

**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN**

Vienna University of Technology

## DIPLOMARBEIT

# Direkte Georeferenzierung von uLFZ-Luftbildern entlang linearer Infrastrukturobjekte

ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation - E 120  
Forschungsgruppe Photogrammetrie

unter der Anleitung von

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

Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Briese

durch

**Michael Scherr, B.Sc.**

Bahnhofstraße 6/5

3133 Traismauer

Matr.-Nr.: 0726526

Wien, April 2014

# Danksagung

Im Zuge dieser Arbeit wurde ich von einigen Personen und Firmen unterstützt, bei denen ich mich an dieser Stelle herzlichst bedanken möchte.

Bei den ÖBB, vertreten durch Frau Dr. Michaela Haberler-Weber, DI Arnold Eder und DI Thomas Redl, fand ich von Beginn an großes Interesse für dieses Thema. Für die gemeinsame Erörterung der Interessen der ÖBB und deren Einbindung in diese Arbeit, sowie für die Finanzierung von Sensoren für die praktische Umsetzung möchte ich mich besonders bedanken.

Die regelmäßige Unterstützung durch DI Christian Neuner und DI Gerhard Neuner vom Unternehmen *twins.nrn*, angefangen bei der Implementierung der Sensoren bis hin zur Befliegung des Testgebiets, habe ich oftmals dankend angenommen.

Besonderer Dank gebührt meinen Kollegen der *Senftner Vermessung ZT GmbH*, allen voran DI Gerhard Senftner, die mich während des gesamten Studiums in vielerlei Hinsicht konsequent unterstützt haben.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinem Betreuer Dr. Christian Briese und bei DI Martin Wieser, die mir immer wieder unterstützend zur Seite gestanden sind. Ebenso möchte ich Univ.Prof. Dr. Norbert Pfeifer für die gemeinsame Erarbeitung des Themas danken.

Nicht zuletzt möchte ich mich besonders bei meiner Familie aber auch bei meinen Freunden bedanken, die mich immer wieder emotional unterstützt und von Anfang an mein Vorhaben geglaubt haben.

# Kurzfassung

Durch die technologische Weiterentwicklung, Minituarisierung und kostengünstigere Herstellung von Sensoren wie GNSS-Empfänger, inertielle Messeinheiten (Drehraten- und Beschleunigungssensoren), Magnetometer und Barometer werden unbemannte Luftfahrzeuge (uLFZ, engl. *unmanned aerial vehicles* - UAV) für die Nahbereichsluftbildphotogrammetrie immer häufiger verwendet. Eine Lücke zwischen herkömmlichen terrestrischen Messmethoden und aufwändigen bemannten Luftbild-Flugmissionen könnte so eventuell geschlossen werden.

Unter der Verwendung eines uLFZ des Herstellers *twins.nrn* wurden Untersuchungen zur direkten Georeferenzierung von uLFZ-Luftbildern, d.h. der Bestimmung der Position und der Orientierung von Fotos im 3D-Raum (äußere Orientierung), vorgenommen. Das primäre Ziel der Arbeit war, die bisherigen Arbeiten der Forschungsgruppe Photogrammetrie am Department für Geodäsie und Geoinformation an der Technischen Universität Wien weiterzuführen und die bisher erreichten Genauigkeiten der direkten Georeferenzierung zu steigern. Durch die Implementierung eines Zweifrequenz-GPS-Empfängers am uLFZ sollten die Aufnahmepositionen der Luftbilder zu den Aufnahmezeitpunkten im Bereich von wenigen Zentimetern bestimmt werden können. Der Vorteil der direkten Georeferenzierung liegt im Verzicht oder zumindest bei der Reduktion von Passpunkten am Boden, die vor allem im unwegsamen Gelände oder in bewaldeten Gebieten aufwendig zu bestimmen sind. Zur Vermeidung des Deformationsverhaltens größerer Bildblöcke unter Verwendung von wenigen Passpunkten, können die Parameter der äußeren Orientierung außerdem als zusätzliche Beobachtungen im Bündelblockausgleich eingeführt werden.

Die Einsatzmöglichkeit eines uLFZ und die Verwendung der direkten Georeferenzierung bei linearen Infrastrukturobjekten stellte das zweite Ziel der Arbeit dar. Aus diesem Grund und der Kooperation mit der ÖBB-Infrastruktur AG, Stab Forschung und Entwicklung und Stab Vermessung und Datenmanagement, wurde diese Möglichkeit anhand eines Trassenabschnittes einer Eisenbahnstrecke in Herzogenburg (NÖ), in Flughöhen von 40m und 70m getestet.

Für die Integration der synchronisierten Messdaten wurde ein erweitertes Kalman-Filter eingesetzt, das neben den Parametern der direkten Georeferenzierung auch die Biase der Sensoren der inertialen Messeinheit mitschätzt. Die Qualität der hier erprobten Methode konnte durch die Differenzbildung der Positionen und Orientierungen zwischen direkt und über Passpunkte indirekt georeferenzierten Luftbildern verifiziert werden. Die daraus resultierenden einfachen Standardabweichungen der Differenzen zwischen direkter und indirekter Georeferenzierung nehmen bei beiden Flügen für den Roll- und Nick-Winkel  $< 1^\circ$ , für den Yaw-Winkel  $< 2^\circ$  und für die Lage- und Höhenkoordinate  $< 3\text{cm}$  an. Die Auswirkungen der erreichbaren

Genauigkeit der direkten Georeferenzierung auf Objektpunkte am Boden wurde anschließend diskutiert. Hier wurde gezeigt, dass sich Unsicherheiten der inneren Orientierung des Kamerasystems zum Teil stark auf die Koordinaten der Objektpunkte auswirken und mit Differenzen von bis zu 12cm in der Lage und 45cm in der Höhe zu rechnen ist. Die Berücksichtigung von wenigen Passpunkten im Bündelblockausgleich brachte eine deutliche Reduktion der Differenzen und es konnten Standardabweichungen in Lage und Höhe von  $<2\text{cm}$  erreicht werden.

Im Hinblick auf hohe Genauigkeitsanforderungen wurden die indirekt georeferenzierten Luftbilder für die photogrammetrische Auswertung von Objekten am Boden herangezogen und mit Daten einer terrestrischen Vermessung der *Senftner Vermessung ZT GmbH* verglichen. Dieser Vergleich zeigte, dass Auswertungen von Gleisen u.a. Objekten mit einer einfachen Standardabweichung von 1-2cm möglich sind. Als Nebenprodukt der photogrammetrischen Auswertung konnte ein hochauflösendes Orthophoto abgeleitet werden, das sich für Dokumentations- oder Planungszwecke eignen kann.

Nach einer kurzen Einleitung werden im zweiten Kapitel Infrastrukturobjekte im Allgemeinen beschrieben, bevor aufgrund der Kooperation mit den ÖBB näher auf Eisenbahntrassen eingegangen wird. Kapitel zwei beinhaltet ebenfalls einen Überblick von uLFZ, deren rechtlichen Rahmenbedingungen in Österreich, sowie die Beschreibung des eingesetzten uLFZ in Form eines Hexakopters. Auf die direkte Georeferenzierung, integrierte Navigationssysteme und die Verwendung der Kalman-Filterung wird im dritten Kapitel eingegangen. Die Datensynchronisation, die Kamerakalibrierung und erste Testmessungen werden im Kapitel vier beschrieben. Nach der Beschreibung des Aufnahmegebiets und der Flugplanung folgt im fünften Kapitel die Durchführung der Befliegung des Testgebiets. Im Kapitel sechs erfolgt die Auswertung der Messdaten und eine Qualitätsuntersuchung der direkten Georeferenzierung. Das siebte und letzte Kapitel fasst die vorliegende der Arbeit zusammen.

# Abstract

Driven by technological developments, miniaturisation and the cost-efficient construction of sensors such as GNSS-receivers, inertial measurement units, magnetometers and barometers, so called unmanned aerial vehicles (UAVs) are increasingly utilised in the field of close range airborne photogrammetry. Those UAVs might have the potential to close the gap between conventional terrestrial measurement methods and complex manned missions in aerial photogrammetry.

In the context of this thesis, extensive investigations on the direct geo-referencing of aerial images, i.e. the determination of the current position and orientation of images in 3D-space, were carried out using a particular UAV manufactured by the company *twins.nrn*. The main goals of this thesis were the continuation of previous work carried out at the research group photogrammetry of the Department of Geodesy and Geoinformation at the Vienna university of Technology on the one hand, and to improve the accuracy of direct geo-referencing on the other hand. By implementing a dual-frequency GNSS receiver on the UAV, the current position at the exposure time of the images should be determined at an accuracy level of several centimetres. The main advantage of direct geo-referencing resides in the possibility to reduce the number of required control points on the ground, which are difficult to measure especially in impassable or forested areas, or even to omit them completely. The elements of the exterior orientation can serve as additional observation within the bundle block adjustment in the case of insufficient numbers of control points and to avoid the deformation of image bundles.

The application for UAVs in the field of direct geo-referencing for the mapping of linear infrastructure facilities (such as rails) describes a second goal of the thesis. Therefore, the possibility to survey a railroad line in Herzogenburg (Lower Austria) was tested at flight altitudes of 40 and 70 metres in cooperation with the *ÖBB-Infrastruktur AG*, Department of Research and Development and Department of Surveying and Data Management.

For the integration of the synchronized measurement data an extended Kalman filter was applied. Hereby, not only the parameters of the direct geo-referencing, but also the biases of the inertial measurement unit were estimated. The quality of the method could be verified by analyzing the differences between the positions and orientations that were calculated directly on the one hand, and indirectly derived with the useage control-points on the other hand. The resulting standard deviations for both flights are in the range of  $<1^\circ$  for the roll and pitch angles,  $<2^\circ$  for the yaw angle and  $<3\text{cm}$  for the 3D position. In a further step, the impact of the accuracy for direct geo-referencing on ground-based object points was evaluated and discussed. It could be shown, that uncertainties within the interior camera orientation stron-

gly affect the coordinates of the object points in the range of up to 12 centimetres for the position components, and up to 45 centimetres for the height component. The consideration of some control-points within the bundle-block adjustment cause an obvious reduction of the differences, and standard deviations in position and height of <2cm could be achieved.

With regard to the high demands on the accuracy, the indirect geo-referenced aerial images were used for a photogrammetric evaluation of ground objects and compared to a conventional terrestrial survey that was carried out by the company *Senftner Vermessung ZT GmbH*. The comparison revealed that the evaluation of railway lines is possible with standard deviations of 1-2cm. As a by-product of the photogrammetric evaluation, a high resolution orthophoto suited for documentation or planning purposes could be derived.

After a short introduction, infrastructure objects are described in general terms before focusing on railway lines in more details due to the cooperation with the company *ÖBB* (Austrian Federal Railways). Chapter two gives an overview on UAVs in general, the associated regulatory framework and deals with the description of the applied UAV in form of a hexacopter. In the third chapter, the focus is laid on direct geo-referencing, integrated navigation systems and the employment of Kalman filtering in this context. Data synchronization, camera calibration and first test-scenarios are depicted in chapter four, followed by a description of the survey-area, flight planning and the flight mission in chapter five. In chapter six, the evaluation of the measurement data and the quality assessment of direct geo-referencing are presented. A complete summary of the thesis can be found in chapter seven.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Ziele</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Infrastrukturobjekte und unbemannte Luftfahrzeuge</b>	<b>3</b>
2.1	Lineare Infrastrukturobjekte . . . . .	3
2.2	Definition und Typen eines uLFZ . . . . .	5
2.3	Rechtliche Rahmenbedingungen von uLFZ in Österreich . . . . .	7
2.4	Funktionsweise des eingesetzten uLFZ . . . . .	9
2.4.1	Sensoren des Hexakopters . . . . .	10
2.4.2	Steuerung des Hexakopters . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Direkte Georeferenzierung und integrierte Navigationssysteme</b>	<b>16</b>
3.1	Direkte Georeferenzierung . . . . .	16
3.2	Koordinatensysteme . . . . .	17
3.3	Integrierte Navigationssysteme . . . . .	19
3.3.1	Inertiale Navigationssysteme . . . . .	20
3.3.1.1	Drehratensensor . . . . .	20
3.3.1.2	Beschleunigungsmesser . . . . .	22
3.3.1.3	Fehlerbetrachtung . . . . .	23
3.3.2	Globales Navigationssatellitensystem - GNSS . . . . .	25
3.3.3	Magnetometer und Barometer . . . . .	30
3.4	Verwendete Sensoren und Implementierung in das uLFZ . . . . .	30
3.5	Grundlagen des Kalman-Filters . . . . .	36
3.6	Realisierung eines EKF für uLFZ . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Datensynchronisation und Systemkalibrierung</b>	<b>45</b>
4.1	Datensynchronisation . . . . .	45
4.2	Kamerakalibrierung . . . . .	49
4.2.1	Photogrammetrische Grundlagen . . . . .	49
4.2.1.1	Parameter der inneren Orientierung . . . . .	50

4.2.1.2	Abbildungsfehler . . . . .	52
4.2.1.3	Kalibrierungsmethoden . . . . .	53
4.2.2	Experimentelle Untersuchung der eingesetzten Kamera . . . . .	54
4.3	Systemkalibrierung . . . . .	59
4.3.1	Passpunktfeld . . . . .	60
4.3.2	Testmessungen und Auswertungen . . . . .	63
4.3.3	Mounting-Calibration . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Projektdurchführung</b>	<b>75</b>
5.1	Beschreibung des Aufnahmegebiets . . . . .	75
5.2	Flugplanung . . . . .	79
5.2.1	Normalfall und Genauigkeitsabschätzung . . . . .	79
5.2.2	Örtliche Gegebenheiten und Wetterverhältnisse . . . . .	82
5.2.3	Satellitensichtbarkeit . . . . .	82
5.2.4	Flugtrajektorie . . . . .	82
5.2.5	Passmarken für die indirekte Georeferenzierung . . . . .	86
5.3	Befliegung . . . . .	88
<b>6</b>	<b>Projektauswertung und Qualitätsuntersuchung der direkten Georeferenzierung</b>	<b>91</b>
6.1	Auswertung . . . . .	91
6.1.1	Auswertung des Fluges in 40 m Höhe . . . . .	93
6.1.2	Auswertung des Fluges in 70 m Höhe . . . . .	97
6.2	Vergleich der direkten zur indirekten Georeferenzierung . . . . .	97
6.2.1	Vergleich der Ergebnisse des Fluges in 40 m Höhe . . . . .	101
6.2.2	Vergleich der Ergebnisse des Fluges in 70 m Höhe . . . . .	104
6.2.3	Auswirkung der direkten Georeferenzierung auf die Objektpunktgenauigkeiten am Boden . . . . .	111
6.3	Vergleich der indirekten Georeferenzierung zur terrestrischen Vermessung . . .	115
6.4	Vergleich zwischen Flugplanung und durchgeführter Befliegung . . . . .	120
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>122</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>125</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>130</b>

# Kapitel 1

## Einleitung und Ziele

Die Einsatzmöglichkeiten von unbemannten Luftfahrzeugen (uLFZ, engl. *Unmanned Aerial Vehicles, UAV*) sind in der Photogrammetrie, Fernerkundung und vielen angrenzenden Wissenschaften zahlreich und mittlerweile von großer Bedeutung. Die Minituarisierung der Flugobjekte bzw. der für die Steuerung notwendigen Sensoren sowie deren kostengünstige Herstellung führte zu einer regelrechten Flut an Forschungsarbeiten sowohl in der Wissenschaft als auch in praxisnahen Institutionen (Briese *et al.*, 2013). Die Nahbereichsluftbildphotogrammetrie mit uLFZ bringt in kleinräumigen Gebieten von bis zu mehreren Quadratkilometern Ausdehnung erhebliche Vorteile mit sich. Die Einsparung von kostenintensiven, bemannten Flügen und hochauflösende Fotos auf Grund der geringen Flughöhe sind zwei davon (Peipe, 1988).

Neben der Minituarisierung der bordinternen Sensoren zur Navigation werden auch die für die Datenerfassung montierten Sensoren stets kleiner und auch kostengünstiger. Nicht nur kompakte Digitalkamerasysteme in unterschiedlichen Ausführungen finden Platz auf einem uLFZ. Anwendungen mit Laserscannersystemen, Thermalkameras oder Multi- und Hyperspektral-Kameras wurden bereits erfolgreich erprobt. Einen guten Überblick über aktuelle Forschungsbereiche bieten die Präsentationen der „UAV-G Konferenz 2013“ (UAV-G Konferenz, 2013).

Die direkte Georeferenzierung von Luftbildern ermöglicht die Bestimmung der äußeren Orientierung (Position und Orientierung im Raum) ohne Passpunkte am Boden und ohne der Verwendung des Bildinhaltes. Speziell für Gebiete im unwegsamen Gelände, im bewaldeten Gebieten oder bei Naturgefahren (z.B. Hangrutschungen) kann die Einsparung von aufwendigen Passpunktmessungen ein erheblicher Vorteil sein. Zusätzlich können die direkt bestimmten Parameter der äußeren Orientierung auch als Beobachtungen für eine Bündelblockausgleichung dienen. Die zusätzlichen Beobachtungen der äußeren Orientierung können mit wenigen Passpunkten am Boden kombiniert werden, wodurch Deformationen bei größeren Bildverbänden vermieden werden können (Kraus, 1996). Durch die näherungsweise orien-

tierten Bilder wird außerdem der Suchraum für die automatisierte oder teil-automatisierte Detektion von Verknüpfungspunkten stark eingeschränkt. Dies ist vor allem bei Aufnahmen von bewaldeten Gebieten oder auch bei Objekten mit wiederkehrenden Mustern ein erheblicher Vorteil.

Ziel dieser Arbeit ist eine Weiterführung von bisherigen Untersuchungen zur direkten Georeferenzierung der Forschungsgruppe Photogrammetrie des Departments für Geodäsie und Geoinformation. Während bei (Glira, 2012) und (Wieser, 2013) ausschließlich Low-Cost-Sensoren für die direkte Bestimmung der äußeren Orientierung verwendet wurden, kommt bei dieser Arbeit ein am verwendeten uLFZ zusätzlich montiertes Zweifrequenz-GPS zum Einsatz. Dadurch sollen die bisher erreichten Standardabweichungen der Positionskoordinaten von 2-3m erheblich reduziert und das Ergebnis der direkten Georeferenzierung verbessert werden. Die erreichbaren Genauigkeiten werden anhand von Aufnahmen eines Testfluges entlang eines Infrastrukturobjekts untersucht.

Nach einem Überblick und der Beschreibung von Infrastrukturobjekten im Allgemeinen wird aufgrund der Kooperation mit den ÖBB speziell auf Eisenbahntrassen eingegangen (Kapitel 2.1). Die Definitionen von uLFZ und die rechtlichen Rahmenbedingungen für deren Einsatz in Österreich erfolgen sowie eine detaillierte Beschreibung des eingesetzten uLFZ ebenfalls im zweiten Kapitel. Im Kapitel drei werden die Funktionsweisen und Fehlerhaushalte der zusätzlich verwendeten Sensoren und deren Implementierung in das uLFZ beschrieben. Die Integration aller Sensoren zu einem Navigationssystem mittels Kalman-Filterung schließen dieses Kapitel ab. Die Synchronisation aller Messdaten wird gleich zu Beginn im Kapitel vier diskutiert. Nach der Kalibrierung der verwendeten Kamera und ersten Testmessungen mit dem uLFZ am Messdach der TU Wien beginnt das fünfte Kapitel mit der Beschreibung des Aufnahmegebiets. Anhand einer 200m langen Eisenbahntrasse erfolgt zunächst die Flugplanung und eine Abschätzung der erreichbaren Genauigkeiten in einer Flughöhe von 40m und 70m. Die Durchführung der Befliegung rundet dieses Kapitel ab. Im sechsten und letzten Kapitel vor der Zusammenfassung werden die Daten der Testmessungen ausgewertet und die Ergebnisse von indirekter und direkter Georeferenzierung verglichen. Die Auswirkungen von Unsicherheiten bei der direkten Georeferenzierung auf Objektpunktkoordinaten werden im Anschluss betrachtet. Im Hinblick auf hohe Genauigkeitsanforderungen werden die indirekt georeferenzierten Luftbilder für die photogrammetrische Auswertung von Objekten herangezogen und mit Daten einer terrestrischen Vermessung verglichen. Das Kapitel wird durch eine Gegenüberstellung der Flugplanung und der tatsächlich durchgeführten Befliegung abgerundet. Das siebte und letzte Kapitel fasst die vorliegende Arbeit zusammen.

## Kapitel 2

# Infrastrukturobjekte und unbemannte Luftfahrzeuge

Im diesem Kapitel werden zuerst lineare Infrastrukturobjekte im Allgemeinen beschrieben. Aufgrund der Kooperation mit den ÖBB reduzieren sich die weiteren Betrachtungen von Infrastrukturobjekte auf Gleisanlagen. Danach wird auf die Definition von unbemannten Luftfahrzeugen und deren Klassifizierung eingegangen. Weiters werden die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen uLFZ-Typen diskutiert. Die rechtlichen Rahmenbedingungen für uLFZ in Österreich sind im seit 1.1.2014 gültigen Luftfahrtgesetz verankert. Die wesentlichsten Punkte des Gesetzes werden hervorgehoben. Nach der Definition von uLFZ wird im Kapitel 2.4 auf die Funktionsweise anhand des in dieser Arbeit eingesetzten uLFZ eingegangen.

### 2.1 Lineare Infrastrukturobjekte

Lineare Infrastrukturobjekte wie Straßen, Eisenbahnlinien, oberirdische Leitungen und Pipelines (z.B. Strom und Gas) sind in der heutigen Landschaft nicht mehr wegzudenken. Ursache dafür ist u.a. die Zunahme von Transporten sowohl auf der Straße als auch auf der Schiene. Auf Grund der großen Beanspruchung von Infrastrukturobjekten ist deren regelmäßige Überwachung essentiell (Wiedemann, 2008). Damit der Betrieb weitgehend ungestört weitergeführt werden kann, werden oftmals luftgestützte, berührungslose Datenerfassungssysteme wie Laserscanner oder Luftbildkameras eingesetzt. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen werden dadurch auch auf einfache Weise flächenhafte Aufnahmen möglich, die bei terrestrischen Methoden einen erheblichen Aufwand bedeuten würden.

Während bemannte Flugsysteme standardmäßig für Gebiete von mehreren Kilometern Ausdehnung zum Einsatz kommen und für die Datenerfassung von Infrastrukturobjekten bereits seit Jahren erfolgreich eingesetzt werden, sind die Restrisiken bei uLFZ nach wie vor vorhanden. Störungen der Sensoren oder durch den Piloten verursachte Flugfehler können leicht zu

einem Absturz und dadurch bei Straßen oder Autobahnen zu Verkehrsunfällen führen.

Aus diesem Grund wurden für die Untersuchungen in dieser Arbeit Infrastrukturobjekte der ÖBB betrachtet. Bei einem Absturz würde es unter Umständen zu einem Sachschaden kommen, die Wahrscheinlichkeit eines Personenschadens kann jedoch als weit geringer eingeschätzt werden.

### **Infrastrukturobjekte der ÖBB**

Die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) betreiben ein Streckennetz von 4894km innerhalb des österreichischen Staatsgebiets. Mit jährlichen Investitionen in das Schienennetz von rund 2 Mrd. Euro bis 2018 sind die ÖBB ein wichtiges, wirtschaftstreibendes Unternehmen und Auftraggeber vieler heimischer Betriebe (ÖBB, 2013). Neben zahlreichen Neubauobjekten ist die Instandhaltung des bestehenden Netzes ein wichtiger Aufgabenbereich der ÖBB-Infrastruktur AG, die eine 100-Prozent-Tochter der ÖBB-Holding-AG ist.

Geschwindigkeiten von bis zu 230km/h auf Strecken des Fernverkehrs stellen in vielen Bereich große Herausforderungen dar, angefangen bei der detaillierten Planung bis hin zur technisch erstklassigen Ausführung während der Bauphase. Das Netz des Fernverkehrs wird durch zahlreiche Nahverkehrsstrecken verdichtet. Auch bei diesen Strecken werden trotz zur Regel geringerer Betriebsgeschwindigkeiten hohe Ansprüche erwartet. Aufgrund des Reliefs in Österreich sind die Bahntrassen in unterschiedlichen Formen angelegt. Seien es sehr bogenlastige Strecken wie z.B. der Verlauf über den Semmering zwischen Wien und Graz oder eher geradlinige Bereiche wie z.B. die Strecke zwischen St. Pölten und Linz. Die 6207 Brücken und 247 Tunnel ergänzen das Gesamtbild (ÖBB, 2013).

Die Grundvoraussetzung für viele Bauvorhaben, seien es Neubauten oder Adaptierungen von bestehenden Bahntrassen, sind Bestandsdokumente der Interessensgebiete. Die Bestandserfassung von Bahntrassen oder bahnnahen Objekten werden überwiegend von Unternehmen aus dem Bereich Vermessungswesen abgewickelt, die für definierte Bereiche von den ÖBB beauftragt werden.

Unabhängig von der Tätigkeit am Gleiskörper, seien es Vermessungsarbeiten oder diverse Bauarbeiten, ist die oberste Prämisse für die ausführenden Personen und die ÖBB selbst die Sicherheit.

### **Sicherheit am Gleiskörper**

Die grundlegenden Regelungen für Arbeitnehmer im Gefahrenbereich der Gleise sind in den österreichischen Arbeitnehmerschutzvorschriften, insbesondere im ArbeitnehmerInnenschutzgesetz (AschG) und in der Eisenbahn-ArbeitnehmerInnenschutzverordnung (EisbAV) festgehalten. Aus diesen Vorschriften wurde in den letzten Jahren die Betriebsanweisung „ÖBB 40 - Schriftliche Betriebsanweisung Arbeitnehmerschutz“ abgeleitet (VAEB, 2011). Diese schriftliche Betriebsanweisung soll die praktische Umsetzung der Arbeitnehmerschutzbestimmung erleichtern und richtet sich sowohl an ÖBB-internes Personal als auch an Arbeit-

nehmerInnen von Fremdfirmen. Gemäß §14 AschG dient die „ÖBB 40“ in erster Linie als Unterweisungsgrundlage für den erwähnten Personenkreis.

Für Arbeiten außerhalb eines Tunnels sind die Sicherungsmaßnahmen „Keine Fahrt“, „Technische Warnung“ und „Organisatorische Warnung“ gültig, wobei grundsätzlich die höchst mögliche Sicherungsmaßnahme „Keine Fahrt“, also eine Streckensperre, anzustreben ist. Die technische Warnung der ArbeitnehmerInnen in Form von dauernd installierten oder mobilen Einrichtungen ist erst dann einzusetzen, wenn eine Streckensperre unmöglich ist. Als letzte Möglichkeit ist eine organisatorische Warnung der ArbeitnehmerInnen, d.h. mittels Sicherungsposten, vorzunehmen.

Persönliche Erfahrungen haben gezeigt, dass jede dieser Möglichkeiten ein gewisses Restrisiko mit sich trägt und mit hohem, personellen und/oder finanziellen Aufwand verbunden ist. Daher versuchen die ÖBB, die Arbeiten am Gleis grundsätzlich auf ein Minimum zu beschränken.

### **Genauigkeitsanforderungen**

Im Pflichtenheft für terrestrische Vermessungen der ÖBB (ÖBB, 2006b) sind die Anforderungen an die Arbeiten des Geodäten definiert. Gleis- und Weichenpunkte, Mastbolzen (5.1) und Bahnsteigkanten sind mit einer einfachen Standardabweichung von 1cm zu erfassen, wobei vor allem die Genauigkeit quer zur Gleisachse entscheidend ist. Erfahrungsgemäß werden für diese Ansprüche grundsätzlich terrestrische Vermessungsmethoden mit Totalstationen oder Nivelliergeräten eingesetzt.

Die ÖBB sehen aber auch den Einsatz luftgestützter Photogrammetrie und Laserscanning vor. Die daraus entstehenden Produkte werden speziell für großräumige Grundlagenplanungen wie Trassenauswahl, Umweltverträglichkeitsprüfungsverfahren sowie lärm- und wasserbautechnische Untersuchungen herangezogen (ÖBB, 2006a). Da es bei diesen Anwendungen um Grundlagenerhebungen geht, sind, je nach Flughöhe, mit einfachen Standardabweichungen von 0,2m bis 1,00m in Lage und Höhe die Anforderungen weit geringer als bei den terrestrischen Detailvermessungen.

## **2.2 Definition und Typen eines uLFZ**

Nach (Van Blyenburgh, 1999) sind uLFZ unbemannte und wiederverwendbare motorisierte Luftfahrzeuge, die ferngesteuert, automatisch oder aus einer Kombination dieser Eigenschaften betrieben werden können. Die automatische Steuerung, d.h. ohne Eingriff des Piloten, wird durch den Einsatz von zusätzlichen Sensoren und Regelkreissystemen realisiert (siehe Kapitel 2.2). Neben der Bezeichnung uLFZ oder UAV sind noch andere wie *Remotely Piloted Vehicle* (RPV), *Remotely Operated Aircraft* (ROA), *Remotely Piloted Aircraft* (RPA), *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS) oder Unmanned Vehicle Systems (UVS) in Verwendung.

Der Begriff Unmanned Aircraft Systems (UAS) wurde ursprünglich von der U.S. Navy eingeführt und steht für das gesamte System, also das Luftfahrzeug und die Bodenkontrollstation (Eisenbeiß, 2009).

Tabelle 2.1: Klassifizierung von uLFZ (Eisenbeiß, 2009)

	Leichter als Luft	Schwerer als Luft		
		flexible Flügel	Starrflügler	Drehflügler
Unmotorisiert	Ballone	Drachenflieger Paragleiter Kites	Gleitflugzeug	Rotor-Kite
Motorisiert	Luftschiffe	Paragleiter	Propellerflugzeug Düsenflugzeug	Einzelrotor Koaxial Quadrokopter Multikopter

(Eisenbeiß, 2009) klassifiziert die verschiedensten Formen von uLFZ im Hinblick auf Motorisierung, Gewicht und Flügeigenschaften und sind in der Tab. 2.1 zusammengefasst. (Everaerts *et al.*, 2008) differenziert bei den uLFZ (Tab. 2.1) weiter bezüglich Nutzlast, Flugdauer und Reichweite, Fluggeschwindigkeit, Steuerung u.a. Eigenschaften. (Gira, 2012) fasst die Klassifizierungen zusammen und hebt Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme hervor.

Luftschiffe oder Ballone sind in einfachen und günstigen Bauweisen erhältlich. Sie weisen kaum Vibrationen auf und lange Betriebszeiten sind möglich. Auf Grund der Größe sind für den Einsatz viele Leute notwendig und bei Wind sind sie schwer lenkbar.

Mikro-uLFZ sind sehr leise und mit einer Größe von wenigen Zentimetern sehr kleine Systeme. Die Aufnahme von sehr geringen Nutzlasten (100-200g) und die kurzen Betriebsdauern sind die Nachteile dieses Systems.

Flugzeuge mit größeren Spannweiten ermöglichen hingegen große Reichweiten, autonome Flüge und die Aufnahme von relativ großen Nutzlasten. Die Start- und Landevorgänge sind wegen dem Platzbedarf hingegen etwas riskanter als bei anderen Systemen. Einige Unternehmen setzen heute bei photogrammetrischen Anwendungen auf solche Flugzeuge, z.B. Grid-IT (2014).

Drehflügler, zu denen auch die Multikopter zählen, sind leicht transportabel und auf Grund der leichten Steuerung und Lenkbarkeit sowie der Möglichkeit, hohe Nutzlasten aufzunehmen, hervorragend für photogrammetrische Zwecke einsetzbar. Der Vorteil gegenüber den zuvor genannten Flugzeugen sind die leichten Start- und Landevorgänge auf engem Raum. Demgegenüber stehen größere Vibrationen als Nachteil. Als Beispiel sollen hier die Produkte von (twins.nrn, 2014) genannte werden. Derzeit wird ein Oktokopter entwickelt, der mit einer Traglast von bis 30kg ausgestattet werden kann und Flugzeiten von bis zu 40 Minuten

erreicht.

Auch motorisierte Paragleiter weisen viele Vorteile auf. Diese sind durch lange Betriebsdauern, hohe Nutzlasten, günstige Anschaffungskosten und ein langsames und stabiles Flugverhalten gekennzeichnet. Zu den Nachteilen zählt die starke Windabhängigkeit und der aufwändige Startvorgang.

Zuletzt sollen noch uLFZ-Systeme für mittlere und große Höhen erwähnt werden. Diese Systeme werden vor allem für wissenschaftliche und militärische Zwecke eingesetzt. Sehr lange Betriebszeiten, große Abdeckungen auf Grund der großen Flughöhen und die Zuladung von hohen Nutzlasten sind mit diesen eher teuren Systemen möglich.

## 2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen von uLFZ in Österreich

Im Luftfahrtgesetz (LFG) der Republik Österreich sind die rechtlichen Rahmenbedingungen für die zivile und militärische Luftfahrt geregelt, unbemannte Luftfahrzeuge waren darin bis zuletzt nicht berücksichtigt. Das für das LFG zuständige Ministerium, das BMVIT (Bundesministerium für Verkehr, Infrastruktur und Technologie), reagierte auf die Entwicklungen im Bereich der uLFZ und übermittelte im April 2013 die Änderungen des LFG an das Parlament. Am 22. Mai 2013 wurde die Änderung des Luftfahrtgesetzes im Nationalrat beschlossen und mit 1. Jänner 2014 ist die Gesetzesänderung inkraftgetreten (BMVIT, 2014).

In den folgenden Abschnitten werden die im 2. Teil des Luftfahrtgesetzes enthaltenen Definitionen von Luftfahrzeugen (Abs. 1), Luftfahrtgeräten (Abs. 2), Flugmodellen und unbemannte Luftfahrzeugen (Abs. 4) beschrieben.

### Luftfahrzeuge und Luftfahrtgeräte

Der §11 Abs. 1 LFG definierte bisher Luftfahrzeuge als „(...) Fahrzeuge, die sich zur Fortbewegung von Personen oder Sachen in der Luft ohne mechanische Verbindung mit der Erde eignen, gleichgültig, ob sie schwerer als Luft (...) oder (...) leichter als Luft sind.“ In der neuen Fassung des Luftfahrtgesetzes wird diesem Paragraph folgender Satz angefügt: „Für Flugmodelle und unbemannte Luftfahrzeuge sind die Begriffsbestimmungen gemäß den §§24c, 24f und 24g anzuwenden.“ Diese Paragraphen werden nachfolgend erläutert.

Entsprechend dem §22 Abs. 1 LFG ist ein Luftfahrtgerät „(...) 1. ein Bau- oder Bestandteil, der Teil eines Flugzeuges ist oder zum Betrieb eines Luftfahrzeuges bestimmt ist, oder 2. ein Gerät, das selbständig im Fluge verwendet werden kann, ohne Luftfahrzeug (§11) oder Flugmodell (§24c) oder unbemanntes Luftfahrzeug (§24f und §24g) zu sein (...).“ Die kursiv geschriebenen Textstellen sind die nach der neuen Fassung ergänzt worden.

Beide Begriffe, Luftfahrzeug und Luftfahrtgerät, werden in den §§11 und 22 LFG klar von den Flugmodellen und unbemannten Luftfahrzeugen getrennt und im folgenden Abschnitt definiert.

### Flugmodelle und unbemannte Luftfahrzeuge

Im neuen Luftfahrtgesetz wird der im 2. Teil der 4. Abschnitt „Flugmodelle und unbemannte Luftfahrzeuge“ völlig neu aufgenommen.

Es wird grundsätzlich zwischen drei Klassen von uLFZ unterschieden, wobei keine der Landesverteidigung dienen darf. Neben den Flugmodellen (§24c) und der „Spielzeuggrenze“ mit bis zu 79 Joule maximaler Bewegungsenergie (§24d) werden die unbemannten Luftfahrzeuge in die Klassen 1 (§24f) und 2 (§24g) unterteilt. Die Inhalte und wesentlichen Unterschiede der §§24c, 24f und 24g sind in der Tabelle (2.2) zusammengefasst.

Demnach gibt es für Flugmodelle bis einschließlich 25kg, die im privaten Bereich nur zum

Tabelle 2.2: Definition von Flugmodellen und unbemannten Luftfahrzeugen gemäß der neuen Novelle des Luftfahrtgesetz.

	Flugmodelle (§24c)	uLFZ, Kl.1 (§24f)	uLFZ, Kl.2 (§24g)
<i>Sichtverbindung<sup>1</sup></i>	ja	ja	nein
<i>Umkreis &gt; 500m</i>	nein	ja	n.d. <sup>4</sup>
<i>unentgeltlich<sup>2</sup></i>	ja	nein	n.d.
<i>bewilligungspflichtig<sup>3</sup></i>	> 25kg	ja	ja

<sup>1</sup> direkt und ohne technische Hilfsmittel

<sup>2</sup> nicht gewerblich im Freizeitbereich und ausschließlich zum Zwecke des Fluges selbst

<sup>3</sup> durch die Austro Control GmbH (ACG) oder eine auf Grund einer Übertragung gemäß §140b zuständige Behörde

<sup>4</sup> im §24g nicht definiert

Zweck des Fluges genutzt werden, keine Bewilligungspflicht. Die klaren Abgrenzungen zwischen Flugmodellen und uLFZ der Klasse 1 sind die kommerzielle bzw. nicht-kommerzielle Nutzung und der Zweck des Fluges. In jedem Fall ist aber ein uLFZ der Klasse 1 bewilligungspflichtig. Für uLFZ der Klasse 2 sind nach §24g „(...) sämtliche für Zivilluftfahrzeuge und deren Betrieb geltende Bestimmungen dieses Bundesgesetzes (...) für Bewilligungen anzuwenden.“

Im §24h Abs. 2 LFG ist auch festgelegt, dass im Interesse der Sicherheit der Luftfahrt für Flugmodelle und uLFZ der Klasse 1 durch die Austro Control GmbH Lufttüchtigkeits- oder Betriebstüchtigkeitshinweise vorzuschreiben sind. „(...)Dabei sind insbesondere die Art und der Umfang der zur Feststellung der Lufttüchtigkeit erforderlichen Überprüfungen, die Kennzeichnung, die Ausrüstungserfordernisse sowie die für den Betrieb erforderliche Befähigung für den Piloten festzulegen.(...)“. Am 17. Dezember wurden von der ACG die Auflagen für die Zulassung und den Betrieb von uLFZ der Klasse 1 in Österreich unter dem Titel LBTH 67 (Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge bis 150kg) veröffentlicht (Austro Control GmbH, 2014; Briese *et al.*, 2013).

Die uLFZ der Klasse 1 werden im Hinblick auf die Zulassung in die Kategorien A, B, C und D unterteilt, wonach sich auch die Strenge der Auflagen richtet, wobei die Kategorie D die

strengsten Auflagen zu erfüllen hat. Die Kategorien sind in Abhängigkeit des Einsatzgebietes und der Betriebsmasse (inkl. Treibstoff und Beladung) anzuwenden und sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen beim Einsatz von uLFZ gehen jedoch über das LFG hinaus. So ist auch auf das Datenschutzgesetz und den zivilrechtlichen Schutz der Privatsphäre, auf Rechte von Grundstückseigentümer bei Start und Landung und versicherungsrechtliche Aspekte zu achten (Briese *et al.*, 2013).

Tabelle 2.3: Unterteilung von uLFZ der Klasse 1 in vier Kategorien (A-D) in abhängig vom Einsatzgebiet und der Betriebsmasse des uLFZ (nach Austro Control GmbH (2014)).

Betriebsmasse	Einsatzgebiet			
	I unbebaut	II unbesiedelt	III besiedelt	IV dicht besiedelt
≤ 5 kg	A	A	B	C
≤ 25 kg	A	B	C	D
> 25kg und ≤ 150 kg	B	C	D	D

## 2.4 Funktionsweise des eingesetzten uLFZ

Bei dieser Abschlussarbeit kommt ein Multikoptersystem (vgl. Tab. 2.1) in Form des Hexakopters „twinHEX“ des Unternehmens *twins.nrn* aus Ampass in Tirol zum Einsatz (*twins.nrn*, 2014). Der Hexakopter besteht im Wesentlichen aus zwei Plattformen, die Flugplattform und die Kameraplattform (siehe Abb. 2.1). Auf der Flugplattform sind die für den Flug notwendigen Sensoren, sowie die abnehmbaren Rotorausleger angebracht. Der Durchmesser der Flugplattform ohne Rotoren beträgt etwa 20cm. Die Kameraplattform ist unterhalb der Flugplattform montiert und dient mit einem Ausmaß von 170x140x100 mm vor allem der Kameraaufnahme (Abb. 2.2 und 2.3).

Der technischen Eigenschaften des Hexakopters „twinHEX“ sind:

- maximaler Durchmesser: 110 cm
- maximale Höhe mit Kameraplattform: 21 cm
- Eigengewicht (ohne Kamera, mit Akkus): ca. 2760 g
- maximale Nutzlast: 2,5 kg
- Flughöhe: bis zu 150m
- Flugzeiten: bis zu 35 Minuten bei 1 kg Traglast

- abnehmbare Rotorverbindungen (für einen leichteren Transport)
- Wegpunktflug über GPS-Navigation



Abbildung 2.1: Hexakopter des Herstellers *twins.nrn* im Einsatz.

Für die Steuerung des Hexakopters sind mehrere Sensoren notwendig. Diese werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

### 2.4.1 Sensoren des Hexakopters

Für den Flugbetrieb im manuellen oder autonomen Modus sind einige Sensoren notwendig. Das Unternehmen *twins.nrn* nutzt für die Flugsteuerung Sensoren des „MikroKopter“-Projekts, einem Open Source Projekt das 2006 ins Leben gerufen wurde (Stempfhuber *et al.*, 2009). Seit 2008 vertreibt das Unternehmen *HiSystems GmbH* die Hardware für das Projekt „MikroKopter“. Auf die freie Software kann unter (HiSystems GmbH, 2013) zugegriffen werden. Eigenen Beobachtungen zufolge hat sich das „MikroKopter“-Projekt sowohl im privaten Bereich als auch für die kommerzielle Nutzung gut am Markt etabliert.

Für die kommerzielle Nutzung werden allerdings Lizenzgebühren vorgeschrieben. Für die rund 1000€ Lizenzgebühren wird der Aktionsradius von den 250m, bezogen auf den Startpunkt, auf 500m erhöht.

In der Abb. 2.2 sind die einzelnen Platinen und Sensoren am Hexakopter dargestellt. Auf der Flugplattform sind die für den Flugbetrieb notwendigen Sensoren zentrisch angebracht.

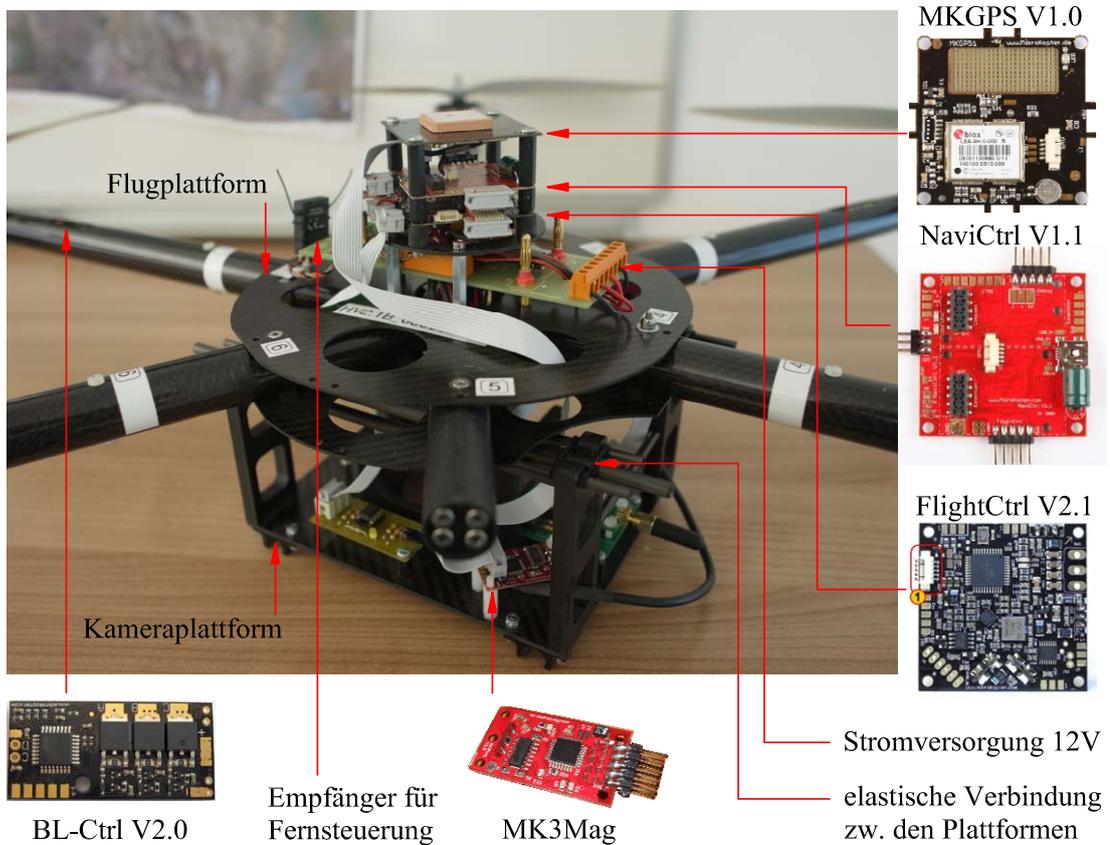


Abbildung 2.2: Implementierte Sensoren im Hexakopter.

An die unterste Platine werden zwei 4S-Lipo<sup>1</sup>-Akkus mit je 4400mAh und 14,8V Spannung zur Stromversorgung angeschlossen, die links und rechts von der Platine platziert werden. Die Akkus nutzen als Anode Lithium, als Kathode Wasserstoff wodurch sich leicht Akkus mit hoher Leistung herstellen lassen. Die hohe Ionenleitfähigkeit liefert zugleich hohe Ströme, das vor allem im Modellbau von Vorteil ist (HiSystems GmbH, 2013). Mittig darüber sind der Reihe nach die Platinen *FlightCtrl* (V2.1), *NaviCtrl* (V1.1) und *MKGPS* (V1.0) angebracht. Diese Platinen werden in den folgenden Absätzen näher beschrieben.

Das Kernstück des Systems ist die *FlightCtrl*. Auf dieser Platine befinden sich je drei orthogonal zueinander angeordnete Beschleunigungssensoren (STMicroelectronics LIS344ALH) und Drehratensensoren (Analog Devices ADXRS610). Diese Sensoren liefern Regelkreisen Informationen über die momentane Orientierung des Hexakopters und werden als Flugstabilisierungssysteme eingesetzt. Dadurch wird für den Piloten der manuelle Flugbetrieb wesentlich

<sup>1</sup>Lithium-Polymer

erleichtert. Zusätzlich befindet sich auf der *FlightCtrl* noch ein Luftdrucksensor (Freescale MPX 4115A), über den die Höhe abgeleitet wird und ein Mikrocontroller. Eine detaillierte Beschreibung über die Funktionsweise der Messsensoren ist im Abschnitt 3.3 nachzulesen.

Der externe Empfänger für die Fernsteuerung ist ebenfalls mit der *FlightCtrl* verbunden. Der Empfänger leitet die auf einer Frequenz von 2,4GHz empfangenen Signale des Senders (Pilot) an die *FlightCtrl* weiter, welche wiederum die Signale verarbeitet und an die BL-Ctrl zur Ansteuerung der BL-Motoren übergibt.

Als Erweiterung zur *FlightCtrl* bilden die Platinen *NaviCtrl*, *MKGPS* und *MK3Mag* ein Navigationssystem in Form eines GPS-Empfängers (u-blox LEA 6s) und einem 3-Achs-Magnetometer (Philips KMZ51), mit dem wesentliche Funktionen für eine automatisierte Befliegung im Hinblick auf eine erfolgreiche photogrammetrische Luftbilddauswertung möglich werden. Diese sind nach (HiSystems GmbH, 2013):

### 1. Wegpunktflug

Der Wegpunktflug (*engl.: Waypoint-Event*), bei dem geplante (Foto-)Positionen in Form von GPS-Lagekoordinaten und einer relativen Höhenangabe zum Startpunkt in einer bestimmten Abfolge automatisch angefliegen werden, ist eine wesentliche Funktion. Die Planung der Wegpunkte wird im Abschnitt (5.2) näher beschrieben.

### 2. Position Hold

Die Funktion „*Position Hold*“ dient dazu, die horizontale Position mittels GPS zu fixieren. Die Variation der Höhe und der Azimutausrichtung kann durch den Piloten nach wie vor manuell vorgenommen werden.

### 3. Azimutausrichtung

Durch die zuvor beschriebenen Sensoren ist es außerdem möglich, das uLFZ nach einem bestimmten Azimut auszurichten. Auch diese Funktion ist wesentlich für photogrammetrische Anwendungen, da dadurch regelmäßige Überlappungsbereiche der Fotos erzeugt werden können (vgl. Kapitel 5.2).

### 4. Coming-Home

Als Sicherheitsmaßnahme bzw. als Funktion für die automatische Rückholung des uLFZ nach erfolgter Wegpunktbefliegung dient die „*Coming-Home*“-Funktion.

Sämtliche Funktionen werden über die Fernsteuerung durch den Piloten initiiert.

## 2.4.2 Steuerung des Hexakopters

Durch je drei gegenläufig angeordnete, nach unten wirkenden Rotoren zählt der Multikopter zur Klasse der Senkrechtstarter und -lander (*engl.: VTOL - vertical take-off and landing*).

Jeder dieser sechs Rotoren ist auf einem Ausleger montiert und wird separat über einen bürstenlosen Gleichstrommotor (BL-Motor) angetrieben (Abb. 2.3). Die Steuerung des Hexakopters erfolgt über die Variation der Drehraten der einzelnen BL-Motoren. Die Bewegungen des Hexakopters beziehen sich auf dessen körperfestes Koordinatensystem ( $\mathbf{x}^b$ ) (vgl. Kapitel 3.2).

Eine gleiche Drehzahl bei allen Motoren bewirkt ein Steigen oder Sinken in  $z_b$ -Richtung bzw.

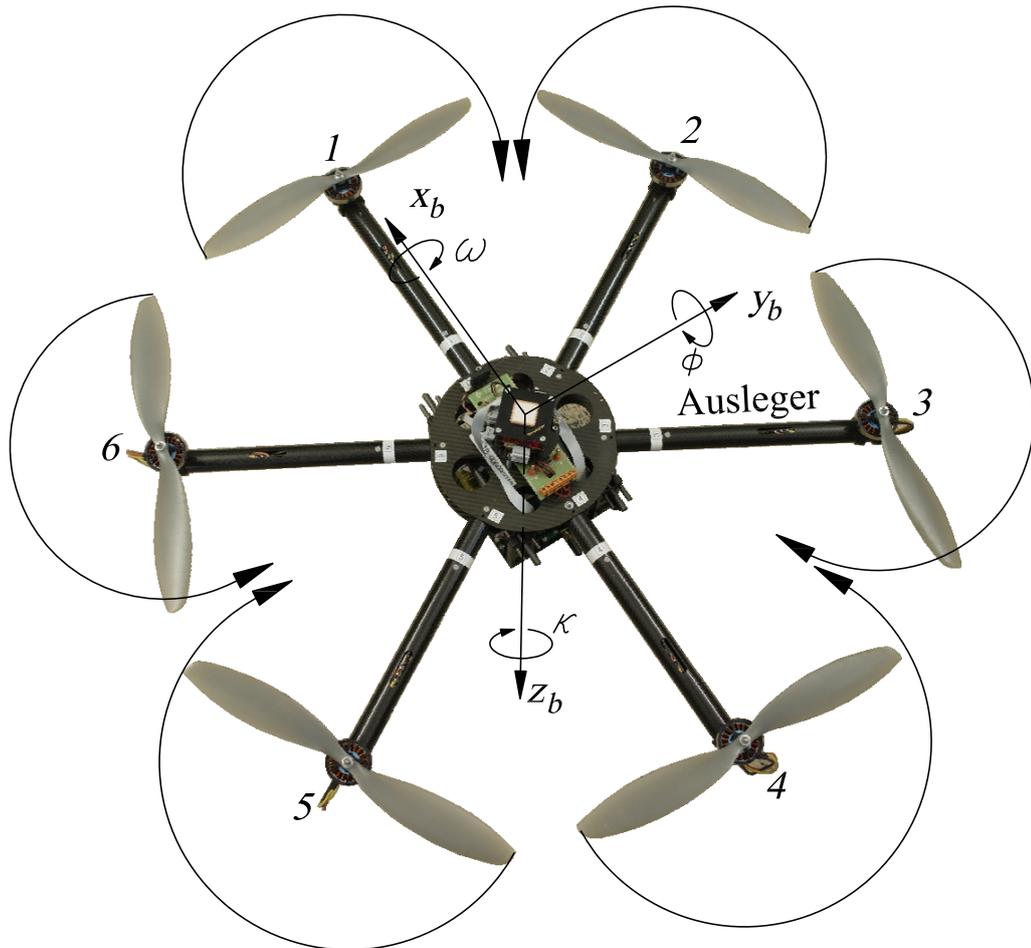


Abbildung 2.3: Je drei gegenläufig angeordnete Rotoren und deren unterschiedlichen Drehzahlen führen zur Bewegung des Hexakopters. Die Rotationen  $\phi$ ,  $\omega$  und  $\kappa$  führen bezogen auf das dargestellte körperfeste Koordinatensystem (vgl. Kapitel 3.2) zum „Nicken“, „Rollen“ und „Gieren“ des Systems.

den Schwebезustand, wenn sich das Verhältnis zwischen Schub und Gewicht (u.a. Faktoren) aufhebt.

