Bilder zu einer geeigneten Kamerageometrie führen. Diese stellte im Gegensatz zu einzelnen Bildverbänden eine wesentlich bessere Aufnahmeconfiguration zur Kamerakalibrierung dar (vgl. Abschnitt 2.1.1). So wollte man zunächst eine über den gesamten Bildverband gültige Kamerageometrie bestimmen und über eine erneute Ausgleichung mit kalibrierter Kamera den Bildverband orientieren.

Es konnte mit diesem Ansatz keine gültige innere Kameraorientierung bestimmt werden. Die komplexe Aufnahmeanordnung führte dazu, dass eine während der Bündelausgleichung bestimmte Kamera nicht jeder Aufnahme gerecht wurde. Daraus resultierende grobe Fehler waren die Folge der Bündelblockausgleichung (vgl. Anhang D). Durch die Kontrolle angezeigter Fehlmessungen konnten berechnete grobe Fehler nicht nachvollzogen werden. Eine Eliminierung dieser falsch ermittelten groben Fehler führte dazu, dass weitere Fehlmessungen detektiert wurden, bis die Redundanz der Bündelausgleichung nicht mehr gegeben war.

Wengleich nicht von formatfüllenden Aufnahmen gesprochen werden konnte, waren 72 Bilder nicht ausreichend, um die Kamera *Canon EOS 5D Mark II* projektbegleitend zu kalibrieren. Damit wurde gezeigt, dass eine photogrammetrische Verwendung dieser Kamera nicht ratsam ist.

Orientierung der Nadiraufnahmen mit der *Ricoh GR Digital III* Ein Ziel der Arbeit war es, die absoluten Orientierungen beider Befliegungen miteinander zu vergleichen. Dabei sollten mögliche Einflüsse der Kameraplattformen sowie der Kameraeigenschaften auf die Orientierungsdaten untersucht werden. Aufgrund der bereits angeführten instabilen inneren Geometrie der *Canon EOS 5D Mark II* war eine vergleichende Analyse der Orientierungsdaten nicht möglich. Die zusätzlichen Probleme bei der Umsetzung der Flugplanung zeigten jedoch die deutlichen Nachteile des Helikopters im Zusammenhang mit der Nutzung für Aufgaben

im photogrammetrischen Nahbereich auf.

Verschiedene Probleme, die sich für die Orientierung der UAV-Bilddaten für den angestrebten Auflösungsbereich ergaben, wurden in den vorherigen Abschnitten erläutert. Diese standen im direkten Zusammenhang mit der Bedienung des UAVs und nicht mit der verwendeten Kamera. Um die Eignung der *Ricoh GR Digital III* für die photogrammetrische Anwendung nicht nur über zwei DOE-Kalibrierungen nachzuweisen, sollten die 56 Senkrechtaufnahmen der UAV-Befliegung orientiert werden. Diese wurden zu diesem Zweck noch einmal mit *Match-AT* in der Version 5.2 prozessiert. *Match-AT* ist zum einen speziell für den Luftbildfall entwickelt worden, zum anderen bestanden zu dieser Software bereits Schnittstellen zu weiterverarbeitenden Programmen des *DLR*.

Als Näherungswerte für die äußere Orientierung in *Match-AT* diente die Flugplanung des *AscTec Falcon 8*. Die Kamera wurde über die Parameter der ersten DOE-Kalibrierung beschrieben. In *Match-AT* wird die Angabe der Bildpunktmessgenauigkeit a priori zusätzlich in automatische und manuelle Messungen getrennt. Dabei wurde ein Drittel der Pixelgröße für die manuelle Messung und ein Sechstel für die automatische Messung angegeben. Nachdem die integrierten Bildmatchingverfahren⁴⁴ sehr gut verteilte Verknüpfungspunkte generieren konnten, wurden anschließend die Passpunkte, die um den Tower verteilt waren, manuell gemessen. Eine Nachprozessierung sowie das Nachmessen bzw. Beseitigen fehlerhafter Bildpunkte führte zu fehlerfreien Ergebnissen.



Abb. 4.19: Flughöhe des UAV stimmt nicht mit der Planung überein

Aus dem Auswerteprotokoll ließ sich zunächst ein weiterer Nachteil des *AscTec Falcon 8* ableiten. Den Orientierungsdaten war zu entnehmen, dass das UAV etwa 22.5 Meter über dem Höhenniveau des lokalen Systems geflogen ist. Dies entsprach annähernd der Höhe über Grund. Geplant war, dass das UAV mit einem Abstand von 15 Metern zum Dach über das zehn Meter hohe Gebäude fliegen sollte. Der *AscTec Falcon 8* flog damit durchschnittlich 2.5

⁴⁴FBM für niedrige und LSM für hohe Auflösungsstufen der Bildpyramide

Meter zu tief, was ebenfalls an den Bildinhalten der Schrägaufnahmen nachgewiesen werden konnte. Diese waren so geplant, dass der Tower vollständig abgebildet wird. Aufgrund dessen, dass das UAV zu tief flog, war die abgebildete Fläche des umliegenden Geländes im Bild deutlich höher als erwartet (vgl. Abbildung 4.19). Damit stellten sich Objektauflösungen für die Dachfläche von 0.4 und für das Gelände von etwa 0.8 Zentimeter pro Pixel ein.

Wie dem Auszug aus dem Ausgabeprotokoll von *Match-AT* (vgl. Abbildung 4.20) weiter zu

standard deviations of exterior orientation parameters (px, py, pz in [meter] omega,phi,kappa in [deg/1000])

photo ID	px	py	pz	omega	phi	kappa
764	0.002	0.002	0.001	6.6856	6.1050	2.4619
765	0.003	0.002	0.001	7.1324	6.3648	2.5403
766	0.002	0.002	0.001	6.8929	6.0570	2.4600
767	0.003	0.002	0.001	7.2706	6.5219	2.4824
768	0.003	0.002	0.001	7.2786	6.4797	2.5972
769	0.002	0.002	0.001	5.9693	5.4572	2.2210
770	0.002	0.002	0.001	5.9438	5.8037	2.2390
771	0.002	0.002	0.001	6.2490	6.2489	2.3763
772	0.003	0.002	0.001	6.5434	6.9316	2.4676
773	0.002	0.002	0.001	6.2237	5.6811	2.3071
774	0.002	0.002	0.001	6.7846	5.5690	2.2517
775	0.002	0.002	0.001	6.8096	5.4379	2.2515
776	0.002	0.002	0.001	7.1537	5.5273	2.3328
777	0.002	0.002	0.001	6.8300	5.4087	2.2469
778	0.002	0.002	0.001	6.2161	4.8306	2.1719
779	0.002	0.002	0.001	6.2040	4.6319	2.0967
780	0.002	0.002	0.001	5.9906	4.7264	2.1167
781	0.002	0.002	0.001	5.9502	4.7595	2.1048
782	0.002	0.002	0.001	6.0617	4.6564	2.1816
783	0.002	0.002	0.001	5.4973	4.5653	2.1454
784	0.002	0.002	0.001	5.8536	4.9508	2.3645
785	0.002	0.002	0.001	5.7535	4.8646	2.2353
786	0.002	0.002	0.001	5.7939	5.1890	2.2180
787	0.002	0.002	0.001	5.9451	5.0611	2.2078
788	0.002	0.002	0.001	5.8739	5.1408	2.1788
789	0.002	0.002	0.001	5.5561	5.2430	2.1535
790	0.002	0.002	0.001	6.3375	5.2533	2.1951
791	0.002	0.002	0.001	6.4680	5.4716	2.2300
792	0.002	0.002	0.001	7.4244	4.9624	2.3651
793	0.002	0.002	0.001	6.9436	4.8045	2.2475
794	0.002	0.002	0.001	6.4775	4.5441	2.2040
795	0.002	0.002	0.001	6.3814	4.5671	2.1611
796	0.002	0.002	0.001	6.4199	4.5921	2.1846
797	0.002	0.002	0.001	6.0806	4.5434	2.1765
798	0.002	0.002	0.001	6.0172	4.6617	2.1558
799	0.002	0.002	0.001	6.0127	4.7107	2.1861
800	0.002	0.002	0.001	5.9509	4.7385	2.1879
801	0.002	0.002	0.001	5.8725	5.0167	2.2768
802	0.002	0.002	0.001	5.8344	5.4206	2.3242
803	0.002	0.002	0.001	5.7136	5.3697	2.2978
804	0.002	0.002	0.001	5.9311	5.8710	2.3391
805	0.002	0.002	0.001	5.8354	5.9586	2.4016
806	0.003	0.002	0.001	6.3724	6.8650	2.4969
807	0.003	0.002	0.001	6.2811	6.8541	2.4520
808	0.002	0.002	0.001	6.0485	6.2981	2.3248
809	0.002	0.002	0.001	6.0249	5.5418	2.2671
810	0.002	0.002	0.001	5.9770	5.1194	2.2310
811	0.002	0.002	0.001	6.6496	5.0133	2.2459
812	0.002	0.002	0.001	6.2807	4.9711	2.3091
813	0.002	0.002	0.001	7.1387	5.0572	2.2798
814	0.002	0.002	0.001	7.1655	4.8802	2.2176
815	0.002	0.002	0.001	7.9411	5.4399	2.4416
816	0.002	0.002	0.001	7.3937	5.1807	2.2821
817	0.002	0.002	0.001	7.5012	5.2721	2.3666
818	0.002	0.002	0.001	8.2418	5.4633	2.5261
819	0.002	0.002	0.001	8.4798	5.4666	2.4966

Abb. 4.20: Genauigkeitsangaben zur Prozessierung der UAV-Daten in *Match-AT*

entnehmen war, konnten die Aufnahmen der *Ricoh GR Digital III* im Rahmen der angegebenen Passpunktgenauigkeit auf ± 2 Millimeter in der Lage bezüglich ihrer X- und Y-Koordinate im lokalen System orientiert werden. Die Standardabweichung der Höhen der Projektionszentren im lokalen System lag durchschnittlich bei ± 1 Millimeter. Damit leistete die *Ricoh GR Digital III*, was von einer kalibrierten Kamera in der Photogrammetrie erwartet wird.

5 Visualisierung der Bilddaten

Aus den Senkrechtaufnahmen der UAV-Befliegung wurde ein hochaufgelöstes digitales Oberflächenmodell⁴⁵ prozessiert. Hierbei kam ein Stereobildmatchingverfahren zum Einsatz, das am *Institut für Robotik und Mechatronik* in Oberpfaffenhofen entwickelt wurde- das Semi-Global Matching⁴⁶. Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung ist eine sehr genaue Orientierung der Ausgangsdaten, da das pixelweise Matchingverfahren die Epipolargeometrie zwischen einzelnen Bildern ausnutzt. Weiterhin geht dieser Algorithmus ebenfalls von einem Lochkameramodell aus, womit die Vorprozessierung der Bilder schon vor der Orientierung nötig wird.

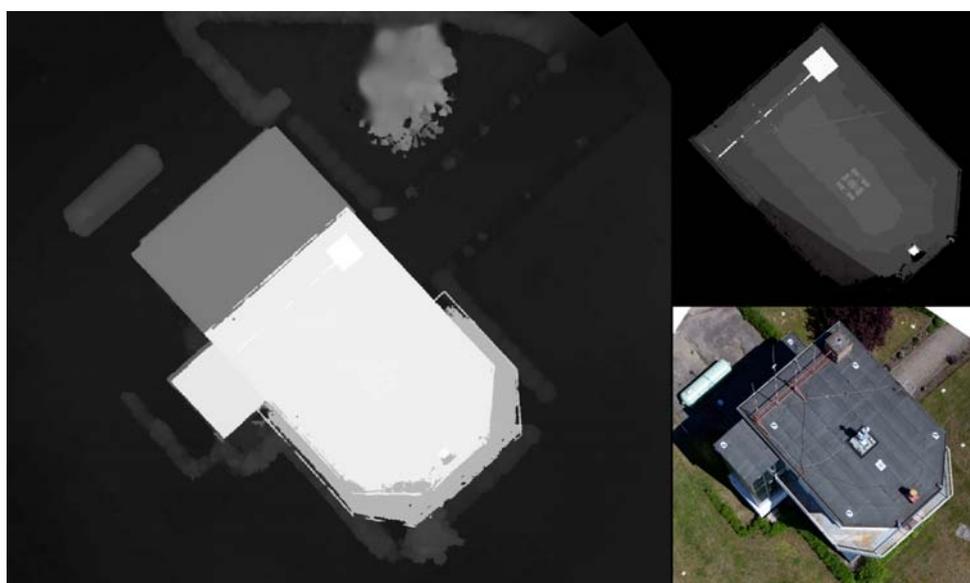


Abb. 5.1: DOM der UAV-Befliegung (links), Grauwertgespreiztes DOM für die Dachfläche (rechts)

Die Abbildung 5.1 zeigt das DOM der UAV-Befliegung. Die Auflösung des Modells beträgt 1.5 Zentimeter in Lage und Höhe. Mit diesen Werten wurden die Standardabweichungen der Bildorientierung für alle Parameter der äußeren Orientierung berücksichtigt, die in dieser Größenordnung an Einfluss verlieren.

Aus der Betrachtung des DOM war feststellbar, dass sich sehr geradlinige und homogene Kanten einstellen. Eine klare Abgrenzung flächenhafter Strukturen, wie dem Anbau, dem Dach des Towers sowie dessen Balkon und dem Treppenhaus, war möglich. Aber auch linienhafte Elemente wie das Geländer am Balkon, Dachrinnen oder auf dem Dach befindliche Kabel bildeten sich heraus. Vereinzelt unstetige Objektteile deuteten zum einen auf unregelmäßige Reflexionen an den Fensterfronten des oberen Stockwerkes des Towers, die zum Teil mit aufgenommen wurden und zum anderen auf vereinzelt Abschattungen oder fehlende

⁴⁵kurz: DOM

⁴⁶kurz: SGM

Informationen für diese Bereiche hin.

Die innere Orientierung der *Canon EOS 5D Mark II* war zwar nachweislich instabil, jedoch konnte mit Hilfe des alternativen Ansatzes der Computer Vision zur Herleitung der relativen Lage von Bildern eine Visualisierung der homologen Punkte für die erfassten Bilddaten der Kamera erfolgen. Dazu wurden die 72 Bilder, die auch bei der projektbegleitenden Kalibrierung zum Einsatz kamen, mit dem Programm *Bundler* orientiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Es wurde deutlich, dass eine hohe Anzahl von Bildern dazu führte, dass sich einzelne Objektstrukturen deutlich herausbildeten.

