

Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Unmanned Aircraft Systems in der Geoinformatik“ Eine Untersuchung zur Genauigkeit

vorgelegt von

Kim Wolter, akad. Geoinformatiker,
U1479, UNIGIS MSc Jahrgang 2010

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Gau-Bickelheim, 17.12.2012

In Erinnerung an

**Klaus Wolter, VT
1938-2011**

**Ursula Wolter
1944-2012**

Vorwort

Diese Arbeit stellt für mich den Schlusspunkt eines langen Weges dar, der 2003 mit dem UNIGIS Professional Studiengang begann und nun, nach Unterbrechungen und Umwegen, endet. Das Studium hat mir eine völlig neue Perspektive auf die Geoinformatik gegeben. Für mich ist die Geoinformatik ein Bindeglied; ein Kommunikationsmedium, das es ermöglicht, Menschen und Institutionen verschiedenster Fachbereiche zusammenzuführen und ihnen eine gemeinsame Basis zu geben, um neue Erkenntnisse zu erlangen. Gerade in der heutigen Zeit ist dies, meiner Meinung nach, unbedingt notwendig um schonend mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen umzugehen und die kommenden Aufgaben zu bewältigen.

„Der Raum ist die Schnittmenge unserer Umwelt und ihrer Themen“

Auch persönlich hat mich das Studium geprägt, da es doch eine enorme Herausforderung darstellt, Familie, Beruf und Studium unter einen Hut zu bekommen. Viele Menschen haben mich hierbei unterstützt, denen ich auf diesem Wege danken möchte:

Meinen Eltern Klaus und Ursula, die beide während meiner Arbeit an dieser Master Thesis verstorben sind; mein Vater hat das Interesse an der Vermessung in mir geweckt und damit meinen beruflichen Werdegang maßgeblich beeinflusst. Auch als Mensch ist er mein Vorbild. Ihnen beiden ist diese Arbeit gewidmet. Ich wollte, sie könnten sie noch lesen.

Meinem Arbeitgeber Alois Dhom: dafür, dass er mich schon vor Studienbeginn gefördert und gefordert und mich dadurch überhaupt dazu gebracht hat, über eine Weiterbildung nachzudenken. Auch während des Studiums hat er mich als mein Mentor hervorragend unterstützt.

Meinem Studienkollegen Klaus Jüttner, der mich zur Teilnahme am Master-Studiengang überredet hat. Es ist viel leichter und schöner, wenn man jemanden hat, mit dem man sich austauschen und messen kann.

Meinen Kollegen beim Ingenieurbüro Dhom, die mich bei der Durchführung der Feldversuche und Untersuchungen unterstützt haben. Ein besonderer Dank geht hier an Marcus Schink.

Robert Ritter danke ich für seine Einlassungen zur 3D-Transformationen, einem mir bis zu dieser Arbeit unbekanntem Phänomen.

Der größte Dank gilt aber meiner Frau und meinen Kindern, die während des Studiums oft auf mich verzichten mussten, mir aber immer alle Unterstützung haben zukommen lassen, auch in schwierigen Phasen. Ohne sie wäre das alles gar nicht möglich gewesen. Sabina, Anna und Roman: Ich weiß gar nicht, wie ich Euch dafür danken kann.

Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben und, dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Gau-Bickelheim, 17. Dezember 2012



Kim Wolter

Kurzfassung

Luftbildaufnahmen werden schon seit langem für photogrammetrische Auswertungen herangezogen. Der Aufwand und die damit verbundenen Kosten machten einen Einsatz hauptsächlich für große Gebiete interessant. Seit einiger Zeit zeichnet sich eine Entwicklung ab, die dies ändern könnte: Unmanned Aircraft Systems, kurz UAS, werden zunehmend für den zivilen Einsatz entwickelt und können mit Blick auf die Kosten auch für kleinere Gebiete genutzt werden. Bisher waren solche unbemannten Flugkörper, die man allgemein auch Drohnen nennt, hauptsächlich aus dem militärischen Bereich bekannt. Dabei haben die Systeme nur den technischen Ansatz gemein. Die hier eingesetzte Drohne gehört mit ihrem Gesamtgewicht von etwa 1000 Gramm zu den sogenannten Mikrodrohnen. Diese sind immer günstiger, leistungsfähiger und leichter zu handhaben, weswegen sie auch für Ingenieurbüros zunehmend interessant werden. Bisher erstreckten sich die Einsatzbereiche vornehmlich auf Dokumentationsaufgaben, beispielsweise in der Archäologie oder bei der Beobachtung von Menschenmassen bei Großveranstaltungen. Hierfür können die Drohnen mit verschiedenen Kamerasystemen ausgestattet werden und bei Bedarf automatisch vordefinierte Routen abfliegen. Die Positionierung erfolgt dabei mittels Einsatz von Satellitennavigation und den aus der herkömmlichen Luftfahrt bekannten Inertial Measurement Units. Um weitere Einsatzgebiete, beispielsweise in der Geoinformatik, erschließen zu können, ist es unabdingbar die Genauigkeit der mit dem System erfassten Daten zu untersuchen. Aus diesem Grund müssen sowohl das Gesamtergebnis, als auch die Einzelkomponenten des Systems, bestehend aus Flugkörper, Kamera mit Halterung, Basisstation und Software überprüft werden. Dies ist vor allem deshalb interessant, weil es sich hier um handelsübliches Zubehör handelt, welches nicht für geodätische Anwendungen ausgelegt ist. Die Resultate dieser Untersuchungen sollen auch Verbesserungspotentiale aufzeigen um die Entwicklung von UA-Systemen voranzubringen. Es sind also geeignete Methoden zu erarbeiten, die erfassten Daten hinsichtlich ihrer Lage- und Höhengenaugkeit zu verifizieren. Für die benötigte Georeferenzierung der Luftbildaufnahmen wird eine Software entwickelt, die die für die Untersuchungen der Genauigkeit benötigten Daten verwendet.

Um das System kommerziell nutzen zu können, ist die Betrachtung der rechtlichen Seite unverzichtbar. Der zivile Einsatz von Drohnen ist gesetzlich nicht geregelt und die Erteilung von Fluggenehmigungen ist bisher nicht einheitlich gelöst. Es gibt schlicht und ergreifend eine Unsicherheit, wie mit dieser Entwicklung umgegangen werden soll. Besonders die

gesellschaftliche Akzeptanz ist in Zeiten von Diskussionen über den Schutz von Persönlichkeitsrechten ein wichtiges Thema. Die vorliegende Master Thesis beleuchtet auch diese Aspekte.

Die Haftung trägt in jedem Fall der verantwortliche Steuerer. Schon aus diesem Grund ist die Kenntnis der erzielbaren Lagegenauigkeit des UAV sehr interessant, um den sicheren Einsatz des Systems zu gewährleisten.

Aber was bedeutet eigentlich „genau“?

Schlagwörter: Nahbereichsphotogrammetrie, Unmanned Aircraft System, Kamera-
kalibrierung, Drohne, Geodaten, Koordinaten, GPS

Abstract

Aerial photographs can be used for a long time for photogrammetric evaluations. The effort and the associated costs made an application interesting mainly for large areas. For some time, there are signs of development that could change this. Unmanned aircraft systems, UAS in short, are increasingly being developed for civilian use and can also be used for smaller areas. Previously, such unmanned missiles, also commonly referred to as drone, and are mainly known from the military. The systems have only the technical approach in common. The used drone with a total weight of 1000 grams belongs to the class of microdrones. They are getting cheaper, more efficient and easier to handle, which is why they are also becoming increasingly attractive for engineering firms. Previously the applications stretched primarily on documentation tasks, for example in archeology or in the observation of crowds at major events. For this purpose, the drones are equipped with various camera systems and if necessary automatically departing predefined routes. The positioning is done through the use of satellite navigation and inertial measurement units known from conventional aircraft. In order to expand new applications, for example the geoinformatics, it is essential to examine the accuracy of the data captured by the system. For this reason, both the overall results, as well as the individual components of the missile, the camera with its mounts, base station and software have to be checked. This is particularly interesting, because common equipment is being used, that is not suitable for geodetic applications. The outcome of these investigations should also show improvement potentials in order to advance the development of the unmanned aircraft systems. This requires the development of appropriate methods, to verify the positional accuracy of the collected data. For the required georeferencing of aerial photographs, software is designed, which uses the information required for the investigation of the accuracy of data.

To use the system commercially, you must also consider the legal aspects. The civilian use of drones is not regulated by law and the granting of permits to fly is not solved consistently. There is quite simply an uncertainty in which way this development should be dealt with. Particularly the social acceptance in times of discussions on the protection of personal rights, are an important topic. The present master thesis also highlights these aspects.

In every case the liability lies upon the responsible operator. For this reason, knowledge of the achievable positional accuracy of the UAV is very interesting to ensure the safe use of the system.

But what does "accuracy" exactly mean?

Tags: close-range photogrammetry, unmanned aircraft system, camera calibration, threats, spatial data, coordinates, GPS

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit.....	v
Kurzfassung.....	vi
Abstract	viii
Inhaltsverzeichnis.....	x
Abbildungsverzeichnis	xii
Tabellenverzeichnis.....	xiv
Diagrammverzeichnis.....	xiv
Anmerkung	xiv
Abkürzungsverzeichnis und Glossar	xv
Struktur.....	xvii
1. Einführung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Hypothese, Ziele und erwartete Ergebnisse	4
1.3 Beabsichtigtes Publikum	6
1.4 Themen, die nicht behandelt werden.....	6
1.5 Lösungsansatz	7
2. Literaturüberblick.....	10
3. Lösungsansatz	15
3.1 Unmanned Aircraft System (UAS)	15
3.1.1 Unmanned Aerial Vehicle (UAV).....	16
3.1.2 Kamerahalterung	19
3.1.3 Kamera	20
3.1.4 Basisstation (inkl. Notebook).....	21
3.1.5 mdCockpit (Version 3.0.x).....	22
3.1.6 Fernsteuerung	26
3.2 Theoretische Überlegungen.....	26
3.3 Testgebiet	36
4. Untersuchung zur Genauigkeit.....	38
4.1 Auswahl des Testgeländes.....	39
4.2 Planung der Flugroute	46

4.3 Testflüge.....	50
4.4 Stationäre Untersuchung zur Lage und Höhe.....	53
4.5 Kamerakalibrierung.....	58
4.6 Positionsbestimmung des UAV mit Tachymetertracking	70
4.7 Abweichungen der Kameralage	81
4.8 Georeferenzierung der Luftbildaufnahmen	83
5. Zusammenfassung der Ergebnisse und Analyse	91
6. Diskussion und Ausblick.....	95
Literaturverzeichnis.....	99
Anhang	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Taubenkamera, <i>Sammlung Schweizer Kameramuseum, Vevey</i>	1
Abbildung 2:	Quadrocopter, md4-200	3
Abbildung 3:	Ablaufschema der Master Thesis	9
Abbildung 4:	Komplettsystem md4-200 mit Drohne, Basisstation mit Notebook und Fernbedienung	16
Abbildung 5:	Antriebsschema eines Quadrocopters	17
Abbildung 6:	Steuerung der Drohne über die Fernbedienung, <i>Handbuch md4-200</i>	17
Abbildung 7:	Bordelektronik	18
Abbildung 8:	PENTAX Optio S1 mit Kamerahalterung.....	20
Abbildung 9:	Der Downlink-Decoder im Einsatz	22
Abbildung 10:	Routenplanung mit Waypoint Editor	24
Abbildung 11:	Auszug aus der Kommandoliste.....	25
Abbildung 12:	Schematische Darstellung der Zentralprojektion	27
Abbildung 13:	Schema der Luftbildaufnahme	28
Abbildung 14:	Rotationsachsen in der Luftfahrt	29
Abbildung 15:	Schema des perspektivischen IST-Rasters.....	31
Abbildung 16:	Bildkoordinatensystem.....	32
Abbildung 17:	Angabe von Pixelgröße und Rotation	32
Abbildung 18:	Vom Autor erstellte Worldfile-Berechnungsfunktion (EXCEL)	33
Abbildung 19:	Schematische Darstellung einer 3D-Helmert-Transformation.....	35
Abbildung 20:	Einteilung des Luftraums in der Rhein-Main-Region, <i>Google Earth, Skyfool</i> ..	37
Abbildung 21:	Sicherheitszone um Hubschrauberlandeplatz und das beabsichtigte Testgebiet	38
Abbildung 22:	Geplantes Testgebiet Pfingstwiese, <i>Orthophoto, Stadtverw. Bad Kreuznach</i> ...	39
Abbildung 23:	Testgebiet am Kuhberg	43
Abbildung 24:	Besichtigung des Geländes	44
Abbildung 25:	Lage des Referenzrasters nach der Absteckung	45
Abbildung 26:	Herstellung der Referenzpunkte.....	46
Abbildung 27:	Einstellungen der Flugroute	49
Abbildung 28:	Routenübersicht und 3D Ansicht	50
Abbildung 29:	Erste Luftbilder	51
Abbildung 30:	Untersuchung der Kameraausrichtung	52
Abbildung 31:	Höhe der empfangbaren Satelliten über dem Horizont in Grad, <i>Trimble Planning</i>	54
Abbildung 32:	Das UAV zentriert über dem Kontrollpunkt	54

Abbildung 33:	Stationärer Koordinatentest der Drohne.....	55
Abbildung 34:	Stationärer Koordinatentest der Drohne mit selbstgerechneten Differenzen.....	57
Abbildung 35:	Schema der Kamerakalibrierung.....	59
Abbildung 36:	Absteckung des Testfeldes.....	60
Abbildung 37:	Eine exakte Positionierung mit einem Fotostativ war nicht möglich.....	61
Abbildung 38:	Mit einer eigens hergestellten Halterung konnte die Kamera auf dem Dreifuss eines Vermessungsstativs aufgebaut werden.	61
Abbildung 39:	Ausrichtung der Kamera im Abstand von 2m zur Wand.	62
Abbildung 40:	Kalibrierungsaufnahme aus einem Abstand von 2m / erstes Bild im ersten Satz (2m_1_1)	63
Abbildung 41:	Visualisierte Residuen für Bild 2m_1_1	64
Abbildung 42:	Visualisierte Residuen für Bild 2m_1_1 (Montage)	65
Abbildung 43:	Messstrecken zur Brennweitenbestimmung.....	68
Abbildung 44:	Verbesserte Ergebnisse bei den Testflügen.....	69
Abbildung 45:	Schemaskizze zum Tachymetertracking	70
Abbildung 46:	Versuche mit Reflektormarken	72
Abbildung 47:	Miniprisma mit flexibler Alu-Halterung	73
Abbildung 48:	Standpunktbestimmung und Anbringen der Miniprismen	74
Abbildung 49:	Tachymetertracking, Aufnahme durch das Okular	75
Abbildung 50:	Aufmaß Drohne.....	76
Abbildung 51:	Grafische Gegenüberstellung der Koordinaten	79
Abbildung 52:	Angewandte 3D-Helmert-Transformation	81
Abbildung 53:	Berechnung der Bildursprungsordinate.....	85
Abbildung 54:	Georeferenziertes Bild (Route_1_1) mit SOLL- und IST-Punkten	87
Abbildung 55:	Alle digitalisierten Passpunkte mit Ellipsen	88
Abbildung 56:	Streckenvergleich (Route_1_5).....	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispielhafte Gegenüberstellung der Sichtbarkeitsanalyse.....	53
Tabelle 2: Beispielhafte Gegenüberstellung zweier Koordinatenuntersuchungen.....	56
Tabelle 3: Übersicht über die Transformationsergebnisse	65
Tabelle 4: Beispiel zur Analyse der Brennweite	68
Tabelle 5: Auswertung des Tachymetertrackings	77
Tabelle 6: Auswertung von Nick- und Rollwinkel der Kamera mit 3D-Helmert-Transformation ...	82
Tabelle 7: Auswertung der Transformationsparameter aller Aufnahmen	86
Tabelle 8: Vergleich von Strecken zwischen unterschiedlichen Aufnahmen	88
Tabelle 9: Vergleich von Strecken innerhalb einer Aufnahme	89

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Analyse „Höhe über Grund“	77
Diagramm 2: Analyse „Lageabweichung“	78
Diagramm 3: Analyse „Richtungswinkel“	80

Anmerkung

Die verwendeten Abbildungen, Tabellen und Diagramme wurden in der Regel selbst erstellt. Ist die nicht der Fall, handelt es sich um zur Veröffentlichung freigegebene Darstellungen. Die Quelle ist in diesem Fall angegeben.

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

DGPS	Differential Global Positioning System / Globales Positionssystem mit Differentialsignal. Es dient der Steigerung der GPS-Genauigkeit. z.B. SAPOS oder EGNOS.
DOP	Dilution of Precision / Verringerung der Genauigkeit. Auch: Geometric Dilution of Precision (GDOP). Maß für die Streubreite der Messwerte bei Sattelitennavigationssystemen. 3D
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service. Europäisches Differential Global Positioning System (DGPS) als Erweiterungssystem zur Satellitennavigation (GPS) zur Steigerung der Genauigkeit auf 1m-3m mittels geostationärem Satelliten
GNSS	Global Navigation Satellite System / Globales Navigationssatellitensystem. Überbegriff für Positionsbestimmung via Satelliten
GPS	Global Positioning System. Amerikanisches Satellitensystem zur Positionsbestimmung. Pendant zu Galileo (Europa) und GLONASS (Russische Föderation)
Framegrabber	Gerät zur Digitalisierung analoger Videodaten
INS	Inertial Navigation System / Trägheitsnavigationssystem. Sensoren zur Messung von Beschleunigung und Drehung frei im Raum beweglicher Körper.
IMU	Inertial Measurement Unit / eigentliche Messeinheit innerhalb des INS. Es erfasst die 6 Freiheitsgrade: Auf/Abstieg, links, rechts, sowie die Gier-, Roll- und Neigungsdrehungen
Kalibrierung	ist ein Messprozess zur zuverlässig reproduzierbaren Feststellung und Dokumentation der Abweichung einer Maßverkörperung zu einer anderen Maßverkörperung, die als normal bezeichnet wird
Meridiankonvergenz	Winkel zwischen Geographisch-Nord und Gitter-Nord

Mikrodrohne	UAV mit einem Einsatzgewicht bis 5 kg.
Postprocessing	Nachbearbeitung der gelieferten Ergebnisse, in der GPS-Vermessung auch das nachträgliche Bearbeiten der GPS-Werte zur Genauigkeitssteigerung
RINEX	Receiver Independent Exchange Format / Empfängerunabhängiges Austauschformat für GNSS-Rohdaten
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung. Ein GPS-Referenzdienst, der Korrekturdaten zum GNSS-Empfänger sendet. Die Genauigkeit lässt sich damit auf unter 1cm steigern.
TPS	Tachymeter Positioning System / Positionsbestimmung bewegter Objekte mittels zielverfolgender Tachymeter
UAS	Unmanned Aircraft System, Gesamtsystem bestehend aus Drohne, Bodenstation und Kamera
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, unbemanntes Luftfahrzeug oder auch Drohne

Struktur

Kapitel 1 gibt zunächst einen Überblick über die Beweggründe und die Motivation zu dieser Arbeit. Aus den dort genannten Anforderungen werden die Hypothese und die weiteren Fragen abgeleitet und beschrieben. Ziele und Nicht-Ziele werden ebenso benannt wie das beabsichtigte Publikum und die Diktion. Am Ende des Kapitels wird der geplante Lösungsansatz aufgezeigt.

Einen Überblick über die in der Arbeit verwendete Literatur erhält man in Kapitel 2. Hier wird der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben.

In Kapitel 3 werden die theoretischen Grundlagen der Arbeit vermittelt, die notwendig sind, um die in Kapitel 4 vorgenommenen Untersuchungen besser nachvollziehen zu können. Ferner wird das eingesetzte Werkzeug, sprich das Unmanned Aircraft System, vorgestellt und ausgeführt. Auch die Anforderungen an das für die Feldversuche benötigte Testgebiet werden erläutert.

Kapitel 4 beschreibt die praktische Umsetzung der Untersuchungen. Beginnend von der Auswahl des Testgebietes, der Beantragung der notwendigen Genehmigungen, der Flugplanung und Durchführung der Testflüge bis hin zu innerhäusigen Auswertung wird der gesamte Prozess beschrieben. Da Untersuchungsmethoden und Vorgehensweise in direkter Abhängigkeit zu den gemachten Ergebnissen stehen, werden in diesem Kapitel auch die Ergebnisse diskutiert. Ein besonderes Augenmerk sei hier auf die Kalibrierung der Kompaktkamera gelegt, die in diesem Zusammenhang bisher noch nicht betrachtet wurde.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung umfasst Kapitel 5. Dabei wird auch ein kritischer Blick auf die verwendeten Untersuchungsmethoden, sowie eine Beurteilung der Gesamtsituation für die Praxis, die auch die rechtliche Situation einschließt.

Kapitel 6 enthält den Ausblick auf die künftige Entwicklung und Ansätze, die Arbeit weiterzuführen.

1. Einführung

1.1 Motivation



Abbildung 1: Taubenkamera

„Genauigkeit, die

Grad der Annäherung an ein gewünschtes oder erforderliches Ergebnis.“ (Duden, 2006)

Es gibt unzählige Möglichkeiten, Koordinaten zu Objekten zu ermitteln und damit die Grundlage für viele klassische GIS-Anwendungen zu schaffen. Die Photogrammetrie ist hier als ein wichtiger Baustein zu nennen, besteht hierbei doch die Möglichkeit sehr große Bereiche flächendeckend oder schwer zugängliche Bereiche überhaupt zu erfassen. In Zeiten von Google Earth, OpenStreetMap, Navigationsgeräten und Smartphones stehen Luftbildaufnahmen nahezu überall und vor allem kostenlos zur Verfügung. Dem entgegen steht der große technische Aufwand, der für die Erfassung dieser Aufnahmen mittels Satelliten oder Befliegungen betrieben werden muss. Aus diesem Grund lohnt sich der finanzielle Einsatz in der Regel nur für genannte großflächige Anwendungen oder wenn die Daten für eine große Anzahl von Anwendern interessant sind.

Die in den vergangenen Jahren vorangetriebene Entwicklung von Drohnen, hier im speziellen von Mikrodrohnen für die zivile Nutzung, stellt eine kostengünstige Alternative dar, um Aufnahmen aus der Vogelperspektive zu machen. Darüber hinaus ergeben sich aus der niedrigen Flughöhe von 3m bis 150m neue Einsatzgebiete, da für viele Anwendungen auch Luftbilder in kleineren Ausschnitten genügen. Beispielhaft sind hier Einsätze in der Archäologie, im Denkmalschutz oder auch bei der Deponieüberwachung in der Literatur beschrieben. Als weiteres Einsatzgebiet ist die Überwachung von Menschenmengen oder Großschadensereignissen bei Polizei- und Rettungsdiensten.

Die in unserem Ingenieurbüro eingesetzte Drohne wird in erster Linie zu Dokumentationszwecken verwendet. Sie ermöglicht den Blick auf bisher schwer zugängliche Bereiche, wie Dachflächen von Kirchen oder auch künftig die Zustandsbewertung von Windrädern, ohne auf Gerüst oder Kranwagen zurückgreifen zu müssen. Es handelt sich dabei um einen sogenannten Quadrocopter; er besitzt also 4 Rotoren. Zusammen mit den eingebauten Sensoren, Gyroskopen, und nicht zuletzt dem GPS-Chip sorgen die Rotoren für eine stabile Fluglage. Die Vorteile liegen vor allem in der relativ leichten Handhabung (im Gegensatz herkömmlicher Modellhelikopter) sowie der Tatsache, dass der Flugkörper an Ort und Stelle verharren kann.



Abbildung 2: Quadrocopter, md4-200

Das verwendete Modell ist in der Lage, im Vorfeld geplante Routen abzufliegen und an definierten Punkten / Koordinaten Flugmanöver und Fotoaufträge abzuarbeiten.

Kenntnisse zur Genauigkeit der erfassten Daten zu gewinnen ist aus verschiedenen Gründen relevant. Zum Einen ist es natürlich sehr interessant zu prüfen, in wieweit sich die Investition auch hinsichtlich klassischer Vermessungsaufgaben einbinden lässt. Angaben zur Genauigkeit der mittels UAS erfassten Geodaten sind auch Grundvoraussetzung für die Abschätzung von möglichen Einsatzgebieten bzw. der ggf. notwendigen Arbeitsschritte im Postprocessing, die idealerweise so gering wie möglich gehalten werden sollen. Beispielsweise muss die Drohne für eine Schadensbegutachtung relativ nahe an das Objekt herangeführt werden. Um die Flugroute der Drohne so zu planen, dass ein sicherer Einsatz gewährleistet ist, sind Kenntnisse zur Lagegenauigkeit unabdingbar.

Wie die Arbeit zeigen wird, ist die rechtliche Grundlage, auf der man arbeitet eher vage, da Drohnen im zivilen Einsatz, im Gegensatz zu den allgemein bekannten militärischen Zwecken, in der Rechtsprechung nicht eindeutig berücksichtigt sind. Das führt u.a. dazu, dass sich der Gesetzgeber schützt, indem er den Betreiber und den Anwender von UAS voll in die Haftung nimmt! Aufgrund dieser unklaren Rechtslage ist es auch äußerst schwierig, einen Versicherungsschutz zu bekommen.

So ist es nur naheliegend, dass die Frage aufkommt, wie lagegenau die Drohne die in der Routenplanung vorgegebenen Manöver abfliegt, da dies bei Einsätzen im Nahbereich mitunter teure Konsequenzen haben kann.

Die Untersuchung der Genauigkeit soll Thema dieser Master Thesis sein. Auch die rechtlichen Rahmenbedingungen und unternehmerischen Gesichtspunkte sollen zumindest in Ansätzen betrachtet werden.

1.2 Hypothese, Ziele und erwartete Ergebnisse

Mit der vorliegenden Arbeit soll überprüft werden, ob die mittels des eingesetzten UAS ermittelten Geodaten den Genauigkeitsanforderungen für die topographische Bestandsaufnahme genügen. Die hierfür benötigte Mindestgenauigkeit wird auf 0,3m festgelegt.

Es gibt zu diesem Thema bereits einige Untersuchungen und wissenschaftliche Arbeiten, die jedoch in erster Linie auf eine Nachbearbeitung der Luftbilder zielen. Um eine Beurteilung der Genauigkeit vornehmen zu können, ist es aber zunächst einmal wichtig die originäre Genauigkeit des Systems zu kennen. Die Georeferenzierung von Luftbildern über Passpunkte kann zwar die Koordinatenermittlung ermöglichen, dadurch wird sich die Genauigkeit der Werte aber nicht zwangsläufig verbessern (Stichwort: Verzerrung der Luftbilder). Die Daten des Systems dürfen also nicht verändert werden. Auf das Postprocessing wird verzichtet, um die Ursprungswerte nicht zu verfälschen. Wie die Arbeit zeigen wird, spricht man bei diesem Vorgehen von „direkter Georeferenzierung“. Des Weiteren soll untersucht werden, welche Genauigkeiten ohne Passpunkte zu erreichen sind (was per Definition eine Nachbearbeitung der Daten nach sich ziehen würde). Dies kann in nicht zugänglichen Bereichen notwendig sein, in denen keine Passpunkte bestimmt werden können. Zudem lassen sich die Kosten durch den Verzicht auf Passpunktbestimmungen erheblich verringern; ein weiterer Anreiz.

Neben der absoluten Genauigkeit ist auch interessant, die relative Genauigkeit zu kennen. Eine Funktion der Drohne ist die Fotodokumentation eines bestimmten Gebietes mittels einer Reihe aneinander angrenzenden / überlappenden Aufnahmen. Hier gilt es zu untersuchen, wie diese Aufnahmen zueinander passen.

Ein Unmanned Aircraft System besteht aus unterschiedlichen Teilen, die in der Vorbereitung und während des eigentlichen Flugs zum Einsatz kommen. Die Komponenten müssen hinsichtlich ihrer Funktionsweise daraufhin geprüft werden, ob und in welcher Weise sie für die Ergebnisse relevant sind. Anschließend müssen Ansätze gefunden werden, wie die vorher ermittelten Parameter hinsichtlich ihrer Genauigkeit untersucht werden können und welchen Einfluss sie auf das Gesamtergebnis haben. Dies verspricht schon aus dem Grund interessant zu werden, da die Drohne nicht zum geodätischen Einsatz entwickelt wurde und „handelsübliche“ Bestandteile einsetzt.

Zwangsläufig werden durch die Untersuchung auch Verbesserungspotenziale aufgezeigt. Die Arbeit soll durchaus auch als Grundlage dienen, die Ergebnisse von Mikrodrohnen weiter zu verbessern. Der Hersteller des hier im Einsatz befindlichen Systems hat bereits Interesse an den Ergebnissen angemeldet, da bei den verschiedenen Gesprächen deutlich wurde, dass es durchaus unterschiedliche Interpretationen des Begriffes „genau“ gibt. Ebenso wurde deutlich, dass die Komponenten bisher noch nicht in diesem Ausmaß untersucht wurden.

Das wesentliche Ziel der Arbeit ist es, vertiefte Kenntnisse zur Genauigkeit der Ergebnisse der mit dem eingesetzten UAS erhobenen Daten zu erlangen. Darüber hinaus sollen aber auch die Rahmenbedingungen zum Erreichen dieser Ergebnisse bekannt sein. Die Ergebnisse müssen reproduzierbar sein, um einen kommerziellen Nutzen aus der Anwendung zu ziehen. Hierfür soll das System unter realen Bedingungen getestet werden. Sind die Ergebnisse also reproduzierbar? Die bisherigen Erfahrungen mit dem System lassen vermuten, dass dem Wetter hier eine zentrale Rolle zukommen wird.

Für die erfolgreiche Nutzung des Systems ist die rechtliche Situation zum Einsatz von Drohnen zu kommerziellen Zwecken ebenso wichtig. Die Erteilung von Flug- und Aufstiegsgenehmigungen ist in Deutschland Ländersache und entsprechend heterogen. Obwohl es sich bei den geplanten Testflügen um wissenschaftliche Untersuchungen handelt, werden die evtl. erforderlichen Genehmigungen eingeholt, wie es für eine kommerzielle Nutzung in Rheinland-Pfalz notwendig ist um realistische Bedingungen zu schaffen. Ferner wird ein Blick auf die Abwicklung in anderen Bundesländern geworfen.

Beschrieben wird also die gesamte Prozesskette des Drohneneinsatzes: Genehmigung, Datengrundlage, Planung, Durchführung und Analyse. Die Arbeit enthält überdies auch eine Art Erfahrungsbericht. Die Ergebnisse sollen somit im Idealfall auch als Entscheidungshilfe für potenzielle UAS-Anwender aus dem Bereich Geodäsie und Geoinformatik verwendet werden können.

1.3 Beabsichtigtes Publikum

Dementsprechend richtet sich die Arbeit auch an interessierte Geodäten und Geoinformatiker, die sich mit dem Thema UAS auseinandersetzen und sich informieren möchten. Grundkenntnisse über den Einsatz von GPS-Empfänger und der Nahbereichsphotogrammetrie sollten vorhanden sein. Ansonsten wird versucht, die eingesetzte Technik verständlich näherzubringen.

Für den größten Teil dieser Arbeit wird der pluralis auctoris verwendet, um Generalität und Objektivität auszudrücken.

1.4 Themen, die nicht behandelt werden

Wie in Kapitel 1.2. beschrieben, ist es erstes Ziel der Arbeit Aussagen zur Genauigkeit des eingesetzten Systems zu treffen. Die dabei herausgearbeiteten Fehlerquellen bzw. Verbesserungsmöglichkeiten werden genannt, aber es ist nicht Ziel der Arbeit diese auch umzusetzen. Es werden auch keine Veränderungen vorgenommen, um die Ergebnisse zu verbessern.

Untersucht wird die Ermittlung von 2D-Koordinaten. Es wird nicht untersucht, in wieweit Höhenangaben aus Luftbildern und digitalen Geländemodellen ermittelt werden können. Die Untersuchungen zur Flughöhe der Drohnen dienen in erster Linie zur Georeferenzierung der erzeugten Aufnahmen. Sie sind aber sicherlich auch für die 3D-Auswertung relevant.

1.5 Lösungsansatz

Zur Untersuchung der Genauigkeit des UAS wird folgendermaßen vorgegangen:

- Zunächst gilt es sich einen umfassenden Blick über den Stand der Technik und der Forschung zu verschaffen. Hierzu besteht unter anderem Kontakt zur Fachhochschule Mainz, die auf diesem Gebiet tätig ist. Darüber hinaus wird auch ein intensiver Austausch mit dem Hersteller des UAS, der Firma Microdrones aus Siegen, stattfinden, der sich schon im Vorfeld sehr interessiert zeigte. Eine intensive Literaturrecherche ist obligatorisch.
- Um die Lagegenauigkeit der UAS-Ergebnisse zu überprüfen, bietet es sich an, die Ergebnisse eines Fluges mit SOLL-Werten zu vergleichen. Für den Geodäten ist es naheliegend, ein Versuchsraaster anzulegen, das als Referenz verwendet werden kann. Die während eines Fluges erzeugten Luftbilder und der daraus ermittelten Koordinaten (IST) werden mit der Referenz (SOLL) verglichen.
- Für das Referenzraaster ist ein geeignetes Testgebiet zu finden. Anschließend müssen für dieses Gebiet die notwendigen Genehmigungen eingeholt werden, um die erforderlichen Feldversuche durchführen zu können. Das Referenzraaster muss in die Örtlichkeit übertragen und signalisiert werden.
- Um herauszufinden von welchen Komponenten des UAS die Genauigkeit der Ergebnisse abhängen, werden die entsprechenden Komponenten identifiziert und untersucht. So soll die Position der Drohne während des Fluges mittels zielverfolgender Tachymeter genau bestimmt werden. Hierfür ist eine geeignete Methode zu finden, auf welche Weise die Zielmarken an dem UAV angebracht werden können. Sie müssen im Rahmen der möglichen Zuladung von ca. 200g liegen.
- Nach der Durchführung von Testflügen über die Referenzpunkte werden die Ergebnisse zunächst analysiert, ob die prinzipiellen Überlegungen, wie die Genauigkeit zu überprüfen ist, angewendet werden können. Stichwort „direkte Georeferenzierung“.
- Anschließend wird ein Feldversuch unternommen, bei dem alle für die Genauigkeitsanalyse erforderlichen Werte **gemeinsam** mit den Luftaufnahmen erhoben

werden. So soll sichergestellt werden, dass äußere Einflüsse wie das Wetter die Einzelergebnisse untereinander nicht verfälschen wie es der Fall wäre, wenn die Analysen in mehreren, zeitlich getrennten Versuchen vorgenommen würden.

- Bei der anschließenden Auswertung werden den erfassten IST-Werten die SOLL-Werte gegenübergestellt. Dabei werden die einzelnen Parameter auch getrennt voneinander betrachtet und hinsichtlich ihrer Relevanz für das Gesamtergebnis untersucht. Dies wird teilweise mit 3D-Transformationen erreicht; aus den Transformationsparametern können Abweichungen der Drohne von der SOLL-Lage ermittelt werden.
- Ergänzt werden die Daten durch Gegenversuche sowie der Untersuchung der eingesetzten Kompaktkamera hinsichtlich ihrer Abbildungsgenauigkeit.

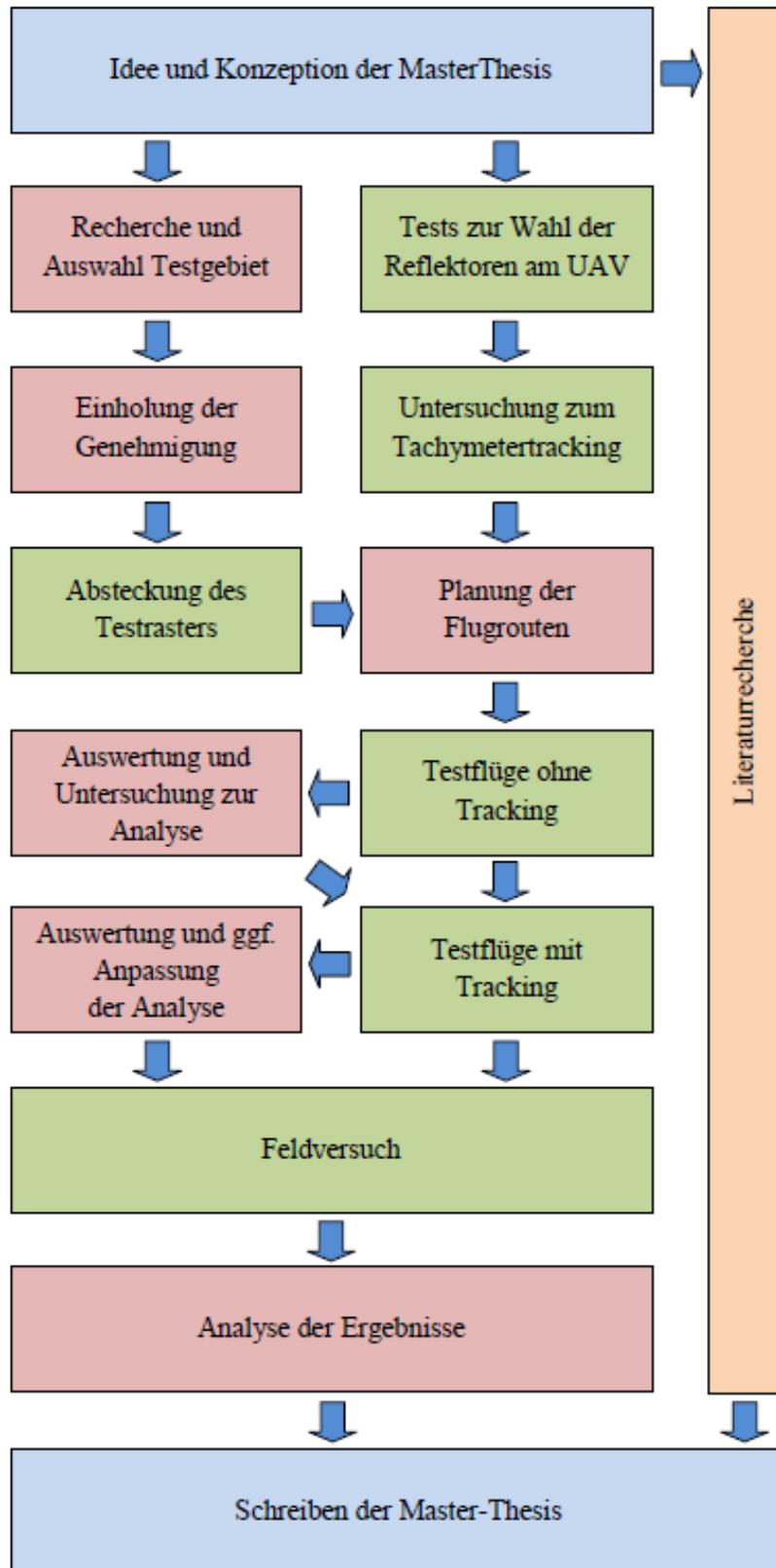


Abbildung 3: Ablaufschema der Master Thesis – grüne Tätigkeiten sind praktische Feldversuche

2. Literaturüberblick

Es gibt nur sehr wenig einschlägige Literatur, die sich mit dem Thema UAS und ihren Einsatzmöglichkeiten beschäftigt. Dagegen gibt es eine große Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten und Publikationen in Fachzeitschriften zum Thema. Allein während der Arbeit an dieser Master Thesis konnten einige sehr interessante Arbeiten eingesehen werden. Dies ist ein klares Indiz welche Chancen in der Nutzung dieser Technik gesehen werden. Sehr häufig handelt es sich bei diesen Arbeiten um Abschlussarbeiten von Bachelor- oder Master-Studiengängen. Sie haben den Nachteil, dass sie ohne Beurteilung oder Kommentare veröffentlicht werden, sofern diese überhaupt zugänglich sind. Andererseits zeigt es auch auf, dass es sich durchaus lohnen kann, auf diesem Gebiet weiter zu forschen. Aus Mangel an Alternativen stellen sie dennoch eine wichtige Quelle dar, um sich über den aktuellen Stand der Wissenschaft zu informieren. Für die Arbeit wurde zudem auch Fachliteratur verwendet, die Teilaspekte der Untersuchung abdeckt.

Nahbereichsphotogrammetrie

Das klassische Einsatzgebiet der für die Arbeit verwendeten UAS liegt im Bereich von 3m bis 150m Abstand zum Zielobjekt. Die damit erzeugten Aufnahmen, die Aufnahmetechnik und die Arbeit mit den Ergebnissen können also dem Fachbereich der Nahbereichsphotogrammetrie zugeordnet werden.

In diesem Gebiet ist das Buch „Nahbereichsphotogrammetrie“ von Thomas LUHMANN (2010) als Standardwerk zu bezeichnen. Es enthält alle wichtigen Formeln zum Auswerten von photogrammetrischen Aufnahmen und mögliche Fehlerquellen. Als besonders wichtig sind hier die Vorgaben zur Auswertung von Schrägaufnahmen und die Verwendung von Standardkameras hervorzuheben. Er erläutert die Unterschiede zu Messkammern und die daraus resultierenden Probleme, sowie die Möglichkeit die Aufnahmen nachträglich zu kalibrieren. Daraus ergab sich für diese Arbeit die Notwendigkeit, die innere Orientierung der eingesetzten Kompaktkamera zu untersuchen. Auch für diese Aufgabe bietet das Buch Lösungsvorschläge. Die Kalibrierung bzw. die Ermittlung der inneren Orientierung ist in keiner der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeiten vorgenommen worden, obwohl in keinem Fall eine Messkammer verwendet wurde. Luhmann geht in der vorliegenden Ausgabe auch auf die Einsatzmöglichkeiten von Mikrodrohnen ein, beschreibt hier jedoch nur in Ansätzen Vorgehensweise und Auswertung, wobei er die Arbeit mit Passpunkten beschreibt.

Wissenschaftliche Arbeiten zum Thema UAV

Wie eingangs bereits erwähnt, stellten auch verschiedene Abschlussarbeiten eine wichtige Informationsquelle dar. Hier sind zunächst drei Arbeiten der Fachhochschule Mainz zu nennen. Die Arbeiten hatten den Vorteil, dass die Möglichkeit bestand, den betreuenden Professor der Arbeiten zu kontaktieren - freilich ohne Aussagen zur Beurteilung zu erhalten. Zur besseren Übersicht werden die Arbeiten hier chronologisch genannt.

Sebastian SIEBERT (2008) untersuchte in seiner Bachelorarbeit den „Einsatz von UAV mit Schwerpunkt auf Anwendung in der Geoinformation“. Die Arbeit gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Systeme im Bereich Mehrflügler sowie die eingesetzten Techniken zur Positionsbestimmung und die daraus resultierenden Einsatzmöglichkeiten. Für diese Arbeit waren die vorgenommenen Untersuchungen zum Tracking des UAV mit einem Tachymeter relevant. Allerdings untersucht Siebert nur, ob die Technik anwendbar ist und macht keine detaillierten Aussagen zur Genauigkeit der Drohne oder ähnlichem. Für die Tracking-Untersuchung wurde ein älteres Modell des hier verwendeten UAS eingesetzt. Auch gibt es schon Ansätze zur Flugplanung von flächenhaften Befliegungen.

Im August 2010 folgte eine Bachelorarbeit von Jan-Philipp DASBACH (2010) mit dem Titel „Einsatz von low-cost UAV bei der Vermessung von Tagebau- oder Deponiegebieten“. Wie aus dem Titel schon erkennbar, wurde hier eine Drohne als Bausatz eingesetzt. Es handelt sich hierbei um einen Oktokopter (im Gegensatz zu dem hier eingesetzten Quadrocopter). Interessant sind vor allem die Untersuchungen zur Signalisierung von Passpunkten sowie zur Flugplanung. Hier wird das 3D-Transformationsprogramm „JAG3D“ eingesetzt, was auch in dieser Arbeit Anwendung findet. Die Luftbilder werden mit verschiedenen Softwareprodukten und mittels Passpunkten in ein digitales Geländemodell gewandelt. Verwunderlich ist nur, dass die errechnete Punktwolke nicht hinsichtlich ihrer Genauigkeit überprüft wurde.

