

Frank Niemeyer

**Konzept und prototypische Umsetzung
eines „Four Vision“-Kamerasystems mit Anwendungen
in kommunalen und landwirtschaftlichen Bereichen
für den Einsatz auf UAVs (Unmanned Aerial Vehicle)**

München 2015

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



Konzept und prototypische Umsetzung
eines „Four Vision“-Kamerasystems mit Anwendungen
in kommunalen und landwirtschaftlichen Bereichen
für den Einsatz auf UAVs (Unmanned Aerial Vehicle)

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Rostock

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Frank Niemeyer

aus Tessin

geb. am 10.07.1976 in Rostock

München 2015

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

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

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

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

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

Gutachter:

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill, Professur für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Norbert Haala, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart
3. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach, Geodätisches Institut, RWTH Aachen

Datum der Einreichung: 29.07.2014

Datum der Verteidigung: 05.12.2014

Diese Dissertation ist auf dem Server der Deutschen Geodätischen Kommission unter <http://dgk.badw.de/>
sowie auf dem Server der Universität Rostock unter
http://rosdok.uni-rostock.de/resolve/id/rosdok_disshab_0000001290 elektronisch publiziert

© 2015 Deutsche Geodätische Kommission, München

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

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5153-9

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Mehrkammersystem mit schrägblickenden Kameras für den Einsatz an unbemannten Trägerplattformen, in diesem Fall speziell für eine MD4-1000 der Firma microdrones, konzipiert, gebaut, kalibriert und getestet. Die MD4-1000 steht als Quadrocopter mit einem Abfluggewicht bis zu 5 kg stellvertretend für die Gruppe der Micro-UAV und innerhalb dieser Gruppe für die sogenannten VTOL-Modelle (vertical takeoff and landing). Diese Modelle brauchen keine Start- bzw. Landebahn und zeichnen sich vor allem durch eine relativ große Traglast aus, mit der sie per Autopilot eine bestimmte Flugroute abfliegen können. Sie sind gut geeignet, kleine Amateurkameras zu tragen und damit Bilder aus der Luft aufzunehmen.

Bereits in den Anfängen der Photogrammetrie gab es erste Versuche mit Drachen, Brieftauben oder kleinen Raketen stellvertretend für unbemannte Trägerplattformen und mitgeführten Kameras, Bilder aus der Luft aufzunehmen. Jedoch ist es erst durch die fortschreitende Entwicklung in der Computertechnik, der Sensortechnik, der Digitalkameratechnik und in der Materialforschung möglich geworden, UAV mit entsprechend hochwertigem Aufnahmeequipment auszurüsten und damit professionelle Bildflüge durchzuführen.

Anhand von verschiedenen Anwendungsszenarien wurde das Potenzial dieser innovativen Vermessungstechnik mit einer Digitalkamera gezeigt. Es entstanden Orthophotos, OrthoDEMs und 3D-Punktwolken mit bis zu einem Zentimeter Bodenaufösungen in Abhängigkeit der Flughöhe. Damit sind Genauigkeitsgrenzen erreicht, mit denen Deformationsanalysen, Verlagerungen oder Vermessungen für viele Anwendungsbereiche möglich sind. Zudem werden mehr und mehr schräge Luftbilder aufgenommen, mit deren Hilfe Punktwolken geometrisch stabiler berechnet werden können. Außerdem konnte gezeigt werden, wie sich das Reflexionsverhalten von Oberflächen aus unterschiedlichen Blickrichtungen bei einseitiger Bestrahlung verändert.

Das „Four Vision“-Kammersystem orientiert sich an bereits existierenden großmaßstäbigeren und schwereren Kammersystemen. Die vier schrägblickenden Kameras bilden zusammen mit der Nadirkamera, synchron ausgelöst, die Oberfläche in Form eines „Malteser Kreuzes“ ab. Mit dieser Aufnahmekonstellation kann das Kammersystem größere Fläche sowie senkrechte Fassaden oder Texturen richtungsabhängig erfassen.

Damit das „Four Vision“-Kammersystem auch in Kombination mit dem UAV funktionieren kann, wurden im Vorfeld Kriterien zur Wahl der verwendeten Hardware aufgestellt und entsprechende Bauteile erworben, getestet und kalibriert. Zum einen musste das Nutzlastgewicht des UAV und zum anderen die elektrische Leistungsaufnahme berücksichtigt werden. Hinzu kommen Kriterien zur Konstruktion, wie z.B. Schwerpunktlage oder Flugbewegungskompensation. Besonders wichtig sind die Stabilitätsuntersuchungen der inneren und äußeren Orientierungsparameter der Kameras. Außerdem wurden Softwaretools zur Steuerung der Kameras programmiert.

Es konnte ein Kammersystem gebaut werden, das offiziell 250 g zu schwer für die MD4-1000 ist, aber dennoch von ihr getragen werden kann. Eine leichtere Kamerahalterung wird derzeit entwickelt. Momentan kann das Kammersystem über eine Parameterdatei alle Kameras entsprechend konfigurieren, gleichzeitig auslösen und die Bilder sowohl Schwarz/Weiß als auch farblich (RGB) verlustfrei in Tiff-Dateien speichern. Einige radiometrische Untersuchungen konnten im gewünschten Umfang jedoch nicht durchgeführt werden.

Die Funktionstüchtigkeit des Kammersystems konnte durch zwei Befliegungen unter Beweis gestellt werden. Dabei wurde für Anwendungen im Agrarbereich das Versuchsfeld der Universität Rostock und für kommunale Anwendungen der Campus der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät befliegen. Das Ziel, die Konzeptionierung, die Entwicklung und der Bau eines Mehrkammersystems mit einer Nadir- und vier schrägblickenden Kameras für den UAV-Einsatz, konnte erfolgreich erreicht werden.

Abstract

Within the scope of this work a multi-camera system with oblique-looking cameras was designed, built, calibrated and tested for the use on an unmanned aerial vehicle (UAV). An MD4-1000 from the company “microdrones” was available as a carrier system. It is a quadcopter with a maximum take-off weight (MTOW) of 5 kg belonging to the so called micro-UAV class. Furthermore it is a vertical takeoff and landing (VTOL) vehicle which does not require any runway. This UAV class offers a relatively big payload making it well suited to carry small amateur cameras to capture images from the air.

Already in the early days of photogrammetry there were first experiments with kites, pigeons and even small rockets which were applied as unmanned aerial vehicles carrying cameras to take pictures from above. However, only thanks to the progressive development in computer, sensor and digital camera technology as well as advances within the field of materials science, it is nowadays possible to equip a UAV with corresponding high-quality recording equipment to perform professional photogrammetric flights.

The potential of this innovative measurement technique applying a digital camera was demonstrated in this work on the basis of various application scenarios. The technique resulted in orthophotos, orthoDEMs (digital elevation model) as well as 3D point clouds with up to one centimeter ground resolution depending on the altitude. It was shown that exceptional accuracy limits can be reached which allow not only for deformation and displacement analyses but also for a broad variety of other possible surveys. In addition, an ever growing number of oblique aerial images are taken making the calculations of point clouds geometrically more stable. Furthermore, changes in the reflection of surfaces from different perspectives during the same conditions of irradiation were shown.

The "Four Vision" camera system is based on existing bigger and heavier camera systems. When triggered synchronously the four oblique-looking cameras and the nadir camera cover an area in the shape of a Maltese cross. The camera system is able to cover larger areas, even allowing the capturing of vertical facades as well as textures depending on its direction.

To make the “Four Vision” camera system work in combination with a UAV, a set of preliminary criteria has been established for the choice of hardware. The payload of the UAV, electrical power and other criteria in the design, e.g. flight motion compensation as well as balance had to be taken into account. The selected components were acquired, tested and calibrated. The stability analyses of the interior and exterior orientation parameters of the cameras were very important. In addition, software tools were programmed to control the cameras.

A camera system was built which although being officially 250g too heavy can still be carried by the MD4-1000. A lighter camera mount is currently being developed. At the moment the camera system can configure all cameras via a parameter file. All cameras will be triggered synchronously. Images can be saved as black and white or as colored TIF-files. However, some radiometric investigations could not be carried out to the desired extent yet.

The scope of possible applications of the camera system was proven by two aerial surveys. On the one hand agricultural applications were demonstrated when the test field of the University of Rostock was photographed. On the other hand a test flight took place at the campus of the Faculty of Agricultural and Environmental Sciences in Rostock representing the potential of the technology for municipal applications. The goal of the conceptual design, development and construction of a multi-camera system with one nadir and four oblique-looking cameras for UAV-use was successfully achieved.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	7
1.1 Motivation	7
1.2 Zielsetzung	8
1.3 Aufbau der Arbeit	8
2 Luftbildphotogrammetrie	10
2.1 Entwicklung der Photogrammetrie	10
2.2 Flugplanung für Senkrechtaufnahmen	11
2.3 Flugplanung für schräge Luftbilder	13
2.4 Aerotriangulation	15
2.5 Bewegungsunschärfe in Luftbildern	17
2.6 Die aktuelle digitale Luftbildphotogrammetrie	19
2.7 Schrägblickende Kamerasysteme	21
2.8 Auswertesoftware	24
2.8.1 „Australis“	24
2.8.2 „Photoscan“ von Agisoft	25
2.8.3 „Pix4UAV“ von Pix4D	25
3 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)	28
3.1 Einführung	28
3.2 Micro-UAVs in der Luftbildphotogrammetrie	32
3.3 Zum Workflow für Befliegungen mit UAVs	34
3.3.1 Vorbereitung	34
3.3.2 Flugplanung	34
3.3.3 Flug	35
3.3.4 Auswertung	36
3.4 Rechtliche Rahmenbedingungen in Deutschland	36
4 Photogrammetrisches Potential von Micro-UAV	38
4.1 Anwendungspotential und Nutzlasten	38
4.1.1 Agrar- und Forstbereich	38
4.1.2 3D-Stadtmodelle	39
4.1.3 Flurneuordnung	39
4.1.4 Bauwesen und Archäologie	39
4.1.5 Real Time Datenerfassung und unzugängliche Gebiete	40
4.2 Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der UAV-Photogrammetrie in verschiedenen Anwendungssegmenten	41
4.2.1 Deichvermessung und -monitoring	41
4.2.2 Küstendeckwerksüberwachung	48
4.2.3 Vogelzählung	53
4.2.4 Standortkartierung für Boden und Vegetation	56
5 Konzept und Umsetzung eines „Four Vision“-Kamerasystems für UAVs	63
5.1 Idee und Konzept	63
5.2 Kriterien zur Wahl der Hardwarekomponenten	64
5.3 Hardwarekomponenten	65
5.3.1 MD4-1000	65
5.3.2 Kameras	66
5.3.3 Objektive	68
5.3.4 Steuereinheit der Kameras (CPU)	70

5.3.5	Speichermodul	71
5.3.6	Stromkonverter	71
5.3.7	Mikrokontroller für synchrones Auslösen	72
5.3.8	Kamerahalterung.....	72
5.4	Bodenauflösung und Fokussierung.....	75
5.5	Softwarekomponenten	77
5.6	Emittierendes Elektromagnetisches Feld.....	80
6	Photogrammetrische Eigenschaften des „Four Vision“-Kamerasystems	84
6.1	Einführung.....	84
6.2	Geometrische Eigenschaften	84
6.2.1	Einheitlichkeit baugleicher Komponenten.....	84
6.2.2	Parameterstabilität der inneren Orientierung.....	85
6.3	Radiometrische Eigenschaften.....	91
6.3.1	Helligkeitsrandabfall, Randabschattung (Vignettierung)	91
6.3.2	Signal/Rausch-Verhältnis	93
6.4	Auflösungsvermögen.....	94
6.5	Modulationsübertragungsfunktion.....	97
6.6	Praktische Untersuchungen zur Stabilität der Kamerahalterung	101
6.6.1	Bestimmung der relativen Orientierungen mit Australis	101
6.6.2	Relative Kameraorientierungen vor dem Testflug.....	103
6.6.3	Relative Kameraorientierungen nach dem Testflug	105
6.6.4	Fazit	108
7	Funktionstest und Anwendung des „Four Vision“-Kamerasystems.....	110
7.1	Voraussetzungen.....	110
7.2	Befliegung: Versuchsfeld	111
7.3	Befliegung: Universitätsgelände mit Gebäuden	117
7.4	Fazit	122
8	Ausblick.....	123
	Abkürzungsverzeichnis	124
	Abbildungsverzeichnis	126
	Tabellenverzeichnis.....	129
	Literatur	130
	Danksagung	138

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Angebot an unbemannten Trägerplattformen - auch Drohnen, UAVs (unmanned aerial vehicle), bzw. als Oberbegriff UAS (unmanned aerial system, schließt alle Komponenten ein → Fernbedienung, Bodenstation, Trägerplattform) oder RPAS (remotely piloted aircraft systems) genannt - erlebt derzeit auf dem Markt einen Hype. Für die unterschiedlichsten Einsatzgebiete (z.B. militärisch, zivil, privat) werden UAVs bedarfsgerecht produziert, angeboten und eingesetzt. U.a. ergeben sich für photogrammetrische und fernerkundliche Zwecke neue Möglichkeiten, Daten über gewünschte Gebiete kostengünstig, schnell und individuell zu gewinnen.

Im Bereich der Geodäsie, Photogrammetrie und Fernerkundung werden Kameras seit über 100 Jahren für Luftaufnahmen verwendet. Im Gegensatz zu klassischen Befliegungen mit hochauflösenden Kameras von Flugzeugen aus großen Höhen, können UAVs punktgenau oder über eine programmierbare, wiederholbare Flugroute in geringeren Höhen Befliegungen in verschiedenen Geschwindigkeiten bis hin zum Schwebeflug vornehmen und dabei individuelle Luftaufnahmen vom Zielgebiet erstellen. Seitenansichten, z.B. von Häuserfassaden, erweitern das Informationsspektrum abgebildeter Objekte und ermöglichen eine stabilere und genauere Berechnung von 3D-Punktwolken der Objektoberflächen.

Die Auswahl an UAVs ist sehr groß. Einen umfangreichen Überblick geben (Blyenburgh & Co., 2012). Interessant für photogrammetrische und fernerkundliche Zwecke ist der zivile Markt um die Micro- (max. Abfluggewicht inkl. Nutzlast: 5 kg) und Mini-UAVs (max. Abfluggewicht inkl. Nutzlast: 25 kg), da die rechtlichen Rahmenbedingungen noch überschaubar sind und in diesen Segmenten bereits professionelle Kameras von UAVs getragen werden können. Derzeitig am Markt erhältliche Mikro-UAV bieten bereits bis zu 2.5 kg Nutzlast an. Als Beispiel können hier der OktokopterXL von Microcopter (2.5 kg,¹), der Flugroboter HT-8-2000 von Height Tech (2 kg,²) aber auch die AR200 von AirRobot (1.5 kg,³) genannt werden. Die MD4-1000 von Microdrones wird mit 1.2 kg Nutzlast angegeben.

In vielen Fällen wird die Bedienung des UAV von zwei Personen übernommen. Der Pilot steuert dabei das UAV während zeitgleich der Kameramann die Kamera am UAV bedient. I.d.R. handelt es sich bei den Kameras um Amateurgeräte, die an speziell schwenkbaren Aufhängungen befestigt sind und mit Servomotoren geneigt und gerollt werden können. Gerade bei den sogenannten VTOL-Modellen (Vertical Takeoff und Landing) werden diese Konstruktionen standardmäßig verbaut. Schräge Luftaufnahmen, die in der klassischen Luftbildphotogrammetrie seltener gemacht und verwendet wurden, werden nun in Verbindung mit UAVs häufiger erstellt. Sie geben dem Betrachter einen gewohnten Blick auf Objekte. Schräge Luftbilder werden gern zur Gebietserkundung aber auch für Inspektionen verwendet.

UAVs dienen als Trägerplattformen für verschiedenste Sensorik. In Verbindung mit Kamera- oder Scannertechnik etablieren sich diese Systeme immer mehr in der Geodäsie, Photogrammetrie und Fernerkundung als Erweiterung klassischer Methoden. Es obliegt dem Nutzer, seine klassischen Datenerfassungsgeräte und Berechnungsalgorithmen an diese neuartige Technik anzupassen oder für den Gebrauch an UAVs neu zu entwickeln.

¹ <http://www.mikrokoetter.de/ucwiki/KomplettsetUebersicht>

² <http://www.height-tech.com/de/home/flugroboter-ht82000000004.html>

³ <http://www.airrobot.de/index.php/produkte.html>

1.2 Zielsetzung

Gegenstand dieser Dissertation ist die Konzeptionierung, die Entwicklung und der Bau sowie Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten eines Mehrkameranystems mit schrägblickenden Kameras für den Einsatz an Micro-UAVs. Dazu soll das Leistungspotential von Micro-UAVs in einem ersten Schritt mit einer Digitalkamera, die kardanisch mit dem UAV verbunden ist, untersucht und dabei standardisierte Workflows und Qualitätsparameter abgeleitet werden.

Die Aufgabe des Mehrkameranystems soll darin bestehen, zum einen flächenhaft georeferenzierte Informationen z.B. im Bereich Precision Farming zu liefern und zum anderen Seitenansichten von Objekten zu ermöglichen (z.B. Fassaden). Durch die schrägblickenden Kameras werden bei den Befliegungen sehr hohe Redundanzen in den Überlappungsbereichen der Bilder erreicht. Objekte werden dadurch nicht nur von oben sichtbar aufgenommen, sondern können aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. Für die Erstellung von Orthophotos soll eine Nadirkamera verantwortlich sein.

Schrägblickende Kameras eignen sich durch eine bessere Schnittgeometrie sehr gut zur Erzeugung von 3D-Punktwolken z.B. für die Erzeugung von digitalen Oberflächenmodellen (DOM) oder Objektmodellen. Bei schrägen, jedoch aus verschiedenen Blickwinkeln gemachten, Aufnahmen wird das abgebildete Objekt bei einseitiger Bestrahlung, wie sie bei wolkenlosen Tagen durch die Sonne geschieht, nicht von allen Seiten gleichmäßig bestrahlt und somit unterschiedlich hell in den Bildern dargestellt. Hieraus lässt sich bei radiometrisch kalibrierten Kameras das Reflexionsverhalten der abgebildeten Oberflächen empirisch bestimmen. Diese gerichteten Signaturen können Aufschluss in Form von Vegetationsindizes geben, aus denen dann Rückschlüsse über den Vitalitätszustand der abgebildeten Vegetation gewonnen werden können (KIRCHGÄBNER, 2013).

Schrägblickende Kameras steigern zudem die Flächenleistung des UAV und lassen außerdem die Detektion von Hindernissen zu, da ein Teil des Flugweges mit abgebildet wird. Die Detektion von Hindernissen bedarf jedoch einer Auswertung der Luftbilder „on the fly“. Das bedeutet, dass entweder die Bilder auf einem mitgeführten Computer oder live über die Bodenstation analysiert werden müssen.

Diese Dissertation entstand im Projekt „PFIFFikus - Innovative Photogrammetrie für Micro UAV's“ gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus in Mecklenburg-Vorpommern. An der Professur für Geodäsie und Geoinformatik wurde in diesem Zusammenhang stellvertretend für die Senkrechtstarter und -lander eine MD4-1000 (Quadrokopter) der Firma Microdrones inkl. Digitalkamera und Kamerahalterung als Trägerplattform des „Four Vision“-Kameranystems angeschafft.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Schwerpunkt dieser Dissertation liegt in der Konzeptionierung und Entwicklung sowie dem Bau und der Kalibrierung eines Mehrkameranystems mit schrägblickenden Kameras für den Einsatz an Micro-UAVs. Die Bandbreite an Anforderungen und zu berücksichtigenden Einflüssen für die Entwicklung und den Bau eines solchen Kameranystems ist enorm.

Im Kapitel 2 sind die wichtigsten photogrammetrischen Grundlagen dieser Dissertation zusammengefasst. Es wird auf die Entwicklung der Luftbildphotogrammetrie sowie auf die aktuelle digitale Luftbildphotogrammetrie eingegangen. Dem folgen wichtige Aspekte für die normale Flugplanung, die Flugplanung mit schräg aufgenommenen Luftbildern und deren mathematischen Zusammenhängen. Zudem werden Hinweise für die Aerotriangulation mit Hilfe von Passpunkten am Boden gegeben und auf die UAV-Bewegungsarten, die zur Unschärfe in Luftbildern führen, eingegangen. Außerdem werden verschiedene existierende Mehrkameranysteme, die verwendete Auswertesoftware sowie deren Workflows vorgestellt.

Kapitel 3 behandelt das Thema UAV. Verschiedene UAV-Plattformen werden vorgestellt und klassifiziert und ihr Anwendungsspektrum mit unterschiedlichen Nutzlasten gezeigt. Außerdem wird auf die Luftbildphotogrammetrie mit Micro-UAVs eingegangen und entsprechende Workflows zusammengestellt. Schließlich werden die rechtlichen Rahmenbedingungen zusammengefasst.

Kapitel 4 stellt das photogrammetrische Anwendungspotential von Micro-UAV an vielen Beispielen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen vor. Zudem werden eigene Untersuchungen an vier Befliegungsprojekten zusammengefasst, aus denen Rückschlüsse zum Bau des „Four Vision“-Kamerasystems gewonnen wurden.

Kapitel 5 wendet sich der Idee und der Konzeptionierung sowie deren Umsetzung und dem Bau des „Four Vision“-Kamerasystems zu, benennt Kriterien zur Wahl der Hardwarekomponenten und stellt die verwendete Hardware vor. Zudem werden theoretische Betrachtungen zur Bodenauflösung und zur Fokussierung speziell für die verwendeten Kamera-Objektiv-Kombinationen vorgenommen und die selbst programmierte Software zum Betrieb des Kamerasystems erklärt. Schließlich wurde auf das Problem der Störung des Empfangs von GNSS-Daten (Global Navigation Satelliten System) durch ein emittierendes elektromagnetisches Feld (EM-Feld) eingegangen und Lösungsvorschläge untersucht.

Kapitel 6 befasst sich u.a. mit den geometrischen und radiometrischen Eigenschaften besonders im Hinblick auf die Parameterstabilität der Kameras. Zudem werden das Auflösungsvermögen ermittelt, die Stabilität der Kameraaufhängung untersucht und die relativen Orientierungen der Kameras untereinander bestimmt.

Kapitel 7 geht auf die praktischen Anwendungen des „Four Vision“-Kamerasystems ein. Zudem konnten zwei Testflüge absolviert werden, deren Ergebnisse vorgestellt und diskutiert werden. Dabei steht der erste Testflug stellvertretend für landwirtschaftliche Anwendungen. Hierfür wurde das Versuchsfeld der Universität Rostock überflogen. Der zweite Flug wurde unter der Prämisse einer kommunalen Anwendung durchgeführt. Dabei wurde das Areal des Campus mit verschiedenen Gebäuden der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät (AUF) überflogen.

Kapitel 8 gibt einen Ausblick über zukünftige oder noch ausstehende Forschungs- und Betätigungsfelder in Zusammenhang mit photogrammetrischen Aufnahmesystemen in Kombination mit UAVs.

2 Luftbildphotogrammetrie

2.1 Entwicklung der Photogrammetrie

Die klassische Photogrammetrie hat ihre Wurzeln in der Nahbereichsphotogrammetrie. Sie unterlag seit ihrer Erfindung verschiedenen Entwicklungsprozessen. (LUHMANN, 2010) geht auf die geschichtliche Entwicklung der Photogrammetrie ein, deren Meilensteine in Tabelle 1 kurz zusammengefasst werden.

Tabelle 1: Einteilung der Entwicklungsphasen nach (LUHMANN, 2010)

Entwicklungsphase	Meilensteine
Erfindung der Fotografie (etwa 1830-1840)	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatzgebiete in Architektur und beim Militär
Messtisch-photogrammetrie (etwa 1870-1900)	<ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung verschiedener Kameras - Emulsionsträger: Glasplatten - erster Bildmesstheodolit zur Bestimmung der äußeren Bildorientierungen - erste Luftaufnahmen von Ballonen - andere unbemannte Trägersysteme: Drachen, Brieftauben, kleine Raketen
Analoge Photogrammetrie (etwa 1900-1950)	<ul style="list-style-type: none"> - erste stereoskopische Auswertegeräte - verstärkte Entwicklungsphase zwischen den beiden Weltkriegen: Entwicklung aufwendiger Auswerteeinstrumente mit optischer Projektion, optisch-mechanischem Betrieb, mechanischen Raumlenkern - erste Geräte zur Bildentzerrung - Kollinearitätsgleichungen
Analytische Photogrammetrie (seit etwa 1950)	<ul style="list-style-type: none"> - Erfindung elektronischer Rechner - Ausgleichung analytischer Grundaufgaben: z.B. Entwicklung erster Modell- und Bündelblockausgleichungsprogramme (gemeinsame Bestimmung innerer und äußerer Orientierungsparameter) - Verwendung von Filmen als Emulsionsträger in angepassten Kameras - Mono- und Stereokomparatoren zur hochgenauen Messung von Bildkoordinaten → Grundlage für Triangulationsprogramme - Übergang von Messkameras (bekannte, konstante innere Orientierung) zu modifizierten professionellen Fotosystemkameras mit eingebauten Réseaus (Glasgitterplatte) - Anwendungsspektrum der Nahbereichsphotogrammetrie wurde erhöht
Digitale Photogrammetrie (seit etwa 1980)	<ul style="list-style-type: none"> - Elektrooptische Bildsensoren - Grundsätzlicher Technologiewandel: von analoger/analytischer Aufnahme- und Auswertetechnik hin zur rein digitalen Bildverarbeitung - in den 80iger Jahren erste Scanning- und Videokameras sowie erste elektronische Theodolite mit Videokameras - seit den 90iger Jahren liefern Digitalkameras mit hoher Auflösung ohne analoge Signalverarbeitung direkt ein digitales Bild und speichern dieses elektronisch in der Kamera oder übertragen es online - automatische Erkennung von kodierten Marken in den Bildern - grafisch-interaktive Mehrbildauswertesysteme mit angeschlossenen CAD-Systemen - kostengünstigere, leistungsfähigere Softwarepakete mit einfacher Bedienung

(LUHMANN, 2010) erkennt einen Trend der **Integration photogrammetrischer Komponenten** in anwendungsspezifische, hybride Systeme, z.B. Kopplung mit Datenbanken und Informationssystemen oder in Verbindung mit Navigationssystemen autonomer Roboter und Fahrzeuge sowie bei Multi-sensorsystemen wie z.B. GNSS-Kameras, Kameras mit Abstandssensoren oder Laserscanner mit digitaler Bilderfassung. Die Erfassung dynamischer Vorgänge und mobiler Anwendungen ist derzeit von großem Interesse.

Mit der Entwicklung der Flugzeuge und den weiter entwickelten Kameras wurden überwiegend schräge Luftbilder aufgenommen, bevor ab 1920 systematische Reihenaufnahmen zu einer raschen Verbreitung des Luftbildwesens für forstliche, archäologische und geografische Zwecke führten. Luftbildmessungen wurden zum Standardverfahren für die topografische Kartierung (ALBERTZ, 2009).

Die frühe Anwendung von schrägen Luftaufnahmen wird heutzutage wieder entdeckt, da erst jetzt die sehr umfangreichen rechnerischen Algorithmen zur Auswertung dieser speziellen Bildverbände durch leistungsstarke Computer und angepasste Auswertesoftware durchgeführt und somit das große Potential schräger Bildaufnahmen ausgeschöpft werden kann.

Tabelle 1 zeigt, dass viele Ideen bereits in den Anfangsphasen der Photogrammetrie ausprobiert wurden, aber zum einen im Bereich der Flugzeugtechnik und zum anderen bei den Kameras an den technischen Voraussetzungen jener Zeit scheiterten. Ein Beispiel ist die Fairchild T-3A mit fünf Kameras (1 nadirblickend, 4 schrägblickend) in der „Malteser Kreuz“-Konfiguration, die bereits 1930 gebaut wurde (PETRIE, 2009, TALLEY, 1938) und deren Kameraanordnung in moderneren Kamerasystemen, wie z.B. im MIDAS (Multi-Camera Integrated Digital Acquisition System) von der niederländischen Firma „TRACK’AIR“⁴, wiederzufinden ist.

Zudem können erste Ansätze erkannt werden, die in den Bereich der unbemannten Trägerplattformen reicht (Drachen, Brieftauben, kleine Raketen). Auch hier waren die technischen Voraussetzungen damals noch nicht ausgereift genug oder nicht vorhanden. Dieses Feld wird durch die moderne UAV-Technologie aber auch durch die sich stetig weiter entwickelndeameratechnik (leistungsfähiger, leichter) neu belebt.

Einige wichtige Aspekte der Luftbildphotogrammetrie sollen mit Blick auf die Übertragbarkeit auf UAV im Folgenden ausführlicher behandelt werden.

2.2 Flugplanung für Senkrechtaufnahmen

Ausführliche Berechnungsformeln für die photogrammetrische Flugplanung sind in (ALBERTZ & WIGGENHAGEN, 2009) zu finden. Die wichtigsten funktionalen Zusammenhänge sollen hier kurz für digitale Luftbilder erläutert werden. Da moderne digitale Kamerasysteme meist CCD (Charge Coupled Device) bzw. CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) Sensoren verwenden, die Licht in Spannung umwandeln, ist hier die kleinste lichtempfindliche Einheit die Größe einer Sensorzelle (Pixel). Über das Verhältnis von Größe der Sensorzelle und Brennweite der Kamera kann die Flughöhe aus der gewünschten Bodenauflösung (GSD - Ground Sampling Distance) bestimmt werden (2.1).

$$\text{Flughöhe} = \frac{\text{GSD}}{\text{Pixelgröße}} \cdot \text{Brennweite} \quad (2.1)$$

Über die Auflösung des Kamerasensors und der Größe einer Sensorzelle kann die Größe des gesamten Sensors bestimmt werden. Lange und kurze Seite des Sensors lassen sich nun über Brennweite und Flughöhe in die Seitenlängen der abgebildeten Fläche in einer orthogonalen Ebene umrechnen (2.2).

$$\text{Seitenlänge}_{\text{Boden}} = \frac{\text{Seitenlänge}_{\text{sensor}}}{\text{Brennweite}} \cdot \text{Flughöhe} \quad (2.2)$$

⁴ http://trackair.com/wp-content/uploads/2010/11/TrackAir_MIDAS_brochure.pdf

Für stereographische Bildauswertungen ist es wichtig, dass die aufgenommenen Gebiete sich in Längsrichtung (Flugrichtung, p) und Querrichtung (Abstand der Flugstreifen, q) um einen bestimmten Prozentsatz (z.B. $p=80\%$, $q=60\%$) überlappen. Da i.d.R. Bilder im Querformat zur Flugrichtung aufgenommen werden, kann nun über die kurze Seite des Aufnahmegebietes die Basislänge (b) zwischen den Projektionszentren der einzelnen Bilder berechnet werden (2.3).

$$b = \text{Seitenlänge}_{\text{kurz}} \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right) \quad (2.3)$$

Der Flugstreifenabstand (a) lässt sich äquivalent zu (2.3) über (2.4) berechnen.

$$a = \text{Seitenlänge}_{\text{lang}} \cdot \left(1 - \frac{q}{100}\right) \quad (2.4)$$

Für einige Anwendungen ist es wichtig zu wissen, wie groß der Öffnungswinkel (AOV - Angle of View) des Sichtbereichs (FOV - Field of View) ist. Wegen der i.d.R. querformatigen, rechteckigen Anordnung der Aufnahme zur Flugrichtung ergeben sich der Roll- und der Nicköffnungswinkel nach den Gleichungen (2.5) und (2.6).

$$AOV_{\text{Roll}} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{0.5 \cdot \text{Auflösung}_{\text{lang}} \cdot \text{Zellgröße}_{\text{lange Seite}}}{\text{Brennweite}}\right) \quad (2.5)$$

$$AOV_{\text{Nick}} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{0.5 \cdot \text{Auflösung}_{\text{kurz}} \cdot \text{Zellgröße}_{\text{kurze Seite}}}{\text{Brennweite}}\right) \quad (2.6)$$

Digitale Kameras müssen die aufgenommenen Bilder speichern. Dieser Vorgang kann gerade für verlustfreie und damit speicherintensive raw-Formate einige Zeit (Δt_{min} , minimalste Bildfolgezeit der Kamera) in Anspruch nehmen. Damit während des Fluges keine Aufnahmen verloren gehen, muss Δt_{min} bei der Berechnung der resultierenden maximalen Fluggeschwindigkeit (v_{max}) berücksichtigt werden (2.7).

$$v_{\text{max}} = \frac{b}{\Delta t_{\text{min}}} \quad (2.7)$$

Ist die Bildfolgezeit der Kamera schnell genug, so kann über (2.8) aus einer vorgegebenen Geschwindigkeit (v) ein längeres Aufnahmeintervall (Δt) berechnet werden.

$$\Delta t = \frac{b}{v} \quad (2.8)$$

2.3 Flugplanung für schräge Luftbilder

Die Flugplanung mit schrägen Luftbildern gestaltet sich etwas schwieriger als die Flugplanung mit Nadiraufnahmen. Schräge Aufnahmen enthalten wegen der gleichzeitig abgebildeten verschiedenen Raumtiefen unterschiedliche Maßstäbe und somit auch unterschiedliche Boden- bzw. Objektauflösungen. Zu den wichtigsten Restriktionen der Aufnahmekonfiguration zählt (LUHMANN, 2010):

- den Bildmaßstab,
- das Auflösungsvermögen (z.B. GSD),
- die Objektumgebung,
- die Schärfentiefe,
- den Aufnahmewinkel,
- die Anzahl und die Verteilung von Bildpunkten,
- die Schnittgeometrie,
- den Formatwinkel und die Sichtbarkeit,
- sowie die Bildauswertung.

Zur Berechnung von Boden- bzw. Objektauflösungen in Bildern ist der Abstand zwischen dem entsprechenden Objektpunkt und dem Kamerastandpunkt nötig. Bei Nadiraufnahmen wird dieser Abstand durch die Flughöhe approximiert. Für den Fall einer Befliegung mit einer schrägen Kamera verändert sich die Bodenauflösung, vorausgesetzt es handelt sich um eine Ebene, mit dem Faktor aus (2.9).

$$Faktor = \frac{1}{\cos(\text{Winkel zur Nadirrichtung})} \quad (2.9)$$

Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 1 verdeutlicht. Die Datenreihe reicht lediglich bis zu einem Neigungswinkel von 85°. Danach steigt die Kurve rasant nach oben. Beim Winkel von 90° findet kein Schnitt mit der Ebene mehr statt (horizontale Visur). Hierfür kann kein Faktor bestimmt werden (mathematische Polstelle).