Die Rotation  $\phi$  um die  $y_b$ -Achse wird primär durch die Variation der Motoren 1 und 4 erzeugt

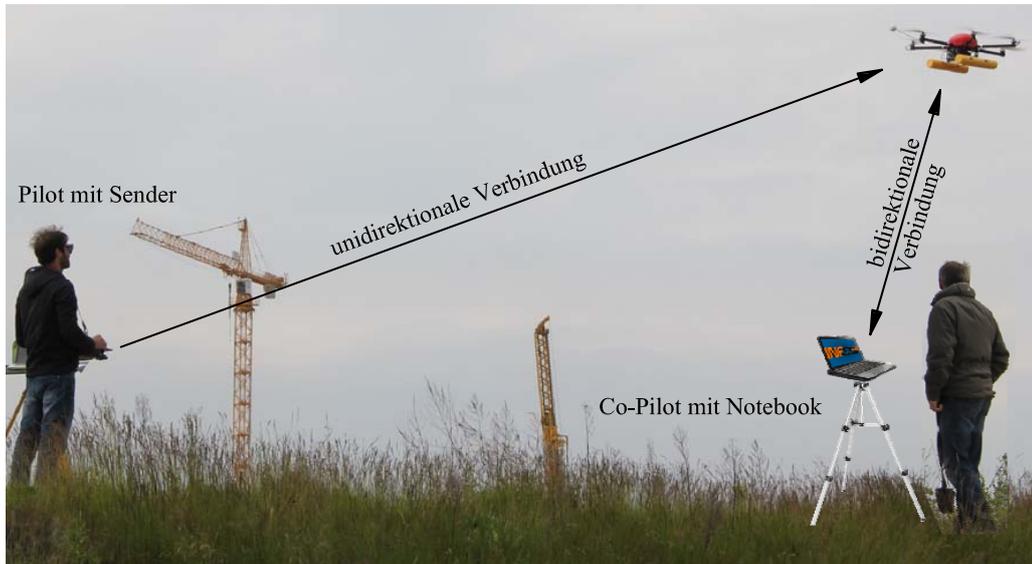


Abbildung 2.4: Feldaufbau bei einem uLFZ-Einsatz. Die unidirektionale Verbindung zwischen Piloten und dem uLFZ dient der Steuerung. Über die bidirektionale Verbindung können die Wegpunkte und Flugparameter an das uLFZ gesendet werden. Während dem Flug werden drahtlos Telemetriedaten vom uLFZ an ein Notebook gesendet, die von einem Co-Piloten überwacht werden.

und führt zum „Nicken“ des Systems. Eine höhere Drehzahl beim Motor 4 führt zur negativen Rotation um die  $y_b$ -Achse.

Die Rotation  $\omega$  um die  $x_b$ -Achse führt zum „Rollen“ und wird durch die Variation der Motoren 2, 3, 5 und 6 verursacht. Die positive Rotation um die  $x_b$ -Achse wird bspw. durch eine höhere Drehzahl von Motor 5 und 6 erzeugt.

Werden die Drehzahlen von drei Rotoren mit gleicher Drehrichtung erhöht und die der anderen gesenkt, führt das System eine Rotation  $\kappa$  um die  $z_b$ -Achse aus. Diese Bewegung wird als „Gieren“ bezeichnet. Ein positiver Drehwinkel  $\kappa$  wird durch eine höhere Drehzahl der Rotoren 1, 3 und 5 verursacht.

In der Abbildung 2.4 ist der Feldaufbau beim Einsatz eines uLFZ dargestellt. Neben dem Piloten und dem uLFZ kommt noch ein Notebook zum Einsatz, das zum einen der Übertragung der Wegpunkte auf die *NaviCtrl* dient und zum anderen als Überwachungsinstrument für diverse Parameter (Sensormesswerte, Status des uLFZ) während des Flugbetriebes. Der Pilot kümmert sich mit stetigem Blickkontakt zum uLFZ ausschließlich um die Steuerung. Daher ist grundsätzlich eine zweite Person erforderlich, die die Überwachung am Notebook übernimmt.

Der prinzipielle Ablauf einer Befliegung erfolgt in 10 Schritten:

1. Während und nach dem Zusammenbau des Hexakopters wird eine durchgreifende Kontrolle (Beschädigungen, Funktionsfähigkeit, Kameraeinstellungen) des Systems vorgenommen.
2. Vor jedem Start sollte das Magnetometer auf Grund von veränderlichen Magnetfeldern kalibriert werden (vgl. Kapitel 3.3.3). Diese Kalibrierung erfolgt durch eine Abfolge von Drehungen um die Achsen  $x_b$  und  $y_b$  nachdem die  $x_b$ -Achse ungefähr nach Norden ausgerichtet wurde. Eine detaillierte Beschreibung ist unter (HiSystems GmbH, 2013) zu finden.
3. An einer für den Start- und Landevorgang geeigneten Position (keine Bäume oder Leitungen, keine Menschenmengen, etc.) werden die geplanten Wegpunkte (5.2) über die bidirektionale Verbindung vom Notebook an den Multikopter übertragen.
4. Bekommt der Pilot von der zweiten Person am Notebook die Freigabe, führt er manuell den Startvorgang durch und bringt den Multikopter nahezu in eine Schwebeposition.
5. Stehen ausreichend Satelliten zur Verfügung, kann mit der Funktion „*Position Hold*“ die horizontale Position fixiert werden.
6. Im nächsten Schritt kann sowohl die Höhe fixiert als auch die zuvor bestimmte Azimutausrichtung aktiviert werden. Der Multikopter verharrt nach diesen Schritten sowohl in der Lage als auch in der Höhe an seiner Position.
7. Startet man nun den Wegpunktflug, wird zunächst die geplante Azimutausrichtung am ersten Wegpunkt durch eine Drehung um die  $z_b$ -Achse erreicht. Anschließend fliegt der Multikopter seinen ersten Wegpunkt an, erzeugt das Foto und fliegt zum nächsten Punkt weiter. Am letzten Punkt verharrt der Multikopter nach der Erstellung des letzten Fotos an dieser Position und wartet auf die Aktivierung der „*Coming-Home*“-Funktion.
8. Der Multikopter kehrt nach der Aktivierung der „*Coming-Home*“-Funktion zu dem Punkt automatisch zurück, an dem der Wegpunktflug gestartet wurde.
9. Durch die Deaktivierung aller Funktionen wird wieder auf den manuellen Betrieb umgeschaltet und die Landung kann erfolgen.
10. Nach der Landung sollten die aufgezeichneten Daten auf deren Vollständigkeit überprüft werden.

## Kapitel 3

# Direkte Georeferenzierung und integrierte Navigationssysteme

Im dritten Kapitel wird zunächst das Prinzip der direkten Georeferenzierung beschrieben. Da in dieser Arbeit mehrere Arten von Koordinatensystemen verwendet werden, kommt es im Kapitel 3.2 zu deren Definition. Im Kapitel 3.3 wird auf die Kombination von verschiedenen Sensoren zu integrierten Navigationssystemen eingegangen. Die Funktionsweisen und Fehlercharakteristika der Sensoren werden allgemein in Unterpunkten des Kapitels näher beschrieben. Die in dieser Arbeit verwendeten Sensoren und deren Implementierung in das verwendete uLFZ werden anschließend im Kapitel 3.4 diskutiert. Die gemeinsame Verarbeitung der Messdaten zu Bestimmung der direkten Georeferenzierung ist durch eine Kalman-Filterung realisiert. Im Kapitel 3.5 werden die Grundlagen der Kalman-Filterung betrachtet und im Anschluss im Kapitel 3.6 die Umsetzung eines Kalman-Filters dargestellt.

### 3.1 Direkte Georeferenzierung

Für die direkte Georeferenzierung der aufgenommenen Luftbilder, d.h. die direkte Bestimmung der Elemente der äußeren Orientierung, wird für die Bestimmung der Koordinaten der Projektionszentren und für die entsprechende Stellung des Bildsensors im Raum zum Zeitpunkt der Belichtung des Bildsensors ein *Positioning and Orientation System* (POS) in Form einer GNSS/IMU-Kombination verwendet. Die Vor- und Nachteile der beiden Sensortypen erfordern eine entsprechende Fusion; auf diese wird in den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 eingegangen.

Die standardmäßig eingebauten Sensoren des Hexakopters sind in die Kategorie der Low-Cost-Sensoren einzuteilen und wurden bereits im Abschnitt 2.4.1 beschrieben. (Glira, 2012) hat gezeigt, dass die Standardabweichungen der Differenzen zwischen indirekter und direkter Georeferenzierung mit Low-Cost-Sensoren folgende Werte annehmen:

- Roll- und Nickwinkel:  $< 1^\circ$
- Gierwinkel:  $\approx 2^\circ$
- Lagekoordinate:  $\approx 0,5m$
- Höhenkoordinate:  $< 1 m$

Diese Werte sind für die geforderten Objektgenauigkeiten wie in 2.1 beschrieben zu hoch. Der Einsatz von hochwertigeren Sensoren könnte die Standardabweichungen deutlich reduzieren. Aus diesem Grund wurde die Implementierung eines DGPS<sup>1</sup>-Sensors vorgesehen, um zumindest die Bestimmung der Lage- und Höhenkomponente erheblich zu verbessern. Die Hinzunahme einer hochwertigen IMU wurde aus Kosten- und Gewichtsgründen nicht in Betracht gezogen.

## 3.2 Koordinatensysteme

Die Positionierung im Raum und die Kombination der verwendeten Sensoren erfordert zunächst eine Definition der jeweiligen Koordinatensysteme und eine Betrachtung, wie diese in Verbindung zueinander stehen. Bei allen verwendeten Koordinatensystemen handelt es sich hier um kartesische Systeme, die in der folgenden Abbildung 3.1 dargestellt sind (Weber, 2008; Wendel, 2011).

### Inertialkoordinatensystem ( $x^i$ )

Ein erdbezogenes Inertialkoordinatensystem ( $i$ -Frame) hat den Ursprung im Mittelpunkt des Erdellipsoids<sup>2</sup>, der mit dem Geozentrum zusammenfällt. Das Geozentrum selbst ist indirekt sehr exakt über Verfahren der Satellitengeodäsie bestimmbar. Die Achsen weisen feste Richtungen in Bezug zu Fixsterne auf. Als Beispiel sei hier das für die Beschreibung der Satellitenorbits verwendete *Earth-Centered Inertial*-Koordinatensystem (ECI) J2000 erwähnt. Die  $x^i$ -Achse weist vom Geozentrum in der Äquatorebene in Richtung Frühlingspunkt<sup>3</sup>, die  $z^i$ -Achse stimmt mit der Drehimpulsachse der Erde zur Standarddepoche J2000 am 01.01.2000 (12h UTC<sup>4</sup>) zusammen, die  $y^i$ -Achse steht im Sinne eines rechtshändigen kartesischen Koordinatensystems senkrecht auf die  $x^i$ - und  $z^i$ -Achse (Kaplan & Hegarty, 2005).

Per Definition wirken auf Inertialkoordinatensysteme keine Beschleunigungen und Rotationen, d.h. das erste newtonsche Axiom gilt in seiner einfachsten Form. Die Rotation der Erde um die Sonne widerspricht jedoch dieser Definition, weshalb an dieser Stelle der Begriff quasi-inertiales Koordinatensystem zu verwenden ist.

---

<sup>1</sup>Differential GPS

<sup>2</sup>Rotationsellipsoid, das in erster Näherung die Erdgestalt darstellt

<sup>3</sup>Schnittpunkt der Äquatorebene mit der Ekliptik

<sup>4</sup>Coordinated Universal Time

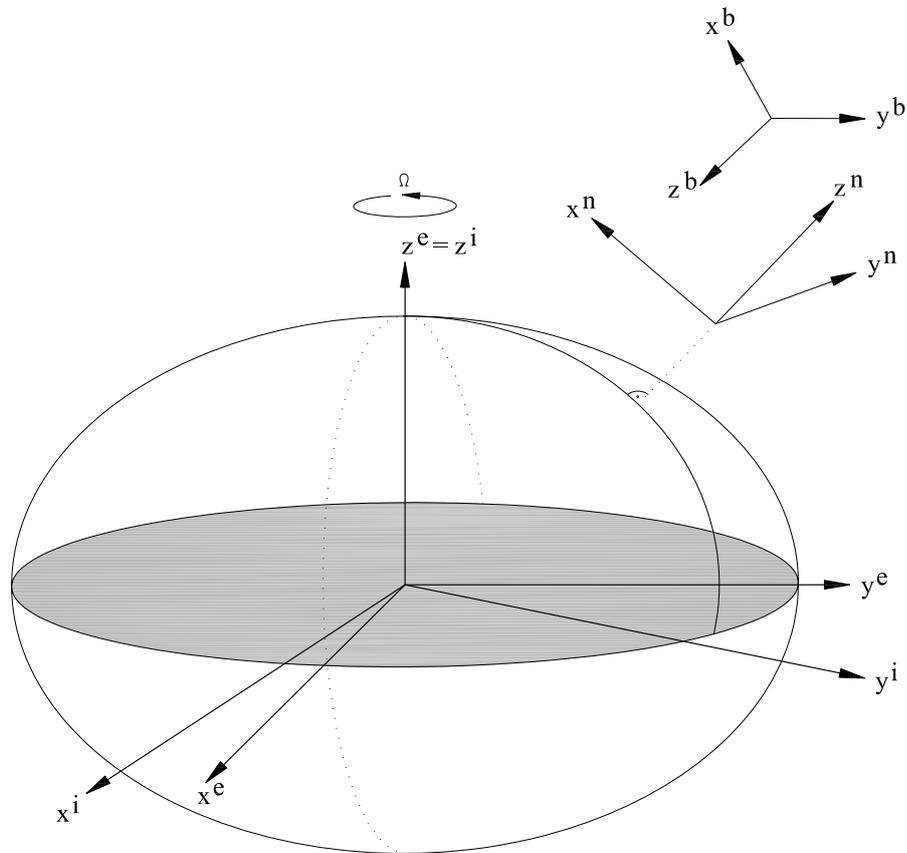


Abbildung 3.1: Darstellung aller Koordinatensysteme; das himmelfeste Inertialkoordinatensystem ( $x^i$ ) und das erdfeste Koordinatensystem ( $x^e$ ) haben als gemeinsamen Ursprung das Geozentrum. Das Navigationskoordinatensystem ( $x^n$ ) könnte in Form des österreichischen Landeskordinatensystem realisiert werden. Der Ursprung würde in den Schnittpunkt des jeweiligen Meridianstreifens (z.B. M34) mit der Äquatorebene fallen. Beim körperfesten Koordinatensystem ( $x^b$ ) sind die Achsen fest im Bezug zu einem bewegten Objekt (z.B. einer Kamera) (nach (Wendel, 2011)).

Die Messwerte von Beschleunigungssensoren (vgl. Kapitel 3.3.1.2) und Drehratensensoren (vgl. Kapitel 3.3.1.1) beziehen sich ebenfalls auf ein Inertialkoordinatensystem.

#### **Erdfestes Koordinatensystem ( $x^e$ )**

Der Ursprung und die Richtung der  $z^e$ -Achse des erdfesten Koordinatensystems ( $e$ -Frame) stimmen mit denen des Inertialkoordinatensystem überein. Die  $x^e$ -Achse stellt die Schnittgerade der Ebene des Nullmeridians mit der Äquatorebene dar. Das erdfeste Koordinatensystem rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  um die  $z^{e,i}$ -Achse und kann damit in Bezug zum

Inertialkoordinatensystem gebracht werden. Erd feste Koordinatensysteme werden auch als *Earth-Centered Earth-Fixed* (ECEF) bezeichnet. Positions- und Geschwindigkeitslösungen von GPS-Empfängern liegen in erdfesten Koordinaten vor (Kaplan & Hegarty, 2005).

#### **Lokales Navigationskoordinatensystem ( $x^n$ )**

Die  $x^n$ - $y^n$ -Ebene eines lokalen Navigationskoordinatensystems ( $n$ -Frame) liegt tangential zum Erdellipsoid wobei der Ursprung im Prinzip beliebig gewählt werden kann und die  $x^n$ -Achse in Richtung Norden und die  $y^n$ -Achse in Richtung Osten weist. Einem rechtshändigen kartesischen Koordinatensystem zufolge, weist die  $z^n$ -Achse parallel zur Schwerebeschleunigung nach unten. Das österreichische Landeskoordinatensystem, in dem die Bestandsdaten der ÖBB zur Regel zu berechnen sind, hat seinen Ursprung im Schnittpunkt des jeweiligen Zentralmeridians mit dem Äquator des Referenzellipsoids (Bessel-Ellipsoid). Seine  $z^n$ -Achse weist jedoch parallel zur Schwerebeschleunigung nicht nach unten sondern in den Zenit.

Es ist darauf zu achten, dass nur durch eine ausreichende Bezugsangabe zu einem globalen Koordinatensystem (z.B. dem erdfesten Koordinatensystem) diese in Verbindung gebracht werden können.

#### **Körperfestes Koordinatensystem ( $x^b$ )**

Das körperfeste Koordinatensystem ( $b$ -Frame) ist fix mit einem beweglichen oder auch statischen Objekt verbunden, die Lagerung des Ursprungs und der Achsen kann im Prinzip beliebig gewählt werden. Durch die fixe Verbindung mit einem Objekt (z.B. einer Kamera) sind der Ursprung und die Achsausrichtungen Funktionen der Zeit.

#### **Nomenklatur**

Für die eindeutige Zuordnung von Messgrößen zu bestimmten Koordinatensystemen wird an dieser Stelle die Nomenklatur in Anlehnung an (Wendel, 2011) anhand einer gemessenen Drehrate  $\tilde{\omega}_{ib}^b$  (vgl. Kapitel 3.3.1.3) erläutert. Der obere Index gibt an, dass die Drehraten im körperfesten Koordinatensystem ( $x^b$ ) vorliegen. Die beiden unteren Indizes geben an, dass die Drehraten im körperfesten Koordinatensystem ( $x^b$ ) bezüglich des Inertialkoordinatensystems ( $x^i$ ) gemessen wurden.

### **3.3 Integrierte Navigationssysteme**

Die Kombination verschiedener Navigationssensoren und Navigationsverfahren wird als integriertes Navigationssystem bezeichnet. Speziell die Fusion von inertialen Navigationssystemen (3.3.1) und Satellitennavigationssystemen (3.3.2) ist eine weit verbreitete Anwendung, da dadurch die Nachteile des einen Systems durch die Vorteile des anderen kompensiert werden können (Wendel, 2011). Inertiale Navigationssysteme bestehen zur Regel aus einer Kombination von Beschleunigungs- und Drehratensensoren. Mit sehr hohen Datenraten von 200Hz und mehr ist es möglich, aus den aufgezeichneten Messdaten der Sensoren die Po-

sition, Lage und Geschwindigkeit abzuleiten. Der Nachteil von INS liegt im kurzzeitgenauen Verhalten der Sensoren, da die Fehler der Positions-, Lage- und Geschwindigkeitslösungen auf Grund von Messfehlern der Sensoren mit der Zeit anwachsen. Dem gegenüber stehen satellitengestützte Verfahren für langzeitgenaue Positionsbestimmungen. Die Orientierung eines Objektes im Raum kann jedoch nur durch mindestens drei GNSS-Antennen am Objekt bestimmt werden und das auch nur mit einer beschränkten Präzision. Da die Datenrate bei den meisten GPS-Empfängern mit 5Hz begrenzt ist und die Verfügbarkeit von externen Einflüssen wie die Sichtbarkeit von Satelliten abhängig ist, die Kontinuität von Messdaten eingeschränkt. Weitere Sensoren für die Navigation sind Magnetometer und Barometer.

In den folgenden Abschnitten werden die Funktionsweisen der verwendeten Navigationssensoren und -verfahren erläutert und auf deren Fehlercharakteristik eingegangen. Die Kombination und Auswertung der Messdaten aus den unterschiedlichen Sensoren erfolgt über ein Kalman-Filter (KF), dessen Grundlagen im letzten Abschnitt erläutert werden.

### 3.3.1 Inertiale Navigationssysteme

Bei einem inertialen Navigationssystem (INS) handelt es sich um ein Koppelnavigationsverfahren (*engl.: dead reckoning*), das mit Hilfe von Beschleunigungs- und Drehratenmessungen die Position  $(x^n, y^n, z^n)$  und die Orientierung  $(r^n, n^n, g^n)$  eines beweglichen Objekts im Navigationskoordinatensystem, fortlaufend bestimmt. Eine inertielle Messeinheit (*Inertial Measurement Unit* - IMU) besteht grundsätzlich aus je drei, zueinander orthogonal positionierten Beschleunigungs- und Drehratensensoren, die fest mit einem Objekt verbunden sind. In körperfesten Koordinaten  $(x^b, y^b, z^b)$  werden in den drei Koordinatenachsen Beschleunigungen  $\vec{a}_{ib}^b(a_x^b, a_y^b, a_z^b)$  und Drehraten  $\vec{\omega}_{ib}^b(\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b)$  bezüglich des Inertialkoordinatensystems gemessen (Abb. 3.2). Man spricht bei dieser Konstellation auch von einem Strapdown-System (Wendel, 2011).

Ausgehend von einem Startpunkt ( $t = 0$ ) werden durch Integration der Beschleunigungen und Drehraten die Positionen und Orientierungen fortlaufend zu den Zeitpunkten  $t_i$  bestimmt.

Im folgenden wird auf die Sensoren einer IMU näher eingegangen und im Anschluss die Fehlercharakteristik des Systems diskutiert.

#### 3.3.1.1 Drehratensensor

Die Drehratensensoren, oft auch als Kreisel, Gyroskope oder kurz Gyros bezeichnet, messen die Drehrate  $\vec{\omega}_{ib}^b$  (Winkeländerung pro Zeit - [ $^\circ/h$ ]) um die sensitive Achse des Systems. Die drei orthogonal angeordneten Drehratensensoren einer IMU liefern somit die Drehraten

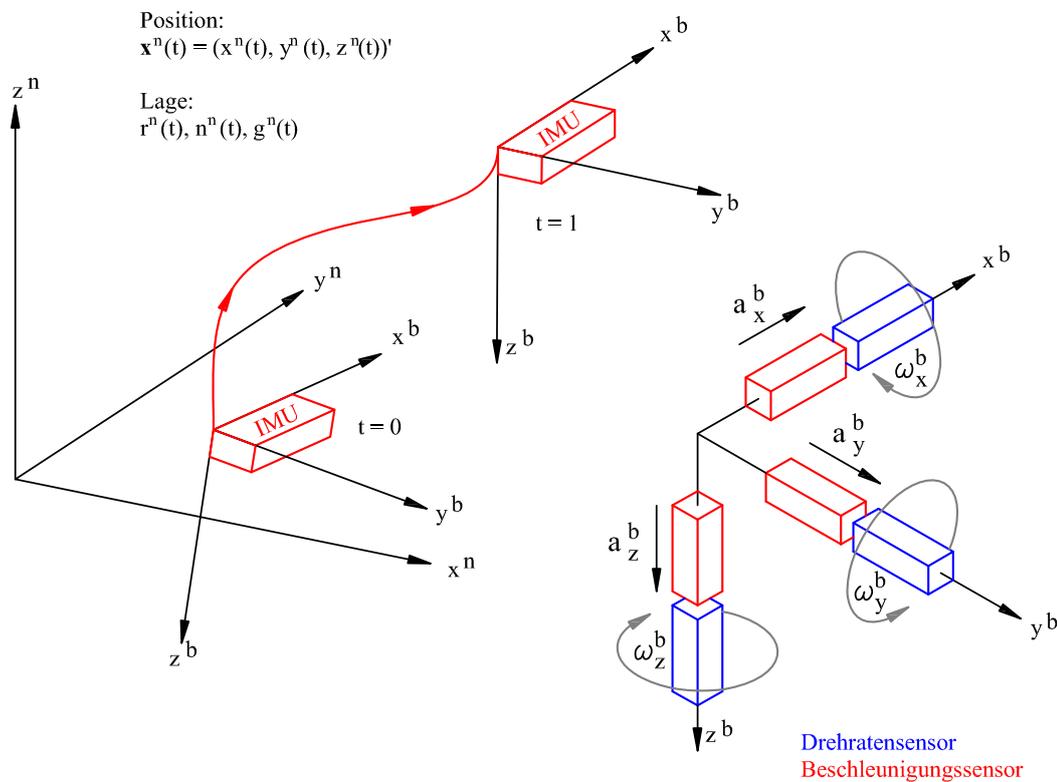


Abbildung 3.2: Anordnung der Sensoren einer IMU. Je orthogonal angeordneter Achse befindet sich ein Beschleunigungssensor und ein Drehratensensor. Durch die Integration der Messwerte können Position und Orientierung des Objektes zu einem Zeitpunkt  $t$  bestimmt werden (nach (Glira, 2012)).

$(\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b)$ . Häufig eingesetzte Drehratensensoren sind MEMS<sup>1</sup>-Kreisel, Faserkreisel und Ringlaserkreisel. Sie unterscheiden sich in deren Bauweise, physikalischen Prinzipien, Drift-Rate (*engl. bias-drift*) und Rauschverhalten und werden im Folgenden beschrieben.

### Faserkreisel und Ringlaserkreisel

Faserkreisel und Ringlaserkreisel basieren auf dem Prinzip des Sagnac-Effekts. In beiden Fällen wird ein Laserstrahl in einen geschlossenen Lichtweg sowohl in als auch gegen den Uhrzeigersinn eingekoppelt. Beim Faserkreisel wird der geschlossene Lichtweg durch eine zu einem Ring geformte Glasfaser realisiert. Wird der Kreisel mit der Drehrate  $\omega$  um die sensitive Achse gedreht, verkürzt bzw. verlängert sich der zu durchlaufende Weg für die beiden gegensinnig laufenden Laserstrahlen und es kommt zu einer Phasenverschiebung, von der die Drehrate abgeleitet werden kann (Wendel, 2011).

<sup>1</sup>MEMS = micro electro-mechanical system

Beim Ringlaserkreisel bilden drei zueinander ausgerichtete Spiegel den geschlossenen Lichtweg. In einem Helium-Neon-Gemisch breiten sich die beiden gegensinnig laufenden Laserstrahlen aus wobei es zu stehenden Wellen kommt, deren Frequenz vom zu durchlaufenden Weg abhängt. Durch die Rotation des Systems kommt es wie beim Faserkreisel zur Verkürzung bzw. Verlängerung des Lichtweges. Durch die Veränderung der Weglänge kommt es auch zur Veränderung der Wellenlänge und somit auch der Frequenz. Die Frequenzdifferenzen erzeugen auf einem Detektor Interferenzmuster aus denen die Drehrate  $\omega$  abgeleitet werden kann (Wendel, 2011).

#### **MEMS-Kreisel**

MEMS-Kreisel werden oft aus einem Stück Silikon in der Größenordnung von wenigen  $\mu\text{m}$  angefertigt. Innerhalb des Systems wird senkrecht auf die sensitive Achse eine Probemasse elektrostatisch in eine translatorische Schwingung versetzt. Erfährt der Sensor zusätzlich eine Rotation um seine sensitive Achse mit der Drehrate  $\omega$ , wirkt auf die Probemasse die Coriolis-Kraft, welche proportional zur Drehrate ist und sich senkrecht auf die Rotationsachse und die translatorische Bewegungsrichtung der Probemasse auswirkt. Die Auslenkung der Probemasse auf Grund der Coriolis-Kraft kann kapazitiv gemessen und somit auf die Drehrate  $\omega$  geschlossen werden (Barbour & Schmidt, 2001).

#### **3.3.1.2 Beschleunigungsmesser**

Der zweite Bestandteil einer IMU neben dem Drehratensensor ist ein Beschleunigungsmesser, der die auf eine Masse  $m$  einwirkende Beschleunigungen  $\vec{a}_{ib}^b$  mit der Einheit  $[m/s^2]$  entlang der sensitiven Achsen misst. Beschleunigungssensoren können als mechanische Bauteile oder Halbleiterelemente hergestellt werden. Die mechanischen Bauteile beruhen grundsätzlich auf dem Feder-Masse-Dämpfer-Prinzip und dem 2. Newtonschen Axiom  $F = m \cdot a$ , welches besagt, dass die einwirkende Beschleunigung  $a$  auf eine Masse  $m$  proportional zur Kraft  $F$  ist. Die Beschleunigungsmesser können nicht direkt die einwirkende Kraft auf die Masse messen, sondern die Auslenkung der Masse gegenüber einem starren Gehäuse entlang der sensitiven Achse, welche mit der Richtung des Federwegs zusammenfällt und unter anderem kapazitiv abgenommen werden kann. Die Beschleunigung resultiert aus einer Funktion mit den bekannten Parametern Masse, Federkonstante und Dämpfungswert sowie der gemessenen Auslenkung. Diese Konfiguration eines Feder-Masse-Dämpfer-Systems wird auch als *open-loop-System* bezeichnet (Wendel, 2011).

Die zweite Möglichkeit bei einem Feder-Masse-Dämpfer-Systems ist die Kompensationsmethode, auch *closed-loop-System* genannt. Der Aufbau ist dem eines *open-loop-System* ähnlich. Dabei wird bei einwirkenden Kraft die Masse bspw. durch ein Magnetfeld in den Gleichgewichtszustand versetzt. Aus dem aufzubringenden Strom, der die Masse in der Ruhelage verharren lässt, kann letztlich die Beschleunigung abgeleitet werden. Dieses System hat gegen-

über einem *open-loop-System* den Vorteil, dass es eine sehr gute Kennlinien-Linearität besitzt und gleichzeitig einen großen Messbereich abdeckt (Gevatter, 2000).

Beschleunigungsmesser als Halbleiterelement (*engl. solid-state*) nutzen unter anderem vibrierende Elemente oder akustische Oberflächenwellen (*engl. surface acoustic wave (SAW)*) zur Bestimmung der auftretenden Beschleunigungen. Bei einem SAW-Beschleunigungssensor ist eine Masse auf einem Ausleger angebracht, der mit einer bestimmten Frequenz in Schwingung versetzt wird. Eine angreifende Beschleunigung entlang der sensitiven Achse bewirkt eine Änderung der Frequenz. Aus der gemessenen Frequenzänderung kann die Beschleunigung abgeleitet werden (Woodman, 2007).

Die objektabhängigen Beschleunigungen werden zusätzlich von der Gravitation und den Scheinkräften Zentrifugal- und Corioliskraft überlagert. Die Messdaten des Beschleunigungssensors müssen um diese zusätzlich wirkenden Kräfte reduziert werden.

### 3.3.1.3 Fehlerbetrachtung

Messungen sowohl mit Drehratensensoren als auch mit Beschleunigungssensoren sind grundsätzlich mit Fehlern behaftet. Im Folgenden soll ein Überblick über die Fehlereinflüsse der beiden Sensoren gegeben werden (Wendel, 2011).

#### Drehratensensoren

Ein Fehlermodell, das die Abweichung der realen Drehrate  $\vec{\omega}_{ib}^b$  von der gemessenen Drehrate  $\vec{\tilde{\omega}}_{ib}^b$  angibt, kann nach (Wendel, 2011) durch

$$\vec{\tilde{\omega}}_{ib}^b = \mathbf{M}_{Gyro} \cdot \vec{\omega}_{ib}^b + \vec{b}_\omega + \vec{n}_\omega \quad (3.1)$$

angegeben werden. Über die Nebendiagonalelemente der 3x3-Misalignment-Matrix  $\mathbf{M}_{Gyro}$  lässt sich die Nichtorthogonalität der sensitiven Achsen einer IMU ausdrücken. Die Elemente der Hauptdiagonalen drücken die Skalenfaktoren der drei Sensoren aus. Der Skalenfaktorfehler [*ppm*], der die Abweichungen der Skalenfaktoren vom Idealwert 1 beschreibt, setzt sich aus einem konstanten und einem nichtlinearen, drehratenabhängigen Faktor zusammen (Abb. 3.3).

Die Biase (Nullpunktsfehler) mit der Einheit [ $^\circ/h$ ] werden mit dem Vektor  $\vec{b}_\omega$  ausgedrückt. Zusätzlich zu einem konstanten Anteil wirkt ein zeitveränderlicher Anteil, der auch als Bias-Drift bezeichnet wird und aus Temperatureinflüssen entstehen kann. Die Schwerebeschleunigung  $g$  wirkt sich häufig als lineare ( $g$ -abhängiger Anteil [ $^\circ/h/g$ ]) und quadratische ( $g^2$ -abhängiger Anteil [ $^\circ/h/g^2$ ]) Funktion als Bias aus.

Das Drehratensensorrauschen wird im Vektor  $\vec{n}_\omega$  beschrieben und wird im Datenblatt eines Sensors typischerweise durch die Wurzel der spektralen Leistungsdichte  $R$  mit der Einheit [ $^\circ/\sqrt{h}$ ] angegeben. Dieses Verhalten wird auch als *angle random walk (ARW)* bezeichnet.

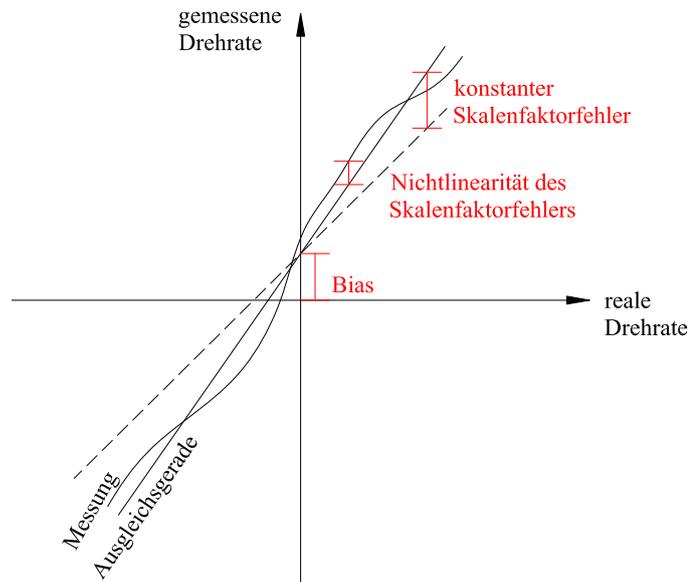


Abbildung 3.3: Zusammensetzung des Fehlermodells eines Drehratensensors (nach (Wendel, 2011)).

Durch diese Angabe kann für eine bestimmte Zeitspanne  $T$  die Standardabweichung des durch Rauschen verursachten Winkelfehlers  $\sigma_{\theta_e}$  gemäß

$$\sigma_{\theta_e} = \sqrt{T} \cdot \sqrt{R} \quad (3.2)$$

relativ einfach abgeschätzt werden. Beispielsweise ist bei einem Sensor mit einer spektralen Leistungsdichte  $R$  von  $1^\circ/\sqrt{h}$  nach einer Stunde mit einer durch Rauschen verursachten Standardabweichung des Winkelfehlers von  $1^\circ$  zu rechnen. Weitere Details sind bei (Wendel, 2011) nachzulesen.

### Beschleunigungssensor

Das Fehlermodell für den Beschleunigungssensor kann analog zum Fehlermodell des Drehratensensors angegeben werden:

$$\tilde{\vec{a}}_{ib}^b = \mathbf{M}_{Accel} \cdot \vec{a}_{ib}^b + \vec{b}_a + \vec{n}_a \quad (3.3)$$

Die Biase  $\vec{b}_a$  haben als Einheit  $g$  wobei  $g$  für die Schwerebeschleunigung steht und mit  $g = 9.80665 \frac{m}{s^2}$  angenommen wird. Der Beschleunigungsbias kann auch einen Anteil auf Grund von Vibrationen aufweisen.

Das Beschleunigungssensorrauschen  $\vec{n}_a$  wird auch über die Wurzel der spektralen Leistungs-

dichte ausgedrückt und wird in diesem Fall als *velocity random walk* bezeichnet.

### 3.3.2 Globales Navigationssatellitensystem - GNSS

Das Globale Navigationssatellitensystem (GNSS) ist der Überbegriff für alle aktuellen Navigationssatellitensysteme der einzelnen Betreiber wie

- GPS (Global Positioning System) - Vereinigte Staaten von Amerika (National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing, 2014)
- GLONASS (GLOBAL NAVIGATION Satellite System) - Russische Föderation (Federal Space Agency, 2014)
- Galileo - Europäische Union (European GNSS Agency, 2014)
- Compass - Chinesische Volksrepublik (China Satellite Navigation Office, 2014)

Die in dieser Arbeit verwendeten GNSS-Sensoren nutzen ausschließlich Signale des GPS, weswegen im Weiteren auch nur noch GPS näher betrachtet wird. Einen guten Überblick über die anderen Systeme findet man z.B. in (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

#### Global Positioning System - GPS

In den frühen 1960er fanden verschiedene amerikanische Institutionen, u.a. das Verteidigungsministerium, Interesse an einem satellitengestützten Navigationssystem. Die Anforderungen an das System waren die globale Abdeckung, die kontinuierliche und vom Wetter unabhängige Verfügbarkeit, die absolute Positionsbestimmung von hochdynamischen Plattformen und eine hohe Genauigkeit. 1964 wurde für militärische Zwecke *Transit* als erstes Satellitennavigationssystem voll einsatzfähig. Die Positionsbestimmung erfolgte über die Auswertung der Frequenzverschiebung der Satellitensignale auf Grund des Dopplereffekts und lieferte Positionsgenauigkeiten von rund 500m. In den späten 1960er entwickelte das US-Verteidigungsministerium das NAVSTAR-GPS (*Navigational Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System*).

Das GPS setzt sich im Wesentlichen aus drei Segmenten zusammen: dem Raumsegment (*engl. Space Segment*), dem Bodenkontrollsegment (*engl. Control Segment*) und dem Nutzersegment (*engl. User Segment*) (Kaplan & Hegarty, 2005).

#### GPS-Raumsegment

Das Raumsegment stellt die Satellitenkonstellation dar. Mit einem durchschnittlichen orbitalen Radius<sup>1</sup> von 26600km befinden sich auf sechs Umlaufbahnen aktuell ca. 30 Satelliten, welche die Erde in 11 Stunden 58 Minuten umrunden. Von den 30 Satelliten sind jederzeit

---

<sup>1</sup>Distanz zwischen dem Satelliten und dem Geozentrum

mindestens 24 Satelliten aktiv, sodass überall auf der Erde mind. vier Satelliten über einer Elevation von  $15^\circ$  sichtbar sind. Die Inklination der Bahnebene gegenüber der Äquatorebene beträgt  $55^\circ$ .

Die Satelliten senden Signale auf den zwei Trägerfrequenzen L1 ( $f_{L1} = 154 \cdot f_0$ ) und L2 ( $f_{L2} = 120 \cdot f_0$ ) mit einer Grundfrequenz von  $f_0 = 10.23\text{MHz}$  aus. Der Trägerfrequenz L1 werden zwei PRN<sup>1</sup>-Codes, der C/A-Code und der P-Code aufmoduliert, der Trägerfrequenz L2 wird nur der P-Code aufmoduliert, wobei jedem Satelliten jeweils ein C/A-Code und ein P-Code eindeutig zugeordnet ist. Den beiden PRN-Codes werden zusätzlich noch Navigationsdaten aufmoduliert, die Informationen über die aktuelle GPS-Woche, den Zustand und die Genauigkeit des sendenden Satelliten, die Uhrenkorrektur, die satellitenspezifischen Ephemeriden<sup>2</sup>, die Almanach-Daten aller Satelliten<sup>3</sup> und die Korrekturdaten für die Laufzeitverzögerung wegen der Ionosphäre liefern.

Da die Satelliten Signale nur aussenden, wird es für die Nutzer, die die Signale empfangen zu einem passiven System. Aus diesem Grund ist es auch möglich, dass beliebig viele Nutzer das System zeitgleich verwenden können.

#### **GPS-Bodenkontrollsegment**

Weltweit sind fünf Bodenkontrollstationen verteilt, wobei sich die Bodenhauptkontrollstation in Colorado Springs befindet. Die Aufgabe des Bodenkontrollsegments besteht darin, den Zustand der Satelliten und deren Funktionalität zu überwachen bzw. aufrecht zu erhalten. Zumindestens täglich werden von der Hauptstation die von ihnen berechneten Ephemeriden, Almanach-Daten, Satellitenuhrenfehler und andere Informationen an die Satelliten gesendet, die wiederum mit den Navigationsdaten an den Nutzer weitergeleitet werden.

#### **GPS-Nutzersegment**

Die Nutzer von GPS verwenden für die Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitbestimmung spezielle GPS-Empfänger. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen den Ein- und den Zweifrequenzempfängern, je nachdem ob nur die Trägerfrequenz L1 oder beide, L1 und L2 empfangen werden können. Bei dieser Arbeit kommen beide Formen zum Einsatz. Der für die Steuerung eingesetzte Einfrequenzempfänger wurde bereits im Abschnitt 2.4.1 beschrieben. Für die präzisere Positionsbestimmung im Hinblick auf die direkte Georeferenzierung wird ein Zweifrequenzempfänger implementiert (vgl. Kapitel 3.4). Ein weiterer Einfrequenzempfänger befindet sich auf dem Sensor *APM2.0* (vgl. Kapitel 3.4), der nur der Datensynchronisation (vgl. Kapitel 4.1) dienen soll.

#### **Positionierungsverfahren mit GPS und Fehlerbetrachtung**

Die Positionierung mittels GPS erfolgt im erdfesten Koordinatensystem WGS-84. Grundsätz-

---

<sup>1</sup>Pseudo Random Noise

<sup>2</sup>Genaue Satellitenbahndaten

<sup>3</sup>Grobe Satellitenbahndaten

lich gibt es zwei Möglichkeiten über die die Positionsbestimmung erfolgen kann:

- Positionslösung mittels Pseudostrecken
- Positionslösung mittels Trägerphasen

### Pseudostrecken

Das Grundprinzip der Pseudostreckenmessung beruht auf dem Vergleich des von dem Satelliten ausgesendeten Codes mit einer empfangernerintern erzeugten Code-Kopie (*engl. Replica Code*). Die Verschiebung der Code-Kopie ist ein Maß für die Laufzeit. Die Laufzeit wird jedoch vom Empfängeruhrenfehler derart beeinflusst, dass dieser in der Beobachtungsgleichung berücksichtigt werden muss. Der Positionslösung mittels der Pseudostrecken  $P_i^j(t)$  zwischen dem Empfänger  $i$  und dem Satelliten  $j$  zum Zeitpunkt  $t$  liegt eine nicht-lineare Beobachtungsgleichung der folgenden Art zu Grunde

$$P_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c \cdot (\delta t_i(t) - \delta t^j(t - T_i^j)) + \delta Tr_i^j(t) + \delta Ion_i^j(t) + \delta MP_i^j(t) + \delta orb_i^j(t) + \delta rel_i^j(t) + \epsilon_i^j(t) \quad (3.4)$$

Hierbei bedeutet

$\delta t_i$ ...	Empfängeruhrenfehler
$\delta t^j$ ...	Satellitenuhrenfehler
$T_i^j$ ...	wahre Signallaufzeit
$\delta MP_i^j$ ...	Mehrwegeeffekte
$\delta Tr_i^j$ ...	Troposphärische Refraktion
$\delta Ion_i^j$ ...	Ionosphärische Refraktion
$\delta orb_i^j$ ...	Satellitenbahnfehler
$\delta rel_i^j$ ...	Relativistische Effekte
$\epsilon_i^j$ ...	Messrauschen

Die bekannten Satellitenpositionen  $\vec{X}^j$  und die unbekanntes, zu schätzenden Empfängerpositionen  $\vec{X}_i$  sind in der geometrischen Entfernung

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(X^j - X_i)^2 + (Y^j - Y_i)^2 + (Z^j - Z_i)^2} \quad (3.5)$$

enthalten. Im zweiten Term auf der rechten Seite der Gleichung 3.4 ist der Empfängeruhrenfehler  $\delta t_i(t)$ , der ebenfalls geschätzt wird, enthalten. Die übrigen unbekanntes Fehlerinflüsse sind durch die restlichen Terme angegeben. Die Schätzung der Koordinaten und des Uhrenfehlers erfolgen grundsätzlich über Methoden der Ausgleichsrechnung (A.Wieser, 2010).

### Trägerphasen

Während die Pseudostrecke mit Hilfe des Codes zwar ungenau aber eindeutig messbar ist, kann die Messung mit Trägerphasen grundsätzlich sehr exakt aber nur innerhalb einer Wellenlänge durchgeführt werden. Das bedeutet, dass die gesamte Strecke nicht eindeutig messbar ist. Die Beobachtungsgleichung für die Positionslösung mittels Trägerphasen  $\Phi_i^j(t)$  ist der der Pseudostrecken ähnlich.

$$\begin{aligned} \Phi_i^j(t) = & \rho_i^j(t) + c \cdot (\delta t_i(t) - \delta t^j(t - T_i^j)) \\ & + \delta Tr_i^j(t) - \delta Ion_i^j(t) + \delta orb_i^j(t) + \delta MP_i^j(t) + \delta rel_i^j(t) + \lambda \cdot N_i^j + \epsilon_i^j(t) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Hinzukommt der Term  $\lambda \cdot N_i^j$ , der sich aus der Wellenlänge  $\lambda$  der entsprechenden Frequenz

Tabelle 3.1: Abschätzung des *User-Equivalent Range Error* (UERE) bei Einzelpunktbestimmung mit Ein- und Zweifrequenzempfängern (Kaplan & Hegarty, 2005).

Segment	Einfluss	1 $\sigma$ [m] (L1)	1 $\sigma$ [m] (L1+L2)
Raum- und Kontrollsegment	Satellitenuhrenfehler $\delta t^j$	1.1	1.1
	Satellitenbahnfehler $\delta orb_i^j$	0.8	0.8
Signalausbreitung	L1 (P)-L1 (C/A) Gruppenlaufzeit	-	0.3
	Ionosphäre $\delta Ion_i^j$	7.0	0.1
	Troposphäre $\delta Tr_i^j$	0.2	0.2
Benutzer	Mehrwegeeffekte $\delta MP_i^j$	0.2	0.2
	Messrauschen $\epsilon_i^j$	0.1	0.1
UERE	Gesamt ( <i>Root Sum Square</i> )	7.1	1.4

und den Mehrdeutigkeiten  $N_i^j$  (*engl. ambiguities*), d.h der ganzen Anzahl an vollen Wellenzügen zwischen Satellit und Empfänger, zusammensetzt. Um letztlich eine Positionslösung im cm-Bereich zu erhalten, ist die Lösung dieser Mehrdeutigkeiten eine Grundvoraussetzung. Bei der Positionierung mittels GPS kann grundsätzlich zwischen der Einzelpunktbestimmung und der relativen Positionierung unterschieden werden.

### Einzelpunktbestimmung

Bei der Einzelpunktbestimmung kommt lediglich ein GPS-Empfänger zum Einsatz. In Abhängigkeit davon, ob es sich um einen Ein- oder Zweifrequenzempfänger handelt, sind in der Tabelle 3.1 die zu erwartenden Fehler ersichtlich (Kaplan & Hegarty, 2005).

Der größte Fehlereinfluss kommt von der Ionosphäre. Im Falle eines Zweifrequenzempfängers können die beiden Frequenzen zur Bildung von Linearkombinationen genutzt werden, wodurch der Einfluss der Ionosphäre drastisch reduziert werden kann. Werden zusätzlich noch auf einer statischen Position Rohdaten von mehr als 30 Minuten aufgezeichnet und sehr präzise Modelle für diverse Einflüsse verwendet, können cm-dm Genauigkeiten erreicht werden

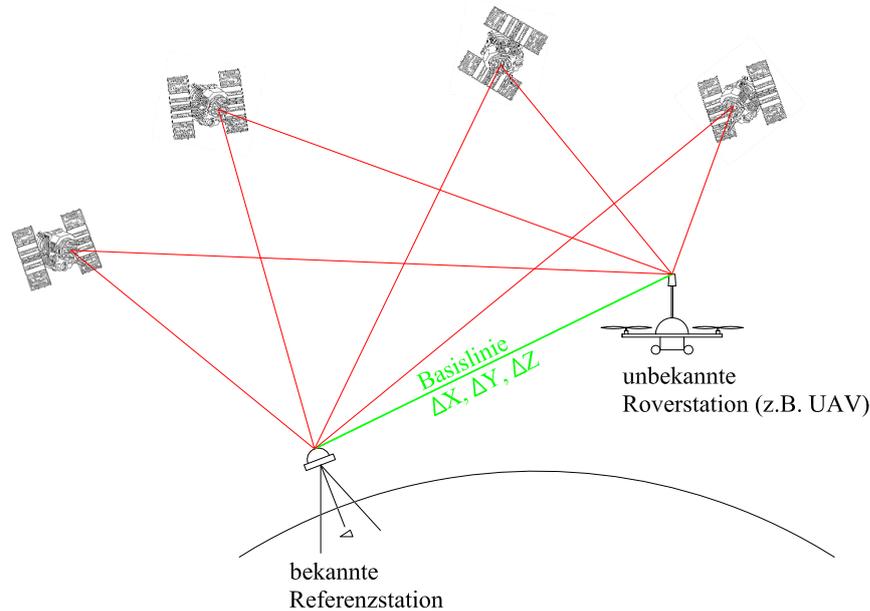


Abbildung 3.4: Grundprinzip der relativen GPS-Messung. Für die Bestimmung der Basislinie werden an der bekannten Referenzstation und der unbekanntem Roverstation (statisch oder kinematisch) simultan GPS-Beobachtungen durchgeführt.

(*Precise Point Positioning - PPP*) (Kaplan & Hegarty, 2005).

### Relative Positionierung

Bei der relativen Positionierung kommen mindestens zwei GPS-Empfänger zum Einsatz. Das Grundprinzip ist in der Abbildung 3.4 dargestellt. Ein (oder auch mehrere) GPS-Empfänger sind auf bekannten Punkten stationiert (Referenz), während der zweite GPS-Empfänger (Rover) in Bewegung ist und dessen Position relativ zur Referenz (Basislinie) bestimmt werden soll. Der Vorteil der simultanen Beobachtung von Satellitensignalen auf mehreren Stationen liegt in der Möglichkeit, Differenzbildungen zwischen den Trägerphasenmessungen auf gleicher Frequenz und Linearkombinationen mit den unterschiedlichen Frequenzen oder zwischen den Trägerphasen- und Pseudostreckenmessungen durchzuführen. Dadurch können bei kurzen Basislinien ( $< 10\text{km}$ ) unerwünschte Terme eliminiert oder stark reduziert werden und die für höchste Genauigkeiten notwendige Lösung und Fixierung der Mehrdeutigkeiten ( $N_i^j$  in Gleichung (3.6)) durchgeführt werden. Können die Mehrdeutigkeiten gelöst und fixiert werden, sind bei kinematischen Anwendungen einfache Standardabweichungen von  $< 10\text{mm} + 1\text{ppm}$  in der Lage und  $< 20\text{mm} + 1\text{ppm}$  in der Höhe sowie bei statischen Beobachtungen  $< 5\text{mm} + 1\text{ppm}$  in der Lage und  $< 10\text{mm} + 1\text{ppm}$  in der Höhe erreicht werden (A.Wieser, 2010).

Zuletzt sei noch erwähnt, dass Mehrwegeeffekte, die auf Grund von Reflexionen und Ablen-

kung der Satellitensignalen an Oberflächen in der Nähe der GPS-Antenne entstehen, durch keine mathematischen Formulierungen gelöst werden können. Daher ist darauf zu achten, dass sich in der Umgebung keine derartigen Oberflächen (z.B. Autos oder Hausmauern) befinden oder dass spezielle GPS-Antennen mit Choke-Ringen eingesetzt werden.

### 3.3.3 Magnetometer und Barometer

Bei einer konstanten Drehung des uLFZ um die lokale Vertikale wirkt kein Einfluss auf die Messungen des Beschleunigungssensors und der Yaw-Winkel kann nicht abgeleitet werden. Auf den Drehratensensor wirkt zwar die Drehung um die sensitive Achse (der lokalen Vertikalen), auf Grund der Drift würde sich aber bereits nach kurzer Zeit ein zu großer Orientierungsfehler ergeben. Aus diesem Grund werden Magnetometer zur Stützung des Yaw-Winkels herangezogen (Wendel, 2011). Die meisten MEMS-Magnetometer beruhen auf den Messungen der Lorentzkraft<sup>1</sup>. Durch drei orthogonal angeordnete Magnetometer kann der Vektor des Erdmagnetfeldes gemessen werden.

Das Problem bei Magnetometer-Messungen liegt darin, dass nicht nur das Erdmagnetfeld gemessen wird sondern auch Störungen, die durch Magnetfelder von z.B. diversen metallischen Objekten in der Umgebung entstehen. Diese Einflüsse unterteilen sich in einen konstanten (*engl.: Hard Iron Offset*) und einen variablen Anteil (*engl.: Soft Iron Distortion*). Erstere werden von permanent magnetisierten Objekten verursacht und bleiben -sofern sich die Umgebung nicht ändert- konstant. Die variablen Anteile entstehen durch Objekte, die bei Spannungseinduktion ein Magnetfeld aufbauen. Auf Grund der Vielzahl von Platinen am Hexakopter (Kamera, Regler, GPS-Empfänger,...) sind einige Störeinflüsse vorhanden. (Wieser, 2013) zeigt, wie das Magnetometer kalibriert werden kann, Unsicherheiten bleiben aber dennoch vorhanden.