In seiner Masterarbeit beschreibt SIEBERT (2010) die „Untersuchung zur Geodatenerfassung mit einem LOW-COST UAV“. Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Entwicklung eines Programms zur Flugroutenplanung. Interessant sind die weiterführenden Untersuchungen zur Signalisierung, sowie zur Verwendung einer handelsüblichen Kompaktkamera wie es auch hier der Fall ist.

Siebert führt seine Genauigkeitsuntersuchung erst nach der Erstellung von Punktwolken durch, die unter Zuhilfenahme von Passpunkten errechnet wurden, so dass keine Aussage zur Genauigkeit der Rohdaten gemacht werden kann. Bei einer vergleichenden Untersuchung der

beiden möglichen Höhenermittlungsmethoden (barometrisch und GPS) wird die GPS-Höhe als wahr angenommen und als Referenzhöhe verwendet. Ein Vergleich mit einer gesicherten Referenz erfolgt nicht.

Alle drei Arbeiten sprechen in ihren Titeln vom Einsatz eines UAV, was per Definition lediglich den Flugkörper darstellt. Nach Überzeugung des Autors ist es jedoch zwingend erforderlich, das Gesamtsystem zu betrachten, da die im Vorfeld verwendete Software zur Routenplanung, sowie der Ausgabe von Telemetriedaten und der Aufnahmen ebensolche Auswirkungen auf das Endergebnis haben kann wie die Hardware. Die vorliegende Arbeit soll dies untersuchen.

Noch während der Arbeit an dieser Master Thesis veröffentlicht Jakob GEIPEL (2012) seine Masterarbeit „Improved DGNS-based Positioning of Micro UAV Platforms for Sensor Web Services“ an der Universität Münster. Obwohl Geipel keine Genauigkeitsuntersuchung vornimmt, untersucht er eine Weiterentwicklung des Systems, indem er einen anderen als den ursprünglich eingesetzten GPS-Chip verwendet und die ermittelten GPS-Positionen über Korrekturdaten einer Referenzstation am Boden erheblich verbessert. Er greift damit einem Ergebnis dieser Arbeit vor, die genau in diesem Bereich Verbesserungspotential sieht.

Darüber hinaus gab und gibt es immer wieder eine Reihe von Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, die einen mehr oder minder großen Nährwert haben. Sie sind in erster Linie dahingehend interessant, da sie einen guten Einblick in aktuelle Entwicklungen und unterschiedliche UA-Systeme geben. Hervorzuheben ist hier ein Artikel von Marius ZIEGLER (2011) im VDV-Magazin. Er beschreibt darin seine Untersuchungen zur Georeferenzierung von Luftbildern. Ziegler setzt keinen Quadrocopter, sondern einen Einflügler ein. Dass diese ihre Position nicht halten können, sondern bei der Luftbildaufnahme in der Vorwärtsbewegung bleiben müssen, ist ein wesentlicher Unterschied zum Einsatz von UAV. Er setzt jedoch ebenfalls eine handelsübliche Kompaktkamera ein. Die von ihm geschilderten Probleme zum Beispiel durch wetterbedingte Bewegung und sein Vorgehen bei der Auswertung entsprechen in Teilen unseren Erkenntnissen. Auch hier gibt es keine Aussagen, ob und wie die Bilder der Kamera kalibriert wurden. Allerdings schreibt Ziegler von der inneren Orientierung der Kamera, deren Angaben nach unserem Kenntnisstand werkseitig nicht mitgeliefert werden.

In ihrer Veröffentlichung „Neue Kalibrations- und Rechenverfahren zur direkten Georeferenzierung von Bild- und Scannerdaten mittels der Positions- und Winkelmessungen

eines hybriden Navigationssystems“ werten die beiden Autoren BÄUMKER und HEIMES (2001) von der Fachhochschule Bochum zwar Flugdaten aus großer Höhe aus und verwenden dabei hochgenaue Inertialsysteme. Ihre Ausführungen zum Thema Koordinatensysteme in der Photogrammetrie und die Auswertung von Schrägbildaufnahmen waren dennoch sehr interessant, da die grundlegenden Aufgaben die gleichen sind wie sie ebenfalls in dieser Arbeit gestellt werden. Zudem haben sie die Möglichkeit des direkten Georeferenzierens beschrieben. Gleiches gilt für die Arbeit „Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung“ von Dr. Ing. Michael CRAMER (2003) von der Universität Stuttgart. Auch hier werden hochgenaue Systeme bei regulären Luftbildflügen eingesetzt. Besonders der Abschnitt zur Kalibrierung ist für diese Arbeit hervorzuheben.

Satellitennavigation

Das für die Master Thesis untersuchte UAV verwendet verschiedene technische Einrichtungen zur Positions- und Lagebestimmung. Kernmodul für die Lagebestimmung ist ein GPS-Chip des Schweizer Unternehmens u-blox. Zur Steigerung der Genauigkeit unterstützt das System das EGNOS-Referenzsystem. Um sich einen Einblick in die Grundprinzipien der Satellitennavigation zu verschaffen, bietet sich „Satellitenortung und Navigation: Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme“ von Werner MANSFELD (2010) an. Unter anderem wird dort auf die Grundprinzipien der Positionsbestimmung via GPS eingegangen. Wie bereits angesprochen, bildet das GPS-Modul einen wesentlichen Baustein des UAV und muss somit hinsichtlich der Genauigkeit der übergebenen Werte untersucht werden. Hier waren besonders Mansfelds Ausführungen zur Genauigkeit und genauigkeitsbeeinflussenden Faktoren wichtig für die Arbeit, wobei seine Einlassungen zur Beschreibung der Genauigkeit mittels Fehlerkreisradius Anwendung in dieser Arbeit finden.

Sensorik

Bei den Feldversuchen soll die Drohne während der Testflüge mittels Tachymetern erfasst und angemessen werden. Geplant ist, sie während des Fluges automatisch von den Vermessungsgeräten verfolgen zu lassen. Das Fluggerät wird sich schon aufgrund von Wetterbedingungen ununterbrochen bewegt. Daher ist es unerlässlich zu wissen, wie genau das Anzielen eines bewegten Objektes sein kann und welche Probleme bei dieser Herangehensweise unter Umständen auftreten können. Eine wichtige Quelle hierfür war „Grundlagen der Sensorik: Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure“ von Harald SCHLEMMER(1996). Zum Thema Tachymetertracking von bewegten Objekten standen

außerdem die beiden wissenschaftlichen Artikel „Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern“ von STEMPFHUBER et. al. (2000) und „Kinematische Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern – Ein Beitrag zum Stand der Technik am Beispiel des Leica TPS1200+“ von STEMPFHUBER & KIRSCHNER (2008). Hier sind vor allem die Aussagen zur notwendigen Geschwindigkeit der Tachymeter sowie die Auslöse- und Ablesezeit relevant, da sich das UAV in unserem Fall auch während der Messung bewegen wird. Letztgenannter Artikel verwendet das gleiche Tachymeter wie es auch für diese Arbeit zum Einsatz kommt.

Rechtliche Betrachtung

Eine rechtliche Betrachtung zum „Einsatz von Drohnen zur Bildaufnahme“ liefert Claudia KORNMEIER (2012) in ihrer gleichnamigen Dissertation. Zunächst nimmt sie eine Einteilung der Systeme hinsichtlich ihres Gewichtes vor. Darüber hinaus definiert sie die Begriffe autonom, automatisch und ferngesteuert aus rechtlicher Sicht. Sowohl das Gewicht als auch die Steuertechnik sind neben dem Einsatzzweck und Einsatzort wesentliche Kriterien bei der Erteilung der Aufstiegs Genehmigung. Besonders der Begriff autonom wird im Bezug auf UAS häufig falsch verwendet, so auch von Andreas BARMETTLER (2007) in seiner Diplomarbeit zum Thema „Photogrammetrische Deponieüberwachung mittels autonomer Mini-Drohnen“. Die von ihm eingesetzte Drohne fliegt nicht autonom, wie von ihm angeführt, denn dies würde bedeuten, dass das Fluggerät selbstständig Hindernisse erkennt und Ausweichmaßnahmen ergreift. Darüber hinaus verschafft das Buch einen Überblick auf die Rechtslage, die auf den verschiedenen Gesetzen auf Bundes- und Landesebene beruht. Kornmeier stellt fest, dass für den Umgang mit Drohnen die technische Entwicklung die bestehenden Gesetze überholt hat. Eine Aussage, die auch von der zuständigen Landesbehörde von Rheinland-Pfalz bestätigt wurde (siehe Anhang 1 und 2).

Wichtig für die vorliegende Arbeit waren auch die Kapitel zum Thema Datenschutz, da es beim Einsatz von UAV unter Umständen zur Verletzung der Persönlichkeitsrechte bzw. dem Recht auf informationelle Selbstbestimmung kommen kann. Dieses Thema wird von der Autorin ebenso detailliert untersucht, wie auch Fragen zur Haftung und der notwendigen Sicherheitsvorkehrungen und Vorgaben.

Bemerkenswert ist zudem der Abschnitt zur gesellschaftlichen Akzeptanz. Hier verweist Kornmeier zwar darauf, dass es hierzu noch keine wissenschaftliche Untersuchung gibt, aber sie zieht Parallelen zu den öffentlichen Diskussionen bei der Videoüberwachung, sowie der bisher überwiegend im militärischen Bereich liegenden medialen Berichterstattung über

Drohnen. Sie verweist auf Marktstudien, die davon ausgehen, dass eine öffentliche Debatte über Nutzen und Risiken von UAS im zivilen Einsatz stattfinden wird.

Die eigenen während der Feldversuche gemachten Erfahrungen zeigen, dass die zivile Bevölkerung dieser Technik äußert zurückhaltend und eher ablehnend gegenübersteht, was Kornmeiers Aussage unterstreicht.

Quadrocopter

Einen allgemeinen Überblick über die Funktionsweise von Quadrocoptern gibt Roland BÜCHI (2012) von der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften in seinem Buch „Faszination Quadrocopter“. Hier wird die Sensor- und Steuertechnik detailliert und allgemein verständlich beschrieben. Auch die Flugmechanik wird angesprochen. Büchi gibt ebenfalls einen guten Einblick in weitere Mehrflügler-Konzepte sowie deren jeweilige Vor- und Nachteile. Für die vorliegende Arbeit war das vor allem deshalb relevant, um das eingesetzte System mit dem aktuellen Stand der Technik zu vergleichen.

3. Lösungsansatz

3.1 Unmanned Aircraft System (UAS)

Der folgende Abschnitt gibt eine kurze Einführung in das für die Untersuchungen eingesetzte Unmanned Aircraft System und seiner Komponenten. Dies erscheint sinnvoll, um Theorie und Methode besser nachvollziehen zu können. Die Untersuchung des Systems bzw. Kenntnis über die Funktionsweise ist erforderlich, um den Einfluss der einzelnen Komponenten auf die Ergebnisse der Befliegung ermitteln zu können.

Das eingesetzte UAS mit der Modellbezeichnung md4-200 ist ein vollständig von der Firma Microdrones (Siegen) entwickeltes und vertriebenes Komplettsystem. Es beinhaltet sowohl die Hard- als auch die Software und besteht im Wesentlichen aus der Drohne und der Bodenstation. Für die Untersuchung muss dies jedoch weiter untergliedert werden. Das System ist dazu konzipiert Foto- und Videoaufnahmen aus der Luft zu ermöglichen. Die Einsätze reichen von Überwachung (Polizei und Rettungsdienste), Dokumentation z.B. in der Archäologie bis hin zu photogrammetrischen Aufgaben (MD4-200 MANUAL, 2009).



Abbildung 4: Komplettsystem md4-200 mit Drohne, Basisstation mit Notebook und Fernbedienung

3.1.1 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Der verwendete Flugkörper des Systems trägt die Bezeichnung md4-200. Wie bereits eingangs erwähnt, handelt es sich hierbei um einen Quadrocopter. Das heißt, es kommen vier Rotoren zum Einsatz, die jeweils von einem Elektromotor angetrieben werden. Sämtliche Flugmanöver werden durch Reduzierung bzw. Erhöhung der Drehzahl erreicht, wobei die Motoren einzeln angesteuert werden. Die Rotoren laufen dabei paarweise gegenläufig (Abbildung 5). Dadurch heben sich die Drehmomente auf und auf die Verwendung von Taumelscheibe und Heckrotor, wie es bei einem herkömmlichen Helikopter der Fall ist, kann verzichtet werden, so dass keine Energie zur Stabilisierung verwendet werden muss (BÜCHI, 2012). Die Drohne wird mit Akkus betrieben und kann je nach Flugmanövern und Wetterlage zwischen 15 und 30 Minuten in der Luft bleiben.

Das UAV kann entweder manuell per Fernbedienung (Abbildung 6) oder mittels einer vorher programmierten und auf der Drohne gespeicherten Route gesteuert werden.

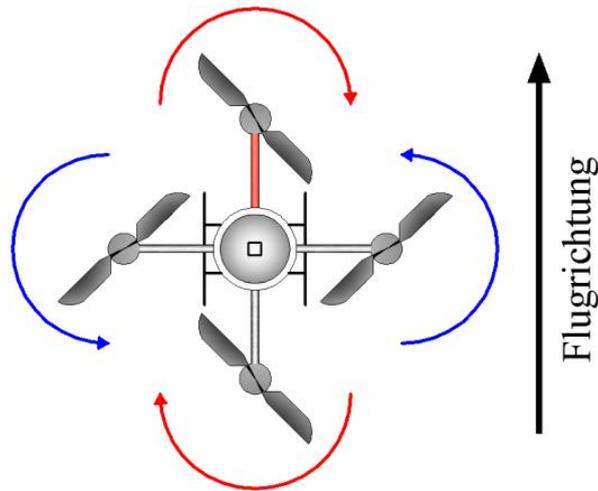


Abbildung 5: Antriebsschema eines Quadrocopters



Abbildung 6: Steuerung der Drohne über die Fernbedienung

Die Drohne besitzt eine Reihe von Einbauteilen zur Position- und Lagebestimmung, die sowohl für einen sicheren Einsatz, aber auch für das automatische Abfliegen vorberechneter Routen und Aufgaben notwendig sind (MD4-200 MANUAL, 2009):

- das Trägheitsnavigationssystem (INS), bestehend aus Gyroskopen, also Kreiseinheiten, zur Ermittlung der Drehwinkel des UAV sowie Beschleunigungssensoren (in X, Y und Z-Richtung)
- der Magnetkompass (Magnetometer) zur Richtungsbestimmung
Die Richtungsangaben der Drohne bei Ein- und Ausgabe beziehen sich auf Gitter Nord. Dabei wird der mit dem Magnetometer ermittelte Wert über das „World Magnetic Model“ umgerechnet.
- das Barometer zur Höhenbestimmung

- das DGPS zur Lage- und Höhenbestimmung

Die Korrekturarten kommen vom europäischen Dienst EGNOS, der für die Steigerung der Genauigkeit sorgt. Um einen optimalen Empfang zu gewährleisten, ist der GPS-Chip außen am Deckel der Drohne angebracht und mittels Kabel mit der Platine verbunden.

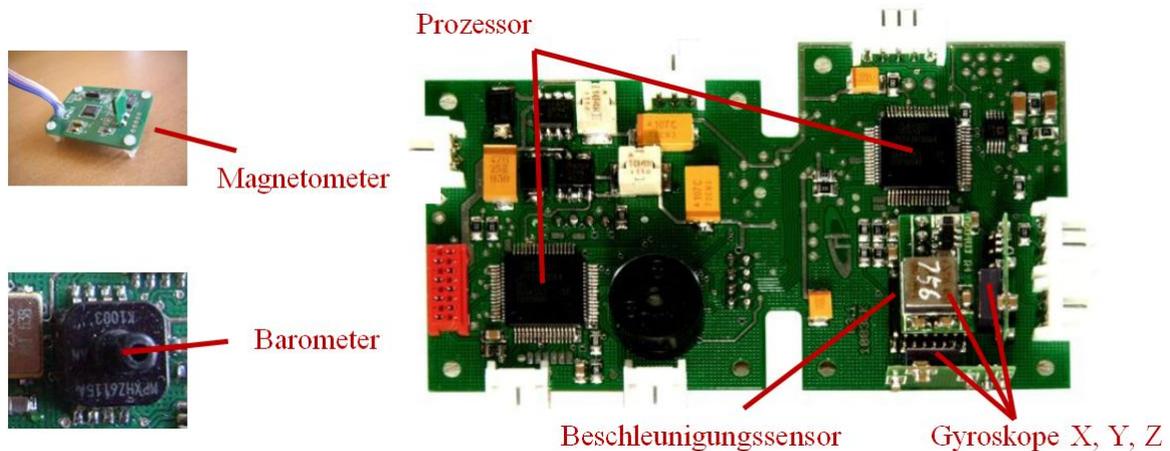


Abbildung 7: Bordelektronik

Die Werte der genannten Sensoren werden 125-mal pro Sekunde (125Hz) gemessen.

Sie erlauben die relative Lageveränderung der Drohne zu erfassen und somit für eine bestimmte Zeit die Navigation zu übernehmen. Abgeglichen werden die Daten mit den absoluten Koordinatenangaben des GPS-Chips, welche 4-mal pro Sekunde erfasst werden.

Alle Werte fusionieren über einen sogenannten Kalman-Filter, einem mathematischen Algorithmus, der die jede für sich genommenen unbrauchbaren Messwerte für eine möglichst genaue Schätzung der Position heranzieht.

- Das alles geschieht mittels einem 32Bit-Mikrocontroller, der sich auf der Platine der Drohne befindet. Die Platine enthält neben dem erwähnten Navigationskontroller auch den Flugkontroller, dessen Prozessor die Flugsteuerung übernimmt. Sie besitzt auch alle notwendigen Anschlüsse für die Stromversorgung aller Einbauteile, für die GPS-Antenne, sowie für die Kamerasteuerung.

Die Angaben zur Lage, Position und Geschwindigkeit sowie des Kamerasignals werden mittels einer angebrachten Funkübertragungseinheit (Downlink) zur Basisstation gesendet und dienen der Überwachung des Fluges. Zusätzlich existiert ein Flugdatenschreiber, der alle während des Fluges erfassten Sensorwerte und Kommandos aufzeichnet. Letzt genannte

Einrichtung ist für die geplanten Untersuchungen von großer Bedeutung. Selbstverständlich ist auch eine RC-Antenne für den Empfang der Signale der Fernsteuerung vorhanden.

Das UAV dient als Trägerplattform und kann verschiedene Kamera- und Videomodelle aufnehmen, u.a. eine Wärmebildkamera.

Technische Daten (Herstellerangaben)

Chassis und Rotoren	Carbon (CFK)
Elektromotoren	4 bürstenfreie Außenläufer (Direktantrieb)
Grundmaße inkl. Rotoren	912,5 x 912,5mm
Eigengewicht	ca. 800g
Empfohlene Nutzlast	200g
Steigrate	7.0m/s (25 km/h)
Reisegeschwindigkeit	8.0m/s (29 km/h)
Maximale Flughöhe	1000m (theoretisch)
Maximale Starthöhe	4000m
Maximale Reichweite (RC)	500-1000m
Einsatztemperatur	-10°C bis 40°C
Flugdatenschreiber	80 Parameter und Sensorwerte mit 125Hz auf microSD
Telemetrie	Echtzeit-Telemetriesender (Downlink)
Flugzeit	ca. 30 Minuten (abh. von Last / Wind)
Akku	14.8V, 4S LiPo, 2300mAh

Anmerkung:

Mit einem Abfluggewicht von ca. 1000g fällt das UAV in die Kategorie der Mikrodrohnen (MUAV). Durch das geschlossene Gehäuse ist auch der Einsatz bei Regen möglich. Die Kamera wird in der Regel über den Abwind vor Regen geschützt.

3.1.2 Kamerahalterung

Für jede verwendbare Kamera- bzw. Videoeinheit gibt es eine entsprechende Halterung, die am UAV angebracht und mittels Steckverbindungen an Strom- und Steuereinheit angeschlossen wird. Wir beschränken uns hier auf die Beschreibung der für die Untersuchungen verwendeten Halterung für die Kamera PENTAX Optio S1.

Die Kamerahalterung besteht wie auch das Chassis der Drohne aus Carbon und wird mit einer 3-Punkt-Aufnahme am Flugkörper arretiert.

Sie besitzt einen Servomotor, mit dem der Nickwinkel der Kamera gesteuert werden kann.

Somit ist die Kamera in einem Bereich von 0° bis 90° zu neigen, um horizontale als auch senkrechte Aufnahmen zu ermöglichen. Gesteuert wird dies über die Fernbedienung oder über eine vorab geplante Route. Während des Fluges gleicht der Servomotor die Bewegungen des Flugkörpers im Nickwinkel aus, so dass die Kamera bei entsprechender Einstellung theoretisch immer senkrecht nach unten ausgerichtet ist.

Die Rollrichtung der Kamera wird passiv durch eine freie Aufhängung ausgeglichen. Die Kenntnis über die Ausrichtung der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme ist unverzichtbar für die Genauigkeitsanalyse!

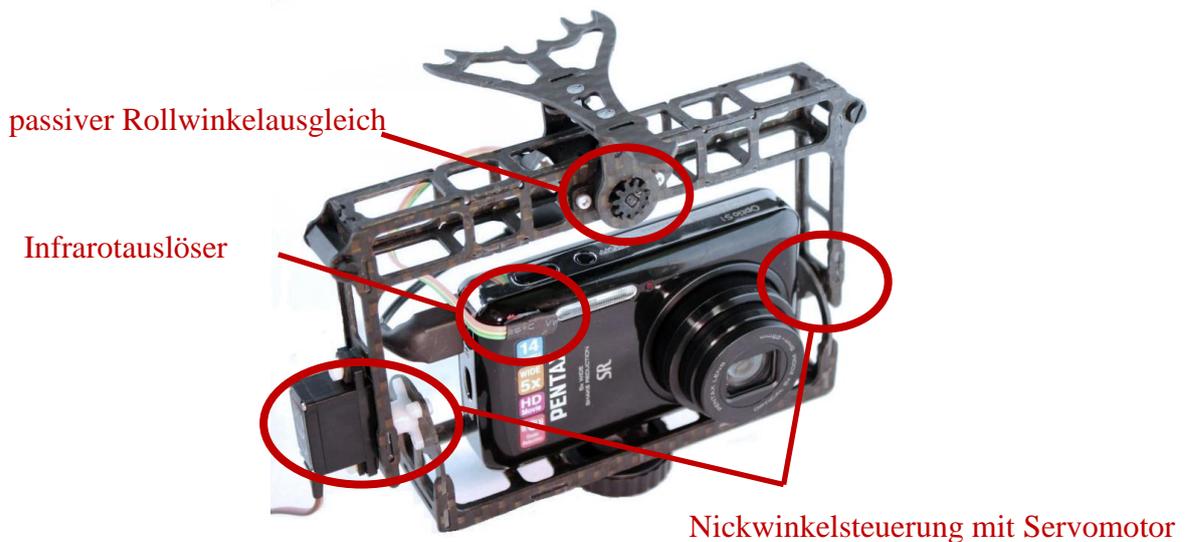


Abbildung 8: PENTAX Optio S1 mit Kamerahalterung

3.1.3 Kamera

Als Kamera wird eine PENTAX Optio S1 eingesetzt. Das Modell kam im April 2011 auf den Markt. Es handelt sich dabei um eine handelsübliche digitale Kompaktkamera. Sie ist sehr gut für den Einsatz an einem UAV geeignet, da sie über eine Vorrichtung zur Fernauslösung (Infrarot) verfügt. So kann sie per Fernbedienung oder mittels vordefinierter Aufgabe / Route ausgelöst und der Zoomfaktor eingestellt werden. Zudem lässt ihr geringes Gewicht noch etwas Spielraum bei der Nutzlast, was für die geplanten Feldversuche sehr wichtig ist.

Technische Daten (Herstellerangaben)

Megapixel (effektiv):	13,8 Megapixel
Maximale Bildauflösung:	4.288 x 3.216 Bildpunkte
Sensortyp und -größe:	CCD, 1/2,3 Zoll
Bild-Format:	JPEG
EXIF Version:	2,30
Lichtempfindlichkeit	automatisch oder manuell ISO 80 – 6400
Shake Reduction	Mechanisch durch CCD-Verschiebung
Brennweite	Pentax Motorzoom 5 mm - 25 mm / 3,9~5,79 (ca. 28 mm - 140 mm äquiv. zu 35 mm)
Scharfstellung:	Autofokus / aus
Zoom	optisch: bis zu 5fach / digital: bis ca. 6,7fach
Verschluss	Programmgesteuerter Elektronischer Zentralverschluss
Verschlusszeiten	1/1.600 - 1/4 Sek
Fernbedienung	Infrarot
Abmessungen (B x H x T)	91 mm x 55 mm x 21 mm
Gewicht	126g (einsatzbereit)

3.1.4 Basisstation (inkl. Notebook)

Die Basisstation erfüllt verschiedene Aufgaben. Ihre Hauptaufgabe ist der Empfang des von der Drohne gesendeten Videosignals und der Telemetriedaten. Über eine Empfangsantenne wird der Downlink empfangen und über zwei USB-Kabel (1 für Telemetrie, 1 für Videodaten) mit einem Notebook verbunden. Auf dem Notebook (Panasonic ToughBook) können unter Verwendung der mitgelieferten Software „mdCockpit - Downlink-Decoder“ die Daten in Echtzeit verarbeitet und angezeigt werden. Das Videosignal wird dabei von einem Framegrabber verarbeitet, der in der Basisstation untergebracht ist. Dies dient der Überwachung des Fluges / der Drohne und spielt eine herausragende Rolle bei der rechtlichen Betrachtung des Drohneneinsatzes. Für den korrekten Empfang des Downlink ist es zwingend erforderlich, dass die Empfangsantenne Richtung Drohne ausgerichtet ist, ggf. muss die Antenne während des Fluges neu ausgerichtet werden. Hervorgehoben werden muss, dass die Station wirklich nur Daten empfängt und der Downlink-Decoder die Daten nicht speichert. Auch bleiben alle Aufnahmen auf der SD-Karte der Kamera. Dies bedeutet, dass ein nachträgliches Ändern der Route während des Fluges nicht möglich ist! Darüber hinaus dient die Basisstation auch als Ladestation für die Akkus, wobei zwischen 220V per Netzstecker

und 12V (KFZ-Netz) gewechselt werden kann. Die Basisstation selbst wird über einen Akku mit Strom versorgt.



Abbildung 9: Der Downlink-Decoder im Einsatz

3.1.5 mdCockpit (Version 3.0.x)

mdCockpit ist im Grunde eine Sammlung verschiedener Applikationen für Flugplanung, Flugüberwachung und Flugauswertung. Darüber hinaus liefert sie auch einen Zugang zur Kalibrierung des UAV. Die Programme werden hier nun kurz beschrieben, sofern sie eine Relevanz für die Master Thesis haben.

Wegpunkt-Editor

Mit dem Wegpunkt-Editor kann eine Flugplanung vorgenommen werden; eine Voraussetzung, um automatisierte Flüge vorzunehmen. Das Programm bietet eine Reihe von Funktionalitäten, die den Anwender bei der Erstellung von Routen unterstützt. Eine Route besteht aus den Wegpunkten, die mit Vektoren miteinander verbunden sind. Jeder Wegpunkt ist über Lage und Höhe definiert, wobei für die Lage geographische Koordinaten verwendet werden. WGS84 ist das Referenzsystem (MDCOCKPIT3 MANUAL, 2012).

Für die Höhenangabe stehen verschiedene Möglichkeiten offen:

relative Höhe	der Startpunkt der Drohne wird als Nullhöhe verwendet (barometrisch)
absolute Flughöhe	GPS-Höhe
Höhe über Grund	Kombination aus der für den Startpunkt ermittelten Geländehöhe und der relativen Höhe

Für jeden Wegpunkt können Aufgaben definiert werden, die die Drohne beim Erreichen der Position ausführen soll, z.B. das Aufnehmen von Luftbildern.

Auch für die genannten Vektoren können Parameter übergeben werden, z.B. wie die Punkte angeflogen werden sollen (diagonal oder senkrecht), Richtungsangaben zur Ausrichtung der Kamera oder die Fluggeschwindigkeit. Aus der Gesamtheit der Eingaben zur Route wird die vermutete Flugdauer errechnet, wobei Wetterbedingungen und Nutzlast nicht berücksichtigt werden und somit nur als Schätzung gesehen werden dürfen. Überschreitet die geplante Route die voraussichtliche Batterieleistung erfolgt eine Warnmeldung.

Wichtig ist die Angabe der verwendeten Kamera. Im Programm sind die entsprechenden Spezifikationen wie Brennweite, Chipgröße usw. abgelegt. Mit diesen Werten wird die geplante Bildgröße unter Verwendung der eingegebenen Flughöhe dargestellt.

Für die Geländehöhen werden SRTM1-Daten von NASA und ESA verwendet, wie sie für den europäischen Raum frei zugänglich vorliegen. Es handelt sich dabei um ein bei einer Spaceshuttle-Mission im Jahr 2000 erstelltes Höhenmodell, das durch ein aktives Radarsystem erstellt wurde. Die Auflösung der frei zugänglichen Daten beträgt 90x90m mit einer mittleren Höhengenaugigkeit von +/- 6m. Die Höhen dazwischen werden interpoliert. Über den hierfür verwendeten Modus ist nichts bekannt (MDCOCKPIT3 MANUAL, 2012).

Bei der Flugplanung wird auch der verwendete Kamerateyp festgelegt. Mit den im Programm hinterlegten Werksangaben zur Brennweite und Chipgröße kann die zu erwartende Bildgröße errechnet werden, was besonders bei der geplanten flächigen Erfassung der Erdoberfläche wichtig ist.

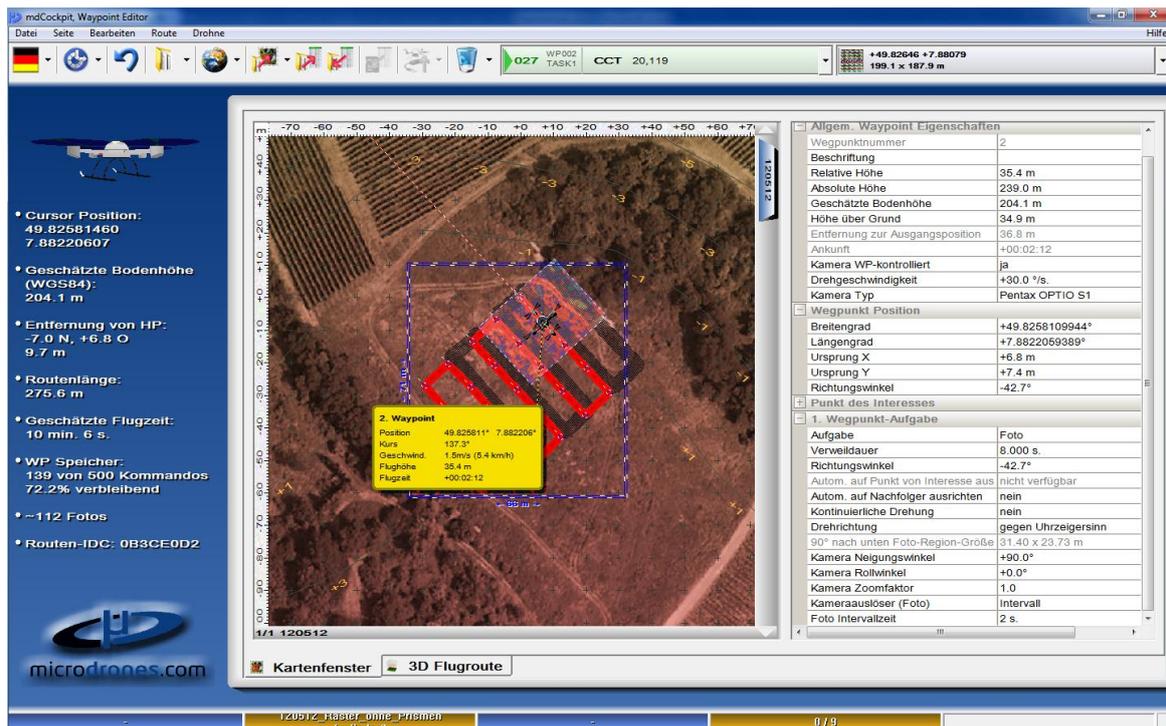


Abbildung 10: Routenplanung mit Waypoint Editor (mit Darstellung der zu erwartenden Bildgröße, dem interpolierten Höhenmodell, sowie hinterlegten Luftbildern aus Google Earth)

Eine weitere Funktion ist die optionale Darstellung von Luftbildern von Google Earth. Ein entsprechender Ausschnitt wird der Route hinterlegt. Ein nachträgliches Eingreifen durch den Anwender ist nicht notwendig / möglich. Umgekehrt kann auch die geplante Route als KML-Datei ausgegeben und in Google Earth visualisiert werden.

Um die Route für das UAV lesbar zu machen, wird sie in eine Kommandoliste (ASCII-Format) umgewandelt. Vom Prinzip verwaltet das UAV immer die gleichen Kommandos, unabhängig davon, ob die Steuerung manuell (über RC-Fernbedienung) oder über eine Routenplanung erfolgt. Die Kommandodatei wird (ausschließlich!) mittels Datenkabel auf die Drohne übertragen. Die Drohne kann nur jeweils eine Route speichern. Ein Abändern der Route während des Fluges ist nicht möglich. Wird die Route während des Fluges abgebrochen, muss die Drohne via Fernbedienung gesteuert werden.

Die Erstellung von Flugrouten ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit.

027	WP002 TASK1	CCT	20,119	+49 82646 +7 88079 199.1 x 187.9 m
027	WP002 TASK1	CCT	20,119	CCT n - Camera Continuous Trigger. n = 50 ... 300. Defines the time delay between taking two pictures on continuous
028	WP002 TASK1	TIM	80,97	TIM n - TIMe delay. n = 1 ... 6000. Defines a time delay in seconds/10.
029	WP002 VECT	CST	0,163	CST n - Camera Set Trigger. n = 0 ... 2. Default is 0. 0 = trigger off, 1 = trigger synchronouse single shot, 2 =
030	WP002 VECT	PMC	408371808,56537694,485028082,34	PMC x,y,z - Position Move Combined. x,y,z = coordinates in the used coordinate system. Moves the drone to the desir
031	WP003 TASK1	CCT	20,119	CCT n - Camera Continuous Trigger. n = 50 ... 300. Defines the time delay between taking two pictures on continuous
032	WP003 TASK1	TIM	80,97	TIM n - TIMe delay. n = 1 ... 6000. Defines a time delay in seconds/10.
033	WP003 VECT	CST	0,163	CST n - Camera Set Trigger. n = 0 ... 2. Default is 0. 0 = trigger off, 1 = trigger synchronouse single shot, 2 =
034	WP003 VECT	PMC	408372257,56538439,485027593,31	PMC x,y,z - Position Move Combined. x,y,z = coordinates in the used coordinate system. Moves the drone to the desir
035	WP004 TASK1	CCT	20,119	CCT n - Camera Continuous Trigger. n = 50 ... 300. Defines the time delay between taking two pictures on continuous
036	WP004 TASK1	TIM	80,97	TIM n - TIMe delay. n = 1 ... 6000. Defines a time delay in seconds/10.
037	WP004 VECT	CST	0,163	CST n - Camera Set Trigger. n = 0 ... 2. Default is 0. 0 = trigger off, 1 = trigger synchronouse single shot, 2 =
038	WP004 VECT	SVS	5,130	SVS n - Set Vertical Speed. n = 1 ... 30. Default is 5. Defines the speed in decimeters/s for vertical moves o
039	WP004	PMH	408372740,56538400,485027420,42	PMH x,y,z - Position Move Horizontal.

Abbildung 11: Auszug aus der Kommandoliste

Downlink-Decoder

Diese bereits angedeutete Applikation wird verwendet, um den während eines Fluges übermittelten Downlink zur visualisieren (siehe Abbildung 9). Der Steuerer der Drohne hat damit die Möglichkeit per Videosignal die Situation aus „Sicht der Drohne“ zu betrachten, sowie alle Telemetriedaten einzusehen. Informationen, die für die Sicherheit der Drohne und ihrer Umgebung wichtig sind (z.B. Verlust des GPS-Signals oder niedriger Batteriestand), werden zusätzlich über eine Sprachmeldung bekannt gegeben.

Wie der Name schon sagt, werden die Daten nur unidirektional von der Drohne zur Basisstation gesendet.

Flugdatenschreiber - Datenanalyse

Auf einer in der Drohne befindlichen microSD-Karte werden alle während des Fluges gemessenen Telemetriedaten gespeichert. Die Daten können mit Hilfe des Programms ausgewertet werden. Im Grunde kann man den Flug nochmals in Echtzeit ablaufen lassen.

Dies dient unter anderem auch der Klärung von Haftungsfragen, sollte es zu einem Unfall kommen. Die Daten können aber auch in EXCEL-Tabellen ausgegeben werden, was für die geplanten Auswertungen unverzichtbar ist. Hierbei ist es auch möglich nur die Telemetriedaten, die zum Zeitpunkt der Kameraauslösung erfasst werden, auszugeben. Pro Aufnahme gibt es somit einen Datensatz.

Terminal

Um mit dem Terminalprogramm arbeiten zu können, wird das UAV mit einem Datenkabel an das Notebook angeschlossen. Mit dem Programm kann die Funktion der verschiedenen Prozessoren, Sensoren und des Speichers hinsichtlich korrektem Betrieb und Inhalt geprüft

werden. Es dient somit der Wartung und Reparatur. Es können aber auch Befehle an die Drohne gesendet werden, um die Konfiguration zu ändern, was im Zuge der Arbeit auch notwendig wurde.

3.1.6 Fernsteuerung

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch die Fernsteuerung genannt. Sie dient der manuellen Handhabung der Drohne (siehe Abbildung 6). Mit den verschiedenen Schaltern können sämtliche Funktionen des UAV, einschließlich der Bedienung der Kamera und des Servomotors der Kamerahalterung gesteuert werden. Die Signalübertragung erfolgt dabei über Funksignale (Radio Control / RC).

Sie wird benötigt, um die Drohne zu starten und mit dem Abfliegen einer gespeicherten Wegpunkt-Route zu beginnen. Außerdem ist es möglich, eine begonnene Route vorzeitig abbrechen und die manuelle Steuerung zu übernehmen, etwa wenn sich herausstellt, dass unvorhergesehene Hindernisse auftreten.

Für die Genauigkeitsanalyse selbst spielt sie eine untergeordnete Rolle, da sie im Verlauf der Routenbefliegung nicht benötigt wird.

3.2 Theoretische Überlegungen

Wie bereits in der Einleitung und unter 1.2 Hypothese, Ziele und erwartete Ergebnisse beschrieben, ist es Ziel der Arbeit, die Koordinatengenauigkeit von Geodaten zu bestimmen, die mit Hilfe von Luftbildaufnahmen eines UAS entnommen werden. Dabei ist sowohl die absolute Lagegenauigkeit der Koordinaten interessant, als auch die relative Genauigkeit der Koordinaten untereinander, wenn die Aufgabenstellung in einem örtlichen System gelöst werden kann.

Werden Form und / oder Lage eines beliebigen Objekts indirekt durch Bildmessungen ermittelt, spricht man von Photogrammetrie.

Beträgt die Aufnahmeentfernung dabei weniger als 300m, wie es bei dieser Arbeit der Fall ist, spricht man von Nahbereichsphotogrammetrie (LUHMANN, 2010, S. 4-6).

Das wesentliche mathematische Modell, das diesem Meßverfahren zugrunde liegt, ist die zentralprojektive Abbildung. Dabei werden Form und Lage des Objektes über die Rekonstruktion von Strahlenbündeln ermittelt.

Der Abbildungsmaßstab ist dabei die wesentliche Kenngröße:

$$m_b = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'}$$

m_b ist hier die Bildmaßstabszahl und beschreibt das Verhältnis von Aufnahmeentfernung h zur Kamerakonstanten c bzw. das Verhältnis einer Naturstrecke X zur Bildstrecke x' (LUHMANN, 2010, S. 134).

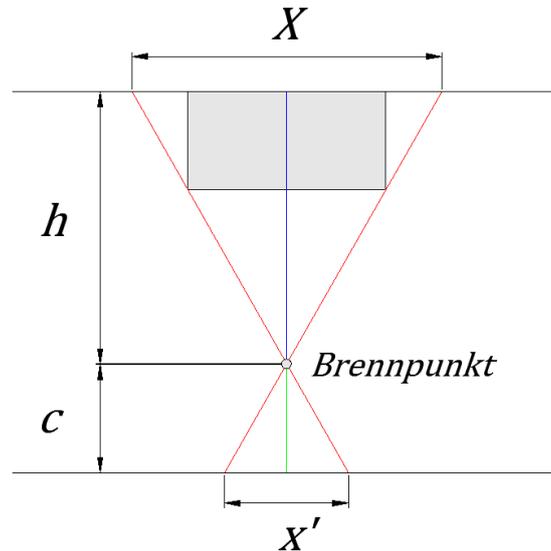


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Zentralprojektion

Die Kamerakonstante c ist die Distanz vom Brennpunkt der Kamera zur Abbildungsfläche der Kamera (z.B. in unserem Fall der CCD-Chip). Die Parallelität von X und x' ist Voraussetzung für diesen Ansatz! Diese Annahme soll als Basis für die weiteren Untersuchungen dienen. Bei Schrägaufnahmen fließen noch eine Reihe weiterer Parameter ein.

Darüber hinaus muss man Kenntnis über die innere und äußere Orientierung haben. Die innere Orientierung besteht im Grunde aus der Kamerakonstanten c und x' , während die äußere Orientierung aus der Entfernung des Brennpunktes h zum Objekt, sowie aus der Objektgröße X abgeleitet wird.

Für unseren Fall bedeutet das, dass die Kamera an der Drohne parallel zum Testraster ausgerichtet sein muss. Man spricht von einer Senkrechtaufnahme. Dies wird nur im Idealfall zutreffen, da die Drohne, bedingt durch Wind und Eigenbewegung (um die Position zu halten), ständig ihre Lage verändert, was die unter 3.1.2 beschriebene Kamerahalterung ausgleichen muss. Die Frage ist, tut sie das?

Um dies herauszufinden muss die oben genannte Gleichung aufgelöst werden; dabei darf es also lediglich eine Unbekannte geben.

Zunächst kann überprüft werden, welche Variablen der Gleichung bekannt sind:

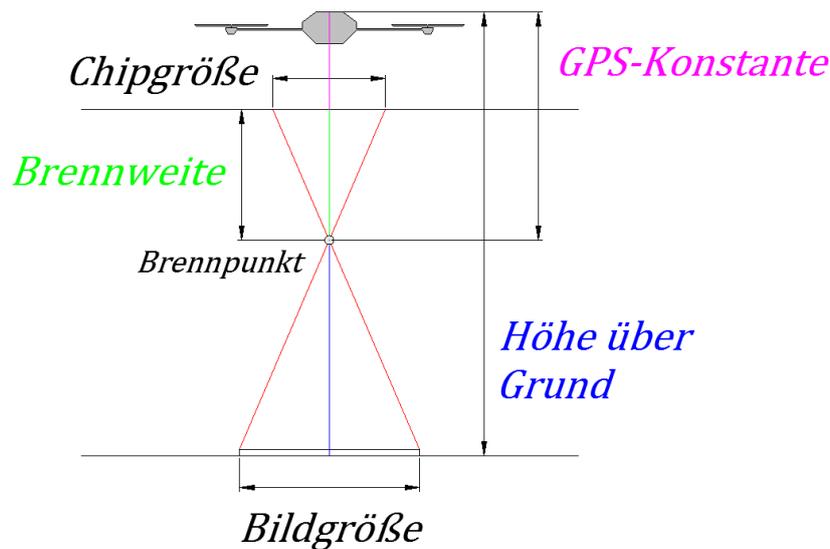


Abbildung 13: Schema der Luftbildaufnahme

- Chipgröße (x') Die Herstellerangaben zur Chipgröße lauten 1/2,3 Zoll
- Brennweite (c) Die Brennweite beträgt 5mm. Dafür muss der Zoom auf 1 stehen. Der Autofokus muss „aus“ sein, da die Fokussierung durch Änderung der Brennweite erreicht wird. Aus gleichem Grund muss auch der Verwacklungsschutz ausgeschaltet werden, weil dies durch Verschiebung des CCD-Chips geschieht = Änderung der Brennweite. Siehe 3.1.3
- Höhe über Grund (h) Der Wert kann entweder über die Differenz aus GPS-Höhe (üNN) und der Geländehöhe (üNN) oder alternativ über die barometrische Höhe ermittelt werden.
- GPS-Konstante (g) Bei den geplanten Feldversuchen muss berücksichtigt werden, dass der Brennpunkt der Kamera nicht mit der Höhe über Grund korrespondiert, da der GPS-Chip am Kopf der Drohne angebracht ist. Diese Differenz, die hier als GPS-Konstante bezeichnet wird, muss beachtet werden.
- Bildgröße (X) Diese Variable wäre in der Praxis die zu ermittelnde Unbekannte.