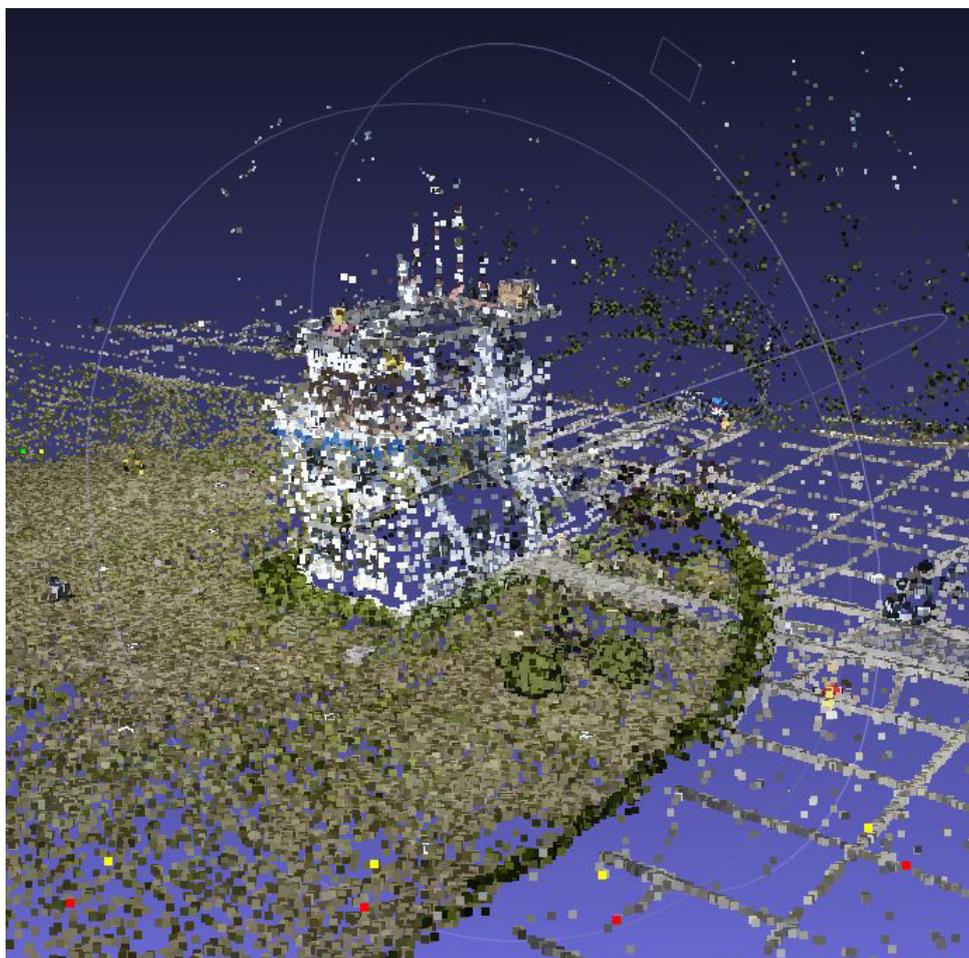


Abb. 5.2: Visualisierung homologer Punkte aus der Bildaufnahme mit der *Canon EOS 5D Mark II*

Die *Canon EOS 5D Mark II* ist daher nicht geeignet um wahre metrische Größen aus ihren Aufnahmen zu bestimmen, jedoch können aus fotografisch hochwertigen digitalen Bildern realitätsnahe dreidimensionale Modelle abgeleitet werden.

6 Fazit

Dieser Abschnitt dient dazu, die verschiedenen Erkenntnisse dieser Arbeit zusammenzufassen. In diesem Zusammenhang wird unter anderem noch einmal auf nachteilige Herangehensweisen zur Befliegung des Towers mit den zwei unterschiedlichen Kameraplattformen sowie die Nutzung von Amateurkameras zu photogrammetrischen Zwecken eingegangen.

Die Befliegung des Towers mit dem Helikopter *Bell 47* konnte nicht zufriedenstellend umgesetzt werden. Ein gleichzeitiges Navigieren und Bedienen der Kamera im Sinne der Flugplanung gestaltete sich schwierig und setzt ein gewisses Maß an Erfahrung voraus. Darüber hinaus waren geplante Geschwindigkeiten und sich daraus ergebende Überlappungen nur bedingt einhaltbar. Insbesondere für Flüge um den Tower herum konnten keine konstanten Geschwindigkeiten sowie Flughöhen gewährleistet werden. Weiterhin mussten verschiedene Sicherheitsaspekte, wie ein minimaler Abstand zum Gebäude und umliegender Objekte sowie eine Grundgeschwindigkeit zur Realisierung geradliniger Flugstreifen, berücksichtigt werden.

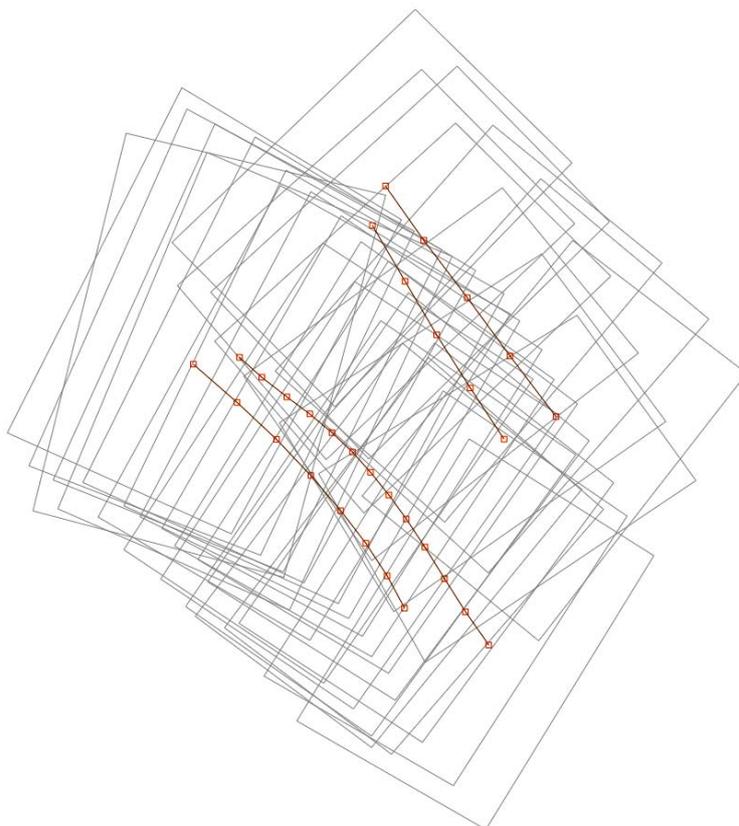


Abb. 6.1: Flugstreifen des Helikopterüberfluges

Die Abbildung 6.1 kennzeichnet die Flugstreifen des Helikopterüberfluges, die in *Match-AT* näherungsweise bestimmt werden konnten. Die geradlinigen Streifen zeigen, dass sich ein Helikopter für Flächenbefliegungen durchaus empfiehlt. Für die umfassende untersuchte photogrammetrische Anwendung im Nahbereich ist der Helikopter *Bell 47* als Kameraplattform jedoch ungeeignet.

Mit dem autonom fliegenden UAV *AscTec Falcon 8* konnten die verschiedenen Überlegungen aus der Flugplanung wesentlich besser umgesetzt werden. Die geplanten Kamerapositionen wurden vollständig angeflogen. Für die Anwendung im Nahbereich der Photogrammetrie stellte die Positionsungenauigkeit jedoch einen Nachteil dar, da sich geplante Überlappungen der Bilder zum Teil nicht einstellten oder die Bilder den Tower nur unzureichend abdeckten. Eine Kontrolle der Bilddaten vor Ort wird dadurch erforderlich. Mit der aktuellen Planungssoftware kann keine sinnvolle Regelung zur Änderung der Flughöhe vor Ort vorgenommen werden. Jeder Wegpunkt muss einzeln korrigiert werden. Aufgrund der ungenauen Positionsbestimmung des UAV müssen zusätzlich umliegende Objekte, wie Bäume oder Laternen in einem Radius von etwa drei Metern zum UAV, innerhalb der Flugplanung berücksichtigt werden. Der *AscTec Falcon 8* kann nach Herstellerangaben auch bei aufkommenden Winden bis zu zehn Meter pro Sekunde sicher geflogen werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Fluglage schon bei niedrigeren Windstärken nicht stabil bleibt. Leichte Kippungen in verschiedene Richtungen führten zu stark projektiven Änderungen im Bild. Für weitere Bildflüge mit dem *AscTec Falcon 8* wird daher empfohlen, an einem nahezu windstillem Tag zu fliegen sowie das UAV nicht am Wegpunkt verweilen zu lassen, sondern die Kamera im Flug auszulösen. Eine konstante Geschwindigkeit in Verbindung mit kurzen Verschlusszeiten sollte dabei zu einer stabileren Fluglage und damit zu homogeneren Bildverbänden führen.

Diese Erkenntnisse lagen vor der UAV-Befliegung nicht vor. Ein weiteres grundlegendes Problem stellen zusätzlich unbrauchbare Navigationsdaten des UAV dar, die nicht als Näherungswerte für eine Orientierung der Bilddaten im Nahbereich tauglich sind. Daher bestanden die Bemühungen vorrangig darin, Lösungen zu finden, mit denen auf Näherungswerte für die Orientierung der UAV-Daten verzichtet und die projektive Verzerrung zwischen den Bildern berücksichtigt werden kann. Es wurde ein möglicher Lösungsweg aufgezeigt, der, unter Nutzung des Programmes *Bundler* oder eines *SIFT-Matlab*-Codes, die Probleme der UAV-Befliegung mit den Mitteln der Computer Vision lösen kann. Eine Überführung des relativen Modells in ein übergeordnetes Koordinatensystem ist nach dieser Methode jedoch abhängig von Passpunktinformationen in den Bilddaten. Im Hinblick auf ein automatisiertes Gesamtverfahren bieten sich codierte Passpunktmarken an, wie sie am Beispiel der Testfeldkalibrierung in *Pictran-DE* Anwendung fanden.

Aufgrund der geringen Größe, einer umfangreichen Wegpunktplanung sowie der Möglichkeit,

die Kamera auf verschiedene Höhenwinkel auszurichten, eignet sich der *AscTec Falcon 8* sowohl für Flächenbefliegungen als auch bedingt für den Einsatz im photogrammetrischen Nahbereich im Sinne der beschriebenen Anwendung.

Die Kamerakalibrierungen sollten den Nachweis zur inneren Stabilität der Spiegelreflexkamera *Canon EOS 5D Mark II* sowie der Kompaktkamera *Ricoh GR Digital III* liefern sowie ein neues Verfahren zur geometrischen Kalibrierung von Kameras vorstellen und untersuchen, das in der Abteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* zunehmend an Bedeutung innerhalb der photogrammetrischen Auswertung gewinnt. Unterschiedliche Kalibrierergebnisse aus einer Testfeldkalibrierung und der Kalibrierung am DOE für die Spiegelreflexkamera konnten aus den Untersuchungen nicht eindeutig auf eine fehlerhafte Verfahrensweise einer der beiden Methoden zurückgeführt werden, da die zu kalibrierende Kamera eine hohe Instabilität der inneren Geometrie aufwies. Die Tatsache, dass sich konstante unabhängige Kalibrierergebnisse für die Kompaktkamera mit Hilfe der DOE-Kalibrierung einstellen, spräche für die Anwendbarkeit des Verfahrens. Erst ein Vergleich der Kalibrierung einer Messkamera im Testfeld sowie zusätzliche unabhängige Kalibrierreihen am DOE können Aufschluss über die Zuverlässigkeit und Stabilität des Verfahrens geben.

Es zeigte sich, dass die innere Orientierung der Spiegelreflexkamera mit dem 35mm-Wechselobjektiv nicht stabil bleibt. Beträchtliche Veränderungen der Parameter der inneren Orientierung können aus den vorliegenden Ergebnissen insbesondere der Anwendungsphase bzw. der eigentlichen Bildaufnahme zugesprochen werden. Die Freihandaufnahme und eine damit verbundene stetige Schwerkraftänderung am Objektiv können die Ursache sein. Unter der Voraussetzung einer geeigneten starren Fixierung des Wechselobjektives am Kameragehäuse ist ein zukünftiger Einsatz der Spiegelreflexkamera zu untersuchen. Aufgrund einer nachgewiesenen instabilen inneren Geometrie der *Canon EOS 5D Mark II*, ist eine weitere generelle photogrammetrische Nutzung der Kamera in dieser Konfiguration für die Fachabteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* nicht zu empfehlen.

Die Kompaktkamera erwies sich im Gegenzug als geeignetes kommerzielles Produkt in Verbindung mit der Nutzung an einem UAV. Die Parameter der inneren Orientierung waren im Anwendungszeitraum stabil, wobei durch weitere Kalibrierungen die Stabilität der optischen Achse der Kamera über einen längeren Zeitraum zu beobachten ist. Für Aufnahmen mit einer Objektauflösung von 0.5 Zentimeter pro Pixel ist ein Abstand zum Objekt von etwa 15 Meter zu wählen. Wesentlich kürzere Aufnahmeabstände sind zu vermeiden, da einerseits die Zahl der aufzunehmenden Bilder steigt und andererseits projektive Verzerrungen von Bild zu Bild stark zunehmen, wodurch eine relative Orientierung der Bilder unter Umständen nicht durchführbar wird. Die Kamera ist aufgrund ihres Gewichtes sowie ihrer Leistungsfähigkeit für die UAV-Photogrammetrie geeignet.