Letztlich werden oftmals noch Barometer zur Stützung der Höhenkomponente herangezogen. Bei GPS-Sensoren von geringer Güte ist speziell die Höhenkomponente großen Unsicherheiten unterworfen und kann durch die Messung des Luftdrucks und die dadurch mögliche Ableitung der Höhe gestützt oder überhaupt ersetzt werden.

## 3.4 Verwendete Sensoren und Implementierung in das uLFZ

Die rein für die Steuerung des uLFZ notwendigen Sensoren wurden bereits im Kapitel 2.4.1 beschrieben. Während (Glira, 2012) die Messdaten dieser Sensoren für die direkte Georeferenzierung nutzt, wurde in dieser Arbeit die Implementierung eines zusätzlichen GPS-Zweifrequenzempfängers für die präzisere Positionsbestimmung vorgesehen. Die Messwerte

---

<sup>1</sup>Kraft, die eine bewegte Ladung im magnetischen oder elektrischen Feld erfährt



Abbildung 3.5: *Maxtena M1227HCT-A-SMA*: Zweifrequenzantenne mit einer Höhe von 51mm und einem Durchmesser von 30mm.



Abbildung 3.6: *Ashtech MB100*: Zweifrequenzempfänger mit einem Ausmaß von 58x56x11mm.

des Beschleunigungs- und Drehratensensors der *FlightCtrl* und des Magnetometers *MK3Mag* (vgl. Kapitel 2.4.1) könnten zwar in Analogie zu (Glira, 2012) verwendet werden, die Veränderung des offenen Quelltextes wäre dafür aber notwendig. Da es sich bei dem eingesetzten uLFZ um ein Leihgerät des Unternehmens *Senftner Vermessung ZT GmbH* handelt und eine Veränderung von Hard- und Software nicht erwünscht war, musste eine weitere IMU in Form eines uLFZ-Autopiloten speziell für die direkte Georeferenzierung der Luftbilder verwendet werden. Die zusätzlich implementierten Sensoren werden im Folgenden näher beschrieben.

### GPS-Zweifrequenzsystem

Das GPS-Zweifrequenzsystem besteht aus der GPS-Antenne „*Maxtena M1227HCT-A-SMA*“ (Abb. 3.5) und dem GPS-Empfänger „*Ashtech MB100*“ (Abb. 3.6), der gemeinsam mit der Kontrolleinheit „*ppm2022L-2*“ des Unternehmens *ppm GmbH* (*ppm GmbH, 2014*) als Gesamtempfängersystem zur Verfügung steht. Mit der Kontrolleinheit und dem darauf befindlichen spezifischen Betriebssystem „*ppmOS*“ lassen sich individuelle Konfigurationen für eine Vielzahl von GPS-Anwendungen gestalten. Die dafür notwendigen Konfigurationsdateien sind auf einer internen SD-Karte gespeichert und können via PC-Schnittstelle angepasst werden.

Nach erfolgter Stromzufuhr durch Anschluss der beiden 4S-Lipo-Akkus (vgl. Kapitel 2.4.1) wird mit der Konfigurationsdatei „*autoexec.sh*“ die Initialisierung des GPS-Empfängers durchgeführt und die Konfigurationsdatei „*gps.cfg*“ aktiviert. In dieser Konfigurationsdatei sind alle für die spezifische GPS-Anwendung erforderlichen Einstellungen zu treffen. Das sind u.a. die Einstellungen der Baudraten, Schnittstellen und Datenspeicherung. Des Weiteren wird die Elevationsmaske, die Aufzeichnungsfrequenz und die Aktivierung des PPS<sup>1</sup>-Signals in die-

<sup>1</sup>*Pulse Per Second*: ein elektrisches Signal, das eine scharf ansteigende und abfallende Flanke besitzt und sich sehr präzise jede Sekunde wiederholt

ser Datei definiert. Das PPS-Signal wird für die spätere Datensynchronisierung (siehe Kapitel 4.1) von entscheidender Bedeutung sein. Die Elevationsmaske wurde auf  $5^\circ$  gesetzt und die Aufzeichnungsfrequenz auf 5Hz. Die Skriptdatei „*firstfix.sh*“ wird einmalig nach erfolgter, gültiger Positionsberechnung ausgeführt und erst danach wird die Datenaufzeichnung gestartet. Die Datenaufzeichnung erfolgt auf der bereits erwähnten internen SD-Karte.

Die GPS-Antenne wurde zentrisch auf dem uLFZ an einem ca. 25cm langen Aluminiumgestänge montiert (Abb. 3.7). Die exponierte Lage der Antenne soll dem grundsätzlich stärker verrauschten L2-Signal zugute kommen. Erste Testmessungen, bei denen die GPS-Antenne direkt zwischen zwei Auslegern montiert wurde, zeigten, dass kaum Signale der L2-Frequenz empfangen wurden. Erst mit obiger Montage der Antenne konnte der Empfang des L2-Signals erheblich verbessert werden. Aus Platzgründen konnte der GPS-Empfänger nur noch seitlich auf der Kameraplattform angebracht werden (Abb. 3.7).

#### **uLFZ-Autopilot Ardu Pilot Mega 2.0**

Zusätzlich zum GPS-Zweifrequenzsystem wurde der uLFZ-Autopilot *Ardu Pilot Mega 2.0*, kurz *APM2.0* implementiert (Abb. 3.8) (DIY DRONES, 2014). Dieser sehr leichte (ca. 20g) und kleine Bauteil (67x40x10mm) wurde bereits in (Wieser, 2013) ausführlich beschrieben. Folgende Bauteile sind auf dem *APM2.0* zu finden:

- **Prozessor: ATMEGA2560**

Der ATMEGA2560 des Herstellers *ATMEL* ist der Hauptcontroller des Systems in Form eines 8bit-Mikroprozessors(ATMEL, 2012).

- **IMU: MPU-6000**

Der Bauteil MPU-6000 des Herstellers *InvenSense Inc.* stellt eine IMU mit Sensoren wie in (3.3.1) beschrieben dar und hat ein Ausmaß von nur 4x4x1mm (*InvenSense Inc.*, 2013).

- **Luftdruck- und Temperatursensor: MS5611**

Der Bauteil MS5611 des Herstellers *MEAS Switzerland Sàrl* ist ein Luftdruck- und Temperatursensor mit einem Ausmaß von 5x3x1mm. Dem Datenblatt ist zu entnehmen, dass der Luftdruck mit einer Standardabweichung ( $1\sigma$ ) von  $\pm 1,5\text{mbar}$  und die Temperatur mit  $\pm 0,8^\circ\text{C}$  ( $1\sigma$ ) gemessen und die Höhe letztlich mit einer einfachen Standardabweichung von 10cm abgeleitet werden kann (*MEAS Switzerland Sàrl*, 2012).

- **GPS: MTK3329**

Hersteller des Einfrequenz-GPS ist das Unternehmen *MediaTek* (*MediaTek*, 2014). Die Positionslösung dieses GPS-Empfängers ist bei dieser Arbeit nicht von Bedeutung. Lediglich die mitaufgezeichnete GPS-Zeit soll für die spätere Synchronisation mit dem Zweifrequenz-GPS verwendet werden.

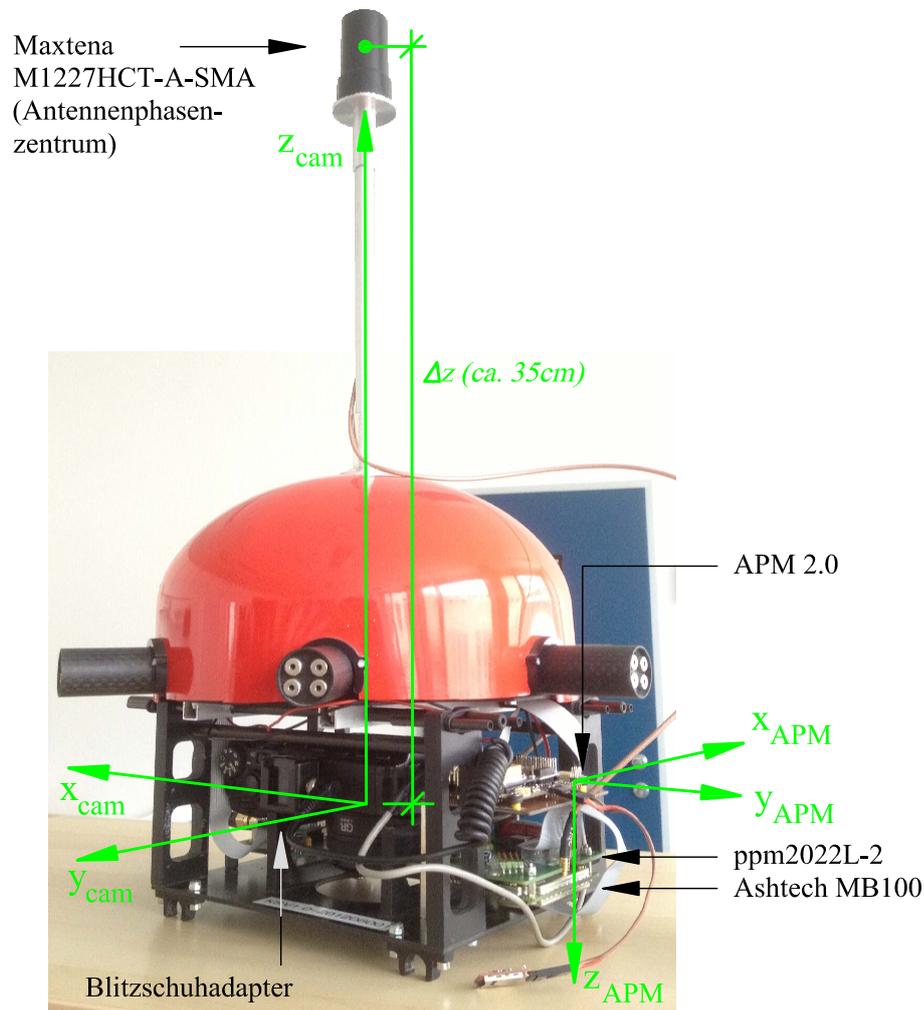


Abbildung 3.7: Zusätzlich implementierte Sensoren mit den jeweiligen körperfesten Koordinatenachsen. Die Verdrehungen der Koordinatensysteme von Kamera ( $X_{cam}$ ) und APM2.0 ( $X_{APM}$ ) werden im Kapitel 4.3.3 behandelt. Zwischen Antennenphasenzentrum und Projektionszentrum ergibt sich durch die Form der Implementierung ein konstanter Offset  $\Delta z$  von ca. 35cm.

- **Magnetometer: HMC5843**

Der Bauteil HMC5843 ist ein digitaler 3-Achs-Kompass von *Honeywell* (Honeywell, 2010).

In der Abbildung 3.7 sind die zusätzlich implementierten Sensoren und deren Achsausrichtungen dargestellt. Die Verdrehungen der Sensor-Koordinatensysteme von Kamera, APM2.0 und Hexakopter zueinander betragen bis auf Montageunsicherheiten  $90^\circ$  oder einem Vielfachen davon. Die angesprochenen Unsicherheiten werden im Zuge der *Mounting Calibration*

im Abschnitt 4.3.3 behandelt.

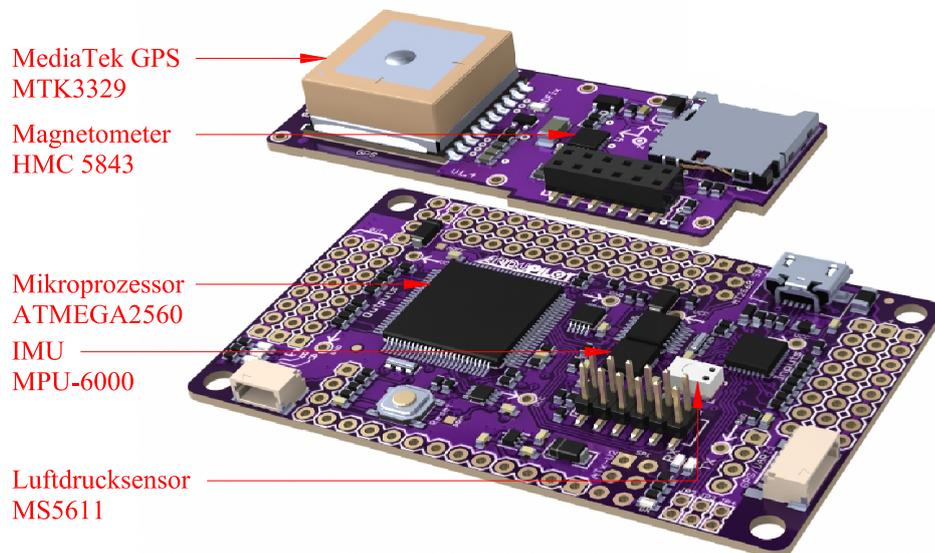


Abbildung 3.8: Ardupilot Mega 2.0: uLFZ-Autopilot mit integrierter IMU, GPS, Luftdrucksensor und Magnetometer (DIY DRONES, 2014).

Die Rohdaten aller Sensoren werden über einen externen, seriellen Datenlogger auf eine MiniSD-Karte gespeichert. Die Zeileneinträge der unterschiedlichen Sensoren lassen sich über die folgenden Buchstaben in der ersten Spalte filtern:

- i ... IMU-Rohdaten:**  $Accel^1_x$ ,  $Accel_y$ ,  $Accel_z$ ,  $Gyro^2_x$ ,  $Gyro_y$ ,  $Gyro_z$   
Aufgezeichnet mit einer Frequenz von 200Hz.
- g ... GPS-Daten:** Diese Zeile beinhaltet die Position (Länge, Breite, Höhe) und die Art der Positionslösung, die relevante GPS-Zeit (UTC) und das Datum, sowie Groundspeed, Groundcourse, Anzahl der Satelliten  
Aufgezeichnet mit einer Frequenz von 5Hz.
- e ... Magnetometer-Rohdaten:**  $Mag^3_x$ ,  $Mag_y$ ,  $Mag_z$   
Aufgezeichnet mit einer Frequenz von 12Hz.
- f ... Barometer-Rohdaten:**  
Aufgezeichnet mit einer Frequenz von 12Hz.
- t ... PPS-Signal:** Signal des Zweifrequenzempfängers (1Hz)
- b ... Kameraauslösezeitpunkt**

<sup>1</sup>Accel: verwendetes Kürzel für die Daten des Beschleunigungssensor

<sup>2</sup>Gyro: verwendetes Kürzel für die Daten des Drehratensensors

<sup>3</sup>Mag: verwendetes Kürzel für die Daten des Magnetometers

In der zweiten Spalte befindet sich die interne Mikrocontrollerzeit. In den restlichen Spalten stehen die oben beschriebenen Rohdaten. Nähere Informationen zur Rohdatenaufzeichnung sind in (Wieser, 2013) nachzulesen.

In der Abbildung 3.9 sind die Verbindungen zwischen den Sensoren in Form eines Block-

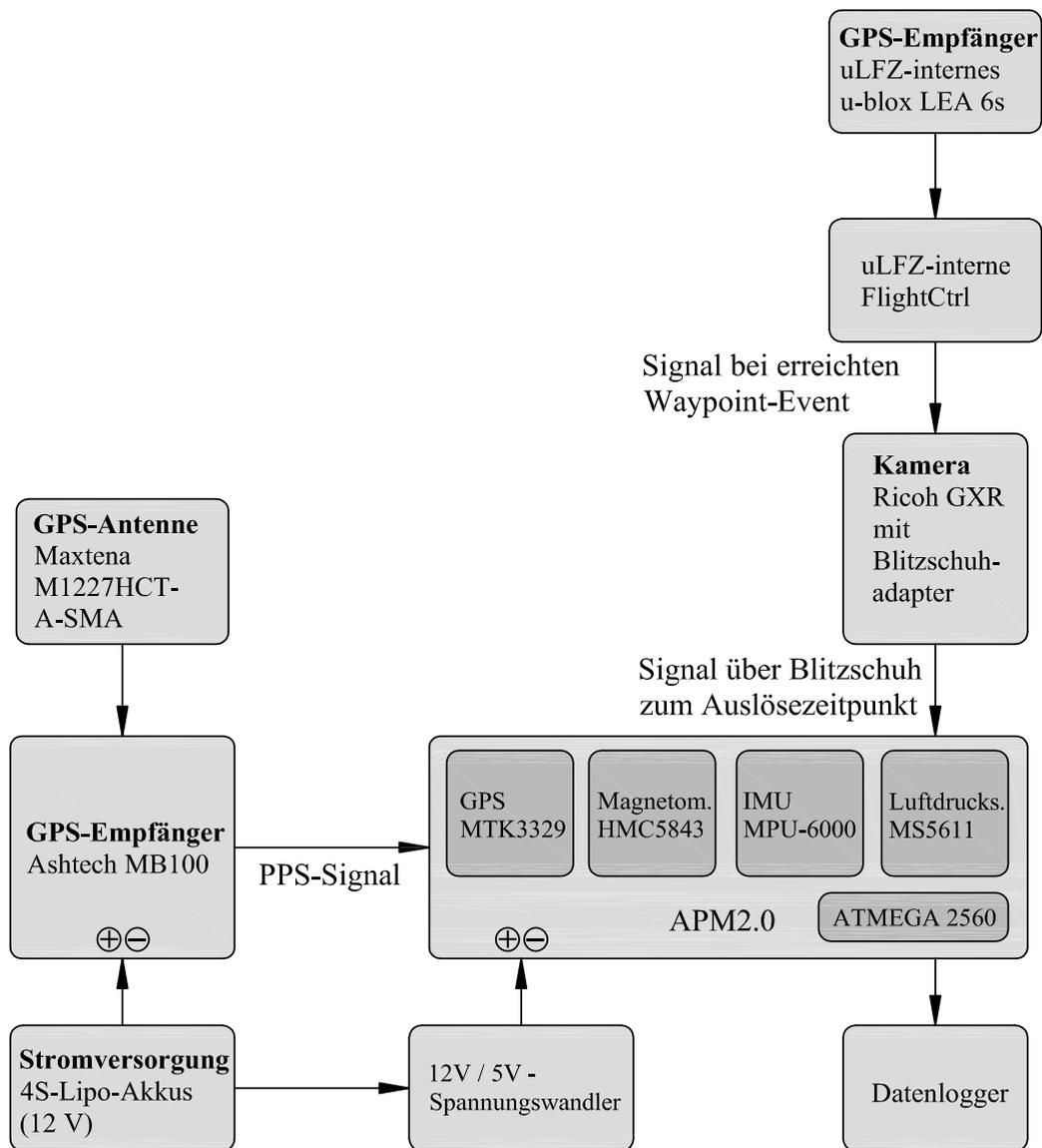


Abbildung 3.9: Blockschaltbild der Verbindungen aller für die direkte Georeferenzierung verwendeten Sensoren.

schaltbildes dargestellt. Das GPS-Zweifrequenzsystem wird über die 4S-Lipo-Akkus mit 12V-Spannung versorgt. Das PPS-Signal des Zweifrequenzsystems wird direkt an den APM2.0 wei-

tergeleitet und mit dem vorgesetzten Buchstaben t und der entsprechenden internen Mikrocontrollerzeit in das Rohdatenfile gespeichert. Die zweite wesentliche Verbindung ist die zwischen der verwendeten Kamera und dem APM2.0, welche über den Blitzschuh der Kamera realisiert wird. Beim Erreichen eines Wegpunktes mit dem uLFZ wird von der *FlightCtrl* (vgl. Kapitel 2.4.1) ein Signal an die Kamera übermittelt, das die Auslösung der Fotoaufnahme verursacht. Die Einstellung an der Kamera sieht vor, dass in jedem Fall eine Belichtung durch den Blitz ausgelöst wird. Auf dem Blitzschuh der Kamera sitzt nun ein Blitzschuhadapter, der das Signal für die Auslösung des Blitzes weiterleitet. Dieses Signal wird abgegriffen und an den APM2.0 weitergeleitet und somit der Auslösezeitpunkt in Form des Buchstaben b und der internen Mikrocontrollerzeit im Rohdatenfile gespeichert. Mit den Einträgen im Rohdatenfile soll die spätere Zeitsynchronisierung erfolgen.

### 3.5 Grundlagen des Kalman-Filters

Für die Fusion der GPS-, IMU- und Magnetometer-Messdaten stellt das Kalman-Filter ein optimales Schätzverfahren dar und wird in diesem Anwendungsbereich fast ausschließlich verwendet. Anfang der 1960iger Jahre entwickelte Rudolf Kalman einen Algorithmus, das Kalman-Filter (KF), zur Schätzung des Zustandes eines linearen Systems bzw. das erweiterte Kalman-Filter (EKF) für schwach nichtlineare Zusammenhänge zwischen den Messwerten und dem Systemzustand. Die Nomenklatur der folgenden Gleichungen für die Kalman-Filterung richten sich weitgehend nach (Wendel, 2011).

Grundsätzlich können lineare Systeme durch Zustandsdifferentialgleichungen der Form

$$\dot{\vec{x}}(t) = \mathbf{F}\vec{x}(t) + \mathbf{B}\vec{u}(t) \quad (3.7)$$

angeschrieben werden. Diese Differentialgleichung wird auch als Systemgleichung bezeichnet. Dabei stellt  $\dot{\vec{x}}(t)$  die zeitliche Ableitung des zu schätzenden Zustandsvektors  $\vec{x}(t)$  dar,  $\vec{u}(t)$  den Eingangsvektor. Mit der Systemmatrix  $\mathbf{F}$  wird das Verhalten des dynamischen Systems beschrieben. Die Eingangsmatrix  $\mathbf{B}$  steht für die Auswirkung der Eingangsgrößen auf die Zustandsgröße. Die soeben beschriebenen Zusammenhänge sind in der Abbildung 3.10 als Blockdiagramm dargestellt.

Liegen diskrete Messwerte für die Schätzung des Systemzustands zu diskreten Zeitpunkten  $t(k)$  vor, so ist der Übergang von der zeitkontinuierlichen in die zeitdiskrete Umgebung erforderlich. Die Lösung der Systemgleichung 3.7 führt zur Grundgleichung der Kalman-Filterung:

$$\vec{x}_{k+1} = \Phi_k \vec{x}_k + \mathbf{B}_K \vec{u}_k + \mathbf{G}_k \vec{w}_k \quad (3.8)$$

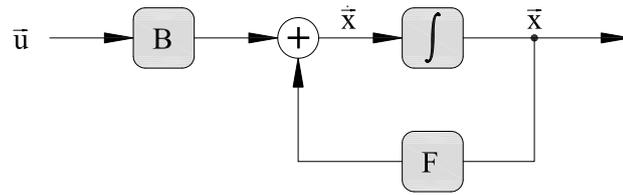


Abbildung 3.10: Blockdiagramm eines zeitkontinuierlichen Zustandsmodell (nach (Wendel, 2011)).

Die Lösung von (3.7) führt ebenfalls zur Transitionsmatrix

$$\Phi_k = \exp^{F(t_{k+1}-t_k)} \quad , \quad (3.9)$$

mit der von einem bekannten Systemzustand zum Zeitpunkt  $t(k)$  auf den Systemzustand zum Zeitpunkt  $t(k+1)$  geschlossen werden kann. Durch eine Reihenentwicklung der Matrixexponentialfunktion und die Verwendungen von wenigen Gliedern der Reihenentwicklung kann das dynamische Verhalten des Systems oftmals ausreichend genau angenähert werden.

Zusätzlich wird noch das mittelwertfreie, normalverteilte, weiße Systemrauschen durch den Vektor  $\vec{w}_k$  berücksichtigt sowie dessen Auswirkung auf die Zustandsgröße durch die Störmatrix  $\mathbf{G}_k$  beschrieben. Dem Systemrauschen werden sämtliche Modellunsicherheiten sowie das Rauschen der Eingangsgrößen  $\vec{u}_k$ , welche zur Regel als Messwerte vorliegen, zugeschlagen. Da die Messwerte als Eingangsgröße dienen, dürfen diese nicht als Ableitung im Zustandsvektor des Systemmodells vorkommen. Durch die Einführung eines Messmodells der Form

$$\vec{y}_k = \mathbf{H}_k \vec{x}_k + \vec{v}_k \quad (3.10)$$

wird der Zusammenhang zwischen den Messwerten  $\vec{y}_k$  und dem Zustandsvektor  $\vec{x}_k$  mit der Messmatrix  $\mathbf{H}_k$  beschrieben. Mit dem Vektor  $\vec{v}_k$  wird das Messrauschen ausgedrückt.

Mit den soeben beschriebenen Grundgleichungen der Kalman-Filterung kann die Schätzung des Systemzustandes erfolgen sowie Informationen über die Güte der Schätzung in Form der Kovarianzmatrix gewonnen werden.

Der Ablauf einer Kalman-Filterung kann grundsätzlich in die zwei Schritte

- Schätzung und
- Prädiktion

unterteilt werden. Diese Schritte werden im Folgenden erläutert.

### Schätzung

Ausgehend von einer a-priori-Zustandsschätzung  $\hat{\mathbf{x}}_k^-$  und -Kovarianzmatrix  $\mathbf{P}_{xx,k}^-$  werden im Schätzschritt die zum aktuell Zeitpunkt  $t(k)$  vorliegenden Messwerte  $\tilde{\mathbf{y}}_k$  verarbeitet um die entsprechenden a-posteriori-Schätzwerte  $\hat{\mathbf{x}}_k^+$  bzw.  $\mathbf{P}_{xx,k}^+$  zu erhalten. Die Indizes  $^+$  und  $^-$  geben an, ob die aktuellen Messwerte bereits verarbeitet wurden ( $^+$ ) oder ob dieser Schritt noch ausständig ist ( $^-$ ).

Für den a-posteriori-Schätzwert ergibt sich

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\tilde{\mathbf{y}}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (3.11)$$

und für die a-posteriori-Kovarianzmatrix

$$\mathbf{P}_{xx,k}^+ = \mathbf{P}_{xx,k}^- - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{xx,k}^- \quad (3.12)$$

Die Elemente der Hauptdiagonale von  $\mathbf{R}_k$  berücksichtigen das Messrauschen in Form von Varianzen der Beobachtungen.

Die Matrix  $\mathbf{K}_k$  wird als Kalman-Gain-Matrix bezeichnet und hat die Form

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{xx,k}^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{xx,k}^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (3.13)$$

Durch die Gewichtung der neuen Messungen wird mit der Kalman-Gain-Matrix deren Einfluss auf die Schätzung bewirkt:

$$\lim_{\mathbf{R}_k \rightarrow 0} \mathbf{K}_k = \mathbf{H}_k^{-1} \quad (3.14)$$

führt dazu, dass den neuen Messungen ein starkes Gewicht zugesprochen wird, während

$$\lim_{\mathbf{P}_{xx,k}^- \rightarrow 0} \mathbf{K}_k = 0 \quad (3.15)$$

eine geringere Gewichtung der Messungen bewirkt und der Prädiktion ein größeres Gewicht zuspricht. Die Kalman-Gain-Matrix wird so gewählt, dass die Spur der a-posteriori-Kovarianzmatrix ein Minimum erreicht (Welch & Bishop, 1995).

### Prädiktion

Ausgehend vom Systemmodell (3.8) wird im Prädiktionsschritt mit der Verwendung des a-posteriori-Schätzwert  $\hat{\mathbf{x}}_k^+$  und dessen Kovarianzmatrix  $\mathbf{P}_{xx,k}^+$  zum Zeitpunkt  $t(k)$  der a-priori-Schätzwert für den folgenden Zeitpunkt  $t(k+1)$  berechnet. Für den a-priori-Schätzwert ergibt sich

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = \Phi_k \hat{\mathbf{x}}_k^+ + \mathbf{B}_k \vec{u}_k \quad (3.16)$$

und für die a-priori-Kovarianzmatrix

$$\mathbf{P}_{xx,k+1}^- = \Phi_k \mathbf{P}_{xx,k}^+ \Phi_k^T + \mathbf{G}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{G}_k^T, \quad (3.17)$$

wobei mit der Matrix  $\mathbf{Q}_k$  das Systemrauschen ausgedrückt wird. Der Gleichung (3.16) ist zu entnehmen, dass für die Prädiktion ausschließlich das Systemmodell verwendet wird und daher keine Messwerte erforderlich sind.

Die bisherige Betrachtung der Kalman-Filterung hat sich auf lineare Systeme bezogen. Liegen der Anwendung nichtlineare Systeme zugrunde oder ist der Zusammenhang zwischen den Messwerten und dem Zustandsvektor nichtlinear, muss ein linearisiertes oder erweitertes Kalman-Filter-Modell eingesetzt werden.

### Linearisiertes Kalman-Filter

Bei einem linearisierten Kalman-Filter wird das beobachtete, nichtlineare System  $\dot{\vec{x}}$  um einen Linearisierungspunkt  $\vec{\bar{x}}$  in einer Taylor-Reihe entwickelt und nach dem linearen Glied abgebrochen:

$$\dot{\vec{x}} = \vec{f}(\vec{x}) + \mathbf{B}\vec{u} + \mathbf{G}\vec{w} \approx \vec{f}(\vec{\bar{x}}) + \left. \frac{\partial \vec{f}(\vec{x})}{\partial \vec{x}} \right|_{\vec{x}=\vec{\bar{x}}} \cdot (\vec{x} - \vec{\bar{x}}) + \mathbf{B}\vec{u} + \mathbf{G}\vec{w} \quad (3.18)$$

Die Subtraktion des analog dazu formulierten geschätzten Systemzustand

$$\dot{\hat{\vec{x}}} = \vec{f}(\hat{\vec{x}}) + \mathbf{B}\vec{u} \approx \vec{f}(\vec{\bar{x}}) + \left. \frac{\partial \vec{f}(\vec{x})}{\partial \vec{x}} \right|_{\vec{x}=\vec{\bar{x}}} \cdot (\hat{\vec{x}} - \vec{\bar{x}}) + \mathbf{B}\vec{u} \quad (3.19)$$

von der Gleichung (3.18) führt zu

$$\Delta \dot{\vec{x}} = \dot{\hat{\vec{x}}} - \dot{\vec{x}} = \left. \frac{\partial \vec{f}(\vec{x})}{\partial \vec{x}} \right|_{\vec{x}=\vec{\bar{x}}} \cdot \Delta \vec{x} - \mathbf{G}\vec{w}, \quad (3.20)$$

dem linearisierten Kalman-Filter zugrunde liegenden Systemmodell. Die partielle Ableitung

$$\mathbf{F} = \left. \frac{\partial \vec{f}(\vec{x})}{\partial \vec{x}} \right|_{\vec{x}=\hat{\vec{x}}} \quad (3.21)$$

nach den Zustandsgrößen wird als Jacobi-Matrix der Funktion  $\vec{f}(\vec{x})$  bezeichnet und stellt die Systemmatrix  $\mathbf{F}$  dar, mit der das Verhalten des dynamischen Systems beschrieben wird (vgl. Abb. 3.10).

Es wird beim linearisierten Modell also nicht der Systemzustand direkt, sondern der Fehler eines vermuteten Systems geschätzt (Wendel, 2011). In der Literatur wird dieses Verfahren auch als *error state space* oder indirektes Kalman-Filter bezeichnet.

Analog zum Systemmodell wird das Messmodell hergeleitet. Auch hier werden nicht die Messwerte direkt, sondern die Differenzen zwischen den Messwerten und den erwarteten Messwerten verarbeitet.

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \vec{h}_k(\vec{x}_k) + \vec{v}_k \quad (3.22)$$

stellt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Messwertvektor und Systemzustand dar. Der Abbruch nach dem linearen Glied einer Taylor-Reihe von (3.22) führt zu

$$\tilde{\mathbf{y}}_k \approx \left. \frac{\partial \vec{h}_k(\vec{x}_k)}{\partial \vec{x}_k} \right|_{\vec{x}_k = \bar{\vec{x}}_k} \cdot (\vec{x}_k - \bar{\vec{x}}_k) + \vec{v}_k \quad (3.23)$$

und analog dazu erhält man für den erwarteten Messwertvektor

$$\hat{\mathbf{y}}_k \approx \left. \frac{\partial \vec{h}_k(\vec{x}_k)}{\partial \vec{x}_k} \right|_{\vec{x}_k = \hat{\vec{x}}_k} \cdot (\hat{\vec{x}}_k - \bar{\vec{x}}_k) \quad (3.24)$$

Die Subtraktion der Gleichung (3.23) von (3.24) führt zum Messmodell

$$\Delta \tilde{\mathbf{y}}_k = \left. \frac{\partial \vec{h}_k(\vec{x}_k)}{\partial \vec{x}_k} \right|_{\vec{x}_k = \hat{\vec{x}}_k} \cdot \Delta \vec{x}_k - \vec{v}_k \quad (3.25)$$

des linearisierten Kalman-Filters.

Mit den soeben hergeleiteten Gleichungen (3.20) und (3.25) und den zuvor angeschriebenen Grundgleichungen der Kalman-Filterung erfolgt die Zustandsschätzung eines nichtlinearen Systems. Die Prädiktion des vermuteten Systemzustands erfolgt durch die Lösung des deterministischen Anteils der nichtlinearen Differentialgleichung 3.18. Die Transitionsmatrix (3.9) wird unter Verwendung von (3.21) nur für die Prädiktion der Kovarianzmatrix des Schätzfehlers verwendet. Der zu verarbeitende Messwert

$$\Delta \tilde{\mathbf{y}}_k = \vec{h}_k(\hat{\vec{x}}_k) - \vec{v}_k \quad (3.26)$$

basiert ebenfalls auf Grundlage des nichtlinearen Messmodells. Die Messmatrix  $\mathbf{H}_k$  ergibt sich aus den partiellen Ableitungen nach den Zustandsgrößen zu

$$\mathbf{H}_k = \left. \frac{\partial \vec{h}_k(\vec{x}_k)}{\partial \vec{x}_k} \right|_{\vec{x}_k = \hat{\vec{x}}_k} \quad (3.27)$$

und wird nur zur Berechnung der Kalman-Gain-Matrix (3.13) sowie der a-posteriori-Kovarianzmatrix (3.12) des Schätzfehlers verwendet.

Der vermutete Systemzustand wird nach der Messwertverarbeitung um die geschätzten Fehler korrigiert.

### Erweitertes Kalman-Filter

Während das linearisierte Kalman-Filter nicht direkt den Systemzustand schätzt, sondern den Fehler eines vermuteten Systemzustands schätzt, wird beim erweiterten Kalman-Filter<sup>1</sup> der Systemzustand direkt geschätzt. Für den a-posteriori-Schätzwert ergibt sich beim EKF

$$\hat{\vec{x}}_k^+ = \hat{\vec{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\tilde{y}_k - \vec{h}_k(\hat{\vec{x}}_k^-)) \quad (3.28)$$

wobei  $\vec{h}_k$  wieder den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Messwert und Systemzustand darstellt. Die a-posteriori-Kovarianzmatrix errechnet sich wie bereits beim linearisierten Modell diskutiert analog zu (3.12), wobei wieder die Kalman-Gain-Matrix (3.13) unter Verwendung der Messmatrix  $\mathbf{H}_k$  (3.27). Bei der Prädiktion erfolgt die a-priori-Zustandsschätzung basierend auf dem nichtlinearen Systemmodell:

$$\hat{\vec{x}}_{k+1}^- = \vec{f}(\hat{\vec{x}}_k^+, \vec{u}_k) \quad (3.29)$$

Die a-priori-Kovarianzmatrix wird wie in der Gleichung (3.17) berechnet. Die Transitionsmatrix muss im Zuge dessen aber wie (3.21) zunächst linearisiert werden und erhält die Form

$$\Phi_k = \left. \frac{\partial \vec{f}(\vec{x}_k, \vec{u}_k)}{\partial \vec{x}} \right|_{\vec{x}=\hat{\vec{x}}} \quad (3.30)$$

Abschließend soll noch darauf hingewiesen werden, dass bei zu stark nichtlinearen Systemen die Kalman-Filterung unzureichende Ergebnisse liefern oder gar divergieren kann und Alternativen wie z.B. *Particle Filter* eingesetzt werden sollten (Wendel, 2011).

## 3.6 Realisierung eines EKF für uLFZ

In den vorherigen Kapiteln wurden die verwendeten Sensoren vorgestellt und mit der Kalman-Filterung ein Verfahren beschrieben, das die Fusion der Messdaten der unterschiedlichen Sensoren ermöglicht. In Abhängigkeit davon, welche Form von Messdaten bei der GPS-/IMU-Integration verarbeitet werden, sind verschiedene Ansätze möglich.

*Tightly Coupled Systems* nutzen zur Schätzung direkt Pseudorange- und Deltarange-Messungen des GPS. Obwohl der Integrationsaufwand größer ist als beim später vorgestellten *Loosely Coupled System*, gibt es einen erheblichen Vorteil. Dieses System liefert auch bei weni-

<sup>1</sup>engl.: extended kalman filter; sowohl im Deutschen als auch im Englischen wird die Abkürzung EKF verwendet

ger als vier beobachteten Satelliten zwar eingeschränkte aber doch noch Stützinformationen. Die Varianten *Ultra-Tight Integration* und *Deep Integration* verarbeiten direkt die empfangereigenen Signale. Diese Varianten liefern zwar die höchste Genauigkeit eines Navigationsfilters, durch die sehr aufwändige Implementierung und der Tatsache, dass der Eingriff auf die Signalverarbeitung oft nur den Empfängerherstellern selbst möglich ist, kommt es kaum zur praktischen Umsetzung.

In dieser Diplomarbeit wird ein *Loosley Coupled System* verwendet, das nicht mehr mit den originären GPS-Daten arbeitet, sondern bereits die endgültigen GPS-Positionen bzw. Geschwindigkeiten für die Stützung des Systems nutzt. Die Umsetzung dieser Variante ist gegenüber den zuvor erwähnten verhältnismäßig einfach bzw. gibt es bereits einige Lösungsansätze. Der entscheidende Nachteil ist allerdings, dass die Stützung der Inertialsensordaten durch GPS-Daten bei weniger als vier beobachteten Satelliten nicht mehr funktioniert und die Lösung entsprechend der Güte der Inertialsensoren sich erheblich verschlechtert.

Für die Verarbeitung der Daten wurde ein EKF in Form einer Simulation von (Barton, 2012) verwendet, der im folgenden näher erläutert wird. Es soll vorweg aber noch erwähnt werden, dass der Lösungsansatz in diesem Artikel neben der Zustandsschätzung auf eine tatsächliche Echtzeit-Flugsteuerung im Sinne der im Kapitel 2.4 beschriebenen automatischen Steuerung eines uLFZ abzielt. Das bedeutet, dass bspw. auch Windeinflüsse berücksichtigt werden könnten. Auf den Ansatz der Flugsteuerung wird nicht näher eingegangen, da in dieser Arbeit die Daten nur im Postprocessing ausgewertet werden und somit Echtzeitlösung nicht relevant sind.

Die Simulation von Barton (2012) kann online in Form eines sehr gut kommentierten Matlab-Skripts bezogen werden. Die Struktur der Simulation ist in vier Einheiten unterteilt:

1. Laden von Werte eines fiktiven Fluges (Position, Geschwindigkeit, Orientierung, Drehraten und Beschleunigungen des uLFZ, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftdruck und Luftdichte)
2. verrauschte Messwerte und Biase für die wahren Werte des fiktiven Fluges erzeugen
3. Zustandsschätzung mit den simulierten Messwerten durch ein linearisiertes Kalman-Filter
4. Darstellung der Ergebnisse

Die simulierten Werte werden durch die Messwerte der in dieser Arbeit eingesetzten Sensoren ersetzt. Neben diesen Messwerten könnten in dem Programm auch noch Windgeschwindigkeiten berücksichtigt werden, zur Messung stehen allerdings keine Sensoren (z.B. Pitotrohre) zur Verfügung und werden daher zu Null gesetzt. Das hier verwendete Kalman-Filter setzt

Messwerte an äquidistanten Stützstellen voraus. Dabei kann zwischen den Aufzeichnungsfrequenzen des GPS und der übrigen Sensoren unterschieden werden. Durch eine Interpolation der Messwerte (siehe Kapitel 4.1) an den äquidistanten Stützstellen wird die erforderliche Datenstruktur erreicht. Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG, 2014) stellt Karten für die magnetische Deklination in Österreich zur Verfügung. Im Messgebiet in Herzogenburg beträgt die Deklination  $3,5^\circ$ .

In Abhängigkeit davon, ob 2D- oder 3D-Magnetometerwerte vorhanden sind, kann in dem verwendeten Programm die Zustandsschätzung durch ein EKF mit unterschiedlichen Algorithmen erfolgen. Unabhängig davon, nimmt der zu schätzende Zustandsvektor die Form

$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{x}} = \underbrace{(\hat{\omega}, \hat{\phi}, \hat{\kappa})}_{\text{Lage}}, \underbrace{(\hat{R}\hat{W}, \hat{H}\hat{W}, \hat{H})}_{\text{Position}}, \underbrace{(\hat{v}_{RW}, \hat{v}_{HW}, \hat{v}_H)}_{\text{Geschwindigkeit}}, \underbrace{(\hat{b}_{\omega x}, \hat{b}_{\omega y}, \hat{b}_{\omega z})}_{\text{Biase Gyro}}, \underbrace{(\hat{b}_{ax}, \hat{b}_{ay}, \hat{b}_{az})}_{\text{Biase Accel}})^T \quad (3.31)$$

an. Die darin enthaltenen 15 Differentialgleichungen setzen sich zusammen aus

1. Orientierung: Roll-, Nick- und Gier-Winkel, [deg]
2. Position: Rechtswert (RW), Hochwert (HW), Höhe (H), [m]
3. Geschwindigkeit: Rechtswert, Hochwert, Höhe, [m/s]
4. Biase von Drehraten- und Beschleunigungssensoren in allen Achsrichtungen.

Die zu verwendenden Differentialgleichungen bzw. deren partiellen Ableitungen, die zur Systemmatrix gemäß (3.30) führen, sind bei (Barton, 2012) bzw. im darin referenzierten Matlab-Skript im Detail beschrieben.

Der Messwertvektor setzt sich zusammen aus

$$\vec{y} = \underbrace{(RW, HW, H)}_{\text{GPS-Position}}, \underbrace{(v_{RW}, v_{HW}, v_H)}_{\text{Geschwindigkeit}}, \underbrace{(m_{2D})}_{\text{Mag}})^T \quad (3.32)$$

bestehend aus

1. GPS-Position: Rechtswert, Hochwert, Höhe, [m]
2. Geschwindigkeit: aus GPS-Messung (NED<sup>1</sup>), [m/s]
3. 2D-Magnetometerwerte: bezogen auf geographisch Nord, [deg]

---

<sup>1</sup>North East Down

Die Messwerte  $\vec{a}_{ib}^b(a_x^b, a_y^b, a_z^b)$  des Beschleunigungssensors und  $\vec{\omega}_{ib}^b(\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b)$  des Drehratensensors werden als bekannte Eingangsgrößen  $\vec{u}_k$  eingeführt und somit im Prädiktions-schritt des Filters und nicht im Messschritt verarbeitet. Dadurch lässt sich die Rechenlast ohne merkliche Einbußen in der Performance deutlich reduzieren. Würden die Inertialsensordaten im Messschritt verarbeitet werden, müsste dieser mit der Messfrequenz der Inertialsensordaten, in diesem Fall mit 200Hz, erfolgen. Aufgrund einer Inversion und der Anpassung der Kovarianzmatrix der Zustandsschätzung würde dies zu einer großen Rechenlast führen (Wendel, 2011).

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass in dieser Arbeit die Implementierung einer Kalman-Filterung ursprünglich nicht vorgesehen war, sondern die Verarbeitung der Messwerte für die direkte Georeferenzierung mit den bei (Wieser, 2013) vorgestellten Algorithmen erfolgen sollte. Da eine genaue Untersuchung des Kalman-Filters nicht im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht, sollte hier nur ein kurzer Überblick über das umfangreiche Thema der Kalman-Filterung gegeben werden.

## Kapitel 4

# Datensynchronisation und Systemkalibrierung

In vierten Kapitel wird im Abschnitt 4.1 auf den Vorgang der Datensynchronisation eingegangen. Dabei wird versucht, über das PPS-Signal die aufgezeichneten Rohdaten des *APM2.0* mit der GPS-Zeit des Zweifrequenz-GPS in Verbindung zu bringen. Die Synchronisation ist für die Lösung mit der Kalman-Filterung ein wesentlicher Punkt.

Bevor die ersten Testmessungen mit dem uLFZ durchgeführt werden, werden Kalibrierungsmessungen und Stabilitätsuntersuchungen zur inneren Orientierung vorgenommen. Die theoretischen Grundlagen (Kapitel 4.2.1) zum Kamerasystem werden vor den experimentellen Untersuchungen (Kapitel 4.2.2) im Messlabor der Technischen Universität Wien beschrieben. Zum Zweck der Systemkalibrierung (Kapitel 4.3) und erster Testmessungen (Kapitel 4.3.2) am Messdach der TU Wien wird im Bereich des Innenhofes ein Testfeld mit 32 Passpunkten errichtet.

Im abschließenden Kapitel 4.3.3 wird im Zuge einer *Mounting-Calibration* die geometrische, relative Anordnung der Sensoren zueinander berechnet. Das geschieht durch die Gegenüberstellung der Werte der äußeren Orientierung aus direkt georeferenzierten und indirekt georeferenzierten Aufnahmen.

### 4.1 Datensynchronisation

Die aufgezeichneten Messdaten der Sensoren sollen im Zuge einer Kalman-Filterung gemeinsam verarbeitet werden, wofür eine exakte zeitliche Synchronisation der Daten erforderlich ist. In der Tabelle 4.1 sind die zu synchronisierenden Sensoren sowie deren Messfrequenz und Zeitbasis dargestellt.

Als Basis für die Zeitsynchronisation soll die vom GPS gelieferte absolute GPS-Zeit<sup>1</sup>  $t_{GPS}$  die-

Tabelle 4.1: Auflistung der Sensoren und deren Aufzeichnungsfrequenz und Zeitsysteme.

Sensor	Frequenz [Hz]	Zeitbasis
GPS	5	GPS-Zeit (absolut)
Beschleunigung	200	Mikrocontroller-Zeit (relativ)
Drehrate	200	—    —
Magnetometer	12	—    —
Baromaeter	12	—    —
Kamera	-	—    —

nen und das relative Zeitmaß der internen Mikrocontrollerzeit ( $t'_{APM}$ ) an diese angepasst werden. Es besteht nun die Aufgabe, den gemeinsamen Startpunkt der Aufzeichnungen zu finden sowie den Maßstabsfehler  $m_T$  der internen Mikrocontrollerzeit zu bestimmen.

Der Maßstabsfehler der Mikrocontrollerzeit, der aus der Güte der internen Uhr entsteht, lässt sich einfach über das sehr exakt aufgezeichnete PPS-Signal in den Rohdaten des *APM2.0* berechnen. Die Anzahl der aufgezeichneten PPS-Signale liefert die Zeit in Sekunden während des ersten PPS-Signals zum Zeitpunkt  $t_{PPS_1}$  und dem letzten PPS-Signals ( $t_{PPS_n}$ ). Die Division mit der Zeitdifferenz zwischen erstem und letztem Eintrag des PPS-Signals, bezogen auf die interne Mikrocontrollerzeit  $t'_{APM}$ , ergibt den Skalierungsfaktor  $m_T$  der zur angepassten internen Mikrocontrollerzeit  $t_{APM}$  führt:

$$m_T = \frac{t_{PPS_n} - t_{PPS_1}}{\Sigma PPS + \Delta_{PPS}} \quad (4.1)$$

Hier ist jedoch darauf zu achten, dass auch tatsächlich jede Sekunde ein PPS-Signal aufgezeichnet wird. Das lässt sich leicht durch eine Zeitdifferenzbildung der aneinander folgenden, aufgezeichneten Epochen ermitteln. Die Summe der fehlenden Einträge  $\Delta_{PPS}$  müssen zur Bestimmung des Maßstabs berücksichtigt werden.

Um den synchronen Zeitpunkt in den Messdaten des *APM2.0* und in den Messdaten des GPS zu finden, wird auf die GPS-Zeit zurückgegriffen. In beiden Messdaten-Files werden die Epochen mit einer Frequenz von 5Hz aufgezeichnet und beinhalten u.a. die Angaben zu Jahr, Monat, Tag, Stunde, Minute und Sekunde. In der Abbildung 4.1 ist graphisch das Prinzip der Synchronisierung dargestellt.

Das relevante Zeitintervall  $\Delta t$  wird durch die erste GPS-Position zum Zeitpunkt  $t_A$  und der Letzten zum Zeitpunkt  $t_E$  festgelegt. Die zugehörigen Mikrocontrollerzeiten  $t'_A$  und  $t'_E$  kön-

<sup>1</sup>Die GPS-Zeit setzt sich zusammen aus der koordinierten Weltzeit (UTC) und einen Offset (aktuell von 16 s seit 1. Juli 2012) der sich auf Grund von Schaltsekunden seit dem Start der GPS-Zeit am 1. Jänner 1980 ergibt

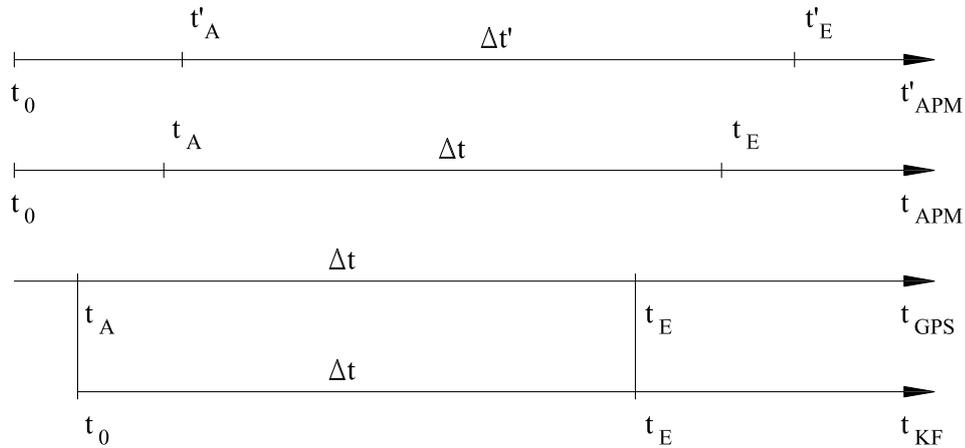


Abbildung 4.1: Zusammenhang der Zeitsysteme von GPS ( $t_{GPS}$ ) und dem Mikrokontroller des APM2.0 ( $t_{APM}$ ). Über die in beiden Messdaten-Files enthaltene GPS-Zeit ist die Synchronisierung der beiden Zeitsysteme möglich. Der Skalierungsfaktor für die Mikrokontrollerzeit lässt sich entweder über das PPS-Signal oder dem Verhältnis zwischen  $\Delta t'$  und  $\Delta t$  ableiten. Für die Auswertung mit der Kalman-Filterung wird auf eine relative Zeitangabe ( $t_{KF}$ ) übergegangen.

nen damit im Messdaten-File des APM2.0 bestimmt werden (Abb. 4.3) und deren Differenz führen zu  $\Delta t'$ . An dieser Stelle sei anzumerken, dass der Skalierungsfaktor  $m_T$  auch gemäß

$$m_T = \frac{t'_E - t'_A}{t_E - t_A} = \frac{\Delta t'}{\Delta t} \quad (4.2)$$

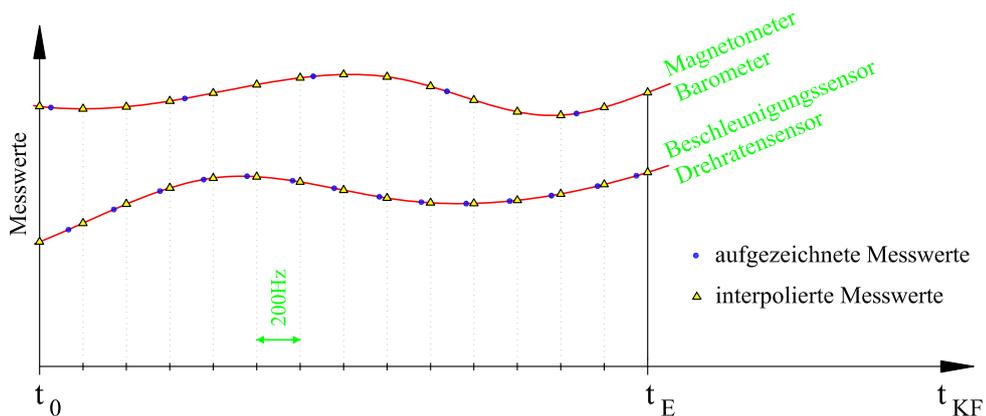


Abbildung 4.2: Das in dieser Arbeit verwendete Kalman-Filter benötigt Messwerte der IMU-Sensoren an äquidistanten Stützstellen. Das wird durch Interpolation der Messwerte von Beschleunigungs- und Drehratensensor sowie Magnetometer und Barometer erreicht.

bestimmt werden kann.