Die Formel würde also demnach lauten:

$$X = \frac{(h - g) \times x'}{c}$$

Mit dieser Formel sollte es also möglich sein, Auswertungen aus einer Senkrechtaufnahme durchzuführen. Sind die Werte bekannt, kann somit die Ausdehnung des Bildes berechnet werden, so wie es in mdCockpit (3.1.5) vorgenommen wird.

Nimmt man nun noch die absolute Koordinate aus der GPS-Messung hinzu, ist es (theoretisch) möglich, das aufgenommene Luftbild zu georeferenzieren:

Bekannt sind Bildgröße, die Ausrichtung per Magnetometer (Kompass) und die Koordinate. D.h. zur Verortung der Luftbilder werden ausschließlich während des Fluges erhobene Daten verwendet. Man bezeichnet dieses Verfahren auch direkte Georeferenzierung. Werden Passpunkte verwendet, spricht man von indirekter Georeferenzierung. Der Aufwand und die Arbeit vor Ort reduziert sich bei der direkten Georeferenzierung erheblich, da im Idealfall keine Passpunkte erforderlich sind. Zeitaufwand und Kosten werden somit geringer (HANSA, 2012).

Die Hauptschwierigkeit dabei ist, dass es sich um eine Senkrechtaufnahme handeln muss (LUHMANN, 2010). Bei der Drohne (mit der Kamerahalterung) handelt es sich jedoch um einen fliegenden Körper, der seine Position ständig korrigieren muss. Neben der Koordinate und der Höhe müssen auch die Rotations- / Kippachsen (siehe Abbildung 14) ständig angepasst werden. Die Werte dieser Achsen sind in der Luftfahrt eindeutig mit Gierwinkel (engl. Yaw), Rollwinkel (engl. Roll) und Nick- oder auch Neigungswinkel (engl. Pitch) benannt. Diese Daten werden auf die Flugdatenschreiber aufgezeichnet, was eine Kontrolle der Lage des UAV erlaubt.

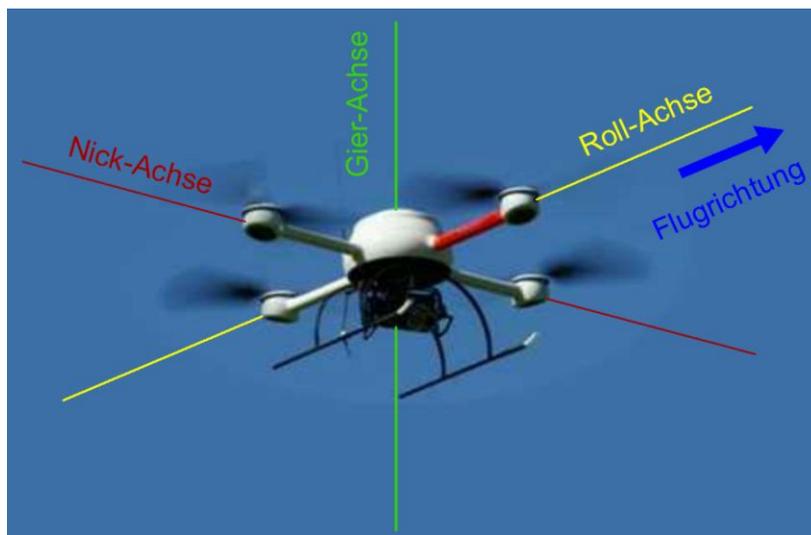


Abbildung 14: Rotationsachsen in der Luftfahrt

Die Erfahrung zeigt, dass die Senkrechtaufnahme nur theoretisch der Fall ist. Eben diese Abweichungen aus der Senkrechten versucht man mit der Kamerahalterung auszugleichen. Die Rollrichtung der Kamera wird jedoch „frei“ ausgeglichen und somit werden keine Werte

im Flugdatenschreiber erfasst. Man muss sich also darauf verlassen, dass die Ausgleichung funktioniert.

Möchte man nun die Genauigkeit der Ergebnisse verifizieren, wird man also nicht umhin kommen, die einzelnen Parameter zu prüfen. Dabei helfen uns die Abweichungen vom Idealfall der Senkrechtaufnahme. Die Idee ist die, dass statt aus dem Luftbild die Naturmaße abzugreifen, die bekannten Naturmaße u.a. dazu dienen, die einzelnen Abweichungsparameter aus der Senkrechten zu bestimmen.

Um bekannte Naturmaße zu erhalten ist es naheliegend, ein Versuchsraster in die Örtlichkeit zu übertragen. Dies hat mehrere Vorteile:

- man hat bekannte / gleichbleibende Kontrollmaße
- das Raster kann „plan“ abgesteckt werden. Verwerfungen des Geländes spielen somit bei der Auswertung keine Rolle.
- man hat ein rechtwinkliges Netz, das
- flächendeckend vorliegt.

Dies vereinfacht den späteren Vergleich von SOLL- und IST-Werten.

Die Befliegung wird derart geplant, dass die Luftbilder sich überlappen, sodass verschiedene Punkte mehrfach bestimmt werden.

Nach der Durchführung des Feldversuchs müssen die Bilder georeferenziert werden. Wie oben beschrieben, werden dabei die Originaldaten des Flugdatenschreibers verwendet. Anschließend digitalisiert man die Punkte aus den Bildern ab. Diese sind die IST-Daten.

Nun überlagert man die Bilder mit den SOLL-Daten, die in die Örtlichkeit übertragen wurden. Folglich kann man mehrere Dinge prüfen:

- Über die Differenzen zwischen SOLL- und IST-Punkten lässt sich die absolute Lageverschiebung bestimmen. Dabei spielt sowohl die Koordinatenermittlung des UAV als solche, aber auch die Neigungsparameter der Kamera eine entscheidende Rolle.
- Durch die Streckendifferenzen zwischen SOLL- und IST-Raster über verschiedene Luftbilder hinweg können Aussagen über die relative Genauigkeit getroffen werden.

- Die Streckendifferenzen zwischen SOLL- und IST-Raster innerhalb eines Luftbildes, jeweils in X und Y-Richtung, lassen Rückschlüsse zu, ob die Luftbildaufnahme perspektivisch gemacht wurde, also die Kamera nicht senkrecht ausgerichtet war.
- Eine Verdrehung des Rasters lässt Rückschlüsse auf die Ergebnisse des Magnetometers zu.

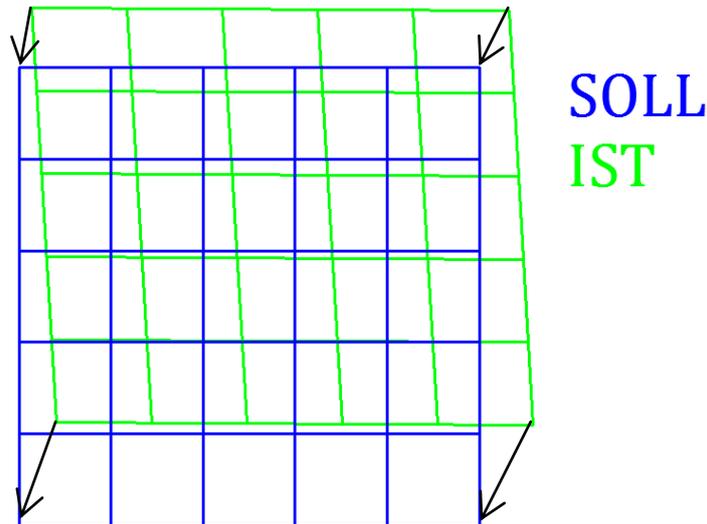


Abbildung 15: Schema des perspektivischen IST-Rasters

Wie erläutert, müssen die Luftbilder für die Analyse georeferenziert werden. Hier ist geplant unter ausschließlicher Verwendung der Telemetriedaten sogenannte Worldfiles zu erzeugen, mit der die Luftbilder in einem CAD-Programm (ACAD) positioniert werden.

Worldfiles sind klar lesbare Textdateien, die Georeferenzdaten eines Bildes enthalten. Es wurde von der Fa. ESRI entwickelt und enthält 6 Werte (WORLDFILE, 2012):

Ein Worldfile besteht aus 6 Zeilen mit Parametern und folgenden Bedeutungen:

- A* Einheiten pro Bildpunkt in x-Richtung
- D* Rotation um y-Achse
- B* Rotation um x-Achse
- E* Einheiten pro Bildpunkt in y-Richtung
- C* x-Koordinate des obersten linken Bildpunkts
- F* y-Koordinate des obersten linken Bildpunkts

Hierbei beziehen sich die Koordinatenangaben (Werte *C* und *F*) jeweils auf die Pixelmitte.

Bilder haben ihren Koordinatenursprung links oben; dies gilt es sowohl bei der Erstellung der Georeferenzierung als auch bei den darauffolgenden Untersuchungen zu beachten.

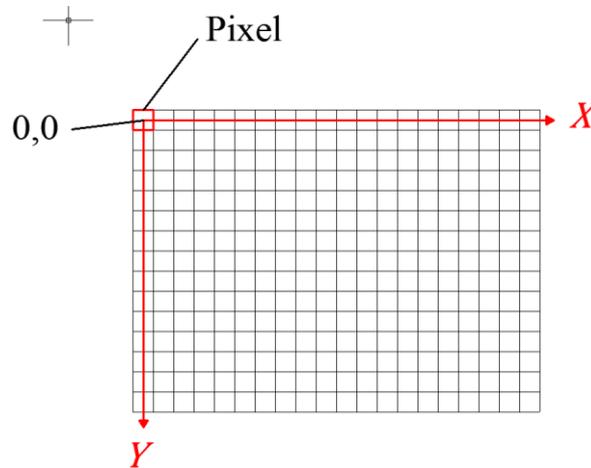


Abbildung 16: Bildkoordinatensystem

Es wird öfters darauf verwiesen, dass die Rotationswerte in der Regel mit 0 anzugeben sind, da eine Drehung des Bildes in einem separaten Arbeitsschritt mit anschließender Rekonstruktion des Bildes einhergehen sollte. Für unsere Aufgabenstellung ist die Rotation aber zwingend notwendig, was die Anforderungen an die Worldfile-Erstellung erhöht, da sich die Pixelgrößenangaben (A und E) immer auf die Koordinatenachsen des Bildes beziehen und sich somit nicht mehr direkt eingeben lassen.

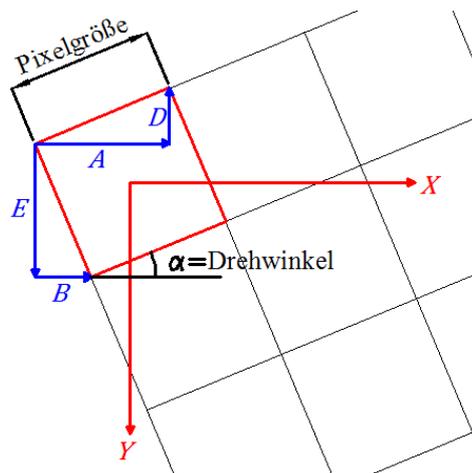


Abbildung 17: Angabe von Pixelgröße und Rotation

Zur Berechnung der benötigten Werte werden somit folgende Formeln angesetzt:

$$A = \cos \alpha \times \text{Pixelgröße}$$

$$D = (-) \sin \alpha \times \text{Pixelgröße}$$

$$B = -\sin \alpha \times \text{Pixelgröße}$$

$$E = (-) \cos \alpha \times \text{Pixelgröße}$$

Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass dieser Ansatz bei einem Drehwinkel von 90° bzw. 270° nicht funktioniert, da die errechnete Pixelgröße dann 0 wäre. Interessanterweise trat das Phänomen auch bei einer Untersuchung eines Worldfile-Erstellungsprogramms für ACAD auf. In der Praxis wird das in aller Regel keine Auswirkungen haben, da schon eine Winkelangabe von beispielsweise $89,999^\circ$ wieder zu korrekten Ergebnissen führt. Die Zuordnung von Wordfile und Aufnahme erfolgt über identische Dateinamen. Je nach Bild-Format wird die Dateinamenerweiterung für den Worldfile angepasst, z.B. *.jpw für die Georeferenzierung einer JPG-Datei (*.tfw bei TIFF-Dateien).

Drehwinkel	Gewünschte Pixelgröße in der Grafik
75,0000	0,50

Einheiten pro Bildpunkt in x-Richtung
 Rotation um y-Achse
 Rotation um x-Achse
 Einheiten pro Bildpunkt in y-Richtung
 x-Koordinate des obersten linken Bildpunkts (Zentrum des Bildpunkts)
 y-Koordinate des obersten linken Bildpunkts (Zentrum des Bildpunkts)

WorldFile
0,12940952
0,48296291
-0,48296291
-0,12940952
0,30618622
0,17677670

Abbildung 18: Vom Autor erstellte Worldfile-Berechnungsfunktion (EXCEL)

Wie erwähnt, werden die absoluten Koordinaten der Luftbilder durch alle Parameter, besonders durch die Perspektive der Kamera, also die Schrägaufnahme, beeinflusst. Um herauszufinden, wie stark dieser Einfluss der einzelnen Werte auf das Gesamtergebnis ist, werden im Wesentlichen zwei Kontroll- / Analyseverfahren eingesetzt:

Tachymetertracking bewegter Objekte

Hierbei soll die Lage der Drohne mittels zielverfolgender Tachymeter exakt bestimmt werden. Ein Tachymeter ist ein Instrument zum punktuellen Messen von Koordinaten. Hierbei werden sowohl Horizontal- und Vertikalwinkel als auch die Entfernung zum Zielobjekt ermittelt und gespeichert.

Die Winkelmessung erfolgt über die Ablesung von horizontalen und vertikalen Teilkreisen. Bei der Streckenmessung wird ein Lichtimpuls ausgesendet und von einem Reflektor (Prisma oder Reflektormarke) zurückgeworfen. Je nach Verfahren wird aus der Laufzeit oder durch Messung von Phasenverschiebung, die zurückgelegte Distanz ermittelt (elektrooptisch) (SCHLEMMER, 1996).

Anhand der ermittelten Werte kann bei entsprechender Orientierung des Vermessungsinstruments im Raum die 3D-Koordinate des Objektes ermittelt werden. Bei

motorisierten Tachymetern besteht die Möglichkeit ein bewegliches Ziel zu verfolgen, wenn das Objekt mit entsprechenden Reflektoren ausgestattet ist. Dabei ist die Geschwindigkeit ein wesentlicher Faktor, da der Tachymeter der Bewegung des UAV folgen können muss. Bewegt sich die Drohne zu schnell, würde das Tachymeter sein Ziel verlieren und die Messung müsste abgebrochen werden. Die Entfernungsmessung kann dabei vernachlässigt werden, da sie sehr schnell vonstattengeht, wenn das ausgesendete Signal in guter Qualität zurückgeworfen wird. Bei dem für die Feldversuche verwendeten Vermessungsgerät handelt es sich um den Typ Leica TPS 1220 +, welches über folgende Leistungsmerkmale verfügt:

Herstellerangaben

Genauigkeit Richtungsmessung:	1" (0,0003°)
Genauigkeit Distanzmessung:	3mm (im Tracking-Modus)
Messzeit:	0,15 Sek
Verfolgungsgeschwindigkeit:	45° / Sek
Reichweite:	800m (unter Verwendung von Miniprismen)

Für die Feldversuche ist geplant, zwei Zielmarken am UAV anzubringen. Somit kann neben der dreidimensionalen (X, Y und Z) Position auch die Ausrichtung der Drohne ermittelt werden.

3D-Helmert-Transformation

Die Helmert-Methode zur Transformation dient der Überführung von dreidimensionalen Koordinaten aus einem in ein anderes System - in unserem Fall vom IST-Koordinatensystem in das SOLL-Koordinatensystem.

Die Grundidee ist die, dass die sechs Freiheitsgrade des INS / UAV, den Translationen und Rotationen der Transformation entsprechen.

Dass die Transformation verzerrungsfrei erfolgt, ist hierbei ein wichtiger Punkt. Die Luftbilder werden dabei also unter Beibehaltung der Skalierung / des Maßstabs lediglich gedreht und verschoben, weshalb dies auch Ähnlichkeitstransformation genannt wird. Im Fall einer 3D-Transformation spricht man hier von einer 7-Parameter-Transformation, denn es erfolgen (HÄSSLER & WACHSMUTH, 1990):

3 Translationen / Verschiebungen	X_o, Y_o, Z_o
3 Rotationen / Drehungen	e_y, e_x, e_z
1 Skalierung (mit dem Faktor 1)	$m=m_y=m_x=m_z$

Die Verschiebungsbeträge des IST-Systems gegenüber dem SOLL-System werden im sogenannten Translationsvektor zusammen dargestellt:

$$t^T = [X_o, Y_o, Z_o]$$

Die Achsdrehwinkel in der Rotationsmatrix:

$$R = \begin{pmatrix} \cos e_y \times \cos e_z & \cos e_x \times \sin e_z + \sin e_x \times \sin e_y \times \cos e_z & \sin e_x \times \sin e_z - \cos e_x \times \sin e_y \times \cos e_z \\ -\cos e_y \times \sin e_z & \cos e_x \times \cos e_z - \sin e_x \times \sin e_y \times \sin e_z & \sin e_x \times \cos e_z + \cos e_x \times \sin e_y \times \sin e_z \\ \sin e_y & -\sin e_x \times \cos e_y & \cos e_x \times \cos e_y \end{pmatrix}$$

Ergänzt man diese Werte durch den bereits aufgeführten Maßstabsfaktor m ($=m_y=m_x=m_z$) und fasst sie zusammen, ergibt sich die Umformungsgleichung:

$$x = t + m (X \times R)$$

Wobei x die Werte des Zielsystems und X die Werte des Startsystems (TRAFO,1999) darstellt. Prinzipiell geeignet wäre auch eine 3D-Affintransformation. Man spricht auch von einer 9-Parameter-Transformation, da hier mit 3 Maßstabsanpassungen gearbeitet wird. Daraus lässt sich auch schon erkennen, dass die Luftbilder verzerrt würden, was u. U. zu besseren Endergebnissen führen würde. Aber dann wäre es nicht möglich, Rückschlüsse auf die für uns wichtigen Parameter der Drohne zu ziehen.

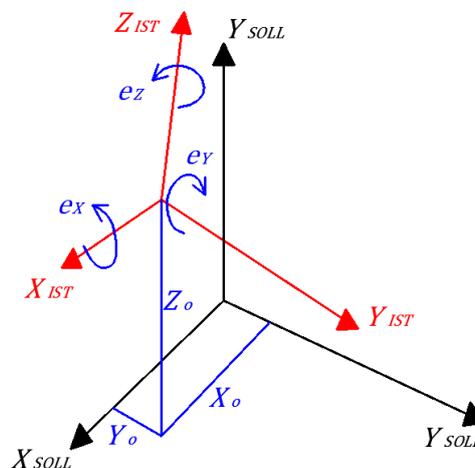


Abbildung 19: Schematische Darstellung einer 3D-Helmert-Transformation

Als ein Ergebnis der Transformation erhält man für die Passpunkte die Residuen. Dabei handelt es sich um die übrig gebliebene Differenz zwischen SOLL-Punkt und IST-Punkt nach der Transformation. Das Residuum ist durch den Richtungswinkel und der Strecke \rightarrow Vektor definiert. Mit diesem Wissen sind wir nun gut gerüstet, um die anstehenden Aufgaben anzugehen.

3.3 Testgebiet

Die gesuchte Fläche muss eine Reihe von Voraussetzungen erfüllen, um als Testgebiet in Frage zu kommen. Dabei geht es weniger um die topographischen Gegebenheiten, obwohl diese auch nicht ganz außer Acht gelassen werden dürfen. Es ist ganz sicher von Vorteil, wenn das Gelände einigermaßen eben ist, da es schlicht und ergreifend die Signalisierungsarbeiten erleichtert. Zudem soll es groß genug sein, um bequem das geplante Raster von 50m x 50m aufnehmen zu können. Zudem sollte auch außerhalb des Rasters zur Sicherheit noch genügend Raum zur Verfügung stehen, bevor Bebauung bzw. hoher Bewuchs einsetzt. Ist dies gegeben, kann man davon ausgehen, dass auch der benötigte GPS-Empfang ausreichend ist und nicht durch Abschattungen gestört wird.

Die Fläche selbst sollte vom Bewuchs her so sein, dass eine Signalisierung mit auf dem Boden befestigten Zielmarken möglich ist. Dies bedeutet auch, dass die Marken mit Erdnägeln o.ä. am Boden gegen verrutschen gesichert werden können, da sie vermutlich einige Zeit dort liegen müssen. Einerseits sollte das Gelände gut zugänglich sein, damit die benötigten Gerätschaften einfach vor Ort und Stelle gebracht werden können. Andererseits soll es jedoch auch so abgelegen sein, damit nicht zu viele Personen über das Gelände laufen und die Luftmarken verändern. Eine Einschätzung, die sich noch als sehr treffend erweisen wird.

Nicht zuletzt muss der Eigentümer des Grundstücks mit der Nutzung einverstanden sein.

Wenn diese Voraussetzungen vorliegen, ist schlussendlich noch der wichtigste Punkt zu klären: Die Aufstiegsgenehmigung muss von der zuständigen Landesbehörde erteilt werden. Für das Land Rheinland-Pfalz ist der Landesbetrieb Mobilität (LBM) in Hahn / Hunsrück zuständig. Die Region, in dem der Autor lebt, ist, zumindest was den Luftraum angeht, geprägt vom internationalen Flughafen in Frankfurt / Main sowie dem kleineren Flughafen Hahn.

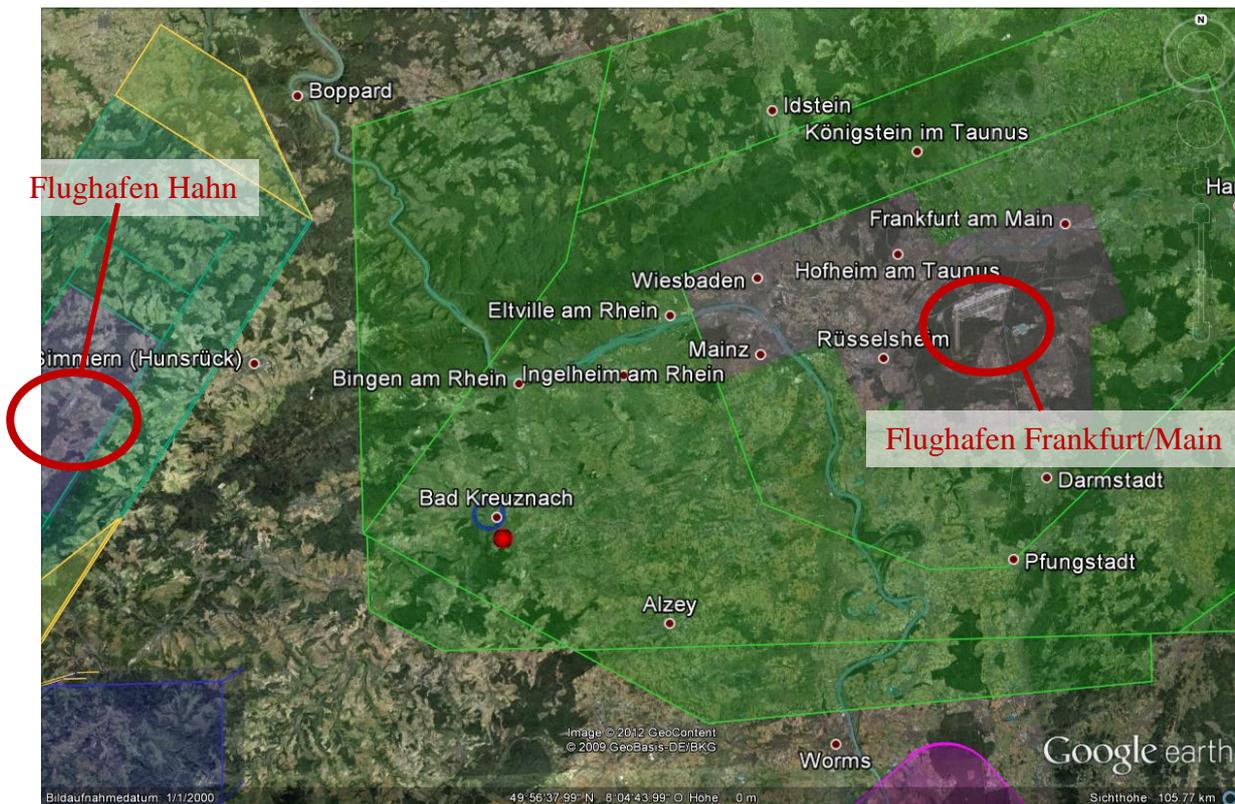


Abbildung 20: Einteilung des Luftraums in der Rhein-Main-Region

In Abbildung 20 sind die Luftraumklassen für das Jahr 2012 in Google Earth visualisiert (SKYFOOL, 2012). Die grünen Bereiche stellen die sogenannte Luftraumklasse C dar. Die Luftraumklassen werden von der internationalen Zivilluftfahrt-Organisation festgelegt und beinhalten Vorgaben zur Durchfliegung der Räume (Höhe, Geschwindigkeit, Sicht- oder Instrumentenflug usw.), sowie die Kontrolle der Lufträume (KORNMEIER, 2012). Bei der Luftraumklasse C handelt es sich um einen kontrollierten Luftraum, der sowohl den Sichtflug als auch den Instrumentenflug zulässt. Die Flughöhen in diesem Gebiet liegen zwischen 457müNN und 3048müNN und spielen für die geplanten Testflüge eine untergeordnete Rolle. Dennoch erhält man vom LBM die Auflage den Luftraum zu beobachten und auch darauf zu achten, dass die Frequenzen zur Bedienung und Übermittlung der Telemetrie keine Störungen verursachen.

Darüber hinaus müssen aber auch lokale Flugbewegungen beachtet werden. Der rote Punkt in Abbildung 20 bzw. Abbildung 21 zeigt das geplante Testgebiet. Zu erkennen ist auch ein Sicherheitsradius von 1500m als blauer Kreis um einen Hubschrauberlandeplatz an einem Krankenhaus. Innerhalb dieses Gebiets muss jeder Flugeinsatz mindestens 2 Tage vorher, unabhängig von der grundsätzlichen Aufstiegsgenehmigung, mit der lokalen Luftaufsichtsstelle oder der Flugleitung abgestimmt werden. Siehe Anhang 2.

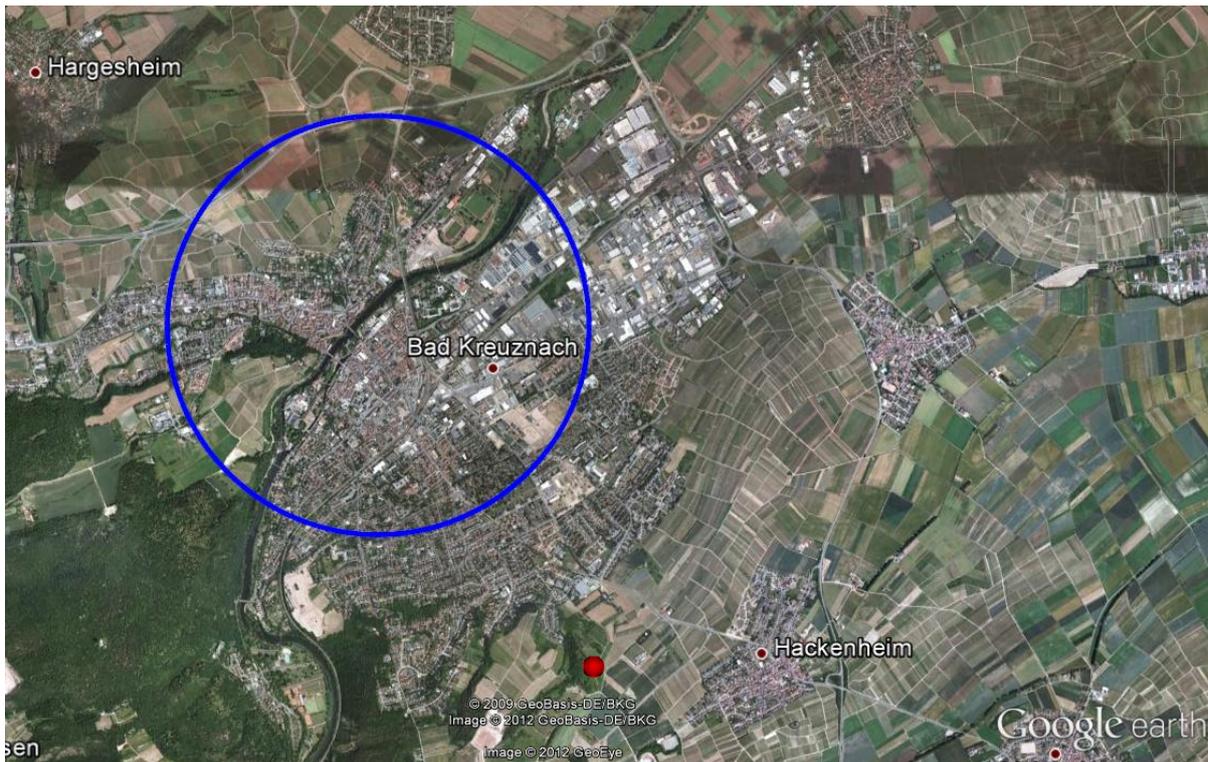


Abbildung 21: Sicherheitszone um Hubschrauberlandeplatz (blau) und das beabsichtigte Testgebiet (rot)

Über die weiteren Details zur Aufstiegsgenehmigung und den damit einhergehenden Auflagen wird später noch ausführlich eingegangen.

4. Untersuchung zur Genauigkeit

Nachdem in Kapitel 3 eine Einführung in Theorie und Technik erfolgte, beschäftigt sich Kapitel 4 mit dem praktischen Teil der Arbeit. Die Tätigkeiten im Zuge der Untersuchungen werden hier nicht zwingend chronologisch aufgelistet; dieser Ablauf ist aus Abbildung 3 zu entnehmen. Vielmehr wurde versucht die Arbeiten thematisch zusammenzufassen. Auch werden die Ergebnisse zunächst direkt im Zusammenhang der jeweiligen Untersuchung genannt und erläutert, da die weitere Vorgehensweise teilweise auf Ergebnissen vorangegangener Versuche beruht. Sie sind durch farbliche Unterlegung hervorgehoben. Die Ergebnisse werden anschließend in Kapitel 5 nochmals zusammengefasst und analysiert.

4.1 Auswahl des Testgeländes

Testgelände „Pfungswiese“ Bad Kreuznach

Das Finden eines geeigneten Testgebietes gestaltete sich sehr schwierig. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein um als Fläche für die Feldversuche in Frage zu kommen.

Zunächst wurde eine öffentliche Fläche in Bad Kreuznach ins Auge gefasst. Die „Pfungswiese“ ist ein Messegelände, in welches das geplante Raster bequem gepasst hätte. Die Stadtverwaltung als Eigentümerin war auch prinzipiell mit der Nutzung einverstanden, wenn die regelmäßig stattfindenden Veranstaltungen, wie Flohmärkte und ähnliches, nicht beeinträchtigt würden.

Nachdem die schriftliche Genehmigung der Stadtverwaltung vorlag, konnte die Aufstiegs Genehmigung beim LBM Rheinland-Pfalz beantragt werden.

Aufstiegs Genehmigung



Abbildung 22: Geplantes Testgebiet Pfungswiese

Dieser Antrag musste in Rücksprache mit dem zuständigen Sachbearbeiter folgendes beinhalten (siehe Anhang 1):

- Name und Anschrift des Antragstellers. Bei Privatpersonen Angabe des Geburtsdatums und Geburtsortes, sowie der Staatsangehörigkeit
- Angaben zum unbemannten Luftfahrtgerät (Bezeichnung und Beschreibung, Antriebsart, Gesamtmasse, Fernsteuerung, genutzte Frequenz)
- Angabe der max. Flughöhe über Grund
- Angabe der Aufstiegsstelle (Gemarkung, Flur- und Flurstücksbezeichnung oder Straßenbezeichnung und Hausnummer)
- Lageplan im Maßstab 1:5.000 mit Eintrag des Aufstiegsortes und des zu nutzenden Flugraumes
- Nachweis der vorliegenden Haftpflichtversicherung für das unbemannte Luftfahrtgerät
- Name, Anschrift, Geburtsdatum u. -ort des Steuerers
- Angabe des Zwecks des Aufstieges (z.B. Luftbildaufnahmen zum Zwecke der Dachsanierung des Hauses
- Einverständnis des Grundstückseigentümers oder sonstigen Nutzungsberechtigten des Aufstiegsortes
- Angabe des Zeitraums, wann der Aufstieg erfolgen soll (Datum, Uhrzeit)
- Anzahl der Aufstiege

Der Gesetzgeber unterscheidet zwischen der kommerziellen und der privaten Nutzung von unbemannten Fluggeräten (KORNMEIER, 2012, S. 52ff), wobei Flüge zum Zwecke der wissenschaftlichen Untersuchung als kommerzielle Nutzung angesehen werden.

So ist die Genehmigungsprozedur als realistisch zu betrachten, da sie auch im regulären Einsatzfall so ablaufen würde.

Nach einer Bearbeitungszeit von 3 Wochen wurde die Genehmigung mit insgesamt 24 Auflagen und Hinweisen erteilt, wobei hier nur die für die Arbeit wesentlichen genannt und erläutert werden sollen.

Die gesamte Genehmigung ist dem Anhang beigelegt (siehe Anhang 2).

- Es dürfen keine Personen oder Tiere über- bzw. angefliegen werden.
- Vor jedem Aufstieg des Flugmodells (mindestens 2 Tage vorher) muss die Zustimmung der Luftaufsichtsstelle oder der Flugleitung des Krankenhauses St. Marienwörth bzw. der Rettungsleitstelle Bad Kreuznach vorliegen.
- Die Flughöhe des Flugmodells von max. 35 m über Grund darf nicht überschritten werden.
- Die Kreisverwaltung Bad Kreuznach (Untere Naturschutzbehörde) hat gegen den geplanten Aufstieg keine Bedenken, wenn die im Biotopkataster erfassten Bereiche (Nahe und Uferbereich der Nahe) nicht beeinträchtigt bzw. gestört werden.

Jeder dieser Punkte ist für sich genommen ein Ausschlusskriterium für das Gebiet. Es ist bei der Nutzung eines öffentlichen Geländes nicht gänzlich auszuschließen, dass Personen oder Tiere überfliegen werden, da das Gelände nicht abgesperrt werden kann und darf. Auch die Einholung einer zusätzlichen Genehmigung bei der lokalen Flugleitung ist als wenig praktikabel anzusehen. Für die Testflüge müssen die geeigneten Wetterbedingungen vorherrschen, was 2 Tage im Voraus nur sehr schwer beurteilt werden kann. Dies würde in der Praxis dazu führen, schon auf Verdacht Genehmigungen einzuholen und dann verfallen zu lassen, weil das Wetter nicht geeignet ist oder sich Personen auf dem Gelände bewegen. Auch die Flughöhe würde bei Einhaltung der Vorgabe dazu führen, dass sich der Autor bei den geplanten Flügen ständig im Grenzbereich der maximalen Flughöhe bewegt.

Letztendlich kann der Autor auch nicht ausschließen, dass sich die am nahegelegenen Fluss „Nahe“ befindliche Flora und Fauna nicht durch die Geräusche und Anwesenheit des Flugkörpers beeinträchtigt fühlen, zumal nicht weiter ausgeführt wurde, was damit genau gemeint ist.

Aufgrund der oben genannten Auflagen wurde die Fläche für die Testflüge aufgegeben. Die Anforderungen brachten zu viele Unsicherheiten mit sich. Der Aufwand wäre enorm geworden. Dennoch zeigt dieses Beispiel schon gut, wie schwierig der kommerziell erfolgreiche Einsatz von UAV in Rheinland-Pfalz ist. Dies resultiert letztlich aus einer gewissen Unklarheit des Gesetzgebers.

An dieser Stelle sei ein kurzer Blick auf die rechtlichen Rahmenbedingungen erlaubt. Wie bereits ausgeführt, ist die Erteilung von Aufstiegsgenehmigungen, u.a. aufgrund mangelnder

Regelungen in den Bundesgesetzen eine Einzelfallentscheidung und obliegt somit den zuständigen Landesbehörden. Entsprechend heterogen sind die Entscheidungen. So werden in Hessen, Nordrhein-Westfalen und Sachsen zeitlich befristete (1 Jahr), aber orts- und einsatzunabhängige Genehmigungen erteilt, siehe Anhang 3. In ihrer Dissertation führt (KORNMEIER, 2012) eine ganze Reihe von Punkten auf, die im Zusammenhang mit dem Einsatz von UAV rechtlich nicht eindeutig geregelt sind. Der Vollständigkeit halber sind hier einige wesentliche Ansätze aus Kornmeiers Buch aufgelistet:

- Eine Einteilung von Drohnen in einen definierten Luftfahrzeugtyp ist nicht möglich, da es keine Besatzung hat und somit kein Flugzeug sein kann, aber auch kein Flugmodell ist, da diese wiederum nur zum Zwecke der Sport- und der Freizeitgestaltung genutzt werden dürfen. Vielmehr handelt es sich um einen eigenen Typ, der jedoch bisher nicht explizit definiert ist.
- Aus gleichem Grund gibt es auch keine Zulassungspflicht für Drohnenmodelle. Kurz gesagt; wenn es fliegen kann, darf auch eine Fluggenehmigung beantragt werden.
- Ein Luftfahrzeug muss immer einen Mindestabstand von 150m zu Personen oder Objekten einhalten. Damit wäre der Einsatzzweck der meisten Systeme aufgehoben. Eine Unterschreitung des Abstands bedarf einer entsprechenden Genehmigung.
- Es gibt keinen definierten Luftfahrzeugverantwortlichen, da sich diese per Definition im Luftfahrzeug befinden müssen. Bei der aktuell angewandten Rechtsprechung wäre auch der Programmierer einer Flugroute oder des Softwareprodukts ein Verantwortlicher.
- Die Haftung ist aktuell (Stand Januar 2012) auf 825.000€ begrenzt.
- Bild und Videoaufnahmen die mittels Drohnen erzeugt wurden, sind dazu geeignet den Tatbestand des unbefugten Erhebens personenbezogener Daten zu erfüllen.

Zwei wichtige Fragestellungen wurden nach Einschätzung des Autors nicht oder nur unzureichend beantwortet. Zum einen wird das ferngesteuerte Fliegen nur in Sichtweite gestattet, sofern das System nicht autonom Hindernisse erkennen und diesen ausweichen kann. Es stellt sich die Frage, wie es sich verhält, wenn das UAV zwar außer direkter Sichtweite fliegt, jedoch das Kamerabild in Echtzeit zur Basisstation übertragen wird? Zum Anderen wird nur von autonomen (also mit selbstständiger Hinderniserkennung usw.) und von ferngesteuerten (also mit RC) Flügen gesprochen. In welche Kategorie fällt die in dieser Arbeit verwendete Flugroutenplanung, die automatisch (nicht autonom!) durchgeführt wird. Nach Ansicht des Autors fällt sie in keine der beiden Kategorien.

Testgelände „Kuhberg“ Bad Kreuznach

Als Konsequenz aus den Erfahrungen wurden die Kriterien ergänzt, wie sie in Kapitel 3.3 zusammengefasst werden.

Nach längerer Suche wurde eine Fläche gefunden, die den Anforderungen fast vollständig gerecht wird. Das Gebiet ist zwar allgemein zugänglich, befindet sich jedoch in Privatbesitz und liegt abseits der Bebauung.



Abbildung 23: Testgebiet am Kuhberg

Es handelt sich dabei um eine ehemalige Kiesgrube, die seit der Verfüllung brach liegt. Nach ausführlicher Auskundschaftung wurde das Gelände als geeignet angesehen, da es auch die Auflagen der Verwaltung erfüllt.



Abbildung 24: Besichtigung des Geländes

Anschließend wurde das Referenzraster geplant und in die Örtlichkeit übertragen. Es handelt sich dabei um ein 10m-Raster mit einer Gesamtausdehnung von 50m x 50m. Zusätzlich wurden die Rastermittelpunkte abgesteckt. Diese Punkte sollen von der Drohne angefliegen werden.

Die umliegenden Rasterpunkte dienen als Passpunkte.

Das Raster wurde mit ausreichendem Abstand zu den angrenzenden Parzellen geplant. Gleichzeitig wurde beachtet, dass die vorhandene Vegetation (Sträucher, Büsche) nicht zu sehr in Mitleidenschaft gezogen wird. Hierzu wurden das zur Verfügung stehende Liegenschaftskataster und Luftbilder verwendet.

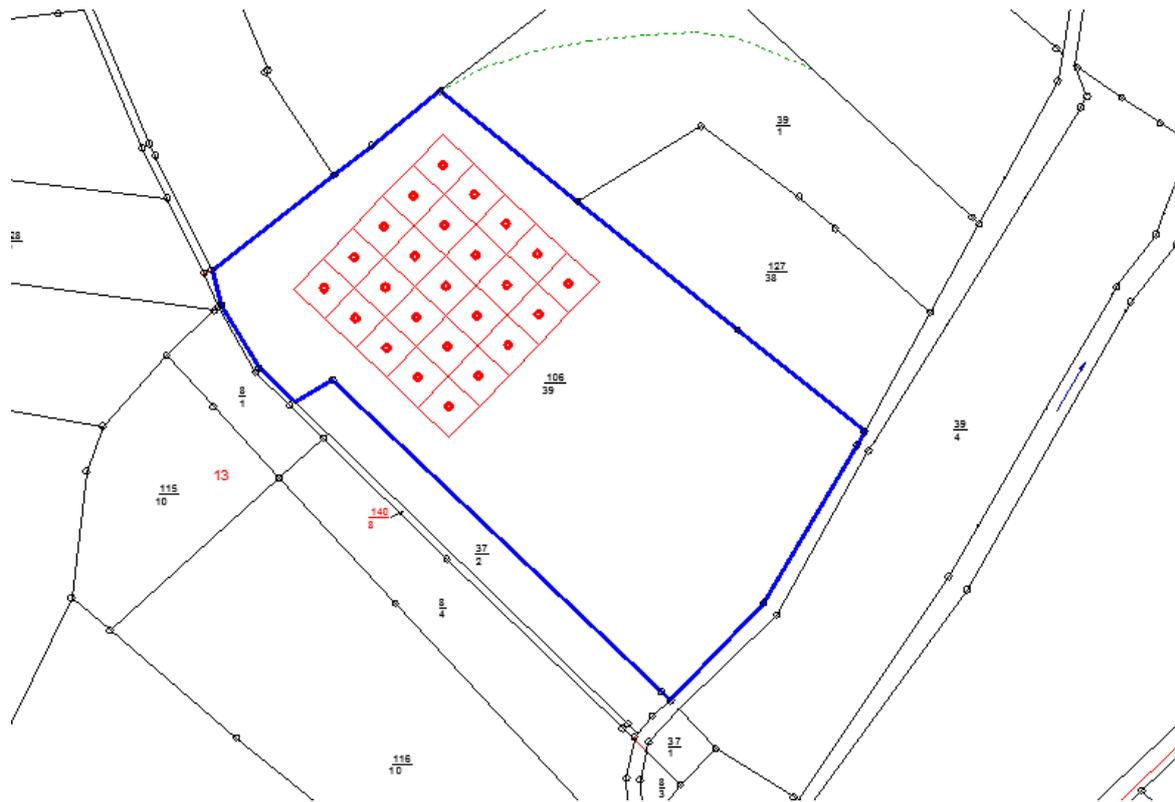


Abbildung 25: Lage des Referenzrasters nach der Absteckung

Die Punkte wurden mit einem GNSS-Empfänger (Leica Viva / GPS-Empfänger) und Korrekturdaten (SAPOS) in die Örtlichkeit übertragen. Die hierbei erzielte Koordinatengenauigkeit lag unter 1cm. Die Absteckung erfolgte im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (GK3) mit Bessel 1841.