Im Hinblick auf eine automatische Orientierung von Bilddaten der *Ricoh GR Digital III* mit dem *AscTec Falcon 8* als Kameraträger sind für die Abteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* für zukünftige Missionen verschiedene Hinweise zu beachten. Für Objektauflösungen ab einem Zentimeter pro Pixel genügt ein Abstand von etwa 30 Metern. Projektive Verzerrungen sollten in diesem Abstand zum Objekt keinen Einfluss auf die relative Orientierung der Bilder in Flugrichtung haben, wie ähnliche Aufnahmen mit der *Canon EOS 5D Mark II* zeigten. Eine zusätzliche Voraussetzung dafür bildet die genügend hohe Anzahl der aufgenommenen Bilder. Im untersuchten Abstand von 15 Meter zum Objekt kommt man für die automatische Suche korrespondierender Punkte nicht ohne projektiver Geometrie und einem geeigneten Matchingalgorithmus aus. Da ein Abstand um 15 Meter nicht nur angestrebt wird, um die Objektauflösung zu steigern, sondern zusätzlich unabhängiger von umliegenden Objekten zu werden, wird es für die Fachabteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* erforderlich sein, Software zu nutzen oder zu entwickeln, die auf den Grundlagen des Computer Vision zur Suche homologer Punkte in Messbildern basiert, um zumindest eine automatisierte Lösung zur Bestimmung von Näherungswerten zu erhalten. Eine Orientierung der Bilder nach photogrammetrischen Gesichtspunkten und Genauigkeitsansprüchen vorausgesetzt, können die Algorithmen der Computer Vision zusätzlich zur Visualisierung bzw. Ableitung verschiedener Produkte und Anwendungen aus photogrammetrisch orientierten Bilddaten beitragen.

7 Ausblick

Die UAV-Photogrammetrie wird in verschiedener Hinsicht von Problemen begleitet, die eine Auswertung der Bilddaten behindern. Nachfolgend werden einige Möglichkeiten beschrieben, die die Genauigkeit des Verfahrens erhöhen sowie die Auswertung maßgeblich erleichtern können.

Das Fehlen guter Näherungswerte für die Bilddaten war ein Hauptproblem bei der Werkstellung dieser Arbeit, das zugegebenermaßen in seinem Ausmaß im Vorhinein zu unbesonnen eingeschätzt wurde. Die Beschaffung von guten Näherungswerten im Nahbereich kann aus vermessungstechnischer Sicht durch verschiedene Verfahren erfolgen. Eine nahe liegende Lösung zur Bestimmung der äußeren Orientierung des UAV bietet die tachymetrische Zielverfolgung, die zum einen der reinen Positionsbestimmung dienen kann, zum anderen aber auch der direkten Navigation des UAV. Ein autonomer Betrieb an Orten mit teilweisen oder vollständigen Abschattungen der Satellitensignale ist über diesen Ansatz gewährleistet. Darüber hinaus eröffnen sich durch einen möglichen Betrieb in geschlossenen Räumen weitere Anwendungsfelder. Neben der Datenkommunikation zwischen UAV und Tachymeter gehören die Echtzeitfähigkeit des Verfahrens sowie die Voraussetzung, dass ein am UAV befestigtes Prisma konstant angezielt werden kann, zu den Problemen, die beim Tachymetertracking zu lösen sind. Als Resultat lägen hochgenaue Positionen des UAV vor, jedoch blieben hohe Winkelfehler aus der niedrigen Auflösung der Sensoren bei dieser Näherungswertbestimmung bestehen.

Eine weitere Lösung für die Beschaffung genäherter Positionsdaten liefert das Differential-GPS-Verfahren. Mit Hilfe eines zusätzlichen Empfängers auf einem bekannten Punkt, der als Basisstation dient, kann die Positionsbestimmung gesteigert werden. Der Aufbau einer Funkstrecke zwischen Basisstation und UAV zum Senden der Korrekturdaten wird hierbei vorausgesetzt. Mit dieser Lösung kann ebenfalls keine hochgenaue Kamerarotation bestimmt werden. Zusätzlich erfordert ein genaues GPS-Verfahren eine andere GPS-Platine am UAV, die neben der Codelösung und der Frequenz L1 auch die Ionosphäreneffekte mit Hilfe der Frequenz L2 berücksichtigt.

Beide beschriebenen Verfahren dienen sowohl der Navigation des UAV als auch der Positionsbestimmung für eine spätere Bilddatenorientierung. Diese fundamentalen geodätischen Messtechniken werden zukünftig Einzug in die UAV-Photogrammetrie halten. Eine momentan begrenzte Leistungsfähigkeit der UAV-Photogrammetrie liegt insbesondere im hohen Preis für hochauflösendere Sensoren begründet, die die Anschaffungskosten eines *AscTec Falcon 8* leicht verdreifachen können. Die Arbeit hat mit SIFT gezeigt, dass es Algorithmen gibt, die ohne Näherungswerte für die äußere Orientierung der Bilddaten auskommen. Ob SIFT dabei nur die Näherungswerte zur Beschreibung der gegenseitigen Lage der Bilder liefern kann oder diese Form der Korrespondenzanalyse direkt zu einer photogrammetrisch anspruchsvollen

relativen Orientierung führt, müssen weitere Untersuchungen bzw. Masterarbeiten zeigen. Hohe zusätzliche Investitionen zur Leistungssteigerung eines ohnehin kostenintensiven UAV können nach dieser Erkenntnis der Arbeit jedoch entfallen.

Der Verwendung von Multicopter-Systemen für die UAV-Photogrammetrie stehen Modellhelikopter gegenüber. Schaut man sich die Flotte des *Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie* der *ETH Zürich* [Mautz 2010] an, so ist feststellbar, dass diese vorrangig Minihelikopter für verschiedene photogrammetrische Einsätze verwenden. Der Nutzungsvorteil bei Minihelikoptern ist zum einen eine höhere Payload, aber auch ein stabileres Flugverhalten aufgrund der Rotorgröße. Die Grenzen eines Multicopters wurden in dieser Arbeit aufgezeigt. Daher ist für die Abteilung *Sensorkonzepte und Anwendungen* das Flugmodell für die UAV-Photogrammetrie durchaus zu überdenken.

Dem Problem der instabilen Fluglage und einer damit verbundenen Abweichung von der Flugplanung kann jedoch auch auf anderem Wege begegnet werden. So stellt die sich daraus ergebene projektive Verzerrung von Bild zu Bild die grundlegende Problematik für die UAV-Photogrammetrie dar. Eine zweckmäßige Lösung, die sich daraus ergibt, ist die Anzahl der Bilder einer UAV-Aufnahme deutlich zu erhöhen. Dies kann durch eine Maximierung der Aufnahmefrequenz der Kamera erreicht werden. Ist die Anzahl maximaler Auslösungen nicht ausreichend, um einer instabilen Fluglage entgegenzuwirken, so wäre eine weitere Lösung, das Aufzeichnen des Bildfluges in einem Video. Verschiedene Hersteller von Kompaktkameras mit Festbrennweiten bieten bereits die Möglichkeit der hochauflösenden Videoaufzeichnung an [vgl. z.B. FUJIFILM Electronic Imaging Europe 2010]. Unter der Voraussetzung, dass eine Bildfolge mit sehr niedrigen Zeitparallaxen vorliegt, kann das Verfahren des optischen Flusses zur gegenseitigen Lagebeschreibung der Folgebilder angewendet werden. Der optische Fluss beruht darauf, dass sich der Bildinhalt wie ein flüssiges Medium verhält [Kraus 1996: S. 443]. Anders als bei der Analyse von Gletscherbewegungen, bei der das Verfahren ebenfalls genutzt wird, ginge man bei der UAV-Photogrammetrie davon aus, dass nicht das abzubildende Objekt, sondern die Kamera selbst beweglich ist und die Ursache der Bildinhaltsänderung liefert. Aufgrund einer sehr hohen Überlappung zwischen den Einzelbildern und einer folglich niedrigen Winkeländerung des Objektes in den Aufnahmen, ist man mit Hilfe von Differenzvektoren in der Lage, die optische Fließbewegung einzelner homologer Objektpunkte über eine Bildserie zu beschreiben. Die Ermittlung einzelner Bildmerkmale würde über ein gängiges Bildmatchingverfahren erfolgen. Für die robuste Zuordnung dieser Merkmale kann der Vergleich der Differenzvektoren des optischen Flusses aus einer ersten Bildfolge dienen. Videoaufnahmen haben bei der Verwendung des optischen Flusses einen Vorteil gegenüber der Einzelaufnahme. Eine konstante Geschwindigkeit des UAV für gleichmäßige Fließbewegungen wird mit der Videoaufzeichnung nicht notwendig, da verschiedene Einzelbilder aus den Aufnahmen abgeleitet

werden können. Nachteilig können sich Bewegungsunschärfen auswirken. Mit leistungsfähigen Kameras und lichtstarken Objektiven sowie einer angepassten UAV-Geschwindigkeit kann man diesem Effekt entgegenwirken.

Tabellenverzeichnis

3.1	Kameraeigenschaften	20
3.2	Bildaufösungen in Abhängigkeit vom Objektabstand	24
3.3	Erfassbare Objektgrößen in Abhängigkeit von der Aufnahmeentfernung	25
4.1	Ergebnisse der ersten DOE-Kalibrierung für die <i>Canon EOS 5D Mark II</i>	44
4.2	Ergebnisse der Testfeldkalibrierung für die <i>Canon EOS 5D Mark II</i>	45
4.3	Korrelation zwischen den Parametern der inneren Orientierung für $r_0 = 0mm$	45
4.4	Korrelation zwischen den Parametern der inneren Orientierung für $r_0 = 14.4mm$	45
4.5	Innere Orientierung bei unterschiedlichen Kantungen für die <i>Canon EOS 5D Mark II</i>	48
4.6	Berechnung der Verzeichnungs-differenzen aus DOE- und Testfeldkalibrierung	50
4.7	Differenzen berechneter Parameter aus erster und zweiter DOE-Kalibrierung für die verwendeten Kameras	51
4.8	Unterschiedliche Kammerkonstanten aus dem Programm <i>Bundler</i>	66

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufnahmeanordnung zur Testfeldkalibrierung	6
2.2	Prinzipaufbau einer DOE-Kalibrierstation	7
2.3	Raumstrahlen im Kugelkoordinatensystem	8
2.4	Zuordnung von extrahierten und idealen Koordinaten	10
2.5	Schematische Darstellung des Kreuzkorrelationsverfahrens	12
2.6	2x2x8-dimensionaler Merkmalsvektor, der eine 8x8 Merkmalsumgebung beschreibt	13
2.7	Epipolargeometrie	15
3.1	Ausschnitt einer Luftfahrtkarte für den Raum Berlin	18
3.2	Tower des Flugplatzes Finow	20
3.3	<i>Canon EOS 5D Mark II</i>	21
3.4	<i>Ricoh GR Digital III</i>	21
3.5	Größenverhältnis der Sensoren	22
3.6	<i>AscTec Falcon 8</i>	27
3.7	Helikopter <i>Bell 47</i>	29
3.8	CAD-Zeichnung des Finower Towers und angrenzenden Bäumen	30
3.9	Situation vor Ort	31
3.10	Flugplanung des Helikopterüberfluges	33
3.11	Flugplanung Umflüge mit <i>Bell 47</i>	33
3.12	Kameraausrichtung in verschiedenen Flugrichtungen	34
3.13	Flugplanung Umflüge mit <i>AscTec Falcon 8</i>	35
3.14	Digitalisierung der Wegpunkte in der <i>AscTec AutoPilot Control</i>	37
3.15	Erstellen einer Flugmatrix mit <i>AscTec AutoPilot Control</i>	37
3.16	örtliche Aufnahmegeometrie	38
3.17	Abhängigkeit der Messgenauigkeit vom Einfallswinkel bei der reflektorlosen Distanzmessung	39

3.18	Tower-Befliegung mit dem <i>Bell 47</i>	41
3.19	Tower-Befliegung mit dem <i>AscTec Falcon 8</i>	42
4.1	Rad.-symmetrische Verzeichnungskurve für $r_0 = 0mm$	46
4.2	Rad.-symmetrische Verzeichnungskurve für $r_0 = 14.4mm$	46
4.3	Abhängigkeit des Bildradius' r' von der Bildhauptpunktlage H	49
4.4	Bildhauptpunktverschiebung zwischen erster und zweiter DOE-Kalibrierung für die <i>Canon EOS 5D Mark II</i>	52
4.5	Netzskizze aus <i>VermCad 3.2.2</i>	55
4.6	FBM für eine Bildfolge aus einer Helikopterbefliegung	58
4.7	Unterschiede zwischen Template und Patch bei starker perspektiver Änderung	59
4.8	Terrestrische Bildfolge mit der <i>Ricoh GR Digital III</i>	60
4.9	SIFT für Folgebilder (Bild 2 mit Bild 1)	61
4.10	FBM für Folgebilder (Bild 2 mit Bild 1)	62
4.11	SIFT für Folgebilder (Bild 2 mit Bild 3)	62
4.12	SIFT für Folgebilder (Bild 2 mit Bild 4)	63
4.13	UAV-Bilddaten für eine Gebäudeseite	63
4.14	Übergang Dach zu Fassade	64
4.15	Übergang UAV- zu Bodenaufnahme	64
4.16	homologe Punkte aus <i>Bundler</i> dargestellt in <i>MeshLab</i> (Ansicht 1)	65
4.17	homologe Punkte aus <i>Bundler</i> dargestellt in <i>MeshLab</i> (Ansicht 2)	66
4.18	Auszug aus dem Ergebnisprotokoll <i>bundle.out</i>	67
4.19	Flughöhe des UAV stimmt nicht mit der Planung überein	69
4.20	Genauigkeitsangaben zur Prozessierung der UAV-Daten in <i>Match-AT</i>	70
5.1	DOM der UAV-Befliegung	71
5.2	Visualisierung homologer Punkte aus der Bildaufnahme mit der <i>Canon EOS 5D Mark II</i>	72
6.1	Flugstreifen des Helikopterüberfluges	73