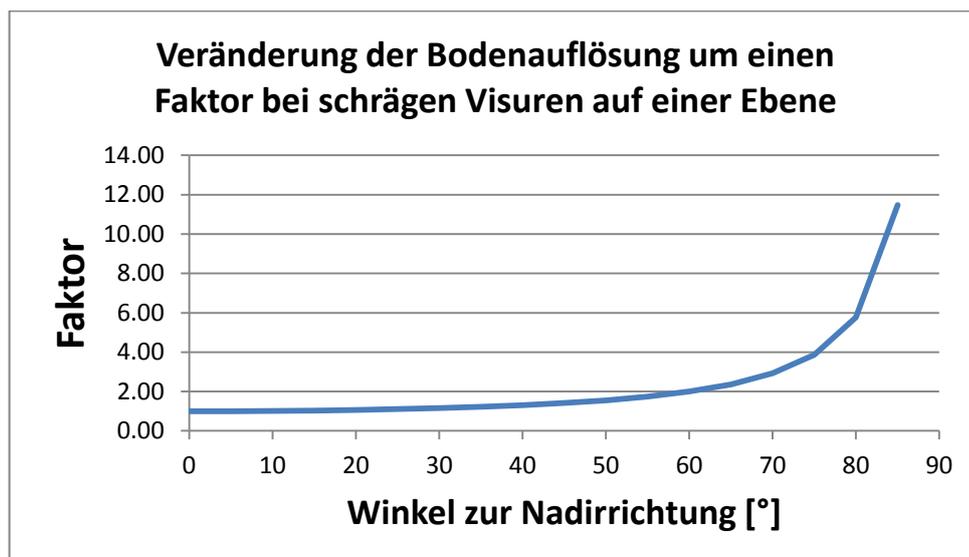


Abbildung 1: Veränderung der Bodenauflösung bei schräger werdender Blickrichtung für die Ebene

Betrachtet man den Bereich für eine Abweichung aus der Nadirrichtung von 30°, so nimmt die Bodenauflösung lediglich um das 1.15-fache zu. Aus Sicht einer Nadirkamera wäre das ein Kameraöffnungswinkel von 60°, der bei vielen Nadirkameras zu finden ist. Es werden somit Verschlechterungen

in der Bodenauflösung zum Rand hin von bis zu 15% für einen Öffnungswinkel von 60° innerhalb einer Aufnahme in Kauf genommen. Normalerweise müsste die geforderte Bodenauflösung in Bezug zum Bildrand berücksichtigt werden. Dadurch wäre die gewünschte Bodenauflösung im Zentrum des Bildes bei Nadiraufnahmen gesichert.

Hat man schräge Luftbilder, in denen die Abstände zu den abgebildeten Objekten stark variieren, ist es im Vorfeld ratsam, den Schärfentiefebereich zu bestimmen. (LUHMANN, 2010) sagt, dass die erreichbare Schärfentiefe vor allem eine Funktion des Bildmaßstabes und der Blende ist. Die Schärfentiefe kann erhöht werden, wenn abgeblendet, der Aufnahmeabstand vergrößert oder die Brennweite verkürzt wird. (KRAUS, 2004) leitet in diesem Zusammenhang anhand der Abbildung 2 den Unschärfbereich her. Für die Abschätzungen der Schärfentiefe für die Flugplanung sollen die wichtigsten funktionalen Zusammenhänge hier zusammengefasst werden.

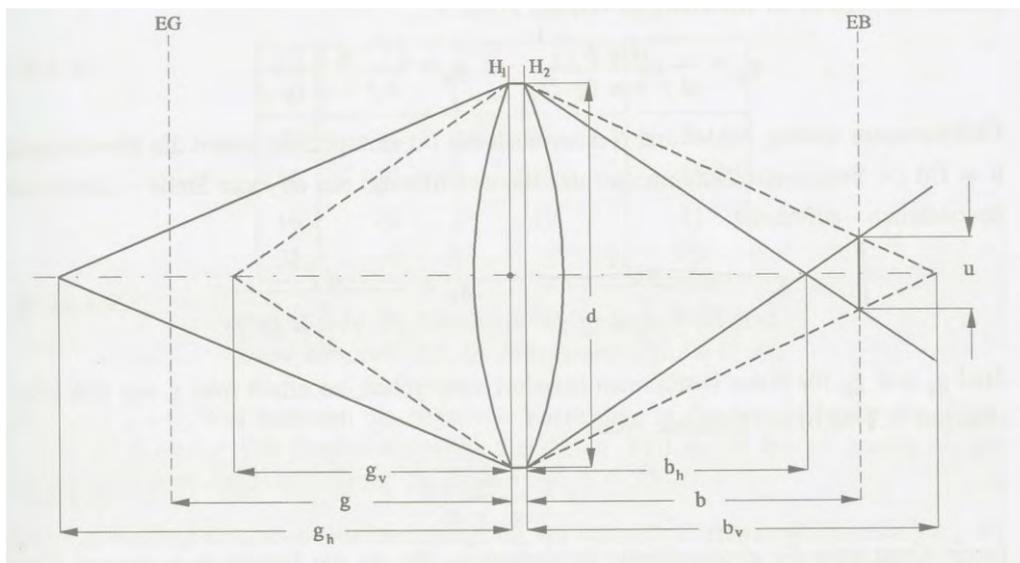


Abbildung 2: Bestimmung der Schärfentiefe (KRAUS, 2004)

Der Begriff Schärfentiefe kommt ohne den Begriff der Tiefenschärfe nicht aus. Diese beiden Begriffe werden oftmals verwechselt. Deshalb sollen sie hier kurz erklärt werden.

Als Schärfentiefe wird ein bestimmter Bereich in Form eines Abstandes in der Realität genannt, in dem alle Objekte scharf in einem Bild abgebildet werden. Die Tiefenschärfe hingegen beschreibt das Auflösungsvermögen von optischen Geräten bzw. dem menschlichen Auge. Das menschliche Auge hat z.B. eine Unschärfegrenze von $\Delta\alpha=0.03^\circ$ (LUHMANN, 2010). Hierüber ließe sich in Verbindung mit der Brennweite (hier: f) ein Unschärfekreis u definieren (siehe (2.10)).

$$u = f \cdot \Delta\alpha \quad (\text{rad}) \quad (2.10)$$

Bei digitalen Sensoren wird u mit ca. 1-3 Pixel angenommen (LUHMANN, 2010). Kennt man die Gegenstandsweite g , die Brennweite f sowie die Blendenzahl k , können hieraus nach (KRAUS, 2004) die Gegenstandsweiten der Vordertiefe g_v und der Hintertiefe g_h nach (2.11) und (2.12) berechnet werden.

$$g_v = \frac{g \cdot f^2}{f^2 + k \cdot u \cdot (g - f)} \quad (2.11)$$

$$g_h = \frac{g \cdot f^2}{f^2 - k \cdot u \cdot (g - f)} \quad (2.12)$$

Die Schärfentiefe ergibt sich aus der Differenz der Hintertiefe und Vordertiefe, siehe (2.13).

$$t = g_h - g_v \quad (2.13)$$

Interessant ist die Gegenstandsweite, ab der die Schärfentiefe von der Vordertiefe bis unendlich reicht. (LUHMANN, 2010) gibt hierfür die Gleichung der hyperfokalen Distanz (b_{hyp}) in (2.14) an.

$$b_{hyp} = \frac{f^2}{u \cdot k} \quad (2.14)$$

2.4 Aerotriangulation

Nach einer Befliegung liegt eine Vielzahl von Luftbildern vor, die mit photogrammetrischen Methoden analysiert und ausgewertet werden. Der Vorgang der gegenseitigen Orientierung der Luftbilder zueinander nennt sich photogrammetrische Triangulation oder Aerotriangulation. Ziel der Aerotriangulation ist, den Bildverband in einem übergeordneten Koordinatensystem (z.B. Landeskoordinatensystem) bestmöglich absolut zu orientieren, d.h. Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter aller Messbilder bzw. Stereomodelle, Bestimmung der Koordinaten (X, Y, Z) diskreter Punkte in einem übergeordneten Koordinatensystem und photogrammetrische Punktbestimmung (KRAUS, 2004). Die Aerotriangulation ist ein systematischer und klar gegliederter Arbeitsprozess. Im weiteren Sinne umfasst die Aerotriangulation vier Phasen: die Planung und Vorbereitung, die Befliegung, die Messung und die Berechnung (TSINGAS, 1991).

Dazu werden sogenannte Passpunkte in den Bildern mit aufgenommen, deren Position im übergeordneten Koordinatensystem bekannt und die in den Bildern gut identifizierbar sind. Es gibt verschiedene Passpunkte. Die Höhenpasspunkte enthalten lediglich die Höhenkoordinate (Z), während Lagepasspunkte die Lagekoordinaten (X, Y) im übergeordneten System beinhalten. Vereinigt ein Passpunkt alle drei Koordinaten (X, Y, Z), dann handelt es sich um einen Vollpasspunkt. Mit Hilfe der Aerotriangulation ist es möglich, auch Bildpaare zu überbrücken, in denen keine Passpunkte vorhanden sind. Um einen Bezug zwischen den einzelnen Bildern ohne Passpunkte zu ermöglichen, werden sogenannte Verknüpfungspunkte (homologe Punkte) in den Überlappungsbereichen der Bilder verwendet. Diese Verknüpfungspunkte haben im Vorfeld keinen Bezug zum übergeordneten Koordinatensystem. Sie gelten somit als Neupunkte, deren Positionen im übergeordneten Koordinatensystem als Ergebnis der Aerotriangulation zu bestimmen sind.

Verknüpfungspunkte sind gut identifizierbare Bereiche in den Bildern, z.B. Ecken oder Gegenstände mit einem hohen Kontrast auf einem kleinen Bildbereich. Es können sowohl natürliche als auch künstliche bzw. signalisierte Punkte (ausgelegte Messmarken) sein. Während die manuelle Identifizierung der Pass- und Verknüpfungspunkte die zeitaufwendigste Arbeitsphase war, können moderne merkmalsbasierte Bildverarbeitungsalgorithmen gleiche Punkte in verschiedenen Bildern weitgehend automatisch und damit schnell detektieren (z.B. der Förstner-Operator (FÖRSTNER & GÜLCH, 1987)). Der SIFT-Operator ist einer der meist genutzten Operatoren. (LOWE, 2004) beschreibt diesen Operator und gibt zudem einen guten Überblick über weitere grundlegende Bildverarbeitungsoperatoren.

Die Berechnung der unbekanntenen äußeren Orientierungsparameter sowie die Bestimmung der Positionen der Verknüpfungspunkte im übergeordneten Koordinatensystem geschehen i.d.R. über die Bündelblockausgleichung. Es ist möglich, das Modell der Bündelblockausgleichung um die Parameter der inneren Orientierung der Kamera als Unbekannte zu erweitern. So kann man das verwendete Kameramodell simultan kalibrieren, was vor dem Hintergrund des Einsatzes von Amateurkameras mit instabiler innerer Orientierung gerne angewandt wird. Außerdem können unterschiedliche Beobachtungsgenauigkeiten in Form von Gewichten eingebracht werden. Die Bündelblockausgleichung ist ein sehr rechenintensives Verfahren. Deshalb wurden in den Anfängen der Computertechnik auch andere Berechnungsmodelle, wie z.B. die Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen, entwickelt.

Die Anzahl und die Positionen der Passpunkte wirken sich auf die Genauigkeit der Ergebnisse der Aerotriangulation aus und sollten während der Bildflugplanung berücksichtigt werden. Schon frühzei-

tig wurde sich mit theoretischen Genauigkeitsberechnungen über die Anzahl und die Verteilung von Passpunkten am Boden auseinandergesetzt (ACKERMANN, 1967) und (ACKERMANN, 1968). Zu diesem Zeitpunkt ging Ackermann vom funktionalen und stochastischen Modell des Anblock-Systems aus (ebene Ähnlichkeitstransformation pro Stereomodell mit 4 Freiheitsgraden, gleiche Genauigkeit und gegenseitige Unabhängigkeit der x- und y-Koordinaten der Messpunkte in den Stereomodellen, Fehlerfreiheit der terrestrischen Passpunktkoordinaten, Vernachlässigung sonstiger Fehler → z.B. Höhenorientierungen der Bildpaare). Die Aussagen zu den Genauigkeiten können aber auch näherungsweise für Blockausgleichungsverfahren gelten, die nicht auf dem Anblock-Prinzip beruhen, sofern sie nur mit einer einigermaßen vergleichbaren Zahl von Freiheitsgraden arbeiten (ACKERMANN, 1968), (KRAUS, 2004).

Das Genauigkeitsverhalten von Lage- und Höhenpasspunkten ist sehr unterschiedlich. Die wichtigsten Aussagen von (ACKERMANN, 1968) zur Lagegenauigkeit sind im Folgenden zusammengefasst.

1. Die Lagegenauigkeit nimmt mit zunehmender Blockgröße an allen Stellen stark ab.
2. Die Lagegenauigkeit eines beliebigen Punktes im Block hängt von seinem Ort im Block ab. Die größte Lagegenauigkeit ist in den Mitten der freien Blockränder zu finden. Die geringste Lagegenauigkeit liegt bei den Passpunkten. Im Blockinnern herrscht ein gleichmäßiges Genauigkeitsverhalten.
3. Je voller die Blockränder mit Lagepasspunkten besetzt sind, umso besser wird die Lagegenauigkeit. Die Zunahme der Fehlerwerte an den freien Randzonen hängt praktisch nur vom Abstand der betreffenden Passpunkte ab.
4. Die Lockerung der Passpunktdichte und der damit verbundene Fehleranstieg an den Blockrändern verschlechtert die Genauigkeit im ausgedehnten inneren Flächenbereich nur geringfügig. Die schwache Beeinflussung des Blockinnern vom Blockrand her gilt jedoch dann nicht mehr, wenn der Block nur noch an den Eckpunkten durch Passpunkte gestützt ist.
5. Zusätzliche Lagepasspunkte in der Blockmitte oder unregelmäßig im Blockinnern verteilt beeinflussen lediglich die Genauigkeit der unmittelbaren Umgebung und haben auf die Genauigkeit des gesamten Blocks keine nennenswerte Wirkung.
6. Die dichten Passpunktlagen in den Randgebieten können umgangen werden, wenn der photogrammetrische Blockverband sich allseitig über das zur eigentlichen Bearbeitung anstehende Gebiet, d.h. über einen inneren Passpunktrahmen, hinaus erstreckt.

Die wichtigsten Aussagen zur Höhengenaugigkeit sind aus (KRAUS, 2004) im Folgenden zusammengefasst. Er bezieht sich dabei wie Ackermann auf das Anblock-Prinzip.

1. Die Höhengenaugigkeit ist in erster Linie abhängig von der Anzahl der zwischen zwei Höhenpasspunktketten (quer zu den Flugstreifen) liegenden Stereomodelle.
2. Man sollte nach ungefähr drei Stereomodellen eine Höhenpasspunktkette quer zu den Flugstreifen anordnen.
3. Die Einbeziehung von GNSS-Daten in die Blockausgleichung befreit die Aerotriangulation von dieser restriktiven Anordnung der Höhenpasspunkte.

Punkt 3 bezieht sich auf die klassische hohe Luftbildbefliegung größerer Gebiete, bei denen sonst Höhengenaugigkeiten außerhalb der GNSS-Genauigkeit auftreten können. Außerdem ist zu empfehlen, mehr als einen Passpunkt an eine Passpunktposition zu legen. So hat man bei Verdeckungen, die sehr häufig durch z.B. Fahrzeuge oder Bäume in Luftbildern entstehen können, die Möglichkeit, diese Passpunktposition, bezogen auf den Bildverband, durch einen weiteren Punkt in der Nähe zu halten. Zudem können Punktverwechslungen in Form lokaler Spannungen leicht aufgedeckt werden. Mehrere Passpunkte eignen sich an einer Stelle für Stabilitätsuntersuchungen, indem man z.B. einige Punkte

aus der Bündelblockausgleichung rausnimmt und die Genauigkeiten der Berechnungen vorher und danach vergleicht.

2.5 Bewegungsunschärfe in Luftbildern

Bewegen sich Kamera und Objekt während einer Aufnahme gegeneinander, entstehen Unschärfen in Form von Verwackelungen oder Verschlierungen im Bild. Diese Effekte sind in der Photogrammetrie und Fernerkundung unerwünscht. So entstandene Unschärfen (Δp) sind abhängig von der Bewegungsart, der Belichtungszeit (Δt), der Geschwindigkeit (v), der Brennweite (c) und dem Abstand (H) zwischen Aufnahmesystem und Objekt. In der klassischen Befliegung herrschen i.d.R. Vorwärtsbewegungen vor. Andere Bewegungsarten sind Drehbewegungen oder Vibrationen.

Unter Rotation versteht man die Drehung der Kamera um eine Rotationsachse mit einer bestimmten Rotationsgeschwindigkeit ω in Umdrehungen pro Zeiteinheit (2.15) (Gesellschaft für Bildung und Technik mbH, 1994). Dabei steht 2π stellvertretend für eine Umdrehung bzw. eine Periode und T für die Periodendauer. Diese Bewegungsart tritt bspw. bei über einem Punkt schwebenden Trägerplattformen auf, bei denen Ausgleichsbewegungen unternommen werden müssen (z.B. wegen Windböen). Dabei kann das Aufnahmesystem in kurze aber dafür schnelle Drehbewegungen versetzt werden. Aus verschiedenen Flügen mit der MD4-1000 ist bekannt, dass bei stärkeren Turbulenzen (Windböen um 6-7 Bft) Rotationsgeschwindigkeiten von ca. $165^\circ/\text{Sekunde}$ auftreten können. Das entspräche rund 0.46 Umdrehungen pro Sekunde. Aufgrund der üblicherweise sehr kurzen Belichtungszeiten kann in diesem Zeitraum von gleichmäßigen Geschwindigkeiten ausgegangen werden.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.15)$$

Für eine gleichmäßige Vorwärtsbewegung ergibt sich für Senkrechtaufnahmen nach (LUHMANN, 2010, S.512) der funktionale Zusammenhang in (2.16).

$$\Delta p = \frac{c}{H} \cdot v \cdot \Delta t \quad (2.16)$$

Die Unschärfe rotierender Systeme soll näherungsweise hergeleitet werden. In (2.17) ist der allgemeine funktionale Zusammenhang aus (2.15) für die sehr kurze Belichtungszeit (Δt) und dem damit verbundenen kleinen Winkelabschnitt (α) dargestellt.

$$\omega = \frac{\alpha}{\Delta t} \quad (2.17)$$

Geht man von kleinen Drehwinkeln während der Belichtungszeit aus und setzt das Modell des rechtwinkligen Dreiecks an, so ergibt sich die Unschärfe (Δp) nach (2.18).

$$\Delta p = \tan(\alpha) \cdot c \quad (2.18)$$

Die Unschärfe (Δp), verursacht durch Rotation, soll an einer Beispielrechnung verdeutlicht werden. Dabei wird die empirisch gemessene maximale Drehrate von 0.46 Umdrehungen pro Sekunde als Rotationsgeschwindigkeit auf unterschiedliche Belichtungszeiten angewendet. Der abgeleitete funktionale Zusammenhang zur Berechnung der während der Belichtungszeit stattfindenden Drehwinkel (α) ist in (2.19) zu finden.

$$\alpha = 2 \cdot \pi \cdot 0.46 \cdot \Delta t \quad (2.19)$$

Wendet man die Bogenmaßformel an, so kann über den Abstand (H) die Bogenlänge (b) im Objektraum bestimmt werden (2.20).

$$b = \alpha \cdot H \quad (2.20)$$

Tabelle 2 zeigt den Zusammenhang zwischen der Belichtungszeit (linke Spalte, reziproker Werte) und der Drehbewegung. In Spalte 2 steht der während der Belichtungszeit gedrehte Winkel (α) nach (2.19). In Spalte 3 steht der Versatz (b) in diesem Fall für 25 m Entfernung (H) berechnet nach (2.20). Spalte 4 und 5 geben die nach (2.18) berechnete zugehörige Unschärfe (Δp), hier in der Einheit [Pixel] mit 6 mm Objektiv und mit 9 mm Objektiv, wider. Die Umrechnung in die Einheit [Pixel] erfolgt über die Seitenlänge der Fozelle (a). In diesem Fall wird das Kameramodell MV-CS27U von Crevis mit $4.65 \times 4.65 \mu\text{m}^2$ benutzt, da diese Kameras später im „Four Vision“-Kamerasystem verbaut werden.

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Belichtungszeit und Drehbewegung

$\frac{1}{\Delta t}$ [sec]	α [°]	b [m]	Δp [Pixel] c=6mm	Δp [Pixel] c=9mm
100	1.66	0.72	37.3	55.9
200	0.83	0.36	18.6	28.0
250	0.66	0.29	14.9	22.4
640	0.26	0.11	5.8	8.7
800	0.21	0.09	4.7	7.0
1000	0.17	0.07	3.7	5.6
1250	0.13	0.06	3.0	4.5
1600	0.10	0.05	2.3	3.5
2000	0.08	0.04	1.9	2.8

Bspw. ergibt sich bei einer Belichtungszeit von 1/800 Sekunde und einer Rotationsgeschwindigkeit von 0.46 Umdrehungen pro Sekunde ein Drehwinkel von 0.21° . Für eine Entfernung von 25 m bedeutet das nach (2.20) einen Versatz im Objektraum um 9 cm. Um zu bestimmen, ob dieser Wert vertretbar ist, muss zusätzlich die Brennweite (c) bekannt sein. Bei 6 mm Brennweite würde sich ein Pixelversatz von 4.7 Pixel und bei 9 mm von 7 Pixel ergeben. Setzt man für die Bewegungsunschärfe eine Schranke von 0.5 Pixel an, so ist diese Grenze für das 6 mm Objektiv um das 9-fache und für das 9 mm Objektiv um das 14-fache überschritten. Die Bilder wären in diesem Fall unbrauchbar.

Über den umgekehrten Weg mit einem vorgegebenen Grenzwert (GW) für die Unschärfegenauigkeit und die Belichtungszeit lässt sich die noch zulässige Winkelgeschwindigkeit (ω) berechnen. Aus dem Arcustangens des Quotienten der Brennweite (c) und der Seitenlänge einer Fozelle (a) multipliziert mit dem Grenzwert (GW) kann nach (2.21) der zugehörige Drehwinkel α , abgeleitet aus (2.18), bestimmt werden.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{a \cdot GW}{c}\right) \quad (2.21)$$

Mit der Belichtungszeit (Δt) kann nun durch (2.22) die Winkelgeschwindigkeit (ω) berechnet werden.

$$\omega = \frac{\alpha}{\Delta t} \quad (2.22)$$

Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen der Belichtungszeit und der Rotationsgeschwindigkeit für eine Bewegungsunschärfe von 0.5 Pixel für die Brennweiten 6 mm und 9 mm. Für eine Belichtungszeit von z.B. 1/800 Sekunde ergäben sich somit Rotationsgeschwindigkeiten für das 6 mm Objektiv von $17.8^\circ/\text{sec}$ und für das 9 mm Objektiv von $11.8^\circ/\text{sec}$.

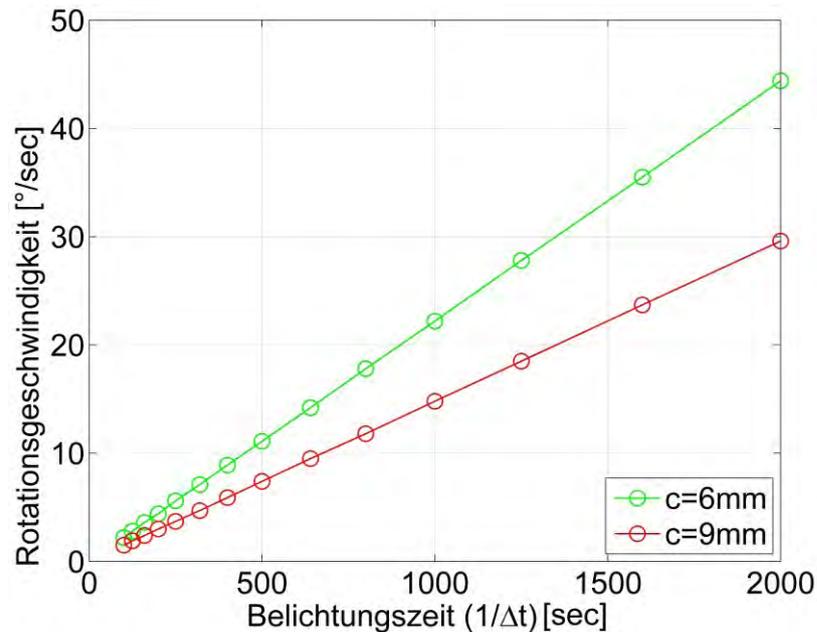


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Belichtungszeit und Rotationsgeschwindigkeit für eine Bewegungsunschärfe von 0.5 Pixel

Die Kamera muss im Vergleich mit den extrem gemessenen Rotationsgeschwindigkeiten, die bei der MD4-1000 auftreten können, während der Belichtungszeit viel ruhiger gehalten werden. Zusätzlich könnte die Trägerplattform instruiert werden, bei Rotationsgeschwindigkeiten, die für die gewünschte Belichtungszeit und Unschärfegrenze zu groß sind, die Kamera nicht auszulösen, sondern einen entsprechenden ruhigen Zeitpunkt abzuwarten.

2.6 Die aktuelle digitale Luftbildphotogrammetrie

Im Gegensatz zur klassischen Luftbildphotogrammetrie haben sich die Möglichkeiten in vielen Bereichen der modernen Luftbildphotogrammetrie verbessert und erweitert. Die digitale Erzeugung von Luftbildern steht im Vordergrund. Großformatige digitale Luftbildkameras ersetzen zunehmend analoge Luftbildkameras und es ist abzusehen, wann die analogen Kameras vollständig ersetzt werden (JACOBSEN, 2009A). U.a. schreiben deutsche Landesvermessungsbehörden Neubefliegungen ausschließlich als digitale Bildflüge aus (CRAMER, 2010). Es gibt keinen Grund analoge anstelle von original digitalen Luftbildern zu verwenden (JACOBSEN ET AL., 2010).

„Die Anforderungen an photogrammetrische Systeme sind in den letzten Jahren gewachsen. Das Bedürfnis, nicht nur einen 2D/2,5 -Blick auf die Welt zu haben, nimmt zu.“ [...] Für den photogrammetrischen Normalfall (automatisierte photogrammetrische Auswertung von Senkrechtaufnahmen) existieren hoch automatisierte Algorithmen zur Ableitung von photogrammetrischen Produkten wie dem digitalen Oberflächenmodell und dem Orthophoto und robuste sowie effektive Algorithmen im Bereich der Klassifizierung und Segmentierung (WIEDEN & LINKIEWICZ, 2013).

Die Anzahl der Aufnahmen ist lediglich durch die Speicherkapazität des Aufnahmesystems begrenzt. Verwackelte oder unbrauchbare Aufnahmen können in Vorschauen während der Befliegung identifiziert, gelöscht oder wiederholt werden.

Neben den klassischen Senkrechtaufnahmen steigt das Interesse an schrägen Luftaufnahmen. Auch wenn schräge Luftaufnahmen für die Erzeugung von klassischen Orthophotos ungeeignet erscheinen, können über 3D-Punktwolken Objekte 3-dimensional rekonstruiert werden (siehe (WAGNER ET AL., 2013)). Außerdem entsteht für den Benutzer eine vertrautere Visualisierung der Szenerie⁵.

⁵ <http://www.pictometry.com/>

Heutige Befliegungen werden zudem unter zu Hilfenahme der GNSS- und der IMU-Technologie (Inertial Measurement Unit) nicht nur zur Verortung bzw. Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter der Luftbilder genutzt, sondern auch vor allem in UAV-Anwendungen als Navigationshilfe für den Autopiloten einbezogen.

Als digitale Sensoren werden CCD- und CMOS-Chips benutzt, deren Funktionsprinzip sowie Vor- und Nachteile in (LUHMANN, 2010) dargelegt werden. Zudem gibt (LUHMANN, 2010) für die Erzeugung von digitalen Farbbildern verschiedene Techniken an: das Parallel- oder 3-Chip-Verfahren, das Zeitmultiplex-Verfahren, das Ortsmultiplex- oder Filtermasken-Verfahren (z.B. Bayer Pattern) und das Verfahren mit einem Vollfarbsensor bzw. der Foveon-Technik. Eine beispielhafte Gegenüberstellung des Bayer Pattern und der Foveon-Technik geben (GEHRKE & GREIWE, 2011) und (GREIWE & GEHRKE, 2013). Im Vergleich zu analogen, mit Fotoemulsionen arbeitenden Kameras, weisen CCD-Kameras eine Reihe von Vorteilen auf: hohe Empfindlichkeit, lineare Empfindlichkeit und spektrale Empfindlichkeit. CCD-Chips sind in einem Wellenlängenbereich zwischen 400 nm bis 1000 nm empfindlich und lassen sich damit universell einsetzen (inkl. Infrarotaufnahmen) (LILIENTHAL, 2003).

Mit der fortschreitenden Entwicklung digitaler Aufnahmesysteme hat sich auch die Bildverarbeitung und -auswertung weiterentwickelt. Die zeitintensive manuelle Punktidentifizierung in den Bildern wird bspw. größtenteils mit Hilfe von Interest-Operatoren aus dem Computer-Vision-Bereich, der sich als eigenständige Disziplin etabliert hat, automatisiert (siehe (FÖRSTNER & GÜLCH, 1987), (LOWE, 2004), (HARWIN & LUCIEER, 2012)).

(ROSE & ZURHORST, 2013) sprechen in diesem Zusammenhang von einem Paradigmenwechsel zwischen klassischer Photogrammetrie, bei der man versucht, mit möglichst wenigen Bildern und dafür stabiler Schnittgeometrie zu arbeiten, und der modernen Photogrammetrie, bei der hunderte Merkmalspunkte pro Bild automatisch berechnet werden, um anschließend Nachbarbilder für die Bündelblockausgleichung zu verknüpfen.

Etablierte Softwarepakete, wie z.B. ERDAS LPS bekommen neue Konkurrenz in Form von benutzerfreundlicher, größtenteils automatisch agierender Auswertesoftware wie „Photoscan“ von Agisoft⁶, „ARC 3D Webservice“⁷ oder „Pix4Dmapper“ von Pix4D⁸, die sogar teilweise als Webservice angeboten werden. Moderne 3D-Rekonstruktionssoftwareprodukte nehmen dem Nutzer viele zeitintensive Arbeitsschritte ab. So werden z.B. im Vorfeld der Bündelblockausgleichung alle Bilder zueinander relativ mit Hilfe des SIFT-Operators orientiert. Künstliche Ziele (kodierte Marken) können in den Bildern als Passpunkte automatisch identifiziert werden. Stellt man der Software die Passpunktkoordinaten zur Verfügung, so kann eine Auswertung des Bildverbandes automatisch erfolgen.

Diese moderneren Auswertepakete lassen auch den nicht photogrammetrischen Normalfall zu, d.h. schräge Luftaufnahmen werden berücksichtigt. Klassische photogrammetrische Workflows scheitern teilweise an Bildern, die nicht dem photogrammetrischen Normalfall entsprechen (HERDA & BREUER, 2013). Einen Überblick und Vergleich verschiedener moderner Auswertepakete geben (HERDA & BREUER, 2013), (NEITZEL & KLONOWSKI, 2011) und (GRUEN ET AL., 2014).

Luftaufnahmen sind nicht mehr ein Privileg für Groß- bzw. Mittelformatkameras. Die stetige Verbesserung der Kameratechnologie und die große Verbreitung von Digitalkameras in den unterschiedlichsten Bereichen führten dazu, dass auch Amateurkameras für photogrammetrische Zwecke genutzt werden. Das Ziel, viele digitale Aufnahmen unterschiedlicher Herkunft für die Rekonstruktion von 3D-Objekten zu benutzen, verfolgt das „Photo Tourism“-Projekt mit Hilfe der Structure-from-Motion Technik mit dem Softwarepaket „Bundler“ (SNAVELY ET AL., 2008).

Nicht alle Digitalkameras sind für photogrammetrische Zwecke geeignet. Nach wie vor spielt die Stabilität der inneren Orientierungsparameter bei der Bildauswertung eine wesentliche Rolle. Zoomobjektive, künstliche Bildmanipulationsalgorithmen sowie diverse Automaten, wie z.B. Fokussierung oder Blendeneinstellung, führen zu veränderten inneren Orientierungsparametern. Daher gibt es an leistungsfähigeren Digitalkameras Möglichkeiten zur Deaktivierung dieser Automaten.

⁶ <http://www.agisoft.ru/products/photoscan>

⁷ <http://homes.esat.kuleuven.be/~visit3d/webservice/v2/index.php>

⁸ <http://pix4d.com/>

Auch wenn die Bedienungen und die Möglichkeiten von Digitalkameras benutzerfreundlicher werden, so sind photogrammetrische Kenntnisse Grundvoraussetzung für die Erstellung geeigneter Aufnahmen. (CRAMER & HAALA, 2012) führen folgende Schwachpunkte bei kommerziellen Kompaktkameras auf. Die Kompaktkameras haben i.d.R. eine instabile Kamerageometrie. Die Verwendung der inneren Orientierungsparameter, die in einer Vorabkalibrierung im Labor bestimmt werden können, ist daher nicht möglich. Ein weiteres Problem stellen optische Bildstabilisatoren dar. Zudem sollte man bei den Aufnahmen darauf achten, dass kurze Belichtungszeiten verwendet werden, da hier eine bessere Bildqualität zu erwarten ist (Bewegungsunschärfe). Außerdem wirken sich größere CCD-Pixel positiv auf die radiometrische Qualität aus. Zu den Vorteilen gehören das kompakte und leichte Kameragehäuse, das mit professionellen Objektiven kombinierbar ist.

Aber nicht nur digitale Aufnahmesysteme und Bildverarbeitung haben sich verändert, sondern auch die Möglichkeit Befliegungen durchzuführen. Bspw. können mit Hilfe unbemannter Trägerplattformen (UAV) Luftbilder aus geringeren Höhen an beliebigen Positionen mit beliebigen Orientierungen aufgenommen werden. Während bei der klassischen Luftbildphotogrammetrie im Normalfall Senkrechtaufnahmen in einem systematischen Bildverband erzeugt werden, entstehen nun vor allem Schrägbilder, teilweise scheinbar unsystematisch aus unterschiedlichen Positionen oder Höhen.