Dies hatte den Vorteil, dass das Raster mit dem Maßstabsfaktor 1 geplant und abgesteckt werden konnte.

Nach der Vermarkung wurden die Rasterpunkte mit GPS in Lage und Höhe aufgemessen, da nicht auszuschließen ist, dass es durch die Signalisierung zu geringen Lageabweichungen gekommen ist. Die absolute Rechtwinkligkeit des Rasters oder das exakte Maß von 10m ist nicht so wichtig wie die Kenntnis über die tatsächliche Lage der einzelnen Rasterpunkte. Ob der Abstand nun bei 10,00m oder 10,03m beträgt ist nicht entscheidend.

Die Koordinaten dieser Aufnahme stellen unsere Referenz, unser SOLL-System dar!



Abbildung 26: Herstellung der Referenzpunkte

Bei der Signalisierung der Punkte wurde auf herkömmliche Luftbildmarken zurückgegriffen, die mit Erdnägeln auf dem Boden befestigt wurden (siehe Abbildung 26). Als Sicherung wurde der eigentliche Punkt mit einem Kunststoffkegel im Boden vermarktet. Bezüglich der Art der Vermarkung wurde auf entsprechende Untersuchungen von (SIEBERT, 2010) zurückgegriffen. Daraus ist zu entnehmen, dass quadratische oder rechteckige weiße Markierungen in den Luftbildern am besten ausgewertet werden konnten. Es ist jedoch dabei darauf zu achten, dass die Bilder nicht überbelichtet werden, da dies zu Unschärfe bei der Abbildung der Markierungen führen kann.

4.2 Planung der Flugroute

Der Vorteil bei der Aufnahme des Rasterfeldes mit dem GPS-Empfänger liegt vor allem in der Tatsache, dass die gemessenen Koordinaten sowohl im Gauß-Krüger-Koordinatensystem als auch in geographischen Koordinaten mit WGS 84 ausgegeben werden können. Diese sollen genutzt werden, um die Flugroute im „Waypoint Editor“ von mdCockpit zu planen.

Um nicht alle Koordinaten manuell eingeben zu müssen, was eine potenzielle Fehlerquelle darstellt, bietet das Programm die Möglichkeit, Koordinatenlisten zu importieren. Das Einlesen von Höhen ist dabei nicht vorgesehen. Gearbeitet wird mit den genannten Gauß-Krüger-Koordinaten. Verwendet werden nur die Rastermittelpunkte, die später vom UAV angefliegen werden sollen. Wie unter 3.1.5 geschrieben, arbeitet das Programm selbst mit

geographischen Koordinaten (Dezimalwerte). Beim Import der GK-Daten erfolgt also intern eine Transformation (MDCOCKPIT3 MANUAL, 2012).

Zur Kontrolle wurden die daraus resultierenden geographischen Koordinaten mit den Werten auf dem GNSS-Empfänger verglichen. Diese Werte werden dort automatisch mit erfasst. Sie können für unsere Aufgabe als hochgenau angenommen werden, da die Herstellerangabe eine Genauigkeit von unter 0,01m aufweist (mit Referenzdienst SAPOS).

Der erste Vergleich ergab augenscheinlich eine Differenz. Es erfolgten weitere Untersuchungen, bei denen die Koordinatendifferenzen und daraus resultierend die Strecken (Bögen) ermittelt wurden. Aufgrund der erwarteten kurzen Distanz zwischen den Werten kann die Erdkrümmung vernachlässigt werden. Auf die Berechnung der Orthodromen wurde verzichtet. Man verwendete die einfache Bogenformel bzw. anschließend den Satz des Pythagoras. Es wurde der mittlere Erdradius verwendet.

Bogenformel:

$$b = \frac{\alpha \times R}{\rho}$$

Siehe Anhang 4.

Die Distanz zwischen den jeweiligen Koordinatenpaaren lag bei $1,239\text{m} \pm 1\text{mm}$. Die Differenz ließ sich nicht eindeutig erklären, da die Firma Microdrones den Transformationsansatz nicht zur Verfügung stellen konnte.

Es wurde klar, dass die Koordinatentransformation von mdCockpit für diesen Zweck nicht geeignet ist, möchte man doch vermeiden schon bei der Planung mit Differenzen zu arbeiten, die die in der Hypothese genannte Anforderung schon bei weitem überschreitet.

Folglich wurden die geographischen Koordinaten aus dem GPS-Empfänger verwendet und importiert.

Die Flugroute wurde mit einer Höhe von 35m über Grund geplant. Mit der gleichbleibenden Höhe soll eine homogene Bodenauflösung erreicht werden, d.h. die abgebildete Fläche pro Pixel soll gleich bleiben, was bei der zentralprojektiven Abbildung über den Abstand von Objekt zur Abbildungsfläche erreicht wird → Höhe über Grund.

Bei der Planung wurde auch darauf geachtet, dass die Drohne entsprechend des Rasters ausgerichtet ist. Damit wird erreicht, dass die Luftbilder bei der geplanten Berechnung der Georeferenzierung nur um den Wert des Richtungswinkels gedreht werden müssen. Abbildung 27 zeigt alle wichtigen Einstellungen und Angaben an den Stationen der Flugroute,

sowie die Parameter der Vektoren zwischen den Punkten wie sie für die Untersuchungen eingestellt wurden:

- 1) Die Flughöhe über Grund = der Abstand zwischen Objekt und UAV. Für die Georeferenzierung der Luftbilder muss beachtet werden, dass die Höhe der Abbildungsfläche der Kamera nicht mit der Höhenangabe des UAV identisch ist. Siehe Kapitel 3.2 GPS-Konstante.
Die relative und die absolute Höhenangabe errechnen sich mittels der geschätzten Bodenhöhe.
- 2) Kamera Waypoint Orientiert bedeutet, dass die Ausrichtung und die Auslösung der Kamera in der Flugdatei gespeichert werden, sie also nicht per Fernbedienung gesteuert wird. Auch der Kameratyp wird vorgegeben. Wie beschrieben, kennt das Programm dadurch Brennweite und Chipgröße der Kamera.
- 3) Hier werden sowohl die absolute Koordinate sowie der Richtungswinkel der Drohne vorgegeben.
- 4) Die Verweildauer wurde auf 8 Sekunden festgelegt, um der Drohne die Möglichkeit zu geben aus der Bewegung heraus zur Ruhe zu kommen. Dies soll die Qualität der Aufnahmen erhöhen. Das bedeutet, die Drohne fliegt einen Wegpunkt an und hält die Position 8 Sekunden lang, bevor sie den nächsten Punkt anfliegt.
- 5) Gibt an, wie groß die abgebildete Fläche des Fotos sein wird.
- 6) Hier wird die Kamera ausgerichtet. $+90^\circ$ Neigungswinkel bedeutet, dass die Kamera senkrecht nach unten ausgerichtet sein soll. Der Rollwinkel ist logischerweise auf 0° gesetzt, dass sich dieser bekanntermaßen frei ausrichtet. Microdrones bietet ein weitaus größeres UAV-Modell (md4-1000) an, bei deren Kameraaufhängung auch der Rollwinkel über einen Servomotor gesteuert werden kann. Wie in der Theorie beschrieben, muss der Zoomfaktor für unsere Untersuchungen 1 bleiben. Für die ersten Untersuchungen wurde die Foto-Intervallzeit aktiviert. Die Kamera macht nach Erreichen des Wegpunktes alle 2 Sekunden eine Aufnahme bis die maximale Verweildauer erreicht ist. Damit soll mehr Bildmaterial zur Optimierung des Versuchsaufbaus zur Verfügung stehen. Der Kamerarichtungswinkel wird beibehalten; eine Veränderung des Wertes würde ein Drehen der Drohne zur Folge haben.
- 7) Wichtig sind hier in erster Linie die Geschwindigkeitsangaben. Sie wurden zunächst auf einen geringen Wert eingestellt, um einen möglichst ruhigen Flug der Drohne zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird auch der Richtungswinkel der Drohne während

des gesamten Fluges beibehalten. Der hier angegebene Wert von 10.02m als Vektorlänge ist plausibel, da ein 10m-Raster verwendet wird.

- 8) Der Richtungswinkel des Vektors / der Flugbahn entspricht natürlich dem Richtungswinkel der Drohne, da wir uns parallel zum Raster bewegen. Dabei gilt es zu beachten, dass mdCockpit bzw. das UAV bei der Richtungsangabe eine eigene Vorgehensweise verfolgt. Der Kreis wird dahingehend aufgeteilt, dass der rechte Halbkreis über Werte von 0° bis $+180^\circ$ im Uhrzeigersinn und der linke Halbkreis von 0° bis -180° gegen den Uhrzeigersinn angesprochen werden. Die Ausrichtung von Raster und Drohne wird also mit $-42,7^\circ$ angegeben, was einem Winkel von $317,3^\circ$ entspricht.

Die Angaben müssen nicht für jeden Wegpunkt bzw. Vektor angegeben, sondern können global eingestellt werden, was die korrekte Eingabe aller Werte erleichtert.

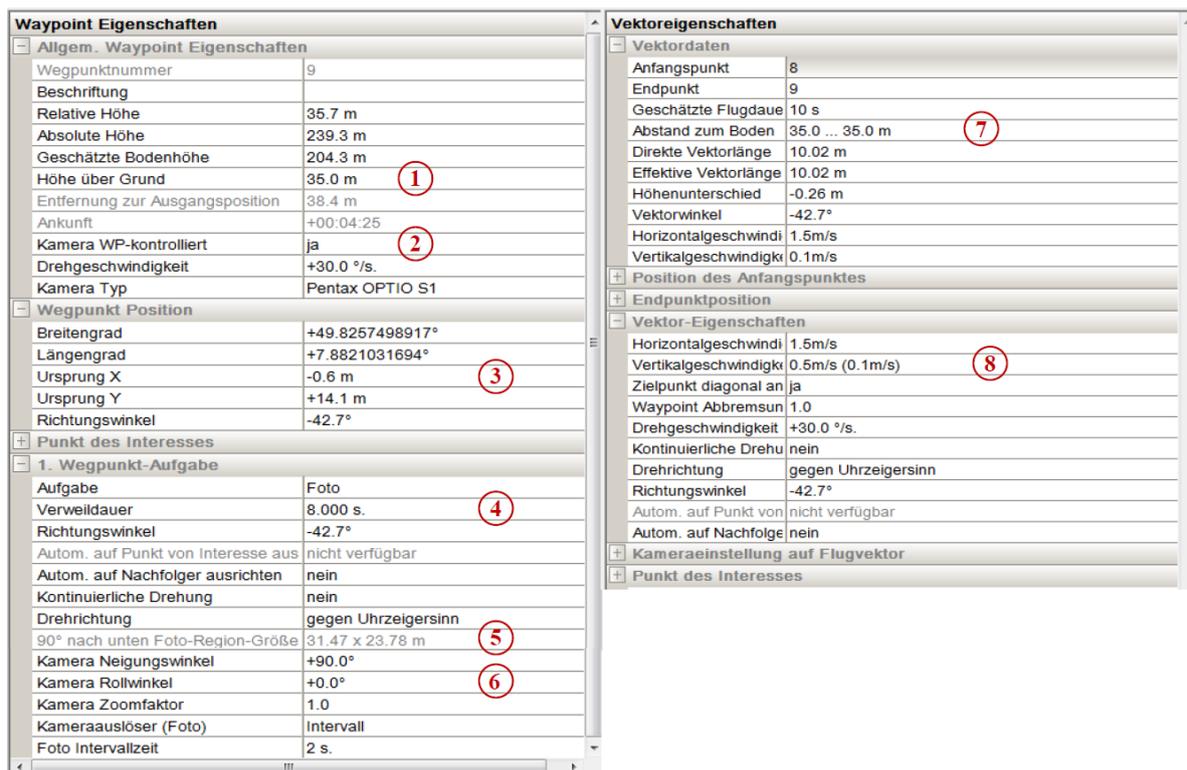


Abbildung 27: Einstellungen der Flugroute

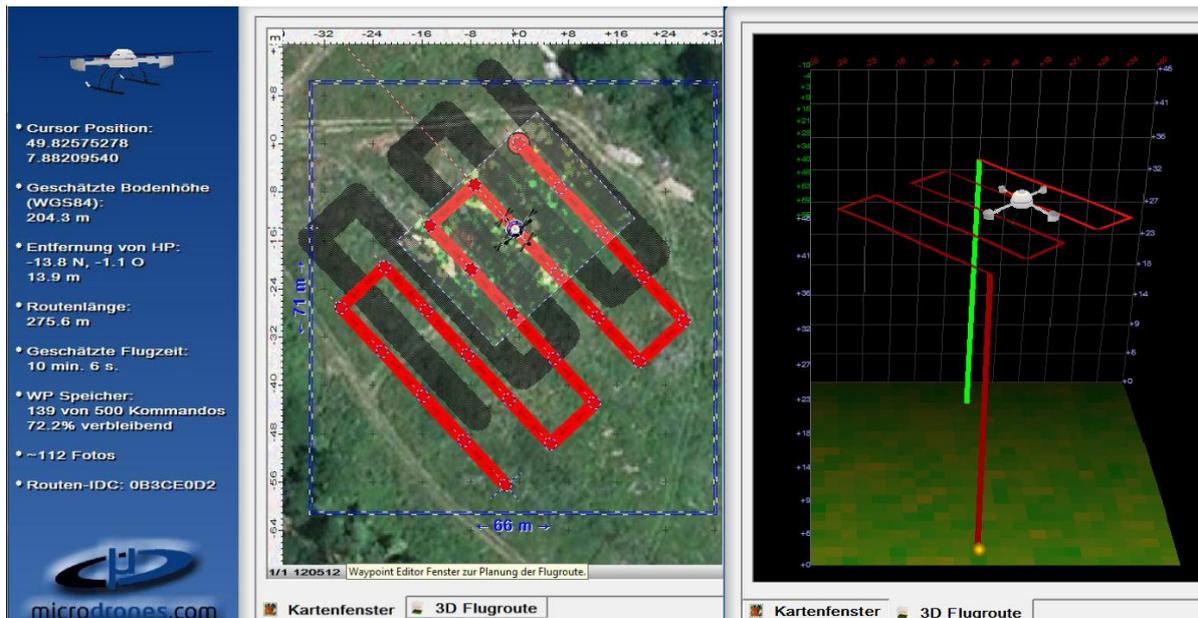


Abbildung 28: Routenübersicht und 3D Ansicht

Die geplante Gesamtflugzeit der Route beträgt ca. 10 Minuten. Dies kann gut mit einer Akkuladung geflogen werden, so dass man noch genügend Energie als Sicherheitsreserve zur Verfügung hat. In der Mitte von Abbildung 28 ist die Drohne auf einem Wegpunkt zu erkennen. Die rot weiß gestrichelte Linie stellt die Flug- / Blickrichtung da, während das hell unterlegte Rechteck die auf dem Foto abgebildete Fläche darstellen soll. Es ist gut zu erkennen, dass mit großen Überlappungsbereichen gearbeitet wird und immer mehrere Rastermittelpunkte auf einem Foto zu erkennen sind.

4.3 Testflüge

Der erste Test im April 2012 konnte bei guten Wetterbedingungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse, sprich die Luftbilder, waren allerdings sehr ernüchternd wie Abbildung 29 aufzeigt. Man hatte es gleich mit einer ganzen Reihe von Problemen zu tun.

- Die Bilder sind unscharf, was vermutlich an einer zu langen Belichtungszeit liegt, da mit ausgeschaltetem Verwackelungsschutz gearbeitet werden muss und die Drohne in ständiger Bewegung ist.
- Der angeflogene Wegpunkt befindet sich nicht annähernd in der Bildmitte, was ein (erwarteter) Hinweis auf eine unzureichende Genauigkeit des GPS-Signals sein könnte.

- Die Fotos erscheinen perspektivisch. Dies bedeutet, dass die Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme nicht senkrecht zum Raster stand. Da die Drohne während des Fluges relativ ruhig lag, ist zu vermuten, dass die Ausrichtung der Kamera nicht korrekt war.
- Der Richtungswinkel stimmt scheinbar auch nicht, wobei zunächst nicht klar ist, ob dies nicht auch eine Folge der Perspektive sein kann.
- Die auf dem Foto dargestellte Fläche ist augenscheinlich nicht so groß, wie in mdCockpit berechnet. Dies kann darauf hindeuten, dass die geplante Flughöhe nicht eingehalten wurde oder, dass die vom Programm verwendeten Angaben zur Brennweite und Chipgröße nicht korrekt waren.

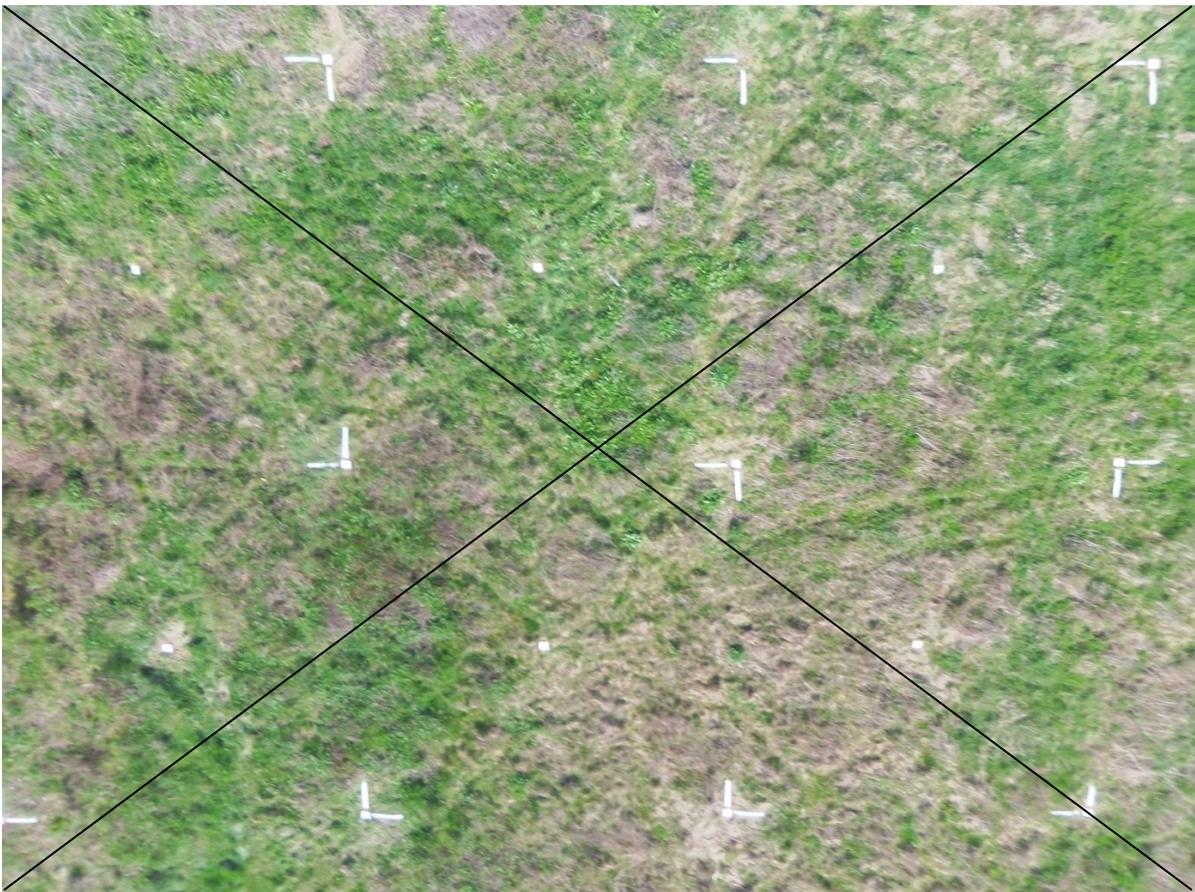


Abbildung 29: Erste Luftbilder

Im weiteren Verlauf galt es nun die einzelnen Sachverhalte zu untersuchen und wenn möglich, Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Der Unschärfe der Fotos versuchte man mit der Verkürzung der Belichtungszeit entgegenzuwirken. Hierzu wurde der Aufnahmemodus auf „Sport“ gestellt und mit der Lichtempfindlichkeit der Kamera experimentiert, wobei sich ISO 800 als der beste Kompromiss zwischen Belichtungszeit und Helligkeit der Aufnahmen herausstellte.

Untersuchung Kamerahalterung

Die Ausrichtung wurde im Büro untersucht. Hierfür wurde die Drohne zunächst eben aufgestellt und die Kamera anschließend auf 90° ausgerichtet. Mittels einer kleinen Libelle wurde anschließend die Lage geprüft.



Abbildung 30: Untersuchung der Kameraausrichtung

Ergebnis: Die Angabe der 90° entsprach nicht der senkrechten Ausrichtung. Nach Rücksprache mit dem Hersteller wurde eine Möglichkeit gefunden, den für die Neigung der Kamera verantwortlichen Servomotor so zu kalibrieren, dass eine Vorgabe von 90° auch der Senkrechten entspricht. Hierzu wurden Veränderungen an der Konfiguration der Drohne vorgenommen. Die Genauigkeit der Libelle wurde hier als ausreichend erachtet. Allerdings konnte bei anschließenden Experimenten mit eingeschaltetem Servoausgleich festgestellt werden, dass die Libelle anschließend immer ein wenig aus dem Wasser ging. Hierfür wurde die Drohne leicht in alle Richtungen geneigt und anschließend wieder auf die ebene Fläche gestellt. Eine erneute Rücksprache mit dem Hersteller ergab, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass der Motor über ein gewisses Spiel verfügt, die Kamera also nicht exakt die ursprüngliche Position einnimmt.

Dass zur Überprüfung der Lage und Höhe des UAV eine Untersuchung mittels Tachymetertracking notwendig wird, war klar und schon zu Beginn der Arbeit an dieser Master-Thesis angedacht. Aufgrund der schlechten Ergebnisse der ersten Flugversuche entschied man sich aber, noch einige weitere Tests durchzuführen um die Ergebnisse besser einschätzen zu können.

4.4 Stationäre Untersuchung zur Lage und Höhe

Zunächst wurden die Flugdaten der vorangegangenen Tests ausgewertet. Hier waren sowohl die Anzahl der zur Positionierung empfangenen Satelliten als auch die angegebene Lagegenauigkeit von Interesse. Die Telemetriedaten werden, wie beschrieben, 125 mal pro Sekunde übermittelt, wobei die GPS-Position selbst 4 mal pro Sekunde ermittelt wird (MDCOCKPIT3 MANUAL, 2012). Die Werte können nach EXCEL ausgegeben werden. Die darin angegebene Satellitenanzahl wurde mit CALSKY (CALSKY, 2012), einem Webdienst, mit dem die Sichtbarkeit und die zu erwartende Genauigkeiten ermittelt werden kann, sowie mit Trimble-Planning (TRIMBLE, 2010), einer kostenlosen Applikation mit gleicher Aufgabe, verglichen. Sichtbarkeit bedeutet hier, wie viele und welche Satelliten über dem Horizont stehen. Hierfür müssen Datum, Uhrzeit sowie die ungefähre geographische Lage und Höhe des GPS-Empfängers angegeben werden.

Dieser Vergleich wurde bei jedem Flug im Zuge der Untersuchungen zu dieser Arbeit durchgeführt und obwohl es auch immer mal wieder zu ähnlichen Ergebnissen kam, kann man feststellen, dass die Angaben in den Telemetriedaten eher zu positiv dargestellt wurden. Siehe Anhang 5.

Dies alleine lässt natürlich kein Urteil zur Qualität der Angaben zu, zumal nicht klar ist, bis zu welcher Höhe über dem Horizont (Elevation) der GPS-Chip der Drohne Satelliten empfängt. Je geringer diese Höhe ist, umso mehr Satelliten werden empfangen. Allerdings gibt es dann auch mehr schleifende Schnitte bei der Positionsbestimmung. Auch hier konnte der Hersteller keine Angaben machen, im Allgemeinen wird jedoch eine Mindestelevation von 10° als praktikabel angenommen (MANSFELD, 2010).

Datum	15.06.2012		
Uhrzeit	12:06 Uhr		
Lage	49° 49' / 7° 59'		
Höhe	207 mÜNN		
	md4-200	CALLSKY.de	Trimble-Planning
Mindestelevation	?	10°	10°
Anzahl der Satteliten	11	9	9
Dilution of Precision (DOP)	1,6	2,53	2,38

Tabelle 1: Beispielhafte Gegenüberstellung der Sichtbarkeitsanalyse

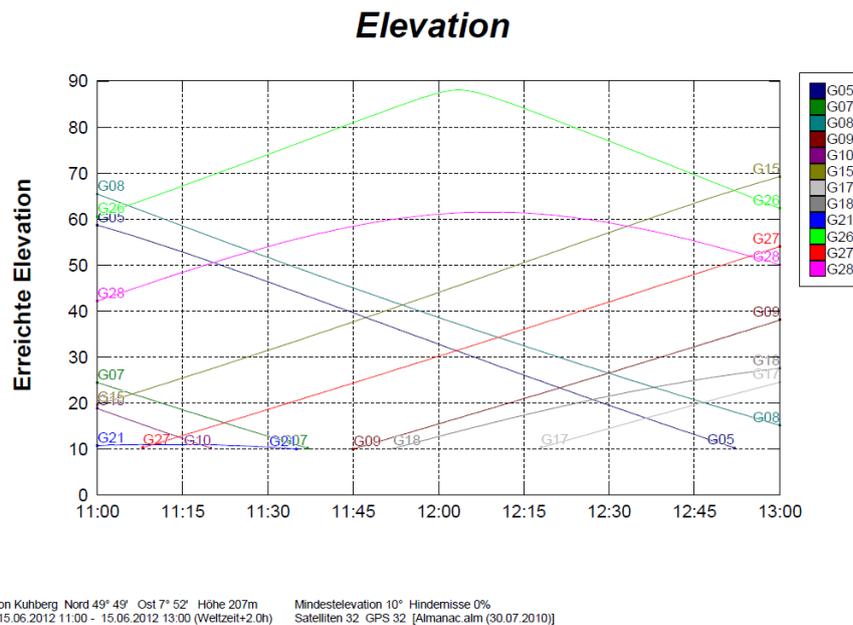


Abbildung 31: Höhe der empfangbaren Satelliten über dem Horizont in Grad

Für den nächsten Versuch wurde ein Punkt in Lage und Höhe mit dem GNSS-Empfänger bestimmt und vermarkiert. Anschließend wurde die Drohne zentrisch über diesem Punkt aufgebaut. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Drohne eben steht, da man vermeiden wollte, dass die INS-Werte Einfluss auf die Koordinatenangaben nehmen (siehe Kapitel 3.1.1). Das UAV wurde gestartet und damit auch die Telemetriedatenaufzeichnung. Für den Versuch wurden vorher die Rotoren abmontiert, sodass die Drohne nicht abhob und an Ort und Stelle verblieb. Die Aufzeichnung wurde für ca. 20 Minuten vorgenommen; dabei wurden ca. 5000 GPS-Positionen aufgezeichnet.



Abbildung 32: Das UAV zentriert über dem Kontrollpunkt

Anschließend wurden wieder die Telemetriedaten ausgelesen. Zur Visualisierung der Ergebnisse wurden die Werte in eine KML-Datei gewandelt und in Google Earth dargestellt.

Auch Google Earth verwendet WGS84 als Referenzsystem, so dass es zu keinen nennenswerten Abweichungen in der Darstellung kommen sollte.

Dabei wurden die Daten nach ihrer Genauigkeitsangabe (GPS-Position-Accuracy=DOP) klassifiziert. Es handelt sich hierbei um eine 3D-Lage-Angabe. Jeder Punkt stellt einen Eintrag in den Telemetriedaten dar:

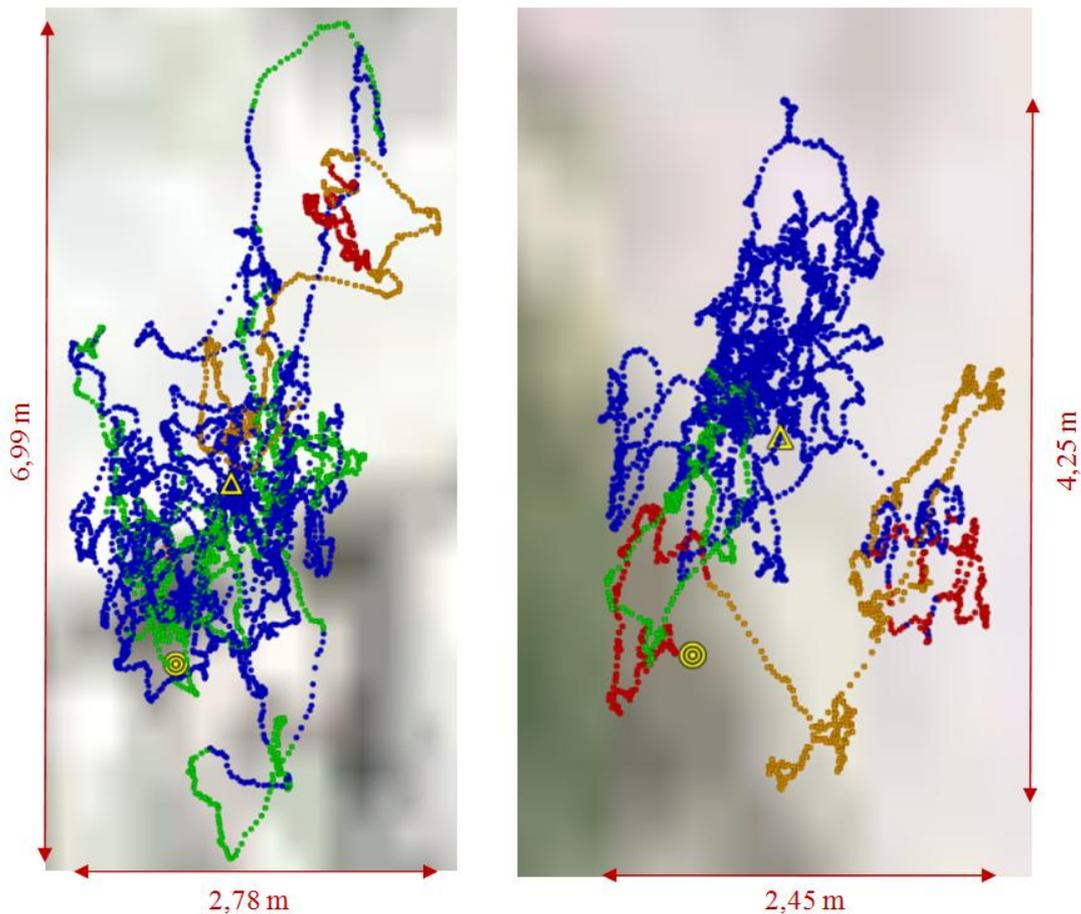


Abbildung 33: Stationärer Koordinatentest der Drohne

Legende:

- DOP 1,0-1,9m
- DOP 2,0-2,4m
- DOP 2,5-2,9m
- DOP 3,0-3,5m
- Referenzpunkt (Gemessen mit GNSS-Empfänger)
- ▲ Mittel

Dieser Versuchsaufbau wurde mehrmals an verschiedenen Orten durchgeführt, um die Ergebnisse zu verifizieren. Abbildung 33 zeigt zwei Ergebnisse. Die allgemeine Verteilung der Punkte ist in beiden Fällen ähnlich, wobei auffällt, dass die spezifische Verteilung der klassifizierten Punkte voneinander abweicht.

In beiden Fällen bilden die Punkte eine Ellipse mit der langen Achse in Nord Süd-Richtung. Dabei liegen die meisten Messungen nördlich des eigentlichen Referenzpunktes. Es fällt auf, dass die vom UAS ausgegebenen Genauigkeiten nicht mit der tatsächlichen Genauigkeit korrespondieren. So liegen im linken Beispiel die Punkte mit den maximalen Abweichungen zum Referenzpunkt (in Nord- / Südrichtung) im DOP-Bereich von unter 2m. Dies ist auch nicht mit der fehlenden Perspektive der Draufsicht zu erklären, in der die tatsächlichen Differenzen der 3D-Punkte nicht zu erkennen sind. Im rechten Beispiel ist zu sehen, dass teilweise Punkte der schlechtesten Genauigkeitsklasse dem Referenzpunkt am nächsten liegen. Die Höhendifferenz zwischen Soll und Ist beträgt hier nur ca. 1m. Somit ist also auch eine eventuelle Höhendifferenz keine Erklärung für die ermittelten Abweichungen.

	Test 1	Test 2
Messdauer	ca. 20 min	ca. 20 min
Anzahl Punkte	4967	4853
Mittlerer DOP des UAV	2,15 m	2,29 m
Min. DOP	1,8 m	1,9 m
Max. DOP	3,1 m	3,3 m
Abstand Koordinatenmittel zur Referenz	1,53 m	1,41 m
Mittlere relative Höhe	3,24 m	3,00 m
Min. relative Höhe	0,1 m	0,0m
Max. relative Höhe	5,2 m	4,5m
Referenzhöhe	-	208,1 müNN
Min. UAV-Höhe (GPS)	-	207,7 mÜNN
Max. UAV-Höhe (GPS)	-	212,1 mÜNN

Tabelle 2: Beispielhafte Gegenüberstellung zweier Koordinatenuntersuchungen

Auch bei der Höhe gibt es erhebliche Unterschiede in den Werten (siehe Tabelle 2). Die relative Höhe (bezogen auf den Startpunkt der Drohne) wird, wie beschrieben, mittels der barometrischen Einheit im UAV ermittelt. Es ist also nicht auszuschließen, dass die Differenzen aus Veränderungen des Luftdrucks resultieren. Jedoch wies auch die GPS-Höhenmessung, beispielsweise bei Test 2, eine Differenz von 4,5m in den Messungen auf. Natürlich unterliegt die Genauigkeit des GPS-Signals einer Reihe von Faktoren. Neben der Sichtbarkeit und Verfügbarkeit von Satelliten, die zeit- und ortsabhängig sind, können auch Signalzeitunterschiede, Messrauschen, Ionosphäre, Interferenzen und weitere Parameter

Einfluss auf das Ergebnis nehmen. Mansfeld beschreibt eine ähnliche Darstellung bei Dauermessungen, wie sie auch bei unseren Untersuchungen nachvollzogen werden konnten (MANSFELD, 2010, S. 170 ff.).

In einem weiteren Schritt wurden die 3D-Strecken zwischen SOLL-Punkt und den gemessenen IST-Werten berechnet. Die Klassifizierung erfolgte innerhalb der gleichen Klassengrenzen wie auch bei der Auswertung für Abbildung 33 mit der Ausnahme, dass hier eine zusätzliche Klasse für Werte für Differenzen über 3,5m (bis 5,2m! / grau dargestellt) gebildet wurden, während in den Telemetriedaten der höchste DOP-Wert bei ca. 3,5m lag.

Die Auswertung erscheint um einiges plausibler. Es ist allerdings zu vermuten, dass die Drohne ihre Position in der Flugbewegung besser bestimmen kann, als dies bei einem stationären Test der Fall ist, da die IMU-Daten, die im Kalman-Filter fusionieren (siehe Kapitel 3.1.1), nur im Flug korrekt arbeiten. Beispielsweise fallen beim stationären Test die Beschleunigungssensoren weg, da sich das UAV logischerweise nicht bewegt.

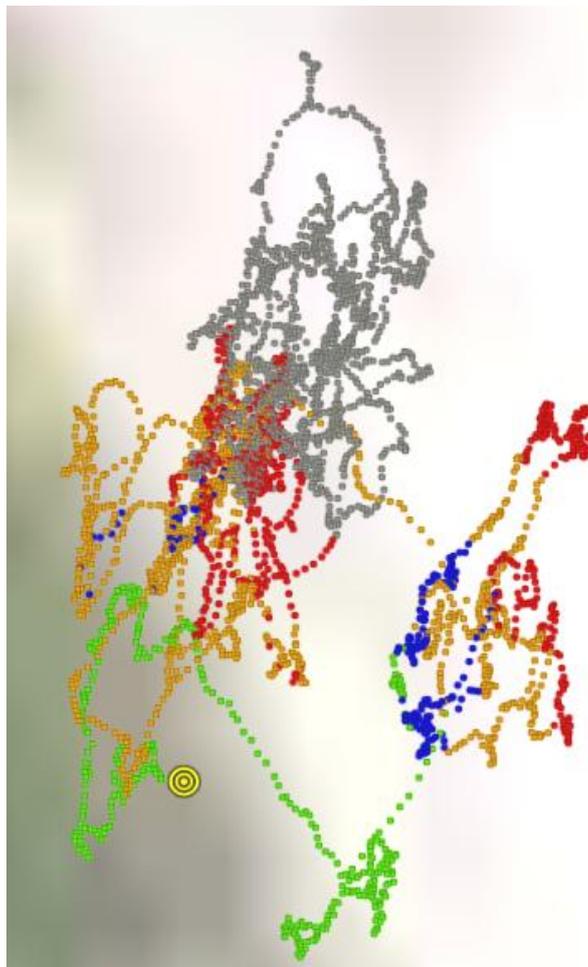


Abbildung 34: Stationärer Koordinatentest der Drohne mit selbstgerechneten Differenzen

Letztlich spielen die genannten Gründe für die Abweichungen in der praktischen Anwendung jedoch keine Rolle. Fakt ist, dass die ermittelten Koordinaten- und Höhenangaben mit äußerster Vorsicht betrachtet werden müssen. Aus dem DOP-Wert der Telemetriedaten können keine belastbaren Rückschlüsse auf die tatsächliche Lagegenauigkeit gezogen werden.

Auch auf die für die geplante Georeferenzierung der Luftbilder mittels der Telemetriedaten so wichtige Höhenangabe (Bildgröße) kann man sich nicht verlassen. Es muss davon ausgegangen werden, dass die absolute Lage der georeferenzierten Luftbilder nicht für die geplante Anwendung ausreichend ist. Aufgrund der Streuung der Messwerte muss auch die zu untersuchende relative Genauigkeit zwischen den verschiedenen Aufnahmen in Frage gestellt werden.

4.5 Kamerakalibrierung

Die oben beschriebenen Abweichungen der absoluten bzw. relativen Höhen haben natürlich direkten Einfluss auf die abgebildete Fläche der Aufnahmen. Je weiter (höher) die Kamera von einem Objekt entfernt ist, umso größer die abgebildete Fläche. Dies könnte also eine Erklärung für die Abweichung der tatsächlich dargestellten Fläche gegenüber der in mdCockpit ermittelten sein. Dennoch wurde es als notwendig erachtet, die relevanten Parameter Brennweite und Abbildungsfläche (Chipgröße) zu verifizieren. Die Recherchen hierzu verliefen parallel zu den aufgeführten Versuchen. Dabei ist aufgefallen, dass dies keineswegs eindeutig zu beantworten ist. Stutzig machte uns zunächst, dass die Brennweite vom Hersteller mit 5mm und nicht wie in der Regel mit 5,00mm angegeben wird. Dies könnte ein Hinweis auf eine gewisse Toleranz bedingt durch die Produktion der Kamera und der verwendeten Materialien sein. Beispielsweise werden bei Kameras des unteren Preissegmentes (wie die im Einsatz befindliche) häufig Kunststofflinsen und Objektive verwendet, die dementsprechend nicht temperaturbeständig sind und schon von daher ein gewisses Spiel haben. Luhmann (LUHMANN, 2011, S. 131 und S. 145) spricht hier von geringerer mechanischer Stabilität. Auch bezüglich der verwendeten Sensorgröße gab es unterschiedliche Angaben. (PENTAX, 2012) selbst gibt sie mit 1/2,3" (Zoll) an. Für die Berechnungen wird der Wert für Höhe und Breite aber im metrischen System benötigt. Microdrones hat in den Kameraspezifikationen den Wert von 6,8 x 5,1mm hinterlegt. Allerdings geben sie bei der Chipbezeichnung auch den Wert von 1/2,33" an, also eine Abweichung zur Herstellerangabe. Eine Internetrecherche ergab Angaben der

Sensordiagonalen von 6,9mm bis zu 7,7mm. Interessanterweise konnte oder wollte der Hersteller selbst zunächst keine genaueren Angaben zur Brennweite oder Sensorgröße machen.

Erst nach einigem E-Mail-Verkehr erhielten wir eine verbindliche Aussage, dass der Sensor der Kamera 6,16mm x 4,62mm groß ist, wobei auch der volle Sensor für die Abbildung verwendet wird. In mdCockpit wird also mit einer falschen Chipgröße gearbeitet.

Darüber hinaus stellte sich bei den Recherchen hierzu heraus, dass es keineswegs als sicher angesehen werden kann, dass die Aufnahmen verzerrungsfrei sind, da man davon ausgehen muss, dass auch die Bildebene (also der Sensor) nicht exakt eben sind. Zusammen mit den Kunststofflinsen führt das zu sogenannten Bilddeformationen, die es zu untersuchen gilt, weil sie natürlich auch Einfluss auf die Genauigkeit haben (LUHMANN, 2011, S. 159). Dies ist auch schon aus dem Grunde wichtig, als dass diese Verzerrungen nicht durch die Einpassung der Bilder über Passpunkte weder durch einen Helmert- noch durch einen affinen Transformationsansatz bereinigt werden können.

Luhmann beschreibt die Möglichkeit der sogenannten Testfeldkalibrierung (LUHMANN, 2011, S. 555). Wie es sich herausstellte, handelte es sich bei den hierfür notwendigen Untersuchungen um die aufwändigsten der gesamten Arbeit.

Auch bei der Kalibrierung macht man sich das Prinzip der zentralprojektiven Abbildung (siehe Abbildung 12) zunutze. Es ist im Grunde der gleiche Versuchsaufbau, wie er mit der Drohne durchgeführt werden soll. Jedoch wird hier versucht, die meisten Unbekannten auszuschalten bzw. die für eine korrekte Berechnung benötigten Voraussetzungen zu schaffen: Die Kamera (besser gesagt: die Abbildungsebene der Kamera) wird parallel zum Objekt aufgebaut. Bei dem Objekt selbst handelt es sich um eine mit einem Raster (bekannte Punkte) versehene ebene Wand. Es werden Aufnahmen in exakt bestimmten Abständen vorgenommen.

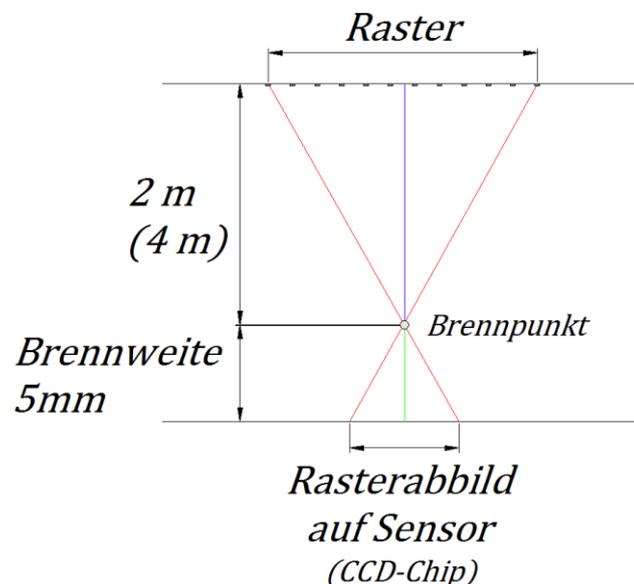


Abbildung 35: Schema der Kamerakalibrierung

Dabei sollte sich das Referenzraster gleichmäßig über das gesamte Bild verteilen, um eventuell vorhandene Bilddeformationen ermitteln zu können. Anschließend werden das Bildkoordinatensystem mit dem örtlichen Koordinatensystem verglichen und die Ergebnisse ausgewertet.