Literatur

- [Albertz und Wiggenhagen 2009] ALBERTZ, Jörg ; WIGGENHAGEN, Manfred: *Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung*. 5. Auflage. Heidelberg : Herbert Wichmann Verlag, 2009
- [AscTec 2009] ASCTEC: ASCTEC FALCON 8 - OPERATING GUIDELINES / Ascending Technologies GmbH. 2009. – Manual
- [AscTec 2010a] ASCTEC ; GMBH, AscTec (Hrsg.): *AscTec Falcon 8/Ascending Technologies*. 2010. – URL <http://www.asctec.de/asctec-falcon>. – Zugriffsdatum: 20. Aug. 2010
- [AscTec 2010b] ASCTEC ; ASCENDING TECHNOLOGIES GMBH (Hrsg.): *Individuelle Projekte/Ascending Technologies*. 2010. – URL <http://mediathek.daserste.de/daserste/servlet/content/3133486?pageId=487856&moduleId=432744&categoryId=&goto=2&show=>. – Zugriffsdatum: 06. Jun. 2010
- [AscTec 2010c] ASCTEC: Lösungen für LUFTBILDFOTOGRAFIE - INSPEKTION - DOKUMENTATION / Ascending Technologies GmbH. 2010 (3). – Flyer
- [Baltsavias 2002] BALTSAVIAS, Emmanuel ; ETH-ZÜRICH (Hrsg.): *NDK 96/97*. 2002. – URL ftp://igpho.ethz.ch/pub/manos/papers/ndk_german96_97amatch.pdf. – Zugriffsdatum: 04. Aug. 2010. – Publikationen ETHZ
- [Barnett et al. 2009] BARNETT, Shawn ; ETCHELLS, Dave ; WEIDELICH, Zig ; ETCHELLS, Dave (Hrsg.): *Canon EOS 5D Mark II Digital Camera - Full Review*. 2009. – URL <http://www.imaging-resource.com/PRODS/E5D2/E5D2A.HTM>. – Zugriffsdatum: 23. Jul. 2010
- [Bauer et al. 2006] BAUER, Martin ; BÖRNER, Anko ; JAHN, Herbert ; SCHEELE, Martin ; SCHISCHMANOW, Adrian ; SCHUSTER, Reinhard: Dynamische Beugungsmuster als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration. In: SEYFERT, Eckhardt (Hrsg.): *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.* Bd. 19. Oldenburg : DGPF e.V., 2006, S. 303–310. – Publikationen der DGPF-Jahrestagung 2006, Berlin
- [Bay et al. 2008] BAY, Herbert ; ESS, Andreas ; TUYTELAARS, Tinne ; VAN GOOL, Luc: SURF: Speeded Up Robust Features. In: *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)* 110 (2008), S. 346–359
- [Birnbach et al. 2009] BIRNBACH, Bastian ; GRIMM, Paul ; KÖLZER, Konrad ; NAGL, Frank: Automatische Bild- und Darstellungsoptimierung für 3D-Photo-Collections. In:

- GERNDT, Andreas (Hrsg.) ; LATOSCHIK, Marc Erich (Hrsg.): *Virtuelle und Erweiterte Realität, 6. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR*. Aachen : Shaker Verlag, 2009, S. 1–13
- [Bockaert 2010] BOCKAERT, Vincent ; JOINSON, Simon (Hrsg.): *Sensor Sizes: Camera System: Glossary: Learn: Digital Photography Review*. 2010. – URL <http://www.dpreview.com/learn/?/key=sensor+sizes>. – Zugriffsdatum: 10. Jun. 2010
- [Brandl 2009] BRANDL, Bernhard ; TEAM dba (Hrsg.): *dba-team: Wir suchen ...* 2009. – URL <http://www.flying-air-tools.de/technik/technik.htm>. – Zugriffsdatum: 21. Aug. 2010
- [Bredow 2010] BREDOW, Wolfgang ; BREDOW, Wolfgang (Hrsg.): *Bell 47 B - 1. zugelassener Zivilhubschrauber*. 2010. – URL http://www.bredow-web.de/diverse_Flugtage/Bell_47_B/bell_47_b.html. – Zugriffsdatum: 21. Aug. 2010
- [CamCat 2010a] CAMCAT ; CAMERA-CATALOG.COM (Hrsg.): *Canon EOS 5D Mark II Digital Camera / by Manufacture / Digital Cameras / Camera-Catalog.com*. 2010. – URL http://www.camera-catalog.com/digitalcameras/manufactures/camera/canon_eos_5d_mark_ii. – Zugriffsdatum: 15. Okt. 2010
- [CamCat 2010b] CAMCAT ; CAMERA-CATALOG.COM (Hrsg.): *Canon EOS 5D Mark II Digital Camera / by Manufacture / Digital Cameras / Camera-Catalog.com*. 2010. – URL http://www.camera-catalog.com/lens/manufacturers/pos/canon_ef_35_f2. – Zugriffsdatum: 15. Okt. 2010
- [CamCat 2010c] CAMCAT ; CAMERA-CATALOG.COM (Hrsg.): *Ricoh GR Digital III Digital Camera / by Manufacture / Digital Cameras / Camera-Catalog.com*. 2010. – URL http://www.camera-catalog.com/digitalcameras/manufactures/camera/ricoh_gr_digital_iii. – Zugriffsdatum: 15. Okt. 2010
- [Canon 2010a] CANON ; GMBH, Canon D. (Hrsg.): *Canon EOS 5D Mark II - Digitale Spiegelreflexkameras - Canon Deutschland*. 2010. – URL http://www.canon.de/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/EOS_5D_Mark_II. – Zugriffsdatum: 14. Aug. 2010
- [Canon 2010b] CANON ; GMBH, Canon D. (Hrsg.): *Canon Self-Cleaning Digitale Spiegelreflex-Kameras - Canon Deutschland*. 2010. – URL http://www.canon.de/For_Home/Product_Finder/Cameras/Digital_SLR/Technologies_Features/Self-Cleaning.asp. – Zugriffsdatum: 27. Aug. 2010
- [Deutsche Flugsicherung (DFS) GmbH und Büro der Nachrichten für Luftfahrer 2009] DEUTSCHE FLUGSICHERUNG (DFS) GMBH (Hrsg.) ; BÜRO DER NACHRICHTEN FÜR LUFTFAHRER (Hrsg.): *Luftfahrkarte ICAO 1:500 000, Berlin (NO 51/10)*. 2009

- [Dudzus 2010] DUDZUS, Stefan ; AIR TEMPELHOF FLUGGESELLSCHAFT MBH & CO. KG (Hrsg.): *Air Tempelhof, Berlin Rundflug, Hubschrauber Rundflug Berlin, Flugplan nach Rügen, Usedom, Poznan, Kaliningrad, Berlinflüge, Charterflug*. 2010. – URL <http://airtempelhof.de>. – Zugriffsdatum: 21. Aug. 2010
- [Eisenbeiß 2009] EISENBEISS, Henri: *UAV-Photogrammetry*. Zürich, ETH Zürich, Dissertation, 2009
- [Freeman 2008] FREEMAN, Michael: *Michael Freemans 101 Top-Tipps für Digitalfotografen: Ein Weltklasse-Fotograf packt aus*. 1. Auflage. München : Markt und Technik, 2008
- [FUJIFILM Electronic Imaging Europe 2010] FUJIFILM ELECTRONIC IMAGING EUROPE ; FUJIFILM ELECTRONIC IMAGING EUROPE GMBH (Hrsg.): *FUJIFILM DIGITAL Deutschland:
Extraklasse - Die Premium-Kompaktkamera FINEPIX X100 von FUJIFILM*. 2010. – URL [http://www.finepix.de/cms/home/presse/pressemeldungen/meldung/article/img-srcfileadmindesignimagesneugif-border0brextraklasse-die-\\penalty\\z@{premium%-kompaktkamera}/?tx_ttnews\[backPid\]=246&cHash=\\penalty\\z@{7e5bc00e2c25846237fd%bb3f35f37094}](http://www.finepix.de/cms/home/presse/pressemeldungen/meldung/article/img-srcfileadmindesignimagesneugif-border0brextraklasse-die-\\penalty\\z@{premium%-kompaktkamera}/?tx_ttnews[backPid]=246&cHash=\\penalty\\z@{7e5bc00e2c25846237fd%bb3f35f37094}). – Zugriffsdatum: 10. Okt. 2010
- [Göhring 2002] GÖHRING, Daniel: *Digitalameratechnologien- Eine vergleichende Betrachtung CCD kontra CMOS*, Technische Universität Berlin-Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Seminararbeit, 2002
- [Hehl 2006] HEHL, Klaus: *Bezugssysteme und Transformationsverfahren / Technische Fachhochschule Berlin*. 2006. – Vorlesungsmanuskript. Kurs: Landesvermessung
- [Helmers 2010] HELMERS, Henner ; HELMERS, Henner (Hrsg.): *Kamera-Sensoren*. 2010. – URL <http://www.henner.info/2mp.htm>. – Zugriffsdatum: 10. Jun. 2010
- [Jahn et al. 2004] JAHN, Herbert ; SCHEELE, Martin ; SCHUSTER, Reinhard: *Metrische Qualifizierung von Matrix-Kameras*. In: *49. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, TU Ilmenau 2 (2004)*
- [Kindermann 2008] KINDERMANN, Klaus: *Fotografieren für Fortgeschrittene: Foto-, Licht- und Aufnahmetechnik optimal einsetzen*. 1. Auflage. Poing : Franzis Verlag, 2008
- [Koethe 2003] KOETHE, Ullrich: *Edge and Junction Detection with an Improved Structure Tensor*. In: MICHAELIS, Bernd (Hrsg.) ; KRELL, Gerald (Hrsg.): *Pattern Recognition, Lecture Notes in Computer Science (LNCS)* Bd. 2781, Springer-Verlag, 2003, S. 25–32. – Publikationen des 25. DAGM-Symposiums 2003, Magdeburg

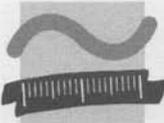
- [Kotowski 1996] KOTOWSKI, Rüdiger: Photogrammetrische Bündeltriangulation zur 3D-Objektkonstruktion und simultanen Sensorkalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. In: *VDVschriftenreihe-Photogrammetrische Messtechnik in der Ingenieurvermessung* Bd. 12 (1996), S. 22–31
- [Kraus 1996] KRAUS, Karl: *Photogrammetrie, Bd. 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. 3. Auflage. Bonn : Ferd. Dümmlers Verlag, 1996
- [Kraus 2004] KRAUS, Karl: *Photogrammetrie Band 1*. 7. Auflage. Berlin : Walter de Gruyter Berlin - New York, 2004
- [Kroon 2010] KROON, Dirk-Jan ; THE MATHWORKS, INC. (Hrsg.): *MATLAB Central - Search Results: id:28300*. 2010. – URL <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/?term=id%3A28300>. – Zugriffsdatum: 10. Okt. 2010
- [Litwiller 2001] LITWILLER, Dave: CCD vs CMOS: Facts and fiction. In: *Photonics Spectra* 1 (2001), S. 154–158
- [Lowe 2004] LOWE, David G.: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: *International Journal of Computer Vision* 60 (2004), S. 91–110
- [LuftVG 2010] LUFTVG ; BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND, VERTRETEN DURCH DAS BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, VERTRETEN DURCH DIE BUNDESMINISTERIN DER JUSTIZ (JURIS GMBH) (Hrsg.): *LuftVG - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis*. 2010. – URL <http://www.gesetze-im-internet.de/luftvg/index.html>. – Zugriffsdatum: 30. Mai 2010
- [Luhmann 2000] LUHMANN, Thomas: *Nahbereichsphotogrammetrie-Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 1. Auflage. Heidelberg : Herbert Wichmann Verlag, 2000
- [Luhmann 2010] LUHMANN, Thomas: *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamera-kalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. München, Fakultät der Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen Universität Dresden, Habilitation, 2010. – Veröffentlicht durch den Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, Reihe C Dissertationen Heft Nr. 645
- [Mautz 2010] MAUTZ, Rainer ; ETH ZÜRICH (Hrsg.): *ETH - Geodetic Metrology and Engineering Geodesy - uav*. 2010. – URL <http://www.geometh.ethz.ch/research/uav>. – Zugriffsdatum: 12. Okt. 2010
- [McLean 2010] MCLEAN, Susan ; NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER (Hrsg.): *NOAA's Geophysical Data Center - Geomagnetic Data*. 2010. – URL <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/Declination.jsp>. – Zugriffsdatum: 21. Aug. 2010

- [Meißner 2007] MEISSNER, Henry: *Untersuchung und Evaluierung von Methoden zur Kalibrierung optischer Sensoren in Verbindung mit Lagesensoren*, Technische Universität Berlin-Fakultät für Elektrotechnik und Informatik-Institut für Technische Informatik und Mikroelektronik, Diplomarbeit, 2007
- [microdrones 2009] MICRODRONES ; MICRODRONES GMBH (Hrsg.): *microdrones GmbH/your eye in the sky*. 2009. – URL www.microdrones.de. – Zugriffsdatum: 06. Jun. 2010
- [microdrones 2009] MICRODRONES ; GMBH microdrones (Hrsg.): *microdrones GmbH/your eye in the sky*. 2009. – URL http://www.microdrones.com/en_md4-1000.php. – Zugriffsdatum: 20. Aug. 2010
- [Müller 2004] MÜLLER, Marko: Untersuchung digitaler photogrammetrischer Systeme. In: *Forschungsassistenzen 2003/2004, Abschlussbericht* (2004), S. 12–23
- [Ricoh 2010] RICOH ; GLOBAL, Ricoh (Hrsg.): *Pressemitteilungen/ Digital Cameras / Ricoh Global*. 2010. – URL http://www.ricoh.com/r_dc/press/release_de/nr_grd3_de.html. – Zugriffsdatum: 19. Aug. 2010
- [RM-AK 2009] RM-AK ; V. (DLR), Deutsches Z. für Luft-und Raumfahrt e. (Hrsg.): *DLR - Optische Informationssysteme - Fachabteilung Sensorkonzepte und Anwendungen (RM-AK)*. 2009. – URL http://www.dlr.de/os/desktopdefault.aspx/tabid-4349/7058_read-10438. – Zugriffsdatum: 04. Aug. 2010
- [Rodehorst 2004] RODEHORST, Volker: *Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion im Nahbereich durch Auto-Kalibrierung mit projektiver Geometrie*. Berlin : Wissenschaftlicher Verlag Berlin, 2004
- [Schüngel 1999] SCHÜNGEL, Franz-Manfred ; SCHÜNGEL, Franz-Manfred (Hrsg.): *Zoobjektive*. 1999. – URL <http://www.foto-net.de/net/objektive/zoom.html>. – Zugriffsdatum: 06. Aug. 2010
- [Schubert und Wehmann 2002] SCHUBERT, Silvio ; WEHMANN, Wolfried: 2. Teil: Untersuchungen zu Einflüssen auf die reflektorlose Punktbestimmung mit den Tachymetern Trimble 3602 DR, Leica TCR 302 und Leica TCRA 1103plus. In: *AVN-Allgemeine Vermessungsnachrichten* 5 (2002), S. 173–177
- [Schuster und Braunecker 2000] SCHUSTER, Reinhard ; BRAUNECKER, Bernhard: Calibration of the LH SYSTEMS ADS40 Airborne Digital Sensor. In: *IAPRS XXXIII* (2000)
- [Schwabe 2010] SCHWABE, Martin: *Canon EOS 550D*. 1. Auflage. Poing : Markt und Technik, 2010