Durch die unsystematisch erscheinenden schrägen Luftbilder lassen sich sehr gut 3D-Punktwolken berechnen. Die Auswertung dieser Punktwolken, ob nun aus Laserscannerdaten oder photogrammetrischen Berechnungen, tritt mehr und mehr in den Vordergrund. Punktwolken können photogrammetrisch in Überlappungsgebieten zweier Bilder berechnet werden (Stereonormalfall). Viele moderne Auswerteprogramme bieten solche Punktwolkenberechnungen aus Bildpaaren an (siehe (NEITZEL & KLONOWSKI, 2011)). Dazu werden i.d.R. markante Punkte in beiden Bildern berechnet. Die einzelnen Punktwolken aus den Stereomodellen werden dann in ein übergeordnetes Referenzsystem zusammengeführt. Die Punktstreuung hängt von den äußeren und inneren Orientierungen der Bilder ab. Es entsteht eine Punktwolke, die man auch als „sparse point cloud“ bezeichnet. Die Algorithmen von (FURUKAWA & PONCE) verdichten diese „sparse point cloud“ zu einer „dense point cloud“. Das Programm „PMVS2“⁹ agiert als ein solches Tool für die freie Software „VisualSFM“¹⁰.

Einen erweiterten funktionalen Ansatz verfolgt das Programm „SURE“¹¹ vom Institut für Photogrammetrie in Stuttgart (ROTHERMEL ET AL., 2012, WENZEL ET AL., 2012). Hier werden homologe Punkte nicht nur in Stereobildpaaren, sondern in mehreren Bildern gefunden und mittels überbestimmter Vorwärtsschnitte ausgeglichen. Durch die teilweise starke Redundanz entstehen empirische statistische Daten über jeden einzelnen Punkt in der Punktwolke. Dabei wird die Lagegenauigkeit jedes einzelnen Punktes gesteigert und es ist möglich, statistisch zu klassifizieren, z.B. in der Form, dass nur Punkte unterhalb eines Genauigkeitsschwellwertes benutzt werden dürfen.

2.7 Schrägblickende Kamerasysteme

Kameras mit schrägen Aufnahmesystemen wurden bereits in den Anfängen der Luftbildphotogrammetrie zwischen den beiden Weltkriegen verstärkt eingesetzt. In der modernen Photogrammetrie wächst die Beliebtheit schrägblickender Kamerasysteme, da sie dem Betrachter einen vertrauteren Eindruck über die Szenerie, z.B. bebaute Gebiete, vermitteln. Zudem können 3D-Stadtmodelle mit einem höheren Level of Detail (LOD) erstellt werden (BENFER, 2013) und (NYARUHUMA ET AL., 2012).

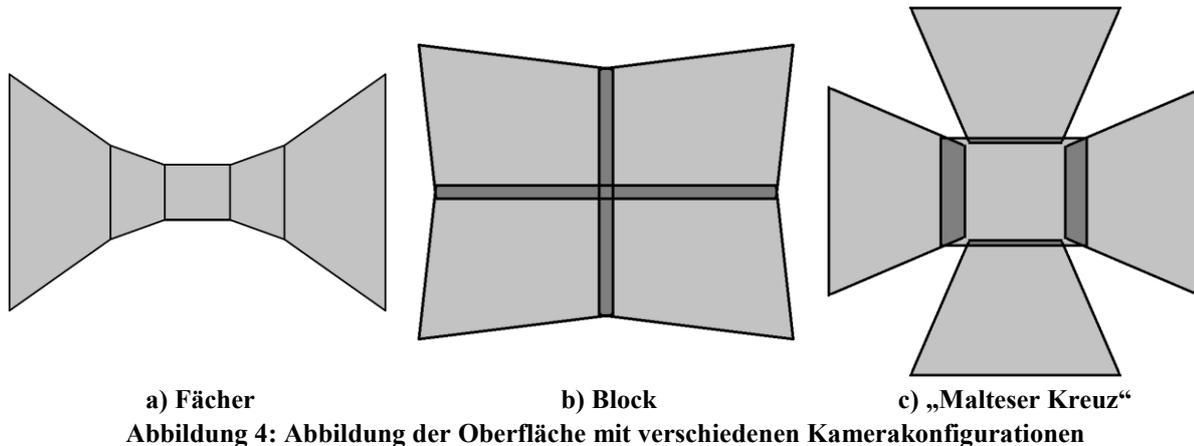
Die limitierende Größe in Bezug zur aufgenommenen Oberfläche bei Luftbildkameras ist die Sensorgröße. Daher entwickelten sich photogrammetrische Systeme mit mehreren Sensoren, mehreren Objektiven und mehreren Kameras (PETRIE, 2009). (PETRIE, 2009) unterscheidet dabei verschiedene Kamerakonfigurationen. Dazu zählt die Fächerkonfiguration (Abbildung 4a), bei der mehrere Kameras nebeneinander angeordnet sind, damit ein sehr breiter Streifen quer zur Flugrichtung abgebildet wird.

⁹ <http://www.di.ens.fr/pmvs/>

¹⁰ <http://ccwu.me/vsfm/>

¹¹ <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/sure/index.en.html>

Diese Systeme werden u.a. zu Aufklärungszwecken beim Militär verwendet (MADANI, 2012). Es gibt auch einzelne Kameras (stepping frame camera), die auf einer rotierenden Plattform sehr schnell neu ausgerichtet und ausgelöst werden und dabei eine Fächeranordnung generieren.



Bei der Blockkonfiguration (Abbildung 4b) sind die Kameras leicht schräg angeordnet und bilden somit eine vergrößerte Bildaufnahmefläche. Diese Konfiguration ist gut für Kartierungsaufgaben geeignet. Die Bilder werden entzerrt und anschließend zusammengesetzt. Es ergibt sich ein nahezu vertikaler Bildverbund, der als ein Bild verarbeitet werden kann.

Die „Malteser Kreuz“-Konfiguration (Abbildung 4c) besteht aus einer Kombination einer Nadirkamera und vier jeweils azimuthal im rechten Winkel angeordneten schrägblickenden Kameras. Diese Kamerakonfiguration wurde ursprünglich für Kartierungsaufgaben entwickelt. Durch die schrägen Blickrichtungen wird diese Konfiguration in Stadtgebieten auch als Informationsquelle über Eigenschaften von Gebäuden oder anderer Strukturen verwendet, die mit Nadiraufnahmen nicht oder nur schwer erhältlich sind. Die Anzahl der einzelnen Kameras und ihre Aufnahmeformate können bei den einzelnen Aufnahmekonfigurationen variieren.

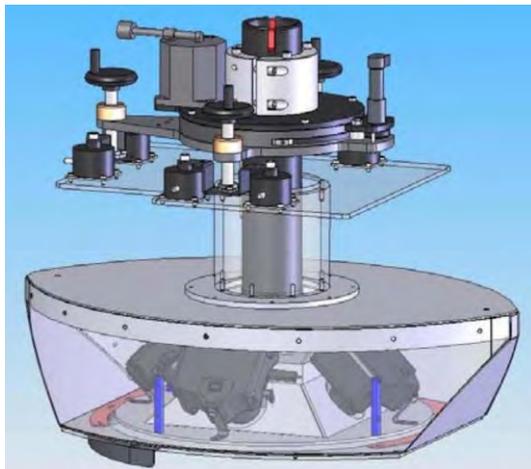


Abbildung 5: Midas-Kamerasystem¹²

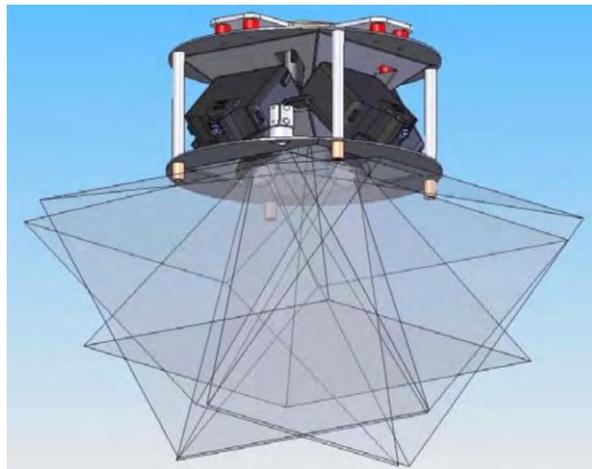


Abbildung 6: MIDAS - Kamerasystem, Kamerablickrichtungen¹²

Ein modernes Mehrkamerasystem mit schrägblickenden Kameras in der „Malteser Kreuz“-Konfiguration (Abbildung 6) ist MIDAS (Multi-camera Integrated Digital Acquisition System) von der niederländischen Firma „TRACK’AIR“. Es besteht aus vier um 45° geneigten Kameras und einer Nadirkamera. Die fünf kleinformatigen Spiegelreflexkameras (CANON EOS 1Ds Mk2) mit jeweils 17 Mega Pixel sind auf einer speziellen Plattform montiert, die ins Vermessungsflugzeug eingebaut wird (Abbildung 5). Zudem können diese Kameras mit unterschiedlichen Objektiven sowohl von CANON als auch von Zeiss benutzt werden. Die Kameras besitzen eine stabile innere Orientierung und können,

dank dem SDK (Software Development Kit) von CANON, remote kontrolliert werden¹². In der neuesten Version sind photogrammetrisch kalibrierte 37 Mega Pixel Kameras von Nikon (D800e) mit Zeiss-Objektiven verbaut (News-Letter¹³ der Firma, 23.09.2013).

„Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelte das Modular-Airborne-Camera-System (MACS). Zielstellung war die einfache und kostengünstige Erzeugung von umfassend verarbeitbaren Bilddatensätzen mit Bodenauflösungen im Zentimeterbereich. Damit sollen photogrammetrische Verfahren und Produkte weiterentwickelt und demonstriert werden. Besonderer Wert wurde auf hohe Aufnahmefrequenzen und kurze Integrationszeiten der Kameramodule gelegt. [...] Das System MACS-Oblique verfügt über fünf synchron auslösende Kameraköpfe.“ (LEHMANN ET AL., 2011)

„MACS kann durch sein modulares und flexibles Konzept an spezifische Aufgaben angepasst werden und wird vorwiegend für Fassadentexturierung, Denkmaldokumentation oder auch Monitoring verwendet. [...] Im System MACS-Oblique sind drei senkrecht schauende sowie zwei Oblique-Kameras verbaut. Die senkrecht schauenden Kameras bestehen aus einem „Geo-CAM“- und zwei hochauflösenden „DOM-CAM“-Modulen. [...] Die ObliqueCam R verkippt um 30° quer zur Flugrichtung zur rechten Seite. Die ObliqueCam V verkippt um 40° in Flugrichtung. [...] Eine vollständige Oblique-Aufnahme kann mit einer alternierenden Befliegung gewährleistet werden.“ (WIEDEN & LINKIEWICZ, 2013)

Ein weiteres Kamerasystem des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) ist das 3K/3K+ System, das sowohl mit der Fächerkonfiguration als auch mit drei schrägblickenden Kameras arbeiten kann.

„Das 3K Kamera System ist ein flugzeuggetragenes, echtzeitfähiges optisches Fernerkundungssystem, das aus einem Sensorsystem, einer Prozessierungseinheit an Bord des Flugzeugs, einer Mikrowellen Datenübertragungseinheit und einer mobilen Bodenstation besteht. Das Sensorsystem selbst besteht aus drei nicht metrischen Amateurkameras (Canon EOS 1Ds Mark II, 16 MPix), die auf einer Plattform so angebracht sind, dass eine Kamera in Nadir Richtung und die anderen zwei Kameras schräg nach unten blicken. Diese Konfiguration hat einen vergrößerten Blickwinkel (FOV) von 110° quer zur Flugrichtung bzw. 31° in Flugrichtung und erlaubt Bilddaten hochauflösend, großflächig und flexibel, z.B. unter der Wolkendecke, aufzunehmen. [...] Die Kameras sind mit einem echtzeitfähigen und hochgenauen GPS/IMU Navigationssystem gekoppelt, damit eine direkte Georeferenzierung der Bilddaten noch an Bord des Flugzeugs erfolgen kann. Die Genauigkeit der direkten Georeferenzierung hängt von mehreren Einflussfaktoren ab, liegt aber meist unter 2 m horizontaler Abweichung.“ (KURZ ET AL., 2012)

Zur effizienten Erfassung schräger Luftbilder wurde von Alpha Luftbild und Rollei Metric in Zusammenarbeit mit der BSF Swissphoto das Schrägbildsystem (Aerial Oblique System) AOS entwickelt. Dabei handelt es sich um ein Drei-Kamerasystem, das insgesamt um 90° um die Z-Achse gedreht werden kann, um eine „Malteser Kreuz“-ähnliche Aufnahmekonfiguration zu erstellen. Das Schrägaufnahmesystem AOS verfügt derzeit über drei kalibrierte Rollei Metric AIC 39 Megapixel-Kameras (Phase One Rückteile), jeweils mit einem 47 mm Objektiv. Eine Kamera wird senkrecht, eine geneigt nach vorne und eine geneigt nach hinten eingebaut. Die abgebildeten Bereiche der drei Kameras überlappen sich geringfügig. Die Bilder der drei Kameras lassen sich zu einem schmetterlingsförmigen Bild zusammensetzen (WIEDEMANN, 2009).

Ein weiteres rotierendes Kamerasystem mit schrägen Blickrichtungen ist die „AZICAM“. Bei diesem System wird lediglich eine Mittelformatkamera verwendet, die auf einer rotierenden Halterung in die jeweils gewünschte Blickrichtung gedreht wird.

Weitere Kamerasysteme mit schrägen Blickrichtungen sind die Quattro DigiCAM und die Penta DigiCAM der deutschen Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH aus Kreuztal. Die Quattro DigiCAM kann sowohl als Block- als auch als „Malteser Kreuz“-Konfiguration eingesetzt werden (KREMER, 2010).

¹² http://trackair.com/wp-content/uploads/2010/11/TrackAir_MIDAS_brochure.pdf

¹³ <http://trackair.com/index.php/new-midas-lease-rental-program/>

2.8 Auswertesoftware

2.8.1 „Australis“

Mit dem Programm „Australis“ von der Firma Photometrix ist es möglich, die inneren Orientierungsparameter einer oder mehrerer Kameras gleichzeitig zu bestimmen¹⁴. Dazu werden homologe Punkte in verschiedenen Bildern automatisch über kodierte Zielmarken erkannt und einander zugeordnet. Mit Hilfe der Bildkoordinaten der Zielmarken werden die inneren Orientierungsparameter berechnet. Die Zielmarken (4.5 x 4.5 cm²) bestehen aus einer Anordnung von mehreren retroreflektierenden Kreisen (Ø=6 mm) vor einem mattschwarzen Hintergrund (Abbildung 7). Diese Zielmarkenpositionen müssen in einem übergeordneten Koordinatensystem nicht bekannt sein. Lediglich die Geometrie zwischen den Marken darf sich während der Bildaufnahmen nicht verändern. Sind die Koordinaten der Marken nicht bekannt, so wird ein Koordinatensystem für die äußeren Orientierungen aller Kameraaufnahmen in das Projektionszentrum des ersten relativ orientierten Kamerastandpunktes gelagert.

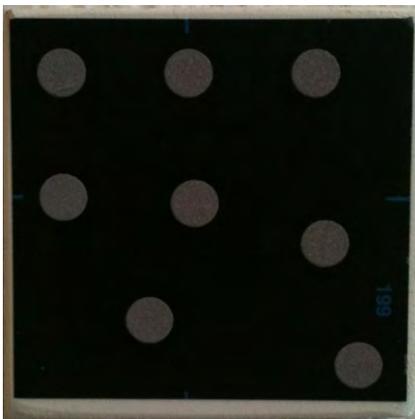


Abbildung 7: Kodierte Marke für „Australis“



Abbildung 8: Kalibriervorrichtung der Professur für Geodäsie und Geoinformatik

„Australis“ ist ursprünglich für die Nahbereichsphotogrammetrie konzipiert worden. Die Kameras sind also entgegen der normalen Luftbildphotogrammetrie um 90° um die X-Achse verdreht, z.B. für Fassadenaufnahmen. Dementsprechend liegt die Y-Achse des übergeordneten Koordinatensystems parallel zur Blickrichtung. Die XZ-Ebene des übergeordneten Systems liegt parallel zur xy-Ebene des Bildkoordinatensystems. Das Azimut, also die Blickrichtung projiziert in die horizontale XY-Ebene, wird von der Y-Achse (0°) im Uhrzeigersinn positiv und gegen den Uhrzeigersinn negativ gedreht. Der Elevationswinkel ist der Winkel zwischen Blickrichtung und deren Projektion in die XY-Ebene. Bei horizontaler Einstellung beträgt der Elevationswinkel 0°. Schaut die Kamera nach oben, wird der Elevationswinkel positiv und schaut die Kamera nach unten, wird er negativ.

Der Rollwinkel wird um die Blickrichtung gedreht. Ein aufrechtes Bild hat einen Rollwinkel von 0°. Eine Drehung im Uhrzeigersinn bekommt positive und eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn bekommt negative Rollwinkelangaben.

Es können mehrere Kameras gleichzeitig kalibriert und zueinander orientiert werden. Voraussetzung ist, dass ausreichend viele Marken (mind. 5) in zwei oder mehreren Bildern zu erkennen sind. Für eine Kamerakalibrierung werden sogar mind. 6-8 Marken pro Bild benötigt. Zudem sollte die Kamera sowohl hoch- als auch querformatige Aufnahmen machen, also zwischen den Aufnahmen gedreht werden.

Entsprechend den Vorgaben von „Australis“ wurde ein Aluminiumgerüst (Abbildung 8) mit ca. 2.5 x 2.5 m² an der Decke des Versuchslabors der Professur für Geodäsie und Geoinformatik im Abstand von ca. 50 cm angebracht und sowohl Decke als auch Gerüst mit über 60 kodierten Messmarken beklebt. Geometrisch ist dieses System stabil.

¹⁴ <http://www.photometrix.com.au/support.html>

2.8.2 „Photoscan“ von Agisoft

Die Firma Agisoft¹⁵ wurde 2006 gegründet, hat ihren Sitz in St. Petersburg (Russland) und stellt automatische 3D-Modellierungs- und Mapping-Lösungen auf Basis der Computer-Vision-Technologien her. Agisoft bietet keinen Webservice zur automatischen Bildverarbeitung an. Ein Softwareprodukt ist die bildbasierte 3D-Modelliersoftware „Photoscan“. Diese Softwarekomponente wird stetig weiterentwickelt. Daher orientieren sich die nächsten Ausführungen an der Version 1.0.2.1824.

Der Workflow von „Photoscan“ unterscheidet sich lediglich in der Startphase ein wenig von dem nachfolgend beschriebenen Pix4D. Es werden im Vorfeld alle Bilder geladen und grob über die getrackten Bildkoordinaten verortet. Zudem können die Koordinaten der GCPs (Ground Control Points) geladen werden. Alle übergebenen Positionen werden dynamisch 3-dimensional angezeigt. In „Photoscan“ können zudem bestimmte Bildausschnitte (z.B. fahrende Autos) maskiert werden, damit diese Bildbereiche in der Bildverarbeitung nicht berücksichtigt werden. Außerdem bietet „Photoscan“ die Möglichkeit, die Bilder im Vorfeld zu einem Gesamtmosaik zu verknüpfen („Align Photos“) ohne dass die GCPs in den Bildern identifiziert werden müssen. Benutzt wird dabei der SIFT-Operator zur Identifizierung von Verknüpfungspunkten. Dieser Vorgang nimmt im Vorfeld zwar etwas Zeit in Anspruch, bietet aber bei den weiteren Verarbeitungsschritten einige Vorteile.

Sind die Bilder relativ zueinander orientiert, werden die GCPs bereits in die Nähe ihrer möglichen Positionen in den Bildern angezeigt. Per Hand können die Markerpositionen korrigiert werden. Mit jeder Korrektur verbessert sich auch die Positionsschätzung der restlichen Markerpositionen. Das macht es dem Benutzer leichter, die Marken zu korrigieren, da gleich in den richtigen Bildern der entsprechende Bereich gezoomt vorliegt. Punktverwechslungen kommen so kaum noch vor. Auch hier gilt, dass die GCPs nicht in allen Bildern identifiziert werden müssen. Jedoch bringt jede weitere Identifizierung mehr Sicherheit in die Berechnungen.

Wurden die Markerpositionen korrigiert, können über einen Update-Button die relativen Orientierungen nachgerechnet werden. Dieser Vorgang geht schnell und berechnete Verbesserungen bzw. Fehler werden tabellarisch angezeigt. Das macht eine schnelle Suche nach Ausreißern möglich. Ist man bei einem Bearbeitungsstand angelangt, an dem sich die Fehlerwerte nicht mehr weiter minimieren, können die inneren Orientierungsparameter in die Bündelblockausgleichung mit eingeführt und die Fehlerwerte weiter minimiert werden, indem die inneren Orientierungsparameter nachgeschätzt werden (Simultankalibrierung). Außerdem können die GCPs auch mit einem Lagefehler apriori für eine weiche Lagenetzgleichung versehen werden.

Sind alle Eingangsbedingungen erfüllt, kommen als weitere Schritte die Berechnung einer verdichteten Punktwolke (Build dense cloud), die Bestimmung eines Gitternetzes (Build mesh) und die Texturierung dieses Gitternetzes (Build Texture). Neben dem Berechnungsprotokoll können OrthoPhotos, OrthoDEMs und 3D-Punktwolken erzeugt werden. Zudem können sämtliche Zwischenergebnisse, wie z.B. die inneren Orientierungsparameter auch mehrerer Kameras, die Bildpositionen und Orientierungen, in unterschiedlichsten Ausgabeformaten gespeichert werden und stehen so zur weiteren Verarbeitung mit anderen Programmen zur Verfügung.

2.8.3 „Pix4UAV“ von Pix4D

Pix4D ist ein Schweizer Unternehmen, das 2011 gegründet wurde. Es bietet sowohl eine Desktopsoftware (ehemals „Pix4UAV“ → jetzt „Pix4Dmapper“) als auch einen online Service zur Verarbeitung von Luftbildern speziell für den Markt der UAV an. Da sich diese Software stetig weiterentwickelt, beziehen sich alle weiteren Angaben auf die „Pix4UAV“ Desktop Version, die im Zuge der Teilnahme an der internationalen Konferenz „UAV-g 2013“ in Rostock, den Autoren kostenlos zur Verfügung gestellt wurde.

Die Vorprozessierungs- und Upload-Software steht auf den Webseiten¹⁶ von Pix4D zur Verfügung. Als Vorinformationen benötigt Pix4D die durch das UAV mitbestimmten ungefähren Positionen der

¹⁵ <http://www.agisoft.ru/>

¹⁶ <http://pix4d.com/>

Aufnahmeorte. Die Orientierungen der Bilder (Bildrichtung, -neigung und -kipfung) sind nicht notwendig. Sollten in den Bildern GCPs verwendet werden, so müssen diese per Hand in den einzelnen Bildern identifiziert werden. Dieser Arbeitsschritt ist sehr zeitaufwendig, da der Benutzer sich in den Bildern selber orientieren muss. Dabei kann es zu Punktverwechslungen kommen. Es ist jedoch nicht nötig, ein und denselben GCP in allen Bildern zu bestimmen. Die Positionen der GCPs müssen im gleichen Koordinatensystem übergeben werden wie die Näherungswerte der Bildpositionen. Neben Nadiraufnahmen können auch schräge Luftaufnahmen oder sogar horizontale Visuren verarbeitet werden.

Pix4D erstellt in seinem Webservice einen Prüfbericht über Fehler, Inhomogenitäten und die erreichten Genauigkeiten (KÜNG ET AL., 2011). Das Projekt kann berichtigt und erneut hochgeladen werden. Es gibt zwei georeferenzierte Endprodukte. Zum einen kann lediglich das mosaikierte Orthophoto erworben werden und zum anderen ein Komplettpaket. Im Komplettpaket sind eine 3D-Punktwolke in verschiedenen Formaten, eine DEM-Datei (Digital Elevation Model) in Textformat, das Orthophoto im TIF-Format (Tagged Image File Format), das OrthoDEM im TIF-Format, die nachberechneten Kameraparameter (innere und äußere Orientierung) und kml-Dateien (Keyhole Markup Language) inkl. Fotokacheln für Google Earth enthalten.

Der Workflow der automatischen Berechnungen ist in Abbildung 9 zu sehen. Da die Bildverarbeitung sehr rechenintensiv ist, werden die Berechnungen im Webservice auf leistungsstarken Servern vorgenommen. Bei der Desktopversion werden die Ressourcen (z.B. Multicore und GPU von der Grafikkarte) voll ausgenutzt. Im Gegensatz zum Webservice stehen in der Desktopversion weitere Einstellmöglichkeiten zur Verfügung.

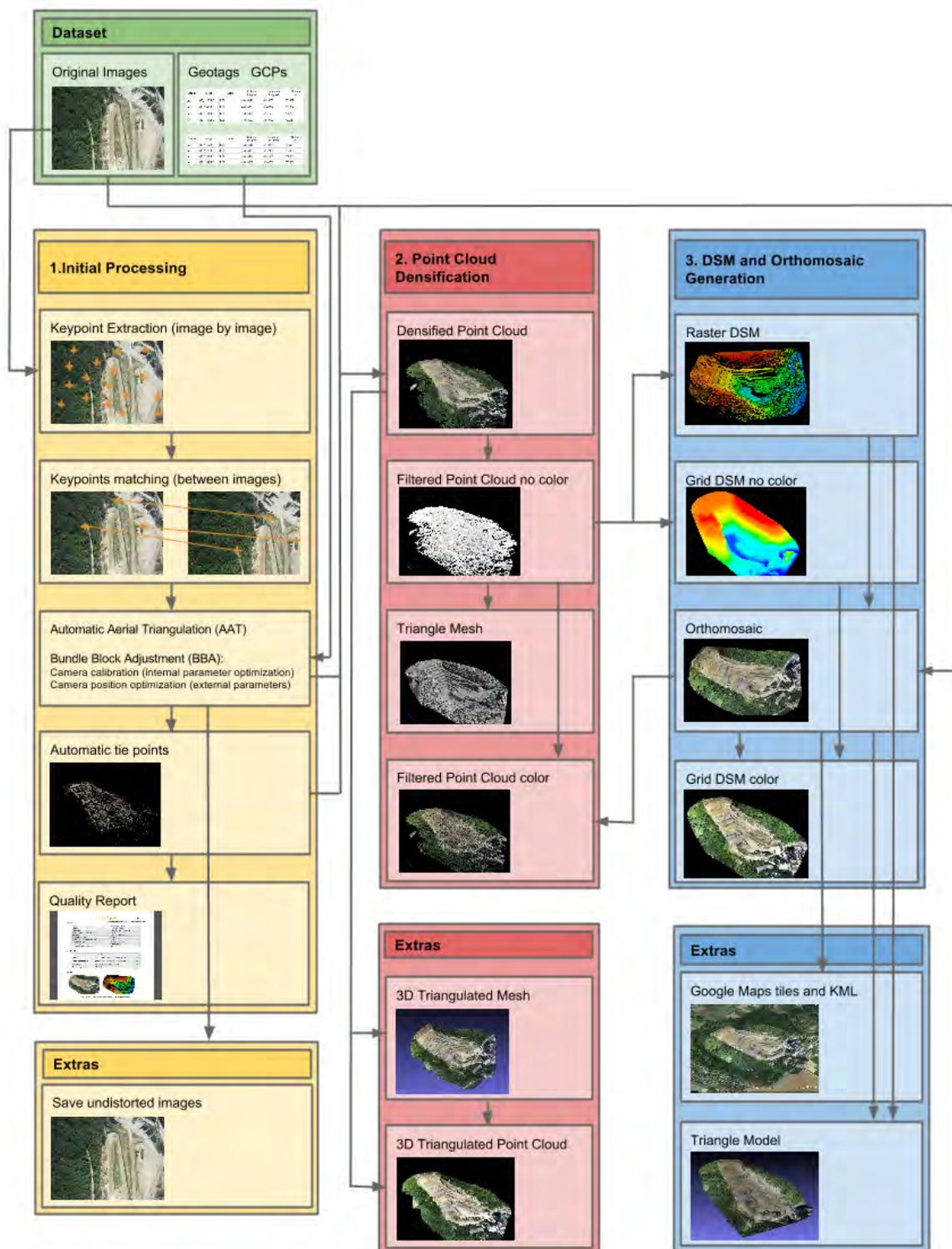


Abbildung 9: Workflow Pix4Dmapper (Quelle: <https://support.pix4d.com/entries/27939633>)

3 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

3.1 Einführung

Unmanned Aerial Systems (UAS) bestehen aus einer, wie im Namen schon erwähnt, unbemannten, fliegenden Trägerplattform (UAV) sowie den Kontrollelementen (z.B. Bodenstation, Fernbedienung, Überwachungssoftware etc.). Mit UAV ist der große Vorteil verbunden, diese Systeme in sogenannten „dull, dirty and dangerous“ Gebieten einzusetzen, wo ein menschlicher Einsatz zu gefährlich oder nicht möglich ist. Als Beispiel kann der Drohneneinsatz in Kriegsgebieten aber auch in kontaminierten Gebieten genannt werden. (COLOMINA ET AL., 2008) fassen weitere Vorteile von UAV wie folgt zusammen. UAV brauchen sich nicht an die physiologischen Grenzen des Piloten zu halten. Somit können höhere Beschleunigungskräfte über einen längeren Zeitraum problemlos geflogen aber auch größere Höhen erreicht werden. UAVs sind i.d.R. leichter und kleiner und dadurch umweltfreundlicher als bemannte Flugsysteme. Darüber hinaus gibt es Bereiche und Situationen, in denen unbemannte Trägerplattformen im Gegensatz zu bemannten Flugzeugen fliegen dürfen, z.B. Tiefflüge über Siedlungen (Flüge unter 500 ft oder für Städte unter 1000 ft). (EISENBEISS ET AL., 2009) ergänzen die Möglichkeiten, den Flug in geringen Höhen nahe am Objekt und unterhalb der Wolkendecke durchzuführen. Hinzu kommt die Möglichkeit der Übertragung von Telemetriedaten (Orientierungsdaten, Bilder, Videos) in Echtzeit an die Bodenstation. U.a. ist so eine schnelle Datenweiterverarbeitung möglich. Zudem sind die Flugkosten im Vergleich zu klassischen Befliegungen in Abhängigkeit der Anwendung i.d.R. viel geringer.

In einigen Bereichen der terrestrischen Photogrammetrie können UAV bestehende Aufnahmesysteme erweitern oder sogar ersetzen. Beispielhaft können hier die Erfassung von Texturen von Häuserfassaden aber auch die Erstellung von 3D-Stadtmodellen genannt werden. Kamerasysteme könnten in Kombination mit terrestrischen Verfahren ausgetauscht und somit z.B. ein konstanter Abstand zwischen Objekt und Kamera aus der Luft aus unterschiedlichen Blickwinkeln beibehalten werden. (GRUEN ET AL., 2014) geben hierfür einen Überblick in Form eines Zwischenberichts ihrer laufenden Forschungsarbeiten, in denen es um UAV in Kombination mit sogenannten terrestrischen Mobile Mapping Systemen (MMS) für die Erzeugung hochauflösender 3D-Stadtmodelle geht. Mit Hilfe der UAV-Technologie können Aufnahmen mit hohen Auflösungen z.B. für Texturen aber auch zur Erzeugung von hochaufgelösten 3D-Punktwolken, Orthophotos bzw. OrthoDEMs gemacht werden.

Moderne Navigationssysteme mit GNSS/INS-Technologie für UAVs erlauben ein präzises, wiederholbares Abfliegen einer programmierten Flugroute (z.B. via Autopilot). D.h. Bilder werden im richtigen Moment und am richtigen Ort ausgelöst. Die UAV-Untergruppe der sogenannten VTOL-Systeme (vertical takeoff and landing) können außerdem vor Ort starten und landen, was zu einer höheren Individualität im Vergleich zu klassischen Flugzeugen führt.

Jedoch sehen (COLOMINA ET AL., 2008) einen wesentlichen Nachteil darin, dass UAV nicht wie Menschen auf unerwartete Situationen reagieren. Das macht es den zuständigen Luftfahrtbehörden schwer, für UAV Regelungen zu treffen. Dies ist das größte Hindernis für die Entwicklung von UAV auf dem freien Markt. Andere wichtige Fragen stellen (COLOMINA ET AL., 2008) im Zusammenhang mit Kommunikationsverbindungen (Zuverlässigkeit, Reichweite, Bandbreiten), Gewicht, Flug außerhalb der Sichtweite, Kollisionsvermeidung und innerer Sicherheit.

Der Bereich der Unmanned Aerial Systems ist sehr groß. Er reicht von sehr kleinen UAVs, wie z.B. die Black Hornet¹⁷ von ProxyDynamics (Handgröße), bis hin zum HALE-System (high-altitude, long-endurance) der NASA. Der Begriff Drohne ist wegen seiner militärischen Herkunft, z.B. Global Hawk, Predator oder Reaper, negativ geprägt. Es gibt mehrere Definitionen des Begriffs „UAV“. Peter van Blyenburgh, Präsident der European Unmanned Vehicle System Association (EURO UVS), definiert UAVs wie folgt:

¹⁷ <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/black-hornet-briten-setzen-mini-drohne-in-afghanistan-ein-a-881588.html>

“UAVs are to be understood as uninhabited and reusable motorised aerial vehicle, which are remotely controlled, semi-autonomous, autonomous, or have a combination of these capabilities, and that can carry various types of payloads, making them capable of performing specific tasks within the earth's atmosphere, or beyond, for a duration, which is related to their missions.” (BLYENBURGH, 1999)

Wikipedia schließt sich in der Definition von UAVs der US Air Force an:

“An unmanned aerial vehicle (UAV), commonly known as a drone, is an aircraft without a human pilot onboard. Its flight is controlled either autonomously by computers in the vehicle, or under the remote control of a pilot on the ground or in another vehicle.” (WIKIPEDIA, 2012)

Van Blyenburgh kategorisiert in Tabelle 3 UAVs nach ihrer Größe und gibt zu jeder Kategorie den Aktionsradius (Range), die Flughöhe (Flight Altitude), die Flugdauer (Endurance), das maximale Abfluggewicht (MTOW) und den Flugstatus (Currently Flying) an. Die Sparte um die UAV im Micro- und Mini-Segment, also UAVs mit einem Abfluggewicht bis zu 5 kg bzw. 25 kg, sind in Deutschland besonders interessant, da die gesetzlichen Rahmenbedingungen überschaubar aber auch die Ladekapazitäten mittlerweile beachtlich sind. Für diese Art von UAV benötigt man eine Aufstiegsgenehmigung und eine fachgerechte Einweisung in das Flugsystem. Zu dieser Sparte zählen verschiedenste Systeme, wie z.B. Blimps (Luftschiffe), Starrflügler, Motorsegler, Helikopter, Quadro-, Hexa-, Oktokopter oder Kite-Systeme (Gleitschirme).