Zunächst wurde mit einem Tachymeter eine geeignete Wand mit einem Raster versehen. Die abzusteckenden Punkte wurden mittels Laser auf die Wand projiziert. Als Referenzpunkte wurden entsprechende Marken auf Klebeetiketten gedruckt und angebracht. Der Abstand zwischen den Punkten wurde auf 0,2m festgelegt, was bei einer beabsichtigten Entfernung von 2m zu einer ausreichenden Punktdichte führt. Für ein flächendeckendes Foto im Abstand von 4m reichte die zur Verfügung stehende Wand nicht aus. Das Raster ist insgesamt 2,6x2m groß und besteht aus 154 Referenzpunkten.



Abbildung 36: Absteckung des Testfeldes

Wie auch bei den Feldversuchen wurde das Testfeld nach der Vermarkung zur Kontrolle aufgemessen. Mit dem Tachymeter wurden ebenfalls Standpunkte für die Kamera im Abstand von 2m und 4m zur Wand bestimmt. Durch die zwei unterschiedlichen Entfernungen soll der Versuchsaufbau an sich geprüft werden. Sofern dies zutrifft, d.h. die Ergebnisse untereinander plausibel sind, dienen die Aufnahmen auch zur Steigerung der Genauigkeit der Aussagen. Ein großes Problem war die Positionierung der Kamera. Mit dem vorgesehenen Fotostativ war es nicht möglich, die Kamera lot- und waagrecht über dem Mittelpunkt der Parallele aufzubauen. Zudem war das Stativ zu leicht und verschob sich beim Versuch Änderungen an der Höhe oder der Ausrichtung vorzunehmen. Ein Vermessungsstativ steht zwar sehr stabil und kann auch mit Hilfe eines optischen Lots und einer Dosenlibelle im Dreifuß lotrecht und absolut waagrecht aufgebaut werden. Es verfügt jedoch über keine entsprechende Aufnahme für die

Kamera. Nach verschiedenen gescheiterten Versuchen blieb nichts anderes übrig als eine entsprechende Aufnahmevorrichtung produzieren zu lassen – siehe Abbildung 38.



Abbildung 37: Eine exakte Positionierung mit einem Fotostativ war nicht möglich.



Abbildung 38: Mit einer eigens hergestellten Halterung konnte die Kamera auf dem Dreifuß eines Vermessungsstativs aufgebaut werden.

Bei der Halterung handelt es sich um einen sogenannten Zeiss-Zapfen, der zentrisch mittels Klemmschraube auf dem Dreifuß befestigt wird. Im Vergleich zu anderen Aufnahme-

systemen hat das den Vorteil, dass die Kamera auch um das Zentrum gedreht werden kann um sie parallel zur Wand auszurichten. Dies geschah mittels Tachymeter, in dem links und rechts an der Kamera Punkte angemessen wurden. Zuvor wurde das Vermessungsinstrument mittig zur Wand aufgebaut und mittels Diagonalen geprüft. Iterativ wurde die Kamera solange gedreht und angemessen, bis sie parallel zur Wand ausgerichtet war. Somit war die Kamera in allen Lagen ausgerichtet. Natürlich wurde beim gesamten Prozess beachtet, dass das Projektionszentrum der Kamera nicht in der Mitte des Gehäuses liegt. Zur Verdeutlichung der Ausrichtung wurde eine Wasserwaage auf der Kamera angebracht (siehe Abbildung 39).



Abbildung 39: Ausrichtung der Kamera im Abstand von 2m zur Wand

Der Ablauf der Aufnahmen zur Kamerakalibrierung sah wie folgt aus: Die Kamera wurde angeschaltet, was das Ausfahren des Objektivs zur Folge hat. Anschließend wurde der Auslöser dreimal betätigt. Sodann wurde die Kamera wieder ausgeschaltet. Das Objektiv fährt zurück in die Ruheposition. Der Vorgang wurde 3 mal wiederholt. Mit dem mehrfachen Auslösen sollte überprüft werden, ob sich die Optik zwischen den Aufnahmen ändert. Aus gleichem Grund wurde auch die Kamera zwischen den Sätzen aus- und wieder eingeschaltet. So konnte geprüft werden, ob das Objektiv immer wieder die gleiche Stellung einnimmt. Dieser Aufbau wurde jeweils für den Abstand von 2m und 4m durchgeführt. Natürlich wurde bei den Aufnahmen darauf geachtet, dass der Zoom auf 1 stand und der Autofokus

ausgeschaltet war. Die Aufnahmen wurden bei Zimmertemperatur (22° C) durchgeführt. Betrachten wir zunächst eines der Bilder:

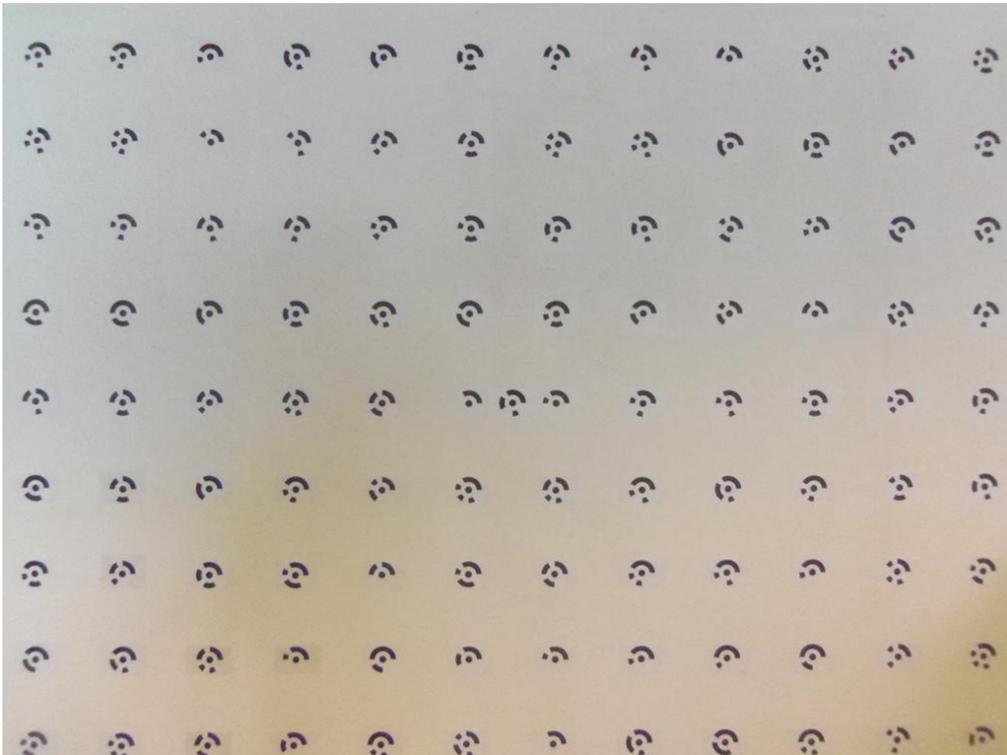


Abbildung 40: Kalibrierungsaufnahme aus einem Abstand von 2m /
erstes Bild im ersten Satz (2m_1_1)

Es fällt auf, dass die Bilder im Randbereich eine gewisse Unschärfe aufweisen. Diese ist am unteren Rand stärker ausgeprägt als oben, sowie rechts etwas stärker als links. Ein Abgreifen der Bildkoordinaten war dennoch ohne weiteres möglich.

Die Ermittlung der Bildkoordinaten der vorliegenden 18 Aufnahmen (2x3x3) wurde anschließend mit dem Programm Bildbearbeitungsprogramm GIMP vorgenommen. Hierfür wurde mit einem Zoomfaktor von 800% gearbeitet. Zusätzlich wurde ein Suchkreis eingerichtet, der in etwa dem Punkt im Zentrum der Bildmarke entsprach. Somit sollte sichergestellt werden, dass das Zentrum möglichst exakt bestimmt wird. Die Pixelkoordinaten wurden auf 1/10-Pixel genau erfasst.

Der Vergleich der Bildkoordinaten mit den örtlichen Koordinaten erfolgt mittels einer 2D-Helmert-Transformation. Sie funktioniert prinzipiell genauso wie die in Kapitel 3.2 beschriebenen 3D-Helmert-Transformation. Sie benötigt jedoch nur 4 Parameter (2 Translationen, 1 Rotation und 1 Maßstab). Dies ist möglich, da wir davon ausgehen, dass die Bildebene parallel zum Objekt ausgerichtet ist. Bild- und Objektfläche sind eben. Aufgrund der identischen Ausrichtung der beiden Systeme sollte die Rotation streng genommen den

Wert 0 haben. Für die Transformation wurde das Programm COSGeo, einer Vermessungsapplikation auf ACAD-Basis verwendet (COSGeo MANUAL, 2010).

Die bei der Transformation entstehenden Residuen (auch Restklaffen genannt), zeigen uns an, ob das Bild der Kamera verzerrt ist und wie stark diese Verzerrung an jedem Passpunkt ausfällt:

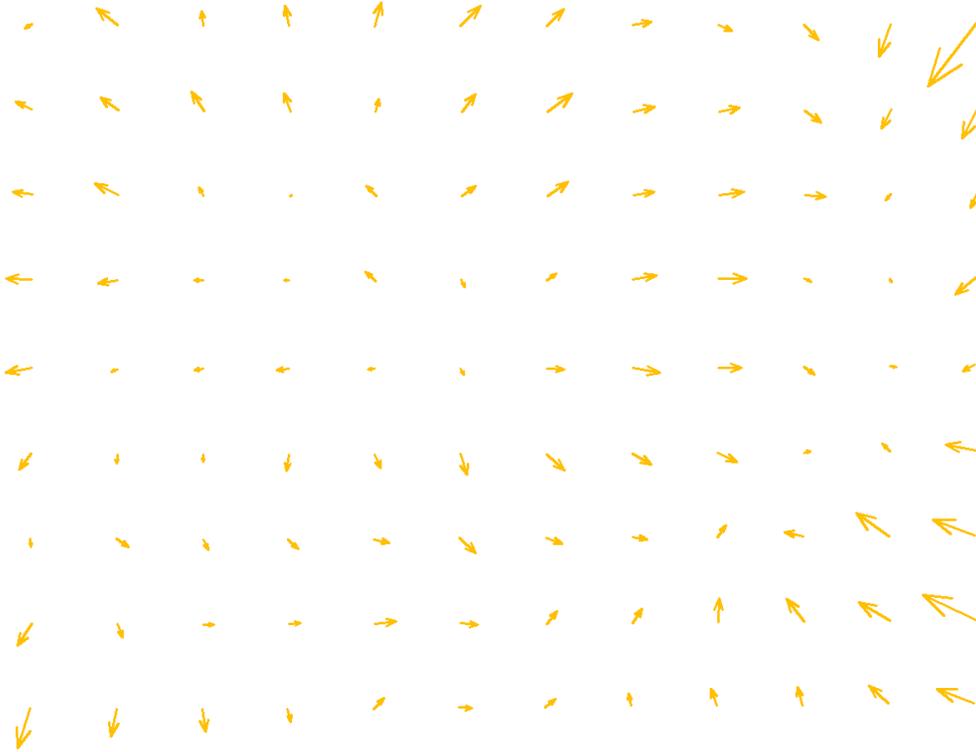


Abbildung 41: Visualisierte Residuen für Bild 2m_1_1

In Abbildung 41 wurden die Residuen visualisiert. Um Stärke und Richtung der Verzerrung besser darstellen zu können wurden die Restklaffenvektoren 20-fach überhöht. Es ist zu erkennen, dass es zwei Bereiche gibt, die eine geringere Verzerrung aufweisen. Um den Gesamteindruck nicht zu stören, wurde auf eine Markierung der Bereiche verzichtet. Die Verzerrungen gehen in alle Richtungen. Sie weisen aber von dem einen verzerrungsarmen, linken Bereich weg, während sie zum rechten Bereich eher hinweisen. Die Verzerrungen sind in den vorher beschriebenen unscharfen Bereichen stärker ausgeprägt. Die Darstellung im Zentrum des Bildes ist weniger verzerrt als der Randbereich.

In Tabelle 3 werden die Transformationsergebnisse von 3 der 18 Aufnahmen gegenübergestellt. Es handelt sich dabei um das erste Bild im ersten Satz und das letzte Bild im dritten Satz aus 2m Entfernung, sowie das erste Bild im ersten Satz aus 4m Entfernung. Wie erwartet, ist der Drehwinkel in allen drei Fällen sehr gering, was auf einen guten Versuchsaufbau hindeutet. Die Achsen des SOLL-Systems (Kamera) und des IST-Systems (Wand) waren sehr gut parallel ausgerichtet. Anhand der angeführten Beispiele mit dem

Abstand von 2m lässt sich erkennen, dass die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist: Drehwinkel, Maßstabsfaktor und auch der mittlere Punktfehler sind nahezu identisch. Der mittlere Punktfehler aller 3 Beispiele liegt nur 6/10 mm auseinander. Auch der Maßstabsfaktor ist plausibel; für den Abstand von 4m ist er doppelt so groß als für den Abstand von 2m. Bei Werten kleiner als 1 bedeutet das, dass das 4m-Bild weniger stark verkleinert werden muss als das 2m-Bild um auf die Örtlichkeit zu passen. Dieser etwas ungewöhnliche Sachverhalt liegt in der Tatsache begründet, dass das Referenzraster in einem örtlichen System im Wertebereich von 10/10 bis 13/12 m liegt, während das Bildkoordinatensystem von 0/0 bis 4.288/3.216 geht - also ungleich höher. Da wir ohne Arbeitseinheiten rechnen, ist das Bild bei der Transformation faktisch größer als das Original.

Parameter	2m_1_1	2m_3_3	4m_1_1
Identische Punkte	108	108	154
Drehwinkel	0,16288562°	0,16869464°	0,08940528°
Maßstabsfaktor	0,00054819	0,00054718	0,00109970
Mittlerer Punktfehler	0,0026m	0,0032m	0,0030m
Max. Punktfehler	0,009280086m	0,00736889m	0,011402193m
Min. Punktfehler	0,000200000m	0,00000064m	0,000412311m

Tabelle 3: Übersicht über die Transformationsergebnisse



Abbildung 42: Visualisierte Residuen für Bild 2m_1_1 (Montage)
(grün = geringere Verzerrung; rot = stärkere Verzerrung)

Abbildung 42 zeigt die ermittelten Verzerrungen sehr anschaulich. Hierfür wurde die Länge der Restklaffenvektoren (= Stärke der Verzerrung) als Höhenwert für ein digitales

Geländemodell verwendet. Anschließend wurde eine orographische Darstellung des Geländemodells gewählt und über das eigentliche Bild geschoben. Die Richtung der Verzerrung geht dabei allerdings verloren (vergleiche hierzu Abbildung 41).

Für die Analyse der Verzerrung können nur die Bilder im 2m Abstand herangezogen werden, da nur hier der gesamte Bildbereich mit Passpunkten abgedeckt ist. Der mittlere Punktfehler lag hier bei 0,0029 m. Die Varianz reichte dabei von 0,0026m bis 0,0032m, wobei zwischen den Aufnahmen keine lineare Veränderung des Punktfehlers ermittelt werden konnte. Die Werte bleiben also relativ konstant, was auf eine gewisse Stabilität des Objektivs hinweist. Auch bei der Testreihe im Abstand von 4m war die Varianz des mittleren Punktfehlers gering. Das Ergebnis war besser als erwartet. Der mittlere Punktfehler und damit die Verzerrung des Bildes sind also in der Kamera begründet und können somit linear bezogen auf den Objektabstand ermittelt werden. Bei einer Flughöhe von 35m würde die mittlere Verzerrung also etwa 0,051m ($0,0029 / 2m \times 35m$) betragen. Allerdings ist der mittlere Punktfehler nur ein Näherungswert. Für unsere Untersuchung und damit für die Praxis darf der maximale Fehler nicht außer Acht gelassen werden, denn wie in Abbildung 41 erkennbar, liegt keine homogene Verteilung der Verzerrung vor. Der maximale Punktfehler aller 2m-Aufnahmen beträgt 0,00929, was bei 35m Flughöhe schon zu einer Verzerrung von 0,163m führen würde. Damit bewegen wir uns schon ein gutes Stück auf unsere selbstgesteckte Grenze von 0,30m zu.

Der mittlere Punktfehler von 0,003m bei den 4m Bildern stellt keinen Widerspruch zum Ansatz der linearen Extrapolation der Verzerrung auf die Flughöhe dar. Dem Ansatz nach müsste der mittlere Punktfehler etwa bei 0,0052 liegen, also doppelt so hoch wie bei einer Entfernung von 2m.

Bei der Berechnung dieser mittleren Punktfehler wurde jedoch nicht die gesamte Bildfläche herangezogen. Das Raster deckte nur etwa 25% der Bildfläche (jeweils die Hälfte der Streckenausdehnung) ab. Das Raster liegt in der Bildmitte und damit in dem Bereich, der geringeren Verzerrungen unterliegt, wie in Abbildung 41 zu erkennen ist. Dadurch wird der mittlere Punktfehler positiv beeinflusst.

Brennweite:

Nehmen wir uns nun noch einmal die Formel für die zentral projektive Abbildung vor:

$$m_b = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'}$$

Wie bereits bekannt, funktioniert diese nur bei Senkrechtaufnahmen, wie sie bei den Aufnahmen der Kamerakalibrierung vorliegen. Folgende Informationen stehen nun gesichert zur Verfügung, bzw. können ermittelt werden:

Sensorgröße:	6,16 x 4,62 mm
Auflösung Sensor:	4288 x 3216 Pixel
Abstand zum Objekt (h):	2m bzw. 4m
Objektgröße (X):	beliebige Strecke zwischen zwei Referenzpunkten
Abbildungsgröße (x'):	indirekt ermittelt über Anzahl der Pixel der Strecke im Bild

Was fehlt, ist eine gesicherte Aussage zur Brennweite, die sodann ermittelt werden kann. Es wird errechnet, wie groß ein Pixel auf dem Sensor ist. Dies ist die Basisgröße für die weiteren Berechnungen:

$$6,16 \text{ mm} / 4288 \text{ px} = 0,001436567164179 \text{ mm/px}$$

$$4,62 \text{ mm} / 3216 \text{ px} = 0,001436567164179 \text{ mm/px}$$

Jetzt kann eine beliebige Strecke an der Wand bestimmt und gemessen werden, beispielsweise 0,201m. Im Bild wird nun die Anzahl der Pixel für diese Strecke ermittelt: 369 px

Teilt man diese beiden Werte, erhält man das Naturmaß für ein Pixel bei einem Anstand von 2m: $0,201 / 369 = 0,00054472 \text{ m}$.

Nun hat man ein bekanntes Naturmaß (X), Bildmaß (x') und den Abstand zum Brennpunkt (h). Es ist also möglich die Brennweite (c) zu ermitteln:

$$c = \frac{h}{X} \times x'$$

oder

$$c = \frac{2 \text{ m}}{0,00054472 \text{ m}} \times 0,001436567164179 \text{ mm} = 5,27456003564268 \text{ mm}$$

Um das Ergebnis zu verifizieren, wurden die Kalibrierungsaufnahmen ausgewertet. Hierfür wurden gleichmäßig auf dem Bild verteilt, Strecken aus den Kalibrierungs-

aufnahmen bestimmt. Dabei wurde darauf geachtet, dass sowohl Längs- als auch Querstrecken bestimmt wurden, siehe hierzu auch Abbildung 43.

Tabelle 4 beschreibt beispielhaft zwei Auswertungen:

Brennweite ermittelt aus 2m Abstand			Brennweite ermittelt aus 4m Abstand		
Meß-strecke	Bild / (Naturmaß/Pixel in Abbild)	errechnete Brennweite	Meß -strecke	Bild / (Naturmaß/Pixel in Abbild)	errechnete Brennweite
m	2m_1_1/ (0,201/369px)	5,27456004	m	4m_1_1/ (0,201/184px)	5,26026584
lo	2m_1_1/ (0,200/366px)	5,25783582	lo	4m_1_1/ (0,204/185px)	5,21107697
ro	2m_1_1/ (0,198/360px)	5,22388060	ro	4m_1_1/ (0,197/178px)	5,19206000
ru	2m_1_1/ (0,200/363px)	5,21473881	ru	4m_1_1/ (0,215/194px)	5,18500521
lu	2m_1_1/ (0,200/369px)	5,30093284	lu	4m_1_1/ (0,204/185px)	5,21107697
slo	2m_1_1/ (0,200/364px)	5,22910448	lm	4m_1_1/ (0,202/183px)	5,21431210
sro	2m_1_1/ (0,197/361px)	5,26498220	om	4m_1_1/ (0,201/184px)	5,26026584
sru	2m_1_1/ (0,198/363px)	5,26741294	rm	4m_1_1/ (0,206/186px)	5,19116795
slu	2m_1_1/ (0,201/365px)	5,21738323	um	4m_1_1/ (0,200/181px)	5,20037313
			slo	4m_1_1/ (0,200/182px)	5,22910448
			sru	4m_1_1/ (0,198/180px)	5,22388060
			slu	4m_1_1/ (0,201/183px)	5,23167743
			sro	4m_1_1/ (0,197/179px)	5,22122888

Tabelle 4: Beispiel zur Analyse der Brennweite

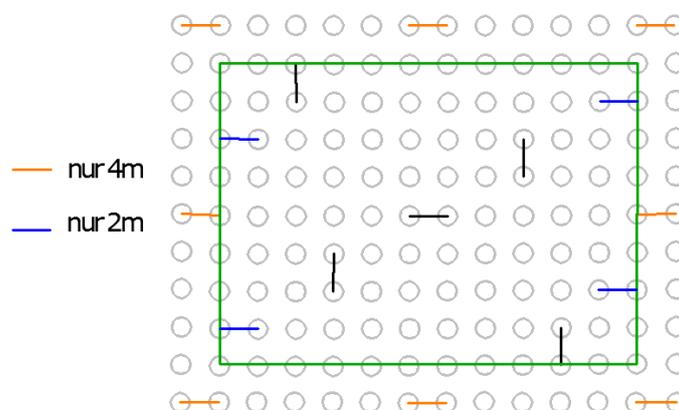


Abbildung 43: Messstrecken zur Brennweitenbestimmung

Natürlich spielt bei der Ermittlung der Brennweite auf diesem Weg auch die Verzerrung der Bilder eine Rolle. Die mittlere Brennweite, ermittelt aus allen Messungen aller 18 Aufnahmen, beträgt 5,23mm. Verwendet man nur die in der Mitte gemessene Strecke beträgt die Brennweite 5,27mm. Ermittelt man den Brennwert nur unter Verwendung der mittleren (in Abbildung 43 schwarz eingetragenen) Kontrollstrecken, die also im verzerrungsärmeren Bereich liegen, erhält man den Wert 5,25mm. Die Streckendifferenz zwischen 5,23mm und 5,27mm bei einer Aufnahmehöhe von 35m beträgt 0,0029m.

Für die weiteren Untersuchungen wurde die Brennweite von 5,25mm verwendet.

Abschließend lässt sich aber sagen, dass man auch hier Abstriche bei der Genauigkeit machen muss. Unter Verwendung des Brennwertes von 5 (,00)mm wäre ein korrektes Arbeiten nicht möglich. Die Differenz zur verwendeten Brennweite beträgt bei 35m Flughöhe 0,19m.

Während der beschriebenen innerhäusigen Untersuchungen wurden natürlich weitere Testflüge unternommen. Die Erkenntnisse bei der Ausrichtung der Kamera sowie der Belichtungseinstellungen wurden in der Praxis getestet und erbrachten eine wesentliche Verbesserung der Bildqualität und Ausrichtung, auf die im nächsten Abschnitt nochmal ausführlich eingegangen wird. Eine dieser Aufnahmen wurde herangezogen, um die gemachten Erkenntnisse bezüglich Brennweite zu testen.



Abbildung 44: Verbesserte Ergebnisse bei den Testflügen

Mit dem Bildbearbeitungsprogramm Gimp wurde die Anzahl der Pixel zwischen zwei Passpunkten ermittelt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die verwendete Strecke möglichst in der Mitte des Bildes lag, um den größten Verzerrungen aus dem Weg zu gehen. Anschließend wurde unter zusätzlicher Verwendung der „Höhe über Grund“ des UAV und der Brennweite die Naturstrecke aus dem Bild ermittelt.

Die Differenz zum tatsächlichen Naturmaß beträgt 0,79m. Nachdem wir diesen Wert aber kennen und den Ergebnissen unserer Untersuchungen vertrauen, wurde in einer Umkehrrechnung die Höhe über Grund ermittelt. Sie wich um 2,56m von der UAV-Höhe ab, was sich mit den Erkenntnissen aus dem stationären Drohmentest deckt. Auch hier läuft alles darauf hinaus, die tatsächliche exakte Lage des UAV zu bestimmen.

4.6 Positionsbestimmung des UAV mit Tachymetertracking

Die beschriebenen Untersuchungen zogen sich über einige Wochen hin. Während des gesamten Zeitraums wurden weitere Testflüge unternommen. Wie Abbildung 44 zeigt, konnten hier wesentliche Fortschritte erzielt werden, so dass die Luftbilder an sich die benötigte Qualität aufweisen. Auch die Flugroute als solche, die Kameraausrichtung und die Kameraeinstellungen standen fest und man konnte die geplanten Untersuchungen mittels Tachymetertracking angehen. Zwischenzeitlich mussten immer wieder Referenzpunkte des Rasters neu hergestellt werden, bzw. die Luftbildmarken ausgetauscht werden, da sie Vandalismus zum Opfer fielen.

Es gab zwar nur wenig Kontakt mit der Bevölkerung, aber bei Schlagworten wie „Drohne“, „Luftbilder“ usw. reagierten die Passanten eher unsicher bis hin zu offen ablehnend und auch der Verweis auf die Wissenschaft konnte sie hier offensichtlich nicht beruhigen. Dies ist ebenfalls durchaus eine, wenn auch im Vorfeld nicht geplante, Erkenntnis der Arbeit.

Zudem machte auch die Natur von ihrem Recht Gebrauch und drohte damit, die Luftmarken zu überwuchern. Dem wurde vorsichtig mit dem Freischneider entgegengewirkt.

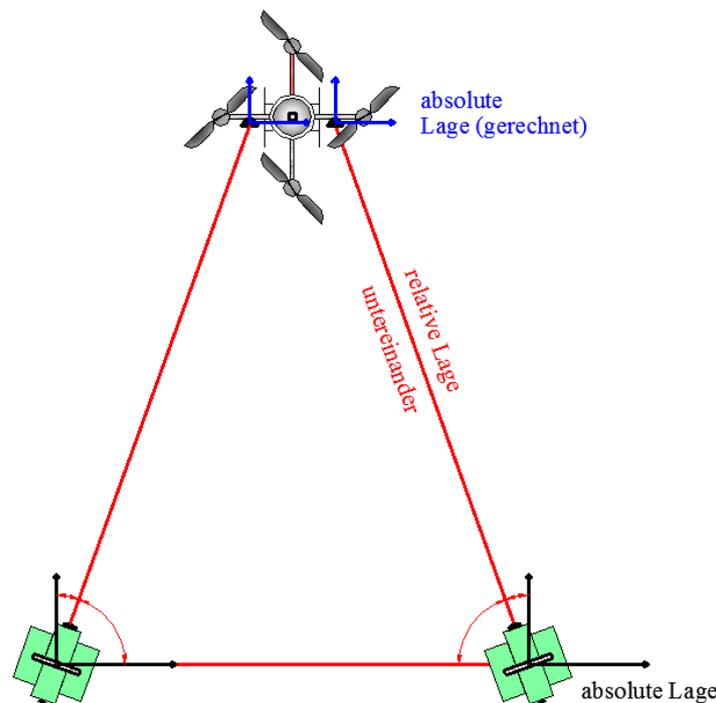


Abbildung 45: Schemaskizze zum Tachymetertracking

Das Grundprinzip des Tachymetertracking baut darauf auf, die relative Position eines sich bewegenden Objektes in Bezug auf eine Basisstation (Tachymeter) zu erfassen. Diese Basisstation ist im verwendeten Koordinatensystem in Lage und Höhe orientiert. Aus den

relativen Werten, also Richtungswinkel (Zenit- und Horizontalwinkel) und Entfernung, kann anschließend die absolute Orientierung der Drohne errechnet werden. Im hier beschriebenen Fall wird das UAV an gleich zwei Stellen angemessen. Dies erfolgt zum Einen, um die Lage doppelt zu bestimmen, also eine Kontrollmaßnahme. Zum Anderen kann damit auch der Richtungswinkel der Drohne bestimmt werden, so dass wir Lage, Höhe und Richtung mit den Telemetriedaten vergleichen können. Hierfür müssen die beiden Messungen jedoch synchron erfolgen, da die beiden angemessenen Punkte keinen Bezug zueinander haben, wenn sich die Drohne zwischen den beiden Messungen bewegt. Außerdem ist nicht die Lage der beiden angemessenen Reflektoren entscheidend, sondern die Position der Kamera zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahme. Dies hat zur Folge, dass die Messungen mit der Aufnahme synchronisiert sein müssen und außerdem die relative Position der Reflektoren zum GPS-Chip (für einen direkten Koordinatenvergleich) und zur Kamera bekannt sein muss (zur Ermittlung der korrekten Höhe über Grund). Es bringt auch nichts, wie beim Tracking üblich, ständig die Positionen zu speichern, da man in diesem Fall eine Flut von Messpunkten hätte und man nicht in der Lage wäre a) die beiden zusammengehörenden Messungen zu erkennen und b) die Positionen zu ermitteln, an denen das Luftbild aufgenommen wurde. Es wurde daher so vorgegangen, dass die Tachymeter zwar ständig die Position der Drohne ermitteln, jedoch nur auf Knopfdruck speichern.

Um das Verfolgen der Drohne mit dem Tachymeter überhaupt zu ermöglichen, mussten zunächst geeignete Zielmarken sowie eine Möglichkeit gefunden werden, diese an der Drohne anzubringen. Zu erwähnen sind hier die Untersuchungen von Sebastian Siebert (SIEBERT, 2008, S. 42), der verschiedene Möglichkeiten getestet hat. Allerdings untersuchte er lediglich die Möglichkeiten des reinen Trackings ohne Luftbildaufnahmen. Aus diesem Grund konnte er die von ihm eingesetzten Reflektoren / Zielmarken zentrisch unterhalb der Drohne anbringen. Dies ist in unserem Fall nicht möglich, da sich hier die Kamera befindet.

Für die Überlegungen dieser Arbeit ist es notwendig, die Positionsdaten zu bestimmen und die direkten Auswirkungen auf das Ergebnis, sprich die Luftbilder, zu untersuchen. Das wesentliche Problem dabei besteht im Gewicht. Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben beträgt die empfohlene Zuladung 200g. Die Kamera mit der dazugehörigen Halterung wiegt 172g; es stehen also nur noch 23g für die Reflektoren zur Verfügung. Die Überschreitung der Zuladungsgrenze führt zu Haftungsausschluss seitens des Herstellers und somit auch letztlich zum Verlust des Versicherungsschutzes, da das Fluggerät „manipuliert“ wurde. Außerdem

werden auch Flugeigenschaften und die Laufleistung des Akkus vom Zusatzgewicht beeinflusst.



Abbildung 46: Versuche mit Reflektormarken

Zunächst wurden Versuche mit Reflektormarken durchgeführt. Sie haben den Vorteil, dass sie nur sehr wenig wiegen (ca. 1g). Als Halterung dienen Alubleche, die entsprechend zugeschnitten wurden. Sie haben neben einem geringen Gewicht auch den Vorteil, dass sie gebogen werden können, um sie in 35 m Höhe gut anzielen zu können. Die Reflektoren wurden unmittelbar an der Kamerahalterung angebracht, da nicht die Position des UAV, sondern die der Kamera entscheidend ist.

Die Tests verliefen allerdings nicht befriedigend. Das von den Reflektoren zurückgeworfene Signal ist zu schwach mit der Folge, dass die Positionsbestimmung durch das Tachymeter zu lange dauert. Bewegt sich die Drohne abrupt z.B. durch einen Windstoß oder dreht sich ein wenig, geht das Signal verloren und die Drohne wird nicht mehr verfolgt. Das Ergebnis entspricht auch den Erfahrungen, die Siebert in seiner Arbeit gemacht hat. Auch wenn hier neuere Tachymeter zum Einsatz kamen, war keine Verbesserung festzustellen. Die Reflektoren sind für die Praxis ungeeignet.

Alternativ muss also zwangsläufig auf Prismen zurückgegriffen werden. Laut Herstellerangaben (vgl. Kapitel 3.2) ist hier bis zu einer Distanz von 800m das Arbeiten ohne Qualitätsverlust möglich. Die kleinsten zur verfügbaren Prismen wiegen jeweils 34g (inkl. Aluhalterung) sodass wir gemeinsam mit Kamera und Halterung auf eine Gesamtzuladung von 240g kommen.

Neben dem Verlust der Haftung ergeben sich daraus eine Reihe weiterer Probleme, die bei den Untersuchungen berücksichtigt werden mussten:



Abbildung 47: Miniprisma mit flexibler Alu-Halterung

- Die Drohne verbraucht spürbar mehr Energie, die Berechnung der Akkulaufleistung geht aber immer nur von 200g Zuladung aus. Es ist also nicht klar, wie lange der Akku durchhält.
- Die Prismenhalterung muss so formstabil sein, dass sie sich während des Fluges nicht aufgrund des höheren Gewichts verändert. Hierfür wird das Aluminium doppelt genommen und entsprechende Tests durchgeführt, die erfolgreich verliefen.
- Ein Anbringen der Prismen an den beweglichen Teil der Kamerahalterung (wie bei den Reflektormarken, Abbildung 46) ist nicht möglich: Während entsprechenden Tests ging der Servermotor kaputt. Es ist nicht auszuschließen, dass das einseitige Zusatzgewicht den Schaden verursacht hat.

Die Prismen werden somit an den Armen der Drohne befestigt. Die geplante Ermittlung der Kameralage zum Zeitpunkt der Aufnahme ist somit nicht mehr möglich. Um die Abweichung der Kamera von der Senkrechten dennoch untersuchen zu können, soll alternativ eine 3D-Helmert-Transformation durchgeführt werden.

Ablauf

Zunächst werden rund um die festgelegten Tachymeterstandpunkte Punkte mit dem GNSS-Empfänger in Lage und Höhe bestimmt. Die Genauigkeit dieser Punkte beträgt 2cm in der Lage und 3cm in der Höhe. Anschließend werden die Standpunkte über eine sogenannte „Freie Stationierung“ bestimmt. Hierdurch erreicht man eine Ausgleichung der Standpunkte untereinander, was zu einer Steigerung der Genauigkeit führt.

Die Prismen werden mit stark haftendem, doppelseitigem Klebeband am UAV befestigt. Die Standpunkte der Tachymeter sind so gewählt, dass sie möglichst weit auseinander stehen, die

beiden Miniprismen werden dementsprechend ausgerichtet. Damit soll verhindert werden, dass ein Prisma in den Suchbereich beider Tachymeter gelangt und somit ein Punkt doppelt und der andere gar nicht bestimmt wird. Jedes Prisma wird jeweils von einem Tachymeter überwacht. Auch der notwendige Neigungswinkel der Prismen in Abhängigkeit von Flughöhe und Entfernung muss berücksichtigt werden – eine zu schwache Reflektion hat den Verlust des Trackings zur Folge.



Abbildung 48: Standpunktbestimmung und Anbringen der Miniprismen

Bevor das Tracking gestartet wird, müssen die Prismen jeweils einmal angezielt werden, da ein automatisches Suchen zu zeitaufwändig wäre. Aus diesem Grund wurde die Route so geplant, dass die Drohne etwa 90 Sekunden über dem ersten Punkt verharrt. Auch bei den nächsten Wegpunkten wurde die Verweildauer etwas erhöht um beim synchronen Auslösen der Messung und der Kamera etwas Zeit zu haben - auch für den Fall, dass ein Tachymeter ein Prisma „verliert“. Um dieser Verlängerung und auch der verkürzten Akkulaufzeit aufgrund des Übergewichts Rechnung zu tragen, wurde die Route in insgesamt 3 Teile aufgeteilt, um in jedem Fall genug Akkuleistung zur Verfügung zu haben. Die Kameraauslösung wurde auf manuell eingestellt und erfolgt mittels der RC-Fernbedienung. Aufgrund der Erkenntnisse zur (für unsere Zwecke) schlechten Qualität des Geländemodells (siehe Kapitel 3.1.5) wurde die absolute Flughöhe der Drohne berechnet, indem auf die tatsächliche Bodenhöhe, mit GNSS-Empfänger gemessen, 35m addiert wurde. Die Synchronisation als solche wird über Sprechfunk organisiert, indem vor dem Auslösen von drei herunter gezählt wird. Ansonsten wird mit der gleichen Routenführung geflogen, wie sie sich bei den vorhergegangenen Tests bewährt hat.

Das Wetter an diesem Tag war regnerisch, aber windstill - die wichtigste Voraussetzung.

Die Flüge, das Tracking und die Synchronisation verlief wie geplant, lediglich bei Route zwei gab es Schwierigkeiten mit der Kameraausrichtung, was aber auf eine fehlerhafte Planung zurückzuführen war. Zwischen den einzelnen Flügen wurde die Drohne jeweils manuell gelandet und die nächste Route wurde mittels Datenkabel übertragen.

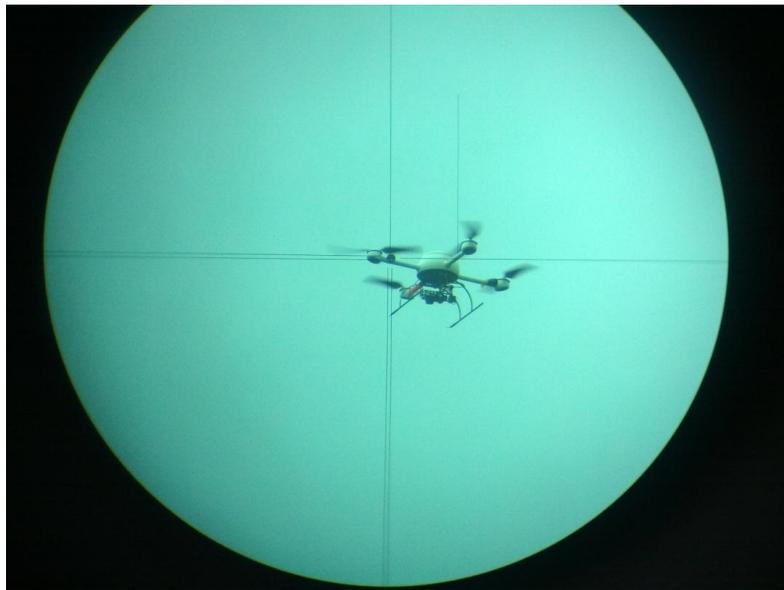


Abbildung 49: Tachymetertracking, Aufnahme durch das Okular; das Fadenkreuz ist im Zentrum des Prismas

Im Anschluss wurde die Drohne sofort auf einem Tisch aufgebaut. Mit dem Tachymeter wurden die Prismen, der GPS-Chip am Kopf der Drohne, sowie die Abbildungsebene der Kamera vermessen. Wie bereits beschrieben, sollen damit die Differenz zwischen GPS-Chip zur Kamera, sowie der vom Tracking ermittelten Punkte zur Kamera ermittelt werden. Außerdem dient der Abstand der beiden Prismen der Kontrolle der Aufnahme: Ist die Strecke während der Flüge identisch mit der in Ruhe ermittelten Strecke, ist davon auszugehen, dass die Messungen möglichst synchron erfolgte. Die exakte Lage der Abbildungsebene in der Kamera ist leider nicht bekannt und der Hersteller macht hierzu, auch auf Rückfrage, keine Angaben, außer, dass der Chip zentrisch hinter der Linse ist. Bei einer Tiefe von 21mm erscheint es vertretbar, die Mitte der Kamera zu verwenden.

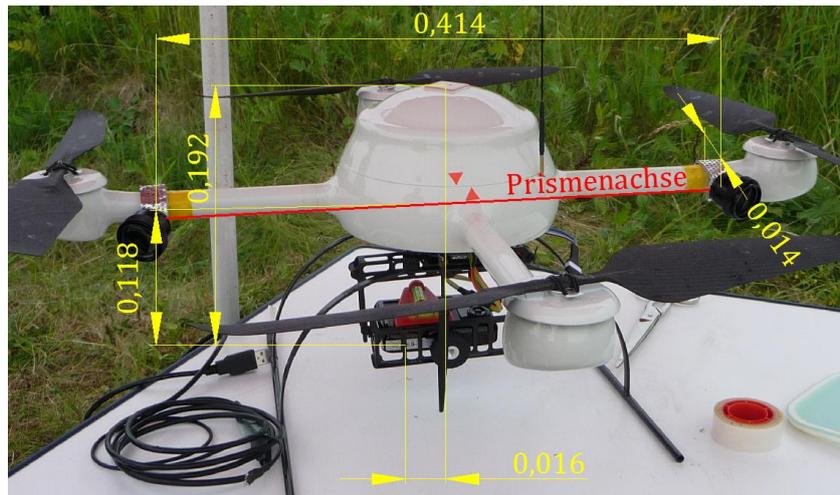


Abbildung 50: Aufmaß Drohne

Die Lageverschiebung zwischen GPS-Chip und Abbildungsmittelpunkt von 0,016m sowie der Prismaachse und dem GPS-Chip von 0,014m kann, gerade auch im Hinblick auf die bisherigen Erkenntnisse, fast vernachlässigt werden. Greift man das Beispiel am Ende von Kapitel 4.4 nochmal auf, führt die Anpassung der Höhe über Grund von 0,192 m, bei einer (GPS-) Flughöhe von 35m, zu einer Streckenveränderung von ca. 0,07m. Für die weiterführenden Untersuchungen werden alle genannten Werte weiterverwendet. Anschließend wurden die Daten analysiert, nachdem die Lagekorrekturen entsprechend Abbildung 50 berücksichtigt wurden. In den Telemetriedaten werden die Datensätze zum Zeitpunkt einer Aufnahme gesondert markiert und können separat ausgegeben werden. Wie in Abbildung 50 ersichtlich, beträgt der Abstand zwischen den Prismen 0,414m. Eine Abweichung von diesem Wert ist ein Hinweis auf asynchrones Anmessen der Punkte, was die Qualität der erhobenen Daten negativ beeinflusst. Bei der Analyse werden die Werte von Ausreißern (Abweichung $>0,04\text{m}$) von der Analyse ausgeschlossen. 5 Messungen waren betroffen. Für die Analyse wurden die Koordinaten der Drohne mit Hilfe des Transformationssatzes des GNSS-Empfängers nach Gauß-Krüger transformiert. Siehe Anhang 6.