- [Siebert et al. 2009] SIEBERT, Sebastian ; KLONOWSKI, Jörg ; NEITZEL, Frank: Unmanned Aerial Vehicles (UAV)-historische Entwicklung, rechtliche Rahmenbedingungen und Betriebskonzepte. In: LUHMANN, Thomas (Hrsg.) ; MÜLLER, Christina (Hrsg.): *Optische 3D-Messtechnik, Photogrammetrie, Laserscanning-Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009* Fachhochschule Mainz-Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik (i3mainz) (Veranst.), Herbert Wichmann Verlag, 2009, S. 376–383
- [Snavely 2010] SNAVELY, Noah ; PHOTOTOURISM (Hrsg.): *Bundler - Structure from Motion for Unordered Image Collections*. 2010. – URL <http://phototour.cs.washington.edu/bundler/#S1>. – Zugriffsdatum: 02. Okt. 2010
- [Snavely et al. 2008] SNAVELY, Noah ; SEITZ, Steven ; SZELISKI, Richard: Modeling the World from Internet Photo Collections. In: *IJCV* 80 (2008)
- [UAV-DACH 2010] UAV-DACH: UAV-DACH e.V.-Deutschsprachiger Verein für Unbemannte Luftfahrzeuge, German-speaking Association for Unmanned Aircraft / UAV-DACH e.V. 2010 (7). – Flyer
- [Uncrate 2009] UNCRATE ; UNCRATE (Hrsg.): *Ricoh GR Digital III|Uncrate*. 2009. – URL <http://www.uncrate.com/men/gear/digital-cameras/ricoh-gr-digital-iii>. – Zugriffsdatum: 23. Jul. 2010
- [Urbansky et al. 2010] URBANSKY, David ; SCHNEIDER, Danilo ; SCHULZE, Marc ; TECHNISCHE UNIVERSITÄT, PROFESSUR FÜR PHOTOGAMMETRIE (Hrsg.): *Photogrammetrie E-Learning Teachlets*. 2010. – URL <http://www.tu-dresden.de/ipf/photo/e-learning/teachlets.htm>. – Zugriffsdatum: 14. Aug. 2010
- [Vertical 2010] VERTICAL ; VERTICAL COMMERCE GMBH (Hrsg.): *GLOSSAR:ISO - die-digitalkamera.de*. 2010. – URL <http://www.die-digitalkamera.de/wiki/Glossar:ISO>. – Zugriffsdatum: 10. Jun. 2010
- [Weißhaar et al. 2003] WEISSHAAR, Eckhard ; KÜVELER, Gerd ; BIANDA, Michele: Schnelle und genaue Methode zur Schwerpunktfindung in Messreihen. In: *Photonik* 4 (2003), S. 46–48
- [WMF 2006] WMF ; WIKIMEDIA FOUNDATION (Hrsg.): *Epipolar_Geometry.png*. 2006. – URL http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/4/47/Epipolar_Geometry.png. – Zugriffsdatum: 10. Jun. 2010

Anhang

A Aufgabenstellung



BEUTH HOCHSCHULE
FÜR TECHNIK
BERLIN
University of Applied Sciences

Beuth Hochschule | Prof. M. Breuer | FB III | Luxemburger Str. 10 | 13353 Berlin

Prof. Dipl.-Ing. M. Breuer
Photogrammetrie und
Fernerkundung
Haus Bauwesen, Zi. 428
Luxemburger Straße 10
Tel. (030) 4504 - 5144
Fax (030) 4504 - 665144
breuer@beuth-hochschule.de

11.5.2010

■ Aufgabenstellung zur Masterarbeit für Herrn KARSTEN STEBNER (754155) zum Thema

Orientierung von Schrägluftbildern aus der Aufnahme mit Kleinformatsensoren

Im Rahmen der Entwicklung verschiedener Sensor- und Aufnahmesysteme sowie neuer Auswerteverfahren am Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt am Standort Berlin Adlershof werden zunehmend auch „Unmanned Aerial Vehicles (kurz: UAV) eingesetzt.

In dieser Arbeit sollen zwei unterschiedliche Sensoren miteinander verglichen werden, die für einen Einsatz am UAV Verwendung finden können. Zu diesem Zweck wird ein mehrstöckiges Gebäude mit der *Canon EOS 5D Mark II* aus einem Helikopter und der *Ricoh GR Digital II* an einem UAV aufgenommen. Die so entstehenden Senkrecht- und Schrägbilddaufnahmen aus der jeweiligen Be- und Umfliegung des Objektes sind zu orientieren.

Die Vor- und Nachteile der Sensoren im Hinblick auf die Genauigkeit der Aerotriangulation sowie die Einflüsse der verschiedenen Aufnahmeplattformen, wie beispielsweise: Stabilität der Fluglage in Bezug auf Radiometrie und Geometrie, sind miteinander zu vergleichen. (Ansprechpartner beim DLR sind Herr Frank Lehmann und Herr Bernhard Strackenbrock).

Bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung ist darauf zu achten, dass die Vorgehensweise eingehend erläutert, alle getroffenen Entscheidungen gut begründet und die Ergebnisse übersichtlich zusammengestellt werden. Dazu gehört auch, dass aufgetretene technische Probleme sachlich dokumentiert werden.

■ ■ ■ ■ ■ www.beuth-hochschule.de

Aufgabenstellung zur Masterarbeit für Herrn KARSTEN STEBNER (754155)



Abzugeben ist der beschreibende Text in 2-facher Ausfertigung, sowie alle Unterlagen und Ergebnisse in digitaler Form. Dazu gehört ein ausführliches Register der gespeicherten Daten. Zur öffentlichen Präsentation der Arbeit sind ein Poster mit den wichtigsten Ergebnissen und eine kurze Zusammenfassung für eine Internetpräsentation anzufertigen.

M. Breuer

Prof. Dipl.-Ing. MICHAEL BREUER

Bearbeitungszeit 5 Monate.

27.5.2010 M. Breuer

B Kurzbeschreibung des Ausgleichungsprogramms CAP

5 Das Programmpaket CAP

CAP ist ein leistungsfähiges und in hohem Maße optimiertes Rechenprogramm zur dreidimensionalen Punktbestimmung durch kombinierte Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungsinformation [5], [6], [22], [71], [90], [120], [130]. CAP wird seit 1988 weltweit nicht nur zur konventionellen photogrammetrischen Bündelblockausgleichung, sondern auch als Softwarepaket zur allgemeinen Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Netze erfolgreich eingesetzt. CAP erlaubt die simultane Verarbeitung einer Vielzahl unterschiedlicher Beobachtungsformen, was sich in der Bezeichnung des Programmnamens **CAP** (**C**ombined **A**djustment **P**rogram) widerspiegelt:

- Bildkoordinaten,
- Raumstrecken,
- Strecken in jeder beliebigen Koordinatenebene,
- direkt beobachtete Koordinaten,
- Koordinatendifferenzen (z. B. Höhenunterschiede),
- horizontale Richtungen,
- vertikale Richtungen,
- Parameter der inneren Orientierung (Kameraparameter),
- Parameter der äußeren Orientierung (Standpunkt und Aufnahmerichtung der Kamera).

Jede Beobachtung einschließlich der Bildkoordinaten kann individuell durch die Vorgabe von Standardabweichungen a priori gewichtet und so mit unterschiedlichem Einfluß an der Ausgleichung beteiligt werden.

Von seiner Konzeption her ist CAP für photogrammetrische Anwendungen im Nahbereich prädestiniert und wird in diesem Bereich auch vorwiegend eingesetzt. Seiner Anwendung zur Verarbeitung von Luftbildblöcken kleiner bis mittlerer Größe steht jedoch nichts entgegen. CAP wurde in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und ist so hinsichtlich seines Leistungsumfanges und seiner Benutzerfreundlichkeit ständig verbessert worden. Installationen auf unterschiedlichen Rechnern (z. B. VAX, SUN, Silicon Graphics) werden angeboten, wengleich der Einsatz auf Personal Computern unter DOS und Windows aus Kostengründen und Gründen der Benutzerfreundlichkeit besonders empfohlen wird.

Bei der Bündelgleichung handelt es sich um ein nicht-lineares Ausgleichungsproblem. Damit entsteht die Notwendigkeit, hinreichend genaue Näherungswerte für alle Unbekannten (Neupunktkoordinaten, Parameter der äußeren und inneren Orientierung) bereitzustellen. Insbesondere für den Fall der allgemeinen Bildtriangulation bei Nahbereichsanwendungen stellt diese Aufgabe ein nennenswertes Problem dar [35], [59], [70]. Lösungsvorschläge, auf der Basis von Einzeltransformationen – wie relative Orientierung, absolute Orientierung und räumlichen Rückwärtsschnitt – liegen vor. Der Rechenaufwand für jede dieser Transformationen ist gering. Sie sind im geeigneten Zusammenspiel ein effizientes Verfahren.

Zur Näherungswertbestimmung sind daher die Programme RELOR (relative Orientierung), ABSOR (absolute Orientierung) sowie RESECT (räumlicher Rückwärtsschnitt) entwickelt und optimiert worden. Sie bilden ein leistungsfähiges Softwarepaket, um – ausgehend von gemessenen Bildkoordinaten – alle notwendigen Berechnungen zur räumlichen photogrammetrischen Punktbestimmung durchführen zu können. Ein- und Ausgabe dieser Programme sind so aufeinander abgestimmt, daß sie untereinander kompatibel sind und daß sich mit ihnen direkt Eingabedateien für eine Bündeltriangulation mit CAP erzeugen lassen. Diese Programme sind für einen Einsatz auf Personal Computern besonders geeignet und zeichnen sich wie CAP durch hohen Bedienungskomfort und weitgehende Fehlertoleranz aus.

Auch bei den Programmen zur relativen und absoluten Orientierung sowie zur Einzelbildeinschaltung (räumlicher Rückwärtsschnitt) handelt es sich, wie bei der Bündelausgleichung selbst, um nichtlineare Ausgleichungen, so daß normalerweise Näherungen für die Unbekannten vorzugeben sind. Den Programmen RELOR, ABSOR und RESECT liegen jedoch Algorithmen zugrunde, die sich durch einen sehr großen Konvergenzradius auszeichnen und darüber hinaus frei von Singularitäten sind. Unabhängig von der Aufnahmekonfiguration ist bei Benutzung dieser Programme keine manuelle Vorgabe von Unbekanntennäherungen erforderlich. Die Vorbereitungsarbeiten für eine allgemeine Bildtriangulation werden damit erheblich vereinfacht und beschleunigt.

6 Anwendungsbereiche

CAP bietet Lösungen für folgende charakteristische Aufgaben:

- räumliche Punktbestimmung bzw. dreidimensionale punktweise Objektrekonstruktion,
- räumliche Orientierung photogrammetrischer Aufnahmen,
- räumliche Orientierung geodätischer Richtungsbündel (Theodolitmessungen),
- räumliche Orientierung von Modellen (dreidimensionale Punktfelder in lokalen Koordinatensystemen),
- Kalibrierung photogrammetrisch genutzter Aufnahmesysteme, z. B. analoge oder digitale Kameras,
- Deformations- und Bewegungsanalyse.

Hieraus ergibt sich eine große Vielfalt sinnvoller Anwendungsbereiche und Einsatzgebiete, die im folgenden lediglich exemplarisch genannt seien:

- Vermessung von Konstruktionsteilen in der Fertigungsindustrie, z. B. Maschinenbau: Automobil-, Flugzeug-, Schiffs- und Raumfahrtindustrie [20], [39], [42], [99], [142]; Designanalyse in der Planungsphase [90], Wareneingangskontrolle, interne Fertigungskontrolle sowie endgültige Qualitätskontrolle in der Produktionsphase [14], Sicherheitsprüfungen → Deformationsanalyse [26], [148].
- Bestandsanalyse und Überwachung von Ingenieurbauten, wie: Brücken, Dämme, Schleusenanlagen, Kühltürme etc.;
- Bestandsanalyse von Industrieanlagen [22], [130], [131], wie: Kernkraftwerke [25], [112], Rohrleitungssysteme etc.;
- geometrische Analysen bei Materialprüfungen [111] → Deformationsanalyse, Erfassung von Bewegungsabläufen (Motographie), geometrische Formerfassung in der Orthopädie und der Dentalmedizin [47], Vermessung von Großbauwerken, z. B. für Architekturzwecke [89], [151], Vermessung archäologischer Ausgrabungsstätten [53], Überprüfung bzw. Kalibrierung photogrammetrischer und geodätischer Vermessungssysteme [50].

In all diesen Fällen handelt es sich um die Verarbeitung geometrischer Beobachtungsinformationen; Gebiete, für die CAP speziell entwickelt wurde.

Anschrift des Verfassers

Dr.-Ing. Rüdiger Kotowski, K²-Photogrammetrie, Münsterstraße 19, 48565 Steinfurt-Borghorst, Telefon (0 25 52) 9 87-87; Fax. -88

[vgl. Kotowski 1996: S. 29 ff.]

C Kalibrierprotokolle für die *Canon EOS 5D Mark II*

Hier werden nur die Ergebnisse der Testfeldkalibrierung dargestellt. Vollständige Ausgleichsprotokolle sind auf der zur Arbeit beigefügten DVD enthalten.