		Mikrocontroller-Zeit									
Rohdatenfile des APM2.0	i	1758554052	-259	-33	-5596	72	89	117	-10650		
	i	1758558980	-257	-74	-5667	81	96	126	-10648		
	i	1758563912	-282	-99	-5739	88	104	132	-10650		
	i	1758568840	-308	-114	-5798	96	110	136	-10654		
	g	1758573940	48.1961700	16.3692160	168.450000	0.580000	266.769990	8	3	95259000	230114
	i	1758573772	-308	-125	-5870	102	114	136	-10652		
	i	1758586264	-370	-125	-5916	107	113	135	-10652		
	i	1758591196	-433	-104	-5944	110	103	135	-10647		
	i	1758596124	-466	-99	-5990	111	93	139	-10648		
											GPS-Zeit
Observation-File des GPS		20616940.848	108342758.03449		1584.819	20616942.521	84422938.89547				
		1234.922									
		21236450.668	111598290.58349		-2523.522	21236452.805	86959711.53747				
		-1966.387									
		14	1	23	9	52	59.0000000	0	9G	1G19G17G31G14G23G32G20G11	
		20201191.015	106157971.57349		-399.659	20201195.879	82720514.48848				
		-311.426									
		25035030.558	131559939.72546		-3778.886	25035033.117	102514239.23045				
		-2944.593									

Abbildung 4.3: Sowohl im Rohdatenfile des APM2.0 (oben) als auch im Rohdatenfile des GPS (unten) ist die GPS-Zeit enthalten. Mit ihr ist die zeitliche Synchronisation der beiden Messfiles möglich, d.h. der Zusammenhang zwischen GPS-Zeit und Mikrocontroller-Zeit kann hergestellt werden.

Das später eingesetzte Kalman-Filter erfordert eine relative Zeitangabe  $t_{KF}$  in Sekunden mit dem Startzeitpunkt  $t_0 = 0$ . Das bedeutet, dass die die synchronen Zeitpunkte  $t_A$  der GPS-Zeit und der Mikrocontrollerzeit gleich Null gesetzt werden.

Im Hinblick auf die Berechnungen mit der Kalman-Filterung ist eine der unterschiedlichen Frequenzen entsprechende geordnete Datenstruktur zu erarbeiten. Dies geschieht durch die Interpolation der Messwerte der IMU-Sensoren an äquidistanten Stützstellen in 200Hz-Schritten, beginnend bei  $t_{KF} = 0$  (Abb. 4.2). Die Messwerte von Beschleunigungs- und Drehratensensor sind zwar in 200Hz-Schritten vorhanden, der erste Messwert fällt jedoch nicht exakt mit dem gewählten Zeitpunkt  $t_{KF} = 0$  zusammen. In der Abbildung 4.3 ist das zu erkennen. Angenommen der Zeitpunkt 9:52:59 der GPS-Zeit bzw. 1758573940 der Mikrocontrollerzeit wird zu  $t_{KF} = 0$  gesetzt, so liegt dieser Zeitpunkt zwischen zwei Messwerten der IMU (Buchstabe *i* in der ersten Spalte - vgl. Kapitel 3.4). Auch die Messwerte des Magnetometers und des Barometers von ursprünglich 12Hz müssen dementsprechend an 200Hz-Schritten interpoliert werden.

## 4.2 Kamerakalibrierung

Im Kapitel 4.2 werden zunächst die photogrammetrischen Grundlagen für die Kalibrierung der eingesetzten Kamera vorgestellt. Die Kalibrierung der Kamera und die Untersuchungen zur Stabilität der inneren Orientierung werden im Kapitel 4.2.2 beschrieben.

### 4.2.1 Photogrammetrische Grundlagen

Wird ein fehlerfreies Kamerasystem vorausgesetzt, kann die Abbildung eines Objektes in die Bildebene einer Kamera als Zentralprojektion angesehen werden (Abb. 4.4). Der vom Projektionszentrum  $P_0 (X_0, Y_0, Z_0)$  der Kamera ausgehende Projektionsstrahl zum Objektpunkt  $P (X_p, Y_p, Z_p)$  im übergeordneten Koordinatensystem durchstößt die Bildebene einer Messkamera bezogen auf das Bildkoordinatensystem im Punkt  $p (x_p, y_p, z_p=0)$ . Der Bildhauptpunkt  $H (x_0, y_0)$  und die Kamerakonstante  $c$  (entspricht  $z_0$ ) definieren das Projektionszentrum bezogen auf das Bildkoordinatensystem (Kraus, 2004).

Den mathematischen Zusammenhang zwischen Bild- und Objektpunkt bildet die Kollinea-

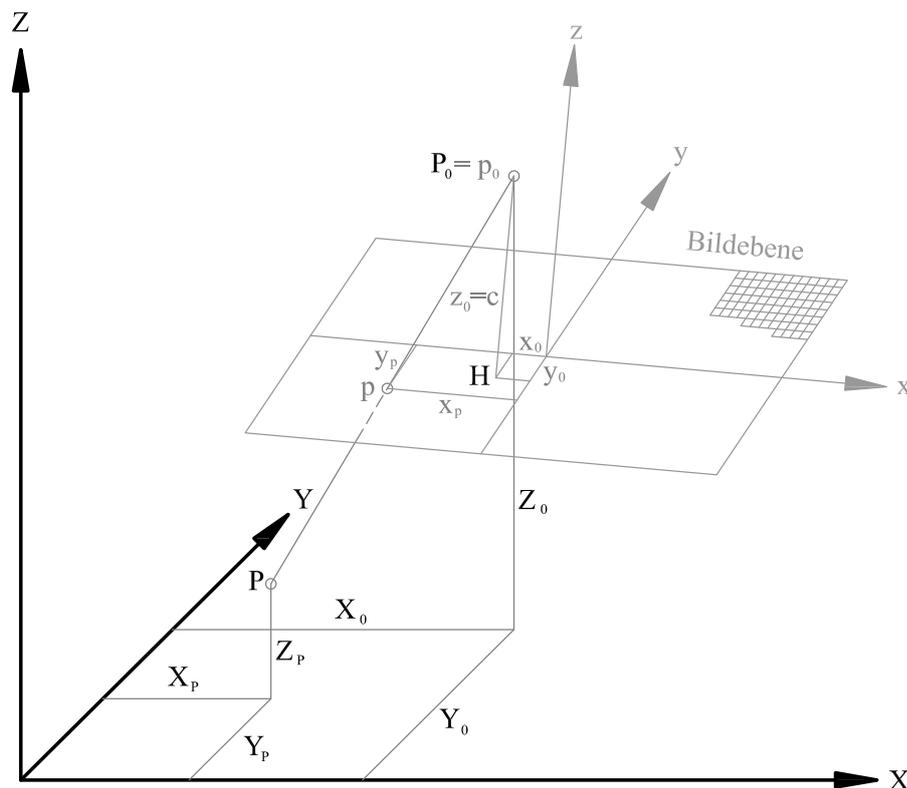


Abbildung 4.4: Zentralprojektion - Zusammenhang zwischen Bild- und Objektpunkt

ritätsbeziehung, die aus einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation abgeleitet wird (Gleichung (4.3) und (4.4)).

$$x = \bar{x} + v_x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (4.3)$$

$$y = \bar{y} + v_y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (4.4)$$

Die Elemente  $x_0$ ,  $y_0$  und  $c$  definieren die innere Orientierung, die drei Drehwinkel  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$  aus der Rotationsmatrix und die Objektkoordinaten des Projektionszentrums  $P_0$  ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ) die äußere Orientierung. Die Transformation der Objektkoordinaten in Bildkoordinaten und umgekehrt mit den Formeln (4.3) und (4.4) setzt die Kenntnis der Parameter der inneren und äußeren Orientierung voraus.

#### 4.2.1.1 Parameter der inneren Orientierung

Die Parameter der inneren Orientierung legen das Projektionszentrum in Bezug auf das kamerafeste Bildkoordinatensystem fest, welches durch die Bildebene und das Objektiv mit dem Projektionszentrum realisiert wird. Der Idealfall eines vollkommen symmetrischen und zentrierten Linsensystem in einem Objektiv wird praktisch nie zur Genüge erfüllt und führt dazu, dass die objektseitigen Einfallswinkel  $\tau$  nicht gleich den bildseitigen Ausfallswinkel  $\tau'$  sind und ein Objektpunkt  $P$  um den Versatz  $\Delta r$ , die radiale optische Verzeichnung, in der Bildebene im Punkt  $p_k$  abgebildet wird (Abb. 4.5 nach (Kraus, 2004)).

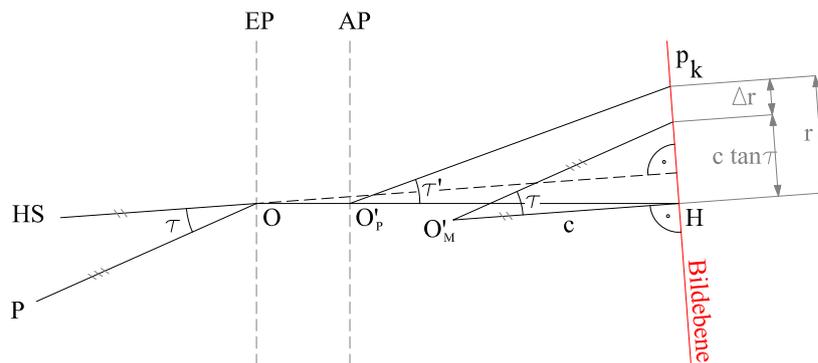


Abbildung 4.5: Strahlengang durch das Objektiv mit geneigter Bildebene nach Kraus (2004). Eine detaillierte Beschreibung dazu ist im Text zu finden.

Das objektseitige Projektionszentrum  $O$  in der Mitte der Eintrittspupille (EP) und das bildseitige Projektionszentrum  $O'_p$  in der Mitte der Austrittspupille (AP) definieren die optische



## 4.2.1.2 Abbildungsfehler

Zusätzlich zur radial-symmetrischen Verzeichnung wirkt auch noch die radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung, deren Ursache Zentrierfehler des Linsensystems sind. Bei Qualitätsobjektiven ist der Anteil wesentlich geringer als der radial-symmetrische und kann in den meisten Fällen vernachlässigt werden, während er speziell bei Amateurkameras berücksichtigt werden sollte (Luhmann, 2010). Die Abbildungsfehler werden in Form von Korrekturfunktionen in Abhängigkeit der Bildkoordinaten  $x_p, y_p$  ausgedrückt. Dafür stehen standardisierte Funktionen in Form von Polynomen zur Verfügung. In Tab. 4.2 sind die für die im Abschnitt 4.2.2 verwendeten Polynome aufgelistet (Kager *et al.*, 2002).

Tabelle 4.2: Verzeichnungsparameter

$i$	$dx_{0i}(x_n, y_n)$	$dy_{0i}(x_n, y_n)$	Bedeutung
3	$x_n(r^2 - 1)$	$y_n(r^2 - 1)$	Radiale Verzeichnung 3. Grades
4	$x_n(r^4 - 1)$	$y_n(r^4 - 1)$	Radiale Verzeichnung 5. Grades
5	$r^2 + 2x_n^2$	$2x_n y_n$	Tangentiale asymmetrische Verzeichnung
6	$2x_n y_n$	$r^2 + 2y_n^2$	Tangentiale asymmetrische Verzeichnung
7	$x_n(r^6 - 1)$	$y_n(r^6 - 1)$	Radiale Verzeichnung 7. Grades

Die Verzeichnungspolynome aus Tabelle (4.2) werden als Funktion des Bildpunktes  $p$  in den Kollinearitätsbeziehungen ((4.3),(4.4)) formal als Translation ( $dx, dy$ ) des Bildhauptpunktes  $H$  berücksichtigt. Die Substitution des Bildhauptpunktes erfolgt mit den Formeln:

$$x_0 = x_0 + dx(x_n, y_n) = x_0 + \sum_i a_i dx_{0i}(x_n, y_n) \quad (4.6)$$

$$y_0 = y_0 + dy(x_n, y_n) = y_0 + \sum_i a_i dy_{0i}(x_n, y_n) \quad (4.7)$$

Für die Berechnung der Polynome aus der Tabelle (4.2) müssen die Bildpunkte  $p$  entsprechend Formel (4.5) zunächst um den Bildhauptpunkt reduziert und in weiterer Folge mit dem Radius  $\rho_0$  normalisiert werden (Kager *et al.*, 2002).

$$x_n = \frac{(x_p - x_0)}{\rho_0} \quad (4.8)$$

$$y_n = \frac{(y_p - y_0)}{\rho_0} \quad (4.9)$$

$$r^2 = x_n^2 + y_n^2 \quad (4.10)$$

Die konstante Größe  $\rho_0$  wird typischerweise mit  $2/3$  der halben Bilddiagonale angenommen. Das hat zur Folge, dass die Verzeichnungswerte vom Bildhauptpunkt weg zunehmen, es beim radialen Abstand  $\rho_0$  wieder einen Nulldurchgang gibt und die Werte danach wieder zunehmen. Die minimalen und maximalen Verzeichnungswerte nehmen dadurch in etwa die gleichen Beträge an (*balanced radial distortion*). Die Normalisierung bewirkt eine Veränderung der Kamerakonstante  $c$  derart, dass der Abbildungsprozess bei Nichtberücksichtigung der Verzeichnung besser beschrieben wird.

Der endgültig anzubringende Abbildungsfehler  $\Delta \mathbf{r}$  setzt sich entsprechend der Formeln (4.6) und (4.7) aus der Summe aller einzelnen Verzeichnungsparameter zusammen. Die Bestimmung der Elemente der inneren Orientierung durch eine Kamerakalibrierung wird im Folgenden diskutiert.

#### 4.2.1.3 Kalibrierungsmethoden

Für die Auswertung von Bild- oder Objektpunkten entsprechend der Kollinearitätsbeziehungen mit den Gleichungen (4.3) und (4.4) werden die Elemente der inneren Orientierung als bekannt und auch konstant vorausgesetzt. Die Annahme einer konstanten inneren Orientierung ist jedoch selbst bei speziellen Aufnahmesystemen wie Messkameras nur bedingt gültig. Kommen Teilmesskameras oder gar Amateurkameras zum Einsatz, muss in jedem Fall mit Veränderungen der inneren Orientierung mit der Zeit gerechnet werden (Luhmann, 2010).

Für die Bestimmung der Elemente der inneren Orientierung kommen folgende Kalibrierverfahren zum Einsatz:

- Laborkalibrierung
- Testfeldkalibrierung
- Simultankalibrierung

Die sehr aufwendige Laborkalibrierung wird prinzipiell nur für hochwertige Messkameras verwendet, bei denen von einer über längere Zeit hinweg stabilen inneren Orientierung ausgegangen wird. Bei der Laborkalibrierung kommen optische Goniometer zum Einsatz, die

das Prinzip der Autokollimation für die Bestimmung der Elemente nutzen (Kraus, 2004).

Bei der Testfeldkalibrierung wird formatfüllend ein Bereich mit koordinativ bekannten Objektpunkten  $P_i$  von unterschiedlichen Positionen aus und mit möglichst guten Schnittbedingungen aufgenommen. Wenn es die örtlichen Gegebenheiten erlauben, sind räumlich ausgedehnte Passpunktfelder zu bevorzugen, da dadurch die Zuverlässigkeit gesteigert werden kann. Nach der Messung der Objektpunkte in den Bildern, werden die Elemente der inneren Orientierung im Zuge einer Bündelblockausgleichung als zusätzliche Parameter eingeführt und mitgeschätzt. Für die Verzeichnungsparameter (Tab.4.2) erhält man die geschätzten Polynomkoeffizienten  $a_i$  ((4.6), (4.7)).

Testfeldkalibrierungen werden dann durchgeführt, wenn die eingesetzte Kamera im Hinblick auf die Stabilität der inneren Orientierung untersucht werden soll, oder eine Simultankalibrierung im Zuge einer Projektauswertung nicht möglich ist.

Sind bei einer photogrammetrischen Bildauswertung höchste Genauigkeitsansprüche gestellt, so ist die Simultankalibrierung (on-the-job-calibration) unbedingt erforderlich. Die Simultankalibrierung unterscheidet sich kaum von der Testfeldkalibrierung. Anstatt eines künstlich angelegten Passpunktfeld wird das zu rekonstruierende Interessensobjekt für die Kalibrierung genutzt. Die Kalibrierung und die Rekonstruktion erfolgen hierbei simultan. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die Bestimmung der inneren Orientierung exakt zum Zeitpunkt der Aufnahme des Interessensobjekts.

#### 4.2.2 Experimentelle Untersuchung der eingesetzten Kamera

Für die Aufnahme des im Kapitel 5.1 vorgestellten Objektes kommt die Systemkamera *Ricoh GXR A12* zum Einsatz (Ricoh Company Ltd., 2013). Untersuchungen zur Stabilität der inneren Orientierung wurden bereits von (Peipe *et al.*, 2010) durchgeführt. Die Kamera besteht aus dem Basisgehäuse und kann mit unterschiedlichen Aufnahmemodulen verbunden werden (Abb. 4.7). Jedes Aufnahmemodel besteht aus einem Objektiv mit geeignetem Bildsensor und einem Bildprozessor. In der Tabelle (4.3) sind die wesentlichen technischen Spezifikation der Kamera angeführt.

Da Bildsensor und Objektiv in einem Modul vereint sind, liegt die Vermutung nahe, dass im Gegensatz zu Kameras, wo Objektiv und Bildsensor in unterschiedlichen Bauteilen platziert sind, die innere Orientierung verhältnismäßig stabil ist. Diese Annahme soll anhand einer Testfeldkalibrierung untersucht werden.

Die Kalibrierung fand im Messkeller der Technischen Universität Wien statt (vgl. Abb. 4.8). Auf einer räumlichen Ausdehnung von etwa  $6,3 \times 5,7 \times 3,3\text{m}^3$  sind etwa 60 retroreflektierende Passpunktmarken angebracht. Die Koordinaten der Passmarken sind mit einer einfachen Standardabweichung von 1mm bestimmt.



Abbildung 4.7: Eingesetzte Systemkamera Ricoh GXR. Die Kamera setzt sich aus einem Basisgehäuse und unterschiedlichen Aufnahmemodulen, bestehend aus Objektiv und eigenem Bildsensor, zusammen. (Quelle: www.chip.de)

Tabelle 4.3: Kameraspezifikationen

<i>Merkmal</i>	<i>Spezifikation</i>
Bildsensor	CMOS <sup>1</sup> 23,6 x 15,7mm (ca. 12,9 Mio. Pixel)
Brennweite	18,3mm (entspricht 28mm bei Kleinbildkameras)
Dateiformat	RAW <sup>2</sup> (als DNG <sup>3</sup> gespeichert), JPEG <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Complementary Metal Oxide Semiconductor, Bezeichnung für Halbleiterbauelemente

<sup>2</sup> Rohdatenformat

<sup>3</sup> Digitales Negativ

<sup>4</sup> Joint Photographic Experts Group

Um die Stabilität der inneren Orientierung zu untersuchen, wurde das Passpunktfeld in unterschiedlichen Kameraausrichtungen und mehreren Serien zu je fünf Fotos abgebildet (Abb. 4.9). Das Schütteln der Kamera zwischen den einzelnen Serien sollte systematisch-mechanische Effekte beseitigen. Die ersten Bilder wurden mit einer Belichtungszeit von 1/50 und einer Blendenzahl von 2,5 aufgenommen. Mit diesen Einstellungen sind die Belichtung und die Tiefenschärfe nicht optimal, die Bilder werden zu verschwommen abgebildet um eine genaue Bildmessung durchführen zu können. Im zweiten Durchlauf wurde die Belichtungszeit auf 1/125 herabgesetzt und die Blendenzahl auf 16 erhöht, wodurch dunkle, aber scharfe Bilder entstanden. Durch Zuschalten des Blitzes wurden die retroreflektierenden Passmarken für die Detektion genügend hell abgebildet .

Die Tabelle (4.4) enthält die unterschiedlichen Aufnahmekonstellation sowie die Summe der



Abbildung 4.8: Das Passpunktfeld im Messkeller der TU Wien umfasst ca. 60 retroreflektierende Passmarken. Die räumlichen Ausdehnung beträgt etwa  $6,3 \times 5,7 \times 3,3\text{m}^3$ .

Tabelle 4.4: Aufnahmekonstellationen (vgl. Abb. 4.9)

<i>Serie</i>	<i>Ausrichtung</i>	<i>Serienanzahl</i>	<i>Bildanzahl (Summe)</i>
A1 bis A3	$0^\circ$	3	15
B1 und B2	$180^\circ$	2	10
C	$90^\circ$	1	5
D	$270^\circ$	1	5
<b>Summe</b>		<b>7</b>	<b>35</b>

Serien und Bilder, die für die Kamerakalibrierung herangezogen wurden.

Die Berechnung der Bündelblockausgleichung erfolgte mit dem Programm Orpheus/Orient (Kager *et al.*, 2002). Die Vorgehensweise bei der Auswertung erfolgt anhand der folgenden Schritte:

1. Passpunkte und Näherungswerte für die innere Orientierung laden
2. Bildmessung der Passpunkte in allen Bildern
3. Näherungswerte für die äußere Orientierung berechnen
4. Alle zusätzlichen Parameter (Verzeichnung) als freie Parameter setzen
5. Bündelblockausgleichung

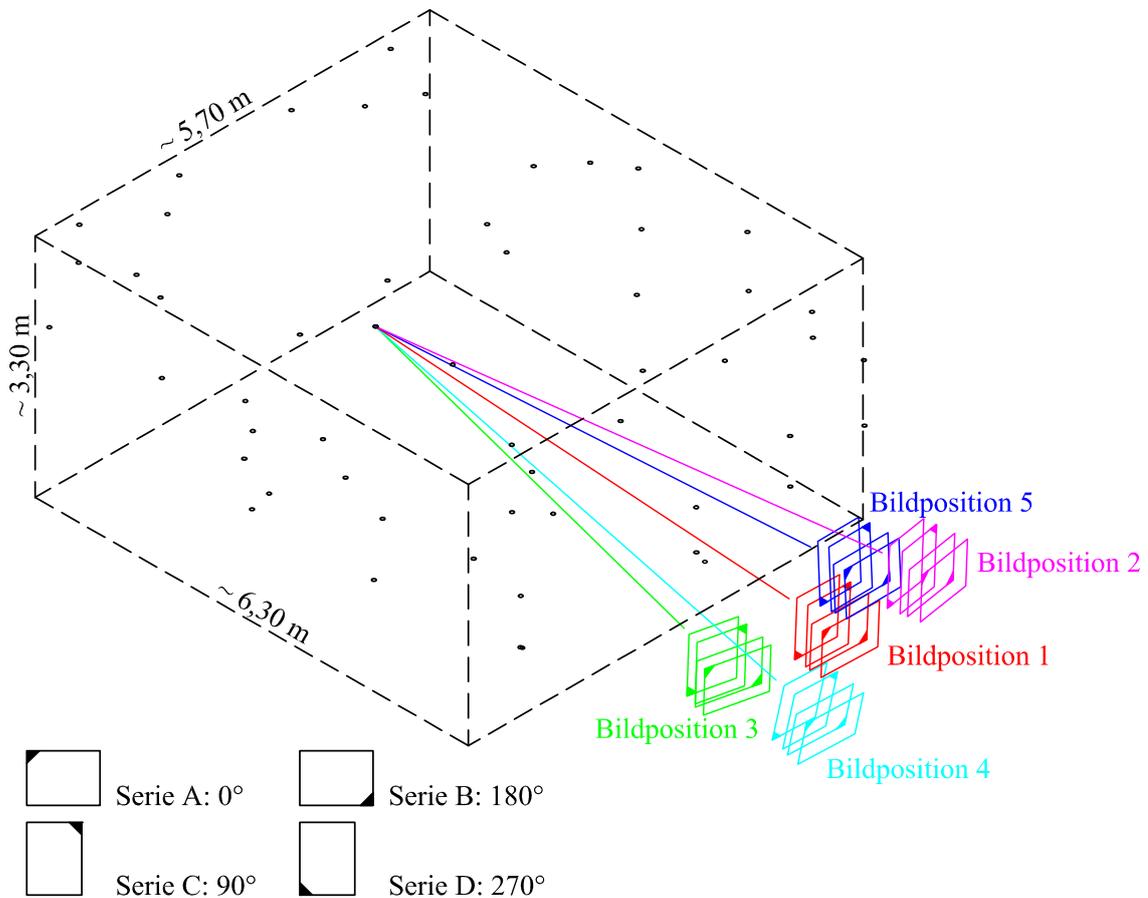


Abbildung 4.9: Darstellung der Aufnahmekonstellationen im Messlabor der TU Wien. Je Serie mit unterschiedlichen Ausrichtungen wurden fünf Aufnahmen von unterschiedlichen Positionen aus erstellt. Die Abstände zwischen Kamera und Passpunkte beträgt 2,50 - 8,80 m.

## 6. Analyse des Ausgleichungsergebnis und ggf. Anpassungen durchführen

Zunächst wurde jede der sieben Serien individuell ausgewertet. Die Bestimmung der inneren Orientierung erfolgte gesondert für jedes Bild. Im ersten Schritt der Ausgleichung wurden die fünf Parameter aus Tab. (4.2) als freie Parameter gesetzt. Die Bündelblockausgleichung lieferte nur für die Polynomkoeffizienten  $a_3$  und  $a_7$  signifikante Werte, die Schätzung aller übrigen Verzeichnungsparameter wurde daher als nicht notwendig erachtet. Das zeigen auch die aus der Varianzkomponentenschätzung erhaltenen Bildmessgenauigkeiten, welche sich am maximalsten bei der Serie D von  $\sigma_B=0,195\text{px}$  ( $a_3$ - $a_7$ ) auf  $\sigma_B=0,206\text{px}$  ( $a_3$ ,  $a_7$ ) verändern.

In der Tabelle (4.5) sind die Streuungen der Elemente der inneren Orientierung innerhalb einer Serie sowie die aus den Summen der Serien A1-A3 und B1-B2 aufgelistet. Die letzte

Zeile der Tabelle zeigt die Mittelwerte aus allen Serien.

Tabelle 4.5: Ausgleichungsergebnisse der individuellen Serien, angegeben in Pixel.

<i>Serie</i>	$\bar{x}_0$	$\sigma_x$	$\bar{y}_0$	$\sigma_y$	$\bar{c}_0$	$\sigma_c$	$a_3$	$\sigma_{a_3}$	$a_{37}$	$\sigma_{a_{37}}$
A1	1853,2	0,3	-1402,7	0,6	3308,0	0,7	-17,00	0,26	1,25	0,05
A2	1851,7	0,3	-1404,2	0,9	3307,4	0,7	-17,17	0,22	1,19	0,04
A3	1851,3	0,3	-1403,8	0,8	3307,7	0,6	-17,10	0,21	1,17	0,04
<b>Summe A</b>	<b>1852,1</b>	<b>0,9</b>	<b>-1403,6</b>	<b>1,0</b>	<b>3307,7</b>	<b>0,6</b>				
B1	1854,7	0,8	-1411,6	1,4	3307,0	1,3	-17,26	0,21	1,19	0,04
B2	1857,6	0,3	-1411,0	0,6	3306,2	0,7	-17,81	0,23	1,35	0,05
<b>Summe B</b>	<b>1856,2</b>	<b>1,6</b>	<b>-1411,3</b>	<b>1,1</b>	<b>3306,6</b>	<b>1,1</b>				
<b>C</b>	<b>1861,6</b>	<b>0,8</b>	<b>-1406,9</b>	<b>0,9</b>	<b>3307,6</b>	<b>0,6</b>	<b>-16,67</b>	<b>0,20</b>	<b>1,10</b>	<b>0,04</b>
<b>D</b>	<b>1850,5</b>	<b>2,7</b>	<b>-1405,3</b>	<b>1,1</b>	<b>3306,1</b>	<b>0,7</b>	<b>-17,12</b>	<b>0,22</b>	<b>1,21</b>	<b>0,06</b>
<b>Summe A-D</b>	<b>1854,4</b>	<b>3,9</b>	<b>-1406,5</b>	<b>3,4</b>	<b>3307,2</b>	<b>1,0</b>				

Die Mittelwerte der Bildhauptpunkte variieren in x um bis zu 11 Pixel, in y um bis zu 8,9 Pixel. Die transparenten Rechtecke der Serien A bis D machen eine Systematik in Abhängigkeit der Kameraausrichtung deutlich, d.h. bei horizontalen Aufnahmen sollte für jede Kamerastellung ein individueller Parametersatz verwendet werden (vgl. Abb. 4.11).

Im zweiten Auswerteschritt wurden alle Serien zu einem Gesamtprojekt zusammengefasst und gemeinsam ausgewertet (graue Rechtecke). Hier wurde wie in der ersten Auswertung zunächst für jedes Bild eine individuelle innere Orientierung geschätzt. Die größeren Differenzen der Hauptpunktlagen führen dazu, dass die Polynomkoeffizienten  $a_5$  und  $a_6$  der tangentialen Verzeichnung, welche stark mit den Bildhauptpunktkoordinaten korreliert sind, neben den Polynomkoeffizienten  $a_3$  und  $a_7$  signifikante Werte annehmen und berücksichtigt werden müssen. Die Berücksichtigung der tangentialen Verzeichnung führt zu einer Verschiebung der Bildhauptpunkte. Die gleichmäßige Verschiebung zwischen den individuellen Bildhauptpunkten ist anhand des Vektors  $\Delta d$  zwischen den Mittelwerten der Bildhauptpunkte aus beiden Auswertungen exemplarisch dargestellt (Abb. 4.11). Die Varianzkomponentenanalyse ergab für die Bildmessgenauigkeit einen Wert von  $\sigma_B=0,18\text{px}$ , also in etwa die selbe Größenordnung wie bei der getrennten Auswertung der einzelnen Serien.

Die Abbildung 4.11 zeigt die Variation der Kamerakonstante  $c$  bezogen auf deren Median. Eine Systematik lässt sich dabei nicht feststellen. Glira (2012) zeigt in einer Fehlerabschätzung, wie sich die Streuung der Kamerakonstante bei unterschiedlichen Basis-Höhen-Verhältnis auf die Genauigkeit der Objektpunkte auswirkt. Bei ungünstigen Schnittbedingungen und einem  $\sigma_c$  von  $1,6\text{px}$  kann es in der Höhe zu Genauigkeitseinbußen von einigen dm, in der Lage von bis zu 10cm kommen.

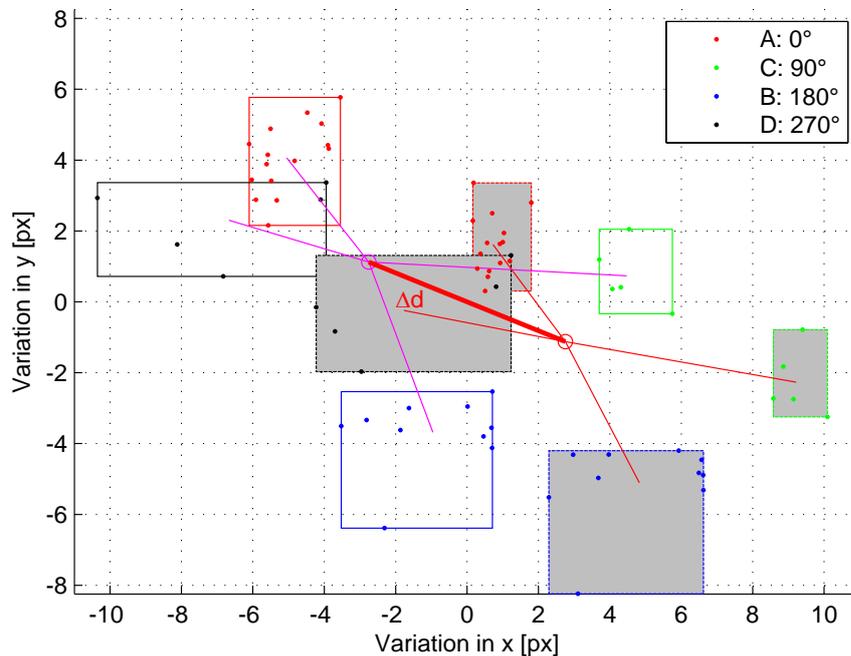


Abbildung 4.10: Variation der Bildhauptpunktskoordinaten.

Abschließend wurde für das Gesamtprojekt noch eine Auswertung mit einem gemeinsamen Parametersatz durchgeführt. Die Tabelle (4.6) zeigt die Ergebnisse der geschätzten sieben Parameter. Diese weichen nur geringfügig von den Mittelwerten aus den individuell geschätzten Parameter je Bild ab (Vergleich Tab. (4.5)). Die Varianzkomponentenanalyse ergab für diese Auswertung eine Bildmessgenauigkeit von  $\sigma_B=0,21$ , also eine geringfügige Verschlechterung gegenüber der Auswertung mit den individuellen Parametern je Bild.

Der Einfluss der Verzeichnungsparameter auf ein Bild ist in der Abbildung (4.12) für die Werte aus der Tabelle (4.6) dargestellt. Die Vektoren der Verzeichnungskorrektur sind mit dem Faktor 10 skaliert.

Das Problem bei dieser Testfeldkalibrierung ist die Tatsache, dass sämtliche Aufnahmen in horizontaler Richtung erfolgten. Bei der konkreten Aufgabenstellung werden aber ausschließlich Senkrechtaufnahmen erstellt, eine Simultankalibrierung ist daher auf jeden Fall erforderlich.

### 4.3 Systemkalibrierung

Die direkte Georeferenzierung, d.h. die Bestimmung der Elemente der äußeren Orientierung von Bildern unter Verwendung von zusätzlichen Sensoren setzt eine korrekte Kalibrierung des gesamten Systems, bestehend aus Kamera, GPS-Sensor und IMU, voraus. Die Bestimmung der geometrischen Anordnung der Sensoren zueinander ist das Ziel die-

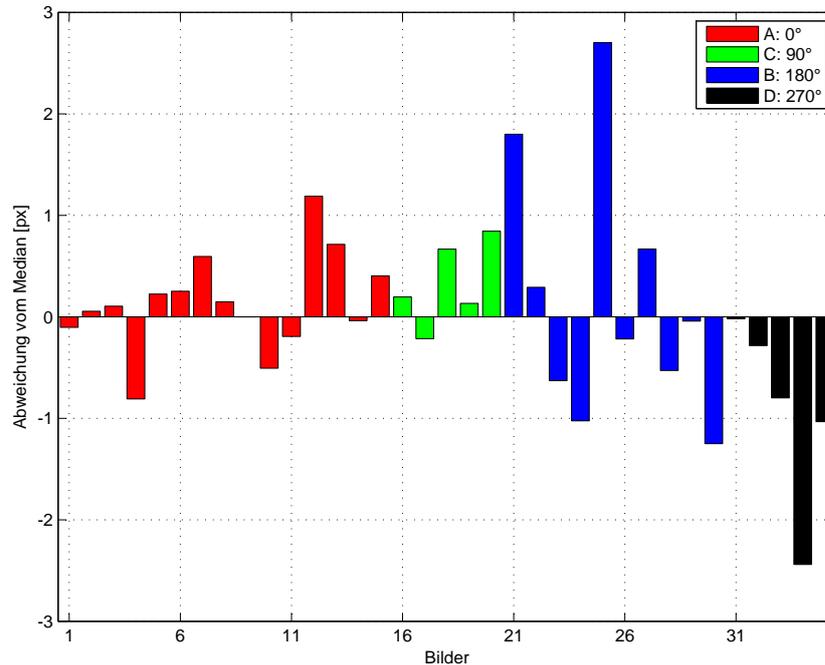


Abbildung 4.11: Variation der Kamerakonstante bezogen auf den Median.

ses Kalibrierungsprozesses. Konkret müssen die Ursprünge und die Achsausrichtungen der Sensor-Koordinatensysteme von GPS, IMU und Kamera in Bezug gesetzt werden. Nach (Cramer & Stallmann, 2002) ist die Systemkalibrierung der kritischste Faktor der direkten Georeferenzierung im Hinblick auf die erreichbaren Objektpunktgenauigkeiten, da systematische Fehlereinflüsse, die im Zuge der Kalibrierung nicht berücksichtigt werden, extrapolierend auf die Objektpunkte wirken.

Eine Möglichkeit der Systemkalibrierung ist der Vergleich zwischen den direkt gemessenen Elementen der äußeren Orientierung aus GPS und IMU mit den geschätzten Elementen, die mittels Passpunkte und einer Bündelblockausgleichung im Sinne einer indirekten Georeferenzierung berechnet werden.

### 4.3.1 Passpunktfeld

Für den Zweck der Systemkalibrierung wurde im Innenhof der TU Wien ein eigenes Passpunktfeld errichtet. Auf einer räumlichen Ausdehnung  $30 \times 30 \times 25\text{m}^3$  sollen ca. 40 Passmarken angebracht bzw. eindeutig definierte Punkte ausgewählt werden. Die Standardabweichungen der Passpunktkoordinaten sollen in Lage und Höhe  $< 5\text{mm}$  betragen. Um a-priori die erreichbare Genauigkeit der Passpunktkoordinaten abschätzen zu können, wurde eine Simulation der geplanten tachymetrischen Vermessung durchgeführt.

Tabelle 4.6: Ausgleichungsergebnis des Gesamtprojekts mit einem Parametersatz.

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>	$\sigma$
$x_0[\text{px}]$	1860,58	0,31
$y_0[\text{px}]$	-1409,29	0,20
$c[\text{px}]$	3306,78	0,30
a3	-17,06	0,08
a5	0,43	0,02
a6	-0,12	0,02
a7	-1,23	0,02

### Netzdesign und Simulation

Ausgehend von den im Landessystem koordinativ bekannten Messpfeilern am Dach der TU Wien sollen Passmarken am Rand des Messdaches, auf Fensterbänken im 3. Stock, am Dachrand eines Hörsaals im Innenhof und am Boden angebracht bzw. ausgewählt werden. Um redundante Messungen zu jedem Punkt zu erhalten, sind drei Standpunkte erforderlich. Für die Vermessung soll die Totalstation „TCRP 1201+“ von Leica eingesetzt werden. Dem technischen Datenblatt sind für diese Totalstation folgende Eigenschaften zu entnehmen (Leica Geosystems AG, 2009):

- Winkelmessgenauigkeit (Hz,  $V^1$ ): 1-(0,3 mgon)
- Distanzmessgenauigkeit: 1 mm + 1,5 ppm
- Zentriergenauigkeit: 1,5 mm bei 1,5 m Instrumentenhöhe

Um ein homogenes, spannungsfreies Netz zu erhalten, muss eine freie 3D-Netzausgleichung durchgeführt werden. Alle Punkte des Netzes -auch die koordinativ bekannten Messpfeiler- werden dabei als Neupunkte betrachtet. Die Lagerung des Netzes erfolgt über die Näherungskordinaten aller Punkte (Gesamtspurminimierung) oder nur über bestimmte Punkte, wie in diesem Fall über die Messpfeiler (Teilspurminimierung) Niemeier (2008). Die notwendigen Näherungskordinaten der Neupunkte wurden mittels einer Konstruktion in *AutoCAD* ermittelt.

Die Simulation wurde im geodätischen Berechnungsprogramm „*rmGEO*“ durchgeführt. Die Eingangsparameter und Einstellungen im Vorfeld sind

- Messgenauigkeiten

<sup>1</sup>Horizontal- und Vertikalwinkel

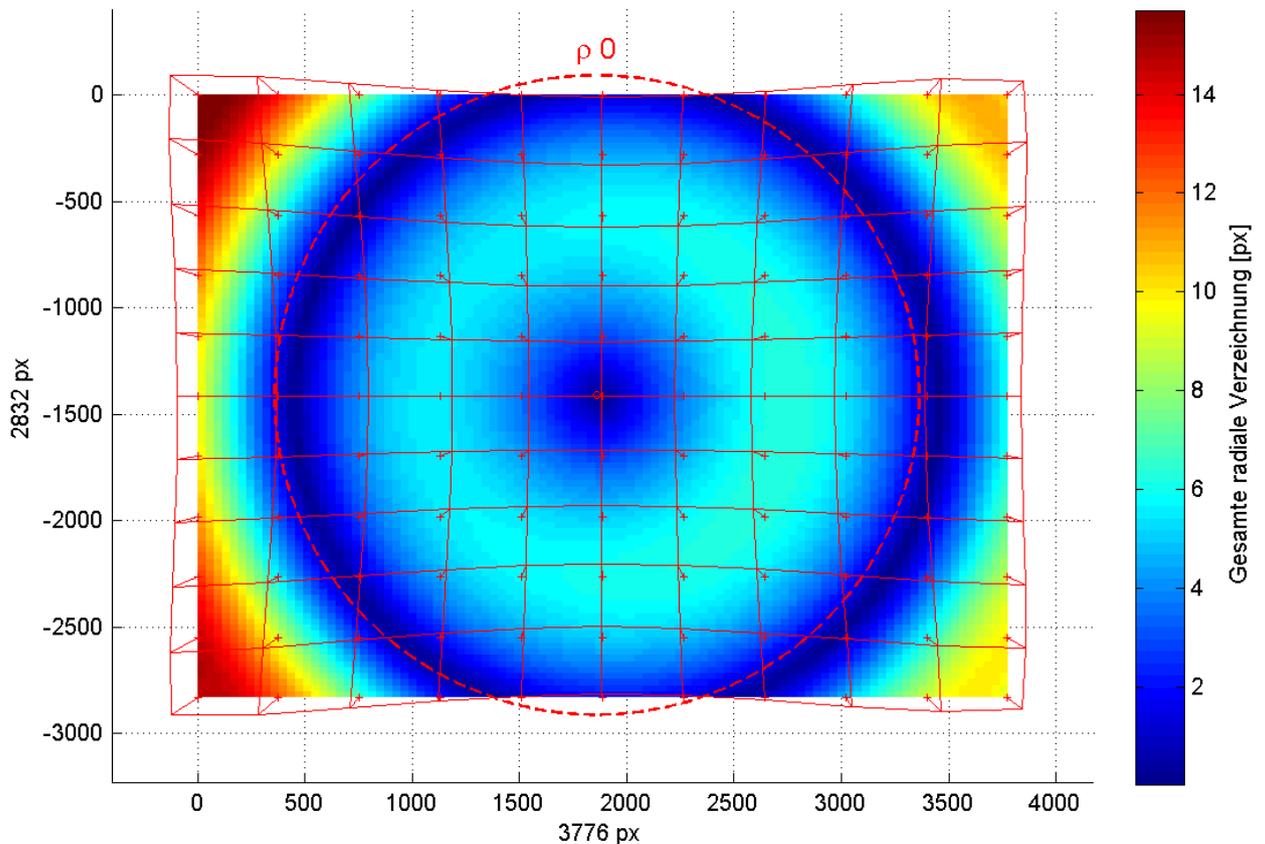


Abbildung 4.12: Einfluss der Verzeichnungsparameter auf die Bildkoordinaten.

- Koordinaten der Festpunkte und Näherungskoodinaten der Neupunkte
- Beobachtungen<sup>1</sup>
- Art und Dimension des Ausgleichs
- Spurminimierung im Falle eines freien Netzausgleichs

In der Abbildung 4.13 sind die zu erwartenden Standardabweichungen der Passpunktkoordinaten dargestellt. Mit der geplanten Netzkonfiguration sind Standardabweichungen in Lage und Höhe von etwa 1 mm zu erwarten und genügen demnach den bereits erwähnten Anforderungen von < 5mm.

### Netzmessung und Auswertung

Wie so oft, kommt es anders als geplant. Die Passpunktmarken konnten zwar in einer äh-

<sup>1</sup>In „rmGEO“ werden alle geplanten Beobachtungen mit dem Wert 1 im Messdateneditor wie von der Software gefordert eingetragen.

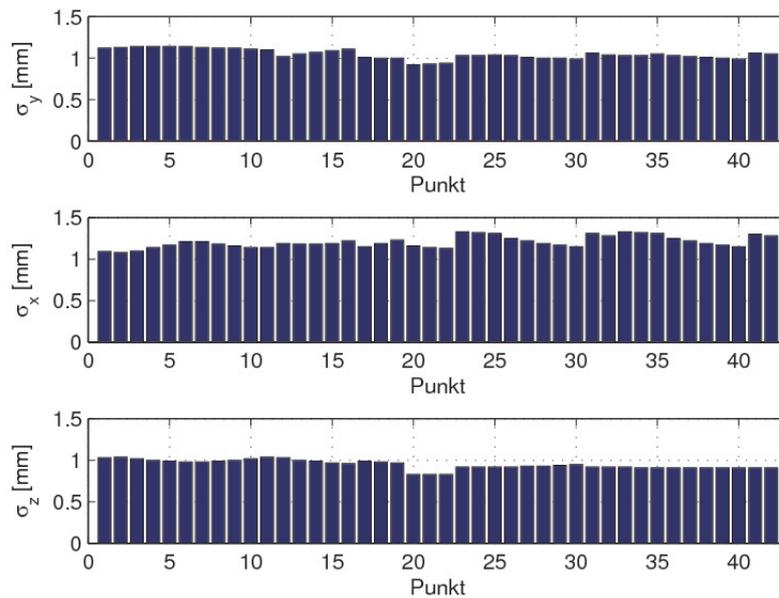


Abbildung 4.13: Simulierte Standardabweichungen der Passpunktkoordinaten.

lichen Konfiguration wie geplant angebracht bzw. ausgewählt, aus Zeitgründen aber nicht jeder redundant vermessen werden. In Summe wurden 32 Passmarken angebracht. In der Abbildung 4.14 sind die Positionen einiger Passpunkte dargestellt. Die redundant gemessenen Punkte erfüllen sowohl in Lage und Höhe die erreichbaren Genauigkeiten. Die Standardabweichungen der Punkte, die lediglich von einem Punkt aus eingemessen wurden, errechnen sich mittels Fehlerfortpflanzung in Abhängigkeit der erreichbaren Genauigkeiten der verwendeten Totalstation.

### 4.3.2 Testmessungen und Auswertungen

Im Hinblick auf die Mounting-Calibration (4.3.3) wurden die ersten Testmessungen am Dach der TU Wien durchgeführt. Da während den Testmessungen kein Risiko eingegangen werden sollte, wurde auf die Montage der Rotoren bzw. auf Flugversuche verzichtet und der „Flug“ durch einfaches Tragen simuliert.

Zu Beginn der Messungen musste der Hexakopter im Hinblick auf die Magnetometer-Kalibrierung, wie in (Wieser, 2013) beschrieben, mehrmals im Raum gedreht werden, sodass die Magnetfeldvektoren einigermaßen eine Kugel abdecken.

Die *Time to First Fix* (TTFF) ist jene Zeit, die der GPS-Empfänger nach dem Einschalten benötigt, um eine Positionslösung durchführen zu können. Erst dann ist auch die für die Synchronisation der Messdaten erforderliche GPS-Zeit im Observation-File vorhanden (Abb. 4.3). Aus

diesem Grund wurde der Hexakopter für einige Minuten auf einem zweiten Pfeiler in Ruhe stehen gelassen und erst dann mit dem simulierten Flug begonnen. Ausgehend von diesem Pfeiler wurde der direkte Weg zu dem Bereich zurückgelegt, in dem auch die Passmarken wie im vorigen Abschnitt beschrieben angebracht wurden. In diesem Bereich wurden 13 Fotos in unterschiedlichen Ausrichtungen und Positionen durch manuelles Auslösen der Kamera erstellt.



Abbildung 4.14: Foto des Innenhofs mit den vermessenen Passpunkten. Hier ist die Verteilung der Passpunkte über das gesamte Foto gut erkennbar.

Ein exemplarisches Bild des Innenhofs der TU Wien mit den sichtbaren Passpunkten ist in der Abbildung 4.14 dargestellt. Die Ausdehnung der Passpunkte erstreckt sich idealerweise über den gesamten Fotobereich. Bei einigen Bildern ist das auch näherungsweise der Fall. Abschluss des „Fluges“ war wieder die Startposition. Auf einem weiteren Messpfeiler wurde ein „Leica GPS 1200“ montiert und während den Testmessungen GPS-Rohdaten mit 5Hz aufgezeichnet um in weiterer Folge eine Basislinienauswertung durchführen zu können (vgl. 3.3.2).

Die Auswertung der GPS-Rohdaten erfolgte mit dem Open-Source-Programm „RTKLIB“. Die Wahl fiel auf dieses Programm, da erste Auswerterversuche mit anderen Programmen an der Mehrdeutigkeitslösung scheiterten. „RTKLIB“ bietet für statische und kinematische An-

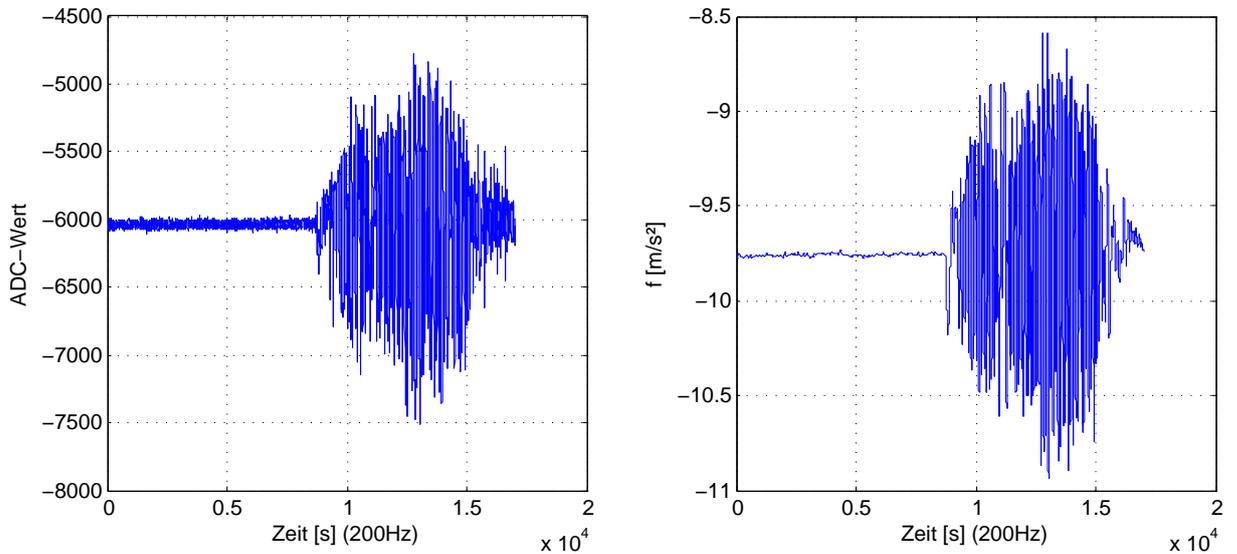


Abbildung 4.15: Zeitreihen der Messwerte des Beschleunigungssensors des *APM2.0* in z-Richtung. Links: Rohdaten in Form von ADC-Werten. Rechts: Konvertierte Rohdaten mit der Einheit  $m/s^2$ .

wendungen verschiedenste Auswertemöglichkeiten (Takasu, T., 2014). Als Eingangsparameter dienen die Rohdaten des Leica-GPS, die zunächst mit dem Programm „Leica Geo Office“ in das Rinex-Format konvertiert werden mussten. Die Rohdaten des Empfängers „Ashtech MP100“ mussten ebenfalls vor dem Import in „RTKLIB“ mit einem Programm von „Ashtech“ ins Rinex-Format konvertiert werden. Da die Rohdatenauswertung erst ein paar Tage nach der Aufnahme erfolgte, konnten von der Homepage des IGS<sup>1</sup> bereits die „Rapid“-Produkte für den Messtag geladen werden. Diese sind üblicherweise nach ca. 17h erhältlich (IGS, 2014). Die spezifischen Antennenparameter (Definition des Antennenphasenzentrum) für das Leica-GPS wurden von der Homepage der (NOAA, 2014)<sup>2</sup> geladen. Die Definition des Antennenphasenzentrums der Antenne „Maxtena“ konnten dem Datenblatt entnommen und in „RTKLIB“ übernommen werden. Die Auswertung der Basislinien konnte erfolgreich durchgeführt werden. Bis auf kurze Unterbrechungen von max. 1 Sekunde konnten die Mehrdeutigkeiten durchgehend gelöst werden.

Damit letztlich die Ergebnisse der direkten und der indirekten Georeferenzierung gegenübergestellt werden können, müssen beide im selben Koordinatensystem vorhanden sein. Die Pfeiler am Messdach der TU Wien sind amtliche Festpunkte des BEV<sup>3</sup> die sowohl Koordinaten im

<sup>1</sup>International GNSS Service

<sup>2</sup>National Oceanic and Atmospheric Administration

<sup>3</sup>Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

Landessystem als auch Koordinaten bezogen auf das ETRS89<sup>1</sup> besitzen. Dadurch wird die Bestimmung der Transformationsparameter zwischen den beiden Systemen und letztlich die Darstellung der GPS-Trajektorie im Landeskoordinatensystem möglich. In der Abbildung 4.16 ist die zurückgelegte Trajektorie dargestellt.

Die Aufbereitung der Rohdaten des *APM2.0* erfolgte mit den Algorithmen aus (Wieser, 2013). Die Schritte umfassen eine Konvertierung von den Rohdaten in Form von ADC (Analog-to-Digital-Converter) in die den einzelnen Sensoren entsprechende SI-Einheiten oder Ableitungen davon. Ebenso werden Tiefpassfilterungen vorgenommen, die das Rauschen reduzieren sollen. In der Abbildung 4.15 sind exemplarisch Ausschnitte der Zeitreihen von aufbereiteten Rohdaten des *APM2.0* dargestellt. In der linken Zeitreihe sind beispielhaft die Rohdaten des Beschleunigungssensors in der z-Achse abgebildet. Nach der Überarbeitung aller Rohdaten liegen die Messwerte in SI-Einheiten [ $\frac{m}{s^2}$ ] vor und können so direkt im Kalman-Filter weiterverarbeitet werden.