Betrachten wir zunächst die ermittelten Werte:

	MITTEL [m]	MAX [m]	MIN [m]
Lageabweichung SOLL / IST-Tracking	1,380	5,270	0,141
Lageabweichung IST-Drohne / IST-Tracking	1,131	4,786	0,159
Lageabweichung SOLL / IST-Drohne	0,928	2,537	0,189
Höhenabweichung IST-Tracking / IST-Drohne	4,025	4,928	3,154
Höhenabweichung über Grund IST-Tracking / IST-Drohne	0,702	1,742	0,041
Abweichung Geländehöhe SOLL / IST-Drohne (SRTM1)	3,406	3,765	2,988
Abweichung 3D IST-Tracking / IST-Drohne	4,376	5,947	3,446

Tabelle 5: Auswertung des Tachymetertrackings

Vergleicht man die tatsächliche Bodenhöhe, gemessen bei der Aufnahme des abgesteckten Rasters, mit der Bodenhöhe der Drohne aus mdCockpit, erkennt man eine durchschnittliche Abweichung von etwa 3,50 Metern. Der Wert bestätigt die Aussagen zur Qualität des SRTM1-Geländemodells aus Kapitel 3.1.5. Das im Vergleich dazu die „Höhenabweichung über Grund“ deutlich weniger differiert, liegt an unserer Vorgabe der Flughöhe unter Verwendung der tatsächlichen Bodenhöhe und der absoluten Höhenvorgabe in mdCockpit. Nun erscheint es zunächst verwunderlich, warum die ermittelte „Höhenabweichung IST-Tracking / IST-Drohne“ mit einem Mittel von 4 m so stark von den Differenzen bei der „Höhe über Grund“ abweicht. Die Lösung liegt darin, dass sich dieser Wert grundsätzlich auf die Geländehöhen der SRTM1-Daten bezieht. Addiert man die „Abweichung der Bodenhöhe“ und die „Höhenabweichung über Grund“ kommt man exakt auf die „Höhenabweichung“!

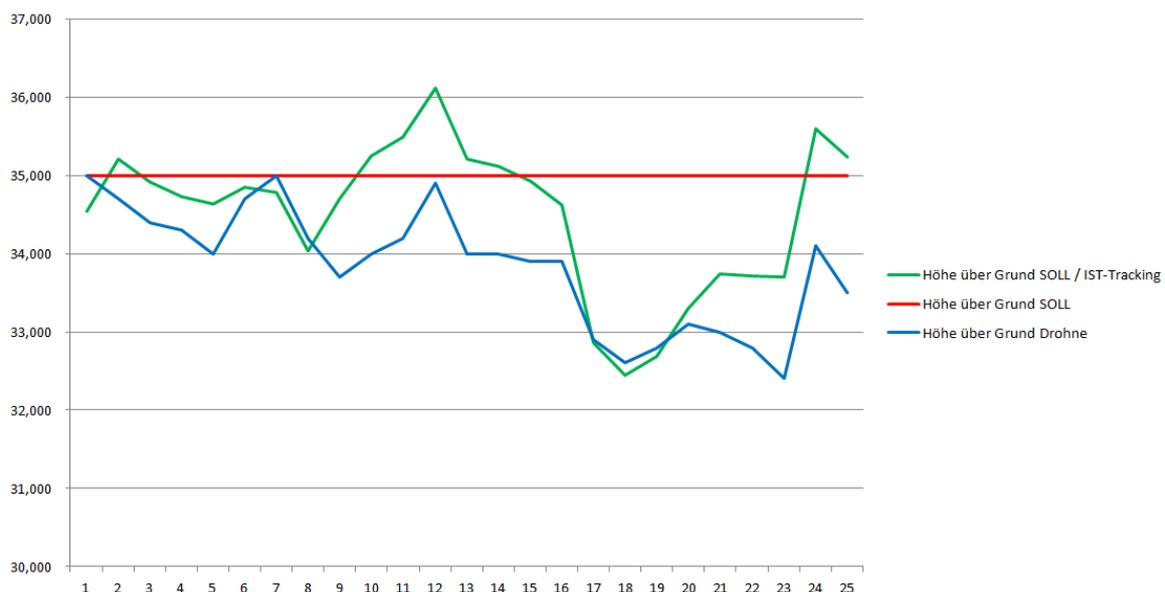


Diagramm 1: Analyse „Höhe über Grund“

Die von der Drohne ermittelte „Höhe über Grund“ kann also nicht für die Georeferenzierung der Luftbilder herangezogen werden. Dass die Werte dabei im Mittel nur 0,74m vom tatsächlichen Wert abweichen, liegt daran, dass sich die schlechten Geländedaten und die schlechten Höhenangaben größtenteils neutralisieren! Die absoluten Abweichungen der Höhe von 4,72m im Mittel bestätigen die Erkenntnisse der stationären Tests (vgl. Kapitel 4.4).

Bei der Lageabweichung ergibt sich ein interessantes Bild. Vergleicht man die SOLL-Lage mit der tatsächlichen Lage (IST-Tracking), so ist das Ergebnis mit einem Mittel von 1,38m nur unwesentlich besser als beim stationären Test, deren Mittel bei etwa 1,53m lag. Die fehlenden Daten des Beschleunigungssensors spielen offensichtlich keine so große Rolle wie gedacht bzw. das INS funktioniert auch bei Stillstand der Drohne korrekt.

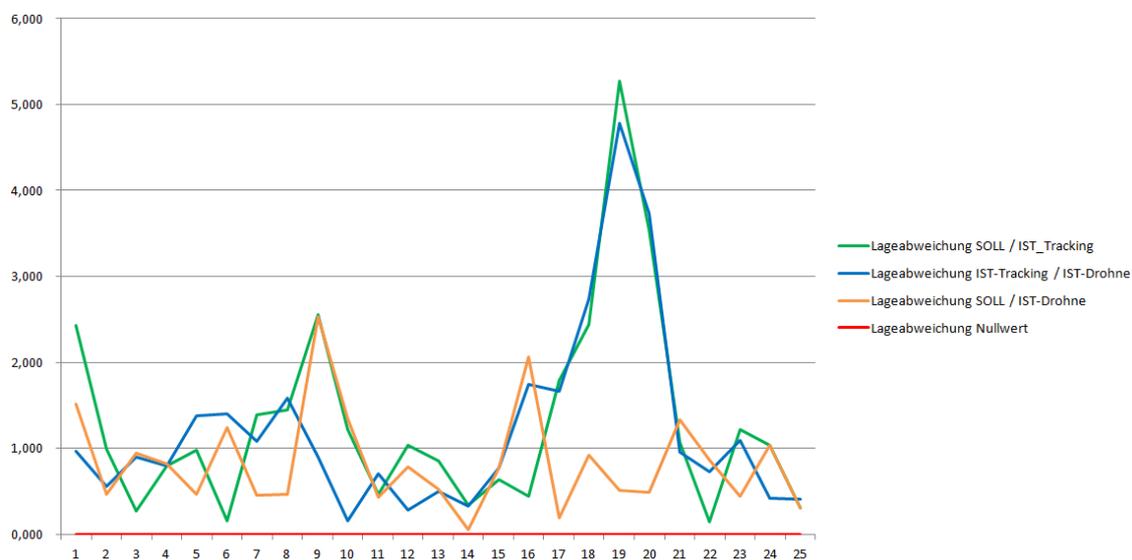


Diagramm 2: Analyse „Lageabweichung“

Nicht ganz klar ist der Ursprung der Differenzen zwischen der SOLL-Lage und den ermittelten Positionen der Drohne selbst (IST-Drohne). Die Werte müssten eigentlich gegen Null gehen, da die Drohne die in der Route vorgegebenen Werte anfliegen soll und anschließend die geplanten Aufgaben, in unserem Fall Luftbildaufnahmen, durchführt. Dabei spielen die Ungenauigkeiten des GPS-Signals und sonstige äußere Einflüsse keine Rolle, sondern die Drohne nähert sich dem durch die Route vorgegebenen **Koordinaten-Wert**. Die Abweichungen sind dadurch zu erklären, dass die Drohne nach einmaligem Erreichen der SOLL-Koordinate ihre Aufgabe ausführt, jedoch aufgrund von Wind und GPS / INS-Angaben die Position ständig anpasst.

Aus der Betrachtung der Lageabweichung zwischen IST-Tracking / IST-Drohne sowie den dazugehörigen 3D-Strecken wird deutlich, dass hier die Höhenabweichung stärker ins Gewicht fällt als die Lageabweichung.

Interessanterweise ist die tatsächliche Lage im Mittel nur unwesentlich schlechter als die von der Drohne ermittelte „vermutete“ Lage. Wie in Abbildung 51 zu erkennen ist, lässt sich hieraus jedoch keine Regelmäßigkeit erkennen. Die Punkte variieren um den Sollpunkt herum. Selbst bei einem möglichen Vergleich der Drohnen-Telemetriedaten mit den SOLL-Werten wird das Ergebnis nicht die tatsächliche Lage zum Zeitpunkt der Aufnahme wiedergeben und tendenziell zu positiv ausfallen.

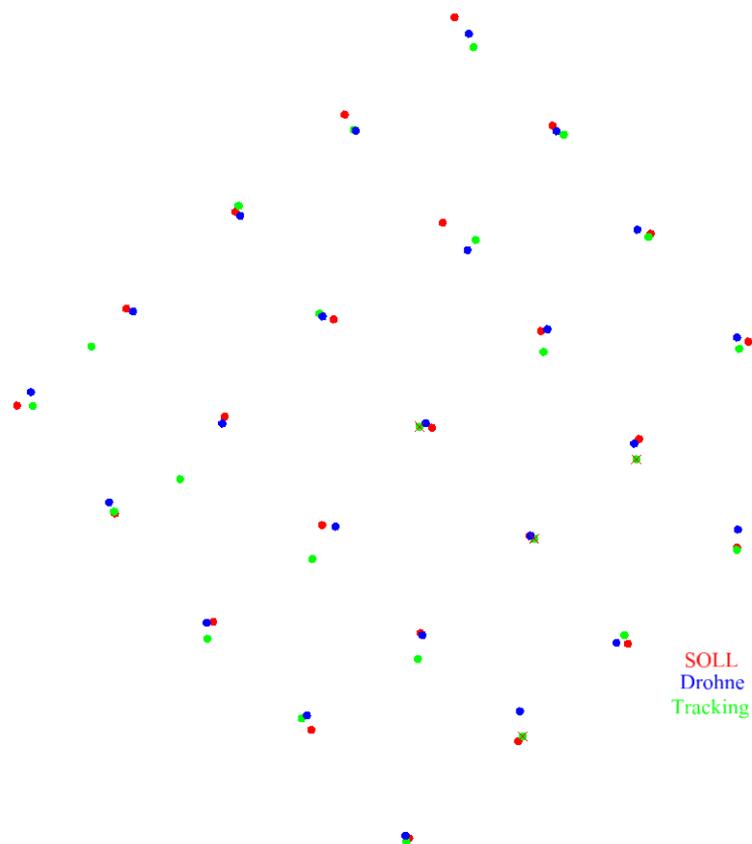


Abbildung 51: Grafische Gegenüberstellung der Koordinaten

Werfen wir nun noch einen kurzen Blick auf die Richtungswinkel, die wir aus der Lage der beiden Prismen entnehmen können. Zunächst müssen noch einige Anpassungen vorgenommen werden. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, werden die Richtungswinkel in positiven und negativen Werten ausgegeben, die zunächst umgerechnet werden müssen. Weiterhin muss die Meridiankonvergenz berücksichtigt werden, da sich die Angabe der Drohne auf geographisch Nord bezieht. Sie beträgt für das Testgebiet $-0,89^\circ$ (AGEOBW, 2009). Für die Analyse wurden die Messungen, die aufgrund des Prismenabstands

herausgenommen wurden, nicht berücksichtigt. Die Richtungswinkel des Trackings betragen im Mittel $317,51^\circ$ gegenüber dem SOLL-Wert von $317,3^\circ$ und passen damit sehr gut. Allerdings kann aus dem Mittelwert selbst keine belastbare Aussage zur Qualität der einzelnen Richtungsangaben gemacht werden.

In Diagramm 3 werden die einzelnen Messungen dargestellt (siehe auch Anhang 7):

Die Werte reichen dabei von $294,40^\circ$ bis $328,03^\circ$. Es werden also weitere Werte aus der Analyse ausgeschlossen werden müssen. Die Werte der Drohne fallen dagegen erwartungsgemäß besser aus. Das Mittel beträgt zwar $315,71^\circ$ (MIN $291,70^\circ$ / MAX $320,10^\circ$) und ist damit unwesentlich schlechter als bei Tracking. Betrachtet man allerdings Diagramm 3, wird deutlich, dass die Werte der Drohne näher an der SOLL-Richtung liegen, während das Tracking stärkere Ausschläge aufweist. Die starke Abweichung an Punkt 13 deutet auf eine vorübergehende Desorientierung der Drohne hin. Schon während des Fluges war zu erkennen, dass die Drohne die Orientierung verlor.

Im Grunde zeigt sich auch hier das gleiche Bild wie auch bei der Lageuntersuchung. Die Richtungswinkel aus den Telemetriedaten der Drohne werden tendenziell besser dargestellt, als sie es tatsächlich (Tracking) sind, was auch logisch erscheint, da das Problem nicht an der Software oder an der Auswertung liegt, sondern an der Genauigkeit der Komponenten zur Positionsbestimmung. Dabei wird nicht nur der vorgegebene Winkel nicht eingehalten, die Richtungen wechseln auch beständig zwischen den einzelnen Messpunkten. Auch dies ist eine Beobachtung, wie sie schon ähnlich bei der Untersuchung der Lage gemacht wurde.

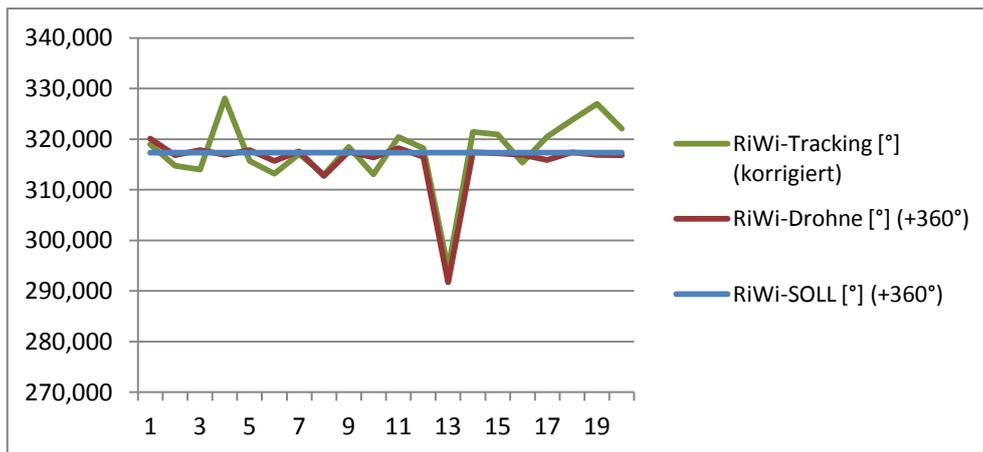


Diagramm 3: Analyse „Richtungswinkel“

4.7 Abweichungen der Kameralage

Nachdem nun Lage, Höhe und Richtungswinkel untersucht wurden, fehlt abschließend noch die Ausrichtung der Kamera. Wie erläutert, konnten keine Prismen direkt an der Kamera angebracht werden. Aus diesem Grund wird hier eine 3D-Helmerttransformation angewendet (TRAFO, 1999). Auch hier machen wir uns zunutze, dass die SOLL-Punkte bekannt sind und, dass eine Senkrechtaufnahme den Idealfall darstellt. Wir kennen die Horizontalstrecken entlang der Rasterachsen in Längs- und Querrichtung. Mit der Transformation ist es möglich aus den Differenzen dieser Strecken den Roll- und den Nickwinkel der Kamera (=Abbildungsebene) zu bestimmen. Dabei würden die Bilder zwar verzerrt (von oben betrachtet), was vermieden werden sollte; jedoch interessiert in diesem Fall nicht das Ergebnis an sich, sondern die berechneten Transformationsparameter, hier insbesondere die Rotation um X- und Y-Achse, siehe Abbildung 52. Die Werte geben an, wie stark die Bilder in X- und Y-Richtung geneigt werden müssen um die SOLL-Lage / die Ebene zu erreichen. Sie beschreiben also, wie stark die Abbildungsfläche der Kamera von der Senkrechtaufnahme abweicht, bei der die Abbildungsebene und die Objektebene parallel sind und die X und Y-Rotation somit Null wären. Die Vorgehensweise ist prinzipiell die gleiche wie bei der Kamerakalibrierung. Die Bildkoordinaten werden, nach dem gleichen Verfahren wie in Kapitel 4.5 erläutert, ermittelt und anschließend auf die örtlichen Rasterdaten transformiert. Dabei werden die entsprechenden IST- (Foto) und SOLL-Punkte (Referenzraster) einander zugeordnet.

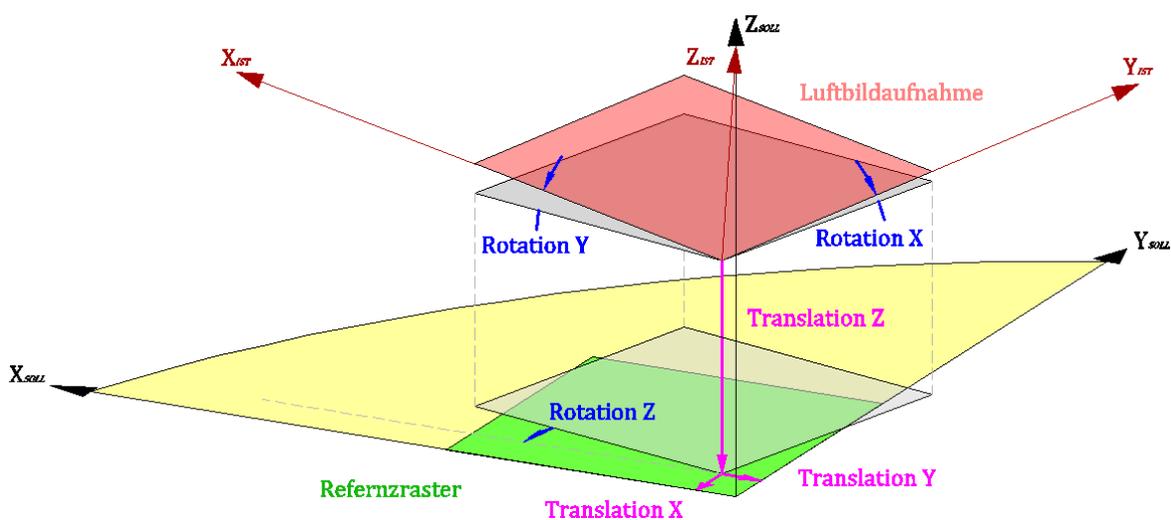


Abbildung 52: Angewandte 3D-Helmert-Transformation (vgl. Abbildung 19)

Für die Auswertung können wieder alle Aufnahmen herangezogen werden, da die Kameraneigung unabhängig von der Lage, Höhe oder Richtungswinkel untersucht werden kann. Bei der Erfassung der Bildkoordinaten ist bereits aufgefallen, dass bei den letzten beiden Fotopositionen die Kamera nicht ausgelöst hat; es liegen zwar Telemetriedaten vor, jedoch keine Aufnahmen.

Die Transformation wurde mit dem Programm Java Graticule 3D (JAG3D) durchgeführt (JAG3D, 2012). Siehe Anhang 8.

Punktnummer	Ry = [°]	Rx = [°]	Abweichung bei 10m (Y)[m]	Abweichung bei 10m (X)[m]
1001	1,48757	0,79941	0,0034	0,0010
1002	1,83753	0,75672	0,0051	0,0009
1003	2,16704	0,68717	0,0072	0,0007
1004	1,66920	1,13596	0,0042	0,0020
1005	1,35699	1,39649	0,0028	0,0030
1006	1,02731	1,14032	0,0016	0,0020
1007	1,35527	0,87962	0,0028	0,0012
1008	1,89964	0,52863	0,0055	0,0004
1009	1,70655	0,62981	0,0044	0,0006
1010	1,55037	0,59733	0,0037	0,0005
1011	1,79215	0,35955	0,0049	0,0002
1012	1,74299	0,32890	0,0046	0,0002
1013	1,55839	0,44750	0,0037	0,0003
1014	1,25128	0,54547	0,0024	0,0005
1015	0,72640	0,78010	0,0008	0,0009
1016	0,56333	0,51442	0,0005	0,0004
1017	0,98749	0,26467	0,0015	0,0001
1018	1,28348	0,24805	0,0025	0,0001
1019	1,59941	0,15191	0,0039	0,0000
1020	2,03572	0,07941	0,0063	0,0000
1021	1,60033	0,18858	0,0039	0,0001
1022	1,66461	0,22548	0,0042	0,0001
1023	1,26652	0,36631	0,0024	0,0002
Mittelwert:	1,48390	0,56747	0,0036	0,0007
Max:	2,16704	1,39649	0,0072	0,0030
Min:	0,56333	0,07941	0,0005	0,0000

Tabelle 6: Auswertung von Nick- und Rollwinkel der Kamera mit 3D-Helmert-Transformation

Die Abweichungen vom SOLL-Winkel von Null reichen für beide Richtungen von 0,57° bis zu 2,16°. Betrachtet man nun Abbildung 52 wird deutlich, dass es zu Streckenverzerrungen kommen muss, wenn Abbildungsebene und Objektebene nicht parallel zueinander stehen.

Diese Streckenabweichungen sind mit dem Cosinus auszurechnen:

$$\text{Abbildungstrecke (Raster im Luftbild)} = \frac{\text{Objektstrecke (Referenzraster)}}{\cos(R_Y \text{ bzw. } R_X)}$$

Bezogen auf die maximale Abweichung von $2,16^\circ$ und einer Objektstrecke von 10m, ergibt sich eine Abweichung von 0,007m, einem Wert, der zu vernachlässigen ist. Auch die Schrägstrecke (Hypotenuse) der beiden Abweichungen zusammengenommen betragen maximal 0,007m. Es fällt auf, dass die Abweichungen des servogesteuerten Nickwinkels größer ausfallen als der Rollwinkel, der passiv über die Aufhängung reguliert wird (vgl. Kap. 3.1.2). Vermutlich ist dies auf die Trägheit des Servo-Ausgleichs bei schnellen Bewegungen des UAV zurückzuführen.

Der Nick- und Rollausgleich für die Kamera funktioniert also sehr gut, auch wenn der eventuelle Einfluss der Kameraverzerrungen (vgl. Kap. 4.5) nicht berücksichtigt ist.

Bei der Untersuchung der Transformationsergebnisse (siehe Anhang 9) ist aufgefallen, dass die Rotation der Z-Achse nicht mit den Richtungswinkeln des Trackings übereinstimmt (vgl. Kap. 4.6). Da sich die Fotos in ihrem lokalen Bild-Koordinatensystem parallel zu den Koordinatenachsen befinden (und somit „genordet“ sind) ist zu erwarten, dass der Rotationswinkel der Z-Achse dem Richtungswinkel des Trackings entspricht. Dass dem nicht so ist kann daran liegen, dass das Auslösen der Kamera und das Anmessen der Prismen nicht völlig synchron verliefen und sich das UAV zwischen den beiden Operationen bewegt hat. Vermutlich kommt es zu einer Verzögerung zwischen der manuellen RC-gesteuerten Auslösung und der tatsächlichen Aufnahme. Auch dies muss bei der Weiterverwendung der Daten berücksichtigt werden.

4.8 Georeferenzierung der Luftbildaufnahmen

Bis jetzt wurden die einzelnen Komponenten des Systems hinsichtlich ihrer Genauigkeit untersucht. Hierbei konnten schon einige interessante Erkenntnisse gewonnen werden. Letztlich ist aber vor allem interessant, wie genau das Gesamtergebnis des UAS geworden ist. Denn es ist nicht auszuschließen, dass sich einige der angeführten Faktoren / Ungenauigkeiten gegenseitig aufheben, wobei die Einzelergebnisse darauf hindeuten, dass dies nicht zwangsläufig so sein muss und eher dem Zufall entspringt.

Wie in Kapitel 3.2 erläutert, werden die Luftbilder hierfür georeferenziert. Dies geschieht mittels zu erstellender Worldfiles. Hierfür werden nur die Telemetriedaten herangezogen, die während des Einsatzes aufgezeichnet wurden. Wie beschrieben, können die Telemetriedaten zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen nach EXCEL ausgegeben werden. Um nicht alle Worldfiles und deren Inhalte manuell rechnen zu müssen, wurde ein kleines Programm geschrieben, welches folgende Operationen vornimmt:

- Einlesen der Telemetriedaten aus dem EXCEL-Export von mdCockpit.
- Transformation der geographischen Koordinaten in das Zielsystem. Der Transformationsansatz wurde mittels dem GNSS-internen Transformation geprüft.
- Berechnung der Bildgröße und der Abbildungsgröße eines Pixels in der Natur, auf Basis der Brennweite, Sensorgröße und Höhe über Grund. Dies geschieht mittels der bereits beschriebenen Berechnung der Zentralprojektion (vgl. Kapitel 4.5).
- Berechnung der absoluten Koordinate der Mitte des linken oberen Pixels, als Basispunkt des Worldfiles. Dabei ist die Ausrichtung der Luftbilder zu berücksichtigen:

$$s = \sqrt{\left(\frac{1}{2}a\right)^2 + \left(\frac{1}{2}b\right)^2}$$

$$\alpha = \arctan\left(\left(\frac{a}{2}\right) / \left(\frac{b}{2}\right)\right)$$

$$\beta = 360^\circ - \alpha - \gamma$$

$$\Delta y = \cos(45^\circ - \gamma) \times \sqrt{\left(\frac{1}{2}Px\right)^2 + \left(\frac{1}{2}Py\right)^2}$$

$$\Delta x = \sin(45^\circ - \gamma) \times \sqrt{\left(\frac{1}{2}Px\right)^2 + \left(\frac{1}{2}Py\right)^2}$$

$$Y_{SOLL} = (\sin \beta \times s + Y_{IST}) - \Delta y$$

$$X_{SOLL} = (\cos \beta \times s + X_{IST}) - \Delta x$$

Siehe Abbildung 53.

Hierbei ist zu beachten, dass das Vorzeichen von Δy und Δx in Abhängigkeit zum Richtungs-/ Drehwinkel stehen. Die Quadranten sind zu beachten.

- Berechnung des Worldfiles entsprechend der in Kapitel 3.2 beschriebenen Berechnung unter Berücksichtigung der vorher berechneten Werte Y_{SOLL} und X_{SOLL} .

Die Vorgehensweise entspricht im Prinzip der des polaren Anhängens / Richtungswinkel und Entfernung (HÄSSLER& WACHSMUTH, 1990).

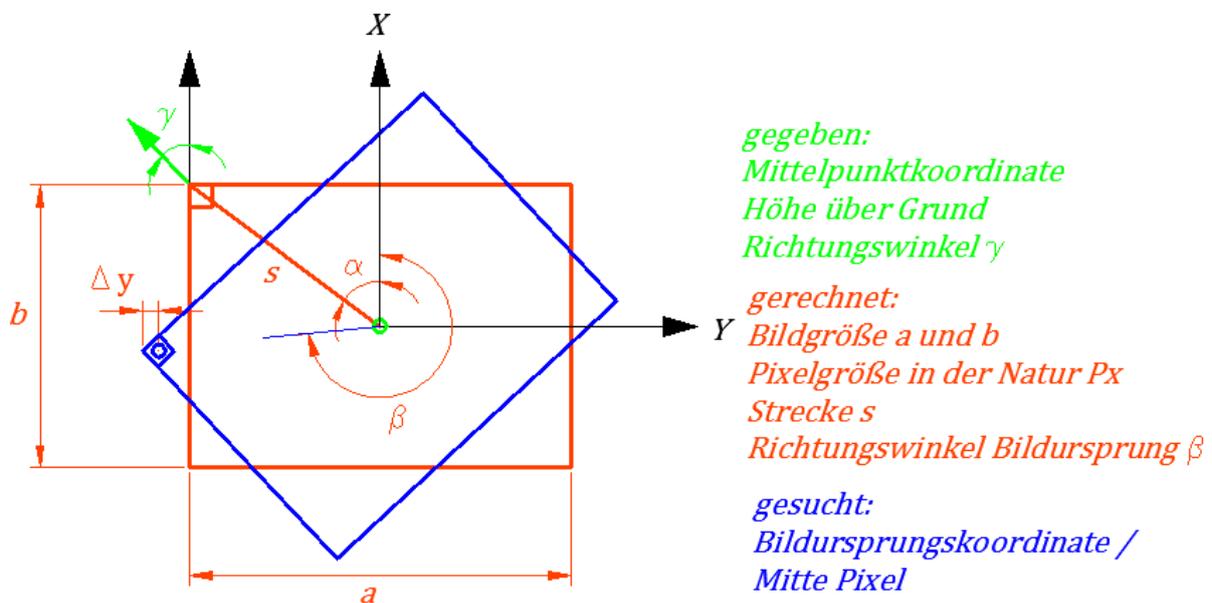


Abbildung 53: Berechnung der Bildursprungscoordinate

Das Ergebnis der Anwendung ist ein Worldfile für jede Luftbildaufnahme. Die Zuordnung erfolgt über die Reihenfolge der Aufnahmen, was bei einer Gesamtzahl von 25 Aufnahmen recht einfach möglich ist. Denkbar wäre auch eine automatische Zuordnung über den Zeitstempel von Datensatz und Aufnahme.

Betrachten wir zunächst alle mit der Drohne erhobenen Luftbilder und Flugdaten. Ein Ausschluss einzelner Aufnahmen aufgrund schlechter Fluglagedaten erfolgt hierbei nicht, da die Feststellung dieser Abweichungen Bestandteil von Untersuchungen war, die in der Praxis so nicht zum Einsatz kommen und die Ergebnisse praxisrelevant sein sollen. In den auf diese Weise georeferenzierten Luftbildern kumulieren alle festgestellten Ungenauigkeiten.

Allerdings muss eine Einschränkung gemacht werden: die in den vorhergehenden Untersuchungen hinsichtlich der Höhengenaugkeit des UAV, aber auch des verwendeten Höhenmodells, war so schlecht, dass jede weitere Auswertung unter Verwendung dieser Angaben zum Scheitern verurteilt ist, da die ermittelte „Höhe über Grund“ bekanntermaßen die Basis für die Bildgröße und damit letztlich auch für die zu erreichende Lagegenauigkeit der Passpunkte darstellt. Aus diesem Grund wurde die „Höhe über Grund“ aus der Auswertung des Tachymeter-Trackings verwendet.

Zunächst werden die Luftbilder unter Verwendung der Worldfiles in einem CAD georeferenziert. Wie beschrieben, wurde die Flugplanung so angelegt, dass jede

Luftbildmarke des Referenzrasters auf mehreren Aufnahmen erfasst ist. Nach dem Einlesen der Bilder werden alle Passpunkte Bild für Bild mit COSGeo (COSGeo MANUAL, 2010) digitalisiert (vgl. Abbildung 54). Um sich einen umfassenden Überblick zur absoluten Lagegenauigkeit zu verschaffen, werden die IST-Passpunkte der einzelnen Aufnahmen mit der aus Kapitel 4.5 bekannten 2D-Helmert-Transformation auf die SOLL-Passpunkte transformiert, siehe Anhang 10. Die daraus resultierenden Transformationsparameter beschreiben die Abweichung der IST-Punkte zu den Soll-Punkten. Aus Tabelle 7 lässt sich ablesen, dass die mittlere Verschiebung der Luftbilder mit 2,97m fast 10-mal so hoch ist wie die festgelegte Fehlergrenze von 0,30m. Die Strecke zwischen den ermittelten Schwerpunkten der SOLL und IST-Punkte beschreibt die Translation. Es ist zu erkennen, dass die Koordinatendifferenzen von X und Y dabei in etwa gleich stark ins Gewicht fallen. An den Min. und Max-Werten lässt sich auch ablesen, dass eine erhebliche Varianz der Werte vorliegt. Auch der Drehwinkel passt in aller Regel nicht, soll er doch im Idealfall bei 0 liegen. Dass der Maßstabsfaktor dagegen sehr gut passt, liegt an der beschriebenen Verwendung der genauen Höhe über Grund, sowie der vorgenommenen Kalibrierung der Kamera. Der mittlere Punktfehler steht in Abhängigkeit zum Drehwinkel der Transformation: je stärker das Bild gedreht ist, umso größer die Standardabweichung. Der Maßstabsfaktor hat, wenn überhaupt, nur einen geringen Einfluss.

	Maßstabsfaktor	Drehwinkel	mittlerer Punktfehler	Strecke Schwerpunkte Alt / Neu	Delta Y	Delta X
Mittel:	1,012035	3,69161	0,145	2,977	1,393	2,282
Max:	1,093289	8,58500	0,382	8,174	5,580	6,918
Min:	0,971006	0,04940	0,032	0,796	0,036	0,385

Tabelle 7: Auswertung der Transformationsparameter aller Aufnahmen

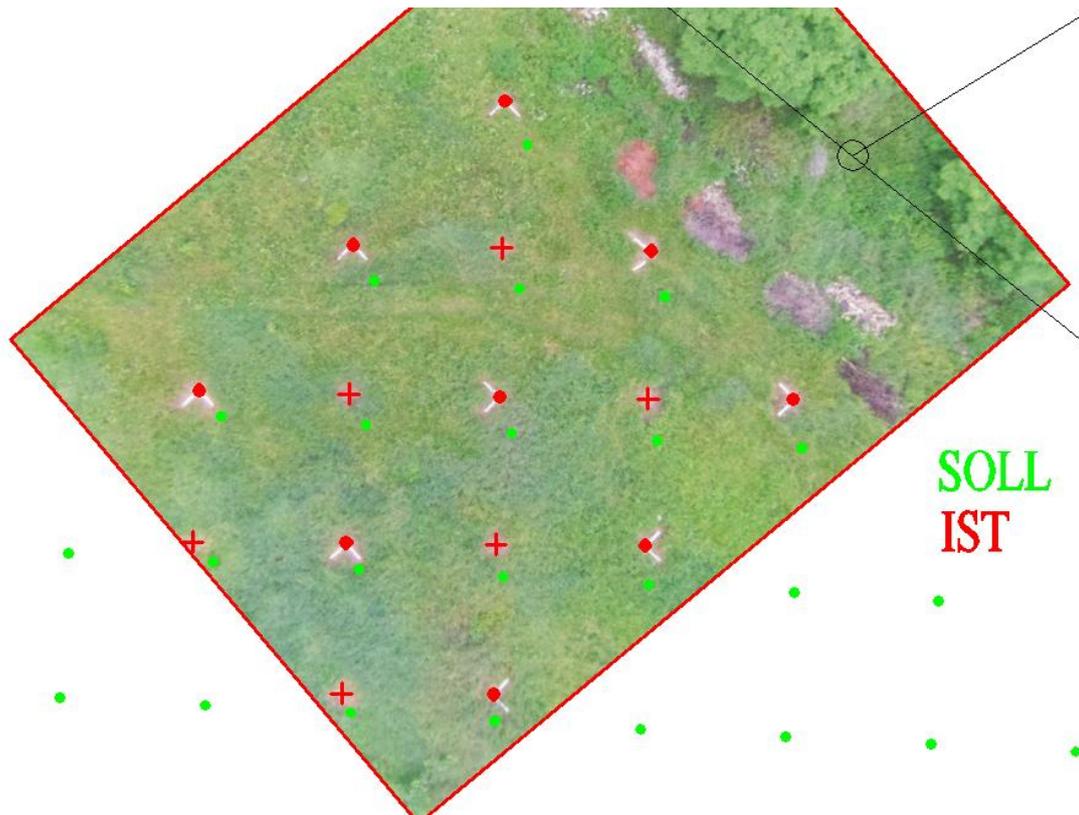


Abbildung 54: Georeferenziertes Bild (Route_1_1)
mit SOLL- und IST-Punkten

Somit kann man sagen, dass die **absolute** Lagegenauigkeit nicht für eine topographische Auswertung ausreicht, da selbst der beste Wert von ca. 0,80m schon mehr als doppelt so hoch liegt wie der Grenzwert. Es lässt sich auch keine Tendenz bei der Verschiebung erkennen. Die Werte variieren enorm und scheinbar willkürlich um die SOLL-Koordinate herum. Bei der vorliegenden Analyse wirken sich vor allem die Abweichungen beim Richtungswinkel der Aufnahmen und die Verzerrungen innerhalb der Luftbilder negativ auf das Ergebnis aus.

Lediglich bei der Richtung der Abweichungen lässt sich ein gewisses Bild erahnen. In Abbildung 55 sind alle digitalisierten IST-Punkte der Luftbildaufnahmen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass einige Passpunkte bis zu 9 mal erfasst wurden. Die Abweichungen tendieren dabei Richtung Norden! Die dargestellte Ellipse wurde generiert aus den Abweichungen des am gleichen Tag vorgenommenen stationären Koordinatentests (vgl. Kap. 4.4). Man sieht, dass die meisten Punkte innerhalb dieser Ellipse liegen. Um daraus belastbare Schlüsse zu ziehen, bedarf es weiterer Tests, die jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit sind.

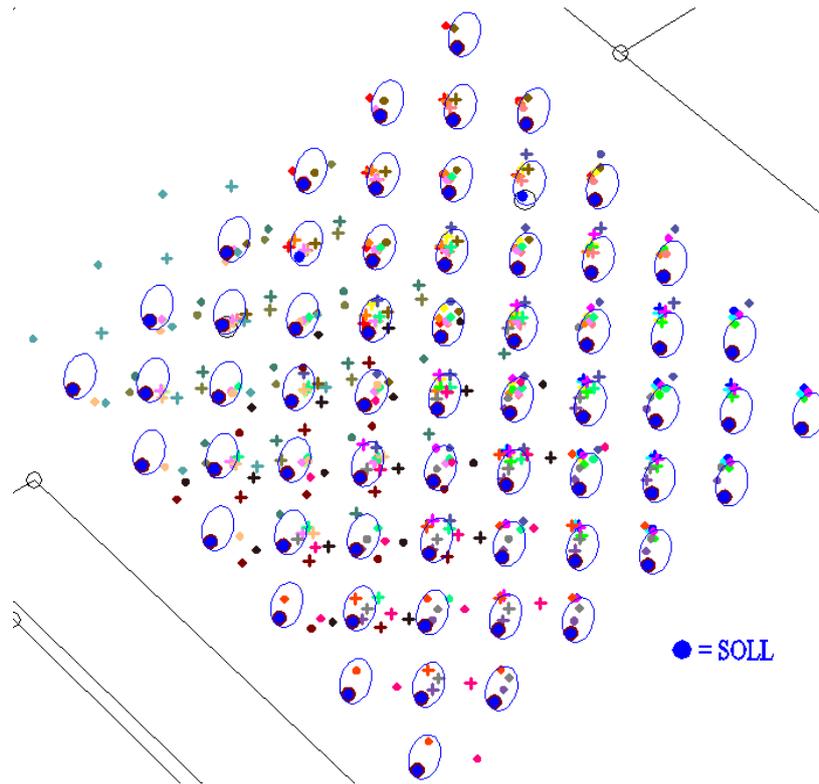


Abbildung 55: Alle digitalisierten Passpunkte mit Ellipsen

Bleibt somit noch zu untersuchen, wie genau die einzelnen Aufnahmen zueinander passen, sprich, wie hoch die relative Genauigkeit der Aufnahmen ist. Hierfür werden Strecken über die Bildgrenzen hinweg zwischen Passpunkten ermittelt und mit der SOLL-Strecke aus dem Referenzraster verglichen. Dies geschieht in beiden Achsen des Rasters.

Wie zu erwarten war, ist das Ergebnis auch bei dieser Untersuchung nicht genauer. Die **relative** Genauigkeit der Aufnahmen untereinander ist ebenso unterschiedlich, wie das auch bei den anderen Tests festgestellt werden konnte. Die Varianz ist enorm, siehe Tabelle 8. Die ermittelten Strecken liegen über der Toleranz und sind somit nicht weiterzuverwenden. Die Vermutung der stationären Untersuchung aus Kapitel 4.4 hat sich somit bestätigt.

Streckenbezeichnung	Distanz-IST	Distanz-SOLL	Differenz
Route_1_1 nach Route_1_2	30,459	30,003	0,456
Route_2_6 nach Route_1_7	19,208	20,001	-0,793
Route_3_6 nach Route_2_7	19,477	20,006	-0,529
Route_3_4 nach Route_3_3	8,842	10,015	-1,173
Route_3,7 nach Route_2_7	8,27	9,986	-1,716
Route_2_6 nach Route_1_4	9,981	10,004	-0,023
Route_1_7 nach Route_2_6	9,333	10,004	-0,671
Route_2_4 nach Route_3_1	9,312	10,013	-0,701
Route_3_6 nach Route_3_5	10,497	10,034	0,463
Route_3_5 nach Route_2_8	23,84	20,018	3,822

Tabelle 8: Vergleich von Strecken zwischen unterschiedlichen Aufnahmen

Zu guter Letzt muss noch die Genauigkeit von Strecken untersucht werden, die innerhalb eines Bildes gemacht wurden. Aufgrund der Ausgangslage schlecht zugängliche Bereiche zu erfassen, wäre dies eine geeignete Methode, sofern das Einsatzgebiet mit einer Aufnahme erfasst werden kann.

Wie in den vorangegangenen Kapitel beschrieben, hängt die Qualität dieser Werte ganz entscheidend von der inneren und äußeren Orientierung der Kamera ab, also Brennweite, Chipgröße, Höhe über Grund und die senkrechte Ausrichtung der Kamera. Die bisherigen Erkenntnisse lassen vermuten, dass hier mit besseren Ergebnissen zu rechnen ist. Zur Analyse werden wieder Strecken zwischen zwei Passpunkten, diesmal innerhalb eines Bildes mit ihrer Referenzstrecke verglichen. Das hier als Beispiel herangezogene Luftbild „Route_1_5“ (= Wegepunkt / Luftbild 5 in Route 1) zeichnet sich dadurch aus, dass es bei der Transformation nur sehr geringe Abweichungen aufwies. Der Maßstabsfaktor lag bei 1,000, der Drehwinkel bei $0,088^\circ$ und der mittlere Punktfehler bei 0,032m (siehe Anhang 10). Abbildung 56 zeigt, dass die absolute Lage zwar erheblich abweicht, aber die Gitterlinien parallel verlaufen. Somit kam die Aufnahme sehr nahe an das Ideal heran. Diese Tatsache spiegelt sich auch in den Ergebnissen wieder. Die Streckendifferenzen liegen unter 0,005m. Fairerweise muss jedoch gesagt sein, dass dieses Vorgehen in der Praxis nicht möglich wäre, da die Qualität der Aufnahme aus den Transformationsparametern nicht vorliegt. Zieht man ein Luftbild mit mittlerer Qualität heran, werden die Ergebnisse deutlich schlechter. Im Falle des in Abbildung 54 dargestellten Luftbildes liegt die mittlere Streckendifferenz in etwa bei 0,30m und bewegt sich damit im Bereich unseres Grenzwertes (siehe Anhang 11).

Bildname	Distanz-IST	Distanz-SOLL	Differenz
Route_1_5	9,991	9,969	0,022
Route_1_5	9,997	10,017	-0,020
Route_1_5	10,050	10,013	0,037
Route_1_5	9,987	9,977	0,010
Route_1_5	10,047	9,998	0,049
Route_1_5	10,018	10,023	-0,005
Route_1_5	10,003	10,014	-0,011
Route_1_5	9,980	9,951	0,029
Route_1_5	10,041	10,015	0,026
Route_1_5	10,043	10,065	-0,022
Route_1_5	9,911	9,948	-0,037
Route_1_5	9,965	10,015	-0,050

Tabelle 9: Vergleich von Strecken innerhalb einer Aufnahme

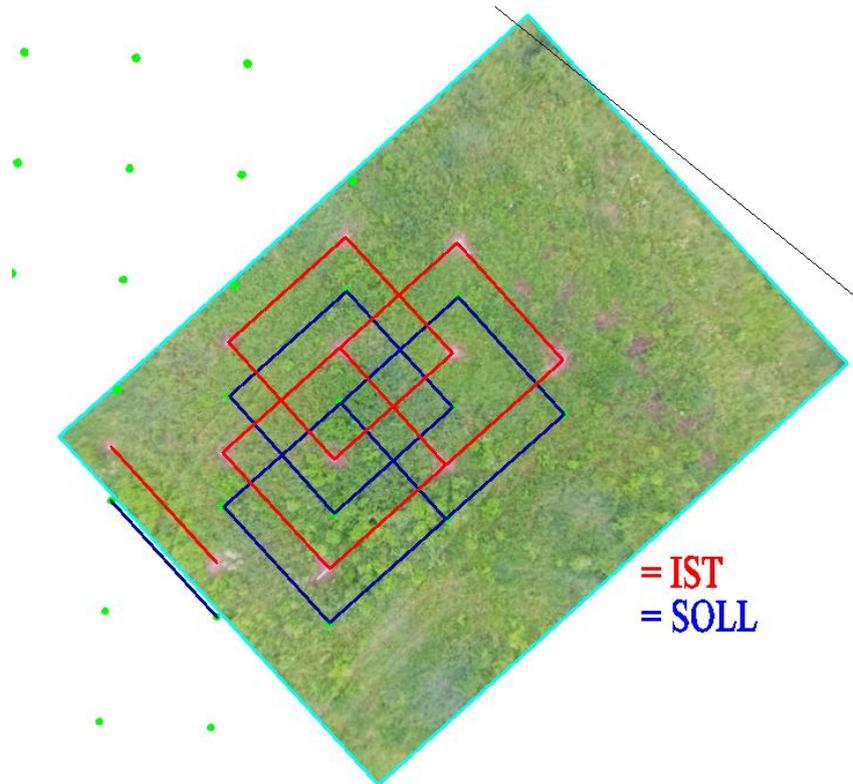


Abbildung 56: Streckenvergleich (Route_1_5)

Es lässt sich also festhalten, dass die **relative Genauigkeit innerhalb einer Aufnahme** durchaus gegeben sein kann. Allerdings kann die Qualität der Aufnahme nicht ohne Passpunkte geprüft werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Werte zwischen den Aufnahmen variieren können; gleichbleibende Genauigkeitsparameter sind nicht gegeben. Dies hat zur Konsequenz, dass in der Praxis letztlich keine Aussage zur Qualität der Aufnahmen getroffen werden kann!