Tabelle 3: UAV-Kategorisierung nach van Blyenburgh (BLYENBURGH & CO., 2012)

RPAS Categories	Acronym	Range (KM)	Flight Altitude (m)	Endurance (hours)	MTOW (Kg)	Currently Flying
Tactical						
Nano	η	< 1	100	< 1	< 0,025	yes
Micro	μ (Micro)	< 10	250	1	< 5	yes
Mini	Mini	< 10	150 ^b to 300 ^a	< 2	< 30 (150 ^b)	yes
Close Range	CR	10 to 30	3.000	2 to 4	150	yes
Short Range	SR	30 to 70	3.000	3 to 6	200	yes
Medium Range	MR	70 to 200	5.000	6 to 10	1.250	yes
Medium Range Endurance	MRE	> 500	8.000	10 to 18	1.250	yes
Low Altitude Deep Penetration	LADP	> 250	50 to 9.000	0,5 to 1	350	yes
Low Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3.000	> 24	< 30	yes
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	14.000	24 to 48	1.500	yes
Strategic						
High Altitude Long Endurance	HALE	> 2000	20.000	24 to 48	(4.500 ^c) 12.000	yes
Special Purpose						
Unmanned Combat Aerial Vehicle	UCAV	approx. 1500	10.000	approx. 2	10.000	yes
Offensive	OFF	300	4.000	3 to 4	250	yes
Decoy	DEC	0 to 500	5.000	< 4	250	yes
Stratospheric	STRATO	> 2000	>20.000 & <30.000	> 48	TBD	no
Exo-stratospheric	EXO	TBD	> 30.000	TBD	TBD	no
Space	SPACE	TBD	TBD	TBD	TBD	no

TBD = To Be Defined ^a = according to national legislation ^b = in Japan ^c = Predator B

In den weiteren Betrachtungen wird speziell auf die Klassen der Micro- und Mini-UAV eingegangen. Am Markt finden sich eine Reihe von Firmen, die high-end Geräte mit Autopilotensystemen und eigener Planungs- und Auswertesoftware anbieten. Als Beispiele können hier die Aibotix GmbH, Airrobot GmbH, Ascending Technologies GmbH, CIS GmbH, geo-konzept GmbH, Geo-Technic, Germap GmbH, Height Tech, MAVinci und Microdrones GmbH aus Deutschland genannt werden. Aus der Schweiz kommen die Firma SenseFly, service-drone aus Indien und aus Slowenien C-Astral. Die Preise bewegen sich zwischen kleineren vierstelligen bis zu mittleren fünfstelligen Eurobeträgen.

Allen gemeinsam ist, dass sie elektrisch angetrieben werden, wofür leistungsfähige Akkus benutzt werden. Die meisten verwendeten Akkus sind Lithium-Polymer-Akkus. Diese Art Stromquelle kann in kurzer Zeit sehr viel Strom abgeben, ist dafür aber auch vergleichsweise schnell entleert, was sich auf die Flugzeit auswirkt. Größere Akkus bringen mehr Flugzeit, bedeuten aber auch mehr Payload.

Das relativ geringe Gewicht der Micro- bzw. Mini-UAV macht diese Klasse anfällig gegen Wind. Jedoch operieren diese Systeme relativ eng am Objekt (ca. 10 - 300 m) und sind somit unabhängig von der Wolkenbildung, was wiederum ein großer Vorteil gegenüber bemannten Flugzeugen ist. Problematisch kann es aber werden, wenn in Gebieten geflogen wird, in denen auf den Kommunikationsfrequenzen zwischen Pilot und UAV andere stärkere Sender aktiv sind und damit Interferenzen entstehen. Deshalb ist es wichtig, im Vorfeld potentielle Störquellen zu identifizieren und gegebenenfalls auf andere Funkkanäle umzuschalten.

Ganz deutlich wird bei den Herstellern zwischen zwei Flugsystemen unterschieden. Auf der einen Seite werden Starrflügler oder Flächenflügler verwendet, die über Katapulte oder aus der Hand gestartet werden. Sie benötigen zum Landen eine ebene Fläche. Die Flächenflügler der Firma C-Astral landen sogar mit Fallschirm, was aus großen Höhen und bei Wind dazu führen kann, dass sich der Landepunkt verschiebt. Das UAV wird aber durch die vergleichsweise weiche Landung nicht beschädigt. Ein wesentlicher Vorteil ist die lange Flugzeit bis zu mehreren Stunden und die damit verbundene vergleichsweise hohe Flächenleistung.

In der anderen Klasse werden die Senkrecht-Starter und -Lander vertreten. Hier findet man Heli-, Quadro-, Hexa- und Oktokopter. Sind mehr als vier Rotoren an einem UAV verbaut, spricht man auch von der Unterklasse der Multikopter. Diese Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine Start- und Landebahn benötigen. Sie sind in der Lage sowohl eine klassische photogrammetrische Befliegung durchzuführen als auch im Schwebestand Aufgaben auszuführen. Die Flugzeiten variieren hier zwischen 10 und 88 min¹⁸. Außerdem gibt es mittlerweile UAV, die sogenannten Wingcopter¹⁹, die eine Mischung aus Senkrechtstarter und Gleiter sind.

Daneben gibt es auch Selbstbausätze und open-source Systeme wie von der Firma Mikrokopter und diverser anderer Anbieter aus der sehr großen Modellbaubranche. Sie sind um ein vielfaches billiger, benötigen aber eine Menge know-how beim Zusammenbauen und beim Fliegen. Zunehmend werden bewährte Assistenzfunktionen übernommen (z.B. „Autopilot“, „Position Hold“, „Wegpunktnavigation“, „Coming Home“ etc.)

Die Navigation vieler UAV geschieht über Multisensorsysteme, die aus einer leistungsstarken und sehr leichten CPU (Central Processing Unit) bestehen, die Informationen von angeschlossenen GNSS- und IMU-Sensoren verarbeitet. Zu den Sensoren gehören je nach Ausstattung des UAV bspw. Gyroskope, Beschleunigungsmesser, Magnetometer, Druckluftsensoren (Druckfühler), Kameras und Abstandssensoren.

Die Positionsgenauigkeit hängt von dem verwendeten GNSS-Receiver ab. (EISENBEISS ET AL., 2009) vergleichen die Genauigkeit der GNSS-Position eines low-cost-Empfängers am UAV mit einer parallel mit Hilfe eines zielverfolgenden Tachymeter getrackten Position. Dabei kommen sie zu dem Ergebnis, dass die Genauigkeiten der Positionierung von low-cost Sensoren bei 1-2 m liegen, wobei die relative Genauigkeit im Dezimeterbereich liegt. Als Beispiel für einen modernen low-cost GNSS-Receiver kann die Empfangs- und Verarbeitungseinheit „uBlox 6“ genannt werden, die ein sehr geringes Gewicht hat, aber sehr gute Positionsgenauigkeiten (absolute Positionsgenauigkeit < 1 m) im Differential-GNSS Modus (DGNSS) erreicht und dabei Signalverarbeitungsfilter einsetzt, die noch aus stärker verrauschten Daten Satelliteninformationen extrahieren können. Zusätzlich wird die Höhe oftmals durch barometrische Höhensensoren und die Flugrichtung durch ein Magnetometer abgeglichen.

Die meisten Flugsysteme sind für den Outdoor-Bereich konzipiert. Jedoch gibt es mittlerweile ernstzunehmende Spielzeug-UAV, wie z.B. von der Firma Parrot die AR-Drone²⁰, die über Kamertechniken sehr gut im Indoor-Bereich klar kommen und sich nach und nach über zusätzliche Module

¹⁸ <http://www.microdrones.com/products/md4-1000/md4-1000-auf-einen-blick.php>

¹⁹ <http://www.youtube.com/watch?v=O3Fn-I5DoBs>

²⁰ <http://ardrone2.parrot.com/>

(z.B. GNSS-Modul) dem Outdoor-Bereich nähern. Dieses System kostet in der Basisversion ca. 300,-€ und es stellt sich die Frage, ob man diese Systeme auch für photogrammetrische und fernerkundliche Zwecke benutzt und dabei einen Verlust oder eine Beschädigung der Drohne in Kauf nimmt, da die Ersatzteile im Vergleich sehr billig sind und das Gesamtsystem relativ robust ist. Zur Bestimmung der Höhe wurden ein Druckfühler und zusätzlich Ultraschallsensoren verbaut. Die Ultraschallsensoren liefern eine präzisere Höheninformation in den ersten 6 Höhenmetern, was ein automatisches Starten und Landen ermöglicht.

Zur Bestimmung der Position und der Fluggeschwindigkeit ist hier eine Kamera in Nadirrichtung mit QVGA Auflösung und 60 fps verbaut. Das Potential der Kameratechnik ist dabei aber noch nicht voll ausgeschöpft und bleibt somit Gegenstand der Forschung im Bereich „Vison based Navigation“. (TEULIÈRE ET AL., 2011) beschreiben in diesem Zusammenhang das Verfolgen von Objekten mit Hilfe von Bildern. (SHETA ET AL., 2012) vergleichen und analysieren unterschiedliche nichtlineare Ausgleichungsverfahren für „Vision based Navigation“-Algorithmen. (GAGEIK ET AL., 2013) untersuchen ein Indoor-Navigationssystem mit barometrischer Höhenbestimmung zusammen mit Ultraschallsensoren, zwei Infrarotsensoren und einer IMU. Dabei werden alle Daten auf dem UAV verarbeitet. Resultierende Positionsungenauigkeiten werden zwischen 10 und 30 cm angegeben.

Die Flugführung und vor allem die Flugsicherheit obliegen immer noch einem menschlichen UAV-Piloten. Zwar können Autopilotensysteme die Steuerung des UAV in einer wesentlich effizienteren Art und Weise übernehmen, jedoch werden i.d.R. definierte Flugrouten abgeflogen. Dabei agiert das UAV quasi blind und reagiert somit nicht auf Hindernisse. Der UAV-Pilot ist dafür verantwortlich, dass das UAV einen freien Flugweg hat. Er muss bei Hindernissen, z.B. andere Flugzeuge (Rettungshubschrauber), die den gleichen Luftraum nutzen dürfen, entsprechend kurzfristig und jederzeit reagieren können.

Damit auch ungeübte Piloten teure Flugsysteme sicher fliegen können, gibt es zusätzlich zum Autopilotensystem weitere Assistenzsysteme und -funktionen.

Eine der wichtigsten Funktionen ist die „Position-Hold“-Funktion. Dabei schwebt das UAV kontinuierlich an einer Position und in einer konstanten Höhe und korrigiert die eigene Position automatisch. Der Pilot muss somit keine korrigierenden Flugmanöver gegen Wind oder Höhenabweichungen vornehmen.

Eine weitere wichtige Funktion ist die „Wegpunkt-Navigation“. Hierbei fliegt das UAV im Autopilot-Modus vordefinierte Punkte an und erledigt dort ihm übertragene Aufgaben. Je nachdem wie umfangreich das Wegpunktplanungsprogramm ist, können punktuelle Aufgaben (z.B. mach ein Foto an einer bestimmten Position) oder sogar vektorielle Aufgaben (z.B. fliege mit einer bestimmten Geschwindigkeit in einer bestimmten Höhe und löse in einem konstanten Zeitintervall die Kamera aus) durchgeführt werden. Gerade die vektoriellen Aufgaben sind sehr wichtig für photogrammetrische und fernerkundliche Anwendungen.

Sollte das UAV aus irgendwelchen Gründen vom UAV-Piloten nicht mehr gesehen werden, weil es zu weit weg ist oder Sichthindernisse vorhanden sind, so kann über die „Coming Home“-Funktion das UAV instruiert werden, mit Hilfe des Autopilotensystems zu seiner Startposition zurückzukehren. Dabei geht das UAV vorher auf eine vordefinierte sichere Höhe und kehrt in direkter Fluglinie zurück. Hindernisse werden dabei i.d.R. nicht erkannt. Daher muss der UAV-Pilot im Vorfeld entsprechende Sicherheitsprotokolle am UAV einstellen.

Über einen zusätzlichen Abstandssensor zum Boden gerichtet, lassen sich bereits Starts und Landungen automatisch durchführen. Zudem ist es bei den meisten Systemen möglich, Notfallprotokolle zu speichern, wie z.B. bei Abriss der Funkverbindung, leeren Akkus oder Störung einzelner Sensoren durch äußere Einflüsse (z.B. Magnetfeldstörung).

Um dem ungeübten UAV-Piloten noch mehr zu entlasten, werden sogar unterschiedliche Flugmodi angeboten. Eines der größten Probleme eines ungeübten Piloten ist die sich ständig wechselnde Flugausrichtung des UAV. Kommt bspw. ein UAV auf den Steuerer zugeflogen mit entsprechender Ausrichtung, kommt es häufig vor, dass rechts und links sowie vorne und hinten vertauscht werden. Für diesen Zweck wird der Flugmodus bezogen auf den Standpunkt des UAV-Piloten angeboten. Dabei ist

es egal in welche Richtung das UAV schaut. Legt man den Hebel nach vorn, so bewegt sich das UAV von einem weg. Äquivalent dazu ist es mit den anderen Richtungen.

Ein weiterer Flugmodus ist der „Dynamik Position Hold“-Modus, bei dem die Flugsteuerung komplett vom Autopilotensystem übernommen wird und der UAV-Pilot über einen virtuellen Cursorpunkt eine neue Position vorgibt, die das UAV dann autonom anfliegen soll. Die Steuerung per Fernbedienung ändert sich hier nicht, jedoch braucht man z.B. Windeinflüsse nicht mehr zu berücksichtigen. Außerdem sollte es ausgeschlossen sein, dass das UAV in Flugmanöver gerät, in denen Absturzgefahr besteht.

Der Bereich der automatischen Hinderniserkennung (Sense and Avoid Systems) ist ein umfangreiches Forschungsfeld. Verschiedenste Ansätze, z.B. photogrammetrisch (Stereonormalfall etc.) oder mit Hilfe von Laserscannern oder Abstandssensoren (Richtungs- und Abstandsmessung) zur Bestimmung der 3-dimensionalen Umgebung, werden erforscht und entwickelt. (SCHERER ET AL., 2008) geben einen umfangreichen Überblick über Algorithmen (z.B. Multiresolution Laplacian Planning Algorithm) in diesem Bereich und zeigen das Flugverhalten anhand eines Modell-Helikopters (Yamaha RMax mit einem max. Payload von 31 kg und einem max. Abfluggewicht von 94 kg), ausgerüstet mit einem 3D-Laserscanner in einem Testgebiet. Dabei sollte der Helikopter bestimmte Punkte anfliegen, in deren direkter Verbindung Hindernisse aufgebaut waren. (BLÖSCH ET AL., 2010) verwenden eine senkrecht nach unten gerichtete Kamera in Verbindung mit dem SLAM-Algorithmus (simultaneous localization and mapping), um gleichzeitig die Umgebung bezogen auf das UAV zu kartieren. (GAGGIK ET AL., 2012) konzipieren einen Ring mit horizontalen Ultraschallsensoren, die Hindernisse ähnlich wie Einparksensoren rund um das UAV erkennen. (HOLZ ET AL., 2013) haben verschiedenste Sensorsysteme an ein prototypisches UAV integriert und evaluiert. (DROESCHEL ET AL., 2013) geben für den verwendeten 3D-Scanner nähere Informationen. (MORI & SCHERER, 2013) verfolgen den photogrammetrischen Ansatz und nutzen dabei die AR Drone und den SURF-Algorithmus (Speeded-Up Robust Features), eine schnellere Version des SIFT-Algorithmus, um frontale Hindernisse zu detektieren. Besonders für Indoor-Befliegungen sind diese Systeme essentiell.

Die UAV-Community ist bereits national als auch international sehr groß und wächst stetig, was sich z.B. auf den internationalen Konferenzen „UAV-g 2011“ in Zürich, „ISPRS 2012“ in Melbourne und „UAV-g 2013“ an der Universität Rostock zeigte. Durch immer bessere Flugassistenzsysteme wird es auch für ungeübte Piloten und somit für deutlich mehr potentielle Anwender möglich, Befliegungen durchzuführen. Durch die Bereitstellung verschiedenster UAV als Trägerplattform steigt die Bedeutung der UAV vor allem im zivilen Markt an. Sensorsysteme werden an die Trägerplattformen angepasst. Große Firmen für Vermessungsequipment steigen in dieses Marktsegment ein. So wurden z.B. von Trimble die Firma Gatewing, stellvertretend für die Flächenflügler, und von der Firma Hexagon/Leica die Firma Aibotix, stellvertretend für die VTOL-Systeme, übernommen.

3.2 Micro-UAVs in der Luftbildphotogrammetrie

(EISENBEISS, 2009) erweitert den Begriff UAV für photogrammetrische Zwecke und definiert den Begriff UAV-Photogrammetrie. Dabei spielt die Nutzlast eine wesentliche Rolle, mit der neben photogrammetrischen auch fernerkundliche und geodätische Daten erhoben werden können.

„The new terminology UAV photogrammetry [...] describes a photogrammetric measurement platform, which operates remotely controlled, semi-autonomously, or autonomously, without a pilot sitting in the vehicle. The platform is equipped with a photogrammetric measurement system, including, but not limited to a small or medium size still-video or video camera, thermal or infrared camera systems, airborne LiDAR system, or a combination thereof. [...] UAV photogrammetry can be understood as a new photogrammetric measurement tool.“
(EISENBEISS, 2009)

In der Luftbildphotogrammetrie werden i.d.R. Kameras oder Kamerasysteme verwendet. Für die unterschiedlichsten Anwendungen und Kamerasysteme existieren bereits unterschiedliche Halterungs- bzw. Verbindungssysteme zum UAV. Die Nutzlast sollte sich im Schwerpunkt des UAVs befinden. Das gilt insbesondere bei beweglichen Teilen. Massenverlagerungen in der Nutzlast während des Fluges destabilisieren das UAV. Außerdem ist die Größe der Nutzlast meist durch die Bauweise des UAV begrenzt. Die von (Blyenburgh & Co., 2012) aufgestellten Gewichtsklassen enthalten sowohl das Gewicht der mitgeführten Sensorik als auch das der Trägerplattform. Somit bleibt für die Kamerasysteme in Abhängigkeit des UAV-Herstellers meist nicht mehr als ca. 1.5 kg im Mikro-UAV Bereich.

Sollen Luftbilder aus verschiedenen Blickrichtungen gemacht werden, muss die Kamerahalterung (Gimbal) schwenkbar sein. Servomotoren kompensieren die Flugbewegungen und halten das Kamerasystem über Nick- und Rollrichtung während des Fluges stabil ausgerichtet.

UAV-Bildverbände unterscheiden sich von üblichen photogrammetrischen Bildflügen vor allem dadurch, dass kleinformatigere Kamerasysteme in unkonventionelleren Aufnahmeanordnungen zum Einsatz kommen. Zudem haben die meisten UAVs bedingt durch das geringe Gewicht eine instabilere Fluglage, während eine stabilisierende Aufhängung meist fehlt. Das führt dazu, dass größere Abweichungen vom Nadirfall und damit deutlich unregelmäßigere Bildüberlappungen zustande kommen (CRAMER & HAALA, 2012). Im Vergleich dazu weichen bei der klassischen Luftbildphotogrammetrie die Nadiraufnahmen schlimmstenfalls nur wenige Grad ab. Ausgehend von den teilweise stark verkippten Aufnahmen ist die gewünschte Überlappung im Bildverband nicht mehr gegeben. Daher werden i.d.R. mehr Aufnahmen gemacht, als notwendig wären. Jedoch orientieren sich wiederum einige Bildverarbeitungsalgorithmen bei der Suche nach Verknüpfungspunkten an stark überlappenden Bildern (teilweise mit mehr als 90% Überlappung). Das macht den Bildverband stabiler, wobei hohe Objekte besser erkannt werden.

Die äußeren Orientierungsparameter der Bilder werden bei UAVs mit der vorhandenen low-cost-GNSS- (absolute Positionsgenauigkeit 1-2 m) und IMU-Technologie (Winkelgenauigkeit schätzungsweise ca. 0.5° - 1°) näherungsweise bestimmt. Alternativ dazu wird ein Verfahren zur Bestimmung der äußeren Orientierungselemente eines UAV mit Videotachymetern und zielverfolgenden Kameras in (NIEMEYER ET AL., 2012) und (NIEMEYER & BILL, 2013) beschrieben.

(KÜNG ET AL., 2011) zeigen, dass die Genauigkeit der 3D-Berechnungen von der Bildauflösung und der Flughöhe abhängen und beschreiben folgend den Workflow einer automatischen photogrammetrischen Luftbilddauswertung für UAV ohne GCPs.

1. Suche nach markanten Verknüpfungspunkten in den Bildern z.B. mit dem SIFT-Operator.
2. Verknüpfungspunkte und genäherte äußere Orientierungsparameter des UAV gehen in eine Bündelblockausgleichung ein.
3. Basierend auf den Ergebnissen der Bündelblockausgleichung werden die Verknüpfungspunkte verifiziert und ihre 3D-Koordinaten berechnet.
4. Diese 3D-Punkte werden interpoliert, so dass sie ein trianguliertes irreguläres Netzwerk bilden, mit dem man ein DEM (Digitale Elevation Modell) erzeugen kann. An dieser Stelle kann das 3D-Modell zusätzlich verdichtet und somit die räumliche Auflösung erhöht werden.
5. Das DEM dient als Grundlage für Orthomosaik- bzw. Orthophotoberechnungen.

Einen erweiterten Überblick über den Workflow präsentiert (GRENZDÖRFFER, 2013c) in Abbildung 10. Klassische photogrammetrische Softwarepakete, wie z.B. ERDAS LPS, die sich auf nur geringfügig aus der Nadirrichtung abweichende Luftbilder verlassen, funktionieren bei zu schrägen Aufnahmen unzureichend (GRUEN ET AL., 2014) und (HERDA & BREUER, 2013). Das Problem dabei ist, dass nicht genügend Verknüpfungspunkte in den Bildern automatisch gefunden werden.

Die Bildflugplanung für klassische Luftbildbefliegungen wird für Flüge mit UAV um einige Parameter erweitert. Ging man bei der klassischen Befliegung von einer konstanten Höhe, Geschwindigkeit, Blickrichtung, Fokussierung und Blendeneinstellung einer Messkamera aus, so müssen diese Werte nun individuell angepasst werden. Die Flugtrajektorien von UAVs sind somit komplexer. Durch

die geringen Flughöhen müssen Kameraeinstellungen im Bereich der Fokussierung, Belichtungszeit und Blende angepasst werden. Unpassende Einstellungen führen i.d.R. zu unscharfen bzw. über- oder unterbelichteten und somit unbrauchbaren Aufnahmen. Hingegen müssen atmosphärische Korrekturen (Refraktion) und die Erdkrümmungskorrektur i.d.R. nicht berücksichtigt werden, da ihr Einflüsse bei diesen niedrigen Flughöhen zu gering ist.



Abbildung 10: Automatisierter photogrammetrischer Workflow von UAV-Bilddaten (GRENZDÖRFFER, 2013c)

3.3 Zum Workflow für Befliegungen mit UAVs

3.3.1 Vorbereitung

Soll ein Gebiet mit einem UAV befliegen werden, muss im Vorfeld geklärt sein, ob eine Aufstiegs-genehmigung für den Piloten von der zuständigen Luftfahrtbehörde erteilt wurde und welche Restriktionen damit verbunden sind. I.d.R. darf sich das UAV nur im unüberwachten Luftraum aufhalten. Einige Luftfahrtbehörden geben aber auch geringere maximale Flughöhen (z.B. lediglich 100 m) vor. Zudem darf nur auf Sicht ohne Hilfsmittel geflogen werden, so dass man das UAV noch aus der Ferne manövrieren und sicher landen kann. Das schließt erfahrungsgemäß einen Aktionsradius von ca. 250 m ein. Größere Fluggeräte sind in größerer Entfernung jedoch noch gut erkennbar (z.B. Starrflügler oder Motorsegler). Der Start- und Landepunkt ist optimal zu wählen. Zudem muss auch der Eigentümer bzw. Besitzer des Gebiets, auf dem gestartet und gelandet wird, dem Flug und den Flugaktionen (z.B. Luftbilder) zustimmen. Weitere Restriktionen, wie z.B. in der Nähe befindliche Flughäfen, militärische Einrichtungen, Flugkorridore für z.B. Notfallhubschrauber etc. müssen beachtet werden.

3.3.2 Flugplanung

Je nach Erfahrungheit des Piloten und Ausstattung des UAV kann der Flug sowohl manuell als auch per Autopilot durchgeführt werden. Für beide Möglichkeiten eignet sich eine Basisstation zur Überwachung der Telemetriedaten des UAV. Die Flugroute sowie die einzelnen Wegpunkte sollten berechnet und der Autopilot damit programmiert werden. Beim manuellen Flug sollte die Basisstation in der Lage sein, zumindest die Flugroute als Hintergrundbild und die UAV-Position inkl. der Positionsdaten im Vordergrund darzustellen.

Für die Flugplanung stellt sich die Frage nach der vom Zweck der Luftbilder abhängigen Bodenauflösung bzw. GSD und der damit verbundenen Flughöhe über dem fotografierten Gebiet (siehe Kap. 2.2). Sind Start- und Landepunkt sowie die Flughöhe definiert, kann die Planung der Flugroute durchgeführt werden. I.d.R. wird dafür Flugplanungssoftware benutzt. Bei höherwertigen UAV wird spezielle Flugplanungs- und Auswertesoftware meist als Paket mit angeboten. Im Fall von Microdrones wäre das z.B. „mdCockpit“ und bei Ascending Technologies, die den Falcon 8 produzieren, ist das „AstecPilot“. Ein anderes allgemeines Flugplanungsprogramm wäre z.B. der GRID-Flightmanager, der insbesondere für Befliegungen im Gebirge entwickelt wurde (RAGG & KLEINDIENST, 2013). (FEICHTNER, 2013) beschreibt, wie man einen durchgängigen GIS-Workflow für Mikrodrohneinsätze, hier für das Mikrokooper-System, unter Verwendung von ArcGIS Desktop erstellt. Bei allen Flugplanungsprogrammen ist zu berücksichtigen, inwieweit sie Höheninformationen des Geländes oder mögliche Hindernisse (z.B. Strommasten, Türme etc.) berücksichtigen. Bei „mdCockpit“ werden z.B. Höheninformationen aus SRTM-Daten (Shuttle Radar Topography Mission) berechnet, die automatisch während der Planung vom Server des USGS (U.S. Geological Survey) heruntergeladen werden (microdrones, 2012).

In Abhängigkeit des Auslöseintervalls der Kamera muss die Geschwindigkeit entlang der Transekte angepasst werden, um die nötigen Überlappungen der Bilder zu gewährleisten. I.d.R. geben die Hersteller für ihr Fluggerät eine maximale Flugzeit an, die nicht überschritten werden sollte.

Für den Flugbetrieb sind GNSS-Sensoren unverzichtbar, um die UAV-Position zu überwachen. Hierfür werden meist Ein-Frequenz-Empfänger mit einer relativen Genauigkeit von 1-2 m benutzt. Diese Positionsgenauigkeit reicht aber für eine akkurate Orthophotoberechnung nicht aus. I.d.R. sind zwar die Bilder innerhalb des Verbands richtig orientiert, jedoch kann es passieren, dass der komplette Bildverband um mehrere Meter verrutscht sein kann. Eine gängige Methode, diesem Problem zu entgegen, ist das Auslegen von GCP, deren Positionen z.B. per GNSS RTK (Global Navigation Satellit System, Real Time Kinematic) genau vermessen werden. Diese GCPs sollten so gebaut sein, dass sie in den Bildern für die entsprechende Flughöhe und Bodenauflösung gut zu erkennen sind. Dabei gilt, dass ein Kreis am Boden in den Bildern durch Kameraneigung als Ellipse dargestellt wird. (LUHMANN ET AL., 2006) untersuchten den Zusammenhang zwischen Flächengröße (Pixelanzahl) und Genauigkeit des Mittelpunkts nach Schwerpunktmethod, kleinste-Quadrate-Methode und Ellipsen-Operator. Die GCPs sollten daher eine Größe haben, mit der sie von mindestens 5 Pixel im Durchmesser in den Bildern abgebildet werden.

Das eigentliche Aufnahmesystem, die Kamera, unterliegt für die spätere photogrammetrische Auswertung bestimmten Restriktionen. Die innere Orientierung der Kamera darf sich während des Fluges nicht verändern. Das bedeutet u.a., dass keine automatische Fokussierung vorgenommen werden darf. Der Kamerasensor sollte zudem durch eine konstante Belichtungszeit mit einer festeingestellten Blende belichtet werden. I.d.R. verfügen heutige digitale Kameras über einen manuellen Modus, in dem automatische Korrekturen abgeschaltet sind.

Die Belichtungszeit sollte so gewählt werden, dass selbst für stärkere Korrekturbewegungen des UAV die Bewegungsunschärfe innerhalb der Toleranz bleibt (siehe Kap. 2.5). Sind die Beleuchtungsverhältnisse vor Ort so gut, dass eine weitaus geringere Belichtungszeit möglich wäre als nötig, so kann diese für eine größere Blendenzahl (kleiner werdende Iris) ausgenutzt werden, was zu mehr Schärfentiefe führt. Diese Schärfentiefe wirkt sich positiv bei bewegtem Gelände aus (unterschiedliche Abstände zwischen abgebildeten Objekten und Kamerastandpunkt).

Für die spätere Luftbilddauswertung ist es wichtig, die inneren Kameraparameter und deren Stabilität zu kennen. Gerade im Bereich der Amateurkameras, wie sie oft bei UAV genutzt werden, können diese Werte stark variieren. Daher sollte vor und nach dem Flug die Kamera kalibriert werden, um mögliche Abweichungen zu bestimmen.

3.3.3 Flug

Der Flug selbst ist zeitlich gesehen im Gegensatz zur Flugvorbereitung meist sehr kurz. Gerade bei Quadro- und Multikoptern mit elektrischem Antrieb liegen die Flugzeiten mit einem Akku i.d.R. bei

10 bis 30 min. Der größte Teil der elektrisch betriebenen Kopter kann derzeit aber nicht länger als 15 min in der Luft bleiben.

3.3.4 Auswertung

Während des Fluges wird bei einigen Systemen die Kamera vom UAV ausgelöst und der Auslösemoment mit der derzeitigen Positionsinformation der Drohne gespeichert. Diese Werte eignen sich besonders gut als Näherungswerte für die Bündelblockausgleichung. Normalerweise sollten die Orientierungswinkel (Azimut, Elevation, Roll) mit erfasst werden und in die Ausgleichung mit eingehen. Aus persönlicher Erfahrung waren diese Werte aber größtenteils als Näherungswerte nicht zu gebrauchen. Glücklicherweise benötigen heutige Auswertesoftwarepakete wie „Pix4UAV“ oder „Photoscan“ keine Winkelnäherungswerte für die Auswertung.

Heutige Auswertestrategien stützen sich auf merkmalsbasierte Zuordnungsverfahren, wie z.B. den Sift-Operator und genügend Rechenkapazität. Im Ergebnis entstehen u.a. Orthophotos, OrthoDEMs und 3D-Punktwolken des fotografierten Gebiets. Mit der 3D-Punktwolke und den OrthoDEM-Bildern lassen sich Massen, Massendifferenzen, Epochenvergleiche und Deformationen berechnen. Im Orthomosaik können Entfernungen und Flächen gemessen aber auch radiometrische Klassifizierungen durchgeführt werden. Bei einigen Systemen wie „Pix4UAV“ und „Photoscan“ werden diese Daten für den Betrieb in Google Earth als KML-Datensatz in verschiedenen Kachelgrößen aufbereitet. So erhält man einen guten Überblick über das prozessierte Gebiet.

3.4 Rechtliche Rahmenbedingungen in Deutschland

Der Begriff UAS wird im Luftverkehrsgesetz (§ 1, Abs. 2, LuftVG) als unbemannte Luftfahrtsysteme benannt.

„Ebenfalls als Luftfahrzeuge gelten unbemannte Fluggeräte einschließlich ihrer Kontrollstation, die nicht zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung betrieben werden (unbemannte Luftfahrtsysteme).“ (LuftVG, 2013)

„Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, weitere Verordnungen auf Bundes- und Landesebene zu erlassen, z.B. Änderungen in der Verordnung über Luftfahrtpersonal (LuftPersV), der Luftverkehrsordnung (LuftVO), der Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung (LuftVZO) etc. Beispielsweise ist derzeit im Luftverkehrsrecht keine Lizenz für den Steuerer eines UAS vorgesehen, denn dafür ist eine Ergänzung der LuftPersV notwendig. Gleichfalls fehlen die rechtlichen Grundlagen für Lizenzen für UAS-(Nutzlast)Operateure, dafür ist eine Änderung § 6 Abs. 2 LuftVZO notwendig. Um zukünftig gleichberechtigt mit anderen Luftfahrtteilnehmern fliegen zu können sind Musterzulassungen von UAS durch das Luftfahrtbundesamt notwendig. Die dafür notwendigen Schritte können nun eingeleitet werden. Schließlich existieren in Deutschland, wie auch auf internationaler Ebene, zurzeit noch keine Zulassungsbestimmungen für autonom operierende UAS.“ (GRENZDÖRFFER, 2013c)

Zu den rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland zählt u.a., dass nicht jeder Benutzer mit einem UAV und nicht jedes UAV überall fliegen darf. Mit einer zertifizierten Einweisung ins Flugsystem und einer amtlichen Aufstiegs Genehmigung können nach § 16 Abs. 7 (LuftVO, 10.08.1963, Neugefasst durch Bek. v. 27.3.1999 I 580; zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 8.5.2012 I 1032) Micro-UAVs im unüberwachten Luftraum auf Sicht, d.h. ohne besondere optische Hilfsmittel eindeutig erkennbar, geflogen werden. Befliegungen mit UAVs bis zu 25 kg Abfluggewicht bedürfen eines speziellen Nachweises des Piloten über die Befähigung, das UAV sicher zu fliegen. UAVs über 25 kg sind in der Bundesrepublik Deutschland hingegen für zivile Zwecke nach § 15a Abs. 3 (LuftVO) nicht zugelassen. Unter diesen Bedingungen werden auch spezielle Anforderungen an die Nutzlast gestellt. Die Nutzlast darf zusammen mit der eigentlichen Trägerplattform das zulässige Abfluggewicht nicht überschreiten. Fernerkundungssysteme, wie z.B. Kamerasysteme, müssen daher angepasst werden.