Die anschließende gemeinsame Auswertung der GPS- und IMU-Daten mittels Kalman-Filterung zeigten auf den ersten Blick zufriedenstellende Ergebnisse (Abb. 4.17). Die Qualität der Ergebnisse soll beim später durchgeführten Vergleich mit den Werten aus der indirekten Georeferenzierung betrachtet werden.

Die indirekte Georeferenzierung erfolgt mit dem Programm „*Agisoft*“ (AgiSoft LLC, 2014). Dieses Programm ist einfach aufgebaut und intuitiv leicht zu bedienen. Neben der automatischen Suche von homologen Punkten in den Fotos ist die Berechnung einer Bündelblockausgleichung möglich. Die Ableitung eines digitalen Oberflächenmodells (DOM) mit Textur aus den orientierten Fotos und in weiterer Folge die Erstellung von Orthophotos sind die wesentlichsten Möglichkeiten dieses Produkts. Das Preis-Leistungsverhältnis und der effiziente Bearbeitungsprozess zählt zu den Vorteilen des Programmes. Die Ausgabe von Qualitätsparametern und der Eingriff in den Auswerteprozess ist minimal gehalten. Diese Umstände sind im Hinblick auf wissenschaftliche Fragen eher nachteilig zu bewerten.

Im Zuge des Auswerteprozesses kann auch die Anpassung der Kamerakalibrierung vorgenommen werden bzw. bereits im Vorfeld gewonnene Kalibrierungswerte importiert werden.

### 4.3.3 Mounting-Calibration

Ziel dieses Abschnitts ist die Bestimmung der relativen, geometrischen Anordnungen der einzelnen Sensoren zueinander um von den direkt bestimmten Werten (Position aus DGPS und Neigungen aus IMU) auf die gesuchte äußere Orientierung der Kameraaufnahmen schließen zu können (vgl. Abb. 3.7). Dieses Verfahren wird auch als *Mounting-Calibration* bezeichnet und wird in (Haring, 2007) anhand eines Kamera-Laserscanner-Systems ausführlich

---

<sup>1</sup>Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989

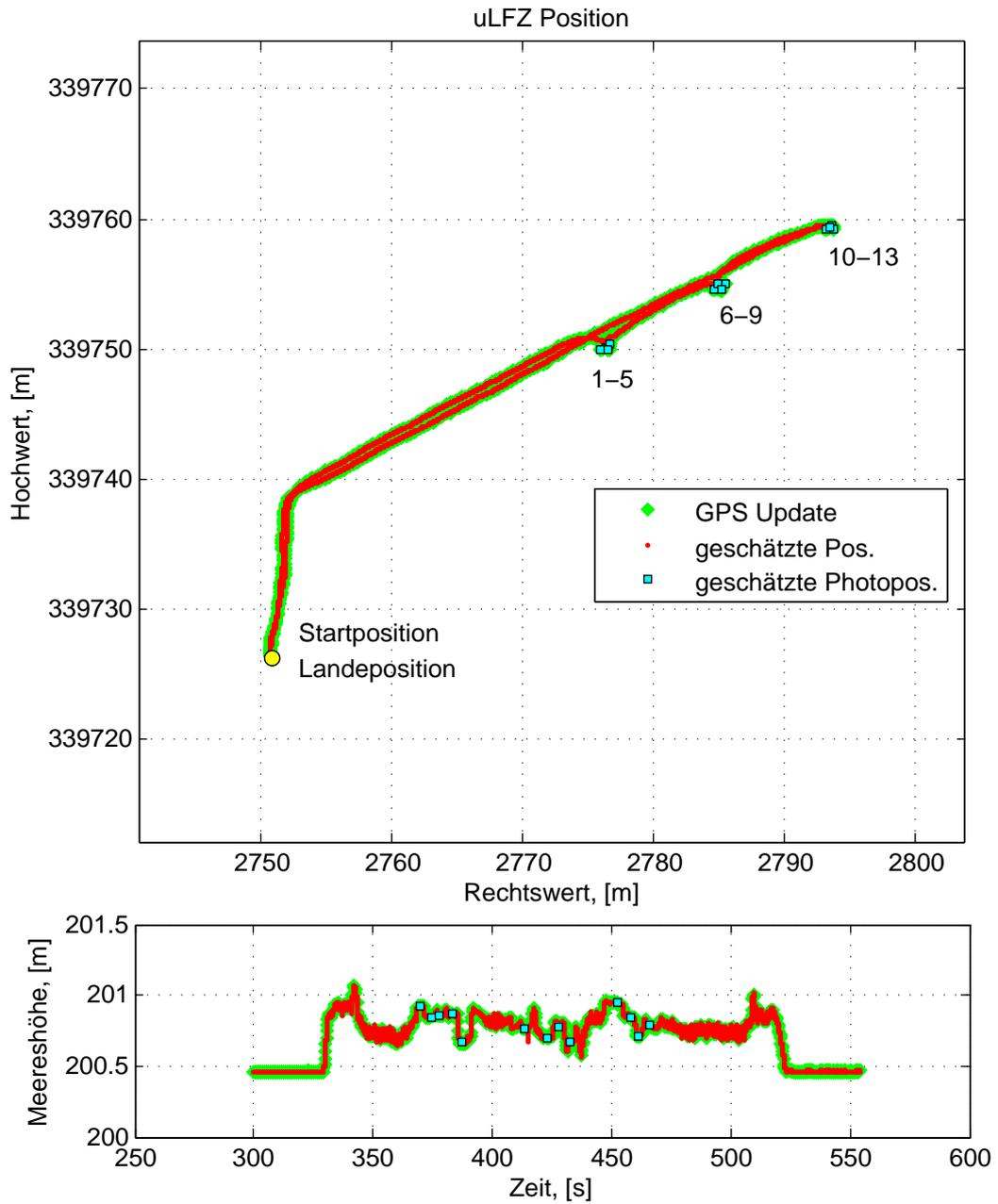


Abbildung 4.16: Trajektorie des „Testfluges“ am Messdach der TU Wien (oben: Lage, unten: Höhe). Die Ergebnisse stammen bereits aus der Kalman-Filterung. Die Positionen der Fotos 1 bis 13 sind durch die cyanfärbigen Quadrate gekennzeichnet.

diskutiert.

Im hier vorliegenden Fall sind folgende Größen zu bestimmen:

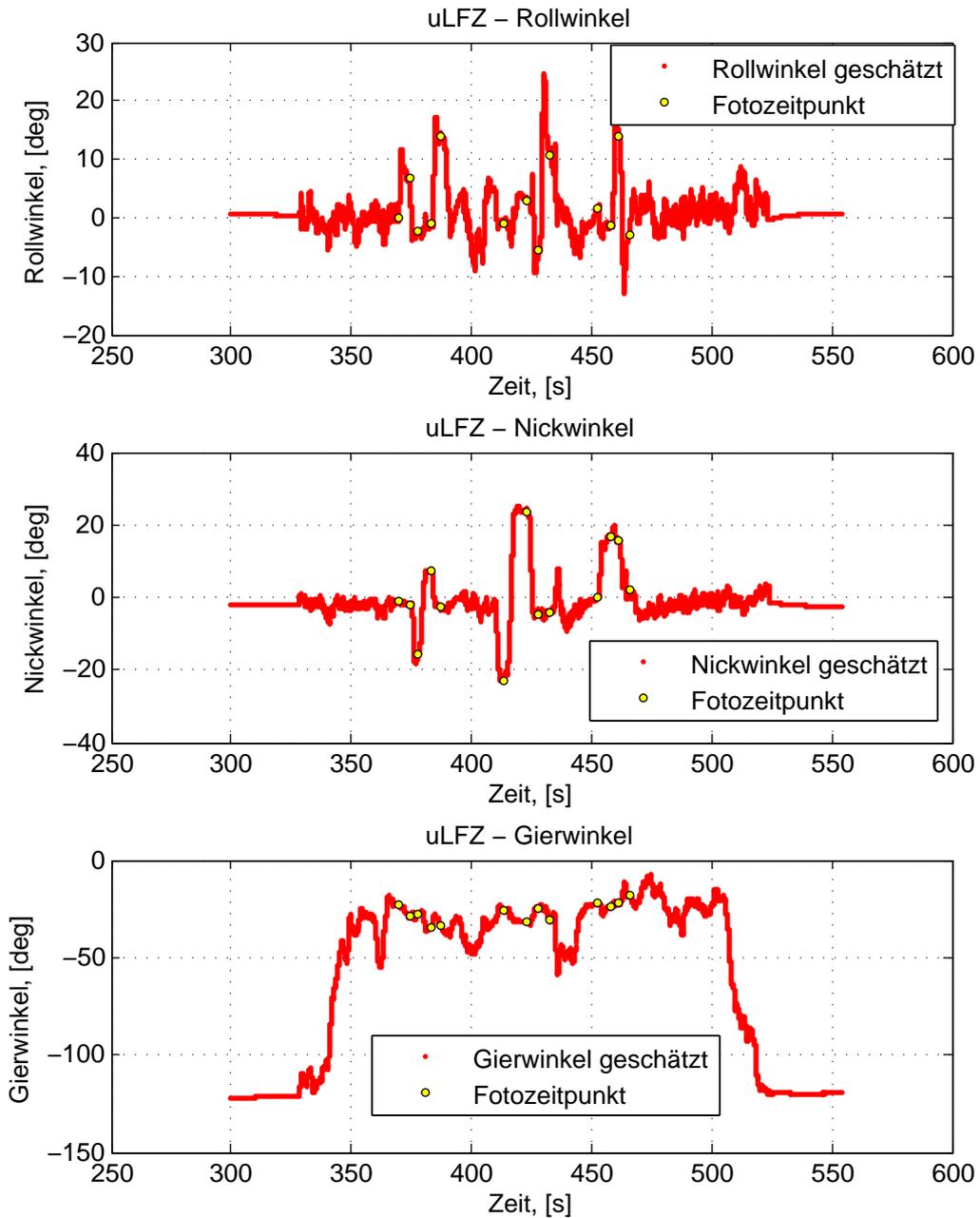


Abbildung 4.17: Darstellung der Orientierungslösung des „Testfluges“ am Messdach der TU Wien mit dem Kalman-Filter. Die gelben Kreise zeigen die Zeitpunkte der Kameraauslösung.

- Verschiebungsvektor  $\vec{l}$  zwischen GPS-Antenne<sup>1</sup> und Projektionszentrum der Kamera

<sup>1</sup>Als Bezugspunkt der GPS-Antenne wird das Phasenzentrum der Antenne betrachtet, auf das sich die Positi-

- Verdrehungen des *APM2.0*-KS<sup>1</sup> gegenüber dem Kamera-KS

Durch die Gegenüberstellung von den direkt bestimmten Positionen und Orientierungen des Hexakopters zum Zeitpunkt der Auslösung und den indirekt über Passpunkte gewonnenen Parametern der äußeren Orientierung des Kamerasystems können die gesuchten Parameter der *Mounting-Calibration* berechnet werden.

Da die GPS-Antenne mit einer konstanten Höhe zentrisch über dem Bildsensor der Kamera montiert ist, reduziert sich der Verschiebungsvektor  $\vec{l}$  auf

$$\vec{l} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

der für jede Aufnahme berechnet und daraus der Median gebildet wird.

Wie in Abbildung 3.7 zu erkennen ist, sind die körperfesten Koordinatensysteme von Kamera und *APM2.0* zueinander um ein Vielfaches von 90° verdreht. Um letztlich die kleinen Restverdrehungen von max. 1-3° zu bestimmen, müssen sich die beiden Systeme zunächst in gleicher Weise auf das selbe Koordinatensystem - in diesem Fall auf das Landeskoordinatensystem - beziehen. Wie bei (Wieser, 2013) wird das durch eine Aneinanderreihung von Rotationsmatrizen realisiert:

$$\mathbf{R}_{APM}^L \approx \mathbf{R}_{CAM,APM}^L = \mathbf{R}_{z,90} \mathbf{R}_{y,180} \mathbf{R}_{CAM}^L \mathbf{S} \quad (4.12)$$

Durch die Multiplikation der Flip-Matrix

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

mit der Matrix  $\mathbf{R}_{CAM}^L$ , die das Kamerasystem bezogen auf das Landessystem ausdrückt, wird dieses zunächst in dem Koordinatensystem des *APM2.0* ausgedrückt (vgl. Abb. 3.7) und mit einer 90°-Rotation um die z-Achse sowie einer anschließenden 180°-Rotation um die neue y-Achse in die vergleichbare Orientierung gebracht, ausgedrückt durch  $\mathbf{R}_{CAM,APM}^L$ , so dass mit

$$\Delta \mathbf{R} = \mathbf{R}_{APM}^{T_L} \mathbf{R}_{CAM,APM}^L \quad (4.14)$$

---

onsbestimmung bezieht  
<sup>1</sup>Koordinatensystem

die Drehmatrix gefunden wird, aus der die Differenzwinkel zwischen den Achsen der Kamera und dem *APM2.0*, bezogen auf das Landessystem, abgeleitet werden können.

Die Beziehung (4.14) wird für alle Aufnahmen berechnet und aus den entsprechenden Differenzwinkeln wird der Median für alle drei Achsen gebildet. Die drei Mediane bilden die finale *Mounting*-Drehmatrix  $\mathbf{R}_{mount}$ . Die Multiplikation dieser Matrix mit der Drehmatrix, die sich aus den im Kalman-Filter berechneten Roll-, Pitch- und Yaw-Winkel zusammensetzt, führt zu

$$\mathbf{R}_{Lage} = \mathbf{R}_{APM}^L \mathbf{R}_{mount} \quad (4.15)$$

aus der die direkt bestimmten Orientierungsparameter der äußeren Orientierung der Kamera zum entsprechenden Aufnahmezeitpunkt abgeleitet werden können.

Das direkt bestimmte Projektionszentrum  $Pho_{pos}$  setzt sich aus der Summe der DGPS-Position (Antennenphasenzentrum) und dem wegen der Neigung der Plattform kompensierten Offset  $\Delta z$  gemäß

$$Pho_{pos} = DGPS_{pos} + \mathbf{R}_{Lage} \vec{l} \quad (4.16)$$

zusammen. Somit können die sechs Elemente der äußeren Orientierung direkt bestimmt werden.

### Ergebnisse der *Mounting-Calibration*

Nach der soeben angeführten Rechenvorschrift der *Mounting-Calibration* wurden die im Abschnitt 4.3.2 durchgeführten und ausgewerteten Testmessungen verarbeitet. In der linken Abbildung von 4.18 sind die Differenzen zwischen den aus dem Kalman-Filter stammenden Orientierungsparametern ( $\omega, \phi, \kappa$ ) und den indirekt bestimmten Werten aus *Agisoft* dargestellt.

Tabelle 4.7: Werte der *Mounting-Calibration* anhand der Messungen vom Messdach der TU Wien.

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>	$\sigma$
$\Delta\omega$ [deg]	2,897	2,312
$\Delta\phi$ [deg]	-0,897	0,863
$\Delta\kappa$ [deg]	1,657	2,763
$\Delta z$ [m]	0,394	0,025

Beim Roll-Winkel ist nach dem sechsten Foto ein deutlicher Sprung von ca. 3° zu sehen. Eine mögliche Ursache könnte eine Bewegung der Kamera gegenüber der Kameraplattform bzw. dem *APM2.0* während der Aufnahme sein, da für die Aufnahmen die gesamte Plattform um

bis  $30^\circ$  geneigt wurde (vgl. Abb. 4.17) und die Kamera nur über die Stativschraube verbunden ist. Während beim Nick-Winkel bis auf eine kleine Verdrehung von etwa  $1^\circ$  keine deutlichen Systematiken zu erkennen sind, weist der Gier-Winkel nach dem neunten Foto ein ähnliches Verhalten wie der Roll-Winkel auf. Auch bei diesem Sprung könnte die Bewegung der Kamera die Ursache sein.

Tabelle 4.8: Werte der Mounting-Calibration anhand der ersten sechs Bildern vom Messdach der TU Wien.

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>	$\sigma$
$\Delta\omega$ [deg]	0,775	0,546
$\Delta\phi$ [deg]	-0,696	0,832
$\Delta\kappa$ [deg]	3,739	0,890
$\Delta z$ [m]	0,401	0,010

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen sind in der Tabelle 4.7 angeführt. Die Differenzen zwischen den um die *Mounting-Calibration* korrigierten Orientierungsparameter aus dem Kalman-Filter und den indirekt bestimmten Werten sind in der rechten Abbildung von 4.18 dargestellt. Die Standardabweichungen nehmen zum Teil etwas schlechtere Werte wie bei (Glira, 2012) an. Die hier erhaltene Standardabweichungen von  $2,312^\circ$  für den Roll-Winkel und  $2,763^\circ$  für den Gier-Winkel verschlechtern sich gegenüber den Standardabweichung von  $< 1^\circ \approx 2^\circ$  bei (Glira, 2012). Die Standardabweichung des Nick-Winkels beträgt  $0,863^\circ$ .

Betrachtet man hingegen nur die ersten sechs Bilder, so ergeben sich Standardabweichungen wie in Tabelle 4.8 zusammengefasst. Bei allen Winkel würden sich so Standardabweichungen von  $< 1^\circ$  ergeben.

In der Abbildung 4.19 sind links die Abweichungen zwischen den aus dem Kalman-Filter stammenden GPS-Positionen (Phasenzentrum) und den über Passpunkte indirekt bestimmten Projektionszentren.

Bei den Bildern 6, 7 und 12 sind die Schrägstellungen der Kamera anhand der Differenzen in Nord- und Ostrichtung deutlich zu erkennen. Ohne Kompensation würden sich je nach Neigung Fehler zwischen 10 und 20cm ergeben (4.19, links). In der Höhenkomponente ist die Differenz  $\Delta z$  zwischen Antennenphasenzentrum und Projektionszentrum gut zu erkennen. Nach der Berücksichtigung der *Mounting-Calibration* und der Neigungskompensation reduzieren sich die Abweichungen sowohl in der Lage als auch in der Höhe auf  $< 4\text{cm}$ . Die Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) der Differenzen der Positionskoordinaten betragen

- $\sigma_{RW} = 0,027m$

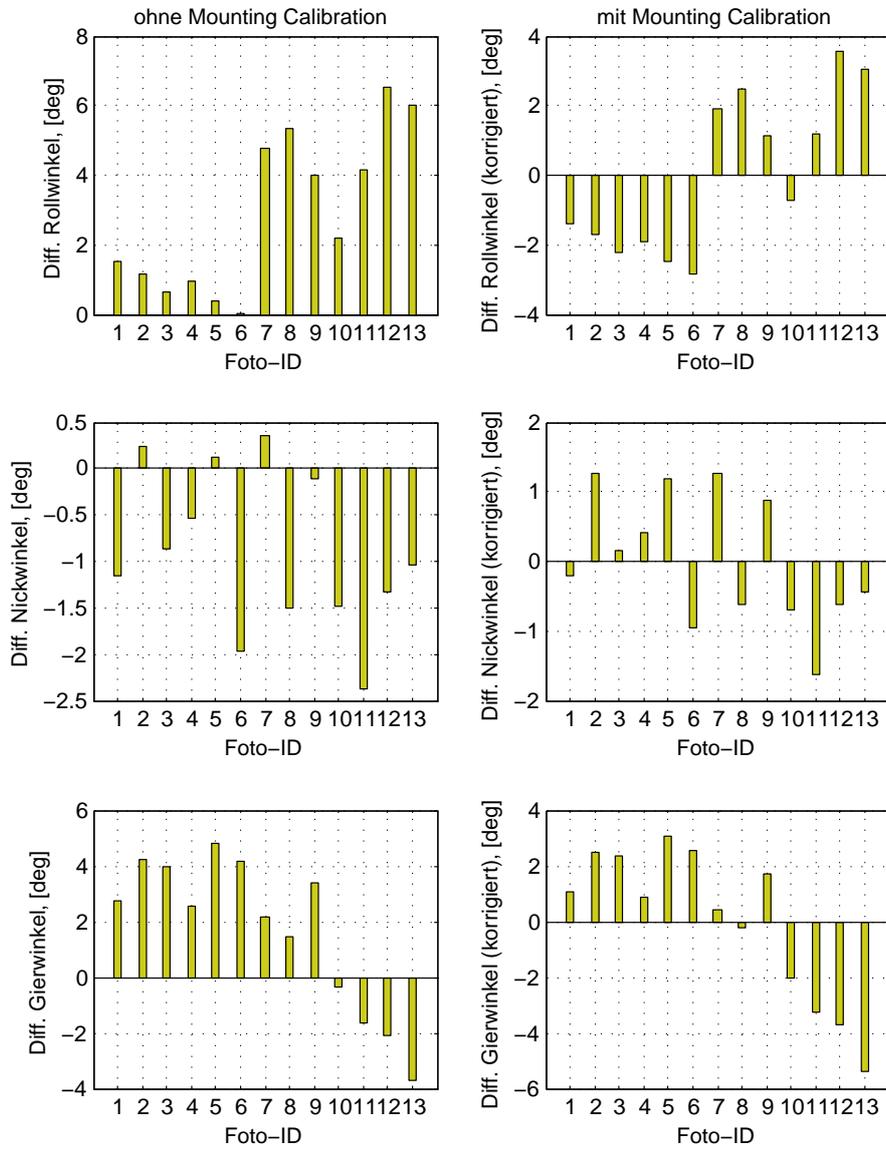


Abbildung 4.18: links: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden Orientierungen der Kamera und den aus den indirekt bestimmten Orientierungen der Kamera. rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der *Mounting-Calibration*.

- $\sigma_{HW} = 0,020m$
- $\sigma_H = 0,015m$

Um die erreichbaren Objektgenauigkeiten am Boden mit einer direkten Georeferenzierung zu erhalten, wurden die direkt bestimmten Werte in *Agisoft* übernommen und ein Bündelblock-

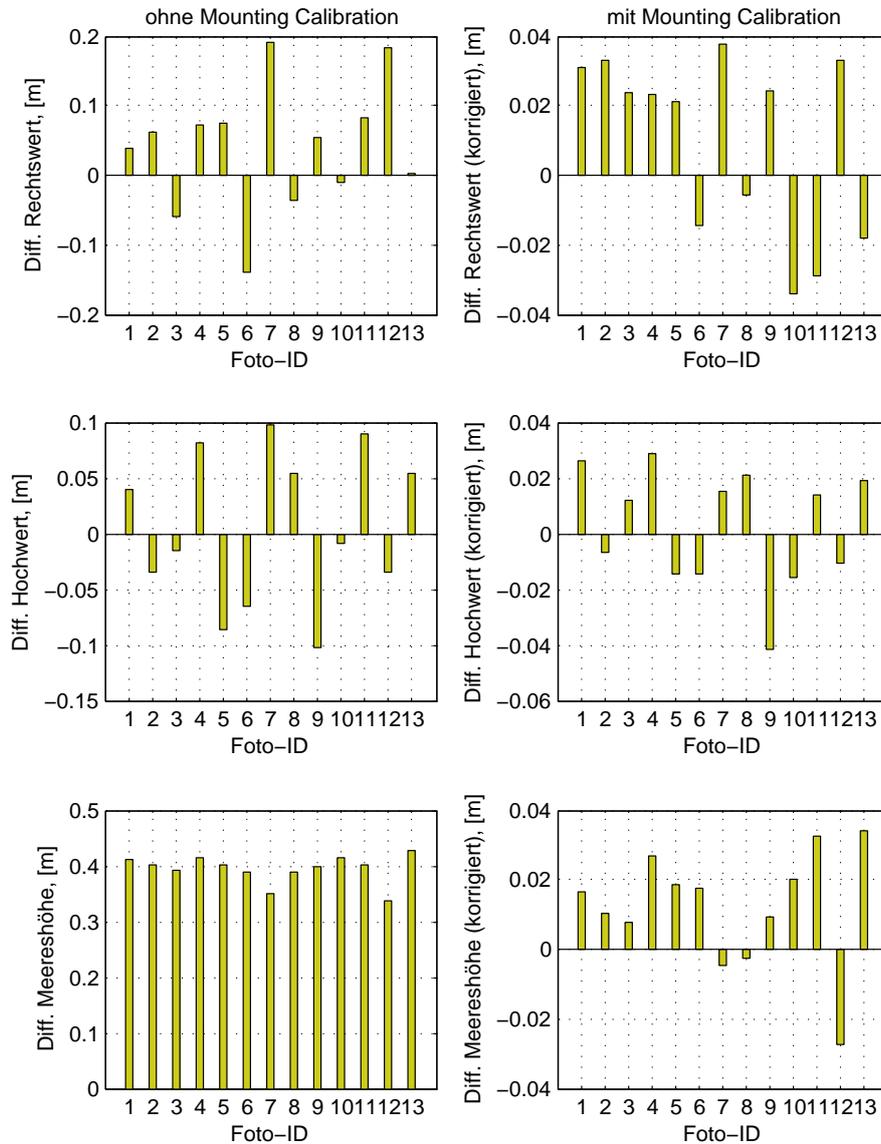


Abbildung 4.19: links: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden GPS-Positionen und den Positionen der indirekt bestimmten Projektionszentren. rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der *Mounting-Calibration*.

ausgleich durchgeführt. Als Anfangswerte der Kamerakalibrierung dienten die im Kapitel 4.2.2 berechneten Werte (Tab. 4.6). Für die Genauigkeit der Position des Projektionszentrums wurden die im Zuge der *Mounting-Calibration* bestimmten Standardabweichungen der Differenzen der Positionskoordinaten verwendet. Im ersten Schritt wurden für die Auswertung nur die Koordinaten der Projektionszentren übernommen und die Orientierungsparameter

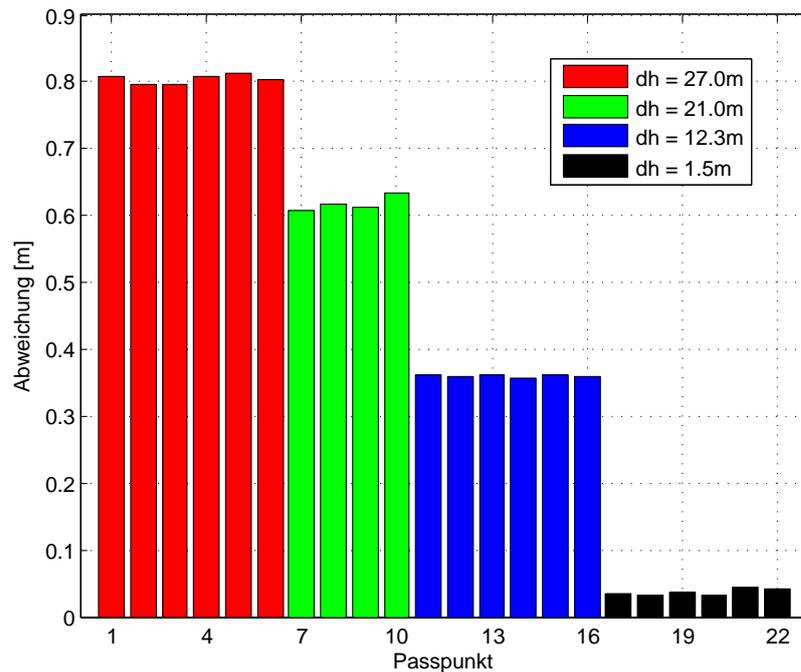


Abbildung 4.20: Horizontale Abweichungen bei den Passpunkten aus der direkten Georeferenzierung. Mit zunehmenden Abstand ( $dh$ ) zum Projektionszentrum erhöht sich die Abweichung auf bis zu ca. 0,80m (Hofebene).

im Zuge des Bündelblockausgleichs geschätzt. Ohne die Anpassung der Kamerakalibrierung konnten bei den Passpunkten die in der Abbildung 4.20 dargestellten Genauigkeiten erreicht werden. Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass es zu einem mit der Höhe abnehmenden systematischen Versatz senkrecht zur Gebäudewand kommt. Grund dafür ist die Anordnung der Aufnahmepositionen entlang der Gebäudekante auf einer Geraden (vgl. 4.14). Durch diese Anordnung ist keine Stützung des Modells senkrecht zum „Flugstreifen“ gegeben. Abhilfe könnte ein zweiter oder mehrere Streifen schaffen, die auch quer zur Flugrichtung das Modell stützen würden. Gerade dieser Aspekt ist im Hinblick auf lineare Infrastrukturobjekte interessant, denn je nach Breite würde oftmals ein Streifen reichen. Bei der späteren Planung des Fluges entlang des Testobjekts in Herzogenburg wurde dieser Umstand bereits berücksichtigt.

Die Anpassung der Kamerakalibrierung im Zuge der Ausgleichung brachte keine signifikanten Veränderungen in den Abweichungen. Auch die Hinzunahme der direkt bestimmten Orientierungswerten (Roll, Pitch, Yaw) brachte keine Veränderung im Ergebnis. Grund dafür ist die Tatsache, dass diese ohnehin durch die große Anzahl an Verknüpfungspunkten ausreichend gut bestimmbar sind.

## Kapitel 5

# Projektdurchführung

Für die Untersuchung der direkten Georeferenzierung von uLFZ-Luftbildern entlang linearer Infrastrukture Objekte wurde ein Streckenabschnitt der ÖBB in Herzogenburg (NÖ) gewählt. Die Wahl fiel auf diesen Abschnitt, da eine Vielzahl von Objekten (Weichen, Lärmschutzwände, Mastbolzen usw.) vorhanden ist und es darüber hinaus einen Bestandsplan aus einer terrestrischen Vermessung gibt. Der Bestandsplan wurde von der *Senftner Vermessung ZT GmbH* für Vergleiche in dieser Arbeit zur Verfügung gestellt.

Die örtlichen Gegebenheiten des Aufnahmegebiets werden im Detail im Kapitel 5.1 beschrieben. Dem folgt die Flugplanung im Kapitel 5.2, in dem zunächst auf eine Genauigkeitsabschätzung in Abhängigkeit der Flughöhe eingegangen wird (Kapitel 5.2.1). Die örtlichen Gegebenheiten und Wetterverhältnisse sowie die - zum Zeitpunkt der geplanten Befliegung - Sichtbarkeit der Satelliten werden ebenfalls diskutiert. Auf die zu wählende Größe der Passmarken für die indirekte Georeferenzierung wird am Ende des Kapitels 5.2 eingegangen.

Den Abschluss des fünften Kapitels bildet die Durchführung der Befliegung der Teststrecke in Herzogenburg (Kapitel 5.3).

### 5.1 Beschreibung des Aufnahmegebiets

Als Testgebiet wurde ein Streckenabschnitt der ÖBB in Herzogenburg (NÖ) ausgewählt (Abb. 5.1). Es handelt sich dabei um einen Bereich, der in den Jahren 2008-2009 von ursprünglich zwei auf vier Gleise erweitert und der gesamte Unterbau, Signalanlagen, Kabelkanäle und Fahrleitungsmasten erneuert wurde. Die Nord-Süd gerichtete Teststrecke hat eine Länge von etwa 200m und eine Breite von etwa 50m und wird im Osten durch einen Begleitweg aus Schotter begrenzt. Südwestlich des Interessensgebiet wurde während des Neubaus ein Sickerbecken errichtet, welches im Zuge der Testmessungen ebenfalls erfasst werden soll. Südlich davon quert eine Hochspannungsleitung (380kV) die Bahntrasse zu der ein entsprechender Sicherheitsabstand einzuhalten ist. Im Westen grenzt von Süd nach Nord zunächst



Abbildung 5.1: Testgebiet in Herzogenburg (NÖ) mit einer Ausdehnung von 200m x 50m. Wegen dem Vorhandensein vieler unterschiedlicher Objekte (Weichen, Lärmschutzwände, Mastbolzen usw.) ist die Wahl auf diesen Streckenabschnitt gefallen.

ein Betriebsgebiet an, gefolgt von einer brachliegenden Fläche und einem Siedlungsgebiet, wobei zwei Anrainer dieser Siedlung mit deren Gärten im Interessensgebiet an die Bahntrasse angrenzen. Die betroffenen Anrainer wurden im Vorfeld über die geplante Befliegung schriftlich informiert.

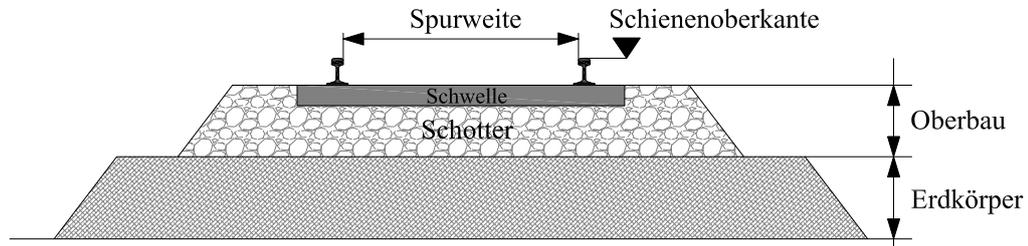
Für die punktuelle Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten einer Luftbilddauswertung bei Bahntrassen werden im Folgenden die Interessensobjekte in Anlehnung an das bereits erwähnte Pflichtenheft der ÖBB (ÖBB, 2006b) beschrieben.

### **Gleise und Weichen**

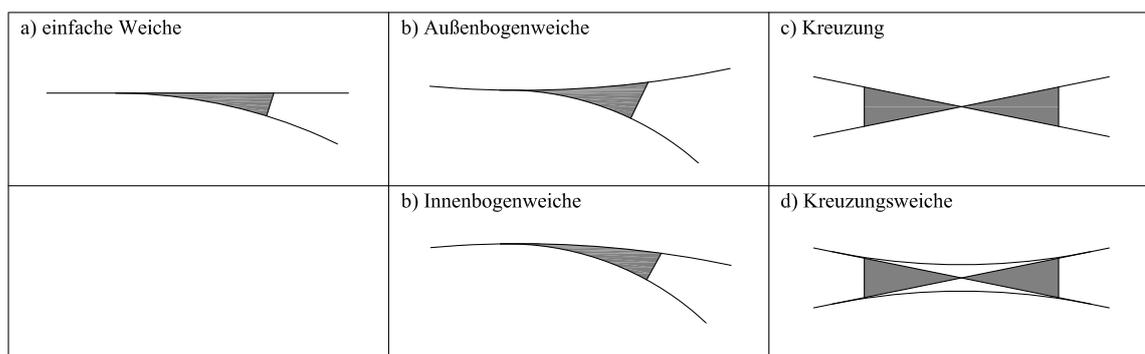
Die gleistechnischen Grundbegriffe sollen beziehungsweise auf (Möser *et al.*, 2000) anhand der folgenden Abbildungen erläutert werden. Der Querschnitt eines Bahnkörpers unterteilt sich zunächst vom Untergrund ausgehend in den Erdkörper und den Oberbau. Innerhalb des Oberbaus befindet sich die Bettung, die zur Regel aus Schotter besteht, und die Schwellen, auf denen die Gleise befestigt sind.

Als Spurweite wird das kleinste Maß zwischen den Schienenköpfen definiert (Abb. 5.2). In Europa beträgt die Normalspurweite 1435mm und wurde durch einen Staatsvertrag im Jahr 1887 festgelegt (Thelen, 2000).

Die Gleisachse befindet sich exakt in der Mitte der beiden Schienenkopffinnenseiten. In den digitalen Bestandsplänen (1:500) der ÖBB ist aus Übersichtsgründen nur die Gleisachse dargestellt. Kommt es bei Bögen zu Überhöhungen wird die niedrigere Höhe der beiden gegen-

Abbildung 5.2: Querschnitt durch einen Bahnkörper (Möser *et al.*, 2000).

überliegenden Schienenoberkanten an der Gleisachse angegeben (ÖBB, 2006b).

Abbildung 5.3: Weichen- und Kreuzungskonstruktionen bei Gleisanlagen (Möser *et al.*, 2000).

Weichen, die den Übergang von einem auf das andere Gleis ermöglichen, gibt es in unterschiedlichen Formen. In Abhängigkeit davon, ob das Stammgleis geradlinig oder gebogen ist, spricht man im ersten Fall von einfachen Weichen (Abb. 5.3a) und im zweiten Fall von Außen- oder Innenbogenweichen (Abb. 5.3b). Kreuzungen von Gleisen (Abb. 5.3c) und Kreuzungsweichen (Abb. 5.3d) vervollständigen die Oberbaukonstruktionen.

In der Abb. 5.4 sind die wichtigsten Begriffe von Weichenanlagen anhand einer einfachen Weiche dargestellt. Der Weichenanfang und das Weichenende sind zur Regel nicht eindeutig sichtbar. Oftmals sind sie durch die Schweißnaht oder ein kleines Loch im Schienensteg gekennzeichnet, beide Markierungen sind unter keinen Umständen in den Luftbildern zu erkennen. Ausgehend von den Zungenspitzen und dem Wissen, um welche Weiche es sich handelt, können Weichenanfang und -ende auch konstruktiv in den Bestandsplänen eingetragen werden. Letztlich wird die gesamte Weichenkonstruktion nur stilisiert durch die Stammgleisachse

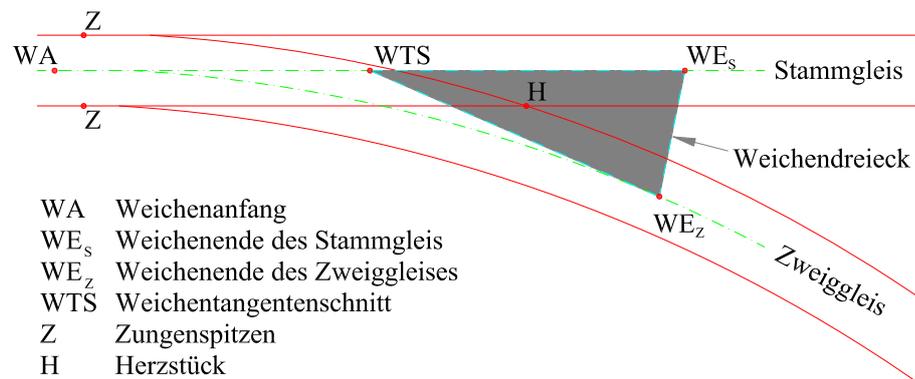


Abbildung 5.4: Einfache Weiche mit den für Bestandsdokumentationen wichtigsten Begriffen (Möser *et al.*, 2000).

und das Weichendreieck als Verbindung zur Zweiggleisachse dargestellt.

### Fahrleitungsmasten und Mastbolzen

In etwa 70% des österreichischen Bahnnetzes ist bereits elektrifiziert. Die Energieversorgung der Antriebsfahrzeuge erfolgt dabei über eine 15kV-Leitung, welche auf Fahrleitungsmasten montiert ist (ÖBB, 2013). Diese Masten dienen aber nicht ausschließlich der Energieversorgung. An ihnen sind Mastbolzen angebracht, die für diverse bautechnische Arbeiten als Referenzpunkte herangezogen werden. Die Genauigkeitsanforderungen an die absolute Lage- und Höhenbestimmung der Mastbolzen ist wie bei den Gleisen mit einer einfachen Standardabweichung von 1 cm hoch. Bei manchem Projekten sind auch Präzisionsnivellements über die Mastbolzen erforderlich, wodurch Standardabweichungen von < 1 mm in den Höhenwerten erreicht werden.



Abbildung 5.5: Mastbolzen, montiert auf einem Fahrleitungsmast (Durchmesser: 15mm; Länge: 60mm).

### **Sonstige Objekte**

Neben den Gleisen und Masten sind noch weitere Objekte für die Bestandserfassung von Interesse.

Entlang der Trassen wurden bis dato über 800km Lärmschutzwände errichtet. Bei steigenden Geländeformen muss es zu Sprüngen an der Oberkante der Lärmschutzwand kommen. Diese Unstetigkeiten sind in der Regel zu erfassen. Wird die Lärmschutzwand nicht genau in Nadirrichtung am Luftbild abgebildet, so sind die Höhensprünge zu erkennen und können ausgewertet werden.

Sonstige Objekte oder Einbauten, wie z.B.

- Kilometersteine
- Kabelschächte
- Signalanlagen
- Fernsprechanlagen
- Kanaldeckel, etc.

sind zwar grundsätzlich zu erfassen, die Genauigkeitsanforderungen liegen jedoch bei einer Standardabweichung von 2-3cm in Lage und Höhe.

## **5.2 Flugplanung**

Ziel dieses Projekts ist die durchgehende Dokumentation und Ableitung von diskreten Punkten der Bahntrasse. Um eine stereoskopische Auswertung eines Objektpunktes durchzuführen, muss dieser in zumindest zwei Fotos abgebildet sein. Demnach sind die Aufnahmen entlang der Trasse strukturiert vorzunehmen und es bedarf bereits im Vorfeld einer entsprechenden Flugplanung. In den folgenden Unterkapiteln sind die Kriterien für eine erfolgreiche Flugplanung angeführt.

### **5.2.1 Normalfall und Genauigkeitsabschätzung**

Im Hinblick auf die Einhaltung der geforderten Genauigkeiten (vgl. Kapitel 2.1) müssen Flughöhe und Kameraspezifikation aufeinander abgestimmt werden. Nach (Luhmann, 2010) und (Kraus, 2004) können die Genauigkeiten durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf die Koordinatenberechnung im Normalfall abgeschätzt werden.

In der Figur 5.6 ist der Normalfall dargestellt. Die Aufnahmerichtung der beiden Bilder verläuft jeweils senkrecht durch die Objektebene. Legt man dabei das XYZ-Koordinatensystem

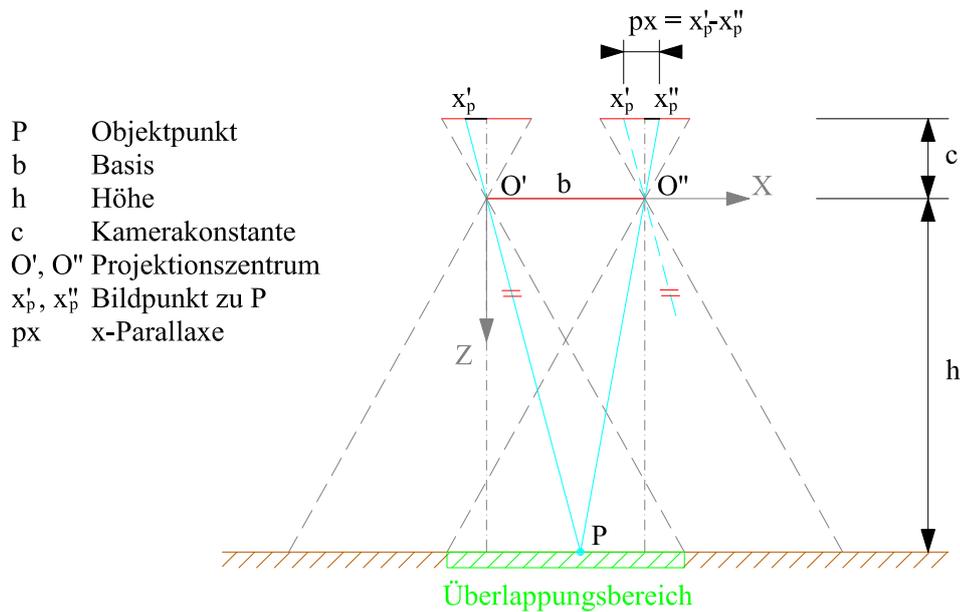


Abbildung 5.6: Normalfall (nach Kraus (2004))

in das Projektionszentrum O', liefern geometrische Proportionalitäten die Objektkoordinaten des Punktes P. Die Lagekoordinaten (X, Y) ergeben sich aus dem Verhältnis

$$X = \frac{h}{c} x'_p = m_B x'_p \quad \text{und} \quad Y = \frac{h}{c} y'_p = m_B y'_p \quad (5.1)$$

und die Höhe Z aus

$$Z = h = \frac{bc}{x' - x''} = \frac{bc}{px} \quad (5.2)$$

Die Basis b zwischen den beiden Projektionszentren (O', O'') ergibt sich aus der Sensorgröße der Kamera und der erforderlichen Längsüberlappung. Um flächendeckend die Abbildung von Punkten P in mindestens zwei Bildern zu garantieren, strebt man eine Längsüberlappung von etwa 60% an. Das Verhältnis zwischen Aufnahmeentfernung h und der Kamerakonstante c wird als Bildmaßstab  $m_B$  bezeichnet, die Differenz zwischen den Bildpunktkoordinaten  $x'_p$  und  $x''_p$  als x-Parallaxe.

Zur Genauigkeitsabschätzung der Objektpunkte wird das Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf die Formeln (5.1) und (5.2) angewendet. Werden nur die einflussreichen Terme berücksichtigt,

b und c als fehlerfrei angenommen, können die Lagekoordinaten in X und Y durch

$$s_X = s_Y = m_B s_{x'y'} \quad (5.3)$$

abgeschätzt werden. Für die Genauigkeit in Aufnahme­richtung gilt analog

$$s_Z = \frac{h}{b} \frac{h}{c} = q m_B s_{px} \quad (5.4)$$

Das Verhältnis  $q$  zwischen Höhe und Basis wird als Design-Faktor bezeichnet. Die Schnittgeometrie, die durch  $q$  beschrieben wird, verbessert sich mit zunehmenden Basisabstand. Dies wird durch einen möglichst großen Bildsensor und die kleinstmögliche Längsüberlappung erreicht. Die Parallaxenmessgenauigkeit  $s_{px}$  ergibt sich aus

$$s_{px} = \frac{s_{x'}}{\sqrt{2}} \quad (5.5)$$

In der Abb.5.7 ist die Genauigkeit der Objektpunkte als Funktion der Höhe für die gewählte Kamera dargestellt. Wird eine Genauigkeit in Lage und Höhe von  $\pm 1\text{cm}$  gefordert, so ist der Abbildung zu entnehmen, dass eine max. Flughöhe von etwa 40m über Grund möglich ist. Strebt man eine Genauigkeit von  $\pm 2\text{cm}$  an, kann die Flughöhe auf bis zu 80m angehoben werden.

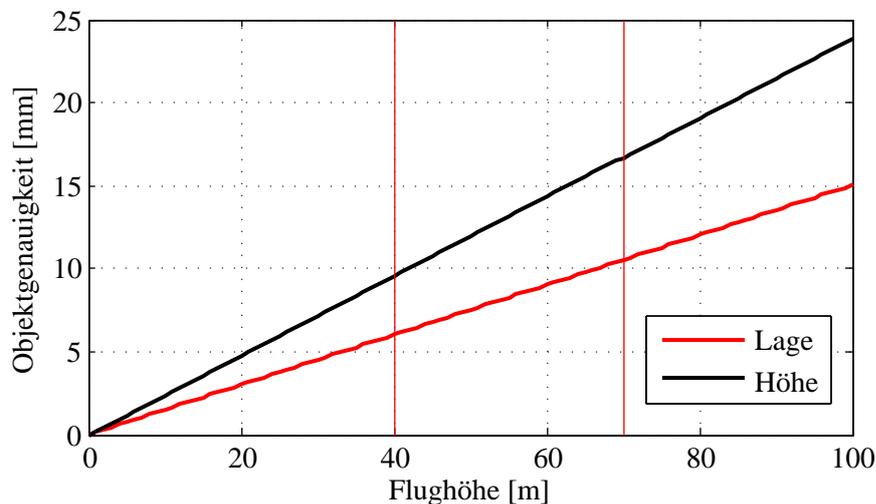


Abbildung 5.7: Erreichbare Genauigkeiten der Objektkoordinaten beim Normalfall in Abhängigkeit der Flughöhe und der Kameraspezifikationen (Ricoh GXR(Tab.4.3)).

## 5.2.2 Örtliche Gegebenheiten und Wetterverhältnisse

Aufgrund der geringen Flughöhe von bis zu 150m über Grund (vgl. Kapitel 2.4) ist besonders auf örtliche Einschränkungen wie Hochspannungsleitungen, Windräder, Hochhäuser, hohe Bäume, Kräne, Schlotte und sonstige hohe Objekte zu achten.

Bei zu starken Windverhältnissen wird die Regelungstechnik des Hexakopters mehr in Anspruch genommen und dadurch die Akkuleistung schneller geschwächt. Daher ist darauf zu achten, dass maximal mäßiger Wind ( $< 30$  km/h) weht. Um störende Schatten von Objekten zu vermeiden, ist ein bewölkter Tag zu bevorzugen. Regen ist im Hinblick auf die Elektronik jedoch zu vermeiden.

Ein weiterer Faktor sind die Schattenverhältnisse. Speziell in den Wintermonaten sind an sonnigen Tagen mit langen Schatten zu rechnen. Optimalerweise sollten die Aufnahmen an bewölkten Tagen durchgeführt werden.

## 5.2.3 Satellitensichtbarkeit

Die automatische Wegpunktbefliegung mit dem eingesetzten Hexakopter setzt den Empfang von mind. sechs Satelliten voraus (HiSystems GmbH, 2013). Mit den aktuellen Satellitenbahndaten und den genäherten Stationskoordinaten kann die Anzahl der sichtbaren Satelliten berechnet werden. Der Abb. 5.8 kann entnommen werden, dass der Einsatz um ca. 11:30 und zwischen 12:30 und 13:45 nicht erfolgen sollte, da hier nur 5-6 Satelliten sichtbar sind. Ein Einsatz ab 13:45 ist im Hinblick auf die Satellitenverfügbarkeit optimal, da hier mit dem Empfang von bis zu acht Satelliten zu rechnen ist.

## 5.2.4 Flugtrajektorie

Der durchgeführten Genauigkeitsabschätzung zufolge, soll das Interessensobjekt aus 40 m und 70 m über Grund erfasst werden. In der Tabelle 5.1 sind die Eingangsparameter für die Flugplanung nochmals angeführt.

Aus den gegebenen Werten der Tab.5.1 werden im nächsten Schritt die erforderliche Anzahl an Bildern und deren Basisabstand  $b$  zueinander innerhalb eines Streifens sowie die Anzahl der Streifen im Abstand  $a$  berechnet. In der Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse für die beiden geplanten Flughöhen angeführt. Unabhängig von den hier theoretisch geplanten Flugtrajektorien sollen auf Grund der Breite der Bahntrasse mit vier Gleisen die Aufnahmen von zwei Streifen aus erfolgen. Der Streifenabstand  $a$  wird so gewählt, dass die geradlinigen Streifen jeweils zwischen dem äußeren und dem inneren Gleis verlaufen (Abb. 5.10).

Im Windows-Programm „*MikrokopterTool-OSD*“ (HiSystems GmbH, 2013) können die aus der Planung erhaltenen Werte (Tab. 5.2) zur Generierung der Wegpunktkoordinaten übernommen werden. Zusätzlich müssen noch folgende Parameter gesetzt werden:

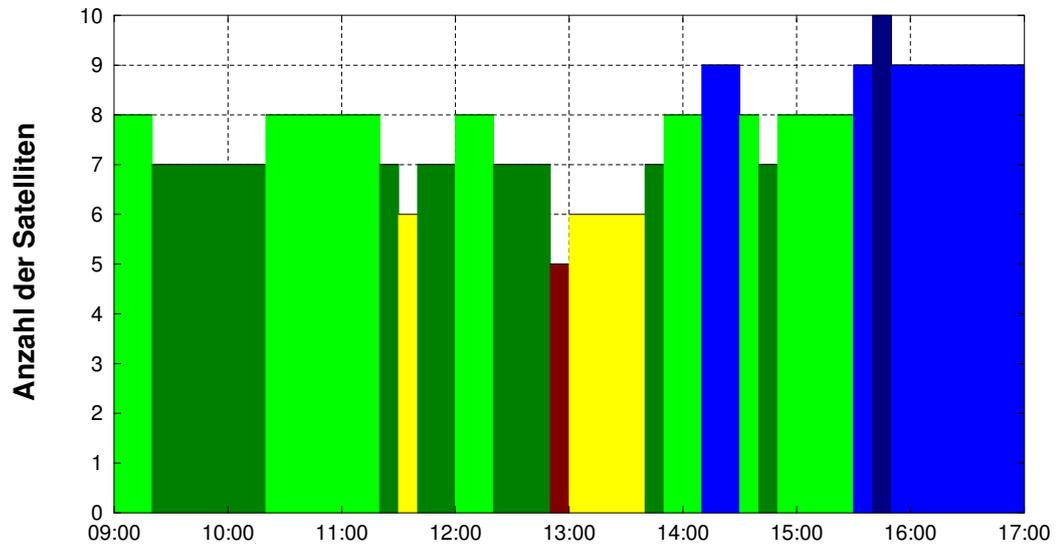


Abbildung 5.8: Satellitensichtbarkeit zwischen 9:00 und 17:00 am geplanten Einsatztag (aus Trimble Geo Office).

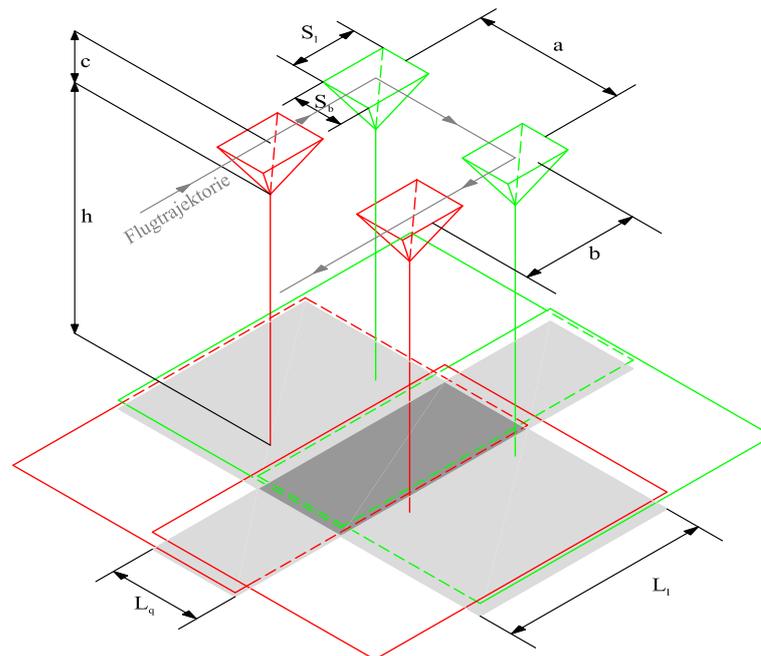


Abbildung 5.9: Prinzip der Flugplanung und Darstellung der dafür notwendigen Parameter. Die Bezeichnungen in der Abbildung sind in den Tabellen 5.1 und 5.2 beschrieben (Kraus, 2004).