5. Zusammenfassung der Ergebnisse und Analyse

Der Ausgangspunkt der Master Thesis waren Überlegungen hinsichtlich des Einsatzes eines Unmanned Aircraft Systems zur Gewinnung von Geo-Daten. Wesentliche Kernfrage und Schwerpunktthema dieser Arbeit ist die Lagegenauigkeit, mit der die Daten erhoben werden können. Nach Abschluss aller Untersuchungen lässt sich sicher sagen, dass die in Kapitel 1.2 aufgestellte Hypothese mit dem System Koordinaten in einer Lagegenauigkeit von 0,30m zu erfassen widerlegt ist. Die bei den verschiedenen Untersuchungen ermittelte Lagegenauigkeit lag bei bis zu 2,5m. Die Qualität des verwendeten GPS-Chipsatzes ist für die geplanten Anwendungen nicht ausreichend.

Auch die relative Genauigkeit der einzelnen Aufnahmen untereinander war mit einem Wert von bis zu 3,8m nicht ausreichend. Die stille Hoffnung, dass die INS-Daten des Systems zu einer besseren relativen Genauigkeit beitragen als dies allein mit dem GPS-Chip möglich wäre, hat sich nicht bewahrheitet. Dass die maximale Lageabweichung kleiner als die relative Abweichung der Aufnahmen ist, ist ein Beleg für das wesentliche Problem, dass alle Positionsangaben des UAS betrifft: Die Abweichungen haben eine erhebliche Varianz in ihren Werten, aber auch in ihrer Lage zum SOLL. Dies ergibt ein sehr diffuses Bild. Eine Tendenz, die sich bei der Ergebnisermittlung noch verbessernd berücksichtigen ließe, ist nicht zu erkennen. Die Ergebnisse sind nicht reproduzierbar, weil einfach zu viele Faktoren hineinspielen, wie die stark abweichenden Ergebnisse der einzelnen Aufnahmen zeigen.

Weniger eindeutig ist die Sachlage bei der Erfassung von relativen Koordinaten innerhalb einer Luftbildaufnahme. Die festgestellten Abweichungen sind zum Teil mit max. 0,05m Streckenabweichung sehr gut, allerdings wurden hierfür nicht ausschließlich auf Werte des UAS zurückgegriffen, sondern die verwendete Höhe über Grund wurde aus der Aufnahme des Referenzrasters und der Höhe des UAV aus dem Tachymeter-Tracking verwendet.

Ausgerechnet die Höhenangaben, der entscheidende Faktor bei jeder beschriebenen Anwendung, sind der größte Unsicherheitsfaktor des Systems. Die Auswertungen haben ergeben, dass schon die minimale Höhenabweichung bei 3,5m liegt. Die gesamte Untersuchung baut auf dem Prinzip der Zentralprojektion auf. Dabei ist die Kenntnis über den korrekten Abstand (Höhe über Grund) zwischen Kamera und Objekt von herausragender

Bedeutung, da sie bei gleichbleibender innerer Orientierung der Kamera die Größe der Aufnahme bestimmt: Eine Abweichung der Höhe über Grund von 1m Meter führt zu einer Streckenabweichung von 0,32m - die kombinierte Höhenermittlung aus GPS-Signal und barometrischer Höhenmessung ist also nicht ausreichend! Schon beim stationären Koordinatentest war erkennbar, dass die barometrischen Höhenwerte starken Schwankungen ausgesetzt ist. Die kann beispielsweise durch die Änderung des Luftdrucks in der Atmosphäre geschehen.

Eine wichtige Rolle spielt hierbei auch das Höhenmodell des UAS, da die Bodenhöhe in der Praxis nicht vorliegt, jedoch zur Ermittlung der relativen Flughöhe benötigt wird. Das verwendete SRTM1-Modell besteht aus einem Raster mit 90m Bodenauflösung und einer Höhengenaugigkeit die mit $\pm 6m$ angegeben wird. In Falle unserer Testflüge haben sich die Differenzen aus Höhenbestimmung und Bodenhöhe aufgehoben. Diese Tatsache kann aber aufgrund der Erkenntnisse über die Varianz der Daten nicht verallgemeinert werden.

Auch die im Programm des UAS verwendete Koordinatentransformation ist nicht für Auswertungen im Sinne der Hypothese geeignet. Beim Vergleich mit anderen Transformationsansätzen ergab sich bereits eine Abweichung von 1m. Generell wurde festgestellt, dass die Werte, die das UAV ausgibt, tendenziell als besser dargestellt werden als sie es tatsächlich sind. Beispielsweise wird der aus dem GPS-Signal ermittelte DOP-Wert geringer angegeben, als dies tatsächlich der Fall ist. Auch der Servomotor der Kamerahalterungen arbeitet nicht ganz exakt, wobei gesagt werden kann, dass diese Komponente (Nick- und Rollwinkelausgleich) sehr gut arbeitet und die resultierenden Abweichungen von 0,007m bei 35m Flughöhe schon fast zu vernachlässigen sind.

Um die Verwendung von Passpunkten und die Transformation der Luftbilder wird man also nicht umhinkommen. Dabei ist es entscheidend, die Verzerrungen innerhalb der Aufnahmen zu kennen, da sich diese, je nach Verteilung der Passpunkte, nicht herausrechnen lassen: Die Kamerakalibrierung, im Vorfeld der Arbeit kaum beachtet, stellte sich im Nachhinein als unentbehrlich für die gesamte Untersuchung und damit auch für die gesamte Anwendung heraus. Dabei war zum einen die Ermittlung von Richtung und Stärke der Verzerrungen der Luftbilder entscheidend. Sie liegt bei einem Abstand von 35m maximal bei 0,163m. Hierbei fällt die Höhe über Grund nicht so stark ins Gewicht. 1m Höhendifferenz führen zu 0,005m Streckendifferenz durch Verzerrung. Dies gilt selbstverständlich nur für die hier eingesetzte

Kamera. Schon eine andere Ausfertigung des gleichen Modells kann andere Verzerrungen aufweisen.

Versucht man nun aber sich die guten Ergebnisse aus den Messungen innerhalb einer Aufnahme zunutze zu machen, indem man möglichst große Bereiche mit einem Luftbild erfasst, muss dabei berücksichtigt werden, dass die maximale Verzerrung bei einer relativen Flughöhe von 100m schon ca. 0,5m beträgt.

Zum anderen benötigt man auch zwingend Kenntnisse zur inneren Orientierung der Kamera. Wie sich herausstellte, sind die benötigten Angaben (Stichwort CCD-Chipgröße und Brennweite) nur ungenau angegeben. Mit den vorgenommenen Untersuchungen konnte die Brennweite ermittelt und verifiziert werden. Die Streckenabweichung beträgt bei Verwendung der Herstellerangabe von 5(,00)mm anstelle der ermittelten Brennweite von 5,25mm bezogen auf die relative Flughöhe von 35m 0,19m. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass eine Wiederherstellungsgenauigkeit des Objektivs zumindest bei gleichbleibenden äußeren Umständen gegeben ist.

Das eigentliche Kernproblem ist also die Daten des UAV und nicht die Kamera oder deren Halterung.

Rückschlüsse über den genauen Einfluss der einzelnen Komponenten auf das Gesamtergebnis zu ziehen ist nur sehr schwer möglich und letztlich auch nicht entscheidend. Dientlich sind die Untersuchungen vor allem deshalb, weil sie Entwicklungspotentiale aufzeigen, um die für die hier angedachte Anwendung unzureichende Lage und Höhengenaugigkeit zu verbessern.

Kritisch betrachtet werden muss, dass zur Untersuchung verwendete Tachymetertracking. Nicht hinsichtlich der Messgenauigkeit, sondern die Synchronisation der beiden Messungen zusammen mit der Fotoauslösung bereitete Probleme. Allerdings gab es genügend Kontrollparameter anhand derer mangelhafte Datensätze aus der Analyse herausgenommen werden konnten. Insgesamt ist die angewandte Methode hinsichtlich Lage- und Höhengenaugigkeit als praktikabel anzusehen. Das gleiche gilt auch für die anderen eingesetzten Untersuchungsmethoden, wie den stationären Test, sowie die Kamerakalibrierung. Natürlich gibt es auch hier Verbesserungsmöglichkeiten (vgl. Kap. 6)

Bezüglich der praktischen Erfahrungen kann man sagen, dass der kommerzielle Einsatz von UAS, zumindest in Rheinland-Pfalz, in naher Zukunft nicht zum Tagesgeschäft gehört.

Zum Einen ist die Bearbeitungszeit für die Aufstiegs Genehmigung zu lange um kurzfristig reagieren zu können. Vor allem aber die Befristung der Genehmigung auf einen festgelegten Zeitraum ist wenig praktikabel, da die Wetterbedingungen an diesen Tagen stimmen müssen und sei es nur einige „schöne“ Aufnahmen zu machen. Verzögert sich die Maßnahme oder das Wetter ist schlecht, muss eine neue Genehmigung beantragt werden. Nicht zuletzt die ganze Reihe von weiteren Dienststellen, die informiert oder um Erlaubnis gefragt werden müssen, komplettieren das Gesamtbild. Der Aufwand wird sich natürlich auch auf das Honorar für den Einsatz bzw. auf den zu erzielenden Gewinn auswirken.

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist die öffentliche Meinung zum Thema. Sei es in Gesprächen mit der kommunalen Verwaltung als Grundstückseigentümer oder aber mit Passanten; die Reaktionen waren bestenfalls sehr zurückhaltend. Die Frage nach der Privatsphäre war allgegenwärtig. Es ist zu erwarten, dass es zu öffentlichen Diskussionen kommen wird, sollte die Technik mehr und mehr in den zivilen Bereich vordringen. Dies erscheint auch zwingend notwendig.

Auch hinsichtlich der Sicherheit gibt es nun einige Erkenntnisse. Bei der Flugplanung, besonders in sensiblen Bereichen und in der Nähe zu Personen, erscheint ein Sicherheitsabstand von 6m notwendig, um Personen und Sachschäden zu vermeiden. Dennoch sollte und muss jederzeit die Möglichkeit bestehen, die Kontrolle via RC zu übernehmen.

Erfahrungen konnten auch bezüglich dem Einsatz bei unterschiedlichen Wetterbedingungen gemacht werden. Die Testflüge erstreckten sich in einem Zeitraum von April bis August 2012. Besonders Wind und Thermik bereiteten hier Probleme. Das UAV ist hier sehr anfällig. Die besten Ergebnisse wurden früh morgens bei leichter Bewölkung und / oder leichtem Regen gemacht.

Die Master Thesis ist insgesamt als Erfolg zu werten. Zwar wurde die Hypothese widerlegt, sie diente jedoch lediglich der Definition eines Grenzwertes. Die formulierten Ziele wurden erreicht. So wurde ein umfassender Einblick in die Anwendung des UAS und der damit erzielbaren Genauigkeiten gewonnen. Dabei wurden die einzelnen Komponenten ebenso betrachtet, wie die Gesamtergebnisse. Verbesserungsmöglichkeiten können daraus abgeleitet werden. In der Diskussion wird darauf näher eingegangen.

6. Diskussion und Ausblick

Von der Erfindung der ersten Taubenkamera durch Julius Neubronner am Anfang des 20. Jahrhunderts bis heute, hat die Luftbildfotografie eine enorme Entwicklung genommen. Unmanned Aerial Systems für den zivilen Bereich stellen den aktuellen Stand dieser Entwicklung dar. Die Systeme haben ein enormes Entwicklungspotential auch wenn die in den Kapitel 4 und 5 beschriebenen Ergebnisse schlechter waren als vermutet.

Die Genauigkeitsuntersuchungen der einzelnen Komponenten geben schon Hinweise auf mögliche Verbesserungen. So könnte der Einsatz eines anderen GPS-Chips eine enorme Steigerung der Lage und Höhengenaugkeit zur Folge haben. Der Hersteller des in der Drohne befindlichen Chips (u-blox AG, Schweiz) bietet auch Module an, die in Echtzeit Korrekturdaten des Referenzdienstes SAPOS empfangen können. Dieser Dienst ist zwar kostenpflichtig, mit ihm ließe sich die Genauigkeit jedoch bis auf 3cm steigern. Eine kostengünstigere Variante könnte sein, einen Chip zu verwenden, der die Rohdaten des GPS aufzeichnet. Diese Daten im RINEX-Format können im Nachhinein korrigiert werden. Eine Überarbeitung der Telemetriedaten wäre notwendig.

Der Zeitaufwand für die Kamerakalibrierung war enorm und vorher nicht eingeplant, da sie die Notwendigkeit der Untersuchung erst im Laufe der Arbeit herauskristallisierte. Im Nachhinein ist es unverständlich, dass dieser Aspekt nicht schon früher erkannt wurde; aber auch daraus lernt man. Für den Autor stellt die Untersuchung ein Höhepunkt der Arbeit dar. Gerade auch aufgrund der Realisierung der Untersuchung mit der Entwicklung einer Kameraaufnahme für Vermessungsstative. Die Ergebnisse der Kalibrierung waren besser als zunächst erwartet. Dennoch gibt es hier Verbesserungsmöglichkeiten, sowohl beim Versuchsaufbau als auch beim verwendeten System. Natürlich wäre es besser die Untersuchungen zur inneren Orientierung in einem Fotolabor mit entsprechender Einrichtung vorzunehmen. Eine solche Einrichtung stand jedoch nicht zur Verfügung. Darüber hinaus wäre es auch interessant zu wissen, wie sich äußere Einflüsse wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Vibrationen auf die Optik auswirken.

Ist die Kamera auch hier formstabil, ist es möglich die (gleichgebliebenen) Verzerrungen in einem weiteren Arbeitsschritt aus den Bildern herauszurechnen. Dennoch muss man sich darüber im Klaren sein, dass man es hier mit einer einfachen Digitalkamera zu tun hat. Anforderungen, wie sie an eine Messkammer gestellt werden, kann sie schon aufgrund ihrer

Konstruktion nicht erfüllen – Stichwort Zoom. Eine Möglichkeit die Verzerrungen in der Praxis zu berücksichtigen bestünde darin, die Flugroute so zu planen, dass sich das zu untersuchende Objekt jeweils in etwa in der Bildmitte befindet. Es gibt jedoch auch schon relativ kleine Messkammern (Tetracam ADC Air), die bei einem Gewicht von etwa 700 Gramm nicht vom hier eingesetzten System verwendet werden kann, wohl aber von der großen Schwester mit einer möglichen Zuladung von 1000 Gramm.

Bleibt noch die Beurteilung der Kamerahalterung übrig. Die Ergebnisse waren in hier schon sehr gut. Denkbar wäre es von Vorteil, noch eine spezielle Halterung für Senkrechtaufnahmen zu fertigen. Auf einen Servomotor zur Ausrichtung der Kamera könnte so zugunsten eines passiven Nickwinkelausgleichs verzichtet werden; die Untersuchungen hatten ergeben, dass der passive Rollwinkelausgleich bessere Ergebnisse liefert.

Das Synchronisieren der Tachymeter und der Kamera beim Tracking stellte sich schwieriger heraus als es ursprünglich erschien. Es waren mehrere Anläufe nötig bis man die drei Routen an einem Stück erfassen konnte. Vor allem das Wetter bereitete Probleme, da die Drohne sehr anfällig für Luftbewegungen ist. Ein Wegdrehen der Drohne oder starke Ausgleichbewegungen führten häufig zum Verlust des Signals. Der Versuchsaufbau ließe sich verbessern, indem man sogenannte 360°-Rundumprismen im Zusammenspiel mit synchronisierten Tachymetern einsetzt, die ihre Messungen zeitgleich vornehmen. Die notwendigen Instrumente standen nicht zur Verfügung. Zudem wäre schon ein einzelnes 360°-Prisma zu schwer gewesen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Technik, die zur (erheblichen) Verbesserung der Genauigkeit der Daten benötigt wird, schon existiert. Sie muss jedoch auch eingesetzt werden. Die Frage ist nur, warum das nicht schon längst gemacht wird? Natürlich gibt es einige technische Details, die geklärt werden müssen, wie die Ansteuerung der Kamera, Austauschformaten usw. Ein weiterer Grund ist aber sicherlich auch die Genauigkeit an sich. Wie aus der Duden-Definition in der Einführung zu entnehmen ist, bezeichnet Genauigkeit „die Annäherung an ein gewünschtes oder erforderliches Ergebnis“. Was „genau“ bedeutet, liegt also schlicht und ergreifend im Auge des Betrachters. Die Notwendigkeit einer Verbesserung wird bisher noch nicht gesehen. Der Hersteller des UAS verweist in Gesprächen und in Prospekten immer auf die hohe Genauigkeit des Systems, und es ist ja auch genau, wenn man die bisherigen Anwendungsgebiete betrachtet. In den verschiedenen Gesprächen im Verlaufe der Untersuchungen konnte schon festgestellt werden, dass hier ein unterschiedliches Verständnis vom Begriff „Genauigkeit“ vorlag, was zu Befremdung, aber

auch immer wieder auch zu heiteren Momenten führte. Auch das Interesse an Details, wie DOP, Uhrzeit der Aufnahme, Kalibrierung des Servomotors wurden vorher noch nie in der Art von Kundenseite vorgetragen. So konnte der Autor nachweisen, dass die in mdCockpit verwendete Chipgröße sowie die Brennweite nicht korrekt angegeben war, was zu einer Falschberechnung der Bildgröße und einigen Spezialfunktionen wie die Erstellung flächendeckender Aufnahmen (interessanterweise als GIS-Raster betitelt) führte. Dieser Sachverhalt war aber offenbar noch niemandem, auch keinem Anwender, aufgefallen, obwohl schon ein schlichter Vergleich der Flugplanung mit den tatsächlich erfolgten Aufnahmen, genügt hätte. Auch dies ist ein Indiz dafür, dass hier kein Bewusstsein für diese Art von Anwendung existiert. Grundsätzlich war man an den Untersuchungen sehr interessiert und zeigte sich aufgeschlossen. Der Hersteller gibt an bereits an einer Lösung zur Höhenbestimmung mittels Laser-Distanzmesser zu arbeiten, womit schon mal ein wesentlicher Schritt getan wäre! Dass solche Dinge noch nicht realisiert wurden, ist also eher mit der Frage nach dem Bedarf als mit der Frage nach den Möglichkeiten zu beantworten. Der Autor hofft mit dieser Arbeit den Bedarf begründet zu haben, da er nach wie vor das große Potenzial sieht, welches hinter dieser Anwendung steht. Zumal die Gesetzgebung zurzeit an einer Novellierung arbeitet, die den zivilen Einsatz von UAS bundesweit einheitlich regelt. Wie aus den zuständigen Verwaltungen zu hören ist, besteht die Hoffnung, dass die Erteilung von Aufstiegsgenehmigung für kommerzielle Zwecke erleichtert / gelockert wird. Dies ist auch zwingend erforderlich, um gleiche Wettbewerbsbedingungen für alle Anbieter und in allen Bundesländern zu schaffen. Damit wäre ein weiteres Hindernis für den wirtschaftlich erfolgreichen Einsatz überwunden.

Persönlich war das Studium im Allgemeinen und die Arbeit an die Master-Thesis im Speziellen eine große Herausforderung für mich; sowohl was den Zeitaufwand angeht als auch von den fachlichen Anforderungen her. Beispielsweise steckt sehr viel Arbeit in den verschiedenen Abbildungen, da man versuchen muss, komplexe Sachverhalte einfach darzustellen. Im Rückblick ist es beeindruckend, wie viel Wissen man sich aus benachbarten Fachbereichen aneignet bzw. aneignen muss. Mit der 7-Parameter-Transformation musste ich mich beispielsweise einem völlig neuen Wissensgebiet widmen. Und auch die Entwicklung der Applikation zur Worldfile-Erstellung ging nicht ohne Weiteres vonstatten. Nicht zuletzt daran lässt sich der interdisziplinäre Ansatz der Geoinformatik erkennen. Dies ist für mich eine der herausragenden Erkenntnisse des Studiums.

Generell ist es nicht einfach mit Rückschlägen fertig zu werden, die man selbst nicht beeinflussen kann. Beispielsweise, wenn die groß angelegten Testflüge mit Prisma, die mit großer Materialeinsatz und Personalstärke (4 Personen) kurzfristig aufgrund ungeeigneten Wetters abgesagt werden müssen oder man mehrere Stunden damit verbringt, mutwillig zerstörte Referenzpunkte wiederherzustellen.

Neben dem Spaß, den die Arbeit an der Master Thesis machte, kommt nun das sehr gute Gefühl, alle Hindernisse überwunden und das Studium erfolgreich abgeschlossen zu haben.

Literaturverzeichnis

- AGEOBW (2009): Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr (AGeoBw); Meridiankonvergenz für die Kartenserie M745 Deutschland 1: 50000, Bezugssystem WGS84
- BARMETTLER (2007): Andreas Barmettler; Photogrammetrische Deponieüberwachung mittels autonomer Mini-Drohnen: Fachhochschule Nordwestschweiz
- BÄUMKER& HEIMES (2001): Prof. Dr. Ing. Manfred Bäumker und Prof. Dr. Ing. Franz Josef Heimes; Neue Kalibrations- und Rechenverfahren zur direkten Georeferenzierung von Bild- und Scannerdaten mittels der Positions- und Winkelmessungen eines hybriden Navigationssystems: Fachhochschule Bochum
- BÜCHI (2012): Roland Büchi; Faszination Quadrocopter, Technik – Elektronik – Flugpraxis: Verlag für Technik und Handwerk, Baden-Baden
- COSGeo MANUAL (2010): COS Systemhaus OHG; COSGeo Handbuch; Version 2010; COS Systemhaus OHG, Ettlingen
- CRAMER (2003): Dr. Ing. Michael Cramer; Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung: Universität Stuttgart
- DASBACH (2010): Jan-Philipp Dasbach; Einsatz von low-cost Unmanned Aerial Vehicles (UAV) bei der Vermessung von Tagebau- oder Deponiegebieten: Fachhochschule Mainz
- GEIPEL (2012): Jakob Geipel; Improved DGNSS-based Positioning ov Micro UAV Platforms for Sensor Web Services: Westfälische Wilhelms-Universität Münster
- HÄSSLER& WACHSMUTH (1990): Dipl.-Ing. Johann Häbler und Dipl.-Ing. (FH) Herbert Wachsmuth; Formelsammlung für den Vermessungsberuf; 4. Auflage: Wilhelm Bing Verlag, Korbach
- KORNMEIER (2012): Der Einsatz von Drohnen zur Bildaufnahme, Eine luftverkehrsrechtliche und datenschutzrechtliche Betrachtung: LIT Verlag, Berlin
- LUHMANN (2011): Thomas Luhmann; Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen; 3. Auflage: Wichmann Verlag, Berlin
- MANSFELD (2010): Werner Mansfeld; Satellitenortung und Navigation, Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme; 3. Auflage: Vieweg + Teubner, Wiesbaden
- MD4-200 MANUAL (2009): Microdrones GmbH; Vorläufige Bedienungsanleitung; Revision 2009-08-25: Microdrones GmbH, Siegen
- MDCOCKPIT3 MANUAL (2012): Microdrones GmbH; Vorläufige Bedienungsanleitung; Revision 2012-05-04: Microdrones GmbH, Siegen
- SCHLEMMER (1996): Dr.-Ing. habil. Harald Schlemmer; Grundlagen der Sensorik, Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure: Wichmann Verlag, Heidelberg
- SIEBERT (2008): Sebastien Siebert; Untersuchung zum Einsatz von Unmanned Aerial Vehicles (UAV) mit Schwerpunkt auf Anwendungen in der Geoinformation: Fachhochschule Mainz
- SIEBERT (2010): Sebastian Siebert; Untersuchungen zur Geodatenerfassung mit einem Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV): Fachhochschule Mainz

STEMPFHUBER et.al. (2000): Dipl. Ing. W. Stempfhuber, Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Schnädelbach, Dr.-Ing. W. Maurer; Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern: Technische Universität München

STEMPFHUBER& KIRSCHNER (2008): Dr. Werner Stempfhuber, Dr. Holger Kirschner; Kinematische Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), Ausgabe 06/2008, S.216 ff.; VDE Verlag GmbH, Offenbach

TRAFO (1999): Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen; Transformation von Koordinaten und Höhen in der Landesvermessung: Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn

ZIEGLER (2011): Marius Ziegler; Photogrammetrische Evaluation multitemporaler UAV-Aufnahmen mit Teilautomatisierung des Auswertungsprozesses: VDV Magazin, Ausgabe 3/2012, S. 208 ff., Verlag Chmierlorz GmbH, Wiesbaden

Internet-Quellen

CALSKY (2012): Webbasierende Sichtbarkeitsanalyse für GPS- und GLONASS-Satelliten:
URL: <http://www.calsky.com/cs.cgi/Intro?> (letzter Zugriff 12.12.2012)

HANSA (2012): Ausführungen zu direkter und indirekter Georeferenzierung:
URL: <http://www.hansaluftbild.de/de/technologie/photogrammetrie/georeferenzierung.html> (letzter Zugriff 12.12.2012)

JAG3D (2012): Java Graticule 3D, ist ein kostenloses zur Ausgleichung von hybriden, geodätischen Netzen, zur Koordinatentransformation, zur Formanalyse und zur Umformung von Koordinaten; Version 3.3.20120910: URL: <http://derletztekick.com> (Aufruf 08.10.2012)

PENTAX (2012): Produktinformation zur Kompaktkamera Optio S1
URL: <http://www.pentax.de/de/Kompaktkameras/optio-s1> (letzter Aufruf 20.09.2012)

SKYFOOL (2012): Webseite für Gleitschirmflieger; hier könne die Lufträume für Deutschland als KML-Dateien für Google Earth heruntergeladen werden: URL: <http://www.skyfool.de/luftraeume/> (Aufruf 18.11.2012)

TRIMBLE (2010): Trimble Planning, ist ein Freeware-Programm zur Sichtbarkeitsanalyse für Satelliten; Version 2.9 (August 2010): URL: http://www.trimble.com/planningsoftware_ts.asp (Aufruf 15.06.2012)

WORLDFILE (2012): Wikipedia-Einträge zum Thema Worldfile, hierbei ist zu beachten, dass es erhebliche Unterschiede zwischen den deutschen, englischen und französischen Ausführungen gibt:
URL: http://de.wikipedia.org/wiki/World_file;
http://en.wikipedia.org/wiki/World_file;
http://fr.wikipedia.org/wiki/World_file

Anhang

Anhang 1 – E-Mail Verkehr zu Beantragung einer Aufstiegsgenehmigung

Kim Wolter

Von: [REDACTED] (LBM Luftverkehr) [REDACTED]@lbm.rlp.de]
Gesendet: Mittwoch, 2. November 2011 11:42
An: Kim Wolter - IB Dhom
Cc: [REDACTED] (LBM Luftverkehr)
Betreff: AW: Noch eine Frage zur Aufstiegsenehmigung [Scanned]

Sehr geehrter Herr Wolter,

hiermit bestätigen wir den Eingang Ihres Antrages auf Aufstieg eines Flugmodells ohne Verbrennungsmotor(en) mit einer Gesamtmasse unter 5 kg zum Zwecke von Luftbildaufnahmen zum Zwecke von wissenschaftlichen Untersuchungen innerhalb Ihrer Master-Arbeit.

Zu Ihrer im u.g. E-Mail gestellten Fragen möchten wir Ihnen nachfolgendes mitteilen:

Der Aufstieg eines Flugmodells ohne Verbrennungsmotor(en) bis zu 5 kg Gesamtmasse bedarf gemäß § 16 Abs. 1 Ziffer 1 Buchstabe a) Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) nicht der Erteilung einer Aufstiegsenehmigung. Um ein Flugmodell handelt es sich entsprechend § 1 Abs. 1 Ziffer 8 Luftverkehr-Zulassungs-Ordnung (LuftVZO) jedoch nur dann, wenn dieses unbemannte Luftfahrzeug in Sichtweite des Steuerers ausschließlich zum Zweck des Sports oder der Freizeitgestaltung betrieben wird.

Der Aufstieg von Flugmodellen aller Art in einer Entfernung von weniger als 1,5 km zu Flugplätzen bedarf jedoch der vorherigen Erteilung einer Aufstiegsenehmigung sowie der Zustimmung der Luftaufsichtsstelle oder der Flugleitung (§ 16 Abs. 1 Ziffer 1 Buchstabe d) LuftVO). Wenn Ihnen beim Aufstieg eines erlaubnisfreien Flugmodells nicht bekannt ist, ob die beabsichtigte Aufstiegsstelle in einer Entfernung von weniger als 1,5 km zu einem Flugplatz sich befindet, stehen wir Ihnen gerne zur Klärung zur Verfügung.

Bei der gewerblichen Nutzung eines Quadropters (MD4-200) zum Zwecke von Luftbildaufnahmen handelt es sich jedoch nicht um den Aufstieg eines Flugmodells sondern um den Aufstieg eines unbemannten Luftfahrtgerätes i.S.d. § 1 Abs. 2 Nr. 11 des Luftverkehrsgesetzes, dessen Aufstieg (immer) der vorherigen Erteilung einer Aufstiegsenehmigung gemäß § 16 Abs. 1 Ziffer 7 LuftVO bedarf.

Diese gesetzliche Regelung trifft nicht nur für Rheinland-Pfalz zu, sondern findet in allen anderen Bundesländern ebenfalls Anwendung.

Eine Aufstiegsenehmigung nach § 16 Abs. 1 Ziffer 7 LuftVO ist gemäß § 16 Abs. 4 LuftVO zu erteilen, wenn die beabsichtigten Nutzungen nicht zu einer Gefahr für die Sicherheit des Luftverkehrs oder der öffentlichen Sicherheit oder Ordnung führen kann. Wann/Ob dies der Fall ist, ist letztendlich eine Einzelfallentscheidung, die von den Gegebenheiten des konkreten Sachverhaltes abhängig ist. Die entsprechende Prüfung beinhaltet unter anderem die Hindernissituation, die Nähe zu Flugplätzen sowie anderen Verkehrseinrichtungen und auch den Abstand zur Wohnbebauung.

Die Erteilung einer „generellen Aufstiegsenehmigung sog. Allgemeinerlaubnis“ ist in Anbetracht der im Einzelfall erforderlichen Prüfungserfordernisse (s.o.) und einer fehlenden bundeseinheitlichen Regelung derzeit nicht möglich.

Wir bitten Sie daher dem Antrag auf Erteilung einer Aufstiegsenehmigung für den jeweiligen Aufstieg eines unbemannten Luftfahrtgerätes insbesondere folgende Unterlagen beizufügen:

- Name und Anschrift des Antragstellers.
Bei Privatpersonen zusätzlich Angabe des Geburtsdatums und Geburtsortes, sowie Staatsangehörigkeit; bei juristischen Personen und Gesellschaften des Handelsrechts sind neben dem Firmensitz die Namen, Anschriften, Geburtsdaten und –orte der vertretungsberechtigten Personen anzugeben.
- Angabe des unbemannten Luftfahrtgerätes (Bezeichnung und Beschreibung, Antriebsart, Gesamtmasse, Fernsteuerung, genutzte Frequenz),
- Angabe der max. Flughöhe über Grund,
- Angabe der Aufstiegsstelle (Gemarkung, Flur- und Flurstücksbezeichnung oder Ort, Straßenbezeichnung und Hausnummer),
- Lageplan im Maßstab 1:5.000 mit Eintrag des Aufstiegsortes und des zu nutzenden Flugraumes,
- Nachweis der vorliegenden Haftpflichtversicherung für das unbemannte Luftfahrtgerät,
- Name, Anschrift, Geburtsdatum u. -Ort der Steuerer,
- Angabe des Zwecks des Aufstieges (z.B. gewerbliche Luftbildaufnahmen),
- Einverständnis des Grundstückseigentümers oder sonstigen Nutzungsberechtigten des Aufstiegsortes,
- Angabe des Zeitraums, wann der Aufstieg erfolgen soll (Datum, Uhrzeit),

- Anzahl der Aufstiege.

Der Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis zum Aufstieg eines unbemannten Luftfahrtgerätes sollte uns möglichst frühzeitig zugehen. Für die Erteilung einer Erlaubnis zum Aufstieg eines unbemannten Luftfahrtgerätes ist je nach Verwaltungsaufwand eine Bearbeitungszeit von 3 Wochen nicht auszuschließen.

Die Gebühr für die Erteilung einer Einzelerlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtgeräten richtet sich nach den §§ 1 und 2 LuftKostV i.V.m. Abschnitt VI Nr. 16 a) des Gebührenverzeichnisses. Je nach Verwaltungsaufwand kann von der Luftfahrtbehörde hierfür eine Gebühr zwischen 30,00 EUR und 500,00 EUR erhoben werden. Hinzu können ggfs. noch Gebühren für die Beteiligung anderer Behörden kommen.

Neben den luftverkehrsrechtlichen Anforderungen möchten wir Sie allgemein auf den Datenschutz und etwaige zivilrechtliche Regelungen verweisen, die je nach Art und Weise der Ausübung oder Verwendung zu beachten wären.

Des Weiteren weisen wir darauf hin, dass ein Aufstieg eines unbemannten Luftfahrtgerätes sowie eines erlaubnispflichtigen Flugmodells ohne Vorliegen einer entsprechenden Aufstiegserlaubnis ein Verstoß gegen die LuftVO darstellt, der jeweils entsprechend als Ordnungswidrigkeit mit einer Geldbuße bis zu 50.000,00 EUR geahndet werden kann.

Für weitere Fragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen
Im Auftrag

[Redacted]

LandesBetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz (LBM RP)
-Fachgruppe Luftverkehr-
Gebäude 890
55483 Hahn-Flughafen

[Redacted]

Web: www.lbm.rlp.de



Bitte denken Sie an die Umwelt, bevor Sie diese E-Mail drucken

Von: Kim Wolter - IB Dhom [Redacted]

Gesendet: Montag, 31. Okt [Redacted]

An: [Redacted]

Betreff: Noch eine Frage zur Aufstiegsgenehmigung [Scanned]

Sehr geehrte Frau Rosenbach-Huth,

vielen Dank zunächst schon einmal für Ihre Unterstützung bei meiner Master-Arbeit.
Zusätzlich zur eben gesendeten Antrag habe ich noch einen Punkt, den ich gerne wissen würde:

In Ihrer Mail vom 29.09.2011 schreiben Sie, dass der Ausstieg eines Flugmodells ohne Verbrennungsmotor mit einer Gesamtmasse bis zu 5kg eigentlich keiner Aufstiegsenehmigung bedürfe.

Meine Fragen dazu:

1. Gilt das auch für die gewerbliche Nutzung der Drohne, oder nur für die private Nutzung?
2. Muss der Aufstieg dennoch angemeldet werden, oder kann ich einfach losfliegen?
3. Wo kann ich recherchieren, ob mein geplantes Einsatzgebiet innerhalb einer genehmigungspflichtigen Zone liegt, oder muss ich das generell mit Ihnen abstimmen?

Es wäre super, wenn Sie mir diese Fragen noch beantworten können.

Schöne Grüße

Kim Wolter

Kim Wolter

Betreff: WG: Aufstiegsgenehmigung Mikro-Drohne zu wissenschaftlichen Zwecken
Anlagen: Lageplan_Antrag.pdf; Trainingsprotokoll Wolter.pdf; Trainingsprotokoll Dhom.pdf; Haftpflichtversicherung_md4-200.pdf; Genehmigung_Stadt_Bad-Kreuznach.pdf

Von: Kim Wolter - IB Dhom
Gesendet: Montag, 31. Oktober 2011 10:10
An: (b) (6) (Erkehr)
Betreff: Aufstiegsgenehmigung Mikro-Drohne zu wissenschaftlichen Zwecken

Sehr geehrte Frau Rosenbach-Huth,

hiermit beantrage ich eine Aufstiegsenehmigung für eine Mikrodrohne zum Zweck der wissenschaftlichen Untersuchungen, im Zuge meiner Master-Arbeit.
Anbei die von Ihnen gewünschten Angaben:

Antragsteller:

Herr Kim Wolter

Tel.: 0670 (b) (6)

Mobil: 0170 (b) (6)

Geboren (b) (6)

Staatsangehörigkeit: deutsch

Flugmodell:

microdrone md4-200

Antriebsart: Quattrokofter, Elektromotoren

Kamera: Pentax Optio S1, 12Mio Pixel, 3fach opt. Zoom

Gesamtmasse: ca. 900g

Fernsteuerung: RC ROYALpro

Frequenz: 35Mhz Kanal62

Downlink (Telemetriedaten): 2,4 GHz

Maximale Flughöhe über Grund:

35m

Aufstiegsstelle:

Pfingstwiese, Bad Kreuznach

Flur 1, Flurstück 50/15

Ausdehnung des Fluggebiets ca. 50x50m

Siehe auch beigefügten Lageplan „Lageplan_Antrag.PDF“

Haftpflichtversicherung:

Siehe beigefügte Bescheinigung „Haftpflichtversicherung_md4-200.pdf“

Steuerer:

Herr Kim Wolter - siehe Antragsteller

Siehe beigefügte Trainingsbescheinigung „Trainingsprotokoll Wolter.pdf“

Herr Alois Dhom

Staatsangehörigkeit: deutsch

Siehe beigefügte Trainingsbescheinigung „Trainingsprotokoll Dhom.pdf“

Zweck des Aufstiegs:

Luftbildaufnahmen (senkrecht nach unten) für wissenschaftliche Untersuchungen innerhalb einer Master-Arbeit.

Der Antragsteller studiert an der Paris-Lodron-Universität Salzburg

Einverständnis des Grundstückseigentümers:

siehe beigefügte Genehmigung „Genehmigung_Stadt_Bad-Kreuznach.pdf“

Zeitraum:

KW48,49, oder 50, das genaue Datum ist wetterabhängig.

Der Aufstiege erstrecken sich über einen Zeitraum von max. 2 Tagen.

Die Aufstiege werden zwischen 8:30Uhr und 15:30 Uhr durchgeführt.

Anzahl der Aufstiege:

Maximal 10 Aufstiege

Ich hoffe, dass ich Ihnen alle erforderlichen Angaben zur Verfügung gestellt habe. Sollten die für die Aufstiegs Genehmigung erhobenen Gebühren deutlich über 150€ liegen, bitte ich Sie vorher Kontakt mit mir aufzunehmen.

Für Rückfragen stehe ich Ihnen natürlich gerne zur Verfügung.

Schöne Grüße aus Gau-Bickelheim

Kim Wolter

E-Mail ist virenfrei.

Von AVG überprüft - www.avg.de

Version: 2013.0.2805 / Virendatenbank: 2634/5958 - Ausgabedatum: 14.12.2012

Trainingsprotokoll

***Basistraining & Bedienung des Systems
md4-200***



microdrones GmbH

Gutenbergstraße 86

D-57078 Siegen / Germany

Phone: +49 (0)271 7700380

Fax: +49 (0)271 77003811

E-mail: info@microdrones.com

Teilnehmer:

Firma: *Ingenieurbüro Dhou*

Nachname: *Wolter*

Vorname: *Kim (Herr)*

In dem heute durchgeführten Training durch die Firma microdrones GmbH hat der Teilnehmer folgende Kenntnisse vermittelt bekommen:

Allgemein:

- Rechtsgrundlage des Betriebes einer md4-200
- Versicherungspflicht (Haftpflicht)
- Anmeldepflicht des Videosenders
- Einstufung als Dual-use Gut

System md4-200:

- Funktion und Inbetriebnahme des Systems md4-200 und der Komponenten
- Handling des Systems
- Handhabung und Umgang mit den Akkus

Flugpraxis:

- theoretische Voraussetzungen
- physikalische Einflüsse
- Wahl des Flugfeldes
- Downwash und Bodeneffekt
- Start
- Landung
- Windeinfluß
- Temperatureinfluß
- praktische Flugübungen
- Post Flight Check
- Safety Instructions

Der Teilnehmer hat obenstehende Inhalte vermittelt bekommen und seine Fragen sind verständlich beantwortet worden.

Unterschrift Teilnehmer:



Unterschrift Ausbilder:



Siegen, 19.10.2011

Anhang 2 – Aufstiegsgenehmigung



LBM RLP - Fachgruppe Luftverkehr - Gebäude 890 - 55483 Hahn-Flughafen

Herrn
Kim Wolter



**LANDESBETRIEB
MOBILITÄT
RHEINLAND-PFALZ**

**FACHGRUPPE
LUFTVERKEHR**

Ihre Nachricht:
vom

Unser Zeichen:

Ihre Ansprechpartnerin:

Durchwahl:

Datum:
14.11.2011



Erteilung einer Erlaubnis zum Aufstieg eines Flugmodells

Aufstiegserlaubnis

I.

Gemäß § 16 Abs. 1 Ziffer 1 Buchstabe d) und Abs. 4 der Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) i.V.m. § 29 Abs. 1 Luftverkehrsgesetz (LuftVG) wird Ihnen hiermit die widerrufliche Erlaubnis erteilt, im Rahmen der unten genannten Auflagen eines Flugmodells mit Elektromotor zu betreiben:

Aufstiegsort:

Pfingstwiese /Bad Kreuznach, Gemarkung Bad Kreuznach, Flur 5, Flurstück 50/15 (Anlage 1)

Umfang der Aufstiegserlaubnis:

Aufstieg eines ferngesteuerten Flugmodells (Microdrohne MD4-200/Quadrocopter) mit Elektroantrieb und incl. Kamera mit einer Gesamtmasse bis zu 5 kg zum Zwecke von Luftbildaufnahmen für wissenschaftliche Untersuchungen innerhalb einer Master-Arbeit von Herrn Wolter

Aufstiegszeiten:

Ab der 48. Kalenderwoche (ab 28.11.2011) bis Ende 50. Kalenderwoche (bis 18.12.2011).
Innerhalb des v.g. Zeitrahmens an insgesamt 2 Tagen insgesamt 10 Aufstiege in der Zeit von 08.30 Uhr bis 15.30 Uhr, außer Mittwochs und Samstags.

Besucher:
Gebäude 890
55483 Hahn-Flughafen

Fon: (06543) 5088-01
Fax: (06543) 5088-00
Web: www.lbm.rlp.de

Bankverbindung:
RLP Bank (LBBW)
BLZ 600 501 01
Konto-Nr. 7401507624

Geschäftsführung:
Dipl.-Ing. Bernd Hölzgen
Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Heinz Rethage



Rheinland-Pfalz

Steuerer des Flugmodells:

Herrn Kim Wolter, 
derzeit wohnhaft in 
und
Herrn Alois Dhom, 
derzeit wohnhaft in 

II.