Die Umsetzung der LuftVO erfolgt in Deutschland durch die Landesluftfahrtbehörden. Auf Basis der nicht bindenden Empfehlung des BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtent-

wicklung) (Nachrichten für Luftfahrer → NFL 161/12) gibt es zwei Klassen von Erlaubnissen, Allgemeinerlaubnis für <5kg Gesamtmasse und Einzelerlaubnis für >5kg oder Verbrennungsmotor oder über gefährlichem Gebiet.

„Die Erlaubnis gilt für beliebige Orte innerhalb des Zuständigkeitsbereichs der jeweiligen (Landes)luftfahrtbehörde, aber nicht über Menschenansammlungen, Unglücksorten, Katastrophengebieten, Justizvollzugsanstalten, Industrieanlagen, Kraftwerken, militärischen Anlagen, außer der Auftraggeber erlaubt es! Es ist eine Anmeldung eines Flugs innerhalb geschlossener Bebauung beim Ordnungsamt oder der Polizei notwendig. Die Erlaubnis ist maximal 3 Jahre gültig und die Kosten liegen bei 50 bis 200 € (pro Behörde / bzw. Bundesland). Die maximal erlaubte Flughöhe liegt bei 100 m (Ausnahmen bis 300 m). Die Verwendung von GPS und Wegpunktnavigation ist in Sichtweite erlaubt. [...] Die Erlaubnis ist begrenzt auf einen oder mehrere Orte. Für Einsätze „mit erhöhtem Gefährdungspotential“ hat der Steuerer eine Befähigung und die Erfüllung der technischen Anforderungen nachzuweisen. Mehrere Orte oder längere Zeiträume sind möglich.“ (GRENZDÖRFFER, 2013c)

4 Photogrammetrisches Potential von Micro-UAV

4.1 Anwendungspotential und Nutzlasten

Im Hinblick auf die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete mit Micro- und Mini-UAV haben sich auch diverse Nutzlasten und Auswerteprogramme entwickelt. Einen allgemeinen Überblick über potentielle Einsatzgebiete im zivilen Sektor gibt (SKRZYPIETZ, 2011). Sie stellt die Anwendungsmöglichkeiten von UAV für zivile Aufgaben im Hinblick auf Katastrophenmanagement (Waldbrände, Erdbeben, kontaminierte Gebiete), Umweltschutz (illegaler Fischfang, Luftverschmutzung, Ölfilme, Trinkwasserschutz), Wissenschaft (Atmosphärenforschung, Vulkane, Landwirtschaft, Transport), Kommunikationstechnik (Telekommunikationsrelays, Breitbandkommunikation), Schutz wichtiger Infrastruktur (Pipelines, Verkehrsüberwachung) und Überwachung (Grenzgebiete, große öffentliche Veranstaltungen) zusammen.

Das Anwendungsspektrum der UAV-Technologie wächst stetig. Viele Firmen passen ihre Hardware dem Potential unbemannter Trägerplattformen an. Das Anwendungspotential steigt, da die UAV sicherer und leistungsfähiger werden. Zudem verbessern sich die Navigationssysteme hin zum autonomen Fliegen, d.h. die menschliche Schnittstelle zwischen Nutzlast und Flugsystem wird zukünftig technologisch geschlossen. Intelligente Nutzlasten werden somit mit Funktionen, ähnlich denen eines Copiloten, ausgestattet sein und am eigentlichen Flug direkt beteiligt werden. Zusätzlich soll ein kleiner Überblick über bestehende Systeme gegeben werden.

4.1.1 Agrar- und Forstbereich

Für land- und forstwirtschaftliche Anwendungen ist eine zuverlässige Ableitung biophysikalischer Größen aus fernerkundlichen Daten, wie z.B. Chlorophyllgehalt, Biomasse o.ä. wichtig. Diese Daten können z.B. als zentrale Eingangsgröße in die Berechnung teilflächenspezifischer Düngemaßnahmen oder zur Berechnung der Vitalität von Forstbeständen dienen. Für die Klassifizierung und zur Bestimmung des Vitalitätszustandes von Pflanzenbeständen werden Bildaufnahmen auf verschiedenen spektralen Bändern verwendet, aus denen aussagekräftige Vegetationsparameter, wie z.B. der NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index), berechnet werden können. (KURZ, 2003) beschreibt ausführlich das spektrale Absorptionsverhalten von Pflanzen. Besonders im Spektralbereich ab 650 nm bis 750 nm, also im Nahen Infrarotbereich (NIR), steigt der Reflexionsgrad bei Pflanzen steil an, der auch „red edge“ genannt wird. Lage, Steigung und Höhe der „red edge“ lassen Rückschlüsse auf den Zustand der Vegetation zu. Es kommen in diesem Bereich sowohl RGB- als auch NIR- und Multispektralkameras zum Einsatz.

(GINI ET AL., 2012) benutzen in diesem Zusammenhang eine MD4-200 mit der RGB Kamera Pentax Optio A40 mit 12M Pixel (130 g) und eine für das NIR-Band modifizierte Sigma DP1 mit Foveon X3 Sensor zur radiometrischen Klassifizierung und 3D-Modellierung von Bäumen. (SCHWEIZER, 2009) untersucht in seiner Masterarbeit die Heterogenität von Bodeneigenschaften. Dabei wurde der „Stuttgarter Adler“ (Flächenflügler, 2 Elektromotoren, max. Startgewicht 25 kg) mit drei gleichen CCD-Kameras verwendet, die mit verschiedenen Filtern im sichtbaren (VIS) und im nahen infraroten (NIR) Spektralbereich Bilder aufnehmen. (WALLACE ET AL., 2012) benutzen einen OktoKopter Droidworx/MikroKopter AD-8 (Nutzlast 2.8 kg für 3-4 min Flugzeit) in Kombination mit dem Ibeo LUX Laserscanner (22000 Punkte/Sek, 200 m Reichweite) und zeigen, dass mit dieser Technik Biomasseveränderungen in Waldgebieten detektiert werden können, was wichtig für die Waldbewirtschaftung ist. (GETZIN ET AL., 2012) nutzen das Miniflugzeug ‘Carolo P200’ mit einer Spannweite von 2 m, einem Abfluggewicht von 6 kg, 0.8 kg Nutzlast und 60 min Flugzeit in Verbindung mit einer hochauflösenden RGB-Kamera, um die Artenvielfalt in unterschiedlichen Waldgebieten an verschiedenen Orten in Deutschland zu untersuchen. (FRITZ ET AL., 2013) verwenden einen MK Okto2 (Highsystems GmbH) und eine schrägblickende Digitalkamera Panasonic G3 (16.6 MPixel) zur Detektion von Baumstämmen in einem Waldgebiet und vergleichen die Ergebnisse mit terrestrischen Laserscannerdaten. (HORMIGO & ARAÚJO, 2013) entwickelten ein Micro-UAV System für die Detektion von

Waldbränden und zum Kartieren von Waldgebieten. Genutzt wurde das Einflügler UAV Spin.Works S-20 mit 2 kg Abfluggewicht, einer Spannweite von 1.8 m und einer Nutzlast von 0.4 kg. (HARWIN & LUCIEER, 2012) untersuchten das Bodenerosionsverhalten in Küstenbereichen mit Hilfe eines Oktokopters von Mikrokooper und der Digitalkamera Canon 550D. Ähnlich wird in der Souss-Ebene in Süd-Marokko das Bodenerosionsverhalten mit dem Flächenflieger SIRIUS von MAVinci beobachtet (D'OLEIRE-OLTMANN, 2013). (GRENZDÖRFFER, 2013a) nutzt eine MD4-1000 mit der Digitalkamera Olympus PEN E-P2 zur flächenhaften Bestimmung von Bestandshöhen und Biomasse. Genauso beschäftigen sich (BENDIG ET AL., 2014) mit sogenannten multitemporalen Crop Surface Models (CSM) zur Bestimmung von Reiswachstum mit Hilfe des MK-Okto von Hisystems und einer RGB-Digitalkamera (Panasonic Lumix DMC GF3 mit Lumix-Objektiv G 20 mm). Einen wesentlichen Beitrag zur Tierrettung, speziell das Auffinden von Rehkitzen unmittelbar vor der Wiesenmahd, stellen (WIMMER ET AL., 2013) mit einer Falcon 8 mit Thermalsensor vor. (SUGIURA ET AL., 2007) benutzten eine Thermalkamera an einem unbemannten Helikopter, um Vegetation und Wasser zu unterscheiden. (THAMM ET AL., 2013) benutzen das Flugsystem SUSI 62 (Gleitschirmsystem mit 16 kg Abfluggewicht und 6 kg Nutzlast), um Feuchtgebiete in Tansania für eine nachhaltige Landwirtschaft während der Trocken- und Regenzeiten zu untersuchen.

Einige Hersteller von Fernerkundungssensorik haben den Vormarsch der UAV-Technologie erkannt und bieten maßgeschneiderte, kleinere und leichtere Systeme für UAVs an. Als Beispiel kann hier die Firma Tetracam genannt werden, die die mini-MCA für UAVs²¹ entwickelte. Aber auch die Firma cubert entwickelte eine maßgeschneiderte nicht-scannende hyperspektrale Kamera (UHD 185) für UAV (JUNG ET AL., 2013).

4.1.2 3D-Stadtmodelle

(GRUEN ET AL., 2014) kombinieren Punktwolken von Mobile Mapping Systemen, UAV-Bildern und terrestrisch aufgenommenen Bildern, um 3D-Stadtmodelle zu erzeugen und dabei insbesondere sichttote Bereiche bei der Erfassung von 3D-Stadtmodellen zu vermeiden. Zum Einsatz kommt ein Falcon 8 in Kombination mit der Digitalkamera Sony Nex-5. (BAIOCCHI ET AL., 2013) nutzen die UAV-Technologie (ANTEOS Mini, MTOW 7 kg, Quadrocopter) in Verbindung mit der Digitalkamera CANON S100 mit einer Brennweite zwischen 5.2 - 26.0 mm und der Infrarotkamera Flir Tau 320, um Schäden an Gebäuden, z.B. nach einem Erdbeben, zu bestimmen und zu vermessen. (KUHNERT & KUHNERT, 2013) nutzen den Laserscanner Hokuyo 30LX zusammen mit einer MD4-1000 zur Kartierung von überirdischen Stromleitungen.

4.1.3 Flurneuerung

Das Potential von UAV-Einsätzen in der Landesvermessung z.B. bei Flurneuerungsverfahren untersuchen (CRAMER ET AL., 2013) in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden Württemberg im Rahmen des UAV@LGL-Projekts anhand von praktischen Beispielen. Die Flüge wurden mit dem Multiplex Twinstar II Träger durchgeführt, einem Flächenflügler mit zwei Elektromotoren, einer Spannweite von 1.4 m und einem Abfluggewicht von ca. 1.3 kg. Die Nutzlastkapazität beträgt ca. 300 g. Als Nutzlast werden hier die Canon IXUS 100 und Ricoh GXR Mount A12 verwendet. Die orientierten Bilder werden für die Generierung von dichten digitalen Oberflächenmodellen (DOM) benutzt und hinsichtlich Genauigkeit und Vollständigkeit evaluiert.

4.1.4 Bauwesen und Archäologie

Kleinere Areale sind prädestiniert für den Einsatz von UAVs. In relativ kurzer Zeit können Oberflächenmodelle und georeferenzierte Orthophotos erzeugt werden. In vielen Fällen ist aber eine Prozessierung der Bilddaten gar nicht nötig, wenn es z.B. nur um optische Eindrücke geht.

(PETERMAN & MESARIC, 2012) benutzen eine MD4-1000 in Kombination mit einer Olympus PEN E-P1 (12MPixel, RGB) mit Festbrennweitenobjektiv zur Dokumentation des Baugeschehens eines

²¹ http://www.microdrones.com/wiki/index.php/Tetracam_Mini-MCA

Supermarktes in periodisch wiederholten Befliegungsepochen. Dabei berechneten sie mit Hilfe von digitalen Geländemodellen die Massenverlagerungen im Baustellengebiet. Außerdem stellen sie die archäologische Befliegung der Ruinen einer mittelalterlichen Burg auf einem Hügel über der Stadt Maribor vor. (HAUBECK & PRINZ, 2014) benutzten eine Stereokamera (Fujifilm Finepix Real 3D W3) in Kombination mit einem MikroKopter (Quadro XL) und evaluierten die Ergebnisse der 3D-Erfassung und Orthophotogenerierung am Beispiel der Ausgrabungsstätte Doliche in der Türkei. (EISENBEISS, 2009) beschreibt in seiner Dissertation drei Befliegungen archäologischer Gebiete (Pinchango Alto (Peru), Copan (Honduras), Castle Landenberg (Schweiz)). Hierfür wurde ein stabiler Modellhelikopter (Copter 1B) benutzt und zusätzlich terrestrische Bilder aufgenommen und Laserscans durchgeführt. (RESNIK, 2014) gibt einen Überblick über seine Erfahrungen bei der Kontrolle von Windenergieanlagen u.a. in Verbindung mit UAVs wider. (VUICIN, 2014) nutzt das Gatewing-System von Trimble zur Befliegung einer 3.6 km² großen Kupfermine in Rumänien.

4.1.5 Real Time Datenerfassung und unzugängliche Gebiete

Bei Naturkatastrophen, z.B. Hangrutschungen und Überschwemmungen, Großereignissen, wie z.B. Demonstrationen bzw. bewegte Menschenmassen oder Unfällen, bei denen es um einen Überblick der Gesamtsituation geht, spielen UAVs mehr und mehr eine wichtige Rolle. Im Vordergrund steht dabei die Bereitstellung von Beobachtungsdaten in kurzen Zeiträumen. Entsprechend müssen die Beobachtungsdaten schon innerhalb der UAS vorprozessiert und bereitgestellt werden, was mit mitgeführten Auswerte-CPU's und großen Datenübertragungsraten per Funk einhergeht.

(WITAYANG ET AL., 2011) benutzen ein UAV als Knoten in einem drahtlosen Sensornetzwerk nach den Vorgaben des OGC (Open Geospatial Consortium), um über einen SOS (Sensor Observation Service) Daten in Echtzeit zu erhalten. Dabei steht exemplarisch ein Helikoptersystem mit einer Traglast von 3-4 kg im Zentrum, der mit entsprechenden Ressourcen (Mini-PC, Digitalkamera etc.) ausgestattet wurde. (ALTSTÄDTER ET AL., 2013) wollen mit dem Carolo-P360 "ALADINA" System die Positionen von Aerosolen (Luftpartikeln) in der Luft messen. Dazu wird das Messinstrument miniaturisiert, getestet und kalibriert. (AMICI ET AL., 2013) untersuchen mit Hilfe eines Hexakopters (Nutzlast 1.7 kg) und einer Thermalkamera (TE 3600AS) Schlammvulkane. (BOGATOV ET AL., 2013) entwickelten ein Strahlenüberwachungsgerät für die MD4-1000 als Ausrüstung der Rettungskräfte zur Aufklärung von Strahlungssituationen in Notfallgebieten. Das Überwachungsgerät besteht aus einem Multi Range Radiometer mit Spektrometerfunktionen und ist in der Lage Gammastrahlung im Bereich von 10^{-7} bis 10^{-1} Sievert/Stunde zu messen. (MERINO ET AL., 2012) beschreiben ein UAS mit mehreren UAV einer Zentralen Waldbrand-Monitoring-Station für Echtzeitüberwachungen von Waldbränden.

Im Projekt EVIVA werden Videosysteme zur umfassenden Beobachtung des Bewegungsverhaltens bei großen Menschenansammlungen entwickelt. Mit den in EVIVA entwickelten Komponenten können große Areale überwacht und bei Detektion einer potenziell gefährlichen Situation spezifische Aufmerksamkeitsalarme am Management- und Führungssystem angezeigt werden (ALMER ET AL., 2013).

4.2 Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der UAV-Photogrammetrie in verschiedenen Anwendungssegmenten

In diesem Kapitel wird das Leistungspotential eines Micro-UAV anhand eigener Befliegungen und Untersuchungen gezeigt. Für die folgenden Beispiele wurde i.d.R. eine MD4-1000 in Kombination mit einer digitalen RGB Kamera mit Festbrennweite (Olympus PEN E-P2 mit 17mm-Pancake Objektiv), wie sie von der Firma Microdrones angeboten wird, verwendet. Die Kamera hat eine Auflösung von 4032 x 3024 Pixel und ist mit dem UAV durch einen 2-achsigen Gimbal verbunden, der die Flugbewegungen um die Neigungs- und Rollachse mit Hilfe von Servomotoren kompensiert. Die Kamera wurde während der Flüge im manuellen Modus betrieben (Abschaltung aller Automaten) und die Belichtungszeit sowie Blendeneinstellung den jeweiligen Lichtbedingungen angepasst.

Zur genauen Georeferenzierung der Bilder und für die Simultankalibrierung der Kamera wurden GCPs am Boden im Erkundungsgebiet ausgelegt und ihre Positionen per RTK-GNSS bzw. per Tachymeter bestimmt. Die Luftbilder wurden mit den Programmen „Australis“, „Pix4UAV“, „Photoscan“ oder/und dem Webservice von „Pix4D“ speziell für UAVs ausgewertet. Als Ergebnisse entstanden georeferenzierte OrthoPhotos, OrthoDEM und 3D-Punktwolken. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurde das Autopilotensystem verwendet, das den Flug auf einer vorprogrammierten wiederholbaren Flugroute garantiert.

4.2.1 Deichvermessung und -monitoring



Abbildung 11: Überblick über die Baustelle des Projekts "DredgDikes" (Foto von Marcus Siewert)

Das EU-Kooperationsprojekt „DredgDikes“²² ist am Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau an der Universität Rostock unter der Federführung von Prof. Dr.-Ing. Saathoff angesiedelt. Baggergut aus Flussmündungen und Bodden in Mecklenburg-Vorpommern (unbelastete, gereifte Schlicke oder Mudden) sollen als alternatives Deichbaumaterial erforscht werden. Vorteile liegen in der ökonomischeren und ökologischeren Gewinnung entsprechenden Materials vor Ort. Zudem sollen Geokunststoffe erprobt werden, um z.B. steilere Böschungsneigungen zu erzeugen und Deiche zu stabilisieren. Untersucht werden Standfestigkeiten unterschiedlicher Baggergutmaterialien. Der Projektstart erfolgte am 01.09.2010 (SAATHOFF, 2012). U.a. wurde im Mai-Juni 2012 eine ca. 3 m hohe Versuchsdeichanlage mit drei Becken im Spülfeldgebiet nahe Markgrafenheide gebaut (Abbildung 11). Das Baugebiet umfasste eine Fläche von ca. 160 x 100 m² (inkl. Baustraßen, Lagerorte etc.). Durch das große Platzangebot sowie fehlende, störend hohe Bebauung, war diese Baustelle prädestiniert für eine Baustellenüberwachung und Vermessung mittels UAV.

Untersucht werden sollte, inwieweit sich eine Baustellendokumentation und vermessungstechnische Überwachung mit photogrammetrischen Mitteln in Kombination mit einem UAV bewerkstelligen lässt. Das Deichbaugebiet wurde sowohl während der Bauzeit als auch später in bestimmten zeitlichen

²² <http://www.dredgdikes.eu/>

Abständen befliegen (Tabelle 4). Die Flüge fanden in einer Höhe von ca. 80 m über Grund statt, wobei die Bildauslösepunkte und der Flugweg für eine Längsüberlappung von 80% und eine Querüberlappung von 60% angepasst wurden. Die theoretische Bodenauflösung mit der Olympus PEN E-P2 beträgt in diesem Fall ca. 21 mm/Pixel. Pro Epoche entstanden zwischen 79 und 126 brauchbare Bilder. Zur Georeferenzierung der Bildverbände wurden im Deichbaugebiet ca. 20 Marken gleichmäßig ausgelegt und mit einem GNSS RTK-Empfänger auf 1-2 cm genau eingemessen. Die Auswertung der Bilder wurde mit dem Webservice von „Pix4D“ oder der Desktopsoftware „Photoscan“ durchgeführt.

Tabelle 4: Kenndaten der Befliegungen für „DredgDikes“

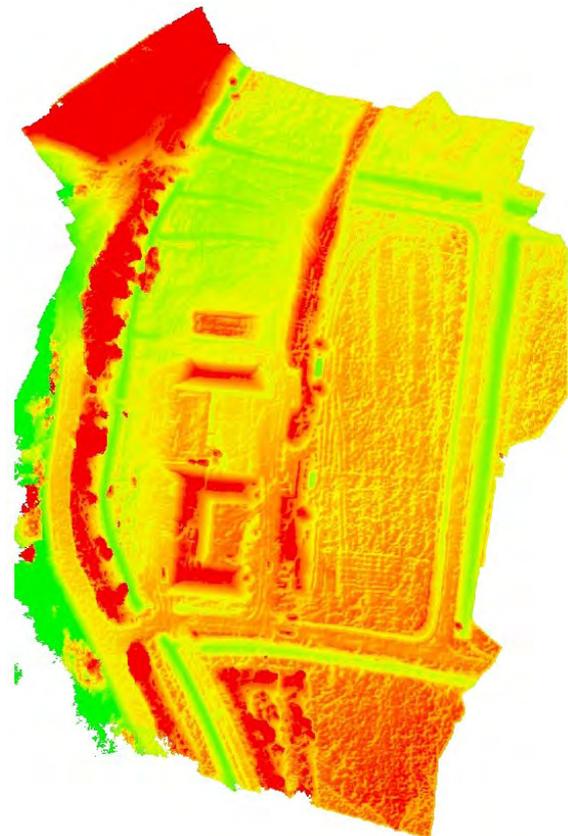
Zweck	Epoche 1	Epoche 2	Epoche 3	Epoche 4
Datum	03.05.2012	23.05.2012	11.06.2012	03.12.2012
Wetter	wolkenloser Himmel, starke Sonneneinstrahlung, kaum Wind	teilweise bewölkt, kaum Wind	leicht bewölkt, Windstärke 2-3 Bft	tief stehende Sonne (lange Schatten), leicht bewölkt, leichter Wind, kalt
Plattform				
UAV	MD4-1000	MD4-1000	MD4-1000	MD4-1000
Nutzlast	Olympus PEN E-P2	Olympus PEN E-P2	Olympus PEN E-P2	Olympus PEN E-P2
Bilder				
Anzahl	105	79	86	126
Anzahl verwendeter Bilder bezogen auf Objekt	105	79	86	126
Belichtungszeit [Sek.]	1/1600	1/1250	1/1000	1/1000
Blende	11	4	5	3.5
Flug (nach Flugdatenschreiber)				
Flughöhe [m]	80	81	77	80
Flugzeit [Min:Sek]	7:39	7:17	7:03	9:18
Geschwindigkeit [m/s]	5	5	5	5
Wegstrecke [m]	1474	1455	1467	1100 (GNSS-Störungen)
Auswertung				
Software	„Photoscan“	Pix4D	Pix4D	„Photoscan“
Fehler [Pixel] (mean reprojection error)	0.69	0.64	0.63	0.65
Größe Gebiet [km ²]	0.06	0.04	0.03	0.06
Ground Sampling Distanz [m/Pixel] (theoretisch)	0.020	0.020	0.019	0.020
Auflösung [m/Pixel] (laut Protokoll)	0.024	0.022	0.021	0.022
Anzahl GCPs	19	8	11	13

Beim ersten Flug (03.05.2012, bauliche Startphase) bestand das eigentliche Ziel darin, den in Kap. 3.3 beschriebenen Workflow praktisch anzuwenden und nachzuweisen. Es entstanden das Orthophoto in Abbildung 12, das OrthoDEM in Abbildung 13 und eine 3D-Punktwolke. Einen 3D-Eindruck und die Verteilung und Positionierung der GCP vermittelt der Screenshot aus „Photoscan“ in Abbildung 14. Die Wetterbedingungen waren sehr gut (wolkenloser Himmel, starke Sonneneinstrahlung, kaum Wind), was sich in der Einstellung von 1/1600 Sekunde für die Belichtungszeit und einer hohen

Blendeneinstellung von 11 widerspiegelt. Mit einer Bodenauflösung von im Endeffekt 2.4 cm (Report „Photoscan“) ist das Orthophoto sehr detailreich und sehr genau auswertbar. Die Positionsgenauigkeit des kompletten Bildverbandes liegt in Abhängigkeit der Positionsgenauigkeit der 19 verwendeten GCPs bei etwa 1-2 cm. Zoomt man in die Bilder herein, sind sogar einzelne Personen erkennbar. Das zugehörige Oberflächenmodell verbessert den Eindruck über die Baustelle (Abbildung 13). Man erkennt die ersten Aufschüttungen der einzelnen Deichkörper und bekommt einen Überblick über den Fortschritt der Arbeiten.



Abbildung 12: Orthophoto "DredgDikes" vom 03.05.2012



High : 14,10
Low : -4,207

Abbildung 13: OrthoDEM „DredgDikes“ vom 03.05.2012

Die zweite Befliegung fand am 23.05.2012, also 20 Tage später, statt. Die Belichtungszeit betrug 1/1250 Sekunde bei Blende 4, was bei den gegebenen Wetterbedingungen zu leicht unterbelichteten Bildern führte. Es herrschte kaum Wind. Die Auswertung wurde mit Hilfe des Webservice von Pix4D durchgeführt. Man erkennt, dass die Becken in den Grundzügen vorhanden sind (Abbildung 15 und Abbildung 18 b)).

Die dritte Befliegung fand am 11.06.2012 unter guten Wetterbedingungen statt (Windstärke 2-3 Bft), nachdem alle Baumaßnahmen abgeschlossen wurden. In den Bildern sind keine Baufahrzeuge zu sehen und der Baukörper liegt roh, ohne Bewuchs und geglättet vor. Unter diesen Bedingungen lässt sich in idealer Weise ein Referenzoberflächenmodell des Deiches ableiten (Abbildung 16).

Insgesamt bekommt man über die Orthophotos und die zugehörigen DEMs einen sehr guten Eindruck über den Fortschritt der Baumaßnahmen. Durch die Georeferenzierung konnten die Bilder z.B. in ArcGIS übereinander gelegt und zusammen mit den Höhenmodellen zu weiteren Berechnungen, z.B. bestimmter Massen und Flächen, herangezogen werden.



Abbildung 14: 3D-Punktwolke „DredgDikes“ vom 03.05.2012

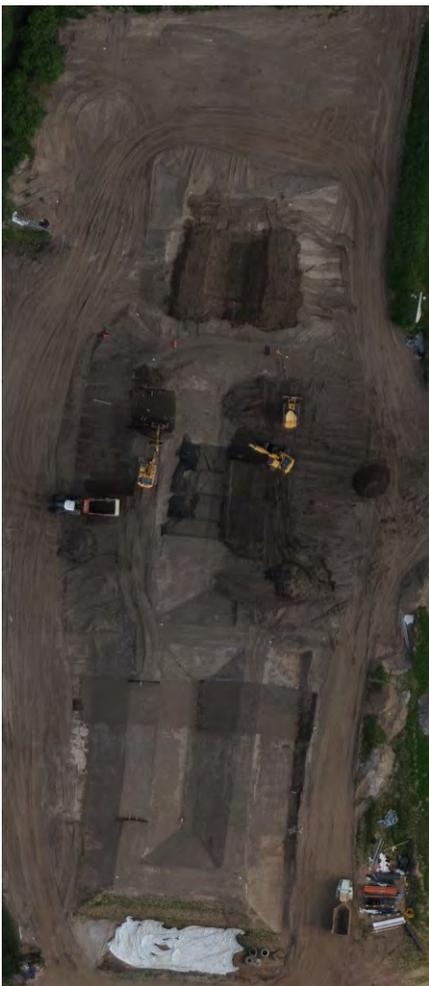


Abbildung 15: Orthophoto
"DredgDikes" vom 23.05.2012



Abbildung 16: Orthophoto
"DredgDikes" vom 11.06.2012



Abbildung 17: Orthophoto
"DredgDikes" vom 03.12.2012

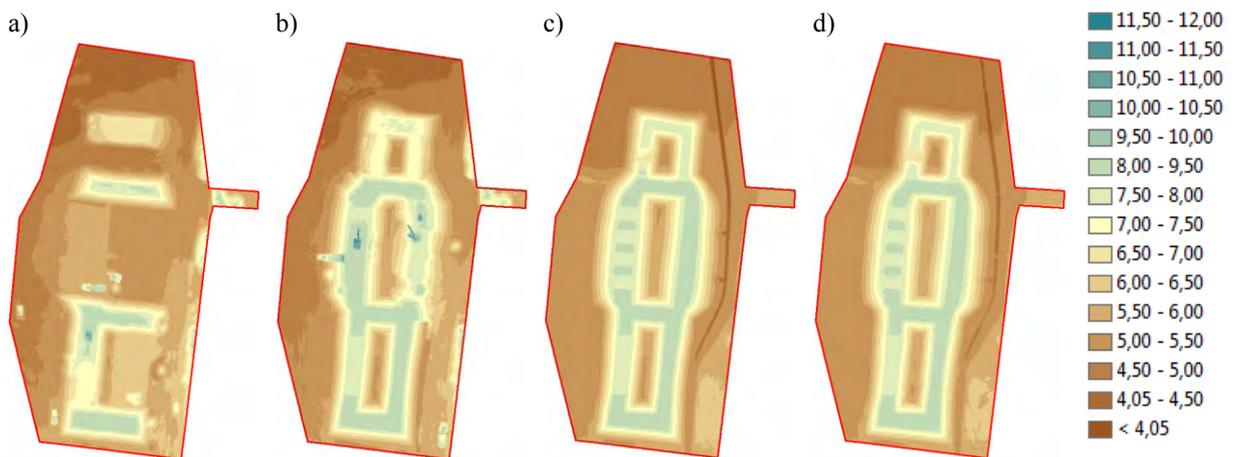


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Oberflächenmodelle der ersten vier Überflüge zur Baustellendokumentation, Höhe in [m] ü. NN

Ca. 3 Wochen nach der dritten Befliegung wurde zusätzlich ein umfangreiches terrestrisches Laserscanning mit 16 Standpunkten durch das Fraunhofer Anwendungszentrum für Großstrukturen in der Produktionstechnik (AGP) durchgeführt. Dabei kam der Laserscanner Imager 5010i von Zöller und Fröhlich mit einer Auflösung von 3 mm auf 10 m zum Einsatz. Somit bestand die Möglichkeit, die Punktwolken bzw. Oberflächenmodelle beider Vermessungsmethoden zu vergleichen. Die Ergebnisse des Vergleichs der 3D-Punktwolken der UAV-Befliegung und des terrestrischen Laserscannings sind in (NAUMANN ET AL., 2013) ausführlich beschrieben und sollen hier kurz wiedergegeben werden.

Die empirische Standardabweichung bei den Differenzen der beiden Oberflächenmodelle liegt bei 0.040 m bei Beibehaltung aller größeren Abweichungen. Werden alle Differenzen, die größer als 10 cm sind, eliminiert (Anteil ca. 0.67%), sinkt die empirische Standardabweichung auf 0.022 m. Als größere Abweichungen konnten noch nachträgliche Aufschüttungen bzw. Auskofferungen und vorhandene Gerätschaften identifiziert werden (z.B. Abbildung 22). Im Vergleich zu der benötigten Zeit für die Datenerhebung ist das terrestrische Laserscanning um den Faktor 2 langsamer. Dieser Faktor vergrößert sich, je mehr Standorte für das Scanning benötigt werden. Den größten Einfluss auf die Differenzen hatte die nachwachsende Vegetation. Größere Abweichungen wurden aber auch bei vertikalen Oberflächen entdeckt, da diese Flächen bei senkrechten Bildaufnahmen schwer modelliert werden können (schleifende Schnitte). Außerdem gab es Schwierigkeiten bei radiometrisch homogenen Flächen, da hier keine photogrammetrischen Verknüpfungspunkte gefunden werden können. Dabei hat die Bildauflösung einen entscheidenden Einfluss. Nachteile beim terrestrischen Laserscanning sind hingegen schleifende Schnitte, große Entfernungen und absorbierende Oberflächen. Die Gegenüberstellung zeigte, dass die photogrammetrische Methode etwas ungenauer als das Scanning ist.

Am 03.12.2012 fand die vierte Befliegung statt. Die Deichanlage war zu diesem Zeitpunkt wieder begrünt. Die zu dieser Jahreszeit tief stehende Sonne (lange Schatten) und das absterbende Vegetationsmaterial lassen die Bilder bräunlich erscheinen (Abbildung 17). Diese Rahmenbedingungen spiegeln sich zudem in der Belichtungszeit von 1/1000 Sekunde und der Blende 3.5 wider.

In den einzelnen Orthophotos und -DEMs erkennt man zudem einige zu berücksichtigende Einflüsse auf die Ergebnisse. Der Flug selbst dauerte jeweils ca. 7 min. Während dieser Zeit wurde z.B. das Baugeschehen nicht unterbrochen. Deshalb sind Bewegungen, wie z.B. von Baufahrzeugen, in Form von Verschlierungen und Verzerrungen im Bildverband erkennbar. Zudem kann es vorkommen, dass ein und dieselbe Person mehrfach im Bild an unterschiedlichen Positionen zu sehen ist. Hinzu kommt, dass hohe Objekte, z.B. der Bagger, verkippt bzw. verzerrt im Orthophoto dargestellt wurden. Dem kann man entgegenwirken, indem man entsprechende Bereiche in den Luftbildern vorab maskiert oder schräge Visuren für stabilere Schnitte verwendet.

In Abbildung 18 sind alle vier Oberflächenmodelle in einer einheitlichen Skala gegenübergestellt. In Abbildung 18 a) und b) erkennt man sogar die Baufahrzeuge, während bei c) und d) auf den ersten Blick kaum noch Unterschiede zu erkennen sind.