- radial-symmetrische Verzeichnungskoeffizienten ... A_1, A_2, A_3
- tangential asymmetrische Verzeichnungskoeffizienten ... B_1, B_2
- Affinitäts- und Orthogonalitätsparameter ... C_1, C_2

C.1 Kalibrierung mit A_1 und A_2 für $R_0 = 0$

```

*** CAP COMBINED ADJUSTMENT PROGRAM *** REV. 2.29
(C) L. HINSKEN, R. KOTOWSKI 1988-2003

Name of this File : adjust01.cam

This file has been updated :           12-10-2010  09:15:26

Number of cameras in this file =  1
**** Start of Camera Block ****

Camera Number =  1

Camera ID           =           11
Camera Type         = Canon_Testfeld
Lens Type           = Canon 35mm 1:2
Date of Calibration = 12-10-2010

Image Format
Coordinates of Upper left Corner =      -17.9712      11.9808
Width and Height                 =           35.9424      23.9616

Principal Distance           =      -35.6434
Focus Setting                =           30.0000
Coord. of Principal Point    =           0.0196      0.0018
Radial symmetric Distortion a1 =      -0.674E-04
Radial symmetric Distortion a2 =           0.680E-07
Radial symmetric Distortion a3 =           0.475E-28
Radial symmetric Distortion r0 =           0.0000
Radial symmetric Distortion rmax =          21.5987
Tang. & Asym. Distortion b1  =           0.000E+00
Tang. & Asym. Distortion b2  =           0.000E+00
Affinity                    =           0.000E+00
Non Orthogonality           =           0.000E+00

Sigma naught                =           0.0022

Standard deviation
Principal Distance           =           0.0008
Coord. of Principal Point    =           0.0006      0.0009
Radial symmetric Distortion a1 =           0.164E-06
Radial symmetric Distortion a2 =           0.389E-09
Radial symmetric Distortion a3 =           0.886E-20
Tang. & Asym. Distortion b1  =           0.000E+00
Tang. & Asym. Distortion b2  =           0.000E+00
Affinity                    =           0.000E+00
Non Orthogonality           =           0.000E+00

```

Correlation between parameters of interior orientation

	C	X0	Y0	A1	A2	A3
C	1.000					
X0	-0.029	1.000				
Y0	0.006	-0.036	1.000			
A1	0.590	-0.011	0.009	1.000		
A2	-0.544	0.008	-0.018	-0.963	1.000	
A3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

**** End of Camera Block ****

C.2 Kalibrierung mit A_1 , A_2 und A_3 für $R_0 = 0$

*** CAP COMBINED ADJUSTMENT PROGRAM *** REV. 2.29
 (C) L. HINSKEN, R. KOTOWSKI 1988-2003

Name of this File : adjust01.cam

This file has been updated : 12-10-2010 09:10:53

Number of cameras in this file = 1
 **** Start of Camera Block ****

Camera Number = 1

Camera ID = 11
 Camera Type = Canon_Testfeld
 Lens Type = Canon 35mm 1:2
 Date of Calibration = 12-10-2010

Image Format
 Coordinates of Upper left Corner = -17.9712 11.9808
 Width and Height = 35.9424 23.9616

Principal Distance = -35.6422
 Focus Setting = 30.0000
 Coord. of Principal Point = 0.0196 0.0017
 Radial symmetric Distortion a1 = -0.666E-04
 Radial symmetric Distortion a2 = 0.635E-07
 Radial symmetric Distortion a3 = 0.709E-11
 Radial symmetric Distortion r0 = 0.0000
 Radial symmetric Distortion rmax = 21.5987
 Tang. & Asym. Distortion b1 = 0.000E+00
 Tang. & Asym. Distortion b2 = 0.000E+00
 Affinity = 0.000E+00
 Non Orthogonality = 0.000E+00

Sigma naught = 0.0022

Standard deviation
 Principal Distance = 0.0010
 Coord. of Principal Point = 0.0006 0.0009
 Radial symmetric Distortion a1 = 0.413E-06
 Radial symmetric Distortion a2 = 0.218E-08
 Radial symmetric Distortion a3 = 0.342E-11
 Tang. & Asym. Distortion b1 = 0.000E+00
 Tang. & Asym. Distortion b2 = 0.000E+00
 Affinity = 0.000E+00
 Non Orthogonality = 0.000E+00

Correlation between parameters of interior orientation

	C	X0	Y0	A1	A2	A3
C	1.000					
X0	-0.008	1.000				
Y0	-0.003	-0.036	1.000			
A1	0.719	0.021	-0.009	1.000		
A2	-0.644	-0.026	0.010	-0.971	1.000	
A3	0.574	0.028	-0.013	0.918	-0.984	1.000

**** End of Camera Block ****

C.3 Kalibrierung mit $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1$ und C_2 für $R_0 = 0$

*** CAP COMBINED ADJUSTMENT PROGRAM *** REV. 2.29
 (C) L. HINSKEN, R. KOTOWSKI 1988-2003

Name of this File : adjust01.cam

This file has been updated : 12-10-2010 09:17:30

Number of cameras in this file = 1
 **** Start of Camera Block ****

Camera Number = 1

Camera ID = 11
 Camera Type = Canon_Testfeld
 Lens Type = Canon 35mm 1:2
 Date of Calibration = 12-10-2010

Image Format
 Coordinates of Upper left Corner = -17.9712 11.9808
 Width and Height = 35.9424 23.9616

Principal Distance = -35.6442
 Focus Setting = 30.0000
 Coord. of Principal Point = 0.0176 0.0131
 Radial symmetric Distortion a1 = -0.666E-04
 Radial symmetric Distortion a2 = 0.644E-07
 Radial symmetric Distortion a3 = 0.537E-11
 Radial symmetric Distortion r0 = 0.0000
 Radial symmetric Distortion rmax = 21.5987
 Tang. & Asym. Distortion b1 = -0.601E-06
 Tang. & Asym. Distortion b2 = 0.313E-05
 Affinity = -0.107E-03
 Non Orthogonality = -0.210E-04

Sigma naught = 0.0022

Standard deviation
 Principal Distance = 0.0010
 Coord. of Principal Point = 0.0026 0.0019
 Radial symmetric Distortion a1 = 0.408E-06
 Radial symmetric Distortion a2 = 0.216E-08
 Radial symmetric Distortion a3 = 0.339E-11
 Tang. & Asym. Distortion b1 = 0.741E-06
 Tang. & Asym. Distortion b2 = 0.558E-05
 Affinity = 0.113E-03
 Non Orthogonality = 0.107E-04

Correlation between parameters of interior orientation

	C	X0	Y0	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2
C	1.000									
X0	0.005	1.000								
Y0	-0.005	0.052	1.000							
A1	0.704	0.000	-0.005	1.000						
A2	-0.638	0.000	0.008	-0.971	1.000					
A3	0.571	0.000	-0.009	0.917	-0.984	1.000				
B1	0.217	-0.006	-0.020	0.009	-0.042	0.051	1.000			
B2	0.039	0.001	0.004	0.019	-0.023	0.020	0.053	1.000		
C1	0.007	0.971	0.048	-0.006	0.006	-0.007	-0.005	0.002	1.000	
C2	-0.004	0.054	0.893	-0.001	0.003	-0.003	-0.022	0.001	0.045	1.000

**** End of Camera Block ****

C.4 Kalibrierung mit A_1 und A_2 für $R_0 = 14.4$

*** CAP COMBINED ADJUSTMENT PROGRAM *** REV. 2.29
 (C) L. HINSKEN, R. KOTOWSKI 1988-2003

Name of this File : adjust01.cam

This file has been updated : 12-10-2010 09:27:00

Number of cameras in this file = 1
 **** Start of Camera Block ****

Camera Number = 1

Camera ID = 11
 Camera Type = Canon_Testfeld
 Lens Type = Canon 35mm 1:2
 Date of Calibration = 12-10-2010

Image Format
 Coordinates of Upper left Corner = -17.9712 11.9808
 Width and Height = 35.9424 23.9616

Principal Distance = -35.2428
 Focus Setting = 30.0000
 Coord. of Principal Point = 0.0196 0.0019
 Radial symmetric Distortion a1 = -0.697E-04
 Radial symmetric Distortion a2 = 0.719E-07
 Radial symmetric Distortion a3 = 0.445E-28
 Radial symmetric Distortion r0 = 14.4000
 Radial symmetric Distortion rmax = 21.5987
 Tang. & Asym. Distortion b1 = 0.000E+00
 Tang. & Asym. Distortion b2 = 0.000E+00
 Affinity = 0.000E+00
 Non Orthogonality = 0.000E+00

Sigma naught = 0.0022

Standard deviation
 Principal Distance = 0.0007
 Coord. of Principal Point = 0.0006 0.0009
 Radial symmetric Distortion a1 = 0.170E-06
 Radial symmetric Distortion a2 = 0.411E-09
 Radial symmetric Distortion a3 = 0.884E-20
 Tang. & Asym. Distortion b1 = 0.000E+00
 Tang. & Asym. Distortion b2 = 0.000E+00
 Affinity = 0.000E+00
 Non Orthogonality = 0.000E+00

Correlation between parameters of interior orientation

	C	X0	Y0	A1	A2	A3
C	1.000					
X0	-0.021	1.000				
Y0	0.007	-0.035	1.000			
A1	-0.247	-0.011	0.009	1.000		
A2	0.199	0.008	-0.018	-0.963	1.000	
A3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

**** End of Camera Block ****

C.5 Kalibrierung mit A_1 , A_2 und A_3 für $R_0 = 14.4$

*** CAP COMBINED ADJUSTMENT PROGRAM *** REV. 2.29
 (C) L. HINSKEN, R. KOTOWSKI 1988-2003

Name of this File : adjust01.cam

This file has been updated : 12-10-2010 09:21:37

Number of cameras in this file = 1
 **** Start of Camera Block ****

Camera Number = 1

Camera ID = 11
 Camera Type = Canon_Testfeld
 Lens Type = Canon 35mm 1:2
 Date of Calibration = 12-10-2010

Image Format
 Coordinates of Upper left Corner = -17.9712 11.9808
 Width and Height = 35.9424 23.9616

Principal Distance = -35.2429
 Focus Setting = 30.0000
 Coord. of Principal Point = 0.0197 0.0018
 Radial symmetric Distortion a1 = -0.689E-04
 Radial symmetric Distortion a2 = 0.671E-07
 Radial symmetric Distortion a3 = 0.777E-11
 Radial symmetric Distortion r0 = 14.4000
 Radial symmetric Distortion rmax = 21.5987
 Tang. & Asym. Distortion b1 = 0.000E+00
 Tang. & Asym. Distortion b2 = 0.000E+00
 Affinity = 0.000E+00
 Non Orthogonality = 0.000E+00

Sigma naught = 0.0022

Standard deviation
 Principal Distance = 0.0007
 Coord. of Principal Point = 0.0006 0.0009
 Radial symmetric Distortion a1 = 0.427E-06
 Radial symmetric Distortion a2 = 0.231E-08
 Radial symmetric Distortion a3 = 0.370E-11
 Tang. & Asym. Distortion b1 = 0.000E+00
 Tang. & Asym. Distortion b2 = 0.000E+00
 Affinity = 0.000E+00
 Non Orthogonality = 0.000E+00

Correlation between parameters of interior orientation

	C	X0	Y0	A1	A2	A3
C	1.000					
X0	-0.022	1.000				
Y0	0.007	-0.036	1.000			
A1	-0.126	0.021	-0.008	1.000		
A2	0.065	-0.026	0.010	-0.971	1.000	
A3	-0.030	0.028	-0.013	0.918	-0.984	1.000

**** End of Camera Block ****

D Projektbegleitende Kalibrierung der *Canon EOS 5D Mark II*

Nachfolgend ist ein Fehlerprotokoll dargestellt, dass innerhalb der projektbegleitenden Kalibrierung für die *Canon EOS 5D Mark II* berechnet wurde. Das Eliminieren dieser Fehler führte zur Berechnung weiterer grober Fehler bis hin zum nicht redundanten stochastischen Modell. Das vollständige Ausgabeprotokoll ist auf der zur Arbeit beigefügten DVD enthalten.

STATUS	POINT NO.	MAGE NO.	OBSERVATIONS	RESIDUALS (*1000)	TESTVALUES	RELIABILITY (*1000)
202	974	1035	11.1530	-0.0082	-4.8	0.0107
202	915	1112	0.6444	0.0097	5.2	0.0097
201	914	1112	-8.7685	0.0088	4.8	0.0099
202	913	1029	-9.4859	-0.0092	-5.2	0.0102
201	892	1032	5.8292	-0.0074	-4.6	0.0114
201	892	1034	-5.5784	0.0085	4.9	0.0106
201	867	40077	-7.0318	-0.0001	-4.6	0.5961
202	867	40077	5.9228	-0.0063	-4.6	0.0134
201	866	40077	-8.9163	0.0002	4.6	0.5565
202	866	40077	5.1665	0.0064	4.6	0.0132
201	863	1031	-8.0236	0.0087	4.9	0.0102
201	862	40015	15.8071	-0.0006	-4.6	0.1448
202	862	40015	-0.7243	-0.0061	-4.6	0.0138
201	862	40020	15.0186	0.0007	4.8	0.1245
202	862	40020	-2.8717	0.0063	4.8	0.0138
201	861	40015	8.6663	0.0004	4.6	0.2304
202	861	40015	-0.9294	0.0065	4.6	0.0130
201	861	40020	7.5702	-0.0005	-4.8	0.1889
202	861	40020	-2.9486	-0.0067	-4.8	0.0131
202	727	1035	-10.7563	-0.0096	-5.3	0.0101
202	725	1036	-10.5288	0.0085	4.6	0.0099
202	725	1040	-4.7178	-0.0092	-4.9	0.0097
201	674	10188	-13.4866	-0.0002	-5.4	0.5673
202	674	10188	6.7561	0.0072	5.4	0.0135
201	672	10188	-6.5190	-0.0009	-5.4	0.1113
202	672	10188	9.0253	-0.0074	-5.4	0.0133
201	670	2006	-1.6826	0.0073	4.7	0.0118
201	666	10019	9.9996	0.0013	5.0	0.0673
202	666	10019	0.7436	0.0066	5.0	0.0138
202	666	1019	-1.3949	0.0088	4.7	0.0096
201	665	10019	6.3972	-0.0012	-5.0	0.0764
202	665	10019	1.1025	-0.0069	-5.0	0.0131
202	665	1019	-0.8228	0.0090	4.7	0.0095
201	1227	90060	4.2242	-0.0001	-4.7	0.6643
202	1227	90060	8.6727	0.0064	4.7	0.0134
201	1226	90115	2.5127	-0.0004	-5.4	0.2513
202	1226	90115	8.6343	0.0072	5.4	0.0137
201	1226	90060	2.5063	0.0009	4.7	0.0971
202	1226	90060	8.6407	-0.0065	-4.7	0.0133
201	1225	90115	1.2884	0.0009	5.4	0.1059
202	1225	90115	7.9612	-0.0074	-5.4	0.0132
201	1221	90158	-3.5768	-0.0005	-5.5	0.2032
202	1221	90158	9.6919	-0.0075	-5.5	0.0135
202	1220	90158	10.4804	0.0074	5.5	0.0137
201	1002	80593	7.9869	0.0064	4.8	0.0136
202	1002	80593	1.0000	-0.0002	-4.8	0.3601
201	1071	80593	9.8778	-0.0062	-4.8	0.0142
202	1071	80593	11.0701	0.0004	4.8	0.2248
1	1019	2	22.4595	0.0018	4.8	0.0105
1	1019	3	4.6287	-0.0002	-6.3	0.0113