Tabelle 5.1: Eingangsparemeter für die Flugplanung.

<i>Objekt</i>		
Objektlänge	$O_l$	200m
Objektbreite	$O_b$	50m
Längsüberlappung	$L_l$	60%
Querüberlappung	$L_q$	30%
Flughöhe über Grund	$h$	40m und 70m
Bildmaßstab	$m_B$	2177 (h=40m) und 3811 (h=70m)
<i>Sensordaten</i>		
Sensurlänge	$S_l$	20,37mm
Sensorbreite	$S_b$	15,50mm
Pixelgröße	$S_{px}$	0,0055mm
Kamerakonstante	$c$	18,37mm

Tabelle 5.2: Berechnete Parameter für die Flugtrajektorie in 40 und 70m Höhe.

<i>Flughöhe h</i>		40m	70m
Bildmaßstab	$m_B = h/c$	2177	3810
Basisabstand	$b = S_l m_B (1 - L_l/100)$	16,0m	28,0m
Bildanzahl pro Streifen	$n_b = [O_l/O_b] + 2$	13	8
(theoretisch) Streifenanzahl	$L_q$	2	1
(theoretisch) Streifenabstand	$a = S_b m_B (1 - L_q/100)$	21,2m	-

- Radius [m]: Befindet sich das uLFZ innerhalb des vorgegeben Radius um den vorgegeben Wegpunkt, erfolgt die Auslösung der Kamera. Speziell bei starkem Wind muss der Radius größer gewählt werden (ca. 4-5m). Ein größerer Radius hat jedoch zur Folge, dass die geplanten Abstände zwischen den Fotos innerhalb eines Streifens möglicherweise nicht exakt eingehalten werden. Im Abschnitt 6.4 wird ein Vergleich zwischen geplanten Wegpunkt und der tatsächlichen Fotoauslöseposition vorgenommen.
- Flughöhe [m]: Die relative Flughöhe bezieht sich auf die Höhe des uLFZ vor dem Start, d.h., es handelt sich nicht um eine absolute Höhenangabe (!)
- Richtung [°]: Sie beschreibt die Ausrichtung des uLFZ bzw. der montierten Kamera am Wegpunkt.
- Kameraneigung [°]: Diese Funktion ist bei dem eingesetzten uLFZ nicht möglich.

- Geschwindigkeit [0.1m/s]: Die Geschwindigkeit von Wegpunkt zu Wegpunkt.
- Steigrate [0.1m/s]: Beschreibt das Steig- und Sinkverhalten des uLFZ
- Wartezeit [s]: Beim Erreichen des Wegpunktes könnten unter Umständen mehrere Aktionen ausgeführt werden, die mehr Zeit in Anspruch nehmen (z.B. Panoramaaufnahmen). Bei einfachen Fotoaufnahmen reichen 2-3 Sekunden.
- WP-Event: Mit diesem Wert wird die automatische Auslösung der Kamera gesteuert.

Sämtliche geplanten Werte werden unmittelbar vor dem Start an die NaviCtrl gesendet und bleiben bis zur Unterbrechung der Stromzufuhr gespeichert.



Abbildung 5.10: Flugplanung mit dem Programm *MikrokopterTool-OSD*. Die Werte aus der Tabelle 5.2 werden zur Wegpunktgenerierung verwendet (HiSystems GmbH, 2013).

### 5.2.5 Passmarken für die indirekte Georeferenzierung

Die Qualitätsbeurteilung der direkten Georeferenzierung erfolgt u.a. durch einen Vergleich mit der indirekten Georeferenzierung (Kapitel 6.2). Für diesen Zweck müssen vor der photographischen Aufnahme Passpunkte signalisiert und vermessen werden.

Als Faustformel für den Durchmesser der Passmarken kann nach (Kraus, 1996)

$$d[cm] = \frac{m_b}{300 \text{ bis } 600} \quad (5.6)$$

herangezogen werden. Der Bildmaßstab  $m_b$  ist als Funktion der Kamerakonstante und der Flughöhe einzusetzen. Der Wert im Nenner ist vom Kontrast der Passmarken zur Umgebung abhängig. Bei einem niedrigen Kontrast ist ein kleiner Wert zu wählen, d.h. der Durchmesser der Passmarke wird größer. Generell sind größere Passmarken zu bevorzugen, da sie leichter in den Bildern aufzufinden sind.

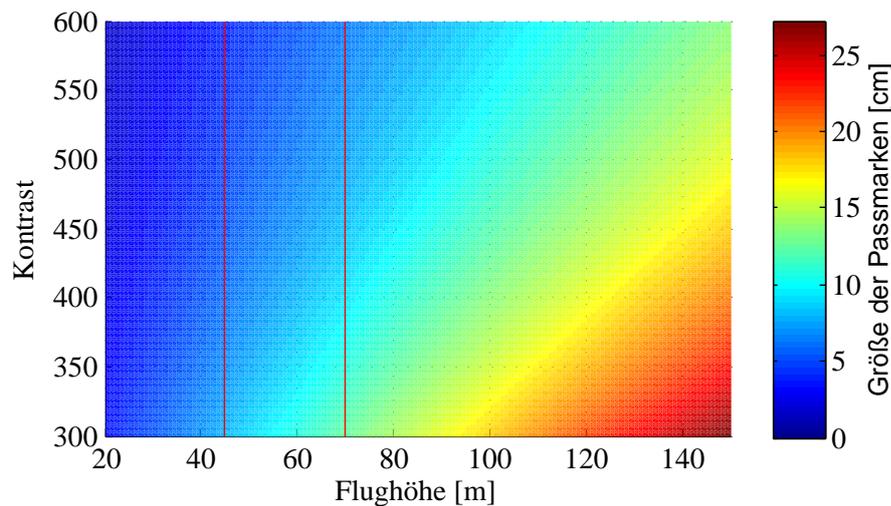


Abbildung 5.11: Durchmesser der Passmarken in Abhängigkeit der Höhe und des Kontrasts.

In der Abbildung (5.11) ist der Durchmesser als Funktion der Höhe und des Kontrastes gemäß Beziehung (5.6) dargestellt. Wie im Kapitel 5.2 geplant, werden die Aufnahmen in einer max. Höhe von 70m über Grund erstellt. Nimmt man einen Wert von 300 für einen niedrigen Kontrast an, so ergibt sich ein Durchmesser für die Passmarken von mind. 13cm.

Bei diesem Projekt werden quadratische Passmarken in einer Größe von 20cm verwendet. Zusätzlich soll auch die Sichtbarkeit von roter Signalfarbe in Form von Kreuzen getestet werden.

Für die im Kapitel 6.2 durchzuführenden Vergleiche muss gewährleistet sein, dass sämtliche

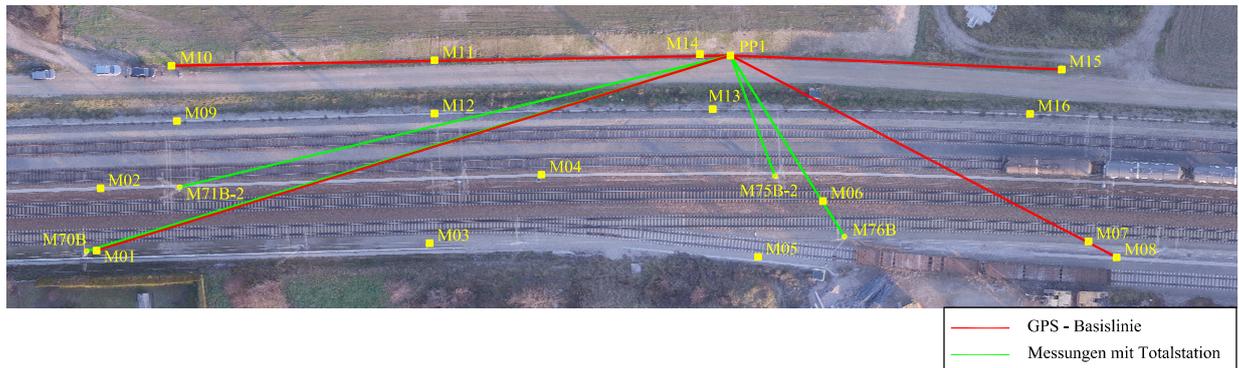


Abbildung 5.12: Übersichtsplan der ausgelegten und vermessenen Passmarken im Bereich der Teststrecke. Die roten Verbindungen stellen die GPS-Basislinien dar, die mittels statischer GPS-Messungen bestimmt wurden. Die grünen Verbindungen sind die Visuren zu den Mastbolzen für die freie Stationierung der Totalstation am PP1.

Messergebnisse innerhalb eines Koordinatensystems vorliegen. Der terrestrisch vermessene Bestandsplan liegt im Landeskoordinatensystem vor, wobei speziell die Mastbolzen mit höchster Präzision tachymetrisch eingemessen wurden. Ausgehend von den Mastbolzen wurden über eine freie Stationierung (PP1 in Abb. 5.12) der Totalstation die Passmarken mit einer Präzision von 5mm in Lage und Höhe tachymetrisch erfasst.

Die Positionen des uLFZ während des Fluges sollen ausgehend von einer Basisstation mittels GPS-Basislinien erfasst werden. Damit auch die GPS-Basislinien bzw. die daraus resultierenden Positionskordinaten im Koordinatensystem des GPS (WGS84) in weiterer Folge in das Landeskoordinatensystem eingebettet werden können, müssen die Transformationsparameter zwischen den beiden Koordinatensystemen bestimmt werden.

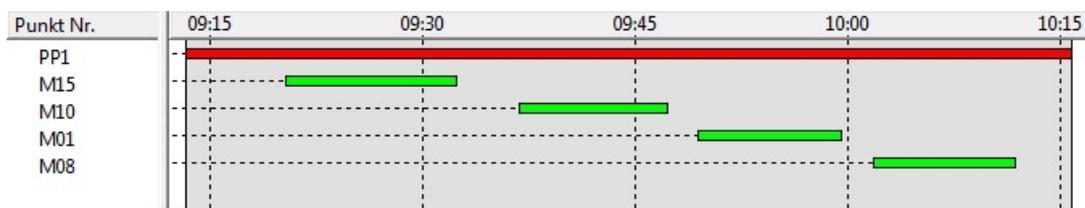


Abbildung 5.13: Zeiten der statischen GPS-Rohdatenaufzeichnung auf dem Punkt PP1 und den Passmarken M01, M08, M10 und M15 für die Basislinienauswertung zwischen den Punkten und der späteren Bestimmung der Transformationsparameter zwischen WGS84 und Landesystem.

Für diesen Zweck wurden auf den vier Passmarken M01, M08, M10 und M15 sowie auf dem Punkt PP1 statische GPS-Rohdatenaufzeichnungen von mind. 10 Minuten durchführt. In der

Abbildung 5.13 sind die Beobachtungszeiten dargestellt. Ausgehend von der Basisstation PP1 als Referenz, welche zuvor mittels *Single Point Positioning (SPP)* näherungsweise im WGS84 koordinativ bestimmt wurde, konnten mittels Basislinienauswertung auch die WGS84-Koordinaten der vier Passmarken berechnet werden. Bei allen Basislinien konnten die Mehrdeutigkeiten fixiert werden, wodurch Standardabweichungen im Millimeterbereich erreicht werden konnten (vgl. Kapitel 3.3.2). Die Auswertung erfolgte mit dem Programm *Leica Geo Office*.

### 5.3 Befliegung

Die Befliegung des Testgebiets erfolgte am 2. Dezember 2013 zwischen 14:45 und 15:20. Auf Grund von technischen Problemen gleich zu Beginn erfolgte der Start erst zwei Stunden später als ursprünglich geplant. Im Hinblick auf die Satellitenverfügbarkeit stellte das zwar kein Problem dar (Abb.5.8), jedoch herrschte an diesem Tag überwiegend Sonnenschein der dazu führte, dass zum Zeitpunkt der Aufnahmen bereits sehr lange Schatten aufgetreten sind. Auf Grund der früh einsetzenden Dämmerung mussten außerdem die Belichtungszeit ( $1/320$ ) und Blendenzahl ( $f/5.6$ ), sowie die ISO-Empfindlichkeit (ISO-400) entsprechend angepasst werden.

Die Blendenzahl stellt das Verhältnis zwischen Brennweite und dem Durchmesser der Eintrittspupille dar. Eine große Blendenzahl liefert grundsätzlich eine größere Schärfentiefe, jedoch muss der Sensor der Kamera entsprechend lange belichtet werden, um nicht zu dunkle Abbildungen zu erhalten. Befindet sich die Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme jedoch in Bewegung, das beim Einsatz mit einem uLFZ unweigerlich der Fall ist, führt eine zu lange Belichtungszeit zu unscharfen Abbildungen. Die ISO-Empfindlichkeit ist ein Maß für die Lichtempfindlichkeit des Sensors, die mit einem niedrigen ISO-Wert sinkt. Mit einem hohen ISO-Wert können zwar kürzere Belichtungszeiten gewählt werden, jedoch führt ein hoher ISO-Wert zu einem Rauschen im Bild und die Qualität sinkt.

Bei den vorherrschenden Lichtverhältnissen musste letztlich ein Kompromiss gewählt werden. Die Abbildungen waren jedoch für den späteren photogrammetrischen Auswerteprozess von zufriedenstellender Qualität.

Die Abbildung 5.14 zeigt ein beispielhaftes Foto mit Detailausschnitten. In den Ausschnitten 1 und 2 sind die Passpunkte in Form eines roten Kreuzes und einer weißen Passmarke deutlich zu erkennen. Die Größe der Passmarke (20cm) könnte grundsätzlich kleiner gewählt werden, jedoch ist die Unterscheidbarkeit zu anderen Objekten (helle Steine etc.) in dieser Größenordnung einfacher.

Im Ausschnitt 3 ist ein Mastbolzen vergrößert dargestellt. Auf Grund des Kontrastunterschieds

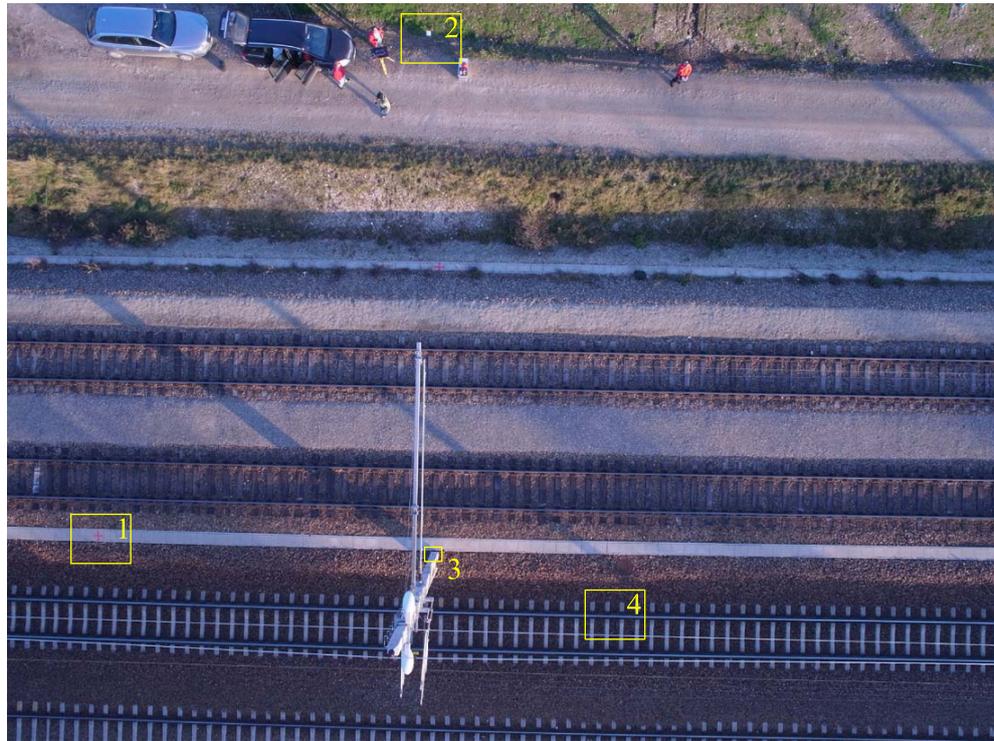


Abbildung 5.14: Die Abbildung zeigt ein beispielhaftes Bild und Detailausschnitte aus 40m Höhe mit einer Belichtungszeit von  $1/320$ , einer Blendenzahl von  $f/5.6$  und ISO-400. Darunter sind die Detailausschnitte von Markierungen (Passmarken (1) und Kreuze (2)), Mastbolzen (3) und Gleise (4) dargestellt.

zwischen hellem Betonmasten und dunklen Mastbolzen und der Tatsache, dass der Hauptpunkt im Bild oberhalb der Abbildung des Mastbolzen liegt, ist dieser gut zu erkennen. Der Ausschnitt 4 zeigt einen vergrößerten Gleisbereich. Sowohl die Gleise selbst als auch die Schwellen, über die später die photogrammetrische Auswertung der Gleishöhen erfolgen soll, sind gut erkennbar.

Die Befliegung selbst wurde wie geplant (vgl. Kapitel 5.2) in zwei Etappen durchgeführt. Die erste Befliegung erfolgte auf einer Höhe von 40m, die Zweite auf einer Höhe von 70m. Ent-

gegen der Planung wurde der zweite Flug mit einer Längsüberlappung von 80% geflogen. Daraus ergibt sich zwar eine doppelte Anzahl an Bildern pro Streifen, diese Vorgehensweise bringt aber auch einen Vorteil mit sich. Durch Windeinfluss kann es zu Neigungen des uLFZ zum Zeitpunkt der Aufnahmen kommen und dadurch der Überlappungsbereich verringert werden. Tritt dies bei zwei aneinander folgenden Bildern in die entgegengesetzte Richtung auf, ist eine durchgehende Überlappung unter Umständen nicht mehr gegeben. Die doppelte Anzahl an Aufnahmen setzt jedoch voraus, dass genügend Zeit bzw. Akkukapazität vorhanden ist. Vor und zwischen den Befliegungen wurden die Kapazitäten der Akkus geprüft und zur Sicherheit getauscht, die Rotation des uLFZ um sämtliche Achsen für die Magnetometer- und Accelerometerkalibrierung (vgl. Wieser (2013)) vorgenommen und die neue Wegpunktliste an das uLFZ gesendet.

Auf dem Bodenpunkt PP1 (Abb.5.12) wurde ein „Leica GPS 1200“ stationiert, welches während der gesamten Befliegungszeit GPS-Rohdaten mit einer Frequenz von 5Hz aufzeichnete und somit zur Basislinienbestimmung herangezogen werden konnte. Im Anschluss an die Befliegungen wurden die aufgezeichneten Rohdaten grob auf deren Vollständigkeit überprüft. Die beiden hintereinander durchgeführten Befliegungen selbst konnten ohne Probleme durchgeführt werden.

## Kapitel 6

# Projektauswertung und Qualitätsuntersuchung der direkten Georeferenzierung

Im sechsten Kapitel werden die Messdaten der Befliegung des Testgebiets entlang der Bahntrasse ausgewertet und eine Qualitätsuntersuchung der Ergebnisse wird vorgestellt. Im Abschnitt 6.1 werden die Messdaten beider Flüge mit dem im Kapitel 3.6 vorgestellten Kalman-Filter ausgewertet. Im Anschluss erfolgt im Kapitel 6.2 ein Vergleich der Ergebnisse der direkten und indirekten Georeferenzierung. Die Auswirkungen der Unsicherheiten der direkten Georeferenzierung auf die Objektgenauigkeit am Boden wird im Abschnitt 6.2.3 diskutiert und es wird festgestellt, dass die erreichbare Genauigkeit den Anforderungen im cm-Bereich nicht genügen.

Der im Kapitel 6.3 durchgeführte Vergleich der indirekten Georeferenzierung zu einer unabhängigen terrestrischen Vermessung anhand diskreter Objekte weist je nach Objektart Standardabweichungen von bis zu 2,6cm auf. Im Anschluss wird eine mögliche Vorgehensweise zur Bestandserfassung eines linearen Infrastrukturobjektes diskutiert.

Im abschließenden Unterkapitel 6.4 werden die geplanten Wegpunkte den tatsächlich angefliegenen Positionen gegenübergestellt und die Auswirkung der Abweichungen auf die photogrammetrische Auswertung diskutiert.

### 6.1 Auswertung

Die Auswertung der GPS-Rohdaten erfolgte wie bei den Testmessungen am Messdach mit dem Programm „RTKLIB“ (vgl. Kapitel 4.3.2). Auch bei den Testflügen entlang der Bahntrasse konnten die Mehrdeutigkeiten gelöst und die näherungsweise berechneten WGS84-Koordinaten mit den bereits bestimmten Parametern (vgl. Kapitel 5.2.5) ins Landessystem

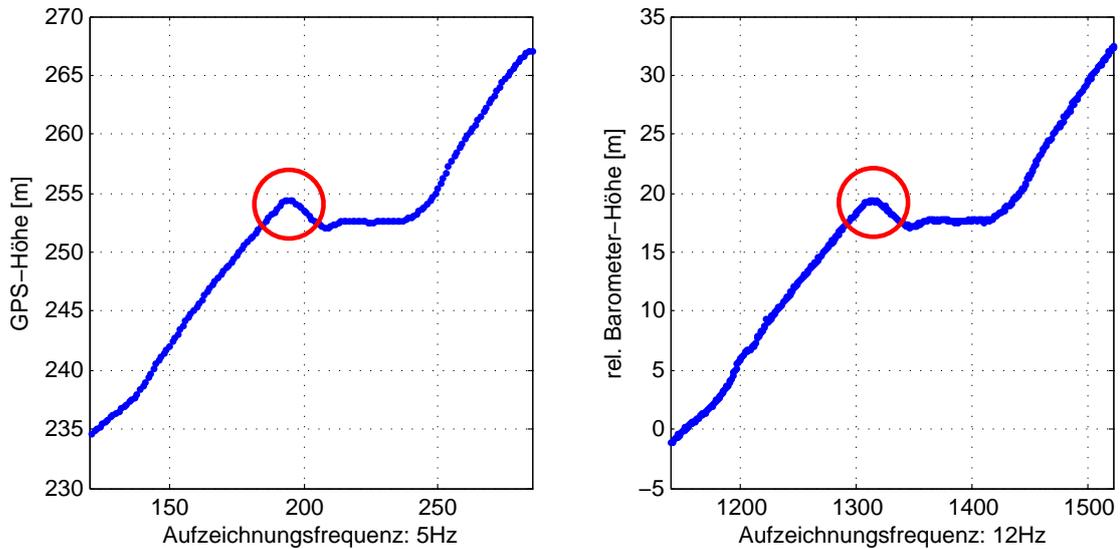


Abbildung 6.1: Höhenwerte der GPS-Auswertung (links) und die relative Höhe des Barometers (rechts) vom Flug in 40m Höhe. In beiden Zeitreihen ist ein Peak zu erkennen, über den die Zeitsynchronisation erfolgte (rote Kreise). Auch beim zweiten Flug konnte über diese Methode die Synchronisation erfolgen.

transformiert werden. Vor der weiteren Auswertung wurden nochmals sämtliche aufgezeichneten Rohdaten auf deren Vollständigkeit überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass bei beiden Flügen die *Time to First Fix* (TTFF) (vgl. Kapitel 4.3.2) des GPS vom *APM2.0* noch nicht erreicht war und somit keine GPS-Zeiten in den Rohdaten des *APM2.0* vorhanden sind. Daher musste eine Alternative zur geplanten Synchronisierung gefunden werden.

Eine Möglichkeit zur Synchronisation der Rohdaten des *APM2.0* und den GPS-Daten stellen die Werte des Barometers und die Höhenwerte aus der DGPS Auswertung dar. In der linken Abbildung von (6.1) ist die Höhenkomponente der GPS-Auswertung dargestellt, in der rechten die Höhenkomponente des Barometers. Als Anhaltspunkt für die Synchronisierung konnte bei beiden Flügen ein Peak in beiden Zeitreihen verwendet werden (rote Kreise in der Abbildung 6.1). Zum Peak in der barometrisch bestimmten Höhe wurde in den Aufzeichnungen des *APM2.0* der nächste GPS-Wert bzw. dessen Mikrocontroller-Zeit ermittelt und der GPS-Zeit des Peaks der GPS-Auswertung gegenübergestellt. Durch die weiteren Auswertungen bzw. den späteren Vergleich mit der indirekten Georeferenzierung konnte die Richtigkeit der Synchronisation gezeigt werden. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass es sich bei dieser Methode um eine improvisierte Lösung handelt. Dennoch wäre es denkbar, zur Absicherung bewusst derartige Flugmanöver (kleine Höhenversätze) zu Beginn und am Ende des Fluges durchzuführen.

Nach der erfolgreichen Synchronisation wurde die Auswertung analog zu den Auswertungen

der Testmessungen durchgeführt.

### 6.1.1 Auswertung des Fluges in 40 m Höhe

Die Berechnung der indirekten Georeferenzierung der 26 Luftbilder erfolgte über alle 16 Passpunkte (vgl. Abb. 5.12) und 97793 automatische detektierte Verknüpfungspunkte. Im Zuge des Bündelblockausgleichs wurde eine Simultankalibrierung der Kamera durchgeführt. Die Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) an den Passpunktkoordinaten betragen

- $\sigma_{RW} = 0,006m$
- $\sigma_{HW} = 0,004m$
- $\sigma_H = 0,010m$

Es konnte dadurch gezeigt werden, dass die Genauigkeitsanforderungen im Subzentimeter-Bereich zumindest mit einer indirekten Georeferenzierung erreicht und bspw. die Anforderungen der ÖBB (vgl. Kapitel 2.1) erfüllt werden können.

Die Auswertung mit der Kalman-Filterung ist in den Abbildungen 6.2 und 6.3 dargestellt.

Ausgehend vom Startpunkt wurde wie geplant der erste Punkt des ersten Streifens direkt angefliegen. Anhand der Höhenkomponente ist der Ablauf des Anstiegs der Höhe in Richtung des ersten Punktes erkennbar. Bezogen auf die Berechnungszeit der Kalman-Filterung hob der Hexakopter nach rund 25 Sekunden ab. Ca. 15 Sekunden nach dem Start wurde die Funktion *Position Hold* (vgl. Kapitel 2.4.2) aktiviert und kurz darauf die Höhe fixiert. In der unteren Abbildung von 6.3 ist die Ausrichtung des Hexakopters anhand des Gier-Winkels zu sehen. Nach dem Start erfolgte zunächst eine manuelle Drehung des Hexakopters, bis die x-Achse des *APM2.0* (zufällig) in Richtung Norden ausgerichtet war. Nach etwa 50 Sekunden wurde der Wegpunktflug gestartet. Wie im Kapitel 2.4.2 beschrieben, erfolgt im Zuge der Aktivierung des Wegpunktfluges auch die geplante Ausrichtung des Hexakopters. Nach etwa 85 Sekunden wurde der erste Wegpunkte erreicht bzw. die Kamera ausgelöst.

In der Abbildung 6.3 sind anhand des Nick-Winkels die Beschleunigungen bzw. die dadurch verbundenen Schrägstellungen des Hexakopters zwischen den Wegpunkten gut erkennbar. Nach etwa 180 Sekunden ist anhand des Roll-Winkels ebenso der Wechsel auf den zweiten Streifen nach dem letzten Foto des ersten Streifens deutlich zu erkennen. Sowohl beim Nick- als auch beim Roll-Winkel treten demnach Neigungen von bis zu  $15^\circ$  auf.

Die zeitlichen Abstände zwischen den weiteren Fotoaufnahmen waren mit durchschnittlich 8 Sekunden in etwa konstant bis nach ca. 4:40 Minuten das letzte Foto erstellt wurde. Nach der Aktivierung der *Coming Home*-Funktion erfolgte die manuelle Landung in der Nähe der Startposition nach knapp 6 Minuten. Die reine Flugzeit beträgt demnach 5:35 Minuten.

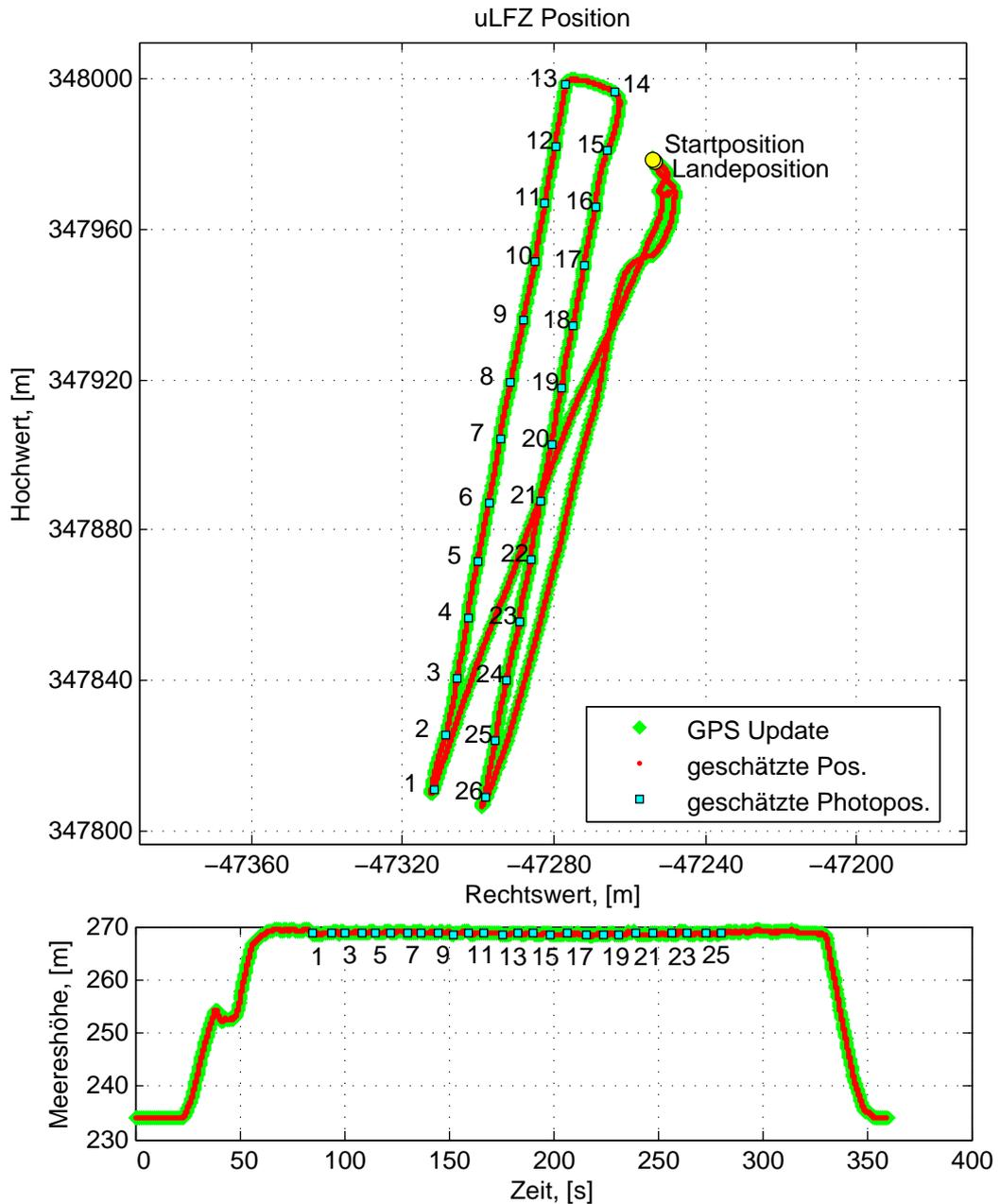


Abbildung 6.2: **Flug 1 (40m)**: Darstellung der Trajektorie des Testfluges entlang der Eisenbahntrasse in Herzogenburg (Oben: Lage, Unten: Höhe), ausgewertet mittels Kalman-Filterung im Landeskoordinatensystem. Die Positionen der Fotos sind durch die cyanfärbigen Quadrate gekennzeichnet.

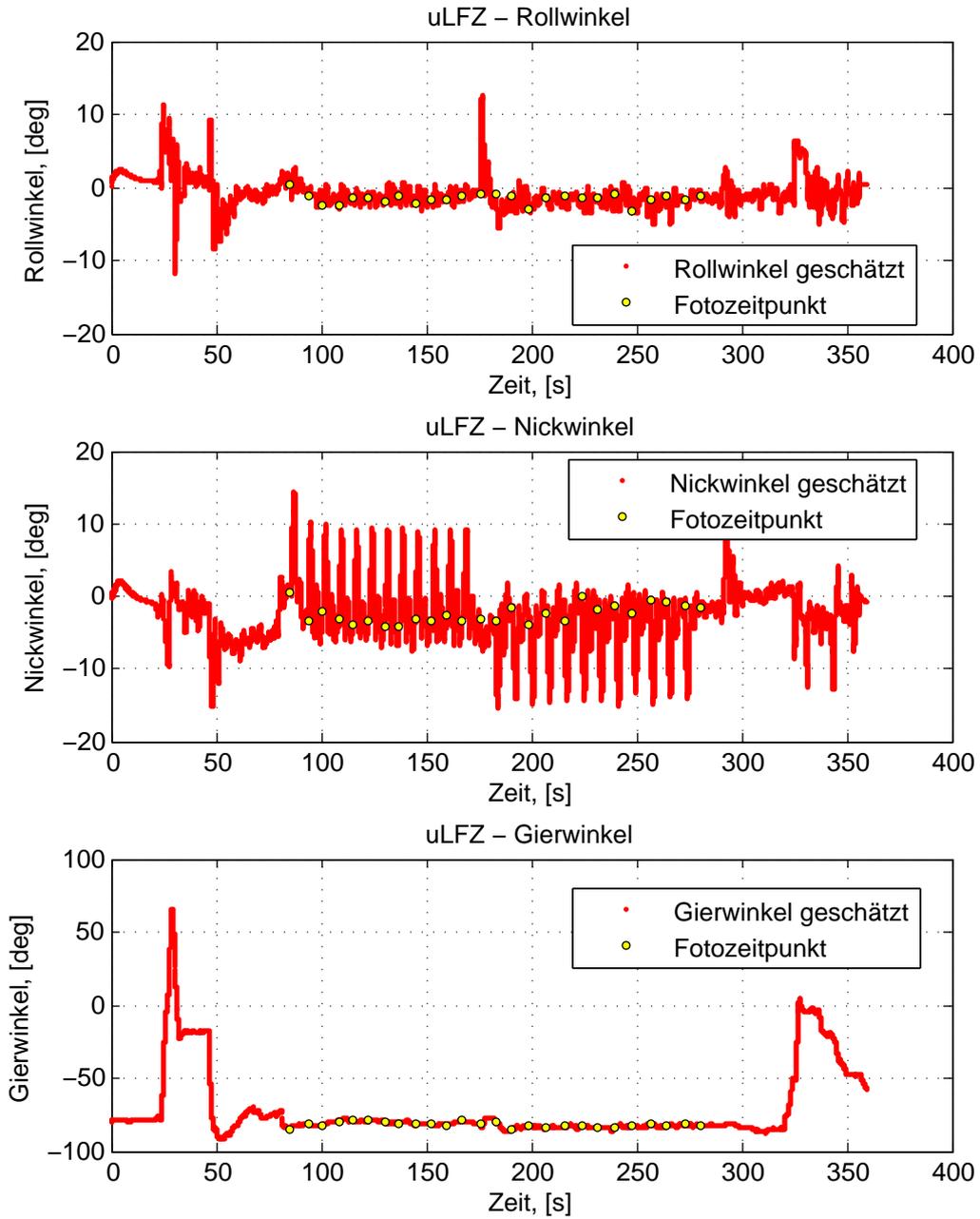


Abbildung 6.3: **Flug 1 (40m)**: Darstellung der Orientierungslösung des Testfluges entlang der Eisenbahntrasse in Herzogenburg mit dem Kalman-Filter. Die gelben Kreise zeigen die Zeitpunkte der Kameraauslösung.

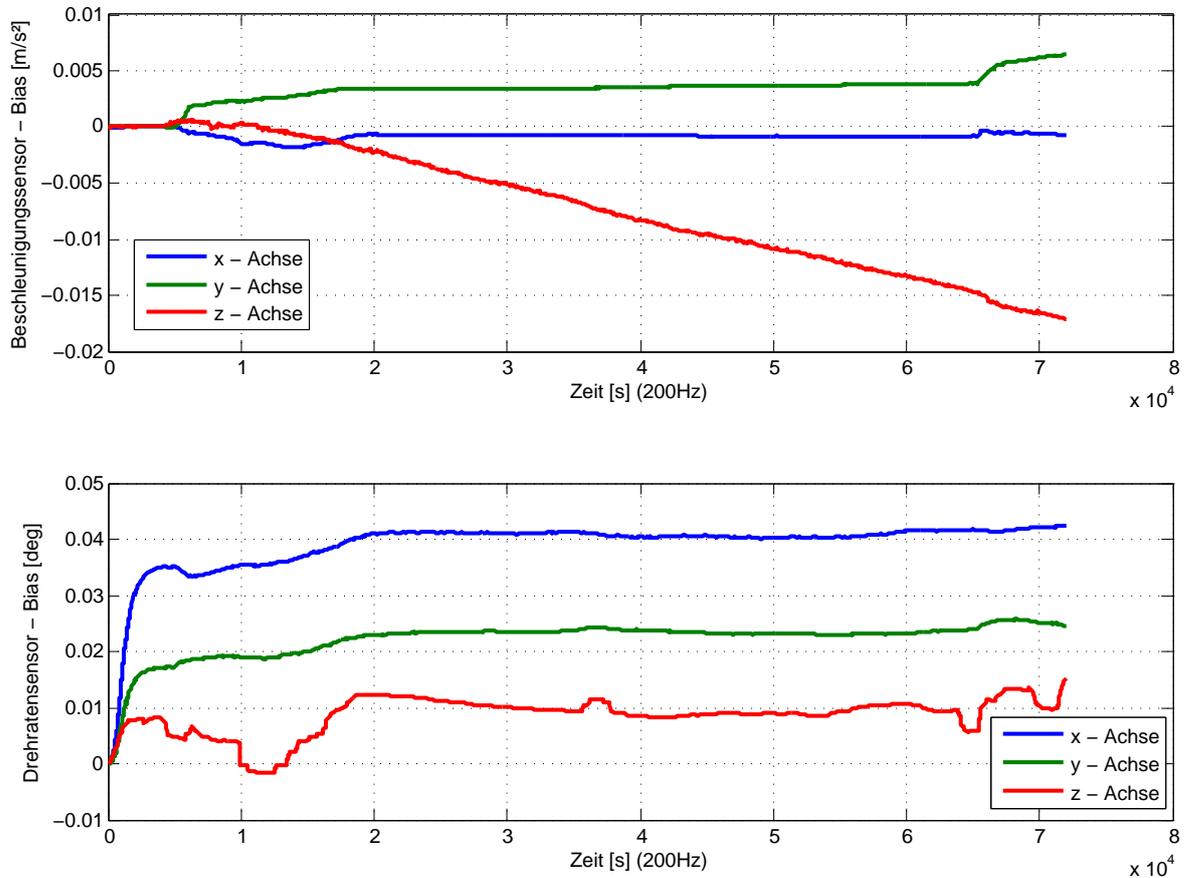


Abbildung 6.4: **Flug 1 (40m)**: Darstellung der vom Kalman-Filter bestimmten Biase der Beschleunigungs- und Drehratensensoren. Oben: Biase der Beschleunigungssensoren - die horizontalen Komponenten (x, y) weisen einen zeitlich konstanten Bias auf, in z-Richtung ist eine zeitliche Drift deutlich erkennbar. Unten: konstante Biase in allen Achsrichtungen der Drehratensensoren

Die durch die Kalman-Filterung geschätzten Biase von Drehraten- und Beschleunigungssensoren sind in der Abbildung 6.4 dargestellt. Während beim Beschleunigungssensor der Bias der horizontalen Komponenten einen konstanten Wert annehmen, tritt bei der vertikalen Komponente ein Driftverhalten auf. Der Grund für dieses Driftverhalten liegt in der Abweichung zur im EKF angenommenen Schwerebeschleunigung von  $9,81 \frac{m}{s^2}$  und der Schwerebeschleunigung, die aus der Konvertierung der ADC-Werte in die SI-Einheiten stammt. Beim Drehratensensor ist in allen Achsrichtungen ein konstanter Bias zu beobachten (vgl. Kapitel 3.3.1.3).

### 6.1.2 Auswertung des Fluges in 70 m Höhe

Die Auswertung für den zweiten Flug in 70m Höhe erfolgte analog zum ersten Flug. Die indirekte Georeferenzierung der 16 Luftbilder wurde über alle 16 Passpunkte und 62518 automatisch detektierte Verknüpfungspunkte berechnet. Eine Simultankalibrierung der Kamera wurde auch bei diesem Flug vorgenommen. Die Auswertung der indirekten Georeferenzierung führte zu Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) an den Passpunkten von

- $\sigma_{RW} = 0,012m$
- $\sigma_{HW} = 0,018m$
- $\sigma_H = 0,012m$

Auch bei einer Höhe von 70m ist die erreichbare Genauigkeit am Boden bei Objekten wie Kabelschächten, Kanaldeckel, etc. ausreichend (vgl. Kapitel 5.1). Während der Auswertung hat sich jedoch gezeigt, dass manche Details in den Bildern nicht mehr gut erkennbar sind und die Auswertung teilweise nicht mehr zuverlässig erfolgen kann. Dieser Umstand könnte z.B. durch Aufnahmen bei adäquaten Lichtverhältnissen verbessert werden (vgl. Kapitel 5.3).

Die Auswertung des zweiten Fluges mit der Kalman-Filterung ist in den Abbildungen 6.5 und 6.6 zu sehen. Bezogen auf die Berechnungszeit der Kalman-Filterung erfolgte der Start nach ca. 90 Sekunden, das erste Foto wurde nach 2:25 Minuten erstellt. Die Aufnahme der restlichen Bilder erfolgte durchschnittlich alle 14 Sekunden, mit Ausnahme des zeitlichen Abstandes von etwa 7 Sekunden zwischen dem letzten Foto des ersten Streifens und dem ersten Foto des zweiten Streifens. Nach knapp 6 Minuten wurde das letzte Foto ausgelöst, die Landung erfolgte nach etwa 6:50 Minuten. Die reine Flugzeit beträgt demnach 5:20 Minuten und ist somit der Flugzeit des ersten Fluges ähnlich (5:35 Minuten).

Die Biase von Beschleunigungs- und Drehratensensor zeigen ein ähnliches Verhalten wie beim ersten Flug und nehmen auch ähnliche Werte an (Abb. 6.7).

Im folgenden Abschnitt wird die Qualität der direkten Georeferenzierung durch einen Vergleich der Ergebnisse mit jenen aus der indirekten Georeferenzierung beurteilt.

## 6.2 Vergleich der direkten zur indirekten Georeferenzierung

Durch den Vergleich zwischen direkter und indirekter Georeferenzierung kann auf die erreichbare Genauigkeit der direkten Georeferenzierung geschlossen werden. Zum Vergleich stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Anbringung einer individuell berechneten *Mounting-Calibration*

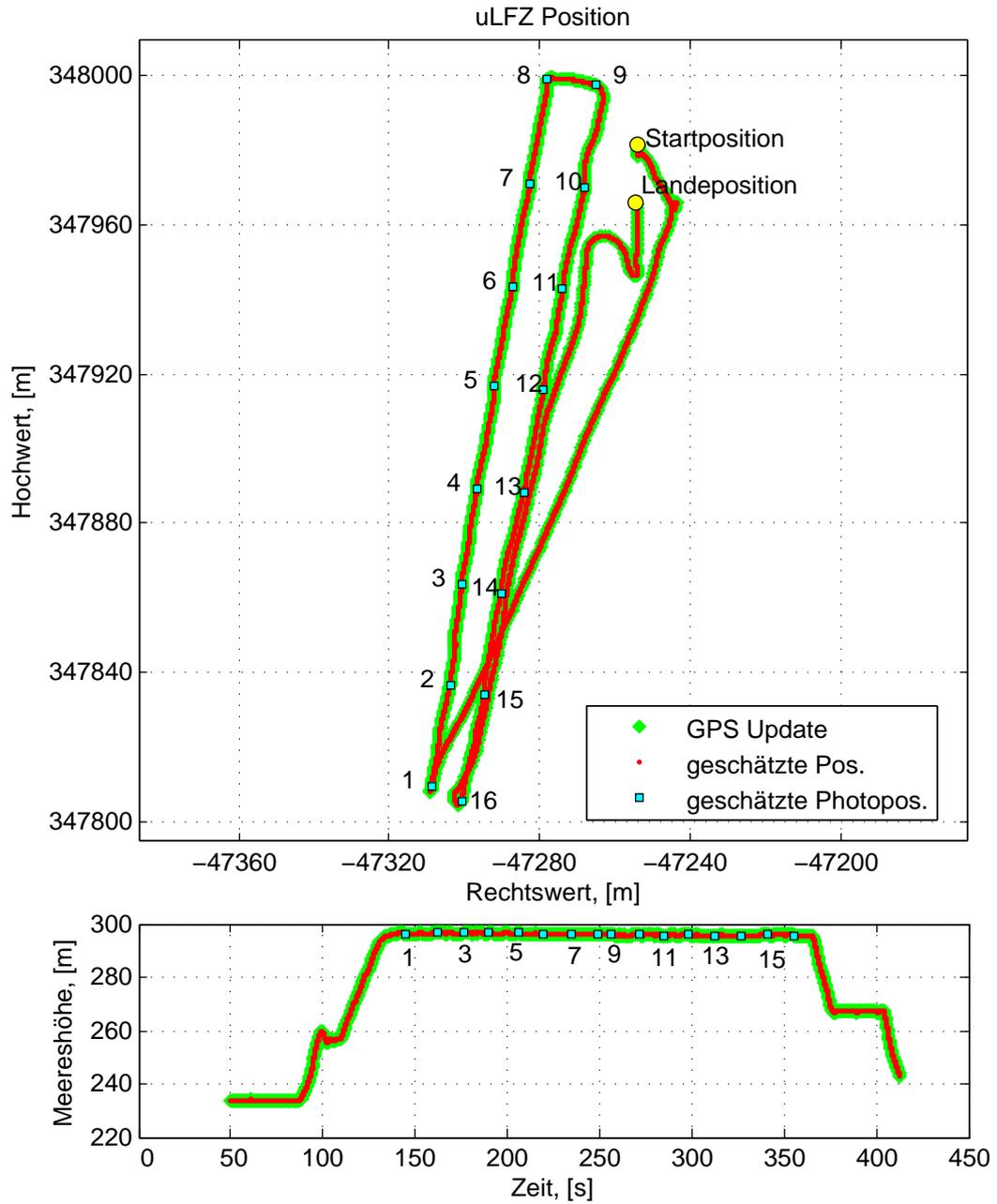


Abbildung 6.5: **Flug 2 (70m)**: Darstellung der Trajektorie des Testfluges entlang der Eisenbahntrasse in Herzogenburg (Oben: Lage, Unten: Höhe), ausgewertet mittels Kalman-Filterung. Die Positionen der Fotos sind durch die cyanfärbigen Quadrate gekennzeichnet.

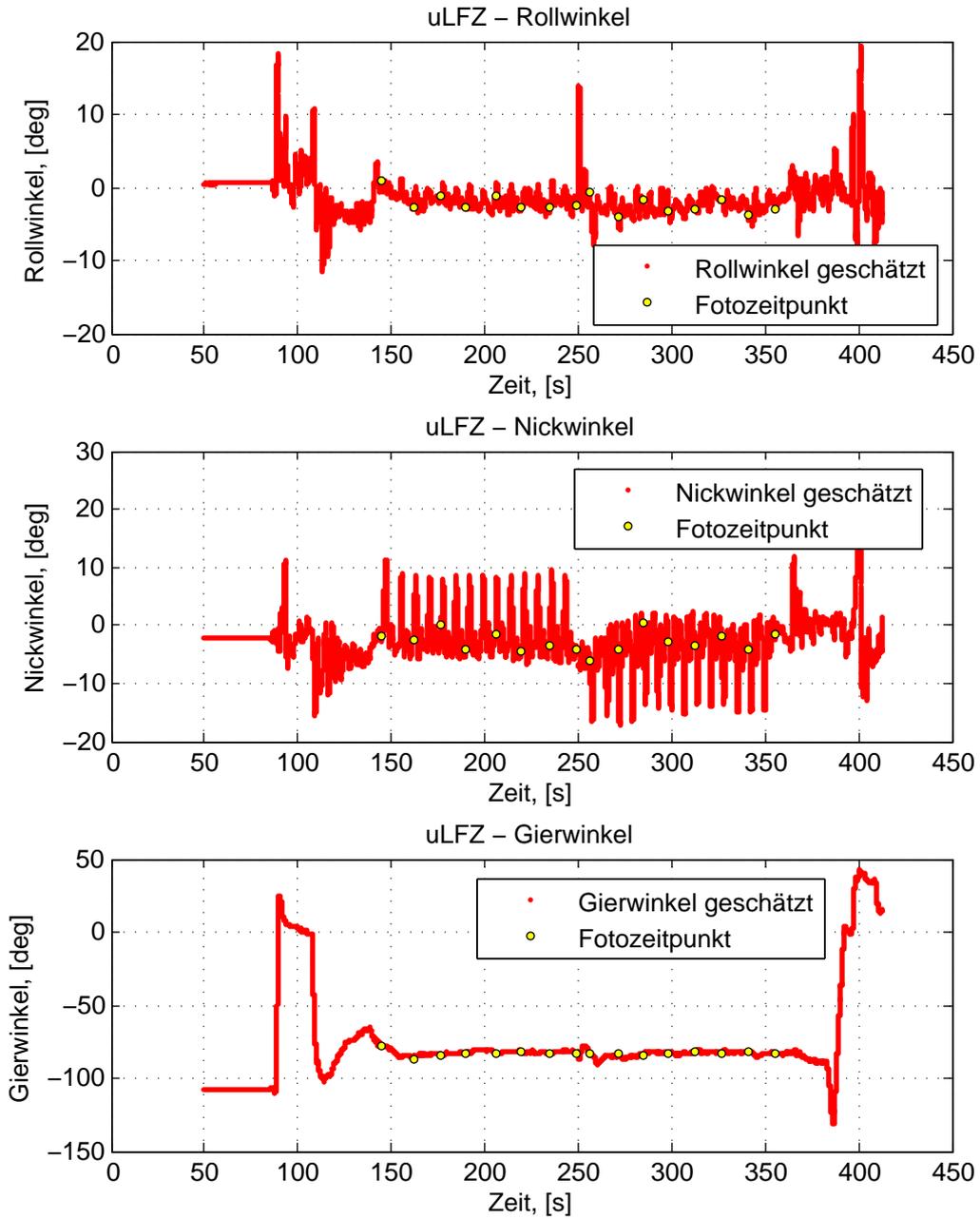


Abbildung 6.6: **Flug 2 (70m)**: Darstellung der Orientierungslösung des Testfluges entlang der Eisenbahntrasse in Herzogenburg mit dem Kalman-Filter. Die gelben Kreise zeigen die Zeitpunkte der Kameraauslösung.

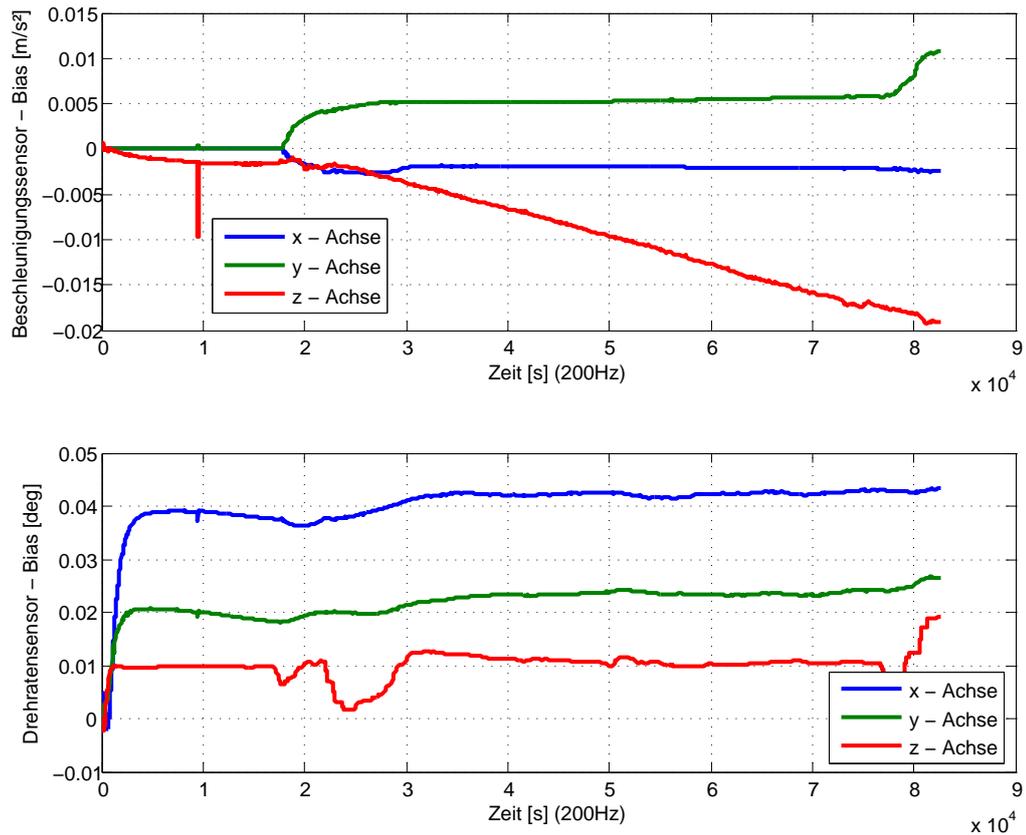


Abbildung 6.7: **Flug 2 (70m)**: Darstellung der vom Kalman-Filter bestimmten Biase der Beschleunigungs- und Drehratensensoren. Oben: Biase der Beschleunigungssensoren - die horizontalen Komponenten (x, y) weisen einen zeitlich konstanten Bias auf, in z-Richtung ist eine zeitliche Drift deutlich erkennbar. Unten: konstante Biase in allen Achsrichtungen der Drehratensensoren

2. Berücksichtigung der im Kapitel 4.3.3 bestimmten *Mounting-Calibration*

In den folgenden beiden Unterkapiteln werden jeweils die Ergebnisse der beiden Flüge betrachtet.