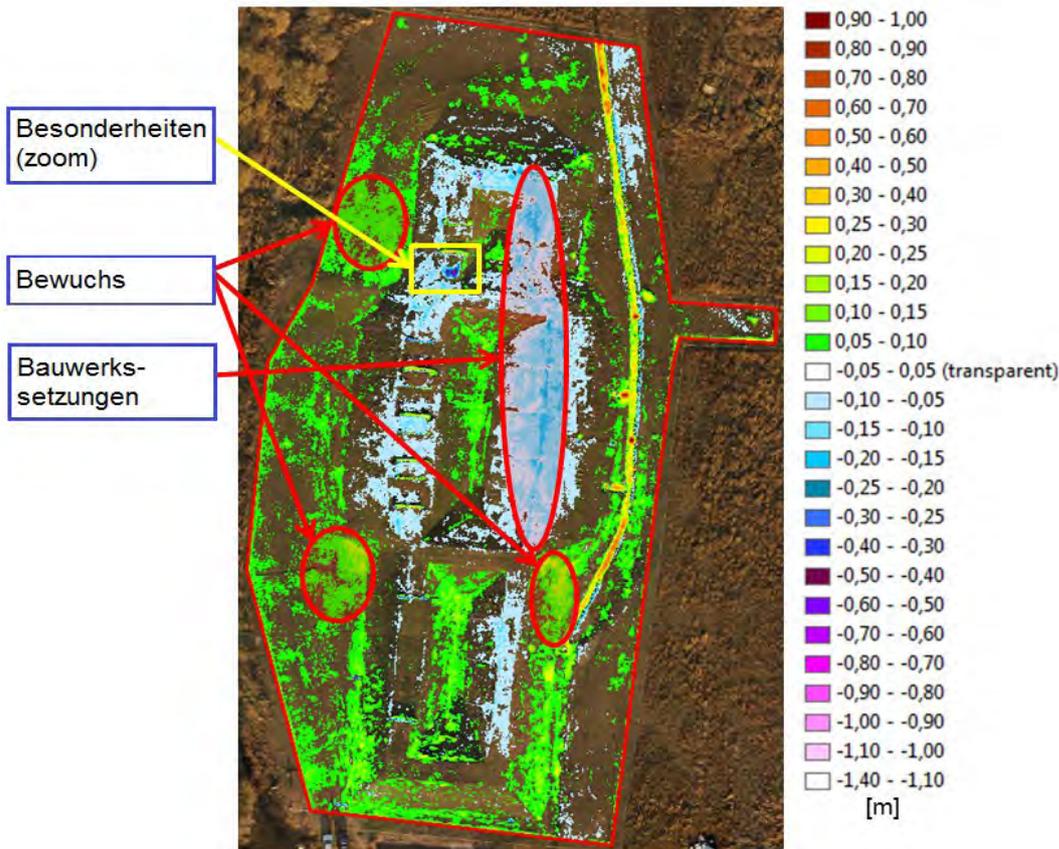


Abbildung 19: Differenz der Höhenmodelle aus dem dritten und vierten Flug eingebildet über dem Orthophoto des vierten Fluges

Um Aussagen über die geometrischen Veränderungen (Deformationen) der Deichanlage zu erhalten, wurde das Höhenmodell der vierten Befliegung mit dem der dritten Befliegung verglichen. In Abbildung 19 sind die Differenzen der Oberflächenmodelle eingefärbt über dem Orthophoto der vierten Befliegung dargestellt. Der Bereich zwischen -5 und 5 cm Differenz wird transparent dargestellt, um Ungenauigkeiten bei der Erstellung der Oberflächen entgegenzuwirken und das Gesamtbild nicht zu überfrachten. Ganz deutlich erkennt man, dass es sowohl Setzungen als auch Hebungen gab. „Besonders interessant sind die Setzungen in der östlichen Deichflanke im Bereich von 5 bis 15 cm. Bei der hier erreichten durchschnittlichen Höhengengenauigkeit im Bereich von wenigen Zentimetern sind die Setzungen ab der zwei- bis dreifachen Genauigkeit klar nachweisbar. [...] Durch das größere Volumen und Gewicht des Deichkörpers im Osten könnte sich dort der Untergrund stärker gesenkt haben. Das relativ nass eingebaute Baggergut verliert Wasser und verdichtet sich. Die Größenordnungen der Setzungen wurden bei der Konzeption des Versuchsdeichs vorhergesagt und durch eine Tachymetermessung punktuell bestätigt.“ (NAUMANN ET AL., 2014a).

Es gibt jedoch auch Hebungen, die sich bei näherer Betrachtung als Vegetationszuwachs herausstellten. Im Grabenbereich und in den Ecken des Deichkörpers findet die Natur besonders geschützte Bereiche. Kritisch sind vereinzelte Anomalien zu betrachten, wie in Abbildung 19 z.B. der gelb umrandete Bereich. Man erkennt stark blau eingefärbt eine fleckenhafte Vertiefung.

In Abbildung 20 und Abbildung 21 ist dieser Vertiefungsbereich aus den Orthophotos der Epochen dargestellt. Kombiniert man diese Bildausschnitte mit den Höhendifferenzen (Abbildung 22), erkennt man, dass z.B. ein Sandhaufen in der dritten Epoche vorhanden war und in der Folgeperiode fehlt. Zudem erkennt man auch Gerätschaften, wie hier die Schubkarre, die als Ausreißer in den Oberflächendaten berücksichtigt werden müssen.



Abbildung 20: Anomalienbereich der dritten Befliegung



Abbildung 21: Anomalienbereich der vierten Befliegung

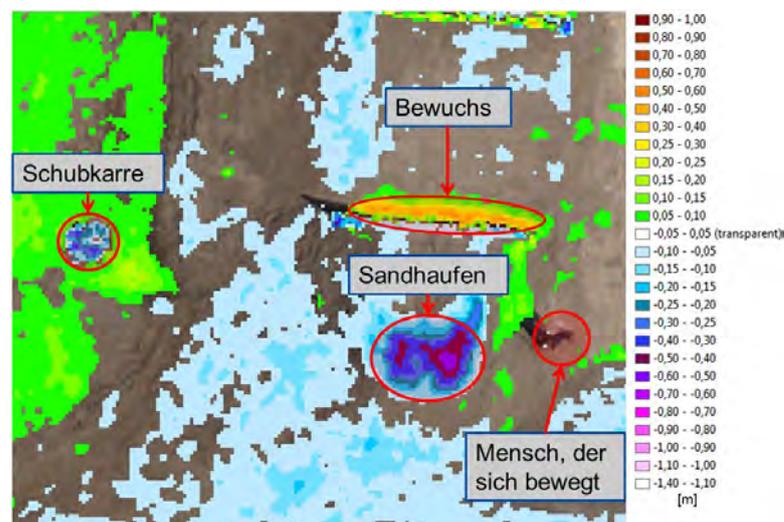


Abbildung 22: Darstellung von zu berücksichtigenden Anomalien

Fazit

Die parallel zum Projekt „DredgDikes“ stattfindenden Befliegungen mit einem UAV und einer Digitalkamera dokumentierten das Baustellengeschehen im Vergleich zur klassischen Befliegung in einer erstaunlich hohen Qualität (hohe Bodenauflösungen). Dabei wurde eine einmal vorprogrammierte Flugroute benutzt. Dank des Autopiloten der MD4-1000 konnten Aufnahmen wiederholt erzeugt und in vergleichbare Produkte, wie z.B. Orthophotos, OrthoDEMs oder 3D-Punktwolken mit ähnlicher Bodenauflösung, berechnet werden. Lediglich die Kamera musste im Vorfeld den Belichtungsbedingungen angepasst werden. Durch die hohe Anzahl der Einzelbilder aus einer vergleichbar geringen Höhe konnten Orthophotos und Oberflächenmodelle sicher berechnet werden. Die Orthophotos sind sehr detailreich und daher sehr genau auswertbar. Sehr schön sind flächenhafte Verbauungen, wie z.B. die ausgelegten Geotextilien, dokumentiert, die zukünftig nicht mehr sichtbar sind.

Die Erfassung der Oberfläche per UAV unterliegt aber auch Einschränkungen. In Abhängigkeit der Flächengröße sowie der gewählten Flughöhe entstehen unterschiedlich lange Flugzeiten. Bewegungen während dieser Zeit im Aufnahmegebiet werden mit dokumentiert. Das kann zu Verzerrungen im Orthophoto führen. Im Gegensatz zu der punktuellen Vermessung gibt die flächenhafte Darstellung der zeitlichen Veränderungen des Deichkörpers einen umfangreicheren Überblick. In Kombination mit den Aufnahmen früherer Befliegungen können Ursachenanalysen zu Verformungen, Setzungen oder Deformationen berechnet werden. Zudem bieten diese Bilder eine gute Dokumentation und besitzen einen gewissen Nachweischarakter über die Einhaltung von Bauvorschriften. Im Vergleich mit einem Laserscan lag die empirische Standardabweichung bei den Differenzen zwischen Laserscan und pho-

togrammetrisch erstellten Oberflächenmodell nach Bereinigung von größeren Abweichungen und Ausreißern, die größer als 10 cm waren, bei 0.022 m. Es wurden noch zwei weitere Befliegungen durchgeführt und in (NAUMANN ET AL., 2014a) sowie (NAUMANN ET AL., 2014b) dokumentiert und evaluiert. Somit liegt eine Dokumentation des Deichareals für den Beobachtungszeitraum von über einem Jahr vor.

4.2.2 Küstendeckwerksüberwachung



Abbildung 23: Deckwerk auf der Elbinsel „Lühesand“

Das Projekt „Lühesand“ wurde in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchgeführt. Untersucht werden sollte, inwieweit UAV-Befliegungen als alternative photogrammetrische Vermessungsmethode Veränderungsvorgänge von schwer zugänglichen Uferbereichen, hier am Beispiel eines 150 m langen Teilstücks des Deckwerks auf der Elbinsel „Lühesand“ in der Elbe, hochgenau detektieren können. Die nördliche Elbe bildet als stark befahrene Bundeswasserstraße den Zugang zum Hamburger Hafen. Vorbeifahrende Schiffe erzeugen dabei in Abhängigkeit von Tiefgang und Geschwindigkeit Wellen, die sich in den Uferbereichen brechen. Hinzu kommen während der Wintermonate Eisschollen und Treibeis, die die Uferbereiche beeinflussen. Die schützenden Deckwerke der Uferzonen bestehen z.B. aus losen bzw. teilweise vergossenen Steinaufschüttungen (Abbildung 23). Die verwendeten Steine sind sehr kantig und haben augenscheinlich einen Durchmesser von etwa 5-30 cm.



Abbildung 24: Flugplanung für Projekt „Lühesand“, Flughöhe 20 m (Quelle Hintergrundbild: Google Earth)

Tabelle 5: Kenndaten der Befliegungen für „Lühesand“

Zweck	Deckwerk Epoche 1	Deckwerk Epoche 2
Datum	01.08.2012	15.11.2012
Wetter	windstill, klarer Himmel	windstill, tiefstehende Sonne, klarer Himmel
Plattform		
UAV	MD4-1000	MD4-1000
Nutzlast	Olympus PEN E-P2	Olympus PEN E-P2
Bilder		
Anzahl	591 (in verschiedenen Höhen)	449
Anzahl verwendeter Bilder bezogen auf Objekt	409 (nur unterste Höhe)	449
Belichtungszeit [Sek.]	1/1000	1/1000
Blende	3.2	3.2
Flug (nach Flugdatenschreiber)		
Flughöhe [m]	28, 48, 68	25
Flugzeit [Min:Sek]	17:20	10:55
Geschwindigkeit [m/s]	1	1
Wegstrecke [m]	1539	953
Auswertung		
Software	Pix4D	Pix4D
Fehler [Pixel] (mean reprojection error)	0.12	0.13
Größe Gebiet [km ²]	0.01	0.01
Ground Sampling Distanz [m/Pixel] (theoretisch)	0.007, 0.012, 0.017	0.006
Auflösung [m/Pixel] (laut Protokoll)	0.009	0.008
Anzahl GCPs	9	22

Die Rahmenbedingungen dieses Projektes waren sehr anspruchsvoll. Es musste ein Zeitpunkt für die Befliegungen gefunden werden, bei der Niedrigwasser zu einer Tageszeit mit hochstehender Sonne (möglichst vormittags) und wenig bis gar kein Wind vorhanden waren. Während des Niedrigwassers kann ein Zeitfenster von ca. 30-45 min genutzt werden, um auch die tiefer gelegenen Steinschichten zu kartieren. Zudem mussten die Kampagnen gut vorbereitet sein, da erstens für die Befliegung ein Tag inkl. einer 200 km langen An- bzw. Abfahrt berücksichtigt werden musste und zweitens der Einsatz auf der Insel normalerweise ohne externe Stromversorgung zu bewerkstelligen war, d.h. die Akkus konnten vor Ort nicht wieder aufgeladen werden. Außerdem musste der saisonale Fährbetrieb berücksichtigt werden. Zum Inselcharakter gehörte aber auch, dass keine Versorgung mit Essen oder Trinken gewährleistet wird und dass vergessene aber wichtige Flugutensilien zum Abbruch der Mission führen können.

Das untersuchte Teilgebiet liegt in unmittelbarer Nähe der wissenschaftlichen Beobachtungsstation auf Lühesand. Die Flughöhe wurde aus Sicherheitsgründen nicht tiefer als 20 m über Grund gesetzt. Die Bodenauflösung beträgt hierfür mit der Olympus PEN E-P2 theoretisch 7 mm/Pixel. Um das Deckwerk auch 3-dimensional sicher zu berechnen, wurden während der Flüge erstmals schräge Luftaufnahmen gemacht. Die Flugroute besteht im wesentlichen aus 3 Profilen mit jeweils 150 m Länge entlang des Uferbereichs (Abbildung 24). Bei den beiden Flugprofilen über Land wurde die Kamera in Nadirrichtung ausgerichtet. Beim dritten Flugprofil über Wasser wurde die Kamera um 20° in Richtung Uferzone gerollt. Die Flugzeit betrug ca. 10 min. Dabei bewegte sich das UAV mit 1 m/sec und löste die Kamera jede Sekunde aus. Durch die Bewegungen des UAV entstanden Überlappungen zwischen 90% und 95% in Flugrichtung. Die Profillinien wurden für eine Querüberlappung von 80% be-

rechnet. Durch die schräge Blickrichtung des dritten Profils liegt die Querüberlappung weitaus höher. Tabelle 5 gibt einen Überblick über wichtige Befliegungsparameter.

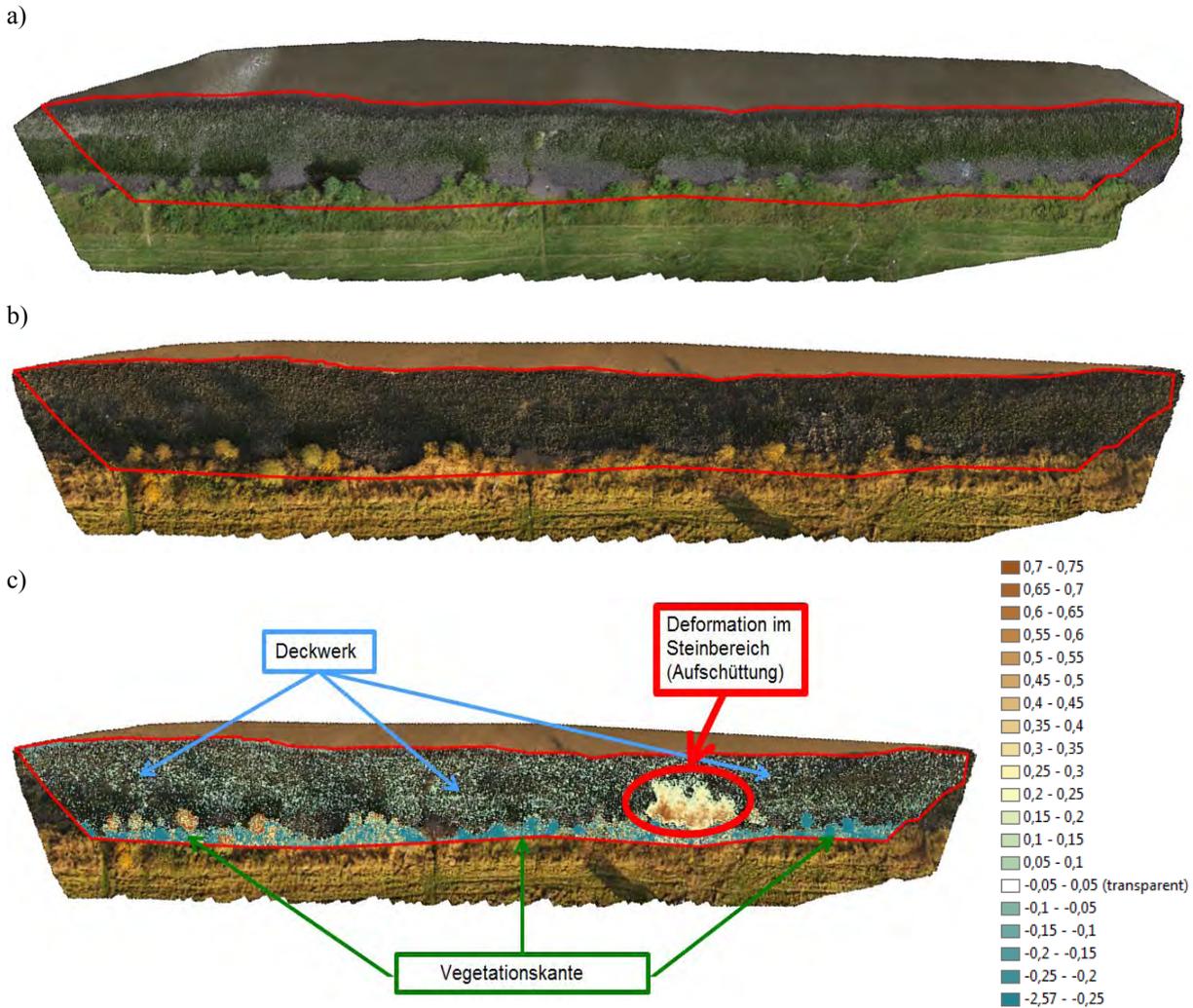


Abbildung 25: Gegenüberstellung der beiden Epochen für das Projekt „Lühesand“, a) Epoche 1, b) Epoche 2, c) Differenz der Oberflächenmodelle beider Epochen [m]

Im Vorfeld der Flüge wurden Marken gleichmäßig auf dem zu überfliegenden Bereich des Deckwerks ausgebracht. Das widerspricht prinzipiell der eigentlichen Idee, unzugängliche Bereiche zu befliegen. Jedoch wird eine Befliegung mit dem Ziel einer hochgenauen Georeferenzierung der Luftbilder ohne GCPs im Zielgebiet noch nicht auskommen. Soll ein Gebiet mehrfach befliegen werden (Monitoring), empfiehlt sich eine dauerhafte Vermarkung. Um die Zielmarkenposition hochgenau zu bestimmen, wurden vier geodätische Festpunkte oberhalb des Deckwerks vermarkt sowie eine Klebefolie an der wissenschaftlichen Beobachtungsstation angebracht. Die Zielmarken wurden dann, ausgehend von diesen Netzpunkten, tachymetrisch eingemessen. Die Positionsgenauigkeit der Marken betrug dadurch ca. 2-3 mm in Lage und Höhe. Für den ersten Flugtag bedeutete das einen erheblichen Mehraufwand, der sich in der Folgeepoche jedoch auszahlte.

Nebenbei sollte untersucht werden, welche Punktformen am Boden besonders gut für GCPs identifizierbar sind. Während der zweiten Epoche wurden deshalb 22 unterschiedlich aussehende GCPs ausgelegt. Abbildung 25 gibt einen Überblick über die entstandenen Orthophotos der beiden Epochen (a) Epoche 1, b) Epoche 2, c) Differenz der Oberflächenmodelle der Epochen).

Die erste Befliegung fand am 01.08.2012 statt. Die Wetterbedingungen waren ideal (wenig bis gar kein Wind, wolkenloser Himmel, hochstehende Sonne). Durch eine Fehlprogrammierung des Kamera-

rollwinkels für das Profil über Wasser konnte die Befliegung mit einer korrigierten Flugroute erst ungefähr 20 min nach Niedrigwasser durchgeführt werden.

Der zweite Flug fand am 15.11.2012 statt, nachdem der Flugtermin immer wieder um insgesamt zwei Monate verschoben werden musste, da die geforderten Bedingungen nicht alle gleichzeitig erfüllt werden konnten. Die Wetterbedingungen waren auch sehr gut (gar kein Wind, wolkenloser Himmel). Jedoch stand die Sonne jahreszeitbedingt sehr tief. Das führt dazu, dass die Bilder etwas brauner bzw. dunkler erscheinen.

Im Bereich des Wellenschlags entstanden durch die dynamische Bewegung des Wassers in den Orthophotos und OrthoDEMs sehr starke Verwerfungen und Anomalien. Für das Deckwerksmonitoring war der Vegetationsbereich oberhalb des Deckwerks nicht von Interesse, so dass sowohl die Orthophotos als auch die OrthoDEMs auf das Gebiet innerhalb der roten Linie beschnitten wurden (Abbildung 25).



Abbildung 26: Bildausschnitt Orthophoto (01.08.2012)



Abbildung 27: Bildausschnitt Orthophoto (15.11.2012)

Der Epochenvergleich wurde mit der Software ArcGIS durchgeführt, da hier die Möglichkeit besteht, Höhenmodelle voneinander zu subtrahieren. In Abbildung 25 c) sind die berechneten Höhenunterschiede gut zu erkennen. Der Bereich von -5 bis +5 cm wird als transparent dargestellt, da das Bild sonst überfrachtet wirkt. Man erkennt ganz deutlich Differenzen bis zu 25 cm Senkung in den Vegetationsbereichen. Das Deckwerk weist hingegen, bis auf eine etwas größere deformierte Zone, erwartbare Schwankungen auf. Bei der starken Deformation im Deckwerk handelte es sich nach Sichtung der Orthophotos (Abbildung 26 und Abbildung 27) um eine Steinaufschüttung wahrscheinlich zur Korrektur des Steigungsverhältnisses. Abbildung 28 zeigt die Differenzen des Steinaufschüttungsgebiets etwas genauer. Man erkennt Höhenunterschiede bis zu 75 cm.

In Abbildung 29 wurde eine Profillinie aus Abbildung 28 (rote Linie) der beiden Oberflächenmodelle extrahiert und eine ausgleichende Gerade berechnet. Dabei spiegelt die blaue Linie mit einer Steigung von 0.2848 (ca. 1/4) die Oberfläche der ersten und die rote Linie mit einer Steigung von 0.3591 (ca. 1/3) die Oberfläche der zweiten Befliegung wider.

Die endgültige GSD betrug laut Auswerteprotokoll von Pix4d 8 mm/Pixel. Damit konnte die Verlagerung von Steinen detektiert werden.

Um zu verdeutlichen, wie gut Steinverlagerungen detektiert werden können, zeigen Abbildung 30 und Abbildung 31 einen gleichen auf Steingröße vergrößerten Bildausschnitt einer anderen Stelle vom Deckwerk für beide Befliegungen. Abbildung 32 zeigt dazu die Höhendifferenzen in Form von Hebungen und Senkungen.

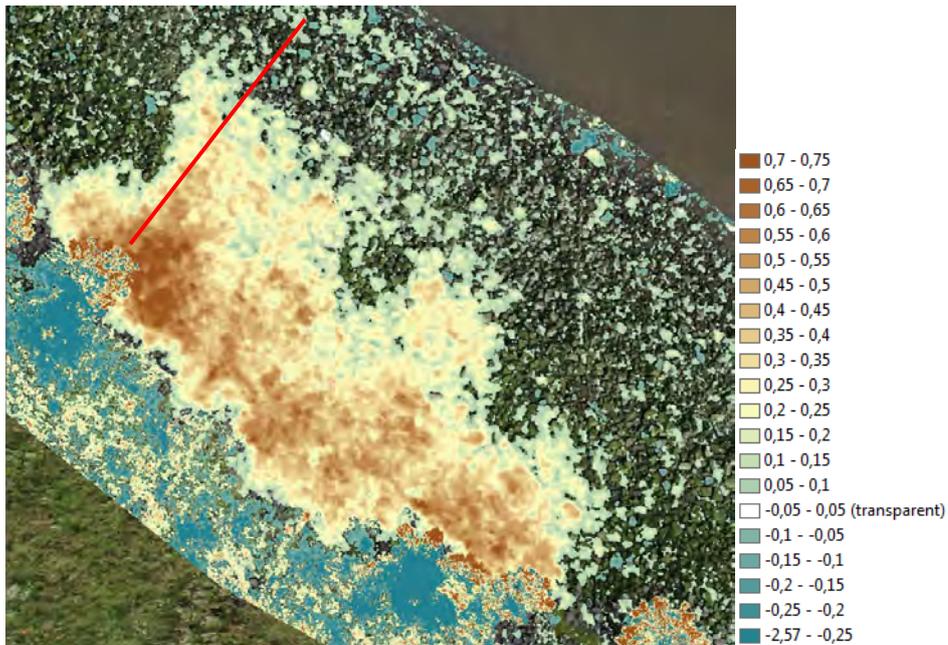


Abbildung 28: Höhendifferenzen

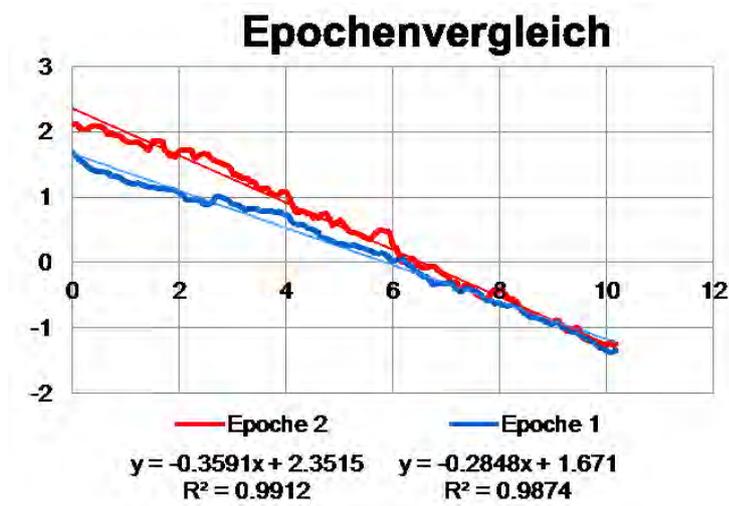


Abbildung 29: Bestimmung der Steigung des Deckwerks



Abbildung 30: Vergrößerung Steine (01.08.2012)



Abbildung 31: Vergrößerung Steine (15.11.2012)

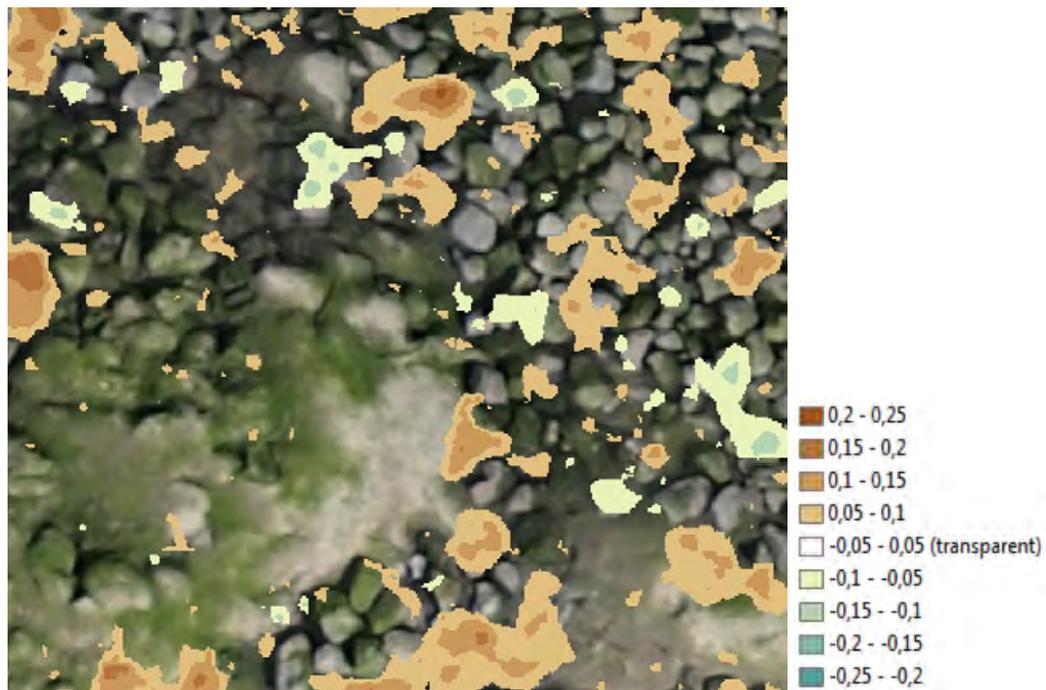


Abbildung 32: Detektion von Steinverlagerungen

Fazit

Die Befliegungen des Deckwerks der Elbinsel „Lühesand“ zeigen das Potential der UAV-Technologie in Verbindung mit digitalen Amateurkameras für vermessungstechnische Aufgaben in unzugänglichen Gebieten. Trotz der anspruchsvollen Bedingungen ist eine sehr genaue flächenhafte Vermessung des Deckwerks geglückt. Schwierig wurde die Auswertung der Wasserflächen bzw. des Wellenschlagbereichs, da hier während der Aufnahmen keine photogrammetrisch stabilen Verknüpfungspunkte detektiert werden konnten. Die hohen Bildüberlappungen von über 90% stabilisieren den Bildverband. Außerdem konnte dadurch der Webservice von Pix4D vollautomatisch genutzt werden, da Verknüpfungspunkte zwischen den Bildern sicherer erkannt wurden. Natürlich ist die erreichbare Genauigkeit von Kameraauflösung und Flughöhe abhängig. Sicherlich sind größere Höhen für flächenhafte Vermessungen sinnvoller. Das Genauigkeitspotential sinkt dabei ein wenig, aber dafür die Anzahl der Bilder und somit der Rechenaufwand pro Flächeneinheit sehr deutlich.

4.2.3 Vogلزählung



Abbildung 33: Vogelschutzinsel Langenwerder

Das Anwendungsszenario Vogelzählung zeigt einen weiteren interessanten Anwendungsbereich der UAV-Technologie, der auf den Vogelschutzinseln Langenwerder und Riether Werder getestet wurde. Primär stehen die Fragen im Raum, inwieweit UAVs das Verhalten von Brutvögeln beeinflussen und ob sich die Ergebnisbilder für eine aussagekräftige Vogelzählung eignen. Auch hier wird das UAV in Verbindung mit einer digitalen Kamera verwendet. Das Brutareal wird in Streifenflug mit Längs- und Querüberlappung überflogen. Dienen die Aufnahmen lediglich zur Zählung der abgebildeten Tiere, spielt eine hochgenaue Georeferenzierung des Bildverbandes eine untergeordnete Rolle. Der Bildverband kann daher mit Hilfe der vom UAV erfassten Bildaufnahme-position orientiert werden und ist in Abhängigkeit der GNSS-Genauigkeit insgesamt in Lage und Höhe absolut verschoben bzw. verdreht. Die Einzelbilder passen jedoch relativ gut zueinander. Das Auslegen von Passpunkten zur hochgenauen Georeferenzierung ist somit im Brutgebiet optional.

Vogelzählungen werden in klassischer Weise von mehreren Beobachtern durchgeführt, die zu bestimmten Zeiten durch die Brutkolonie gehen und Nester bzw. Gelege und Vögel zählen. Dabei entsteht sehr viel Unruhe, da während der Brutzeit die Vögel sehr empfindlich auf äußere Einflüsse reagieren.

Tabelle 6: Kenndaten für die Befliegungen zur Vogelzählung

Zweck	Langenwerder	Riether Werder
Datum	23.05.2013	05.06.2013
Wetter	windstill, wechselnde Bewölkung	windstill, wechselnde Bewölkung
Plattform		
UAV	MD4-1000	MD4-1000
Nutzlast	Olympus PEN E-P2	Olympus PEN E-P2
Bilder		
Anzahl	746	332
Anzahl verwendeter Bilder bezogen auf Objekt	743	329
Belichtungszeit [Sek.]	1/1250	1/1250
Blende	4.5 & 6.3	5
Flug (nach Flugdatenschreiber)		
Flughöhe [m]	55	62
Flugzeit [Min:Sek]	12:53 & 13:18	8:46
Geschwindigkeit [m/s]	5	5
Wegstrecke [m]	4359 & 3415	3523
Auswertung		
Software	„Pix4UAV“	„Pix4UAV“
Fehler [Pixel] (mean reprojection error)	0.14	0.14
Größe Gebiet [km ²]	0.19	0.08
Ground Sampling Distanz [m/Pixel] (theoretisch)	0.014	0.016
Auflösung [m/Pixel] (laut Protokoll)	0.015	0.018
Anzahl GCPs	13	3

An der Professur für Geodäsie und Geoinformatik wird der Einsatz von UAVs zu Vogelzählungszwecken seit 2011 erforscht. Während 2011 zusätzlich noch das UAV Falcon 8 von Ascending Technologies in Verbindung mit der Sony Nex 5 zum Einsatz kam, wurde später nur noch die MD4-1000

und die Olympus-Kamera genutzt. Die überflogenen Gebiete wurden über die Zeit immer größer. Exemplarisch sind die wichtigsten Flugdaten für die Befliegungen im Jahr 2013 in Tabelle 6 zusammengestellt.

Die Interaktion zwischen UAV und Vogel wurde im Vorfeld untersucht. Die Vogelschutzinsel Langenwerder, nördlich der Ostseeinsel Poel, hat in etwa eine Länge von 1000 m und eine Breite von ungefähr 400 m. Die Insel ist sehr flach und mit Gräsern und Sträuchern bewachsen. Auf der Insel existiert eine ornithologische Beobachtungsstation. Zudem gibt es einen elektrischen Zaun, der andere Landtiere von der Brutkolonie abhalten soll. Der dominierende Brutvogel ist die Sturmmöwe. Das UAV wurde in verschiedenen Flughöhen zwischen 100 m und 50 m über Grund über Teilen der Insel geflogen und das Verhalten der Vögel beobachtet. Als Fluchtrichtung des UAV war die Rückkehr in größere Höhen geplant. Dies war aber unnötig, da sich sämtliche Vögel von dem elektrisch betriebenen UAV unbeeindruckt zeigten und das Vogelverhalten bei allen Arten am Boden normal blieb. U.a. waren Möwen, eine jagende Rohrweihe und ein Brandganspärrchen mit 11 Jungen während der Flugzeit im Untersuchungsgebiet unterwegs.

Entscheidend für die Erkennung von Vögeln in Bildern sind zum einen die Vogelgröße und zum anderen die Klassifizierungsmethode und deren Anforderungen an die Mindestanzahl von Pixel pro Vogel. (GRENZDÖRFFER, 2013b) gibt hierzu eine Anzahl von 20-30 Pixel pro Vogel im Bild zur sicheren Erkennung an. Das bedeutet für die etwa 40-45 cm großen Tiere, dass die Olympus PEN E-P2 eine Bodenauflösung von eher 1.6 cm erreichen muss, was bei der Flughöhe von 50 m gewährleistet ist.

Das Gebiet nördlich des Zaunes (Abbildung 34) wurde 2013 komplett mit 80% Längs- und 60% Querüberlappung abgeflogen. Dabei wurde eine Fläche von knapp 20 ha aufgenommen. Insgesamt entspricht der Kurs einer Routenlänge von etwa 7.5 km mit einer Flugzeit von 30.5 min und mit insgesamt 745 Bildern. Zur genaueren Georeferenzierung wurden GCPs im Zielgebiet, jedoch nicht flächendeckend, ausgelegt.