Widerrufsvorbehalt, Vorbehalt weiterer Anordnungen

1. Die Erlaubnis wird unter dem Vorbehalt des jederzeitigen Widerrufs erteilt.

Der Widerruf kommt insbesondere in Betracht, wenn

- nachträgliche Tatsachen bekannt werden, bei deren Kenntnis die Erlaubnis nicht erteilt worden wäre,
 - nachträgliche Änderungen in rechtlicher oder tatsächlicher Hinsicht eintreten, die zu Tatsachen führen, aufgrund derer die Erlaubnisbehörde diese Erlaubnis nicht erteilt hätte, wenn sie bereits zum Zeitpunkt der Erlaubniserteilung bestanden hätten,
 - der Flugbetrieb zu Störungen oder Beeinträchtigungen der öffentlichen Sicherheit oder Ordnung führt und dies durch geeignete Nebenbestimmungen nicht vermieden werden kann,
 - fortgesetzt oder erheblich gegen die Festlegungen dieses Erlaubnisbescheides oder sonstige einschlägige Rechtsvorschriften verstoßen wird.
2. Die mit diesem Bescheid erteilten Nebenbestimmungen sind einzuhalten. Die Festlegung weiterer Nebenbestimmungen und Beschränkungen im Interesse der Sicherheit des Luftverkehrs oder zur Aufrechterhaltung der öffentlichen Sicherheit oder Ordnung bleiben vorbehalten.

III.

Nebenbestimmungen

1. Das in Ziffer I benannte Flugmodell ist so zu betreiben, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Personen und Sachen, nicht gefährdet oder gestört werden.
2. Die Zustimmung sämtlicher Grundstückseigentümer bzw. Verfügungsberechtigter müssen vorliegen und für die Dauer der Erlaubnis aufrechterhalten werden.
3. Das Flugmodell darf nur von den in der Erlaubnis als „Steuerer“ genannten Personen gesteuert werden.
4. Vor jedem Aufstieg des Flugmodells (mindestens 2 Tage vorher) muss die Zustimmung der Luftaufsichtsstelle oder der Flugleitung des Krankenhauses St. Marienwörth (Tel. 0671/372-0) bzw. der Rettungsleitstelle Bad Kreuznach (Tel. 0671/19222) vorliegen.

Seite 2 von 6

5. Der Betrieb des Flugmodells über Menschenansammlungen, Unglücksorten und Katastrophengebieten ist nicht gestattet.
6. Es dürfen keine Personen oder Tiere über- bzw. angefliegen werden.

Zwischen dem Flugmodell und anderen Personen sowie zu öffentlichen Verkehrswegen, Hochspannungsleitungen und anderen Hindernissen muss ein ausreichender lateraler Sicherheitsabstand eingehalten werden. Die Beurteilung eines gesicherten Abstandes ist vom Steuerer vorzunehmen, dass jegliche Belästigung und Gefährdung ausgeschlossen ist.
7. Der Betrieb des Flugmodells darf nur unter den Bedingungen und innerhalb der Betriebsgrenzen der Betriebsanleitung bzw. der Gebrauchsanweisung des Herstellers und in Sichtweite des Steuerers¹ erfolgen. Der automatisch-autonome Betrieb (z.B. mittels GPS-waypoint-Navigation) ist nur erlaubt, wenn der Steuerer jederzeit mit Hilfe der Funkfernsteuerung eingreifen kann.
8. Das Flugmodell muss über eine sogenannte Fail-Safe-Funktion (Autolandung) für Fernsteuerausfall und schwache Akkuladung sowie ein GPS-Modul für Positionsstabilisierung (Position Hold) verfügen.
9. Der Aufstieg des Flugmodells darf nur in dem festgelegten Flugraum, der im Lageplan rot gekennzeichnet ist, stattfinden (Anlage1).

Der Flugraum ist strikt einzuhalten und darf auf keinen Fall überschritten werden.
10. Die Flughöhe des Flugmodells von max. 35 m über Grund darf nicht überschritten werden.
11. Für die Vorbereitung des Betriebes sind vom Steuerer alle wesentlichen Informationen über die örtlichen Gegebenheiten, die zum Zeitpunkt des Einsatzes des Flugmodells herrschenden meteorologischen Bedingungen einzuholen.
12. Beim Betrieb des Flugmodells ist auf weiteren Flugverkehr zu achten. Das Flugmodell hat bemannten Luftfahrzeugen immer auszuweichen.
13. Es dürfen nur Funkanlagen (Telemetrieanlagen) verwendet werden, die den für solche Anlagen geltenden Vorschriften entsprechen. Die für die Anlagen geltenden Bestimmungen und Verfügungen der Bundesnetzagentur sind zu beachten.
14. Bei Anzeichen von Funkstörungen ist der Flugbetrieb unverzüglich solange einzustellen, bis die Störquelle eindeutig ermittelt und ausgeschaltet wurde.
15. Der Erlaubnisinhaber hat einen Nachweis über den Einsatz des Flugmodells mit folgenden Angaben zu führen:
 - Name des Steuerers,
 - Datum und Uhrzeit des Aufstieges,
 - Zweck des Aufstieges,
 - Einsatzort,
 - Dauer des Einsatzes
 - Anzahl von Starts und Landungen,
 - Besonderheiten, Vorkommnisse, Betriebsstörungen.

¹ Der Betrieb erfolgt gemäß § 15a Abs. 3 Satz 2 LuftVO außerhalb der Sichtweite des Steuerers, wenn das Luftfahrtgerät ohne besondere optische Hilfsmittel nicht mehr zu sehen oder eindeutig zu erkennen ist.

16. Die Aufzeichnungen sind zwei Jahre aufzubewahren und der ausstellenden Behörde auf Verlangen vorzulegen.
17. Unfälle mit Personen- oder schweren Sachschäden oder sonstige nicht nur geringfügige Störungen im Zusammenhang mit der Ausübung dieser Erlaubnis sind dem Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz, Fachgruppe Luftverkehr, Gebäude 890, 55483 Hahn-Flughafen unverzüglich anzuzeigen.
18. Für die Regulierung von Personen- und Sachschäden, die durch das Luftfahrtgerät entstehen könnten, muss eine ausreichende Haftpflichtversicherung nach den Vorschriften §§ 37 Abs. 1 a), 43 LuftVG i. V. m. §§ 101 ff. Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung abgeschlossen sein.
19. Die Aufstiegserlaubnis oder eine beglaubigte Kopie davon ist beim Betrieb des Flugmodells mitzuführen und auf Verlangen vorzuweisen.

IV.

Hinweise

1. Mit Hilfe des Flugmodells darf nicht in den räumlich-gegenständlichen Bereich der privaten Lebensgestaltung Dritter eingedrungen werden (z.B. Persönlichkeitsrecht, Urheberrecht).
2. Diese Erlaubnis ersetzt nicht nach anderen gesetzlichen Vorschriften erforderliche öffentlich- oder privatrechtliche Zustimmungen, Genehmigungen oder Erlaubnisse, soweit dies nicht gesetzlich vorgesehen ist und befreit nicht von der Einhaltung der Vorschriften und sonstigen Bestimmungen, die bei der Teilnahme am Luftverkehr zu beachten sind. Sie ist auch nicht übertragbar.
3. Die Erlaubnisbehörde ist berechtigt nachzuprüfen, ob die Voraussetzungen, die für die Erteilung der Genehmigung maßgebend waren, fortbestehen und ob der Flugbetrieb ordnungsgemäß durchgeführt wird. Sie kann die hierfür notwendigen Auskünfte verlangen, Überprüfungen durchführen und ggf. weitere Nebenbestimmungen festlegen.
4. Zuwiderhandlungen gegen die Nebenbestimmungen dieses Bescheides können als Ordnungswidrigkeit geahndet werden, soweit sie nicht nach anderen Vorschriften mit Strafe bedroht sind.
5. Die einschlägigen Vorschriften und Verordnungen, insbesondere die Bestimmungen des LuftVG und der LuftVO, sind einzuhalten.

V.

Kostenentscheidung

Die Kosten für diesen Bescheid hat der Antragsteller zu tragen.

Die Gebühr wird in Höhe von **90,00 EUR** festgesetzt.

Die Gebühr für die Luftfahrtbehörde beruht auf §§ 1 und 2 Kostenverordnung der Luftfahrtverwaltung (LuftKostV) i.V.m. Abschnitt VI Nr. 16 a) des Gebührenverzeichnisses (Anlage zu § 2 Abs. 1 LuftKostV).

Die Gebühr ist mit der Bekanntgabe des Bescheides fällig und auf das Konto der Rheinland-Pfalz Bank (LBBW), BLZ 600 501 01, Konto-Nr. 740 150 7624 unter Angabe der **Referenz-Nr. VIII131603000480** zu zahlen.

Gründe:

Mit E-Mail beantragt Herr Kim Wolter, Gau-Bickelheim die Erteilung einer Erlaubnis zum Aufstieg eines Flugmodells (Microdrohne MD4-200/Quadrocopter) mit Elektroantrieb und incl. Kamera mit einer Gesamtmasse bis zu 5 kg zum Zwecke von Luftbildaufnahmen für wissenschaftliche Untersuchungen innerhalb einer Master-Arbeit von Herrn Wolter.

Die von Herrn Wolter beantragte Aufstiegsstelle (Pfungstwiese) befindet sich in weniger als 1,5 km zu dem Hubschrauberlandeplatz des Krankenhauses St. Marienwörth Bad Kreuznach, sodass für den Aufstieg die Erteilung einer Erlaubnis zum Aufstieg eines Flugmodells sowie die Zustimmung der Luftaufsichtsstelle oder der Flugleitung des Landeplatzes gemäß § 16 Abs. 1 Ziffer 1 Buchstabe d) LuftVO erforderlich ist.

Die Stadtverwaltung Bad Kreuznach hat keine Bedenken gegen den Aufstieg des Flugmodells auf der beantragten Aufstiegsstelle. Jedoch verweist Sie darauf, dass zum Zeitpunkt von Flohmärkten auf der Pfungstwiese (Mittwochs und Samstags) keine Aufstiege stattfinden dürfen.

Die Kreisverwaltung Bad Kreuznach (Untere Naturschutzbehörde) hat gegen den geplanten Aufstieg keine Bedenken, wenn die im Biotopkataster erfassten Bereiche (Nahe und Uferbereich der Nahe) nicht beeinträchtigt bzw. gestört werden.

Unter Beachtung der Regelungen und Nebenbestimmung der v.g. Aufstiegserlaubnis sollte es nicht zu einer Gefahr für den Luftverkehr sowie für die öffentliche Sicherheit oder Ordnung kommen.

Die Aufstiegserlaubnis für den Aufstieg eines Flugmodells auf dem beantragten Aufstiegs-gelände konnte antragsgemäß erteilt werden.

Die im Erlaubnisbescheid angeordneten Nebenbestimmungen sind gemäß § 29 Abs. 1 LuftVG i.V.m. § 16 Abs. 1 und 4 LuftVO zur Vermeidung von Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung geboten.

Seite 5 von 6

Rechtsbehelfsbelehrung

Gegen diesen Bescheid kann innerhalb eines Monats nach Bekanntgabe Widerspruch erhoben werden. Der Widerspruch ist bei dem Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz, Fachgruppe Luftverkehr, Gebäude 890, 55483 Hahn-Flughafen oder bei dem Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz, Friedrich-Ebert-Ring 14-20, 56068 Koblenz schriftlich oder zur Niederschrift einzulegen.

Im Auftrag
Gez.



Anlage: Lageplan mit Eintrag des festgelegten Flugraumes (Anlage 1)

Anhang 3 – Aufstiegsgenehmigung – Beispiel Sachsen

	Regierungspräsidium Dresden
<small>Regierungspräsidium Dresden Postfach 10 05 55 - 01074 Dresden</small>	
	<p>Dresden, 07.04.2008 Telefon: (0351) 8 25- 3614 Telefax: (0351) 8 25- 9309 E-Mail: *  Bauh.  Aktenzeichen:  <small>(Bitte bei Antwort angeben)</small></p>
<p>Vollzug des Luftverkehrsgesetzes (LuftVG) und der Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO); Allgemeine Erlaubnis für den Betrieb eines ferngesteuerten Flugkörpers mit Eigenantrieb im Freistaat Sachsen Ihr Antrag vom 13.02.2008, nebst nachgereichter Unterlagen</p>	
<p>Das Regierungspräsidium Dresden erteilt für den Betrieb eines ferngesteuerten Flugkörpers mit Eigenantrieb gemäß § 25 Abs. 1 LuftVG i. V. m. § 16 Abs. 1 Nr. 5, Abs. 4 und 5 LuftVO folgende</p>	
Allgemeine Betriebserlaubnis	
I.	
Betreiber:	
Art des Flugkörpers:	ferngesteuerter Flugkörper mit (Elektro-) Eigenantrieb vom Typ: VTOL-Miniaturdrohne md4-200 (nachfolgend Flugdrohne genannt)
Umfang der Erlaubnis:	Betrieb der o. g. Flugdrohne bis zu einer maximalen Höhe von 100 m über Grund (ü. GND)
Zweck:	gewerblicher Einsatz zur Anfertigung von Foto- und Videoaufnahmen
Geltungsbereich:	Gebiet des Freistaates Sachsen
Betriebszeiten:	täglich von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang (SR bis SS)
Befristung:	Die Erlaubnis ist bis zum 31.12.2008 befristet.
<small>Dienstgebäude: Straßenbergallee 2 01099 Dresden</small>	<small>Telefon-Zentrale: (03 51) 8 25-0 Telefax: (03 51) 8 25 99 99 E-Mail: post@rpd.sachsen.de Internet: http://www.rp-dresden.de</small>
	<small> gebührenfreie Parkplätze zu erreichen mit Straßenbahnlinie 11 und Straßenlinie 91</small>
<small>* kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente</small>	<small>telefonische Terminsprache wird empfohlen</small>

Anhang 4 – Koordinatenvergleich GNSS mit Importdaten in mdCockpit

GPS (WGS84)		Import GK in md-Cockpit		Differenz-Strecke
N/Breite	W/Länge	N/Breite	W/Länge	
49,8258771139 °	7,8821114056 °	49,8258838891 °	7,8821202621 °	1,2399199884 m
49,8258109944 °	7,8822059389 °	49,8258177724 °	7,8822147911 °	1,2397228193 m
49,8257450056 °	7,8823003000 °	49,8257517799 °	7,8823091503 °	1,2393099976 m
49,8256790806 °	7,8823943056 °	49,8256858559 °	7,8824031602 °	1,2397612037 m
49,8256131500 °	7,8824888250 °	49,8256199276 °	7,8824976703 °	1,2390886988 m
49,8255515333 °	7,8823865000 °	49,8255583152 °	7,8823953541 °	1,2401539919 m
49,8256178000 °	7,8822922528 °	49,8256245785 °	7,8823011004 °	1,2393545354 m
49,8256836972 °	7,8821977806 °	49,8256904711 °	7,8822066325 °	1,2394236673 m
49,8257498917 °	7,8821031694 °	49,8257566679 °	7,8821120185 °	1,2393278046 m
49,8258159306 °	7,8820089806 °	49,8258227069 °	7,8820178386 °	1,2401290328 m
49,8257548083 °	7,8819070278 °	49,8257615830 °	7,8819158727 °	1,2388569936 m
49,8256890778 °	7,8820014056 °	49,8256958517 °	7,8820102540 °	1,2391176234 m
49,8256229750 °	7,8820960528 °	49,8256297543 °	7,8821049075 °	1,2400354030 m
49,8255568250 °	7,8821902083 °	49,8255636070 °	7,8821990615 °	1,2400806193 m
49,8254910944 °	7,8822844694 °	49,8254978742 °	7,8822933170 °	1,2394335640 m
49,8254297806 °	7,8821823694 °	49,8254365604 °	7,8821912168 °	1,2394219232 m
49,8254957861 °	7,8820880361 °	49,8255025621 °	7,8820968857 °	1,2393583650 m
49,8255617500 °	7,8819934583 °	49,8255685254 °	7,8820023050 °	1,2390605708 m
49,8256279889 °	7,8818995333 °	49,8256347647 °	7,8819083848 °	1,2395121386 m
49,8256938167 °	7,8818049056 °	49,8257005924 °	7,8818137511 °	1,2389840432 m
49,8256328306 °	7,8817028972 °	49,8256396117 °	7,8817117407 °	1,2391676531 m
49,8255670222 °	7,8817972000 °	49,8255737990 °	7,8818060544 °	1,2398364780 m
49,8255007889 °	7,8818916028 °	49,8255075733 °	7,8819004469 °	1,2394455706 m
49,8254349139 °	7,8819860028 °	49,8254416893 °	7,8819948451 °	1,2386778343 m
49,8253687611 °	7,8820803139 °	49,8253755437 °	7,8820891656 °	1,2399919660 m

Anhang 5 – Beispielauswertung CALSKY

CalSky - the Daily Astronomical Calendar

<http://www.calsky.com/observer/print.php?pid=50007077054227&ob...>

Globales Navigations-Satellitensystem GNSS (GPS/GLONASS)

Datum	Zeit h m	Sats	PDOP	TDOP	SV0	1	2	3				
					SV12345678901234567890123456789012							
14. Mai.	06:00	9	+ 2.31	1.14	>X		X X X		<			
14. Mai.	06:05	9	+ 2.26	1.09	>X		X X X		<			
14. Mai.	06:10	8	+ 2.43	1.25	>X		X X	X	<			
14. Mai.	06:15	8	+ 2.46	1.25	>		X X	X	X<			
14. Mai.	06:20	8	+ 2.47	1.26	>		X X	X	X<			
14. Mai.	06:25	8	+ 2.48	1.27	>		X X	X	X<			
14. Mai.	06:30	8	+ 2.50	1.28	>		X X	X	X<			
14. Mai.	06:35	7	> 3.11	1.85	>		X	X	XX<			
14. Mai.	06:40	7	> 3.22	1.94	>		X	X	XX<			
14. Mai.	06:45	7	> 3.34	2.05	>	X	X		XX<			
14. Mai.	06:50	8	+ 2.64	1.38	>X		X X		X <			
14. Mai.	06:55	9	+ 2.06	0.93	>	X		X	X <			
14. Mai.	07:00	9	+ 2.13	0.98	>	X		X	X <			
14. Mai.	07:05	9	+ 2.20	1.04	>	X		X	X <			
14. Mai.	07:10	9	+ 2.27	1.11	>	X		X	X <			
14. Mai.	07:15	9	+ 2.33	1.13	>	X	X		X <			
14. Mai.	07:20	9	+ 2.34	1.13	>	X	X		X <			
14. Mai.	07:25	9	+ 2.35	1.13	>	X	X		X <			
14. Mai.	07:30	9	+ 2.36	1.13	>	X	X		X <			
14. Mai.	07:35	9	+ 2.37	1.12	>	X	X		X <			
14. Mai.	07:40	9	+ 2.37	1.12	>	X	X		X <			
14. Mai.	07:45	10	+ 2.05	0.88	>		XX			X	X <	
14. Mai.	07:50	9	+ 2.55	1.17	>X		X			X	X <	
14. Mai.	07:55	9	+ 2.43	1.14	>X		X			X	X <	
14. Mai.	08:00	9	+ 2.34	1.10	>X		X			X	X <	
14. Mai.	08:05	9	+ 2.27	1.07	>X		X			X	X <	
14. Mai.	08:10	9	+ 2.21	1.04	>X		X			X	X <	
14. Mai.	08:15	9	+ 2.16	1.01	>X		X			X	X <	
14. Mai.	08:20	10	+ 2.12	0.90	>XX					X	X <	
14. Mai.	08:25	10	+ 2.09	0.88	>XX					X	X <	
14. Mai.	08:30	10	+ 2.07	0.85	>XX					X	X <	
14. Mai.	08:35	11	+ 2.02	0.80	> X		X			X	X <	
14. Mai.	08:40	9	+ 2.29	0.98	> X		X			X	X<	
14. Mai.	08:45	9	+ 2.24	0.98	> X			X	X		X<	
14. Mai.	08:50	8	+ 2.38	1.06	> X		X			X	X<	
14. Mai.	08:55	8	+ 2.42	1.10	> X		X			X	X<	
14. Mai.	09:00	9	+ 2.19	1.03	> X		X			X	X <	
14. Mai.	09:05	9	+ 2.27	1.10	> X		X			X	X <	
14. Mai.	09:10	9	+ 2.36	1.17	> X		X			X	X <	
14. Mai.	09:15	8	+ 2.47	1.26	> X		X			X	X <	
14. Mai.	09:20	8	+ 2.58	1.35	> X		X			X	X <	
14. Mai.	09:25	8	+ 2.70	1.45	> X		X			X	X <	
14. Mai.	09:30	9	+ 2.71	1.45	> X		X		X	X	<	
14. Mai.	09:35	9	> 2.80	1.53	> X		X	X	X			<
14. Mai.	09:40	9	> 2.84	1.59	> X		X	X	X			<
14. Mai.	09:45	10	+ 2.26	0.98	> X		X	X				X <
14. Mai.	09:50	10	+ 2.29	1.00	> X		X	X				X <
14. Mai.	09:55	11	* 1.97	0.82	>	X	X	X	X			<

Montag, 14. Mai 2012

Objekt (Link)	Beschreibung
Beobachtungsort	Testfeld, Germany WGS84: Lon: +7d52m56.1s Lat: +49d49m31.9s Höhe: 254m Alle Zeiten in MEZ oder MESZ (im Sommer)

Alle Rechte bei CalSky.com von Arnold Barmettler. Ausdrücke dürfen nur für persönliche Verwendung erstellt werden. Es dürfen keine elektronische Kopien für

Anhang 6 – Auswertung Tachymetertracking – Lage und Höhe

SOLL		IST-Tracking				IST-Drohne				Höhe (Boden)	
Rechts	Höhe (Boden)	Rechts - korrigiert	Hoch-korrigiert	Strecke Prismen	RiWi	Höhe (Luft) - korrigiert	Hoch	Höhe (Luft)	Relative Höhe	Höhe über Grund	Höhe (Boden)
32419596,064	207,465	32419597,355	5519868,529	0,424	53,403	242,010	5519869,443	238,700	33,900	35,000	203,700
32419602,753	207,420	32419603,517	5519862,502	0,434	48,756	242,627	5519862,749	238,800	33,900	34,700	204,100
32419609,431	207,623	32419609,278	5519855,469	0,408	47,904	242,544	5519855,967	238,700	33,900	34,400	204,300
32419616,083	207,787	32419615,468	5519847,765	0,442	63,489	242,514	5519848,551	238,900	34,000	34,300	204,500
32419622,771	207,788	32419623,295	5519840,010	0,451	49,800	242,429	5519841,291	238,700	33,900	34,000	204,800
32419615,310	208,235	32419615,294	5519833,937	0,435	46,971	243,080	5519835,337	239,700	34,900	34,700	205,000
32419608,641	208,170	32419608,465	5519840,180	0,630	76,335	242,957	5519841,254	239,800	35,000	35,000	204,800
32419601,956	207,926	32419602,138	5519847,552	0,434	51,350	241,954	5519849,112	238,800	34,000	34,200	204,500
32419595,260	207,743	32419597,517	5519855,255	0,416	46,755	242,446	5519854,554	238,000	33,200	33,700	204,400
32419588,596	207,659	32419589,201	5519862,829	0,430	52,830	242,903	5519862,778	238,100	33,200	34,000	204,100
32419581,161	207,939	32419581,370	5519857,616	0,419	46,857	243,428	5519856,916	238,500	33,600	34,200	204,300
32419587,840	208,072	32419586,881	5519850,186	0,433	54,999	244,186	5519849,998	239,400	34,500	34,900	204,500
32419594,539	208,294	32419593,690	5519842,413	0,488	54,902	243,505	5519842,660	238,700	33,900	34,000	204,700
32419601,201	208,470	32419601,489	5519834,702	0,358	61,076	243,589	5519834,917	239,000	34,200	34,000	205,000
32419607,871	208,497	32419607,655	5519828,075	0,422	52,562	243,420	5519827,538	239,100	34,300	33,900	205,200
32419600,426	208,539	32419600,709	5519821,108	0,537	107,843	243,160	5519822,837	239,300	34,400	33,900	205,400
32419593,751	208,555	32419593,565	5519826,434	0,437	26,121	241,415	5519828,070	238,100	33,300	32,900	205,200
32419587,057	208,417	32419586,387	5519833,303	0,426	56,155	240,869	5519835,541	237,600	32,800	32,600	205,000
32419580,412	208,340	32419577,376	5519838,805	0,423	55,559	241,029	5519842,626	237,500	32,800	32,800	204,800
32419573,715	208,170	32419571,333	5519847,922	0,376	49,398	241,477	5519850,345	237,600	32,800	33,100	204,500
32419566,277	208,314	32419567,345	5519843,842	0,415	55,104	242,052	5519844,793	237,700	32,900	33,000	204,700
32419572,951	208,555	32419572,891	5519836,573	0,428	58,766	242,264	5519837,209	237,700	32,900	32,800	204,900
32419579,630	208,614	32419579,246	5519827,826	0,373	63,658	242,321	5519828,921	237,600	32,900	32,800	205,200
32419586,311	208,733	32419585,650	5519822,350	0,453	62,294	244,332	5519822,549	239,500	34,800	34,100	205,400
32419592,985	208,757	32419592,784	5519813,864	0,375	56,859	243,999	5519814,268	239,200	34,400	33,500	205,700
SOLL / IST_Tracking		Lageabweichung		Lageabweichung		Höhenabweichung (Luft)		Höhenabweichung (Boden)		Lageabweichung 3D	
		IST-Tracking / IST-Drohne	SOLL / IST-Drohne	IST-Tracking / IST-Drohne	SOLL / IST-Tracking	Höhenabweichung über Grund	IST-Tracking-SOLL / IST-Drohne	SOLL / IST-Drohne	IST-Tracking / IST-Drohne	IST-Tracking / IST-Drohne	IST-Tracking / IST-Drohne
2,426	0,990	0,962	1,511	3,310	34,545	-0,456	3,765	3,320	3,446	3,867	3,867
0,990	0,990	0,558	0,464	3,827	35,207	0,507	3,320	3,320	3,867	3,867	3,867
0,791	0,791	0,899	0,942	3,844	34,921	0,521	3,323	3,323	3,947	3,947	3,947
0,975	0,975	0,801	0,823	3,614	34,727	0,427	3,287	3,287	3,701	3,701	3,701
0,156	0,156	1,376	0,460	3,729	34,641	0,641	2,988	2,988	3,974	3,974	3,974
1,391	1,391	1,402	1,247	3,380	34,845	0,145	3,235	3,235	3,659	3,659	3,659
1,446	1,446	1,084	0,449	3,157	34,787	-0,213	3,370	3,370	3,338	3,338	3,338
2,553	2,553	1,581	0,461	3,154	34,028	-0,172	3,426	3,426	3,528	3,528	3,528
1,222	1,222	0,903	2,537	4,446	34,703	1,003	3,343	3,343	4,537	4,537	4,537
0,461	0,461	0,159	1,345	4,803	35,244	1,244	3,559	3,559	4,806	4,806	4,806
1,035	1,035	0,708	0,427	4,928	35,489	1,289	3,639	3,639	4,978	4,978	4,978
0,852	0,852	0,277	0,782	4,786	36,114	1,214	3,572	3,572	4,794	4,794	4,794
0,344	0,344	0,496	0,523	4,805	35,211	1,211	3,594	3,594	4,831	4,831	4,831
0,632	0,632	0,323	0,054	4,589	35,119	1,119	3,470	3,470	4,600	4,600	4,600
0,438	0,438	0,775	0,777	4,320	34,923	1,023	3,297	3,297	4,389	4,389	4,389
1,789	1,789	1,739	2,065	3,860	34,621	0,721	3,139	3,139	4,233	4,233	4,233
2,439	2,439	1,665	0,189	3,315	32,860	-0,041	3,355	3,355	3,709	3,709	3,709
5,270	5,270	2,741	0,920	3,269	32,452	-0,148	3,417	3,417	4,266	4,266	4,266
3,534	3,534	4,786	0,511	3,529	32,689	-0,111	3,540	3,540	5,947	5,947	5,947
1,068	1,068	3,730	0,490	3,877	33,307	0,207	3,670	3,670	5,380	5,380	5,380
0,141	0,141	0,958	1,331	4,352	33,738	0,738	3,614	3,614	4,456	4,456	4,456
1,217	1,217	0,727	0,868	4,564	33,709	0,909	3,655	3,655	4,621	4,621	4,621
1,034	1,034	1,096	0,446	4,721	33,707	1,307	3,414	3,414	4,847	4,847	4,847
0,310	0,310	0,413	1,038	4,832	35,599	1,499	3,333	3,333	4,849	4,849	4,849
0,310	0,310	0,407	0,303	4,799	35,242	1,742	3,057	3,057	4,816	4,816	4,816

Anhang 7 – Auswertung Tachymetertracking - Richtungswinkel

Punktnummer	RiWi-Tracking [°]	Meridiankonvergenz [°]	RiWi-Tracking [°] (korrigiert)	RiWi-Drohne [°]	RiWi-Drohne [°] (+360°)	RiWi-SOLL [°]	RiWi-SOLL [°] (+360°)	SOLL/Tracking [°]	SOLL/Drohne [°]	Drohne/Tracking [°]
1001	318,063	-0,89	318,953	-39,9	320,1	-42,7	317,3	-0,76306	-2,8	2,03694
1002	313,880	-0,89	314,770	-43,2	316,8	-42,7	317,3	3,41960	0,5	2,91960
1003	313,114	-0,89	314,004	-42,2	317,8	-42,7	317,3	4,18604	-0,5	4,68604
1004	327,140	-0,89	328,030	-43,1	316,9	-42,7	317,3	-9,83974	0,4	-10,23974
1005	314,820	-0,89	315,710	-42,2	317,8	-42,7	317,3	2,47964	-0,5	2,97964
1006	312,274	-0,89	313,164	-44,3	315,7	-42,7	317,3	5,02628	1,6	3,42628
1008	316,215	-0,89	317,105	-42,4	317,6	-42,7	317,3	1,08509	-0,3	1,38509
1009	312,079	-0,89	312,969	-47,3	312,7	-42,7	317,3	5,22068	4,6	0,62068
1010	317,547	-0,89	318,437	-42,5	317,5	-42,7	317,3	-0,24691	-0,2	-0,04691
1011	312,172	-0,89	313,062	-43,6	316,4	-42,7	317,3	5,12834	0,9	4,22834
1012	319,499	-0,89	320,389	-41,8	318,2	-42,7	317,3	-2,19928	-0,9	-1,29928
1015	317,306	-0,89	318,196	-43,5	316,5	-42,7	317,3	-0,00598	0,8	-0,80598
1017	293,509	-0,89	294,399	-68,3	291,7	-42,7	317,3	23,79092	25,6	-1,80908
1018	320,540	-0,89	321,430	-42,6	317,4	-42,7	317,3	-3,23977	-0,1	-3,13977
1019	320,003	-0,89	320,893	-42,8	317,2	-42,7	317,3	-2,70301	0,1	-2,80301
1020	314,458	-0,89	315,348	-43,1	316,9	-42,7	317,3	2,84153	0,4	2,44153
1021	319,593	-0,89	320,483	-44,1	315,9	-42,7	317,3	-2,29342	1,4	-3,69342
1022	322,889	-0,89	323,779	-42,6	317,4	-42,7	317,3	-5,58895	-0,1	-5,48895
1024	326,065	-0,89	326,955	-43,1	316,9	-42,7	317,3	-8,76451	0,4	-9,16451
1025	321,173	-0,89	322,063	-43,2	316,8	-42,7	317,3	-3,87310	0,5	-4,37310

Anhang 8 – Auswertung 3D-Helmertransformations – Nick- und Rollwinkel

	Tx =	Ty =	Tz =	q0 =	q1 =	q2 =	q3 =	Mx =	My =	Mz =	Rx = [rad]	Ry = [rad]	Rz = [rad]	Rx = (°)	Ry = (°)	Rz = (°)	
1001 Route1Bild1	32419591,127256	5519843,331780	208,148507	-0,946285	0,010031	-0,010796	-0,322998	0,009387	0,009387	0,009387	0,025963	6,269233	5,625138	1,487570	359,200592	322,296667	
1002 Route1Bild2	32419598,737881	5519835,840331	208,419702	-0,931453	0,012536	-0,011981	-0,363447	0,009518	0,009518	0,009518	0,032071	6,269978	5,538925	1,837533	359,243277	317,357026	
1003 Route1Bild3	32419603,713874	5519828,251640	208,709732	-0,931544	0,015440	-0,012455	-0,363087	0,009529	0,009529	0,009529	0,037822	6,271192	5,539648	2,167041	359,312834	317,398450	
1004 Route1Bild4	32419610,308503	5519821,292261	208,665506	-0,932506	0,010006	-0,014500	-0,360725	0,009472	0,009472	0,009472	0,029133	6,263359	5,544687	1,669198	358,864036	317,687164	
1005 Route1Bild5	32419618,339105	5519813,266990	208,602987	0,931175	-0,006587	0,015662	0,364177	0,009427	0,009427	0,009427	0,023684	6,258812	5,537286	1,356993	358,603512	317,263118	
1006 Route1Bild6	32419610,832197	5519806,671485	208,717708	0,928533	-0,004631	0,012567	0,371008	0,009522	0,009522	0,009522	0,017930	6,263283	5,522747	1,027313	358,859682	316,430094	
1007 Route1Bild7	32419603,927614	5519813,289934	208,810930	0,928044	-0,008118	0,011527	0,372204	0,009397	0,009397	0,009397	0,023654	6,267833	5,520159	1,355274	359,120378	316,281813	
1008 Route1Bild8	32419595,545840	5519821,337553	208,894331	0,939292	-0,013991	0,010015	0,342686	0,009256	0,009256	0,009256	0,033155	6,273959	5,583376	1,899642	359,471372	319,903880	
1009 Route2Bild1	32419592,861693	5519828,110919	208,649541	0,923474	-0,011646	0,010786	0,383332	0,009459	0,009459	0,009459	0,029785	6,272193	5,496115	1,706555	359,370187	314,904193	
1010 Route2Bild2	32419581,720737	5519836,193894	208,439968	0,943928	-0,011052	0,009384	0,329832	0,009623	0,009623	0,009623	0,027059	6,272760	5,610720	1,550366	359,402674	321,470576	
1011 Route2Bild3	32419575,152138	5519831,110252	208,703926	0,938280	-0,013591	0,008349	0,345507	0,009694	0,009694	0,009694	0,031279	6,276910	5,577434	1,792155	359,640451	319,563429	
1012 Route2Bild4	32419580,027370	5519823,425915	208,884899	-0,941999	0,013367	-0,007804	-0,335260	0,009825	0,009825	0,009825	0,030421	6,277445	5,599251	1,742995	359,671105	320,813451	
1013 Route2Bild5	32419587,378759	5519815,495045	208,990771	-0,935855	0,011353	-0,008444	-0,352101	0,009602	0,009602	0,009602	0,027199	6,275375	5,563374	1,558388	359,552502	318,757850	
1014 Route2Bild6	32419586,024538	5519813,291363	208,958132	0,973655	-0,009548	0,007122	0,227715	0,009941	0,009941	0,009941	0,021839	6,273665	5,823588	1,251283	359,454527	333,667014	
1015 Route2Bild7	32419601,552862	5519801,451699	208,808445	0,937471	-0,003574	0,008588	0,347940	0,009574	0,009574	0,009574	0,012678	6,269570	5,572322	0,726396	359,219900	319,270533	
1016 Route2Bild8	32419594,142111	5519795,285401	208,894481	0,942381	-0,003131	0,005875	0,334474	0,009415	0,009415	0,009415	0,009832	6,274207	5,601031	0,563332	359,485581	320,915437	
1017 Route3Bild1	32419593,750055	5519802,929218	208,971643	0,864146	-0,006285	0,006332	0,503162	0,008988	0,008988	0,008988	0,017235	6,278566	5,228593	0,987493	359,735333	299,576312	
1018 Route3Bild2	32419576,936427	5519812,383571	209,009489	-0,951816	0,009998	-0,005493	-0,306457	0,008921	0,008921	0,008921	0,022401	6,278856	5,660158	1,283483	359,751949	324,303165	
1019 Route3Bild3	32419567,432133	5519816,791811	209,047934	-0,949563	0,012839	-0,005631	-0,313264	0,008950	0,008950	0,008950	0,027915	6,280534	5,645827	1,599412	359,848091	323,482059	
1020 Route3Bild4	32419562,306620	5519826,561225	208,915629	0,950829	-0,017107	0,004834	0,309207	0,008995	0,008995	0,008995	0,035530	0,001386	5,654390	2,035719	0,079412	0,079412	323,972683
1021 Route3Bild5	32419563,628950	5519814,414359	209,130249	-0,949978	0,012754	-0,005921	-0,312001	0,009306	0,009306	0,009306	0,027931	6,279894	5,648477	1,600328	359,811422	323,633893	
1022 Route3Bild6	32419563,021046	5519813,277838	209,199660	-0,950329	0,013194	-0,006387	-0,310902	0,009307	0,009307	0,009307	0,029053	6,279250	5,650775	1,600461	359,774524	323,765558	
1023 Route3Bild7	32419569,310317	5519805,890107	209,199976	-0,947600	0,009453	-0,006558	-0,319251	0,009733	0,009733	0,009733	0,022105	6,276792	5,633193	1,266523	359,633690	322,758184	
Mittelwert:			208,816006	0,036186	0,000944	0,000655	0,024859	0,009428	0,009428	0,009428	0,025899	6,000220	5,581618	1,483896	343,787262	319,803154	

Anhang 9 – Auswertung 3D-Helmerttransformation - Richtungswinkel

3D Helmert		
Rz = [°]	RiWi-Tracking [°] (korrigiert)	Differenz [°]
322,29667	318,95306	3,34361
317,35703	314,77040	2,58663
317,39845	314,00396	3,39449
317,68716	328,02974	-10,34258
317,26312	315,71036	1,55276
316,43009	313,16372	3,26637
319,90388	317,10491	2,79897
314,90419	312,96932	1,93487
321,47058	318,43691	3,03367
319,56343	313,06166	6,50177
320,81345	320,38928	0,42417
319,27053	318,19598	1,07455
299,57631	294,39908	5,17723
324,30316	321,42977	2,87339
323,48206	320,89301	2,58905
323,97268	315,34847	8,62421
323,63389	320,48342	3,15047
323,76556	323,77895	-0,01339

Anhang 10 – Auswertung 2D-Helmertransformations

Bildname	Anzahl der Passpunkte	Maßstabsfaktor	Drehwinkel	mittlerer Punktfehler	Schwerpunkt Alt Y	Schwerpunkt Alt X	Schwerpunkt Neu Y	Schwerpunkt Neu X	Strecke Schwerpunkte Alt / Neu	Delta Y	Delta X
Bild_1_1	15	0,971006	2,395300	0,1060	32419593,540	5519863,865	32419594,185	5519862,185	1,799	-0,645	1,680
Bild_1_2	18	0,998171	0,855500	0,0498	32419598,483	5519858,147	32419598,816	5519856,262	1,915	-0,333	1,885
Bild_1_3	18	1,008584	0,049400	0,0557	32419605,624	5519851,629	32419605,488	5519848,821	2,812	0,136	2,808
Bild_1_4	18	1,000980	1,311700	0,0575	32419612,485	5519843,890	32419612,164	5519841,379	2,531	0,321	2,511
Bild_1_5	12	1,000018	0,088400	0,0318	32419615,466	5519841,111	32419615,501	5519837,663	3,448	-0,036	3,448
Bild_1_6	16	0,991294	1,336800	0,0826	32419612,041	5519837,943	32419611,780	5519834,326	3,627	0,261	3,617
Bild_1_7	24	0,988686	0,336000	0,1010	32419608,869	5519841,446	32419608,442	5519838,042	3,430	0,426	3,404
Bild_1_8	21	0,981798	2,942100	0,0623	32419605,087	5519850,745	32419603,866	5519846,887	4,047	1,221	3,858
Bild_2_1	24	1,020533	2,667700	0,1329	32419595,670	5519854,313	32419595,095	5519852,923	1,504	0,576	1,390
Bild_2_2	20	1,026048	4,480500	0,0768	32419591,675	5519860,773	32419590,465	5519858,846	2,275	1,210	1,927
Bild_2_3	20	1,028616	3,582700	0,0534	32419583,788	5519852,937	32419583,018	5519852,172	1,086	0,771	0,765
Bild_2_4	27	1,022551	3,179400	0,0636	32419586,940	5519850,170	32419586,232	5519849,083	1,297	0,708	1,087
Bild_2_5	25	1,026974	3,135200	0,0823	32419594,175	5519843,604	32419592,774	5519841,583	2,460	1,401	2,022
Bild_2_6	24	1,030187	3,696300	0,0685	32419601,435	5519833,104	32419600,999	5519831,365	1,793	0,436	1,739
Bild_2_7	19	1,027120	3,226000	0,0657	32419602,774	5519829,646	32419602,726	5519828,852	0,796	0,047	0,794
Bild_2_8	15	1,010971	3,800000	0,0470	32419597,821	5519825,249	32419597,678	5519822,345	2,907	0,143	2,903
Bild_3_2	19	0,996249	7,758200	0,3349	32419589,297	5519837,776	32419585,670	5519837,231	3,668	3,627	0,544
Bild_3_3	18	0,992910	6,986200	0,3815	32419582,454	5519846,467	32419576,874	5519843,301	6,416	5,580	3,167
Bild_3_4	13	0,989446	7,862400	0,2513	32419579,101	5519849,712	32419574,157	5519848,354	5,127	4,944	1,358
Bild_3_5	16	1,026203	8,585000	0,3190	32419570,730	5519849,872	32419575,084	5519842,954	8,174	-4,355	6,918
Bild_3_6	15	1,033133	7,080700	0,3098	32419576,262	5519842,390	32419574,679	5519842,004	1,629	1,583	0,385
Bild_3_7	16	1,093289	5,860000	0,2408	32419583,645	5519833,513	32419581,757	5519835,511	2,749	1,888	-1,998
Mittel:	--	1,012035	3,691614	0,1454	--	--	--	--	2,977	1,393	2,282
Max:	--	1,093289	8,585000	0,3815	--	--	--	--	8,174	5,580	6,918
Min:	--	0,971006	0,049400	0,0318	--	--	--	--	0,796	0,036	0,3855

Anhang 11 – Auswertung Streckendifferenzen

Bildname	Distanz-IST	Distanz-SOLL	Differenz
Route_1_5	9,991	9,969	0,022
Route_1_5	9,997	10,017	-0,020
Route_1_5	10,050	10,013	0,037
Route_1_5	9,987	9,977	0,010
Route_1_5	10,047	9,998	0,049
Route_1_5	10,018	10,023	-0,005
Route_1_5	10,003	10,014	-0,011
Route_1_5	9,980	9,951	0,029
Route_1_5	10,041	10,015	0,026
Route_1_5	10,043	10,065	-0,022
Route_1_5	9,911	9,948	-0,037
Route_1_5	9,965	10,015	-0,050

Route_1_1	10,033	9,988	0,045
Route_1_1	10,232	9,981	0,251
Route_1_1	10,207	10,000	0,207
Route_1_1	10,040	9,984	0,056
Route_1_1	10,170	10,031	0,139
Route_1_1	10,370	10,016	0,354
Route_1_1	10,317	9,980	0,337
Route_1_1	10,353	10,023	0,330
Route_1_1	10,313	10,027	0,286
Route_1_1	10,269	10,020	0,249
Route_1_1	10,279	10,041	0,238
Route_1_1	10,282	9,991	0,291
Route_1_1	10,374	9,975	0,399

Route_3_4	9,970	10,034	-0,064
Route_3_4	9,861	10,003	-0,142
Route_3_4	9,792	10,005	-0,213
Route_3_4	10,122	10,015	0,107
Route_3_4	10,143	9,999	0,144
Route_3_4	10,029	10,009	0,020
Route_3_4	10,183	9,987	0,196
Route_3_4	10,246	9,999	0,247
Route_3_4	10,324	9,995	0,329
Route_3_4	10,412	9,997	0,415
Route_3_4	10,419	9,982	0,437
Route_3_4	9,975	9,999	-0,024
Route_3_4	10,135	9,992	0,143
Route_3_4	10,308	9,995	0,313
Route_3_4	10,444	10,009	0,435