**6.2.1 Vergleich der Ergebnisse des Fluges in 40 m Höhe**

In der Abbildung 6.8 sind die Differenzen für den Flug in 40m Höhe wie bereits im Kapitel 4.3.3 beschrieben dargestellt. Die direkt ermittelten Differenzen zwischen direkter und indirekter Georeferenzierung sind in den linken Abbildungen angeführt. Aus diesen Differenzen wurde eine für diesen Flug individuelle *Mounting-Calibration* berechnet. In der Tabelle 6.1 sind die berechneten Werte angeführt.

Tabelle 6.1: Werte der individuellen *Mounting-Calibration* für den ersten Flug in 40m Höhe.

<i>Parameter</i>	Flug 1: 40m	
	<i>Wert</i>	$1\sigma$
$\Delta\omega$ [deg]	0,862	0,645
$\Delta\phi$ [deg]	-1,271	0,474
$\Delta\kappa$ [deg]	0,769	1,263
$\Delta z$ [m]	0,297	0,016

In den rechten Abbildungen von 6.8 sind die um die *Mounting-Calibration* korrigierten Differenzen der Orientierung dargestellt. Bis auf die Werte des ersten Fotos liegen die Differenzen des Roll-Winkels stets unter  $1^\circ$ , die des Nick-Winkels großteils unter  $0,5^\circ$  und die Differenzen des Gier-Winkels bis auf zwei Fotos unter  $2^\circ$ .

In der Abbildung 6.9 sind die Differenzen der Positionslösungen dargestellt. Die Differenzen in Nord- und Ostrichtung nehmen nach der Berücksichtigung der *Mounting-Calibration* bzw. der Neigungskompensation  $< 3\text{cm}$  an (linke Abb. 6.9). Bei der Höhe ist eine Neigung der Flugstreifen zu erkennen. Vom ersten Foto des ersten Streifens (Fotos 1 bis 13) nimmt die Differenz ab, beginnend beim ersten Punkt des zweiten Streifens (Fotos 14 bis 26) nimmt die Differenz bis zum letzten Foto wieder zu. Offensichtlich wirken sich bei der indirekten Georeferenzierung die systematischen Fehlereinflüsse, die im Zuge der Kamerakalibrierung nicht berücksichtigt werden, auf die äußere Orientierung aus. Dieses Verhalten wird beim zweiten Flug noch deutlicher zu sehen sein (vgl. Kapitel 6.2.2).

Da der Vorteil einer direkten Georeferenzierung im Verzicht auf Passpunkte liegt, ist die Berechnung einer individuellen *Mounting-Calibration* grundsätzlich nicht immer möglich. Daher

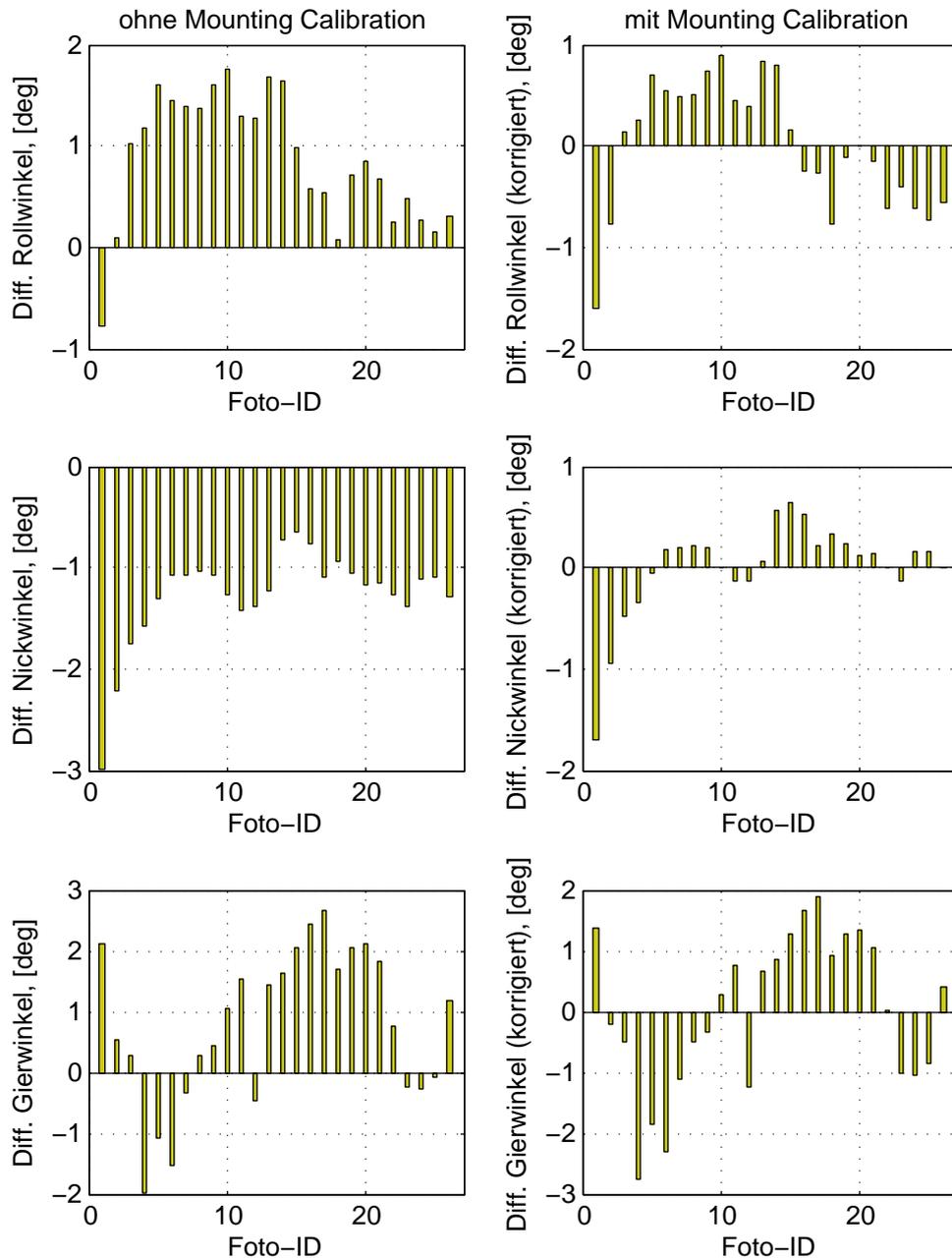


Abbildung 6.8: **Flug 1 (40m)**: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden **Orientierungswerten** und den aus den indirekt bestimmten Orientierungen der Kamera. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer *Mounting-Calibration*. Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der individuell berechneten *Mounting-Calibration*.

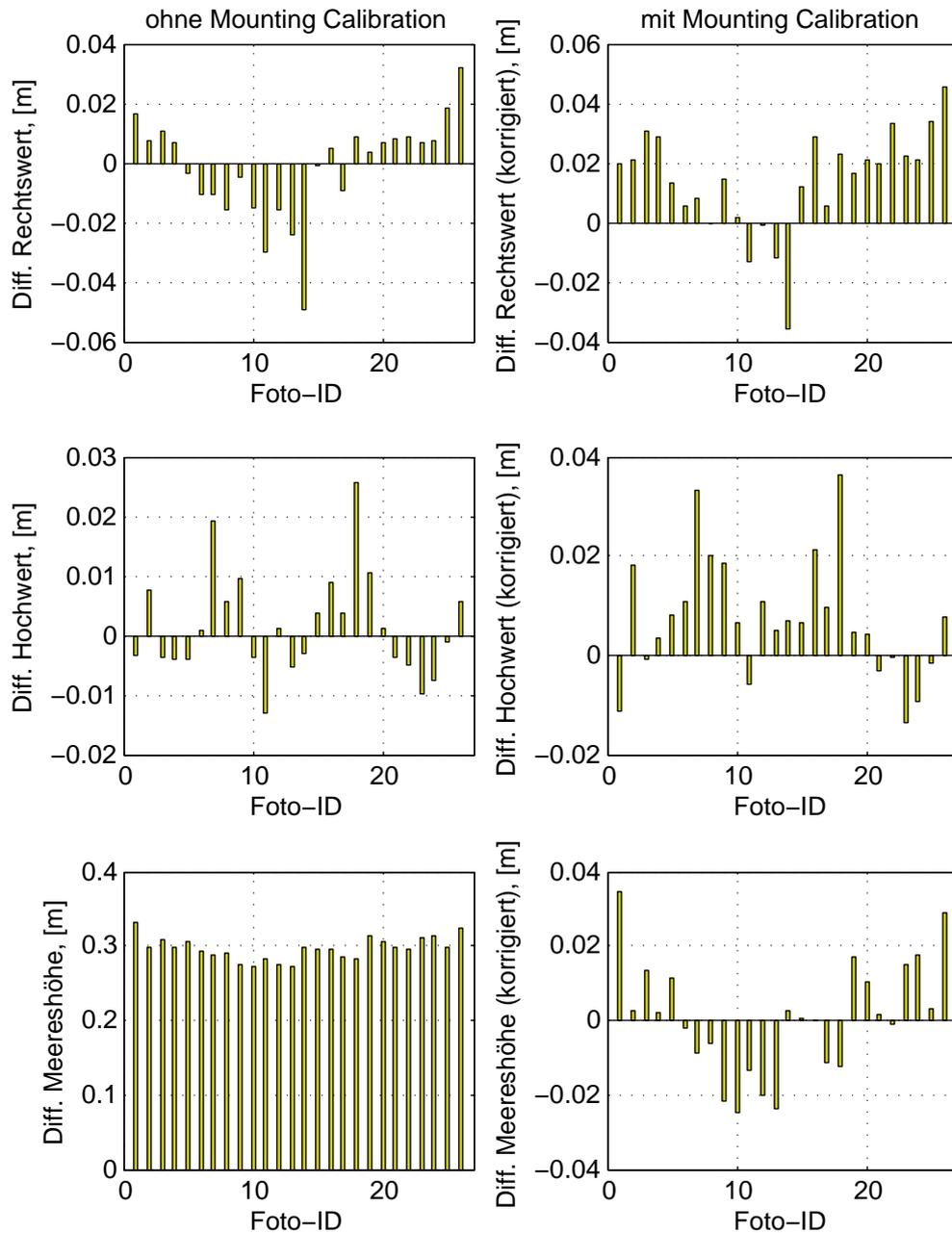


Abbildung 6.9: **Flug 1 (40m)**: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden **GPS-Positionen** und den Positionen der indirekt bestimmten Projektionszentren. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer *Mounting-Calibration*. Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der individuell berechneten *Mounting-Calibration*.

muss im Falle einer direkten Georeferenzierung auf bereits vorhandene Werte einer im Vorfeld bestimmten *Mounting-Calibration* zurückgegriffen werden. Der Vergleich zwischen der *Mounting-Calibration* am Messdach (Tabelle 4.7) und jener vom ersten Flug (Tabelle 6.1) zeigt verhältnismäßig große Differenzen. Die Differenzen betragen beim Rollwinkel ( $\approx 2^\circ$ ), beim Nick-Winkel ( $\approx -0,3^\circ$ ) und beim Gier-Winkel ( $\approx 0,9^\circ$ ). Eine mögliche Ursache für die Differenzen könnte die Montierung der Kamera sein. Da diese nur über eine Stativschraube an einem Punkt befestigt ist, könnte es zwischen der Demontage und dem erneuten Einsetzen der Kamera zu unterschiedlichen Ausrichtungen kommen. Eine Anpassung der mechanischen Verbindung zwischen Kamera und Kameraplattform könnte dieses Problem lösen.

Die Auswirkungen der Differenzen der *Mounting-Calibration* sind in der Abbildung 6.10 zu sehen. Während beim Nick- und Yaw-Winkel aufgrund der Differenz von ( $\approx -0,3^\circ$ ) die Werte etwas besser werden, kommt es bei den übrigen Winkeln kaum zu einer Verbesserung. Beim Roll-Winkel werden die Differenzen zwischen direkter und indirekter Georeferenzierung gar etwas größer.

Die individuelle *Mounting-Calibration* führt auch beim Offset  $\Delta z$  zwischen GPS-Antenne und Projektionszentrum zu einem anderen Wert. Die Differenz liegt hier bei 10cm. In der Abbildung 6.11 ist die Auswirkung dieser Differenz anhand der Höhe zu erkennen. Während die Differenzen in der Lage auch hier stets unter 4cm liegen, bleibt in der Höhe eine Differenz von etwa 10cm vorhanden.

In der Tabelle 6.2 sind die Differenzen zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Mittelwerte  $\bar{\Delta}$  und Standardabweichungen  $\sigma_{\Delta}$  der Differenzen zwischen direkter und indirekter Georeferenzierung des ersten Fluges in 40m Höhe.

Parameter	ohne <i>Mounting</i>		mit ind. <i>Mounting</i>		mit <i>Mounting</i> vom Dach	
	$\bar{\Delta}$	$\sigma_{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\sigma_{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\sigma_{\Delta}$
$\Delta\omega$ [°]	0,862	0,645	0,000	0,637	-2,048	0,640
$\Delta\phi$ [°]	-1,271	0,474	0,000	0,476	-0,419	0,483
$\Delta\kappa$ [°]	0,769	1,263	0,000	1,262	-0,868	1,259
$\Delta RW$ [m]	-0,002	0,017	0,014	0,017	0,014	0,018
$\Delta HW$ [m]	0,001	0,009	0,007	0,012	-0,004	0,014
$\Delta H$ [m]	0,297	0,016	0,000	0,015	-0,098	0,016

## 6.2.2 Vergleich der Ergebnisse des Fluges in 70 m Höhe

Die Ergebnisse des zweiten Fluges in 70m Höhe zeigten ein ähnliches Verhalten wie die des ersten Fluges, nur zum Teil ausgeprägter. In der Tabelle 6.3 sind die Ergebnisse der indi-

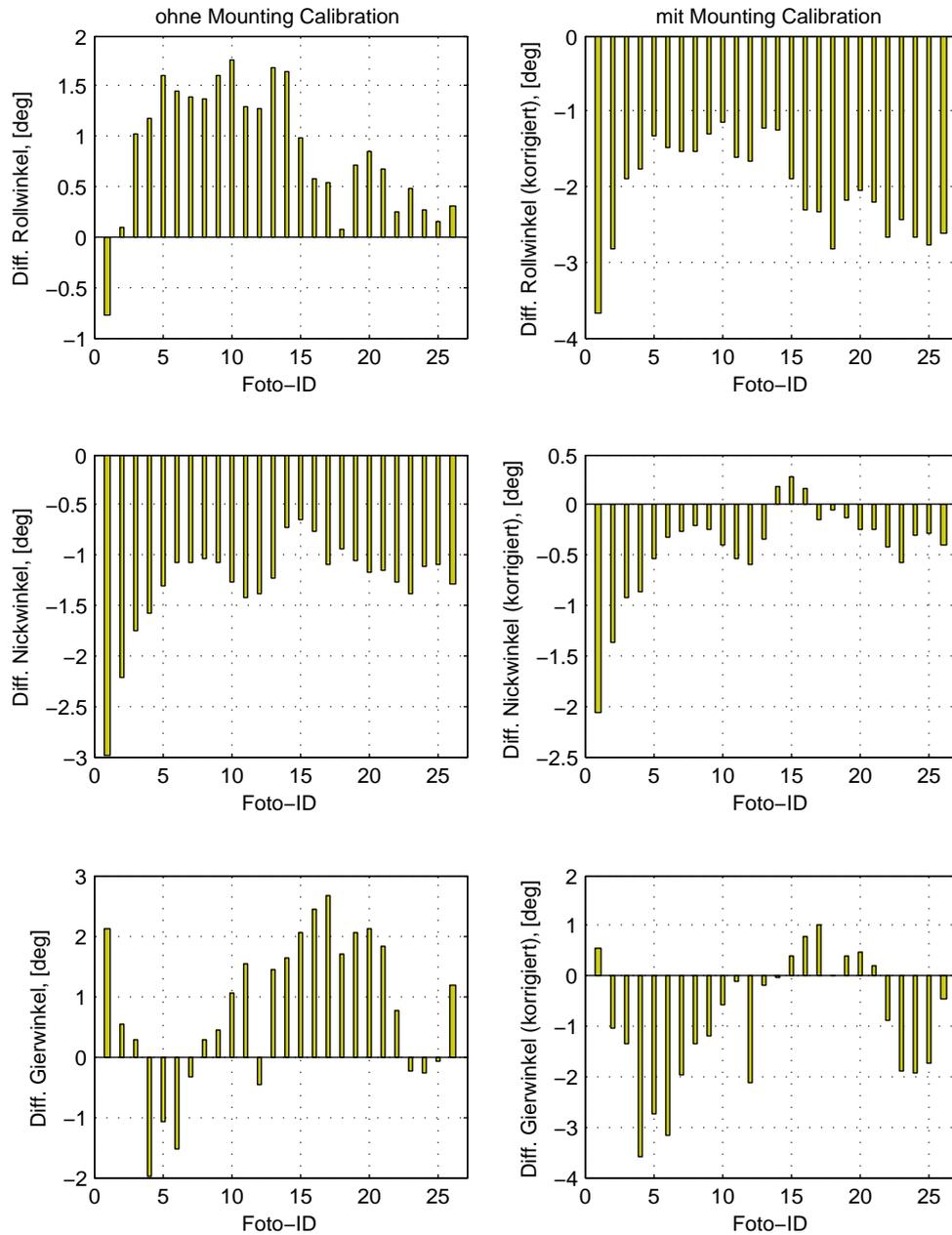


Abbildung 6.10: **Flug 1 (40m)**: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden **Orientierungswerten** und den aus den indirekt bestimmten Orientierungen der Kamera. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer *Mounting-Calibration*. Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der am Messdach bestimmten *Mounting-Calibration*.

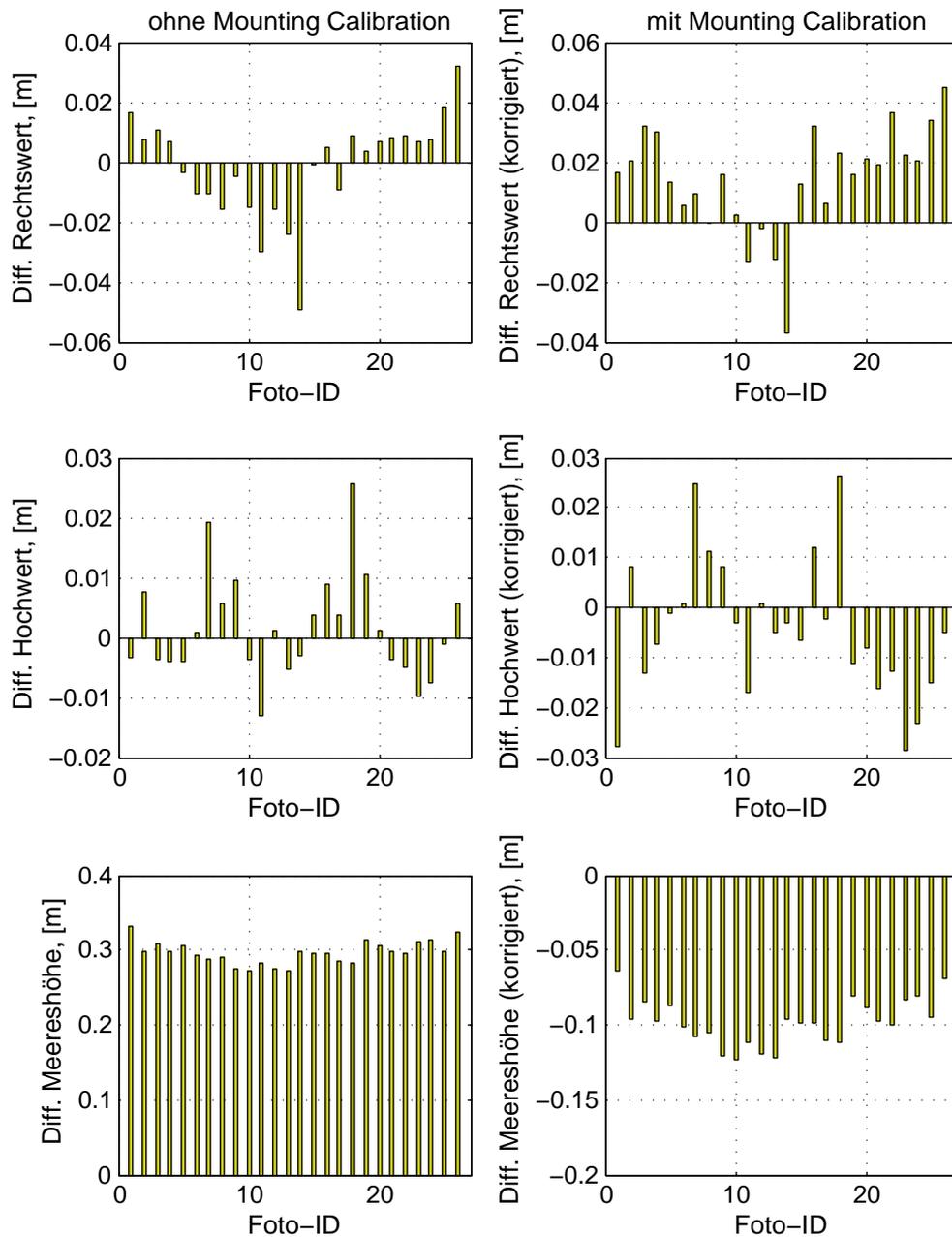


Abbildung 6.11: **Flug 1 (40m)**: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden **GPS-Positionen** und den Positionen der indirekt bestimmten Projektionszentren. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer *Mounting-Calibration*. Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der am Messdach bestimmten *Mounting-Calibration*.

viduellen *Mounting-Calibration* angeführt.

Tabelle 6.3: Werte der individuellen *Mounting-Calibration* für den zweiten Flug in 70m Höhe.

<i>Parameter</i>	Flug 2: 70m	
	<i>Wert</i>	$1\sigma$
$\Delta\omega$ [deg]	-1,105	0,839
$\Delta\phi$ [deg]	-1,463	0,493
$\Delta\kappa$ [deg]	-0,055	1,716
$\Delta z$ [m]	<b>0,625</b>	0,035

Die Differenzen nach Berücksichtigung der individuell berechneten *Mounting-Calibration* nimmt ähnliche Werte wie beim ersten Flug an (Abb. 6.12 und 6.13). Die zuvor angesprochene Neigung der beiden Streifen kommt beim zweiten Flug noch stärker hervor. In der Höhenkomponente ist deutlich ein Minimum am Ende des ersten Streifens bzw. am Beginn des zweiten Streifens zu erkennen. Die Maxima liegen beim ersten und beim letzten Foto (Foto 1 und 26). Abgesehen davon ist die berechnete Differenz von 60-70cm zwischen GPS-Antenne und Projektionszentrum deutlich höher als die aus der Montage resultierende Differenz von etwa 35cm (Abb. 3.7). Offensichtlich werden die Differenzen mit der Höhe größer und die Neigung kommt stärker hervor.

Um die Hypothese des Neigeverhaltens bei *Agisoft* zu stützen, wurde eine indirekte Georeferenzierung der Fotos des zweiten Fluges mit *Orpheus/Orient* durchgeführt. Für den Bündelblockausgleich in *Orpheus/Orient* wurden in den Fotos alle sichtbaren Passpunkte sowie mehrere, über den gesamten Bildausschnitt verteilte natürliche Verknüpfungspunkte gemessen. In Summe wurden die Bildmessungen von den 16 Passpunkten (vgl. Abb. 5.12) und 25 Verknüpfungspunkten als Beobachtungen eingeführt. Für die innere Orientierung der Kamera wurden wie bereits im Kapitel 4.2.2 beschrieben, als zusätzliche Parameter die mit signifikanten Werten als frei gesetzt. Die aus der Varianzkomponentenschätzung erhaltene Bildmessgenauigkeit liegt bei  $\sigma_B=0.192\text{px}$ . Die mittlere Standardabweichungen der Passpunktkoordinaten nach der Bündelblockausgleichung betragen in der Lage  $\sigma_{X,Y}=9\text{mm}$  und in der Höhe  $\sigma_H=13\text{mm}$ .

In der Abbildung 6.14 sind die Differenzen der Kamerapositionen dargestellt. Die Neigung wie in Abb. 6.13 tritt hier zwar nicht auf, die Höhendifferenzen zwischen GPS-Antenne und Projektionszentrum beträgt im Mittel jedoch nur 12cm. Die Differenzen in Ost- und Nordrichtung liegen weitgehend im Bereich von maximal 5cm, allerdings kommt es bei den Fotos 6, 8 und 9 zu Abweichungen von bis zu 14cm.

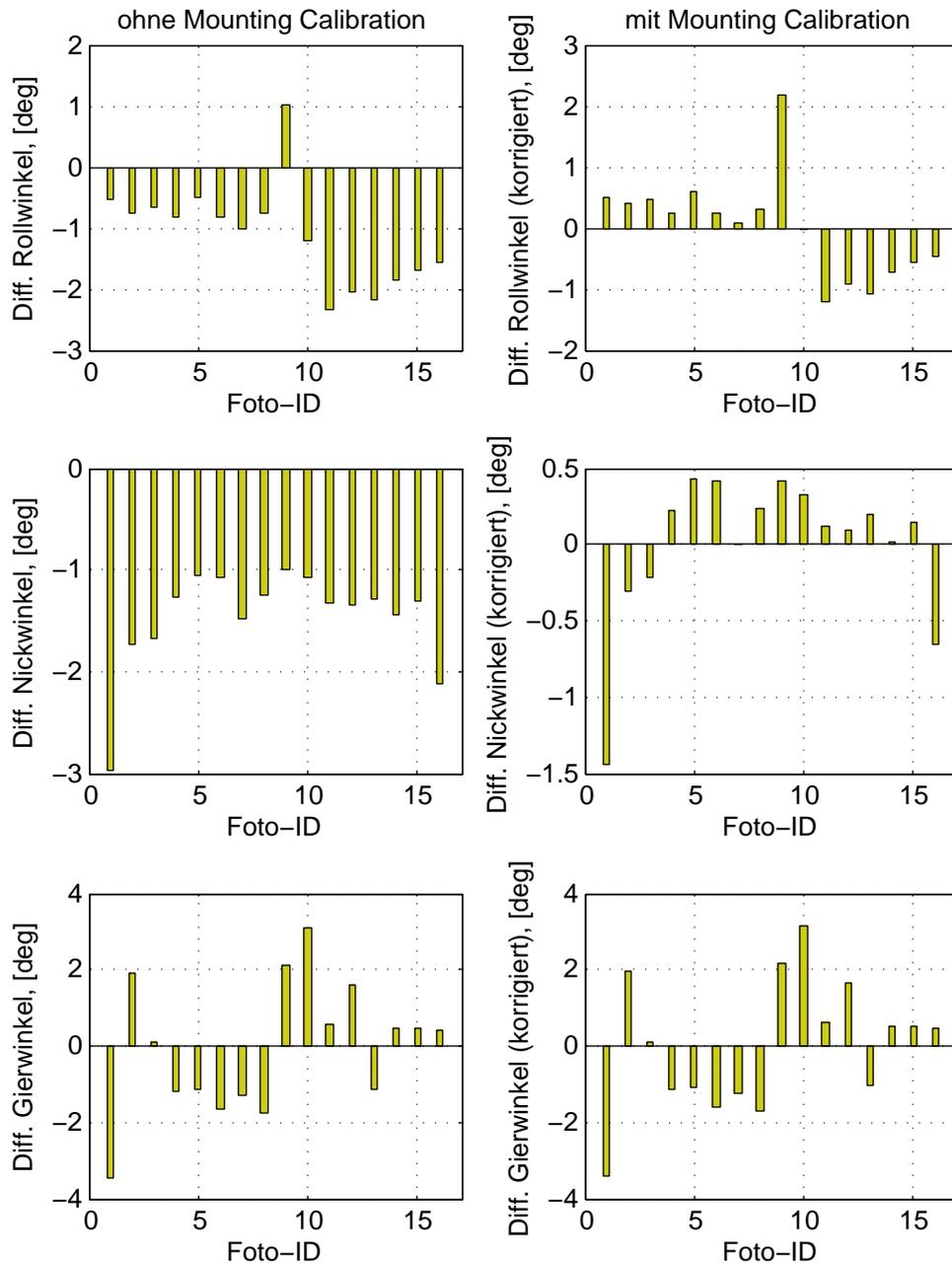


Abbildung 6.12: **Flug 2 (70m)**: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden **Orientierungswerten** und den aus den indirekt bestimmten Orientierungen der Kamera. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer *Mounting-Calibration*. Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der individuell berechneten *Mounting-Calibration*.

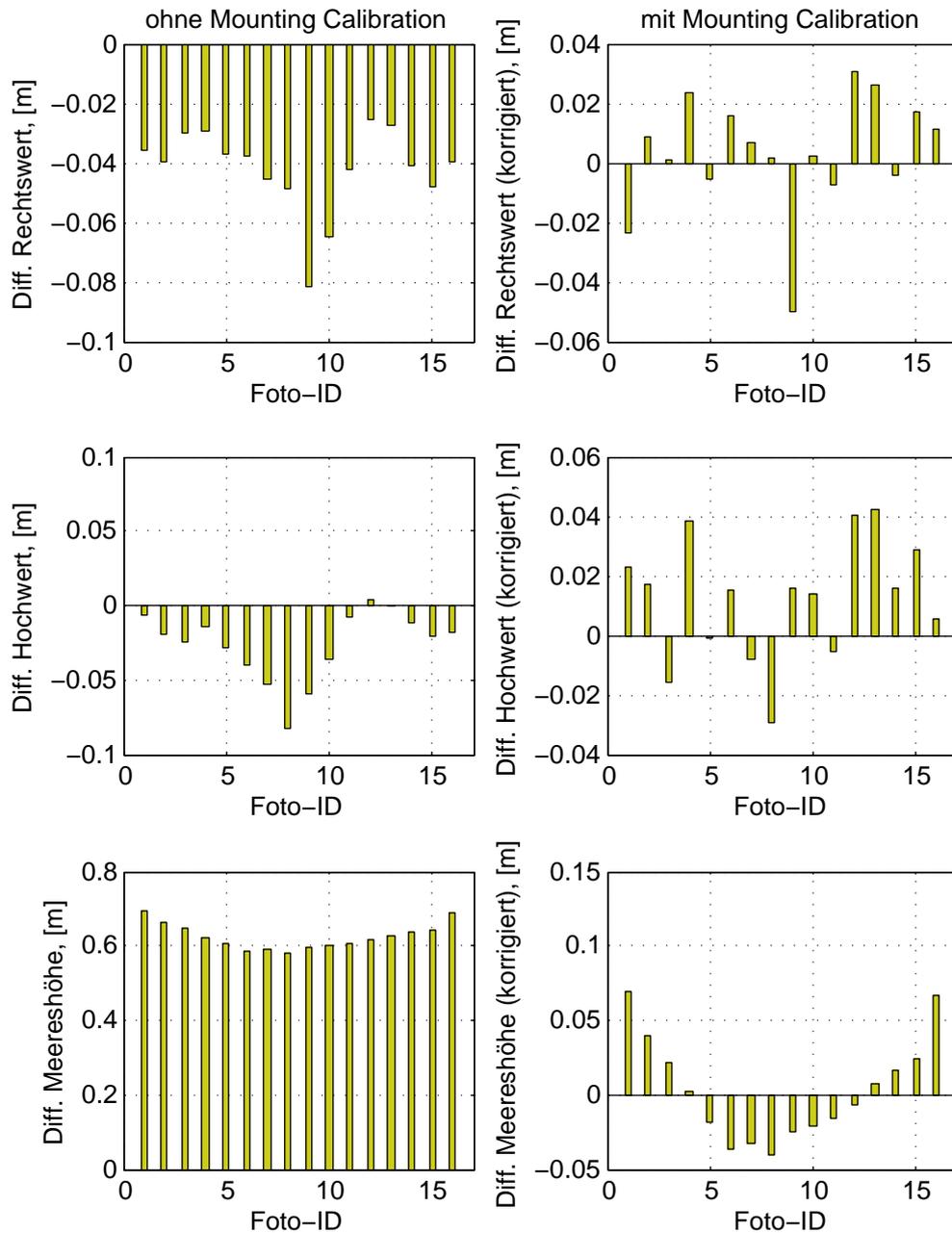


Abbildung 6.13: **Flug 2 (70m)**: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden **GPS-Positionen** und den Positionen der indirekt bestimmten Projektionszentren. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer *Mounting-Calibration*. Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der individuell berechneten *Mounting-Calibration*.

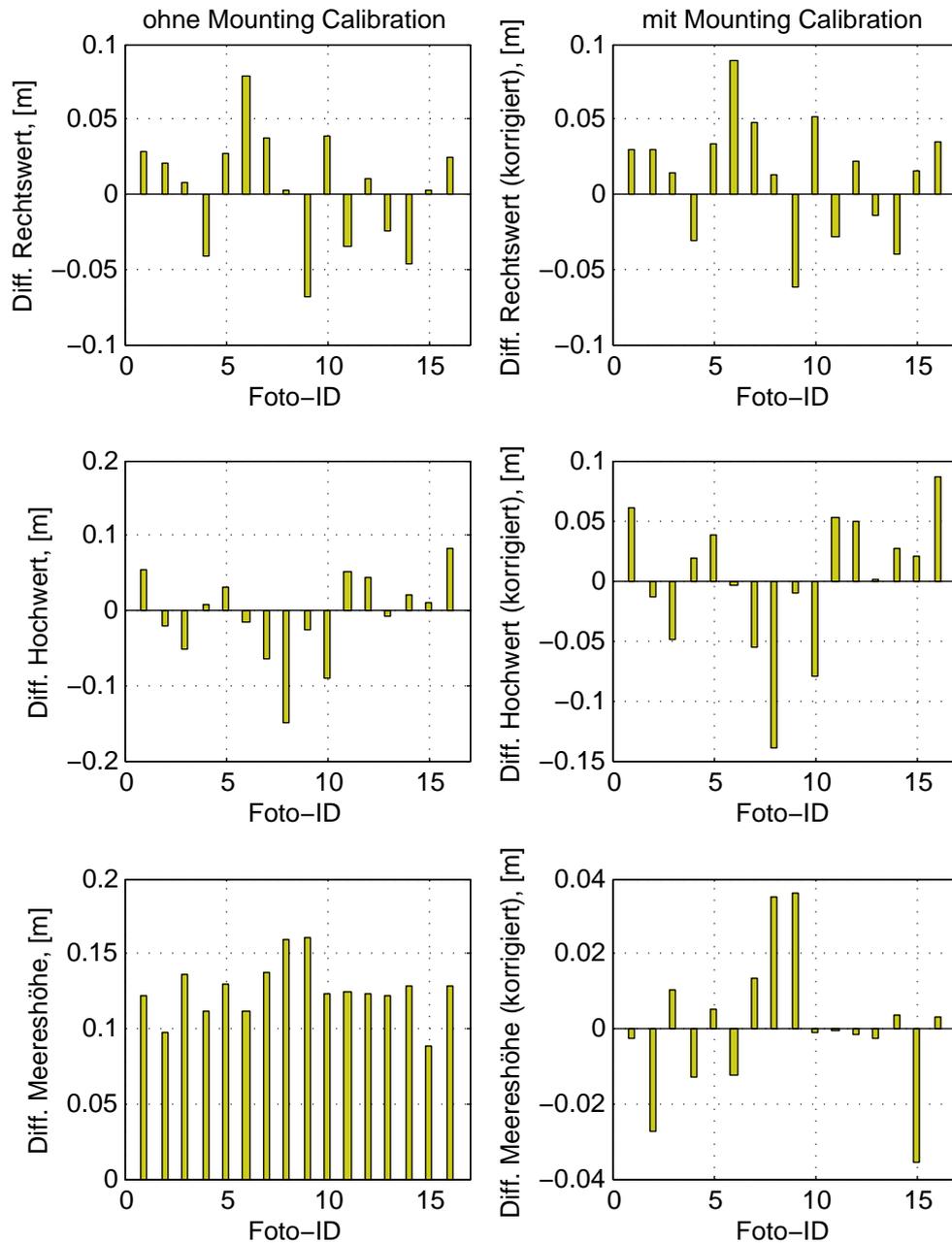


Abbildung 6.14: **Flug 2 (70m)**: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden **GPS-Positionen** und den Positionen der mit *Orpheus/Orient* indirekt bestimmten Projektionszentren. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer *Mounting-Calibration*. Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der individuell berechneten *Mounting-Calibration*.

Die Standardabweichung der Differenzen zwischen den in *Orpheus/Orient* berechneten Werten von Roll-, Nick- und Gier-Winkel und den aus *Agisoft* stammenden Werten betragen  $\sigma_{Roll} = -0.174^\circ$ ,  $\sigma_{Nick} = -0.047^\circ$  und  $\sigma_{Gier} = -0.017^\circ$

In der Tabelle 6.4 sind die Differenzen zusammengefasst. Weitere Untersuchungen im Hinblick auf das Neigungsverhalten wären notwendig, diese würden aber den Rahmen der hier vorliegenden Arbeit sprengen.

Tabelle 6.4: Mittelwerte  $\bar{\Delta}$  und Standardabweichungen  $\sigma_{\Delta}$  der Differenzen zwischen direkter und indirekter Georeferenzierung des ersten Fluges in 70m Höhe.

Parameter	ohne <i>Mounting</i>		mit ind. <i>Mounting</i>	
	$\bar{\Delta}$	$\sigma_{\Delta}$	$\bar{\Delta}$	$\sigma_{\Delta}$
$\Delta\omega$ [°]	-1,105	0,839	0,000	0,837
$\Delta\phi$ [°]	-1,463	0,493	0,000	0,481
$\Delta\kappa$ [°]	-0,055	1,716	0,000	1,718
$\Delta RW$ [m]	-0,042	0,014	0,003	0,020
$\Delta HW$ [m]	-0,026	0,023	0,012	0,020
$\Delta H$ [m]	0,625	0,035	0,003	0,034

### 6.2.3 Auswirkung der direkten Georeferenzierung auf die Objektpunktgenauigkeiten am Boden

Um zu verifizieren, wie sich die Unsicherheiten der direkt bestimmten äußeren Orientierung und der Kamerakalibrierung auf die Objektgenauigkeit am Boden auswirkt, wurden für beide Flüge folgende Varianten bei der Bündelblockausgleichung herangezogen:

1. Direkte Georeferenzierung mit der *Mounting-Calibration* vom Messdach und der fixen Kamerakalibrierung vom Messdach  
(Tab. 6.5: Variante 1)
2. Direkte Georeferenzierung mit der *Mounting-Calibration* vom Messdach und einer Simultankalibrierung der Kamera  
(Tab. 6.5: Variante 2)
3. Indirekte Georeferenzierung mit Simultankalibrierung mit je einem Passpunkt in den Blockecken (vier Passpunkte in Summe)  
(Tab. 6.5: Variante 3)

4. Indirekte Georeferenzierung mit Simultankalibrierung mit je einem Passpunkt in den Blockecken (vier Passpunkte in Summe) und Einführung der Parameter der äußeren Orientierung als zusätzliche Beobachtung mit der *Mounting-Calibration* vom Messdach (Tab. 6.5: Variante 4)

#### **Variante 1**

Die Variante 1 soll jene Situation darstellen, wo keine Passpunkte in der Natur gesetzt und terrestrisch vermessen werden können. Diese Situation tritt wie bereits im Kapitel 1 erwähnt bei Gebieten mit unwegsamem Gelände, Naturgefahren oder bewaldeten Gebieten auf. Die aus der direkten Georeferenzierung stammenden Parameter der äußeren Orientierung wurden mit den Werten der *Mounting-Calibration* vom Messdach (Tab. 4.8) korrigiert und eine Bündelblockausgleichung gerechnet. Dabei wurden die Parameter der Kamerakalibrierung von den Messungen am Messdach (vgl. Kapitel 4.3.2) übernommen und als fixe Parameter im Bündelblockausgleich behandelt. Die Abweichungen an den Passpunkten entlang der Bahntrasse (vgl. Abb. 5.12) sind für beide Flüge in den oberen Abbildungen von 6.15 und 6.16 dargestellt.

#### **Variante 2**

Die Variante 2 beinhaltet die Schritte der ersten Variante, im Zuge der Bündelblockausgleichung wurden jedoch die Parameter der inneren Orientierung als zusätzliche freie Parameter gesetzt. Die Ergebnisse zu dieser Variante sind wieder für beide Flüge in den zweiten Abbildungen von 6.15 und 6.16 dargestellt.

#### **Variante 3**

In der Variante 3 wird eine indirekte Georeferenzierung mit den Passpunkten 1, 8, 10 und 15 in den Blockecken gerechnet (vgl. Abb. 5.12). Mit dieser Variante soll das „Biegeverhalten“ des Blockes bei einer Bündelblockausgleich ohne Passpunktkette entlang des gesamten Bildverbandes gezeigt werden. Kraus (2004) schlägt vor, nach etwa drei Modellen jeweils eine Passpunktkette quer zum Flugstreifen zu setzen. In den dritten Abbildungen von 6.15 und 6.16 sind die Ergebnisse der beiden Flüge dargestellt.

#### **Variante 4**

Die Variante 4 soll zeigen, dass die Stützung von je einem Passpunkt in den Blockecken durch die aus der direkten Georeferenzierung stammenden Parameter der äußeren Orientierung der Aufnahmen dem „Biegeverhalten“ entgegenwirkt. Die Ergebnisse sind in den untersten Abbildungen von 6.15 und 6.16 für beide Flüge dargestellt.

In der Tabelle 6.5 sind die statistischen Kennzahlen der einzelnen Varianten zusammengefasst. Bei beiden Flügen liefert die Variante 1 die schlechtesten Ergebnisse. Das geringere Streuen der Differenzen bei der Variante 2 gegenüber der Variante 1 zeigt, dass in jedem Fall eine Simultankalibrierung der Kamera vorzunehmen ist. Die großen Differenzen in den Höhenabweichungen sind das Resultat der bereits im Kapitel 4.3 angesprochenen unzureichenden

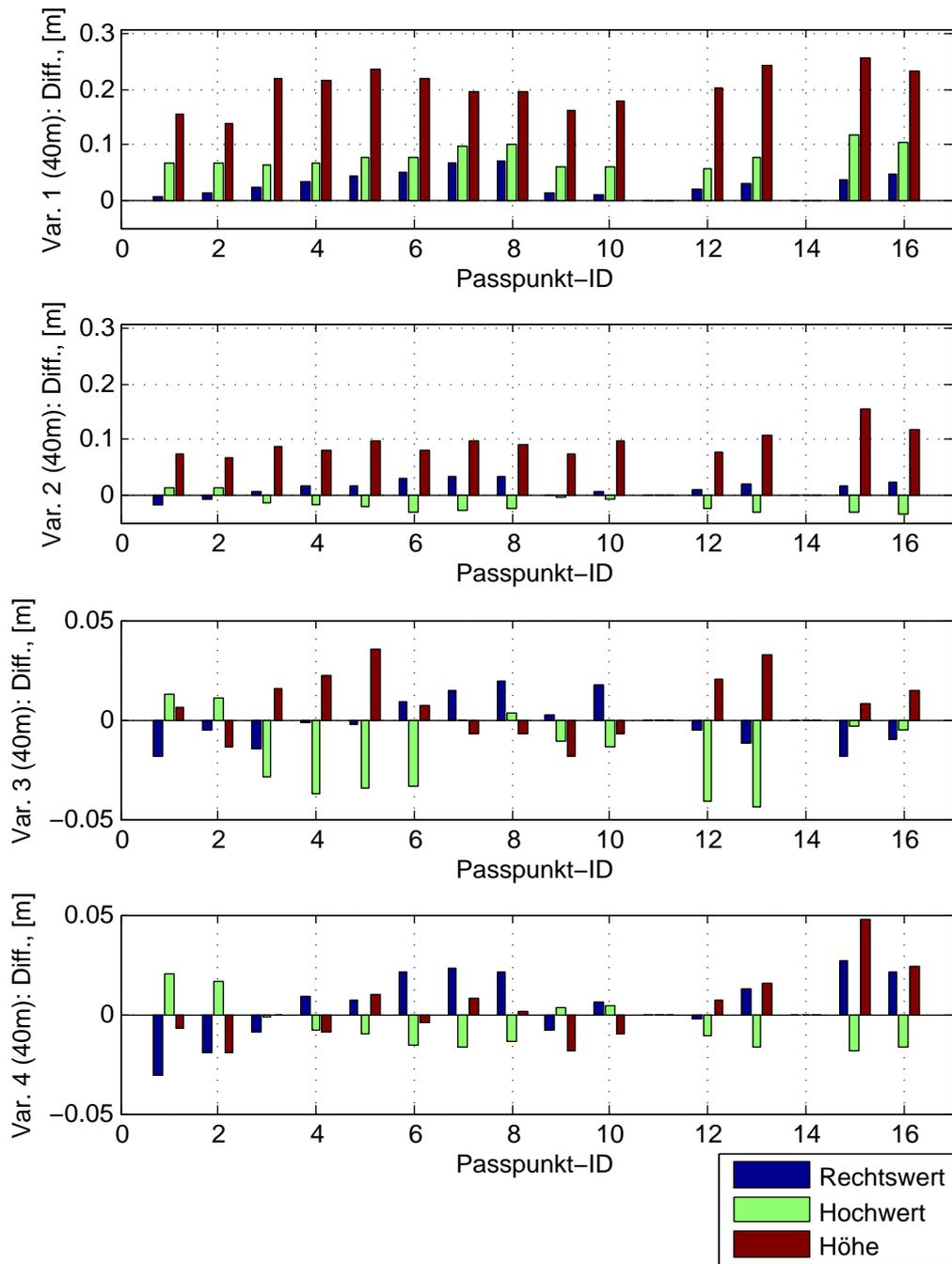


Abbildung 6.15: **Flug 1 (40m):** Auswirkungen der direkten und indirekten Georeferenzierung auf die Passpunktgenauigkeit mit den Varianten 1-4.

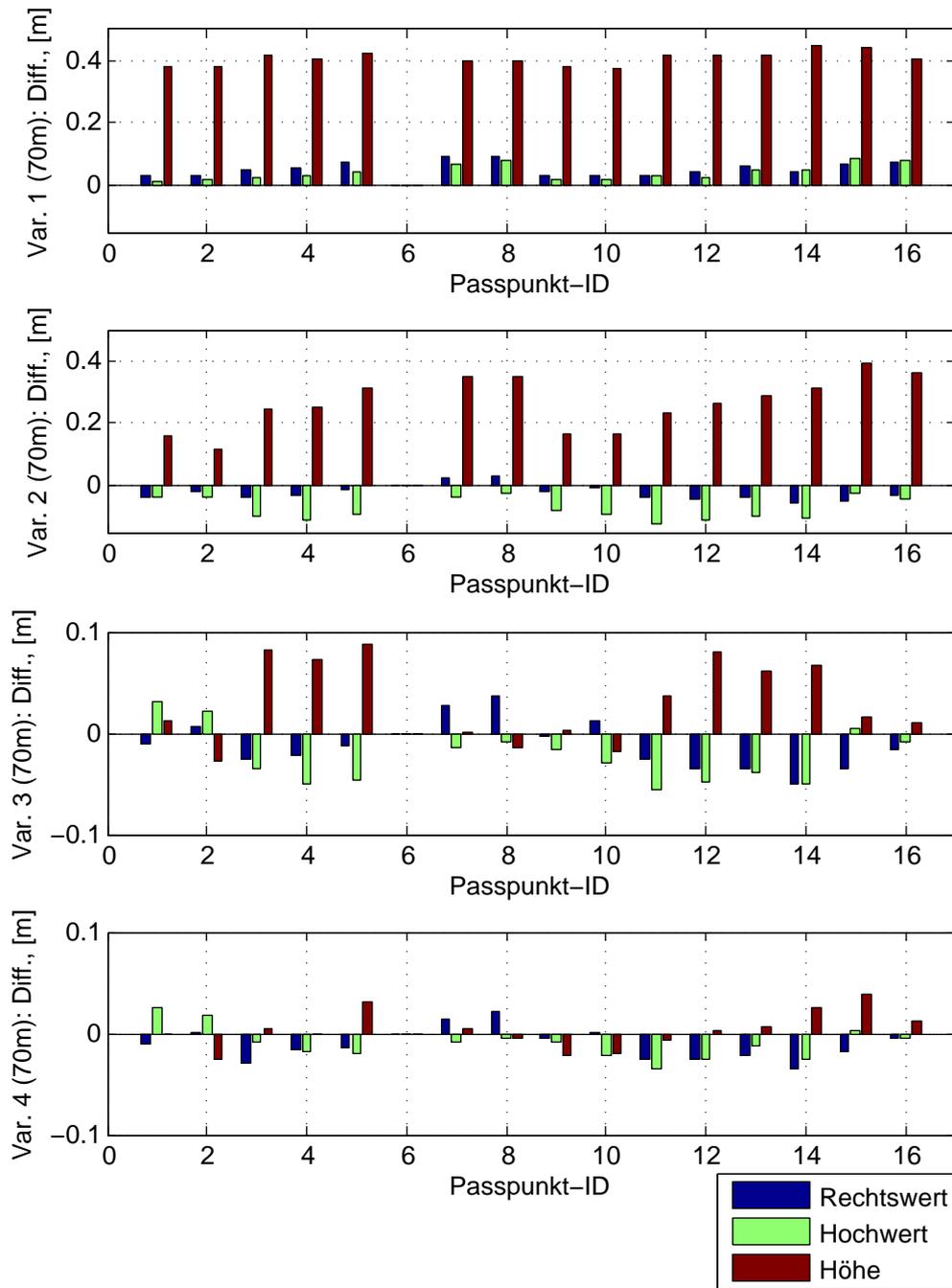


Abbildung 6.16: **Flug 2 (70m)**: Auswirkungen der direkten und indirekten Georeferenzierung auf die Passpunktgenauigkeit mit den Varianten 1-4.

Tabelle 6.5: Statistische Kennzahlen der Abweichungen an den Passpunkten bei unterschiedlichen Varianten.

Variante	min[mm]			max[mm]			mean[mm]			1 $\sigma$ [mm]		
	RW	HW	H	RW	HW	H	RW	HW	H	RW	HW	H
40m												
1	5	56	140	72	116	258	33	78	204	21	20	35
2	0	-5	66	32	-33	154	13	-17	93	15	15	23
3	-2	-1	6	19	-44	35	-2	-16	8	13	20	17
4	-3	-2	0	-31	20	47	6	-6	3	18	12	18
70m												
1	30	15	372	95	87	447	53	42	407	23	26	22
2	-9	-24	115	-57	-121	394	-24	-73	265	25	35	84
3	-2	-5	0	-51	-56	88	-13	-22	31	25	27	41
4	1	3	-1	-35	-36	39	-11	-10	3	16	16	19

Systemkalibrierungen, bzw. die großen Differenzen der berechneten *Mounting-Calibration* in unterschiedlichen Flughöhen.

Bei der Variante 3 ist das „Biegeverhalten“ in den Höhendifferenzen bei der Verwendung von nur einem Passpunkt in den Blockecken bei beiden Flügen gut zu erkennen. Die Passpunkte 1 bis 8 liegen westlich der Bahntrasse, die Passpunkte 9 bis 16 östlich (vgl. Abb. 5.12). Die Maxima liegen jeweils ca. in der Mitte des Blockes bei den Passpunkten 4 bis 6 bzw. 11 bis 14.

Der Vergleich mit der Variante 4 zeigt bei beiden Flügen eine Reduktion des „Biegeverhalten“ in den Höhendifferenzen.

Zusammenfassend kann hier gesagt werden, dass bei hohen Genauigkeitsanforderungen auf Passpunkte nicht vollständig verzichtet werden sollte. Die Kombination von wenigen Passpunkten an den Blockecken und die Stützung des Bildverbandes durch die über die direkte Georeferenzierung gewonnenen Parameter der äußeren Orientierung erscheint hier als die zu empfehlende Variante.