Das zweite Vogelschutzgebiet ist die Insel Riether Werder im Neumarper See (Stettiner Haff) nahe der polnischen Grenze. Sie ist vorwiegend mit Gras und Schilf bewachsen. Der dominierende Vogel ist hier die Lachmöwe. Die Flugplanung ist in Abbildung 35 dargestellt und wurde ebenfalls mit 80% Längs- und 60% Querüberlappung konfiguriert. Die Flughöhe betrug 65 m über Grund. Die resultierende Bodenauflösung ergab dabei 1.9 cm, was zur Detektion der Vögel ausreichte. Die Flugrouten hatte eine Länge von insgesamt 3.4 km bei einer Flugzeit von knapp 9 min. Es entstanden 332 brauchbare Bilder, die ein Gebiet von ca. 7.9 ha abbildeten. Auch hier wurden zur genaueren Georeferenzierung GCPs im Zielgebiet ausgelegt, jedoch nicht flächendeckend.

Die entstandenen Luftbilder wurden mit dem Programm „Pix4UAV“ von Pix4D ausgewertet. (GRENZDÖRFFER & BOGDANOV, 2013) beschreiben den Prozess der automatischen Vogelerkennung und -zählung in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden die Orthophotos einer Multispektralklassifikation unterzogen. Dabei wurde das Aussehen der Tiere (z.B. weißer Kopf, graues Gefieder) als charakteristisches Merkmal genutzt. Diese Methode unterliegt Fehlereinflüssen. So wurden z.B. zu dunkle Tiere nicht sicher erkannt, zwei eng nebeneinander sitzende Tiere wurden als eins gezählt oder Steine oder Holzstücke wurden irrtümlich miterfasst. Um die Fehlerquote zu senken, wurden die gefundenen Bereiche im Bild in einem zweiten Schritt größenbasiert selektiert. Besonders interessant waren sitzende Tiere, da sie i.d.R. brüteten und man so Informationen zum Gelege und zur Nistdichte bekommt. (GRENZDÖRFFER & BOGDANOV, 2013) geben eine Erkennungsgenauigkeit der Möwen durch eine Kombination aus multispektraler Klassifikation und anschließenden GIS-Operationen von 95% bis 97% an. Allerdings wurden stehende Möwen von brütenden Vögeln mit einer Zuverlässigkeit von 74% unterschieden. Einen beispielhaften Überblick bieten Abbildung 36 für die Brutgebiete der Vogelschutzinsel Langenwerder für das Jahr 2012 und Abbildung 37 für das Brutgebiet auf der Insel Riether Werder für das Jahr 2013.



Abbildung 34: Flugplanung Langenwerder

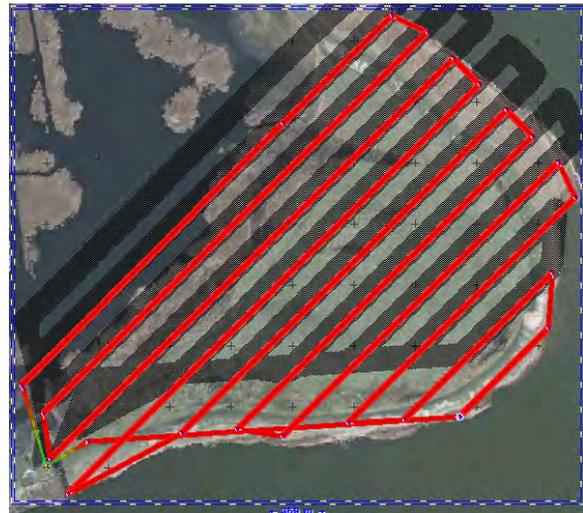


Abbildung 35: Flugplanung Riether Werder

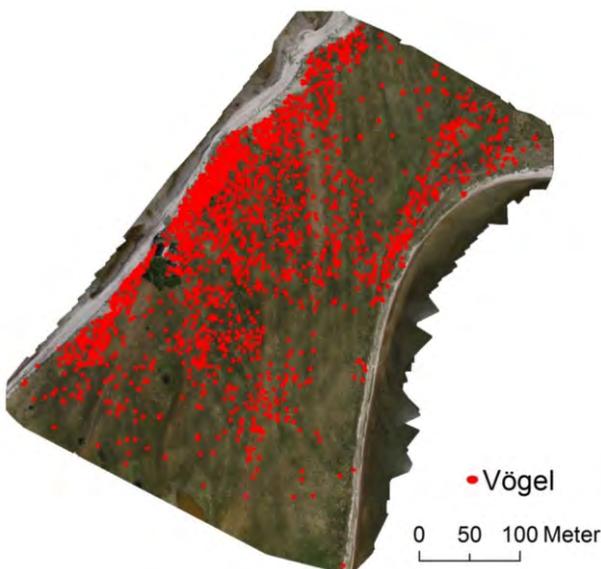
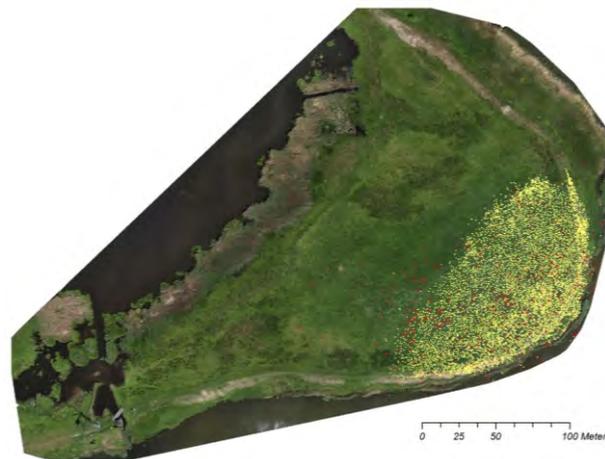
Abbildung 36: Brutgebiete Langenwerder 2012
(GRENZDÖRFFER & BOGDANOV, 2013)

Abbildung 37: Brutgebiete Riether Werder 2013

Fazit

Diese Erfassungsmethode leistet sehr genaue Zahlen über Vögel und stört zudem die Vogelwelt während der Brutzeit nicht. Natürlich ist diese Methode nur zur flächenhaften Erfassung von Bodenbrütern, die sich vom Untergrund unterscheiden, prädestiniert. Grenzen dieser Methode liegen daher bei unscharfen bzw. verwackelten Aufnahmen und ungünstigen bzw. wechselnden Belichtungsverhältnissen.

4.2.4 Standortkartierung für Boden und Vegetation

In der Fernerkundung werden reflektierte Lichtstrahlen durch Aufnahmemedien, z.B. Film oder CCD-Sensor, registriert. Auf dem Weg von der Strahlungsquelle bis zum Aufnahmemedium tritt der Lichtstrahl in Wechselwirkung mit verschiedenen anderen Medien und wird dabei reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Wegen der elektromagnetischen Eigenschaften von Licht treten diese Effekte wellenlängenabhängig auf. Zur Beobachtung der Strahlung über eine Bandbreite von Wellenlängen werden daher Spektrometer benutzt. Misst man die reflektierte Strahlung von Oberflächen in verschiedenen Wellenlängenbereichen, erhält man Kennlinien, anhand derer die Oberflächen identifiziert bzw. klassifiziert werden können, siehe z.B. (ALBERTZ, 2009). Man spricht in diesem Zusammenhang von „spektraler Signatur“. Als Beispiel kann hier die Bestimmung des Entwicklungszustandes von

Vegetation genannt werden. Durch Kombination der Rückstrahlungen in signifikanten Wellenlängen, z.B. Infrarot, Rot, Grün und Blau, lassen sich die verschiedensten Vegetationsparameter ableiten (z.B. NDVI, VARI), siehe (KURZ, 2003) und (GITELSON ET AL., 2002).

Ein radiometrisches Messgerät misst den Strahlungsfluss, da die elektromagnetischen Wellen bzw. Photonen am Detektor pro Zeiteinheit eine bestimmte Arbeit verrichten (MEISTER, 1995). Möchte man über die empfangenen Lichtstrahlen absolute Aussagen finden, müssen alle Einflüsse auf dem Weg zwischen Lichtquelle und Empfangsmedium (z.B. Streuung in der Atmosphäre → Himmelslicht, Oberflächeneigenschaften) sowie die Emissionseigenschaften der Lichtquelle (Wellenlängen, Strahlungsdichte) und Immissionseigenschaften des Empfängers (Wellenlängenbereich, Empfindlichkeit etc.) berücksichtigt werden. Zudem benötigt man Informationen über die Richtungen, aus der die Strahlung kommt und in die sie reflektiert wird („gerichtete Signatur“).

Das Reflexionsverhalten von Oberflächen kann mit Hilfe der Bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF) beschrieben werden. Die BRDF beschreibt das Verhältnis aus differenzieller **Strahlungsdichte** in Beobachtungsrichtung und der differenziellen **Bestrahlungsstärke** aus Beleuchtungsrichtung (NICODEMUS, 1977). Neben der Abhängigkeit der BRDF von der Wellenlänge sind die optischen Eigenschaften sowie die Struktur der beobachteten Oberfläche wichtige Einflussfaktoren. Dabei spielen insbesondere Schattenwürfe sowie Mehrfachstreuungen, aber auch Vegetationseigenschaften, wie bspw. die Blattdichte, eine bedeutende Rolle (DRÖSKE, 2010).

Die BRDF wird im Bereich der Fernerkundung für die **Korrektur von Bilddaten**, um über den gesamten Bildbereich auf einen konstanten Beobachtungswinkel zurückzurechnen, zur **Klassifikation von Oberflächen**, wenn Bilddaten aus verschiedenen Aufnahmewinkeln vorliegen und zu **Ableitung von Pflanzenparametern oder Gesteinen** aus Fernerkundungsdaten, eingesetzt (SCHWARZBACH, 2006). Eingangsgrößen der BRDF sind:

- Elevationswinkel der Strahlungsquelle (z.B. Sonne)
- Azimut der Strahlungsquelle (z.B. Sonne)
- Elevationswinkel des Sensors
- Azimut des Sensors
- Wellenlänge

Da die BRDF gerichtete Lichtstrahlung benötigt, jedoch in der Realität das Sonnenlicht in der Atmosphäre gestreut wird (Rayleigh-Streuung, Mie-Streuung) und somit auch aus anderen Richtungen einwirkt, entstehen Vermischungen zwischen den einzelnen Strahlungsrichtungen. (MEISTER, 1995) beschreibt in seiner Diplomarbeit über die Messung der spektralen Reflexionsfunktion ausgewählter Oberflächen bei natürlicher Beleuchtung, dass diese Strahlungsanteile bei diffus reflektierenden Oberflächen durch zweimalige Messung mit voller Beleuchtung bzw. durch Schattenbildung ohne die direkte Sonneneinstrahlung getrennt werden können.

Zudem entstammt die direktionale Strahlung einer Punktquelle, also einem infinitesimal kleinen Raumwinkel, der in der Natur nicht anzutreffen ist und auch künstlich, z.B. mit einem Laser, nur annäherungsweise erreichbar ist. Die von physikalischen Instrumenten gemessene Strahlung ist konisch, da sie aus einem bestimmten finiten Raumwinkel stammt. Damit lässt sich aus Feldmessungen ein hemisphärisch-direktionaler Reflektanz-Faktor (HDRF) ermitteln, aus dem die BRDF abgeleitet werden kann (KIRCHGÄBNER, 2013).

Bei der Bestimmung von fernerkundlichen Kenngrößen von Boden und Pflanzen müssen atmosphärische Einflüsse einschließlich der BRDF, in diesem Fall von Pflanzenoberflächen, berücksichtigt werden. Diese sind bislang nur sehr aufwendig und kostenintensiv ermittelbar (SCHOPFER ET AL., 2008). Einen Überblick über unterschiedliche BRDF-Modelle in Bezug zu realistisch wirkenden Computergrafiken gibt (GEBHARDT, 2003). Eine sehr umfangreiche Einführung ins Thema BRDF geben (SCHAEPMAN-STRUB ET AL., 2006).

Für eine radiometrische Auswertung von Bildern müssen die optischen Sensoren im Vorfeld radiometrisch kalibriert werden. Hierfür wird eine Ulbrichtkugel verwendet, die aus gerichteter Strah-

lung diffuse Strahlung erzeugt oder Strahlung stark divergenter Quellen sammelt²³. Möchte man die BRDF bestimmen, sind zusätzliche Informationen, wie z.B. die Sonneneinstrahlung (Sonnenphotometer) und Wetterdaten (Handgeräte) notwendig.

Bei schrägen Bildaufnahmen werden richtungsabhängige Strahlungssignaturen aufgenommen. Abbildung 38 skizziert den Strahlenverlauf von der Sonne hin zur Objektoberfläche und von der Objektoberfläche zur Kamera an einem UAV in schräger Perspektive. Abbildung 39 zeigt das zugehörige Polardiagramm, in dem sowohl Azimut-(tangentielle Komponente) als auch Elevationswinkel (radiale Komponente) der einfallenden bzw. reflektierten Strahlung eingetragen werden kann. Das gelbe Sonnensymbol (Hotspot) stellt dabei den Sonnenstand dar. Durch den Sonnenstand und den Nullpunkt verläuft die sogenannte Principal Plane. Rechtwinklig zu ihr verläuft die Cross Plane. Führt man einen Schnitt entlang dieser Ebenen, bekommt man charakteristische Kennlinien.

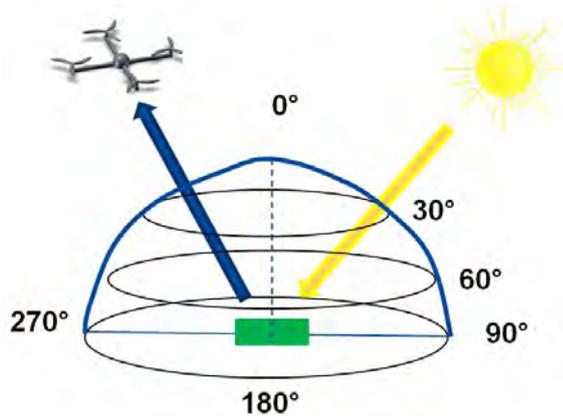


Abbildung 38: Beobachtungsgeometrie (Schrägperspektive)

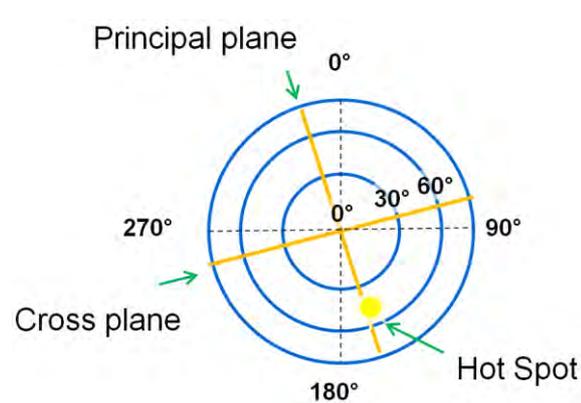


Abbildung 39: Beobachtungsgeometrie (Draufsicht)

Die Richtungsabhängigkeit von schrägen Luftaufnahmen eines Objekts sollte anhand eines Flugexperiments für einen Teilbereich des Versuchsfeldes mit Winterweizen der Universität Rostock gezeigt und weitestgehend modelliert werden. Ähnliche BRDF-Untersuchungen mit einem UAV („Stuttgarter Adler“, Starrflügler) unternahm (DRÖSKE, 2010) in seiner Diplomarbeit. Die Erfahrungen sollen bei der Konstruktion des „Four Vision“-Kamerasystem einfließen, um Informationen über das Reflexionsverhalten von Oberflächen mit zu bestimmen, die dann z.B. als Indikatoren für Vegetationsindizes oder auch für die radiometrische Anpassung von unterschiedlichen Bildern innerhalb eines Bildverbandes genutzt werden könnten.

Im Feldversuch vom 11.05.2011 mit der Olympus PEN E-P2 und der MD4-1000 sollte untersucht werden, ob BRDF-Effekte für die drei spektralen Kanäle der Kamera erkennbar sind. Die Kamera wurde nicht radiometrisch kalibriert, da hierfür die gerätetechnischen Voraussetzungen nicht vorhanden sind. Jedoch wurden in der Kamera alle Automaten abgeschaltet (z.B. Autofokus, automatische Belichtungszeit etc.) und eine konstante Blendenzahl (5.6) sowie eine konstante Belichtungszeit (1/1000 Sekunde) eingestellt. Zudem wird davon ausgegangen, dass auch alle weiteren beeinflussenden Eigenschaften (Weißabgleich; Helligkeitsrandabfall) der Kamera während des Fluges konstant bleiben. Einen Überblick über die wichtigsten Flugparameter gibt Tabelle 7.

Um die tatsächlichen BRDF-Effekte zu berechnen, muss sowohl die Bestrahlungsstärke aus Beleuchtungsrichtung (Sonne) als auch die Strahlungsdichte der reflektierten Strahlung beobachtet werden, wozu u.a. Sonnenphotometer bzw. Spektrometer benötigt werden. Da man lediglich die Intensität der Rückstrahlung in den Bildern bestimmen kann, kann man für diesen Versuch keine BRDF modellieren. Lediglich das Anisotropieverhalten kann bestimmt werden. Richtungsabhängige Signaturen sind auf die Anisotropie der Rückstrahlung zurückzuführen (SCHNEIDER & MANAKOS, 2000).

²³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Ulbrichtkugel>

Tabelle 7: Kenndaten der Befliegung für den hemisphärischen Flug

Zweck		Hemisphärischer Flug
Datum		11.05.2011
Wetter		windstill, leicht bewölkt, klare Sonneneinstrahlung
Plattform		UAV Nutzlast
		MD4-1000 Olympus PEN E-P2
Bilder		
Anzahl		284
Anzahl verwendeter Bilder bezogen auf Objekt		141
Belichtungszeit [Sek.]		1/1000
Blende		5.6
Flug (nach Flugdatenschreiber)		
Flughöhe [m]		12 bis 30
Flugzeit [Min:Sek]		mehrfaches Fliegen
Geschwindigkeit [m/s]		max 5, Abbremsung auf 0 bei Kamera-standpunkten
Wegstrecke [m]		ca. 804 für einen hemisphärischen Flug
Auswertung		
Software		Australis
Fehler [Pixel] (mean reprojection error)		k.A.
Größe Gebiet [km ²]		0.00049
Ground Sampling Distanz [m/Pixel] (theoretisch)		0.003 - 0.007
Auflösung [m/Pixel] (laut Protokoll)		k.A.
Anzahl GCPs		23



Abbildung 40: "FIGOS"-Projekt (SCHOPFER ET AL., 2008)



Abbildung 41: Geplante hemisphärische Flugroute

Nach dem Vorbild des „FIGOS“-Projekts (SANDMEIER ET AL., 1995) und (SCHOPFER ET AL., 2008) (Abbildung 40) soll eine hemisphärische Flugroute mit skalierbarem Radius und orientierbarer Kamera, die auf das Zentrum dieser Hemisphäre gerichtet ist, Aufnahmen von einem Feldausschnitt machen. Als Strahlungsquelle dient die Sonne, die natürlich während der Aufnahmen nicht durch Wolken verdeckt sein darf. Außerdem war es ratsam, um die Mittagszeit zu fliegen, damit im Bild keine langen Schatten vorhanden sind. Der zeitliche Beobachtungsaufwand sollte zudem so kurz wie möglich gehalten werden, da während des Aufnahmezeitraums Inhomogenitäten der Bestrahlung (z.B. durch Wolken oder veränderten Sonnenstand) auftreten können. Abbildung 41 zeigt die hemisphärische

Flugroute. Geflogen wird auf fünf Breitenkreisen unterschiedlicher Höhe einer gedachten Halbkugeloberfläche mit 25 m Durchmesser mit jeweils 12 Bildpositionen sowie einer Bildposition im Zenit. Insgesamt ergeben sich daraus theoretisch 61 Bilder.

Die Positionierungsgenauigkeit der MD4-1000 betrug bestenfalls 2-3 m. Die Genauigkeit der Kamerablickrichtung (roll, pitch, yaw) ist hingegen a priori nicht bekannt. Die Kameraaufhängung ist mit zwei Servomotoren für den Nick- und den Rollwinkel der Kamera versehen. Empirische Versuche zeigten, dass die Richtungsgenauigkeiten keinesfalls den erforderlichen Anforderungen entsprechen. Um die äußeren Orientierungen der Bilder in ein übergeordnetes gemeinsames Koordinatensystem zu überführen, wurden 22 kodierte Messplatten nach dem Messprinzip der Auswertesoftware „Australis“ in einem größeren Maßstab angefertigt, ausgelegt und mit der RTK-GNSS mit 1-2 cm Lage- und 2-3 cm Höhengenaugigkeit eingemessen (Abbildung 43). „Australis“ erkennt diese Marken automatisch in den Bildern und kann die Bildkoordinaten dazu bestimmen. Anschließend werden mit den Bildkoordinaten zusammen mit den GNSS-Koordinaten der Marken über eine Bündelblockausgleichung die äußeren Orientierungsparameter der einzelnen Bilder bestimmt.

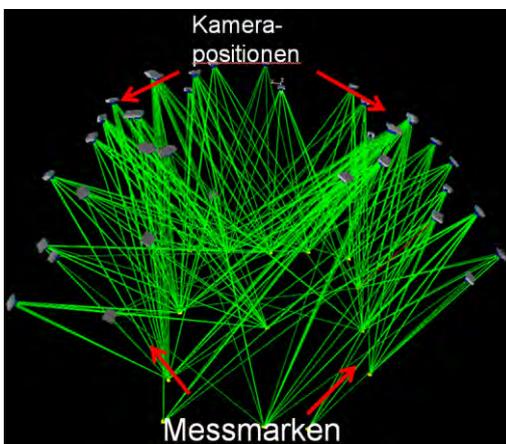


Abbildung 42: Bestimmung der äußeren Orientierung mit „Australis“



Abbildung 43: Übersicht über Untersuchungsgebiete im Feld (weiße Rechtecke)

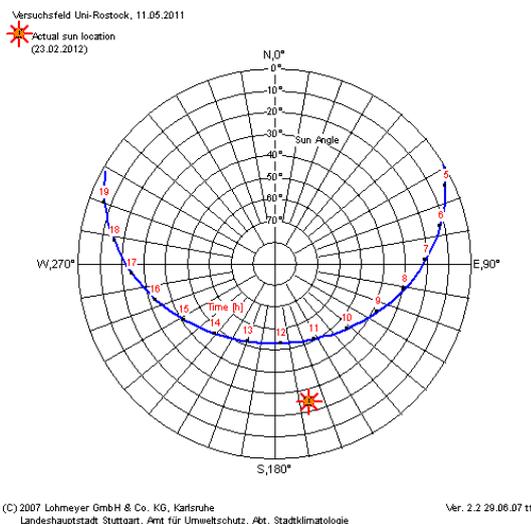


Abbildung 44: Sonnenstand für 11.05.2011²⁴,
blaue Linie = Sonnenstände,

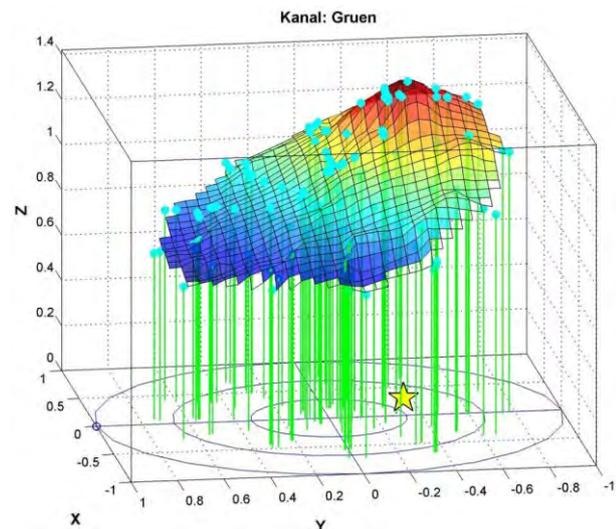


Abbildung 45: Beispiel für die Darstellung der Anisotropie für einen spektralen Kanal

In Abbildung 42 sind einzelne (nicht alle) Kamerapositionen über grüne Strahlen (rays) mit den Marken am Boden verbunden. Man erkennt, dass nicht alle Bilder automatisch orientiert wurden.

²⁴ <http://cgi.stadtlima-stuttgart.de/mirror/sonne.exe>.

Gründe hierfür sind z.B., dass im Bereich des Hotspots die Marken so sehr überstrahlt waren, dass eine Unterscheidung der Punkte und des Hintergrundes nicht mehr möglich war. Ein anderer Grund ist, dass in einzelnen Bildern nicht genügend Marken sichtbar waren. Zwar sollte die MD4-1000 die Kamera immer ins Zentrum richten, jedoch muss das UAV mit den Witterungsbedingungen, wie z.B. Wind, zusätzlich fertig werden. Deshalb wurde pro Standpunkt eine Verweildauer von 5 sec. programmiert, was teilweise nicht ausreichte.

Da es sich bei dem Flug um einen meiner ersten Flüge handelte und ich mit dem Equipment erst mal zurecht kommen musste, wurde leider zu spät bemerkt, dass die Kamera auf Serienbildmodus eingestellt war. So entstanden pro Standpunkt bis zu 5 und somit insgesamt 284 Bilder. Auswertbar waren davon lediglich 141 Bilder. Gerade Bilder im Bereich der Focal-Plane waren unbrauchbar, da hier spiegelnde Reflexionen auf der laminierten Oberfläche der Marken vorkamen. Dafür sind einige Bildpositionen durch den Serienbildmodus überrepräsentiert.

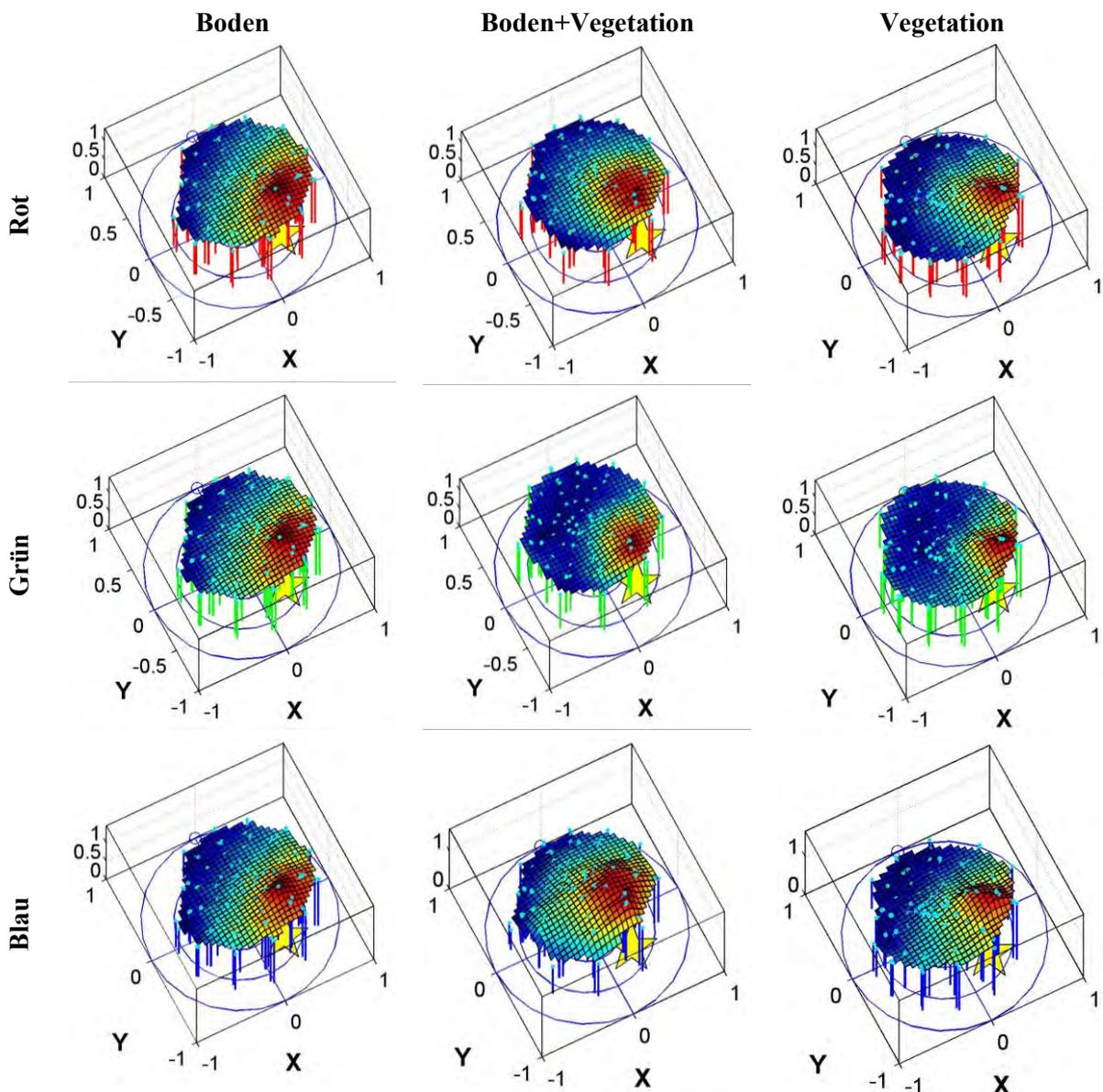


Abbildung 46: Anisotropie der drei ausgewählten Bereiche des beobachteten Versuchsfelds

Abbildung 43 zeigt das beflogene Feldstück. Die weißen Vierecke repräsentieren die Bereiche, für die das Anisotropieverhalten bestimmt wurde. Abbildung 45 zeigt exemplarisch eine derartige Grafik. In der XY-Ebene sind Azimut und Elevation der Bildposition in ein Polardiagramm eingetragen. Je höher die Aufnahme gemacht wurde, umso dichter kommt die Position dem Zentrum (Zenit). Norden

schaut in diesem Fall nach links und Süden nach rechts. Demzufolge schauen Osten nach hinten und Westen nach vorne. Der gelbe Stern zeigt die Position der Sonne während der Aufnahmen an.

Letztendlich wurden die äußeren Orientierungen aller auswertbaren Bilder berechnet und die Bilder mit ERDAS georeferenziert und in ASC-Dateien umgerechnet. Tabellarisch wurden in einem 5 cm Raster die georeferenzierten Bildkoordinaten mit den Werten der drei Farbkanäle hinterlegt. Über die Koordinaten der Rechtecke konnten so die zugehörigen Bereiche in den Bildern extrahiert werden.

In einem ersten Schritt wurden alle Werte pro Kanal, die innerhalb des weißen Rechtecks sind, zu einem Wert gemittelt. So entsteht pro Bild ein repräsentativer Wert für jedes ausgewählte Gebiet. Danach werden diese Werte über alle beteiligten Bilder nochmals gemittelt (normiert). Bei der Darstellung wurden die einzelnen Werte durch das Gesamtmittel dividiert. Das führt dazu, dass der Wertebereich beim Wert 1 liegt und alle drei Kanäle verglichen werden können.

Geflogen wurde in der Zeit von 9:55 Uhr - 10:41 Uhr. Der Sonnenstand variierte in dieser Zeit etwa von 128° - 144° im Azimut und 45° - 49° in der Elevation (Abbildung 44). Die berechneten Rückstrahlungswerte wurden über den jeweiligen Bildpositionen im Polarplot in Z-Richtung abgetragen. Danach wurde eine Oberfläche zu den einzelnen Stützstellen kubisch interpoliert und graphisch dargestellt.

Fazit:

Die Ergebnisse wurden in (GRENZDÖRFFER & NIEMEYER, 2011) veröffentlicht. Durch zwischenzeitliche Abbrüche der Flüge war die Befliegungszeit relativ lang. Die Sonne wechselt für diesen Zeitraum ihre Position um ca. 15° im Azimut und ca. 4° in der Elevation. Dieser Einfluss wurde nicht berücksichtigt und könnte sich durch eine leichte Verlagerung des Hotspots im Polarplot niederschlagen. Außerdem steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich in dieser Zeit die Beleuchtungsverhältnisse im Beobachtungsgebiet durch Bewölkung verändern, was dazu führen kann, dass Ausreißer im Polarplot je nach Einflusszeit entstehen können. Dieser Einfluss kann aber durch entsprechende Wetterbeobachtungen ausgeschlossen werden. Zudem wurden nicht alle Bilder benutzt, da ihre äußeren Orientierungen mit dem gewählten Orientierungsverfahren nicht bestimmt werden konnten. Dadurch ist der Stichprobenumfang an einigen Stellen etwas lückenhaft.

Hinzu kommt, dass die ausgewählten Flächen relativ groß gewählt wurden. Es wurde zwar darauf geachtet, dass diese Flächen repräsentativ sind, jedoch ergeben sich immer Mischsignaturen (Boden, Vegetation) und Helligkeitsunterschiede (z.B. durch Schatten) innerhalb der Flächen. Je kleiner die Fläche ist, umso kleiner wird auch dieser Einfluss. Das entspricht auch dem Grundgedanken der BRDF, die für infinitesimal kleine Raumwinkel Aussagen trifft.

In Anbetracht der Umstände und Einflüsse bei der Befliegung zeichnet sich jedoch ein typisches Bild anisotroper Rückstrahlung ab. Ganz deutlich ist der Bereich mit den höchsten Rückstrahlungswerten rund um den Sonnenstand zu erkennen (Hotspot). Die Anisotropie der reflektierten Strahlung ist erkennbar und unterscheidet sich sowohl hinsichtlich des Farbfrequenzbandes (Rot, Grün, Blau) als auch hinsichtlich der beobachteten Fläche (Abbildung 46). Es konnte die Richtungsabhängigkeit reflektierter Strahlung gezeigt werden, was im Umkehrschluss bedeutet, dass bei schrägen Luftbildaufnahmen eine radiometrische absolute Vergleichbarkeit unterschiedlicher Aufnahmen nur erreicht werden kann, wenn entsprechende zusätzliche Eingangsgrößen, wie z.B. Richtungen der Lichtstrahlen etc. sowie komplexe Strahlungsmodelle angewendet werden. Zusätzlich müssen die Wetterbedingungen und die Beleuchtungsverhältnisse dokumentiert werden.