E Protokolle der Netzmessung

E.1 Lagenetzausgleichung

Netzausgleichung										NR = 14
Eingelesene Festpunkte										
Punktkennzeichen	Rechts (Y)	Hoch (X)	s(V)X,Y [cm]							
20002	0.000	34.453	0.15							
20003	0.000	0.000	0.00							
Ausgegliche Koordinaten der Festpunkte										
Punktkennzeichen	Rechts (Y)	Hoch (X)	Phi gon	A cm	B cm	sX cm	sY cm	sL cm		
20002	0.000	34.452	100.0	0.11	0.03	0.03	0.11	0.12		
20003	0.000	0.000		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Quadratisches Mittel sL = 0.08										
Ausgegliche Koordinaten der Neupunkte										
Punktkennzeichen	Rechts (Y)	Hoch (X)	Phi gon	A cm	B cm	sX cm	sY cm	sL cm		
S1	-12.703	23.660	67.4	0.10	0.05	0.07	0.09	0.11		
S2	55.656	6.770	192.4	0.20	0.05	0.20	0.06	0.21		
1001	-35.035	-25.894	158.5	0.16	0.04	0.13	0.10	0.17		
1002	-23.667	-64.637	122.7	0.26	0.08	0.12	0.24	0.27		
1003	11.108	-44.105	84.8	0.17	0.04	0.06	0.16	0.17		
1004	48.162	-23.450	29.8	0.19	0.04	0.17	0.09	0.20		
1005	113.362	58.979	170.0	0.45	0.07	0.40	0.21	0.46		
1006	44.996	82.730	132.1	0.33	0.06	0.17	0.29	0.33		
1007	-55.734	10.516	11.2	0.21	0.06	0.21	0.07	0.22		
20000	35.655	25.787	161.4	0.15	0.04	0.13	0.09	0.16		
20001	34.067	-4.016	8.7	0.12	0.03	0.12	0.03	0.13		
30023	3.589	12.385		0.06	0.05	0.05	0.06	0.08		
30030	33.366	9.424	183.6	0.13	0.05	0.13	0.06	0.14		
30031	25.728	2.454	194.7	0.11	0.06	0.11	0.06	0.12		
30032	7.193	25.174	118.8	0.10	0.06	0.06	0.10	0.12		
30033	3.262	19.503		0.09	0.06	0.06	0.09	0.10		
30034	4.645	4.846		0.05	0.05	0.05	0.05	0.07		
30035	32.836	2.867	195.6	0.12	0.05	0.12	0.05	0.13		
30036	36.610	17.272	173.1	0.15	0.06	0.14	0.08	0.16		
30037	17.191	33.978	130.9	0.14	0.06	0.09	0.13	0.15		
30040	19.701	-4.598		0.09	0.06	0.09	0.06	0.11		
30041	12.468	4.801		0.07	0.05	0.06	0.05	0.08		
Quadratisches Mittel sL = 0.19										
Bewegliche Festpunkte										
Punktkennzeichen	s(V)X,Y cm	VY cm	EVY %	GFY cm	NVY	VX cm	EVX %	GFY cm	NVX	TP cm
20002	0.15	0.0	-unkontrolliert-			-0.1	93.3	0.1	0.7	0.1
Polarstrecken										
Punktkennzeichen	Punktkennzeichen	Shor	Sber	s(V) cm	V cm	EV %	GF cm	NV		
System 1										
S1	1007	44.993	44.993	0.11	0.1	37.6	-0.1	0.8		
S1	1001	54.354	54.354	0.11	-0.1	58.1	0.1	1.0		
S1	1002	88.976	88.975	0.11	-0.1	34.0	0.2	1.0		

E PROTOKOLLE DER NETZMESSUNG

S1	1003	71.826	71.827	0.11	0.0	63.4	-0.1	0.5
S1	1004	76.965	76.967	0.11	0.2	62.8	-0.3	1.8
S1	1005	130.918	130.919	0.12	0.0	42.2	-0.1	0.5
S1	1006	82.574	82.573	0.11	0.0	50.8	0.1	0.5
System 2								
S2	1001	96.394	96.394	0.11	0.0	61.1	0.0	0.2
S2	1002	106.729	106.729	0.12	0.0	38.0	-0.1	0.4
S2	1003	67.624	67.623	0.11	-0.1	59.8	0.1	1.0
S2	1004	31.135	31.135	0.10	0.0	47.1	0.0	0.2
S2	1006	76.704	76.704	0.11	0.0	43.2	0.1	0.3
System 3								
20000	20002 F	36.692	36.693	0.11	0.1	77.7	-0.1	1.0
20000	20001	29.846	29.845	0.10	-0.1	82.5	0.2	1.4
20000	1004	50.800	50.800	0.11	0.1	68.7	-0.1	0.8
20000	1003	74.077	74.078	0.11	0.1	74.2	-0.1	0.5
20000	1005	84.499	84.499	0.11	0.0	38.3	0.1	0.5
20000	30036	8.568	8.569	0.10	0.0	44.2	-0.1	0.4
20000	30030	16.522	16.522	0.10	0.0	58.9	0.0	0.0
20000	30035	23.092	23.093	0.10	0.0	59.5	-0.1	0.5
20000	30037	20.199	20.199	0.10	0.0	44.0	-0.1	0.7
System 4								
20001	20000	29.845	29.845	0.10	0.0	82.5	0.0	0.4
20001	20003 F	34.305	34.303	0.11	-0.2	87.7	0.2	2.0
20001	1001	72.484	72.483	0.11	-0.1	71.7	0.1	0.7
20001	30023	34.610	34.610	0.11	0.0	62.5	-0.1	0.4
20001	30034	30.727	30.728	0.10	0.1	62.1	-0.1	0.7
20001	30041	23.329	23.329	0.10	0.0	61.3	0.0	0.3
20001	30040	14.378	14.378	0.10	0.0	46.3	0.0	0.2
20001	30031	10.554	10.555	0.10	0.0	45.3	-0.1	0.4
20001	30035	6.992	6.992	0.10	0.0	59.6	0.0	0.1
20001	30030	13.459	13.459	0.10	0.0	60.1	0.0	0.1
20001	30036	21.439	21.439	0.10	0.0	46.3	0.0	0.3
20001	1004	24.007	24.007	0.10	0.0	68.5	0.0	0.2
20001	1003	46.199	46.199	0.11	0.0	72.8	0.0	0.0
System 5								
20002 F	20003 F	34.453	34.452	0.11	-0.1	86.4	0.2	1.4
20002 F	20000	36.693	36.693	0.11	0.0	77.7	0.0	0.0
20002 F	1006	65.995	65.995	0.11	0.0	50.3	-0.1	0.4
20002 F	30037	17.198	17.198	0.10	0.0	43.2	0.0	0.3
20002 F	30032	11.740	11.739	0.10	0.0	44.9	0.1	0.4
20002 F	30033	15.301	15.301	0.10	0.0	46.3	0.0	0.0
20002 F	30023	22.357	22.357	0.10	0.0	60.7	0.0	0.3
20002 F	30034	29.968	29.968	0.10	0.0	61.6	0.0	0.0
20002 F	30041	32.165	32.166	0.10	0.1	62.1	-0.1	0.6
20002 F	1003	79.338	79.339	0.11	0.1	75.8	-0.1	0.8
20002 F	1001	69.778	69.779	0.11	0.1	69.2	-0.1	0.9
System 6								
20003 F	20002 F	34.453	34.452	0.11	-0.1	86.4	0.2	1.4
20003 F	20001	34.304	34.303	0.11	-0.1	87.7	0.1	1.0
20003 F	30032	26.181	26.181	0.10	0.0	47.7	-0.1	0.4
20003 F	30033	19.773	19.774	0.10	0.0	46.8	-0.1	0.5
20003 F	30023	12.894	12.894	0.10	0.0	60.7	-0.1	0.5
20003 F	30034	6.713	6.713	0.10	0.0	60.4	0.0	0.3
20003 F	30041	13.360	13.361	0.10	0.0	61.2	0.0	0.2
20003 F	30040	20.230	20.230	0.10	0.0	47.2	0.0	0.2
20003 F	30031	25.845	25.845	0.10	0.0	48.0	0.0	0.0
20003 F	30035	32.960	32.961	0.10	0.0	62.6	-0.1	0.6
20003 F	30030	34.672	34.671	0.11	-0.1	62.8	0.1	1.0
20003 F	1004	53.569	53.567	0.11	-0.1	71.9	0.2	1.2
20003 F	1003	45.482	45.483	0.11	0.1	74.5	-0.1	0.8
20003 F	1001	43.566	43.566	0.11	0.0	71.0	0.0	0.0
20003 F	1007	56.717	56.717	0.11	0.0	41.9	0.1	0.5

E PROTOKOLLE DER NETZMESSUNG

Richtungen									
Punktkennzeichen	Punktkennzeichen	Richtung gon	V-quer cm	s(V) mgon	V mgon	EV %	GF mgon	NV	
System 1									
S1	1007	0.0000	-0.03	1.58	-0.5	33.3	1.5	0.5	
	1001	345.8266	0.07	1.36	0.8	58.6	-1.3	0.7	
	1002	326.7367	0.04	1.00	0.3	37.9	-0.8	0.5	
	1003	297.3609	0.04	1.13	0.4	65.8	-0.6	0.4	
	1004	260.8057	-0.02	1.08	-0.1	64.6	0.2	0.1	
	1005	201.4820	-0.03	0.85	-0.1	34.8	0.4	0.2	
	1006	168.1249	-0.07	1.04	-0.6	37.9	1.5	0.9	
System 2									
S2	1001	0.0000	-0.04	0.96	-0.3	57.8	0.5	0.4	
	1002	375.3489	-0.11	0.92	-0.7	42.0	1.6	1.1	
	1003	367.7920	0.10	1.17	0.9	60.5	-1.5	1.0	
	1004	337.4822	0.04	2.16	0.7	55.6	-1.3	0.5	
	1006	113.1309	0.04	1.09	0.3	28.4	-1.2	0.6	
System 3									
20000	20002 F	0.0000	-0.03	1.87	-0.5	68.2	0.7	0.3	
	20001	288.2135	-0.11	2.25	-2.3	81.1	2.8	1.1	
	1004	268.9852	0.08	1.44	1.0	61.5	-1.6	0.9	
	1003	306.3250	-0.02	1.11	-0.2	54.2	0.4	0.2	
	1005	159.1227	0.01	1.03	0.1	19.8	-0.3	0.1	
	30036	277.7133	-0.03	7.46	-1.9	43.7	4.3	0.4	
	30030	293.6722	-0.02	3.92	-0.9	59.0	1.5	0.3	
	30035	292.6127	0.03	2.84	0.9	59.8	-1.4	0.4	
	30037	11.4013	0.06	3.23	2.0	44.1	-4.4	0.9	
System 4									
20001	20000	0.0000	-0.07	2.25	-1.4	72.6	1.9	0.7	
	20003 F	304.0815	-0.10	1.98	-1.9	82.4	2.2	1.0	
	1001	277.0906	-0.10	1.12	-0.9	52.7	1.6	1.0	
	30023	328.0380	-0.01	1.97	-0.1	60.5	0.2	0.1	
	30034	315.2348	0.01	2.19	0.2	61.0	-0.3	0.1	
	30041	321.2806	0.08	2.82	2.1	60.8	-3.4	1.0	
	30040	294.0332	-0.02	4.48	-0.8	46.0	1.7	0.3	
	30031	338.6161	0.03	6.07	1.9	45.1	-4.3	0.5	
	30035	385.3420	0.00	9.13	-0.4	60.5	0.7	0.1	
	30030	393.2886	0.06	4.78	2.9	60.6	-4.8	0.8	
	30036	4.1801	-0.03	3.05	-0.9	45.4	2.1	0.5	
	1004	156.6639	-0.04	2.74	-0.9	59.5	1.6	0.4	
	1003	229.7178	0.22	1.55	3.0	61.2	-4.9	2.5	
System 5									
20002 F	20003 F	0.0000	0.00	1.98	0.0	83.7	0.0	0.0	
	20000	315.1776	-0.02	1.87	-0.4	76.1	0.5	0.2	
	1006	247.7606	0.02	1.19	0.2	31.8	-0.6	0.3	
	30037	301.7530	0.07	3.77	2.7	44.0	-6.2	1.1	
	30032	358.0149	0.05	5.47	2.9	44.2	-6.6	0.8	
	30033	386.3199	0.08	4.22	3.5	45.1	-7.7	1.2	
	30023	389.7337	0.05	2.93	1.3	60.1	-2.2	0.6	
	30034	390.0920	0.00	2.24	0.1	61.3	-0.1	0.0	
	30041	374.6581	0.06	2.10	1.1	61.4	-1.9	0.7	
	1003	391.0586	-0.10	1.06	-0.8	59.9	1.3	1.0	
	1001	33.4874	-0.03	1.15	-0.3	56.6	0.5	0.4	
System 6									
20003 F	20002 F	0.0000	-0.03	1.98	-0.5	74.8	0.6	0.3	
	20001	107.4689	0.03	1.98	0.6	81.8	-0.7	0.3	
	30032	17.7153	0.06	2.53	1.4	46.2	-3.1	0.8	
	30033	10.5469	0.08	3.29	2.5	46.0	-5.5	1.1	
	30023	17.9549	0.06	4.99	3.0	60.8	-4.9	0.8	

E PROTOKOLLE DER NETZMESSUNG

30034	48.6459	0.05	9.51	4.7	60.6	-7.8	0.6
30041	76.5987	0.02	4.82	0.9	61.3	-1.4	0.2
30040	114.5961	-0.01	3.22	-0.5	47.1	1.0	0.2
30031	93.9439	0.05	2.56	1.1	47.5	-2.4	0.6
30035	94.4556	-0.03	2.05	-0.6	60.9	1.0	0.4
30030	82.4750	-0.03	1.97	-0.6	60.6	1.0	0.4
1004	128.8468	-0.12	1.38	-1.4	62.3	2.3	1.3
1003	184.2948	-0.11	1.56	-1.5	63.3	2.3	1.2
1001	259.4792	0.07	1.62	1.1	56.6	-1.9	0.9
1007	311.8714	0.06	1.32	0.7	33.6	-2.1	0.9

Mittlere Fehler a priori

Richtungen	0.00070 gon	0.0010 m	Zieleinstellung
Polarstrecken	0.0010 m	1.50 ppm	relativ

Statistische Beobachtungsgruppen

Beobachtungsgruppe	Fehleranteil	Redundanzanteil	VVP
Insgesamt	0.762	70.0 100.00 %	40.645
Festpunkte	0.688	0.9 1.33 %	0.442
Richtungen	0.753	33.2 47.50 %	18.876
Polarstrecken	0.772	35.8 51.17 %	21.328

Kleinste Redundanzen

Beobachtungs- typ	System	Punktkennezeichen auf/von	Punktkennezeichen nach	V cm/mgon	EV %	NV	EP cm
Richtung	3	20000	1005	0.1	19.8	0.1	0.0
Richtung	2	S2	1006	0.3	28.4	0.6	-0.1
Richtung	5	20002	1006	0.2	31.8	0.3	0.0
Richtung	1	S1	1007	-0.5	33.3	0.5	0.1
Richtung	6	20003	1007	0.7	33.6	0.9	-0.1
...							