### 6.3 Vergleich der indirekten Georeferenzierung zur terrestrischen Vermessung

Die geforderten Standardabweichungen von 1-3 cm bei Infrastrukturobjekten (vgl. Kapitel 2.1 und 5.1) konnten mit der direkten Georeferenzierung ohne Passpunkte nicht erreicht werden. Zu groß sind die zuvor diskutierten Unsicherheiten bei den Varianten 1 und 2 (vgl.

Kapitel 6.2.3) um bspw. den Anforderung der ÖBB bei Bestandsaufnahmen zu genügen. Die Ergebnisse der direkten Georeferenzierung könnten einzig als grobe Planungsgrundlage dienen (vgl. Kapitel 2.1).

Bei Bestandsdokumentationen des Gleiskörpers könnte allerdings die Kombination aus terrestrischer Vermessung und indirekter Georeferenzierung von uLFZ-Luftbildern, die durch die direkt bestimmten Parameter der äußeren Orientierung gestützt wird, eine effiziente und sichere Alternative zur rein terrestrischen Aufnahme darstellen. Der Vorteil wäre, dass sich Personal nur für terrestrisch durchgeführte Ergänzungsmessungen auf den Gleiskörper begeben müsste. Das hätte zur Folge, dass die von den ÖBB bereitgestellten Sicherungsposten (vgl. Kapitel 2.1) für kürzere Zeiten gebucht werden müssten und somit Kosten gespart werden könnten. Eine wirtschaftliche Betrachtung aus Sicht einer ausführenden Firma wurde zwar nicht durchgeführt, persönliche Erfahrungen zufolge ist aber speziell die Aufnahme des Gleiskörpers sehr aufwändig, vor allem wenn mehrere Gleise parallel verlaufen.

Für die Qualitätsbeurteilung der Objektauswertung über die indirekte Georeferenzierung wurde von der *Senftner Vermessung ZT GmbH* ein terrestrisch vermessener Bestandsplan über diesen Streckenabschnitt bereitgestellt. Die Gleise wurden mit einer Standardabweichung von 1cm in Lage und Höhe mit einer Totalstation vermessen.

Mit *Agisoft* ist die Auswertung von zusätzlichen diskreten Punkten zwar möglich, die Umsetzung im Programm ist für eine große Anzahl an Punkten jedoch nicht praktikabel. Im Hinblick auf einen Bestandsplan wäre eine stereoskopische Auswertung von Vorteil, die direkt die Konstruktion von 3D-Linien zulässt, die in einem weiteren Schritt in ein lesbares CAD<sup>1</sup>-Format (z.B. DXF<sup>2</sup>) exportiert werden können. Für diesen Zweck wurden die Aufnahmen auch mit der Photogrammetrie-Software *ImageMaster-Photo* der Firma *Topcon* ausgewertet. Bei diesem Programm ist eine direkte Georeferenzierung, also der Import und die Weiterverarbeitung der äußeren Orientierung, nicht vorgesehen. Außerdem muss vor der Auswertung eine eigene Kamerakalibrierung durchgeführt werden, wofür es das Programm *ImageMaster-Calib*, ebenfalls von *Topcon* gibt. Die Kalibrierung erfolgt durch mehrere Aufnahmen von einem programm-spezifischen Kalibrierungsblatt. Das Blatt kann in verschiedenen Größen bis zu einer maximalen Größe von A0 geplottet werden. Die Kalibrierung erfolgt über die sieben Parameter:

- Kamerakonstante  $f$
- Bildhauptpunkt:  $X_p, Y_p$
- Radiale Verzeichnung:  $K_1, K_2$

---

<sup>1</sup>Computer-Aided-Design

<sup>2</sup>Drawing-Exchange-File

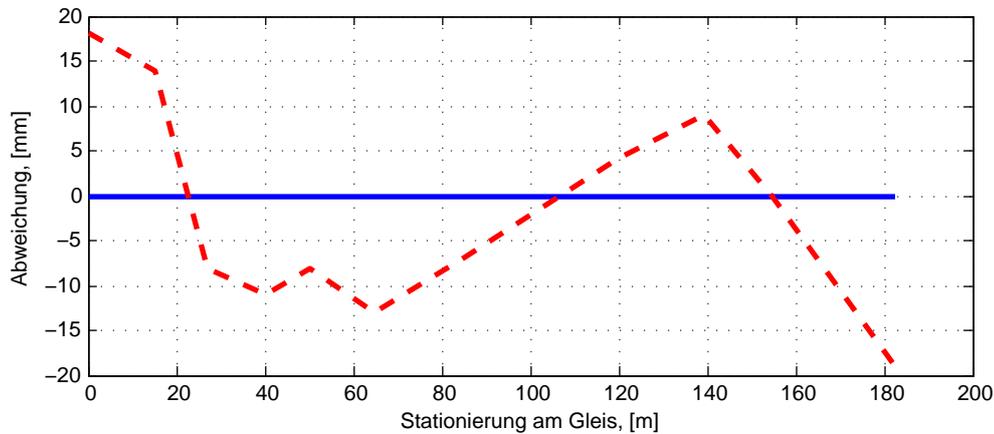


Abbildung 6.17: Höhenabweichung eines Gleisstranges über eine Länge von etwa 180m zwischen terrestrisch vermessenen Gleis (blau, reduziert auf Höhe 0) und dem photogrammetrisch ausgewerteten Gleis (rot-strichliert). Die in regelmäßigen Abständen von 10-20m verglichenen 11 Höhenpunkte weichen um max. 18mm vom terrestrisch vermessenen Bestand ab.

- Tangentiale Verzeichnung: P1, P2

Ein erheblicher Nachteil von *ImageMaster - Photo* ist die manuelle Messung von Verknüpfungspunkten zur Orientierung der Bilder. Die Bildorientierung erfolgt über einen Bündelblockausgleich.

Während Objekte wie Kabelkanäle, Kanaldeckeln, Oberkanten von Lärmschutzwänden und andere Objekte direkt durch messen in zwei Bildern ausgewertet werden konnten, mussten die Gleise auf eine andere Weise bestimmt werden. Die Lage der Gleise kann einfach über ein Orthophoto bestimmt werden. Da keine Identpunkte auf der Schienenoberkante detektiert werden können, mussten die Höhen der Gleise indirekt über die Höhe der Schwellen und einem in der Natur gemessenen konstanten Offset von 17cm abgeleitet werden. In der Abbildung 6.17 ist die Höhenabweichung entlang eines Gleisabschnittes von 180m dargestellt. Die maximale Höhenabweichung bei den 11 Vergleichspunkten liegt bei diesem Strang bei 18mm.

An manchen Masten waren in den Bildern auch die Mastbolzen zu sehen (vgl. Abb. 5.14) und konnten so auch photogrammetrisch ausgewertet werden.

Punktuelle Auswertungen von Gleisanlage, Einbauten und Lärmschutzwänden konnten zeigen, dass die Abweichungen der Höhenkomponente im Bereich von wenigen Zentimetern liegen. In der Tabelle 6.6 sind die durchschnittlichen Abweichungen der Höhenkomponente von unterschiedlichen Objekten aufgelistet.

Die Lage diverser Objekte kann wie bei den Gleisen entweder über das Orthophoto abgelei-

Tabelle 6.6: Mittlere Abweichungen der Höhenkomponente von identen Punkten zwischen terrestrisch vermessenen Objekten und Objekten, die photogrammetrisch abgeleitet wurden.

<i>Objekt</i>	$\Delta\bar{h}[m]$	$1\sigma [m]$
Gleise	0,002	0,026
Mastbolzen	0,015	0,014
Oberkante Lärmschutzwand	0,024	0,022
Sonstige Objekte	0,002	0,014

tet werden oder über die stereoskopische Auswertung. Speziell bei linearen Objekten wie bei Kabelkanälen erscheint die Auswertung über das Orthophoto effizienter. Die Abweichungen in Ost- und Nordrichtung nehmen eine Standardabweichung von 0,016cm an.

In der Abbildung 6.18 ist ein mögliches Ergebnis für ein lineares Infrastrukturobjekt wie bspw. eine Eisenbahntrasse dargestellt (ohne Höhenangaben). Den photogrammetrisch ausgewerteten (3D-)Objekten (rot dargestellt) wird ein Orthophoto zur besseren Orientierung hinterlegt. Die Weiß dargestellten Objekte stammen aus der terrestrischen Vermessung. Am Bahnkörper direkt können bis auf die Masten bzw. Mastbolzen alle Objekte abgeleitet werden. Somit kann das Arbeiten am Gleis erheblich reduziert werden.

Eine mögliche Vorgehensweise bei der Bestandserfassung könnte folgendermaßen aussehen:

- Schaffung eines homogenen Festpunktfeldes im Aufnahmegebiet
- Terrestrische Vermessung von Passmarken für die darauffolgende Befliegung, Mastbolzen und anderen Objekten, die eine hohe Genauigkeit fordern
- Terrestrische Vermessung von sonstigen, nicht einsehbaren Objekten auf Grund von Vegetation oder auch künstlichen Bauten (Brücken über Bahntrasse, etc.)
- Befliegung der Bahntrasse und Auswertung mittels indirekter Georeferenzierung
- Ableitung von Gleisen, Schotterbett, sichtbaren Einbauten und allen übrigen Objekten
- Kombination der beiden Auswertungen und ggf. punktuelle Ergänzungen im Feld

Vor allem der direkte Einsatz am Gleis kann durch diese Vorgangsweise minimiert werden und somit zu einer Steigerung an Sicherheit führen. Als Nebenprodukt zum klassischen Bestandsplan liegt außerdem ein hochauflösendes Orthophoto des Aufnahmegebiets vor, das für Dokumentations- oder Planungszwecke sehr hilfreich sein kann.

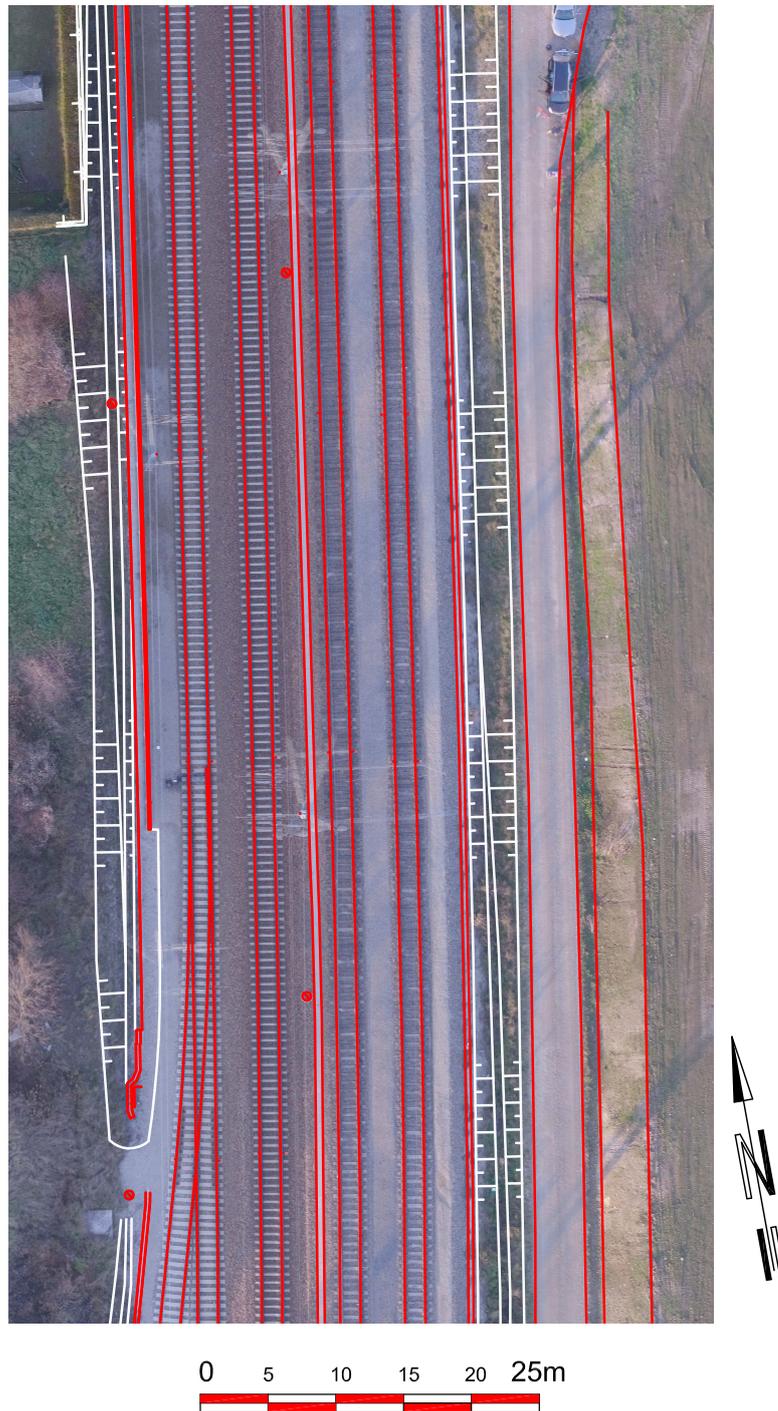


Abbildung 6.18: Ausschnitt der stereoskopischen Auswertung von diversen Objekten (rote Linien) und der Kombination mit den terrestrisch vermessenen Ergänzungen (weiße Linien). Den Auswertungen ist das erzeugte Orthophoto als Zusatzinformation und zur besseren Orientierung hinterlegt.

## 6.4 Vergleich zwischen Flugplanung und durchgeführter Befliegung

Je nach Umgebung ist beim GPS-Sensor (vgl. Kapitel 2.4.1), der für die Steuerung des Hexakopters zuständig ist, mit Ungenauigkeiten im Meterbereich zu rechnen. Diese Unsicherheiten haben letztlich auch Auswirkungen auf die geplanten Wegpunkte, an denen Aufnahmen erstellt werden sollen (vgl. Kapitel 5.2.4).

Für den Vergleich mussten die Koordinaten der geplanten Wegpunkte, die als Längen- und Breitengrade im WGS84 vorliegen in das Landeskoordinatensystem transformiert werden. Für die Transformation dienen die im Abschnitt 5.2.5 angeführten Parameter.

In den oberen beiden Darstellungen der Abbildung 6.19 sind die Differenzen der Rechts- und Hochwerte zwischen den geplanten und den tatsächlich angeflogenen Wegpunkten zu sehen. In beiden Streifen scheint es in den Ostkomponenten zu einem systematischen Offset von etwa 1,5m in Richtung Osten zu kommen, wobei die Abweichungen des ersten Streifens (bis inklusive Foto 13) um etwa 0,5m größer sind als die beim zweiten Streifen. In der Nordkomponenten, also in etwa in Flugrichtung sind im ersten Streifen keine Systematiken zu erkennen, während im zweiten Streifen die Auslösungen der Kamera um durchschnittlich 1,5m zu früh stattfanden. In jedem Fall wird der gewählte Radius von 4m aber tatsächlich eingehalten. Die Abweichungen liegen vermutlich an den Positionsbestimmungen mit unterschiedlichen GPS-Sensoren. Während die Steuerung auf Basis eines Einfrequenz-GPS funktioniert und dieses im Sinne der Einzelpunktbestimmung den im Kapitel 3.3.2 beschriebenen Fehlereinflüssen unterworfen ist, erfolgt die Positionsbestimmung der Fotopositionen mit einem Zweifrequenz-GPS und den Auswertelgorithmen einer relativen Positionierung, wodurch sämtliche Fehlereinflüsse weitgehend eliminiert oder stark reduziert werden können. Die unteren beiden Grafiken der Abbildung 6.19 stellen die Differenzen zwischen den geplanten und den tatsächlich erreichten Basisabständen in beiden Streifen dar. Bis auf drei Differenzen in beiden Streifen liegen die Übrigen stets unter einem Meter. Die maximale Differenz, die zwischen dem Bildpaar 6 und 7 des ersten Streifens auftritt, beträgt knapp 1,5m. Eine Differenz des Basisabstandes von max. 1,5m verursacht bei gleicher Höhe nach Gleichung (5.4) eine Veränderung der Genauigkeit in z-Richtung von etwa 1mm und ist somit nicht von Relevanz.

Auch die geplanten Flughöhen von 40m und 70m wurden nicht exakt erreicht. Beim ersten Flug beträgt die Flughöhe bezogen auf den Startpunkt nur etwa 36m, beim zweiten Flug nur etwa 63m. Das Verhältnis zwischen Soll und Ist beträgt bei beiden Höhen ca. 1,1. Ob dieser Maßstab von den Eigenschaften des Luftdrucksensors abhängig ist, oder in der Steuerungssoftware nicht korrekt berücksichtigt wurde, konnte nicht verifiziert werden. Diese Abweichungen von den Planungen zeigen jedoch, dass vor allem bei Objekten wie z.B. Hochspannungsleitungen ein ausreichender Sicherheitsabstand berücksichtigt werden sollte.

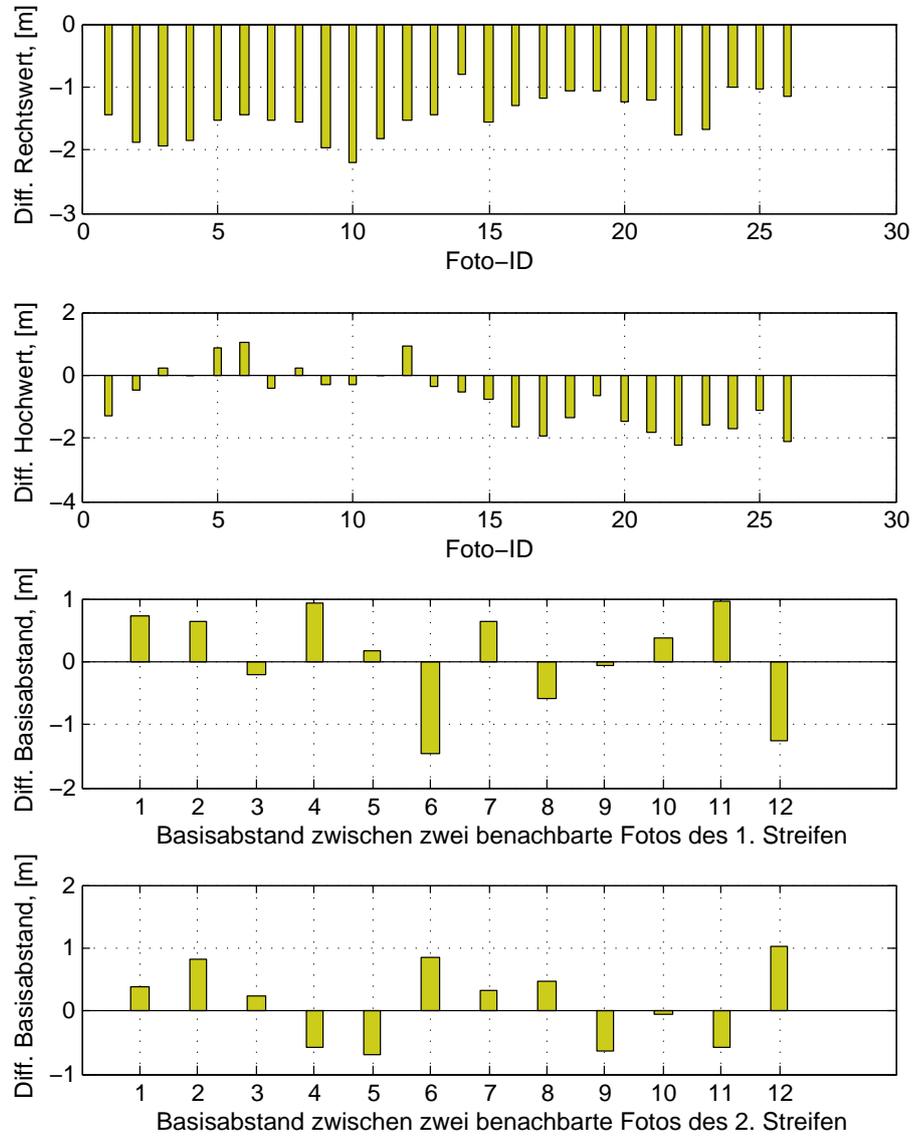


Abbildung 6.19: Abweichungen zwischen geplanten Wegpunkten und tatsächlich angeflogenen Wegpunkten. Die oberen beiden Grafiken visualisieren die Differenzen der Rechts- und Hochwerte, die unteren beiden die Differenzen der Basisabstände zwischen zwei benachbarten Fotos.

## Kapitel 7

# Zusammenfassung

Der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen (uLFZ) in der Nahbereichsluftbildphotogrammetrie stellt eine interessante und wirtschaftliche Alternative bzw. Ergänzung zu terrestrischen und bemannten, oft kostenintensiven, luftgestützten Messverfahren dar. Durch die technologische Weiterentwicklung und Minituarisierung der verwendeten Sensoren eines uLFZ sind diese, im Verhältnis zu bemannten Flugmissionen, zu erschwinglichen Preisen erhältlich.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen von uLFZ in Österreich sind seit 1.1.2014 gesetzlich geregelt, die Umsetzung im Hinblick auf Bewilligung verläuft momentan jedoch noch schleppend. Unabhängig davon, muss die oberste Prämisse beim Einsatz von uLFZ die Sicherheit sein. Nur durch die regelmäßige Bedienung und Wartung von uLFZ kann ein gewisses Maß an Sicherheit erreicht werden. Trotz technischen Vorkehrungen wie redundante Steuerungssysteme bleiben Restrisiken bestehen.

Aufbauend auf Arbeiten von Glira (2012) und Wieser (2013) war das Ziel der Arbeit, Untersuchungen zur direkten Georeferenzierung von uLFZ-Luftbildern entlang linearer Infrastrukturobjekte durchzuführen. Durch die Implementierung eines kompakten Zweifrequenz-GPS-Empfänger auf der Flugplattform, einem Hexakopter des Unternehmens *twins.nrn*, sollen Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreicht und damit die Möglichkeiten zur Bestandserfassung linearer Infrastrukturobjekte untersucht werden.

Die gemeinsame Verarbeitung der synchronisierten Messdaten von GPS, inertialer Messeinheit und Magnetometer erfolgte in einem erweiterten Kalman-Filter und bestätigte sich als sehr gute Methode zur Gewinnung der Parameter direkt georeferenzierter uLFZ-Luftbilder, den Positionen und Orientierungen der Bilder im 3D-Raum.

Nach Testmessungen mit dem uLFZ am Dach der Technischen Universität Wien konnten erste Ergebnisse erzielt werden. Um eine quantitative Qualitätsbeurteilung zu erhalten, wurden die direkt bestimmten Positionen und Orientierungen der Bilder den indirekt, über Passpunkte ermittelten, Werten gegenübergestellt. Unter der Annahme, dass sich bei den Testmessungen

die Kamera zwischen zwei Aufnahmen einmalig gegenüber der Flugplattform leicht bewegt hat, konnten für die Orientierungen (Roll-, Nick- und Gier-Winkel) Standardabweichungen der Differenzen von  $< 1^\circ$  und bei den Positionen (Rechtswert, Hochwert und Höhe)  $< 3\text{cm}$  erreicht werden.

Am 2. Dezember 2013 konnte nach durchgeführter Flugplanung die Befliegung des Testgebietes, einer 200m langen Eisenbahntrasse in Herzogenburg (NÖ), in einer Höhe von 40m und 70m erfolgen. Die Qualitätsbeurteilung der direkten Georeferenzierung erfolgte auch hier durch die Gegenüberstellung zu indirekt bestimmten Werten. Die Standardabweichungen der Differenzen nehmen bei beiden Flügen für den Roll- und Nick-Winkel  $< 1^\circ$ , für den Gierwinkel  $< 2^\circ$  an. Für die Position ergeben sich Standardabweichungen von  $< 3\text{cm}$  in Lage und Höhe.

Die Unsicherheiten der inneren Orientierung des Kamerasystems bei der direkten Georeferenzierung mit im Vorfeld unabhängig bestimmten Kalibrierwerten auf die Koordinaten von Objektpunkten am Boden wirken sich stark aus. Differenzen von bis zu 12cm in der Lage und 45cm in der Höhe treten dabei auf. Die Berücksichtigung von je einem Passpunkt in den Blockecken brachte eine deutliche Reduktion der Differenzen und es konnten Standardabweichungen in Lage und Höhe von  $< 2\text{cm}$  erreicht werden.

Für Genauigkeitsanforderungen im Zentimeterbereich bei der Bestandserfassung von Infrastrukturobjekten konnte gezeigt werden, dass die photogrammetrische Auswertung indirekt georeferenzierter uLFZ-Luftbilder eine gute Ergänzung zu herkömmlichen, terrestrischen Messmethoden darstellen könnte. Standardabweichungen von  $< 2\text{cm}$  an Objektpunkten am Boden sind möglich. Als zusätzliches Produkt können hochauflösende Orthophotos abgeleitet werden, die für Dokumentations- oder Planungszwecke eingesetzt werden könnten.

Weitere Untersuchungen zum Thema direkte Georeferenzierung könnten durch den Einsatz einer hochwertigeren IMU durchgeführt werden. Die technologischen Entwicklungen werden in diesem Bereich weitergeführt und es ist zu erwarten, dass es in den kommenden Jahren auch bei Low-Cost-Sensoren zu Genauigkeitssteigerungen kommen wird.

Im Hinblick auf die Instabilität der Kameramontierung müssten in jedem Fall Adaptierungen vorgenommen werden. Eine mechanische Lösung über eine Mehrpunktfixierung wäre denkbar.

Neben unbemannten Flugmissionen könnte auch der Einsatz von Ultra-Leichtfluggeräten, im Speziellen Gyrokopter, näher untersucht werden. Diese hätten zum Vorteil, dass auch Sensoren mit größerem Ausmaß und Gewicht transportiert werden könnten. Somit wäre neben hochwertigen Kamerasystemen auch die Verwendung von Laserscannern bei linearen Infrastrukturobjekten denkbar. Neben den höheren Transportlasten ist auch die Reichweite ein erheblicher Vorteil. Die Mehrkosten einer bemannten Flugmission mit Ultra-Leichtfluggeräten müsste näher betrachtet werden, bei Gebieten von mehreren Kilometern Ausdehnung ist aber

auch der Einsatz von uLFZ bereits aufwendig und kostenintensiv.

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Methoden konnten bei der direkten Georeferenzierung die oben erwähnten Standardabweichungen erreicht werden und somit das erste Ziel, die Genauigkeitssteigerung bisheriger Arbeiten, erfüllt werden. Die praktische Erfassung von linearen Infrastrukturobjekten als zweiter Teil der Arbeit konnte ebenfalls erfolgreich durchgeführt werden. Es wurde gezeigt, dass durch den Einsatz von uLFZ und der Verwendung der direkten Georeferenzierung hohe Genauigkeitsanforderungen bei Bestandserfassungen linearer Infrastrukturobjekte erfüllt werden können.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Hexakopter des Herstellers <i>twins.nrn</i> im Einsatz. . . . .	10
2.2	Implementierte Sensoren im Hexakopter. . . . .	11
2.3	Je drei gegenläufig angeordnete Rotoren und deren unterschiedlichen Drehzahlen führen zur Bewegung des Hexakopters. Die Rotationen $\phi$ , $\omega$ und $\kappa$ führen bezogen auf das dargestellte körperfeste Koordinatensystem (vgl. Kapitel 3.2) zum „Nicken“, „Rollen“ und „Gieren“ des Systems. . . . .	13
2.4	Feldaufbau bei einem uLFZ-Einsatz. Die unidirektionale Verbindung zwischen Piloten und dem uLFZ dient der Steuerung. Über die bidirektionale Verbindung können die Wegpunkte und Flugparameter an das uLFZ gesendet werden. Während dem Flug werden drahtlos Telemetriedaten vom uLFZ an ein Notebook gesendet, die von einem Co-Piloten überwacht werden. . . . .	14
3.1	Darstellung aller Koordinatensysteme; das himmelfeste Inertialkoordinatensystem ( $\mathbf{x}^i$ ) und das erdfeste Koordinatensystem ( $\mathbf{x}^e$ ) haben als gemeinsamen Ursprung das Geozentrum. Das Navigationskoordinatensystem ( $\mathbf{x}^n$ ) könnte in Form des österreichischen Landeskoordinatensystem realisiert werden. Der Ursprung würde in den Schnittpunkt des jeweiligen Meridianstreifens (z.B. M34) mit der Äquatorebene fallen. Beim körperfesten Koordinatensystem ( $\mathbf{x}^b$ ) sind die Achsen fest im Bezug zu einem bewegten Objekt (z.B. einer Kamera) (nach (Wendel, 2011)). . . . .	18
3.2	Anordnung der Sensoren einer IMU. Je orthogonal angeordneter Achse befindet sich ein Beschleunigungssensor und ein Drehratensensor. Durch die Integration der Messwerte können Position und Orientierung des Objektes zu einem Zeitpunkt $t$ bestimmt werden (nach (Glira, 2012)). . . . .	21
3.3	Zusammensetzung des Fehlermodells eines Drehratensensors (nach (Wendel, 2011)). . . . .	24
3.4	Grundprinzip der relativen GPS-Messung. Für die Bestimmung der Basislinie werden an der bekannten Referenzstation und der unbekanntem Roverstation (statisch oder kinematisch) simultan GPS-Beobachtungen durchgeführt. . . . .	29

3.5	<i>Maxtena M1227HCT-A-SMA</i> : Zweifrequenzantenne mit einer Höhe von 51mm und einem Durchmesser von 30mm. . . . .	31
3.6	<i>Ashtech MB100</i> : Zweifrequenzempfänger mit einem Ausmaß von 58x56x11mm. . . . .	31
3.7	Zusätzlich implementierte Sensoren mit den jeweiligen körperfesten Koordinatenachsen. Die Verdrehungen der Koordinatensysteme von Kamera ( $X_{cam}$ ) und <i>APM2.0</i> ( $X_{APM}$ ) werden im Kapitel 4.3.3 behandelt. Zwischen Antennenphasenzentrum und Projektionszentrum ergibt sich durch die Form der Implementierung ein konstanter Offset $\Delta z$ von ca. 35cm. . . . .	33
3.8	<i>Ardupilot Mega 2.0</i> : uLFZ-Autopilot mit integrierter IMU, GPS, Luftdrucksensor und Magnetometer (DIY DRONES, 2014). . . . .	34
3.9	Blockschaltbild der Verbindungen aller für die direkte Georeferenzierung verwendeten Sensoren. . . . .	35
3.10	Blockdiagramm eines zeitkontinuierliches Zustandsmodell (nach (Wendel, 2011)). . . . .	37
4.1	Zusammenhang der Zeitsysteme von GPS ( $t_{GPS}$ ) und dem Mikrokontroller des <i>APM2.0</i> ( $t_{APM}$ ). Über die in beiden Messdaten-Files enthaltene GPS-Zeit ist die Synchronisierung der beiden Zeitsysteme möglich. Der Skalierungsfaktor für die Mikrokontrollerzeit lässt sich entweder über das PPS-Signal oder dem Verhältnis zwischen $\Delta t'$ und $\Delta t$ ableiten. Für die Auswertung mit der Kalman-Filterung wird auf eine relative Zeitangabe ( $t_{KF}$ ) übergegangen. . . . .	47
4.2	Das in dieser Arbeit verwendete Kalman-Filter benötigt Messwerte der IMU-Sensoren an äquidistanten Stützstellen. Das wird durch Interpolation der Messwerte von Beschleunigungs- und Drehratensensor sowie Magnetometer und Barometer erreicht. . . . .	47
4.3	Sowohl im Rohdatenfile des <i>APM2.0</i> (oben) als auch im Rohdatenfile des GPS (unten) ist die GPS-Zeit enthalten. Mit ihr ist die zeitliche Synchronisation der beiden Messfiles möglich, d.h. der Zusammenhang zwischen GPS-Zeit und Mikrokontroller-Zeit kann hergestellt werden. . . . .	48
4.4	Zentralprojektion - Zusammenhang zwischen Bild- und Objektpunkt . . . . .	49
4.5	Strahlengang durch das Objektiv mit geneigter Bildebene nach Kraus (2004). Eine detaillierte Beschreibung dazu ist im Text zu finden. . . . .	50
4.6	Parameter der inneren Orientierung, bestehend aus Bildhauptpunkt H, Kamerakonstante c und Abbildungsfehler $\Delta r$ (Luhmann, 2010). . . . .	51
4.7	Eingesetzte Systemkamera Ricoh GXR. Die Kamera setzt sich aus einem Basisgehäuse und unterschiedlichen Aufnahmemodulen, bestehend aus Objektiv und eigenem Bildsensor, zusammen. (Quelle: www.chip.de) . . . . .	55

4.8	Das Passpunktfeld im Messkeller der TU Wien umfasst ca. 60 retroreflektierende Passmarken. Die räumlichen Ausdehnung beträgt etwa $6,3 \times 5,7 \times 3,3\text{m}^3$ . . .	56
4.9	Darstellung der Aufnahmekonstellationen im Messlabor der TU Wien. Je Serie mit unterschiedlichen Ausrichtungen wurden fünf Aufnahmen von unterschiedlichen Positionen aus erstellt. Die Abstände zwischen Kamera und Passpunkte beträgt 2,50 - 8,80 m. . . . .	57
4.10	Variation der Bildhauptpunktskoordinaten. . . . .	59
4.11	Variation der Kamerakonstante bezogen auf den Median. . . . .	60
4.12	Einfluss der Verzeichnungsparameter auf die Bildkoordinaten. . . . .	62
4.13	Simulierte Standardabweichungen der Passpunktkoordinaten. . . . .	63
4.14	Foto des Innenhofs mit den vermessenen Passpunkten. Hier ist die Verteilung der Passpunkte über das gesamte Foto gut erkennbar. . . . .	64
4.15	Zeitreihen der Messwerte des Beschleunigungssensors des <i>APM2.0</i> in z-Richtung. Links: Rohdaten in Form von ADC-Werten. Rechts: Konvertierte Rohdaten mit der Einheit $\text{m/s}^2$ . . . . .	65
4.16	Trajektorie des „Testfluges“ am Messdach der TU Wien (oben: Lage, unten: Höhe). Die Ergebnisse stammen bereits aus der Kalman-Filterung. Die Positionen der Fotos 1 bis 13 sind durch die cyanfärbigen Quadrate gekennzeichnet. . . .	67
4.17	Darstellung der Orientierungslösung des „Testfluges“ am Messdach der TU Wien mit dem Kalman-Filter. Die gelben Kreise zeigen die Zeitpunkte der Kameraauslösung. . . . .	68
4.18	links: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden Orientierungen der Kamera und den aus den indirekt bestimmten Orientierungen der Kamera. rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der <i>Mounting-Calibration</i> . . . . .	72
4.19	links: Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden GPS-Positionen und den Positionen der indirekt bestimmten Projektionszentren. rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der <i>Mounting-Calibration</i> . . . . .	73
4.20	Horizontale Abweichungen bei den Passpunkten aus der direkten Georeferenzierung. Mit zunehmenden Abstand ( $dh$ ) zum Projektionszentrum erhöht sich die Abweichung auf bis zu ca. 0,80m (Hofebene). . . . .	74
5.1	Testgebiet in Herzogenburg (NÖ) mit einer Ausdehnung von 200m x 50m. Wegen dem Vorhandensein vieler unterschiedlicher Objekte (Weichen, Lärmschutzwände, Mastbolzen usw.) ist die Wahl auf diesen Streckenabschnitt gefallen. . . . .	76
5.2	Querschnitt durch einen Bahnkörper (Möser <i>et al.</i> , 2000). . . . .	77
5.3	Weichen- und Kreuzungskonstruktionen bei Gleisanlagen (Möser <i>et al.</i> , 2000). . . . .	77

5.4	Einfache Weiche mit den für Bestandsdokumentationen wichtigsten Begriffen (Möser <i>et al.</i> , 2000). . . . .	78
5.5	Mastbolzen, montiert auf einem Fahrleitungsmast (Durchmesser: 15mm; Länge: 60mm). . . . .	78
5.6	Normalfall (nach Kraus (2004)) . . . . .	80
5.7	Erreichbare Genauigkeiten der Objektkoordinaten beim Normalfall in Abhängigkeit der Flughöhe und der Kameraspezifikationen (Ricoh GXR(Tab.4.3)). . .	81
5.8	Satellitensichtbarkeit zwischen 9:00 und 17:00 am geplanten Einsatztag (aus <i>Trimble Geo Office</i> ). . . . .	83
5.9	Prinzip der Flugplanung und Darstellung der dafür notwendigen Parameter. Die Bezeichnungen in der Abbildung sind in den Tabellen 5.1 und 5.2 beschrieben (Kraus, 2004). . . . .	83
5.10	Flugplanung mit dem Programm <i>MikrokopterTool-OSD</i> . Die Werte aus der Tabelle 5.2 werden zur Wegpunktgenerierung verwendet (HiSystems GmbH, 2013). 85	85
5.11	Durchmesser der Passmarken in Abhängigkeit der Höhe und des Kontrasts. . . .	86
5.12	Übersichtsplan der ausgelegten und vermessenen Passmarken im Bereich der Teststrecke. Die roten Verbindungen stellen die GPS-Basislinien dar, die mittels statischer GPS-Messungen bestimmt wurden. Die grünen Verbindungen sind die Visuren zu den Mastbolzen für die freie Stationierung der Totalstation am PP1. . . . .	87
5.13	Zeiten der statischen GPS-Rohdatenaufzeichnung auf dem Punkt PP1 und den Passmarken M01, M08, M10 und M15 für die Basislinienauswertung zwischen den Punkten und der späteren Bestimmung der Transformationsparameter zwischen WGS84 und Landessystem. . . . .	87
5.14	Die Abbildung zeigt ein beispielhaftes Bild und Detailausschnitte aus 40m Höhe mit einer Belichtungszeit von 1/320, einer Blendenzahl von f/5.6 und ISO-400. Darunter sind die Detailausschnitte von Markierungen (Passmarken (1) und Kreuze (2)), Mastbolzen (3) und Gleise (4) dargestellt. . . . .	89
6.1	Höhenwerte der GPS-Auswertung (links) und die relative Höhe des Barometers (rechts) vom Flug in 40m Höhe. In beiden Zeitreihen ist ein Peak zu erkennen, über den die Zeitsynchronisation erfolgte (rote Kreise). Auch beim zweiten Flug konnte über diese Methode die Synchronisation erfolgen. . . . .	92
6.2	<b>Flug 1 (40m):</b> Darstellung der Trajektorie des Testfluges entlang der Eisenbahntrasse in Herzogenburg (Oben: Lage, Unten: Höhe), ausgewertet mittels Kalman-Filterung im Landeskoordinatensystem. Die Positionen der Fotos sind durch die cyanfärbigen Quadrate gekennzeichnet. . . . .	94

---

6.3	<b>Flug 1 (40m):</b> Darstellung der Orientierungslösung des Testfluges entlang der Eisenbahntrasse in Herzogenburg mit dem Kalman-Filter. Die gelben Kreise zeigen die Zeitpunkte der Kameraauslösung. . . . .	95
6.4	<b>Flug 1 (40m):</b> Darstellung der vom Kalman-Filter bestimmten Biase der Beschleunigungs- und Drehratensensoren. Oben: Biase der Beschleunigungssensoren - die horizontalen Komponenten (x, y) weisen einen zeitlich konstanten Bias auf, in z-Richtung ist eine zeitliche Drift deutlich erkennbar. Unten: konstante Biase in allen Achsrichtungen der Drehratensensoren . . . . .	96
6.5	<b>Flug 2 (70m):</b> Darstellung der Trajektorie des Testfluges entlang der Eisenbahntrasse in Herzogenburg (Oben: Lage, Unten: Höhe), ausgewertet mittels Kalman-Filterung. Die Positionen der Fotos sind durch die cyanfärbigen Quadrate gekennzeichnet. . . . .	98
6.6	<b>Flug 2 (70m):</b> Darstellung der Orientierungslösung des Testfluges entlang der Eisenbahntrasse in Herzogenburg mit dem Kalman-Filter. Die gelben Kreise zeigen die Zeitpunkte der Kameraauslösung. . . . .	99
6.7	<b>Flug 2 (70m):</b> Darstellung der vom Kalman-Filter bestimmten Biase der Beschleunigungs- und Drehratensensoren. Oben: Biase der Beschleunigungssensoren - die horizontalen Komponenten (x, y) weisen einen zeitlich konstanten Bias auf, in z-Richtung ist eine zeitliche Drift deutlich erkennbar. Unten: konstante Biase in allen Achsrichtungen der Drehratensensoren . . . . .	100
6.8	<b>Flug 1 (40m):</b> Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden <b>Orientierungswerten</b> und den aus den indirekt bestimmten Orientierungen der Kamera. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer <i>Mounting-Calibration</i> . Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der individuell berechneten <i>Mounting-Calibration</i> . . . . .	102
6.9	<b>Flug 1 (40m):</b> Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden <b>GPS-Positionen</b> und den Positionen der indirekt bestimmten Projektionszentren. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer <i>Mounting-Calibration</i> . Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der individuell berechneten <i>Mounting-Calibration</i> . . . . .	103
6.10	<b>Flug 1 (40m):</b> Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden <b>Orientierungswerten</b> und den aus den indirekt bestimmten Orientierungen der Kamera. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer <i>Mounting-Calibration</i> . Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der am Messdach bestimmten <i>Mounting-Calibration</i> . . . . .	105

6.11 <b>Flug 1 (40m):</b> Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden <b>GPS-Positionen</b> und den Positionen der indirekt bestimmten Projektionszentren. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer <i>Mounting-Calibration</i> . Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der am Messdach bestimmten <i>Mounting-Calibration</i> . . . . .	106
6.12 <b>Flug 2 (70m):</b> Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden <b>Orientierungswerten</b> und den aus den indirekt bestimmten Orientierungen der Kamera. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer <i>Mounting-Calibration</i> . Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der individuell berechneten <i>Mounting-Calibration</i> . . . . .	108
6.13 <b>Flug 2 (70m):</b> Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden <b>GPS-Positionen</b> und den Positionen der indirekt bestimmten Projektionszentren. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer <i>Mounting-Calibration</i> . Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der individuell berechneten <i>Mounting-Calibration</i> . . . . .	109
6.14 <b>Flug 2 (70m):</b> Differenzen zwischen den aus Kalman-Filter stammenden <b>GPS-Positionen</b> und den Positionen der mit <i>Orpheus/Orient</i> indirekt bestimmten Projektionszentren. Links: Differenzbildung ohne Berücksichtigung einer <i>Mounting-Calibration</i> . Rechts: Differenzen nach der Berücksichtigung der individuell berechneten <i>Mounting-Calibration</i> . . . . .	110
6.15 <b>Flug 1 (40m):</b> Auswirkungen der direkten und indirekten Georeferenzierung auf die Passpunktgenauigkeit mit den Varianten 1-4. . . . .	113
6.16 <b>Flug 2 (70m):</b> Auswirkungen der direkten und indirekten Georeferenzierung auf die Passpunktgenauigkeit mit den Varianten 1-4. . . . .	114
6.17 Höhenabweichung eines Gleisstranges über eine Länge von etwa 180m zwischen terrestrisch vermessenen Gleis (blau, reduziert auf Höhe 0) und dem photogrammetrisch ausgewerteten Gleis (rot-strichliert). Die in regelmäßigen Abständen von 10-20m verglichenen 11 Höhenpunkte weichen um max. 18mm vom terrestrisch vermessenen Bestand ab. . . . .	117
6.18 Ausschnitt der stereoskopischen Auswertung von diversen Objekten (rote Linien) und der Kombination mit den terrestrisch vermessenen Ergänzungen (weiße Linien). Den Auswertungen ist das erzeugte Orthophoto als Zusatzinformation und zur besseren Orientierung hinterlegt. . . . .	119
6.19 Abweichungen zwischen geplanten Wegpunkten und tatsächlich angeflogenen Wegpunkten. Die oberen beiden Grafiken visualisieren die Differenzen der Rechts- und Hochwerte, die unteren beiden die Differenzen der Basisabstände zwischen zwei benachbarten Fotos. . . . .	121

# Literaturverzeichnis

AGISOFT LLC (2014). AgiSoft - Image-based 3D modeling. <http://www.agisoft.ru/>.

ATMEL (2012). Datenblatt ATMEGA2560 - Mikroprozessor. <http://www.atmel.com/Images/doc2549.pdf>.

AUSTRO CONTROL GMBH (2014). Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 67. [http://www.austrocontrol.at/luftfahrtbehoerde/lizenzen\\_\\_bewilligungen/flugbewilligungen/unbemannte\\_lfz](http://www.austrocontrol.at/luftfahrtbehoerde/lizenzen__bewilligungen/flugbewilligungen/unbemannte_lfz).

A.WIESER (2010). *Vorlesungsskriptum: Positionierung und Navigation mit Satellitenverfahren*. Institut für Geodäsie und Geophysik, TU Wien., Wien, Österreich.

BARBOUR, N. AND SCHMIDT, G. (2001). Inertial sensor technology trends. *Sensors Journal, IEEE*, 1, 332–339.

BARTON, J.D. (2012). Fundamentals of small unmanned aircraft flight. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 31, 132–149.

ÖBB (2006a). Pflichtenheft für Photogrammetrie und Laserscanning der ÖBB. [http://konzern.oebb.at/de/B2B\\_Online/OeBB\\_CAD-Richtlinie/F03\\_v00\\_Pflichtenheft\\_Photogrammetrie.pdf](http://konzern.oebb.at/de/B2B_Online/OeBB_CAD-Richtlinie/F03_v00_Pflichtenheft_Photogrammetrie.pdf).

ÖBB (2006b). Pflichtenheft für terrestrische Vermessung der ÖBB. [http://www.a-eder.com/fusion/downloads/vermessung/pflichtenheft\\_terr.pdf](http://www.a-eder.com/fusion/downloads/vermessung/pflichtenheft_terr.pdf).

ÖBB (2013). Zahlen, Daten, Fakten. [http://www.oebb.at/infrastruktur/de/2\\_0\\_Das\\_Unternehmen/Daten\\_und\\_Fakten/index.jsp](http://www.oebb.at/infrastruktur/de/2_0_Das_Unternehmen/Daten_und_Fakten/index.jsp).

BMVIT (2014). Luftfahrtgesetz. <http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10011306>.

BRIESE, C., FORTNER, R., SAGER, P. AND PFEIFER, N. (2013). Vom modellflughobby zu unbemannten flugsystemen für die geodatenerfassung. *VGI (Vermessung und Geoinformation)*, 101, 64–74.

- CHINA SATELLITE NAVIGATION OFFICE (2014). Galileo - Offizielle Homepage des China Satellite Navigation Office. <http://en.beidou.gov.cn/>.
- CRAMER, M. AND STALLMANN, D. (2002). System calibration for direct georeferencing. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34, 79–84.
- DIY DRONES (2014). DIY DRONES - The Leading Community for Personal UAVs. <http://diydrones.com/profiles/blogs/apm-2-0-release>.
- EISENBEISS, H. (2009). *UAV photogrammetry*. Ph.D. thesis, Zürich, Eidgenössischen Technischen Hochschule.
- EUROPEAN GNSS AGENCY (2014). Galileo - Offizielle Homepage der European GNSS Agency. <http://www.gsa.europa.eu/>.
- EVERAERTS, J. *et al.* (2008). The use of unmanned aerial vehicles (uavs) for remote sensing and mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 1187–1192.
- FEDERAL SPACE AGENCY (2014). GLONASS - Offizielle Homepage der Federal Space Agency. <http://glonass-iac.ru/en/>.
- GEVATTER, H.J. (2000). *Automatisierungstechnik 1: Mess- und Sensortechnik*, Vol. 1. Springer DE.
- GLIRA, P. (2012). *Direkte Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost-Sensoren*. Master's thesis, Technischen Universität Wien.
- GRID-IT (2014). Homepage von Grid-IT Gesellschaft für angewandte Geoinformatik mbH. <http://www.grid-it.at/uav/system>.
- HARING, A. (2007). *Die Orientierung von Laserscanner- und Bilddaten bei der fahrzeuggestützten Objekterfassung*. Ph.D. thesis, Department of Geodesy and Geoinformation - Technischen Universität Wien.
- HiSYSTEMS GMBH (2013). MikroKopter. <http://www.mikrokoetter.de>.
- HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. AND WASLE, E. (2008). *GNSS: Global Navigation Satellite Systems: Gps, Glonass, Galileo, and More*. Springer.
- HONEYWELL (2010). Datenblatt HMC5843 - Magenometer. [http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense\\_Brochures-documents/HMC5843.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5843.pdf).

- IGS (2014). IGS - International GNSS Service. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/index.html>.
- INVENSENSE INC. (2013). Datenblatt MPU6000 - IMU. <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-6000A-00v3.4.pdf>.
- KAGER, H., FROTTENSTEINER, M., KERSCHNER AND PSTADLER (2002). *ORPHEUS User Manual*. Institut für Photogrammetrie and Fernerkundung, TU Wien., Wien, Österreich.
- KAPLAN, E.D. AND HEGARTY, C.J. (2005). *Understanding GPS: principles and applications*. Artech house.
- KRAUS, K. (1996). *Photogrammetrie: Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. Walter de Gruyter, 2nd edn.
- KRAUS, K. (2004). *Photogrammetrie Band 1*. Walter de Gruyter, 7th edn.
- LEICA GEOSYSTEMS AG (2009). Leica TPS1200+ Series - Leistungsstarke Totalstationen. [http://www.leica-geosystems.at/downloads123/zz/tps/tps1200/brochures/Leica\\_TPS1200+\\_brochure\\_de.pdf](http://www.leica-geosystems.at/downloads123/zz/tps/tps1200/brochures/Leica_TPS1200+_brochure_de.pdf).
- LUHMANN, T. (2010). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichmann Berlin, 3rd edn.
- MEAS SWITZERLAND SÀRL (2012). Datenblatt MS5611 - Luftdrucksensor. <http://www.meas-spec.com/downloads/MS5611-01BA03.pdf>.
- MEDIA TEK (2014). Datenblatt MT3329 - GPS. [http://www.mediatek.com/\\_en/01\\_products/04\\_pro.php?sn=50](http://www.mediatek.com/_en/01_products/04_pro.php?sn=50).
- MÖSER, M., MÜLLER, G., SCHLEMMER, H. AND WERNER, H. (2000). *Handbuch Ingenieurgeodäsie, Eisenbahnbau*. Wichmann, 2nd edn.
- NATIONAL COORDINATION OFFICE FOR SPACE-BASED POSITIONING, NAVIGATION, AND TIMING (2014). GPS - Offizielle Homepage des U.S. Government. <http://www.gps.gov/>.
- NIEMEIER, W. (2008). *Ausgleichsrechnung - Statistische Auswertungsmethoden*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, Germany, 2nd edn.
- NOAA (2014). NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.noaa.gov/>.
- PEIPE, J. (1988). Luftaufnahmen aus geringer flughöhe - flugsysteme, sensoren und anwendungen. *ISPRS Archives*, XXVII Part B11, 356–369.

- PEIPE, J., PRZYBILLA, H.J., HASTEDT, H. AND RIEKE-ZAPP, D. (2010). Neue digitalkameras mit erhöhter stabilität? *DGPF Tagungsband 19/2010 - Dreiländertagung OVG, DGPF und SGPF*, 19, 485–488.
- PPM GMBH (2014). ppm GmbH - Precise Positioning Management. <http://www.ppmgmbh.com/>.
- RICOH COMPANY LTD. (2013). Ricoh GXR Produktseite. [http://www.ricoh.com/r\\_dc/de/gxr/](http://www.ricoh.com/r_dc/de/gxr/).
- STEMPFHUBER, W., EISENBEISS, H. AND KOLB, M. (2009). Genauigkeitsanalyse der 3d-trajektorie von mini-uavs. *Zukunft mit Tradition*, 29, 407–417.
- TAKASU, T. (2014). RTKLIB - An Open Source Program Package for GNSS Positioning. <http://www.rtklib.com/>.
- THELEN, S. (2000). Entwicklung des europäischen eisenbahnverkehrs.
- TWINS.NRN (2014). Homepage von Mechatronic - twins.nrn OG. <http://www.twins.co.at/>.
- UAV-G KONFERENZ (2013). UAV-G 2013 - Programmübersicht. [http://www.uav-g.org/presentations\\_online.htm](http://www.uav-g.org/presentations_online.htm).
- VAEB (2011). ÖBB 40 - Schriftliche Betriebsanweisung Arbeitnehmerschutz. [http://www.vaeb.at/mediaDB/681014\\_R8\\_OEBB40\\_web.pdf](http://www.vaeb.at/mediaDB/681014_R8_OEBB40_web.pdf).
- VAN BLYENBURGH, P. (1999). Uavs: an overview. *Air & Space Europe*, 1, 43–47.
- WEBER, R. (2008). *Vorlesungsskriptum: Geo-Koordinatensysteme*. Institut für Geodäsie und Geophysik, TU Wien., Wien, Österreich.
- WELCH, G. AND BISHOP, G. (1995). An introduction to the kalman filter.
- WENDEL, J. (2011). *Integrierte Navigationssysteme*. Oldenbourg Verlag München Wien, 2nd edn.
- WIEDEMANN, A. (2008). Inspektion linearer objekte mit flugzeuggestützten sensoren. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 17.
- WIESER, M. (2013). *Direkte Georeferenzierung von Photographien anhand von freier Hardware und quelloffener Software*. Master's thesis, Technischen Universität Wien.
- WOODMAN, O.J. (2007). An introduction to inertial navigation.
- ZAMG (2014). Magnetische Deklination 2012. <http://www.zamg.ac.at/cms/de/images/geophysik/magnetische-deklination-2012>.