Größte normierte Verbesserungen (normalverteilt)

Beobachtungs- typ	System	Punktkennezeichen auf/von	Punktkennezeichen nach	V cm/mgon	EV %	NV	EP cm
Richtung	4	20001	1003	3.0	61.2	2.5	-0.1
Polarstrecke	4	20001	20003	-0.2	87.7	2.0	0.0
Polarstrecke	1	S1	1004	0.2	62.8	1.8	-0.1
Polarstrecke	3	20000	20001	-0.1	82.5	1.4	0.0
Polarstrecke	6	20003	20002	-0.1	86.4	1.4	0.0
Polarstrecke	5	20002	20003	-0.1	86.4	1.4	0.0
Richtung	6	20003	1004	-1.4	62.3	1.3	0.1
Richtung	5	20002	30033	3.5	45.1	1.2	-0.1
Polarstrecke	6	20003	1004	-0.1	71.9	1.2	0.0
Richtung	6	20003	1003	-1.5	63.3	1.2	0.1
...							

Schlussprobe AtPV = 5.4E-16

E.2 Höhennetzausgleichung

Netzausgleichung - Höhen

NR = 16

Eingelesene Festpunkte

Punktkennzeichen	Z	s(V)Z
20002	2.000	0.0000

Ausgeglicheene Höhen der Festpunkte

Punktkennzeichen	Z	sZ cm
20002	2.000	0.00

Quadratisches Mittel sL = 0.00

Ausgeglicheene Höhen der Neupunkte

Punktkennzeichen	Z	sZ cm	
S1 D	2.098	0.05	
S2 D	2.416	0.05	
1001 D	1.157	0.04	
IMAGE NO.	1003 D	1.496	0.04
1004 D	1.598	0.04	
1005 D	1.038	0.09	
1006 D	0.862	0.06	
1007 D	0.656	0.06	
20000 D	2.667	0.03	
20001 D	2.475	0.03	
20003 D	2.209	0.02	
30023 D	0.864	0.03	
30030 D	1.099	0.04	
30031 D	0.973	0.04	
30032 D	0.857	0.04	
30033 D	0.907	0.04	
30034 D	0.828	0.03	
30035 D	1.096	0.04	
30036 D	1.161	0.04	
30037 D	1.004	0.04	
30040 D	0.907	0.04	
30041 D	0.958	0.04	

Quadratisches Mittel sL = 0.05

Höhendifferenzen

Punktkennzeichen	Punktkennzeichen	dZ	s(V) cm	V cm	EV %	GF cm	NV
System 1							
S1	1007	-1.443	0.10	0.0	36.1	-0.1	0.9
	1001	-0.941	0.11	0.0	58.9	0.0	0.1
	1002	-0.766	0.15	-0.1	38.6	0.2	1.0
	1003	-0.602	0.13	0.0	70.2	0.0	0.4
	1004	-0.499	0.13	-0.1	73.8	0.1	1.1
	1005	-1.061	0.19	0.1	59.8	-0.1	0.8
	1006	-1.236	0.14	0.0	60.9	0.0	0.2
System 2							
S2	1001	-1.260	0.16	0.0	75.5	-0.1	0.5
	1002	-1.086	0.17	0.1	49.5	-0.2	1.0
	1003	-0.921	0.12	0.1	66.4	-0.1	0.8

E PROTOKOLLE DER NETZMESSUNG

	1004	-0.818	0.08	0.0	42.7	0.0	0.1
	1006	-1.553	0.13	-0.2	57.1	0.3	2.3
System 3							
20000	20002	-0.665	0.09	-0.2	83.2	0.2	3.3
	20001	-0.192	0.08	0.0	84.6	0.0	0.4
	1004	-1.070	0.11	0.1	75.1	-0.1	0.8
	1003	-1.171	0.13	0.0	81.9	0.0	0.1
	1005	-1.629	0.14	0.0	32.5	0.1	0.8
	30036	-1.506	0.06	0.0	34.8	0.0	0.4
	30030	-1.569	0.07	0.0	54.8	0.0	0.0
	30035	-1.571	0.08	0.0	62.6	0.0	0.3
	30037	-1.663	0.07	0.0	45.1	0.0	0.5
System 4							
20001	20000	0.194	0.08	-0.1	84.6	0.2	2.6
	20003	-0.265	0.09	0.0	89.4	0.0	0.6
	1001	-1.319	0.13	0.1	78.8	-0.1	1.3
	30023	-1.611	0.09	0.0	70.8	0.0	0.2
	30034	-1.647	0.08	0.0	69.8	0.0	0.1
	30041	-1.517	0.08	0.0	62.1	0.0	0.5
	30040	-1.568	0.07	0.0	41.5	0.0	0.3
	30031	-1.502	0.06	0.0	35.0	0.0	0.2
	30035	-1.379	0.06	0.0	45.9	0.0	0.4
	30030	-1.377	0.06	0.0	53.6	-0.1	0.8
	30036	-1.314	0.07	0.0	53.4	0.0	0.4
	1004	-0.877	0.08	0.0	58.5	0.0	0.1
	1003	-0.979	0.10	0.0	72.4	0.0	0.1
System 5							
20002	20003	0.210	0.09	-0.1	87.6	0.1	1.5
	20000	0.668	0.09	-0.1	83.2	0.1	1.1
	1006	-1.139	0.12	0.1	53.7	-0.2	2.0
	30037	-0.996	0.07	0.0	41.1	0.0	0.5
	30032	-1.143	0.06	0.0	35.3	0.0	0.3
	30033	-1.093	0.07	0.0	41.8	0.0	0.3
	30023	-1.136	0.07	0.0	60.3	0.0	0.4
	30034	-1.172	0.08	0.0	68.2	0.0	0.2
	30041	-1.042	0.09	0.0	68.3	0.0	0.4
	1003	-0.502	0.14	-0.2	83.7	0.2	1.8
	1001	-0.842	0.13	-0.1	77.2	0.1	0.7
System 6							
20003	20002	-0.209	0.09	0.0	87.6	0.0	0.3
	20001	0.267	0.09	-0.1	89.4	0.1	1.3
	30032	-1.352	0.08	0.0	55.3	0.0	0.3
	30033	-1.303	0.07	0.0	48.2	0.0	0.3
	30023	-1.345	0.06	0.0	51.4	0.0	0.2
	30034	-1.381	0.06	0.0	44.5	0.0	0.3
	30041	-1.252	0.06	0.0	52.2	-0.1	0.8
	30040	-1.302	0.07	0.0	50.0	0.0	0.3
	30031	-1.236	0.08	0.0	56.7	0.0	0.2
	30035	-1.113	0.09	0.0	71.8	0.1	0.7
	30030	-1.110	0.09	-0.1	71.7	0.1	0.9
	1004	-0.611	0.11	0.0	78.2	0.0	0.0
	1003	-0.713	0.10	0.0	72.2	0.0	0.4
	1001	-1.052	0.10	0.0	64.8	0.1	0.7
	1007	-1.553	0.11	-0.1	46.1	0.1	0.9

Mittlere Fehler a priori

Vertikalwinkel 0.00070 gon 0.0005 m Höheneinstellung

Statistische Beobachtungsgruppen

Beobachtungsgruppe Fehleranteil Redundanzanteil VVP

E PROTOKOLLE DER NETZMESSUNG

Insgesamt	0.732	37.0	100.00 %	19.841
Festpunkte	0.000	0.0	0.00 %	0.000
Höhendifferenzen	0.732	37.0	100.00 %	19.841

Größte normierte Verbesserungen (t-verteilt)

Beobachtungs- typ	Sys- tem	Punktkenneichen auf/von	Punktkenneichen nach	V cm	EV %	NV	EP cm
Höhendifferenz	3	20000	20002	-0.2	83.2	3.3	0.0
Höhendifferenz	4	20001	20000	-0.1	84.6	2.6	0.0
Höhendifferenz	2	S2	1006	-0.2	57.1	2.3	0.1
Höhendifferenz	5	20002	1006	0.1	53.7	2.0	-0.1
Höhendifferenz	5	20002	1003	-0.2	83.7	1.8	0.0
Höhendifferenz	5	20002	20003	-0.1	87.6	1.5	0.0
Höhendifferenz	4	20001	1001	0.1	78.8	1.3	0.0
Höhendifferenz	6	20003	20001	-0.1	89.4	1.3	0.0
Höhendifferenz	5	20002	20000	-0.1	83.2	1.1	0.0
Höhendifferenz	1	S1	1004	-0.1	73.8	1.1	0.0
...							

E.3 Koordinatenliste

Punktnummer	Rechtswert	Hochwert	SL	Höhe	Sh
S1	-12.703	23.660	0.0011	2.098	0.0005
S2	55.656	6.770	0.0021	2.416	0.0005
1001	-35.035	-25.894	0.0017	1.157	0.0005
1002	-23.667	-64.637	0.0027	1.331	0.0010
1003	11.108	-44.105	0.0017	1.496	0.0004
1004	48.162	-23.450	0.0020	1.598	0.0004
1005	113.362	58.979	0.0046	1.038	0.0009
1006	44.996	82.730	0.0033	0.862	0.0007
1007	-55.734	10.516	0.0022	0.656	0.0007
2001	28.993	62.771	0.0010	0.923	0.0005
2002	66.318	8.207	0.0008	0.986	0.0007
2003	48.086	-23.593	0.0009	1.670	0.0005
2004	11.265	-44.411	0.0010	1.569	0.0004
2005	-35.294	-25.928	0.0010	1.223	0.0005
2006	-30.874	7.825	0.0010	0.667	0.0004
20000	35.655	25.787	0.0016	2.668	0.0003
20001	34.067	-4.016	0.0013	2.475	0.0003
20002	0.000	34.452	0.0012	2.000	0.0000
20003	0.000	0.000	0.0000	2.209	0.0002
30001	23.842	13.796	0.0015	2.229	0.0006
30002	21.419	16.468	0.0015	2.223	0.0006
30003	16.903	21.348	0.0015	3.464	0.0006
30004	14.663	21.440	0.0015	1.426	0.0006
30005	12.263	17.259	0.0014	3.489	0.0006
30006	16.767	12.239	0.0014	2.239	0.0006
30007	19.085	9.699	0.0014	2.222	0.0006
30008	21.120	9.482	0.0015	2.241	0.0006
30009	23.780	11.880	0.0015	2.253	0.0006
30010	19.145	9.627	0.0014	6.207	0.0006
30011	16.779	12.227	0.0014	5.959	0.0006
30012	21.149	9.519	0.0015	6.066	0.0006
30013	23.728	11.859	0.0015	6.062	0.0006
30014	23.798	13.838	0.0015	5.972	0.0006
30015	21.431	16.438	0.0015	5.958	0.0006
30016	15.782	17.232	0.0015	5.945	0.0006
30017	19.774	18.243	0.0015	5.950	0.0006
30018	18.017	19.412	0.0015	5.433	0.0006
30021	13.428	14.917	0.0014	5.430	0.0006
30022	16.499	17.789	0.0015	9.463	0.0006
30023	3.589	12.385	0.0008	0.864	0.0004
30024	11.696	19.114	0.0014	3.257	0.0006
30025	8.473	20.343	0.0014	2.081	0.0006
30028	10.742	22.191	0.0014	2.218	0.0006
30029	12.774	30.402	0.0008	0.928	0.0005
30030	33.366	9.425	0.0014	1.099	0.0004
30031	25.728	2.454	0.0012	0.973	0.0004
30032	7.193	25.174	0.0012	0.857	0.0004
30033	3.262	19.503	0.0010	0.907	0.0004
30034	4.645	4.847	0.0007	0.828	0.0004
30035	32.836	2.867	0.0013	1.096	0.0004
30036	36.610	17.272	0.0016	1.161	0.0004
30037	17.191	33.978	0.0015	1.004	0.0004
30038	25.496	32.240	0.0008	1.047	0.0005
30039	29.818	26.984	0.0008	1.008	0.0005
30040	19.701	-4.598	0.0011	0.907	0.0004
30041	12.468	4.801	0.0008	0.958	0.0004
30097	19.826	18.123	0.0015	9.490	0.0006
30100	18.373	19.162	0.0015	12.469	0.0006
30103	12.486	14.081	0.0014	10.809	0.0006
30104	12.669	13.059	0.0014	10.763	0.0006
30105	14.411	12.058	0.0014	10.849	0.0007
30107	18.597	19.122	0.0015	12.472	0.0006
30110	23.400	14.253	0.0015	10.235	0.0006
30111	23.553	13.703	0.0015	9.509	0.0007
30112	23.386	11.806	0.0011	10.181	0.0005
30113	23.120	11.304	0.0015	9.613	0.0006
30114	21.677	10.006	0.0015	10.205	0.0006
30115	19.275	9.866	0.0015	10.183	0.0006
30116	21.086	9.830	0.0015	9.610	0.0006
30117	14.865	12.477	0.0014	7.888	0.0007
30119	16.275	13.059	0.0014	9.842	0.0006