5 Konzept und Umsetzung eines „Four Vision“-Kamerasystems für UAVs

5.1 Idee und Konzept

Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, werden schräge Bildaufnahmen sowohl in der klassischen Befliegung als auch in Verbindung mit UAV-Befliegungen vermehrt eingesetzt. Schräge Bildaufnahmen vermitteln dem Betrachter einen erweiterten Eindruck der Umgebung, vor allem über die Höhe von abgebildeten Objekten in Relation zu anderen benachbarten Objekten (z.B. Häuser, Türme, etc.) Ein Beispiel stellt die Internetplattform bing²⁵ dar, die zusätzlich zu der normalen Darstellung von Satelliten- und Luftbildern auch schräge Bilder in der Vogelperspektive anbietet. Zoomt man von einer kleinmaßstäbigen Ansicht in eine großmaßstäbige hinein, werden in der Vogelperspektive schräge Ansichten angezeigt. Diese Daten sind natürlich noch nicht flächendeckend und aus jeder Perspektive vorhanden.

Die Plattform google.maps²⁶ bietet dem Nutzer mit Streetview hingegen schräge Ansichten in Augenhöhe eines normalen Fußgängers an. Dafür sind spezielle Messwagen, wie in den Medien oftmals diskutiert, auf den Straßen unterwegs, die die Umgebung in entsprechender Weise scannen bzw. fotografieren. Es besteht sogar die Möglichkeit einer Anaglyphenansicht für eine entsprechende Anaglyphenbrille. Alle diese Erweiterungen nutzen dem Betrachter für eine verbesserte Orientierung und erweitern den Informationsgehalt dieser interaktiven Geoviewer.

Der Vorteil schräger Aufnahmen liegt in der Erweiterung der Perspektive (WIEDEN & LINKIEWICZ, 2013). Außerdem wird die abgebildete Flächengröße im Vergleich zu Nadiraufnahmen zu Lasten der Bodenauflösung vergrößert. Schräge Aufnahmen eignen sich zudem sehr gut für die Berechnung von 3D-Punktwolken aus mehreren Aufnahmen gleicher Objekte. Die schrägblickenden Visuren zwischen zwei Aufnahmepunkten lassen eine Vergrößerung der Basislänge zwischen den Aufnahmestandorten zu. Die Schnittgeometrie wird dadurch stabiler und schleifende Schnitte werden bei der Bestimmung von Objektpunkten vermieden. Über die 3D-Punktwolke erreicht man zusätzliche Objektinformationen, wie z.B. die Höhe, die 3D-Ausmaße oder das Volumen. Außerdem benötigt man schräge Ansichten bei Aufnahmen z.B. von Häuserfassaden (LINKIEWICZ, 2013).

Werden schräge Aufnahmen von radiometrisch kalibrierten Aufnahmesystemen durchgeführt, können unter Zuhilfenahme entsprechender atmosphärischer Strahlenausbreitungsmodelle und BRDF-Modelle betrachteter Oberflächen Rückschlüsse auf die „gerichtete Signatur“ (siehe Kap.4.2.4) gezogen werden und somit ein Informationszugewinn, z.B. über den Vitalitätszustand von Vegetationsoberflächen, gewonnen werden. Hat man mehrere Aufnahmen ein und derselben Oberfläche aus verschiedenen Blickrichtungen, lässt sich zudem über das Anisotropieverhalten das Reflexionsverhalten dieser Oberfläche (BRDF) ableiten.

Aus diesen Gründen soll ein Kamerasystem mit mehreren Kameras mit „Malteser Kreuz“-Konfiguration konzipiert, entwickelt und gebaut werden, das in der Lage ist, schräge Aufnahmen von einem UAV aus anzufertigen. Zum Einsatz kommen leichte Industriekameras, die über einen zentralen Minicomputer gesteuert werden sollen. Dieses Kamerasystem wird folgend „Four Vision“-Kamerasystem genannt, auch wenn defakto 5 Kameras zum Einsatz kommen. Da das zukünftige Einsatzgebiet im kommunalen oder Agrarbereich liegen soll, sind primär flächenhafte Informationen zu ermitteln. Das bedeutet, dass die Auflösung des Kamerasensors nicht so hoch sein muss. Zudem soll die Möglichkeit gegeben sein, die Neigung der schrägblickenden Kameras im Bezug zum Kamerasystem zu verändern. Die abgebildete Flächengröße der schrägblickenden Kameras soll nahe der Kamera-neigung von etwa 40° gleich der Flächengröße der Nadirkamera sein.

Im Fall des „Four Vision“-Kamerasystems wird die Flächenleistung im Vergleich zu einer Befliegung mit nur einer Nadirkamera erhöht. In Abbildung 47 auf der linken Seite erkennt man den Nor-

²⁵ <http://www.bing.com/maps/?FORM=Z9LH3>

²⁶ <https://www.google.de/maps>

malfall bei Luftbildbefliegungen. Es gibt eine Kamera, die senkrecht nach unten (Nadir) schaut. Die aufgenommene Fläche wird hier als rechteckige grüne Fläche dargestellt. Auf der rechten Seite sind die schrägblickenden Kameras und ihre Sichtbereiche dargestellt. Die aufgenommene Fläche einer schrägblickenden Kamera wird hier als blaues Trapez dargestellt. Alle vier Bereiche bilden dabei die Konfiguration eines „Malteser Kreuzes“. Zwar besitzen die schrägen Aufnahmen unterschiedliche Bildmaßstäbe und somit auch unterschiedliche Boden- bzw. Objektauflösungen, jedoch spielt das für eine Vielzahl von Anwendungsfällen eine untergeordnete Rolle, wenn es z.B. darum geht, einen ersten flächenhaften Eindruck zu bekommen. Zudem sind die Auflösungen der Luftbilder, von einem UAV aus gemacht, durch den relativ geringen Abstand zum Objekt mehr als ausreichend, so dass an dieser Stelle ein gewisser Spielraum vorhanden ist. Gerade im landwirtschaftlichen Umfeld, wo große, relativ ebene Flächen mit einer einheitlichen Wuchshöhe aufgenommen werden sollen, können so Flugstreifen eingespart und somit mehr Fläche während eines Fluges fotografiert werden.

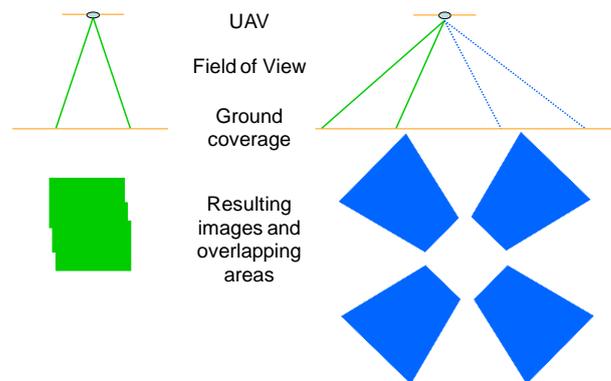


Abbildung 47: Flächenleistungen von Nadiraufnahme und schrägblickenden Aufnahmen in (GRENZDÖRFFER ET AL., 2012)

Da schräge Aufnahmen für die Erzeugung von Orthophotos nicht geeignet sind, weil hohe Objekte in den Bildern verkippt dargestellt werden, soll das „Four Vision“-Kamerasystem um eine Nadirkamera erweitert werden. Die Vorteile von schrägen Aufnahmen sollen dabei genutzt und die Nachteile durch die Nadirkamera kompensiert werden.

5.2 Kriterien zur Wahl der Hardwarekomponenten

An der Professur für Geodäsie und Geoinformatik der Universität Rostock wurde im Projekt „PFIFFikus - Innovative Photogrammetrie für Micro UAV's“ eine MD4-1000 der Firma Microdrones angeschafft. Dieses Modell ist laut Hersteller in der Lage 1.2 kg Nutzlast zu tragen. Der Quadrocopter bietet verschiedene Schnittstellen für die Nutzlast an. Z.B. werden Korrekturwerte der Fluglage an Servomotoren geleitet, um bspw. eine Kamerablickrichtung während des Fluges beizubehalten. Zudem existiert eine serielle Schnittstelle, die ursprünglich für einen Gasometer entwickelt wurde, um digitale Werte einer Nutzlast im UAV zu registrieren. Diese Werte werden in einer Zeitreihe parallel zu allen anderen Sensoren an Bord aufgezeichnet. Dadurch sind die Werte räumlich und zeitlich verortet und man kann Korrelationen der unterschiedlichen Sensorwerte untersuchen.

Dieses UAV wurde mit einem zusätzlichen Stromanschluss (22V) versehen, die einer Nutzlast den Strom des Bordnetzes zur Verfügung stellt. Natürlich sollten keine Geräte mit hohem Stromverbrauch angeschlossen werden, da sonst weniger Energie zum Fliegen bereit steht. Außerdem ist die MD4-1000 in der Lage, eine Kamera via USB-Kabel auszulösen. Aus diesen Voraussetzungen leiten sich folgende Anforderungen ab.

- Das Kamerasystem sollte ein Gesamtgewicht von 1 kg nicht überschreiten. Je schwerer die Nutzlast wird, umso kürzer wird die Flugzeit und umso träger reagiert das UAV.

- Der Stromverbrauch des Kamerasystems sollte minimal sein.
- Das Kamerasystem sollte über die MD4-1000 ausgelöst werden bzw. der Auslösemoment sollte durch das UAV registriert werden.
- Jede Kamera sollte den exakten Auslösemoment über die serielle Schnittstelle an das UAV geben. Dadurch werden die Bilder verortet.
- Das Kamerasystem sollte im eigenen Schwerpunkt gelagert sein, so dass das UAV von den Roll- und Kippwinkelkompensationen des Kamerasystems nichts bemerkt.

Da es weitere vergleichbare UAV gibt, die solche Traglasten zur Verfügung stellen, wie z.B. der Oktokopter XL ARF von Mikrocopter, der AR200 von AirRobot oder die MR-X8 Multirotor, ergibt sich ein weiteres Kriterium.

- Das Kamerasystem sollte so entwickelt werden, dass es auch von anderen ähnlichen Trägerplattformen getragen und betrieben werden kann.

5.3 Hardwarekomponenten

5.3.1 MD4-1000



Abbildung 48: MD4-1000 mit offenem Gehäuse



Abbildung 49: MD4-1000 mit Kamerasystem

Microdrones hat mit der MD4-1000 ein hochwertiges UAV entwickelt, das Lasten bis zu 1.2 kg tragen kann (Abbildung 48 und Abbildung 49). Die Flugzeiten hängen von dem Gewicht der mitgeführten Last (Payload) ab und variieren von 15 bis 45 min. Der Quadrocopter hat einen Durchmesser gemessen zwischen den Rotorachsen von 1.04 m. Die Fluggeschwindigkeit beträgt bis zu 15 m/s. Dabei ist das Gesamtabfluggewicht kleiner als 5 kg. Damit gehört es zur Klasse der Micro-UAVs. Die maximale Flughöhe wird von Microdrones mit 1000 m angegeben. Die MD4-1000 ist in der Lage Windstärken zwischen 3-4 Bft (max. 25 km/h) auszugleichen. Zu den an Bord befindlichen Sensoren zählen u.a. das Magnetometer (Kompass), der Luftdrucksensor (Regulierung der Flughöhe) und ein GNSS-Empfänger (Positionierung und Lokalisierung) mit 1-3 m absoluter Positionsgenauigkeit sowie Gyroskope und Beschleunigungssensoren. Die benutzten Lithium-Polymer-Akkus haben eine Spannung von ca. 22V und leisten damit 2000 Watt. An Bord befindet sich zudem ein Autopilot, mit dessen Hilfe das UAV automatisch über einem bestimmten Punkt gehalten wird („Position Hold“) oder mit dem vorprogrammierte Flugrouten abgeflogen werden können („Waypoint Navigation“). Diese Funktionen erlauben es, in mehreren Epochen immer wieder denselben Weg abzufliegen, was manuell äußerst schwierig ist. Ein UAV-interner Flugdatenschreiber macht mit 125 Hz Aufzeichnungen von über 80 Parametern und Sensormesswerten und schreibt sie auf eine MicroSD Karte.

Die Basisstation (Abbildung 50) besteht aus einem Laptop und einer Empfangsantenne für die Verarbeitung der von dem UAV gesendeten Telemetriedaten. Während des Fluges kann das UAV von der Basisstation aus unidirektional überwacht werden. Treten Probleme auf, gibt der Laptop in Form von

gesprochenem Text akustische Warnhinweise. Sollte die Drohne den Funkkontakt zur Fernbedienung verloren haben, hält sie eine Zeit lang über die „Position hold“-Funktion ihre Position. Danach kehrt sie zum Ausgangspunkt zurück oder leitet ein Notlandemanöver ein. Alle Aktionen während des Fluges werden umfassend in einem Flugdatenschreiber redundant zum UAV in der Basisstation gespeichert. Einige Sensorwerte können in Form von Zeitreihen in einem Diagramm dargestellt werden.



Abbildung 50: MD4-1000 Basisstation zur Überwachung der UAV-Telemetriedaten



Abbildung 51: Fernbedienung für MD4-1000 auf 35Mhz²⁷

Flugzeitlimitierende Faktoren sind die Außentemperatur, extreme Flugmanöver und das Wetter in Form von Wind. Als Nutzlast werden von Microdrones eine Kamerahalterung, die über Servomotoren die Neigungs- und Rollbewegungen kompensieren, und die Olympus PEN E-P2 mit 17 mm Festbrennweite angeboten. Das System ist somit in der Lage, photogrammetrisch auswertbare Luftbilder zu erzeugen.

5.3.2 Kameras



Abbildung 52: MV-CS27U von der Firma Crevis (MaxxVision, 2013a)

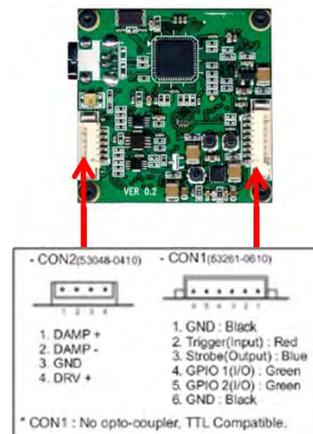


Abbildung 53: MV-CS27U Schnittstellen (MaxxVision, 2013a)

Recherchen ergaben, dass das Kameramodell MV-CS27U (Abbildung 52 und Abbildung 53) von der Firma Crevis den Anforderungen an das „Four Vision“-Kamerasystem genügt. Dabei handelt es sich um eine Color Industriekamera (Rot-Grün-Blau Bayernpattern mit aufgedampfter UV-Schutzschicht) mit einem 1/2“ Sony CCD Sensor. Die Größe einer Sensorzelle beträgt $4.65 \times 4.65 \mu\text{m}^2$. Bei einer Auflösung von 1280×1024 Pixel ergeben sich die effektiven Abmaße des

²⁷ <http://www.l-a-s.biz/catalog/images/royalpro9.jpg>

Sensors von $5952 \times 4761.6 \mu\text{m}^2$. Die Auflösung erscheint nicht sonderlich groß, reicht aber aus, um flächenhafte Informationen aufzunehmen.

In Kombination mit Objektiven mit Brennweiten von 6 mm bzw. 9 mm erreicht man Bodenaufösungen z.B. bei 50 m Flughöhe von 2.6 cm für das 9 mm Objektiv und von 3.9 cm für das 6 mm Objektiv (Abbildung 54).

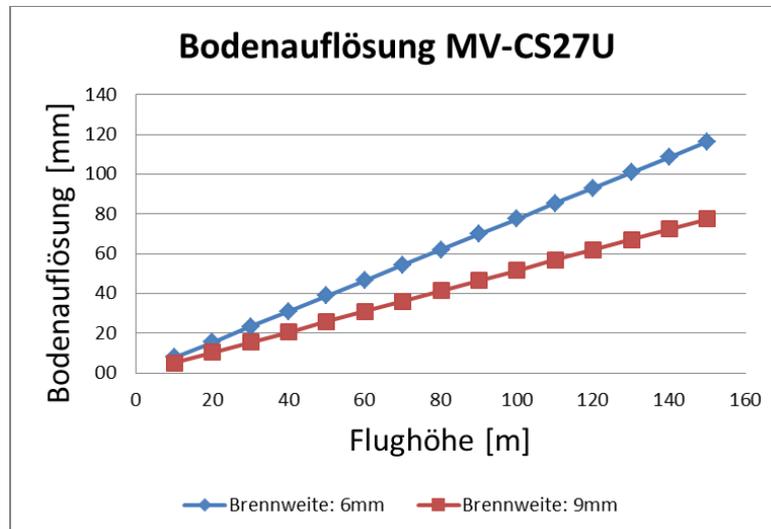


Abbildung 54: Zusammenhang zwischen Kameramodell und erreichbarer Bodenauflösung für die Brennweiten von 6 mm und 9 mm

Die Kamera ist in der Lage 15 Frames pro Sekunde (fps) auszulösen und wird über eine USB 2.0 Schnittstelle gesteuert und mit Strom versorgt. Der Stromverbrauch liegt bei 2.5 W. Somit sind keine weiteren Kabel für die Stromversorgung nötig. Mit den Abmaßen von $29 \times 29 \times 29 \text{ mm}^3$ und einem Gewicht von 38 g liegt sie innerhalb der Anforderungen.

Die MV-CS27U bietet zusätzlich zur USB-Schnittstelle zwei weitere Schnittstellen an (Abbildung 53), über die ein Triggerimpuls bzw. Auslöseimpuls an die Kamera gesendet werden kann. Außerdem kann ein Strobe-Signal (TTL-Signal für Blitzlicht) abgegriffen werden. Dieses Signal liegt zum tatsächlichen Auslösevorgang in einem **konstanten** Delay und wird bspw. an das UAV gesendet und als Nutzlastwert in die interne Zeitreihe geschrieben. Später kann so die Position des UAV bzw. der Kamera zum Auslösezeitpunkt bestimmt und die Bilder so georeferenziert werden.

Die Kamera ist programmierbar und bietet eine Menge von Einstellmöglichkeiten über das mitgelieferte SDK. Zudem werden Beispielprogramme für C++, LabView, Visual Basic und Halcon mitgeliefert, über die man sehr schnell die Programmierung der Kamera erlernen kann. Leider sind die Treiber der Kamera lediglich für Windows Betriebssysteme vorhanden.

Diese Kamera verfügt nicht über einen Infrarot Kanal. Darum sind auch Indizes wie der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) oder der SR (Simple Red Index) mit diesen Modellen nicht berechenbar. Lediglich Indizes, die auf den Wellenlängen für Rot, Grün und Blau beruhen, wie z.B. der VARI (GITELSON ET AL., 2002), können berechnet werden. Der Grund für die Wahl für eine RGB-Kamera bestand darin, dass zukünftig nicht nur landwirtschaftliche Anwendungen damit durchgeführt werden sollen, in denen vor allem der nahe Infrarotbereich von großem Interesse ist, sondern auch ganz normale Luftbildaufnahmen von z.B. Häusern, Fassaden oder anderen Objekten im sichtbaren Licht aufgenommen werden sollen. Zudem bieten Infrarotkameras i.d.R. nur diesen einen Kanal an, während bei der RGB-Kamera drei Kanäle zur Verfügung stehen.

Zu den Kameras werden einzelne Demonstrationsprogramme und Programme für grundlegende Einstellungen mitgeliefert. Da Industriekameras i.d.R. an Orten betrieben werden, an denen stabile Lichtverhältnisse gewährleistet sind, reichen diese Programme auch völlig aus, um die Kamera einmalig vor dem Gebrauch auf die Umgebung abzustimmen.

Bei den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten des „Four Vision“-Kamerasystem ändern sich die Lichtverhältnisse sehr stark, so dass die Kameras individuell vor einem Flug angepasst werden müssen. Die Kameras verfügen leider nicht über entsprechende Automatismen für Belichtungszeit, Blende und Empfindlichkeit wie heutige Amateurkameras. Um aussagekräftige und auswertbare Bilder zu bekommen, müssen entsprechende Methoden programmiert werden. Dabei ist eine Auseinandersetzung mit den wichtigsten radiometrischen Einstellungsmöglichkeiten des Kameramodells nötig. Tabelle 8 gibt einen Überblick über diese Parameter und deren Bedeutung.

Tabelle 8: Einstellungsmöglichkeiten der verwendeten Industriekameras (MV-CS27U)

Kameraparameter	Bedeutung
DeviceUserID	Vom Benutzer zugewiesene ID (0-65535), z.B.: 5
ExposureTime	Belichtungszeit in Mikrosekunden (10^{-6} Sek); min=10 μ Sek, max=65535 μ Sek
PixelFormat	Kamera kann in verschiedenen Modi betrieben werden: 35127316 - RGB8Packed, 17301505 - Mono8, 17301515 - Bayer_BG8
GainRaw	Verstärkung des Videosignals; meist eingesetzt, um sehr kurze Belichtungszeiten zu bekommen und die damit einhergehenden unterbelichteten Bilder aufzuhellen; je höher der Gainwert, umso mehr Bildrauschen wird erzeugt; manuell einstellbar zwischen 0-100 (laut Datenblatt: 0dB - +22dB)
GainBlueRaw	Verstärkung des Videosignals des Blauen Kanals; wichtig für den Weißabgleich bzw. für die Einstellung der richtigen Farbtemperatur (0-5000)
GainRedRaw	Verstärkung des Videosignals des Roten Kanals; wichtig für den Weißabgleich bzw. für die Einstellung der richtigen Farbtemperatur (0-5000)
BlackLevelRaw	Korrekturmöglichkeit für Thermisches Eigenrauschen (0-255)
BalanceWhiteAuto	Die einzige Automatik in dieser Kamera ist der Weißabgleich. 0 - Weißabgleich abgeschaltet; 1 - Weißabgleich wird einmal durchgeführt und dann gesetzt, 2 - Weißabgleich wird kontinuierlich durchgeführt und passt sich an die jeweilige Situation an
ColorCorrection	Verändert die RGB-Empfindlichkeit des Sensors (0-10)
GammaMode	Manipulationsmöglichkeit des Bildes mit Gammafunktion (0=off, 1=Mode(0.45), 2=Mode(0.70), 3= eigene Werte)

5.3.3 Objektive

Die MV-CS27U bietet für Objektive einen C-Mount Anschluss an. Die Wahl der Objektive entscheidet mit über die Größe und Auflösung der abgebildeten Fläche. Als erstes soll die Frage geklärt werden, welche Brennweite das Objektiv der Nadirkamera haben soll.

Mit dem UAV besteht die Möglichkeit im unüberwachten Luftraum zu fliegen. Dieser Luftraum ist abhängig vom Ort und liegt bspw. rund um Rostock bei 1000 ft (ca. 300 m). Da das Kamerasystem für landwirtschaftliche und kommunale Anwendungen konzipiert ist, werden i.d.R. höhere Bodenauflösungen nicht benötigt. Demzufolge wäre ein Weitwinkelobjektiv sinnvoll. Weitwinkelobjektive haben jedoch den großen Nachteil, dass sie eine starke Verzeichnung im Randbereich aufweisen.

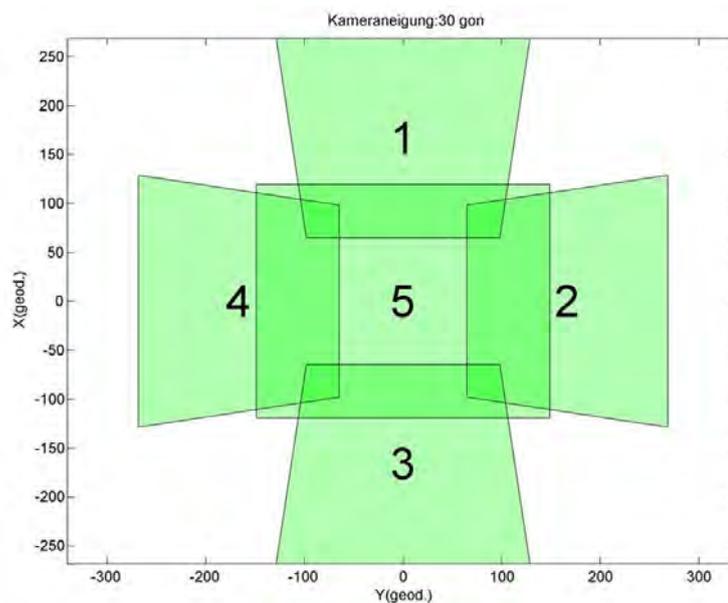
Die Wahl fiel schließlich auf ein Objektiv mit 6 mm Brennweite. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Flughöhe, die abgebildete Flächengröße und die Bodenauflösung (siehe auch Abbildung 54) für ein 6 mm Objektiv zusammen mit der MV-CS27U.

Bei einer Flughöhe von bspw. 50 m würde eine Fläche von 1968 m² abgebildet werden. Die Seitenlängen des abgebildeten Rechtecks wären ca. 50 m x 40 m. Dabei entstände eine GSD von ca. 4 cm pro Pixel.

Tabelle 9: Relation Flughöhe und Bodenauflösung für ein 6 mm Objektiv zusammen mit der MV-CS27U

Höhe [m]	Seite a [m]	Seite b [m]	Fläche [m ²]	GSD [m/Pixel]
20	19.84	15.87	315	0.015
50	49.60	39.68	1968	0.039
100	99.20	79.36	7873	0.078

Die einzelnen Kameras sollen im „Four Vision“-Kamerasystem so angeordnet werden, dass die aufgenommenen Bildbereiche am Boden eine „Malteser Kreuz“-Konfiguration abbilden (Abbildung 55). Die Kamera mit Nadirblickrichtung bildet annähernd ein rechteckiges Gebiet ab. Die schrägblickenden Kameras bilden hingegen eine trapezförmige Fläche mit unterschiedlichen Bildmaßstäben ab. In Abbildung 55 kann man nachvollziehen was passiert, wenn die Neigungswinkel der schrägblickenden Kameras vergrößert werden. Während Fläche 5 konstant bleibt, werden die Flächen 1 bis 4 mit zunehmender Schrägstellung immer größer und die trapezförmige Abbildung immer langgezogener. Das „Four Vision“-Kamerasystem soll einen Schwenkbereich für die schrägblickenden Kameras von 30°-60° ermöglichen. Bei Winkeln im Bereich von 0°-30° würden sich die Bildbereiche, wie es in Abbildung 55 mit 27° sichtbar ist, zu sehr überlappen. Im Gegensatz dazu wären bei Winkeln größer als 60° die abgebildeten Flächen und die damit verbundenen unterschiedlichen Bildmaßstäbe innerhalb des Bildes zu groß für eine sinnvolle Bildauswertung.

**Abbildung 55: Abgebildete Flächen in der Ebene („Malteser Kreuz“)**

Die abgebildeten Flächen der schrägblickenden Kameras sollten im Schwenkbereich ungefähr den gleichen Flächeninhalt wie die Nadirkamera haben. Deshalb wurden für die schrägblickenden Kameras Objektive mit 9 mm Brennweite gewählt. Für Neigungen bei ca. 38° wären die Flächen annähernd gleich groß.

Für die Nadirkamera wird das Fujinon C-Mount Objektiv mit 6 mm Brennweite genutzt (Abbildung 56). Die Blendenzahl ist zwischen 1.2 und 16 stufenlos einstellbar. Der Sichtbereich wird mit 56°09' x 43°36' angegeben.

Für die schrägblickenden Kameras werden Fujinon C-Mount-Objektive mit 9 mm Brennweite genutzt (Abbildung 57). Hier ist die Blendenzahl zwischen 1.4 und 16 stufenlos einstellbar. Der Sichtbereich wird mit 39°09' x 29°52' angegeben. Beide Objektivtypen haben je ein Gewicht von 55 g. Fokussierungen und Blendeneinstellungen sind manuell einstellbar und werden mit einer Schraube ar-

tiert und sind dadurch weniger anfällig für Vibrationen. Die MOD (minimum object distance) beträgt für beide Objektive 0.1 m.



Abbildung 56: Fujinon C-Mount Objektiv mit 6 mm Brennweite (MaxxVision, 2013b)



Abbildung 57: Fujinon C-Mount Objektiv mit 9 mm Brennweite (MaxxVision, 2013b)

Zusätzlich zu den Objektiven mussten 5 mm breite Abstandsringe zwischen Objektiv und Kamera eingebaut werden, um ein scharfes Bild zu erzeugen. Insgesamt ergäbe sich ein Gewicht von ca. 93 g pro Kamera. Mit fünf verwendeten Kameras wäre ein Gewicht von 465 g verbraucht.

5.3.4 Steuereinheit der Kameras (CPU)

Die fünf Kameras des „Four Vision“-Kamerasystems müssen über einen zentralen Computer gesteuert und mit Strom versorgt werden. Diese Computereinheit darf kein größeres Gewicht besitzen und muss für die Kamerasteuerung über genügend Rechenleistung verfügen. Mehrere Systeme wie z.B. das PC104 System, das Beagle Bord oder diverse MiniPC bieten solche Developer-Boards an. Im Vergleich wurde das Pico-ITX-Board mit 1.6 GHz, einem Intel® Atom™ Z510 / 530 Prozessor, 6 USB 2.0 Anschlüssen (alle mit 500 mA abgesichert), 2 SATA-Ports, 1 PATA44-Port, 1 DVI-D-Port, 1 GB LAN Anschluss, 1 microSD Card socket, 1 GByte RAM und einem passiven Kühler gewählt (Abbildung 58).



Abbildung 58: Pico-ITX-Board, 1.6 GHz Intel® Atom™ Z510 / 530 Prozessor, 6 USB 2.0, 2 SATA-Ports, 1 PATA44-Port, 1 GByte RAM²⁸

Das Board benötigt eine Spannung von 5 V, hat einen Leistungsverbrauch von 5 W (ohne extern angeschlossene Geräte) und hat die Abmaße 100 x 72 mm². Das Board hat ein Gewicht von ca. 214 g.

²⁸ http://www.kontron.com/downloads/manual/ktd-s0002-i_pitx-sp_usersguide.pdf

Erst in der Endphase der Kamerakonstruktion kurz vor den ersten Befliegungstests kam das Problem der Überlagerung eines vom Board emittierenden EM-Feldes mit den GNSS-Signalen zu Tage, was zu Störungen in der Navigationseinheit führte. Deshalb wurde das KTA55-pITX mit einem Gewicht von ca. 257 g als zweite Computereinheit angeschafft. Beide Boards gleichen sich von ihren Anschlüssen, Größen und Stromverbrauch. Jedoch wurde beim KTA55-pITX statt eines 1.6 Ghz Prozessors ein Dual-Core-Prozessor mit 1.0 GHz verwendet. Zudem wurde der Arbeitsspeicher auf 2 GByte erweitert.

5.3.5 Speichermodul

Das Speichermodul hat in erster Linie die Aufgabe, die Bilder der einzelnen Kameras zu speichern. Außerdem soll auf ihm das Betriebssystem und die Kontroll- und Steuerungssoftware der Kameras installiert sein. Das Kamerasystem sollte in der Lage sein, pro Sekunde 5 Bilder auszulösen und zu speichern. Vergleichsweise schaffen handelsübliche Digitalkameras in Abhängigkeit der Schreibgeschwindigkeit der Speicherkarte und ohne Burstmodus ein bis zwei Bilder in 2 Sekunden. Ein Bild des „Four Vision“-Kamerasystems hat eine Größe im RGB-RAW-Modus von knapp 3.9 MBytes. Pro Minute würde das Kamerasystem somit 1.17 GByte erzeugen. Berücksichtigt man die Flugzeit von 15 min, so ergäbe sich ein Datenvolumen von 17.6 GByte.

Das erste Speichermodul bestand aus einer 64 GByte Compact Flash Card mit einer maximalen Schreibgeschwindigkeit von 40 MBytes/Sek., die über einen speziellen Adapter und den PATA44-Anschluss an das Pico-ITX-Board mit 1.6 GHz angeschlossen wurde. Dieses Modul (Speicherkarte, Adapter, Kabel) hat ein Gewicht von lediglich 40 g. Als Betriebssystem wurde Windows XP benutzt, da die mitgelieferte Kontrollsoftware und vor allem die Kamertreiber nur für dieses System konzipiert wurden. Tests ergaben, dass die Schreib- und Lesegeschwindigkeit zu langsam für einen flüssigen Betrieb des Kamerasystems waren. Trotzdem soll dieses Modul hier erwähnt sein, da es für die ersten Konzeptionen z.B. bzgl. des Gewichts verwendet wurde.

Ab der zweiten Version des Kamerasystems wurde als Datenspeicher eine 120 GByte mSATA SSD (Mushkin Atlas Deluxe Solid State Disk), die über einen mSATA-Adapter und ein kurzes SATA-Kabel mit dem Board verbunden wird, verwendet. Die Lesegeschwindigkeit dieser Karte wird mit 560 MByte/Sek. und die Schreibgeschwindigkeit mit 525 Mbyte/Sek. bei einem Stromverbrauch von 2 Watt angegeben²⁹ (SATAIII-Standard). Zudem ist gleichzeitiges Lesen und Schreiben möglich. Leider unterstützen beide CPUs nur den SATAII-Standard mit einer Bandbreite von 300 MByte/Sek. Somit besteht an dieser Stelle noch Potential, um die Verarbeitungsgeschwindigkeit zu steigern.

5.3.6 Stromkonverter

Während des Betriebs der CPU zusammen mit den 5 Kameras konnte eine Leistungsaufnahme von 21 W gemessen werden. Die Stromversorgung kann damit über das leistungsstarke Stromversorgungsnetz der MD4-1000 erfolgen, da das Kamerasystem prinzipiell nur während des Flugs funktionieren soll. Microdrones hat auf Wunsch einen Stromanschluss für unser Kamerasystem in die MD4-1000 integriert.

Mit einem DC-DC-Konverter (Abbildung 59) wird der Strom von 22 V auf 5 V transformiert. Dieses Netzteil ist in der Lage, Eingangsspannungen zwischen 6-34 V auf Ausgangsspannungen zwischen 5-24 V via Jumper zu transformieren. Damit können neben der MD4-1000 auch andere Trägerplattformen als Stromlieferant angezapft werden, was den Anforderungen aus Kap.5.2 entspricht. Dieses Netzteil hat ein Gewicht von 71.7 g. Die maximale Leistung beträgt 100 W limitiert auf 10 A Eingangssicherung.

²⁹ <http://www.alternate.de/Mushkin/Atlas-Deluxe-SSD-120-GB/html/product/990331?>



Abbildung 59: DC-DC Netzteil³⁰

5.3.7 Mikrokontroller für synchrones Auslösen

Der Kontroller verbindet die Kameras mit dem UAV und der Steuereinheit und ist auf die Kamera MV-CS27U von Crevis und die MD4-1000 abgestimmt. Lösen die Kameras aus, wird über die Verbindung CON1 (siehe Abbildung 53) auf der Kamera ein Stromimpuls gesendet. Der Kontroller erkennt das Signal und wandelt es in ein digitales Signal ($\langle \text{NutzlastdatenID} \rangle, \langle \text{Messwert} \rangle \langle \text{CR} \rangle \langle \text{LF} \rangle$) um. Über eine Standard UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) bzw. RS232 Schnittstelle an der MD4-1000 wird das digitale Signal als Nutzlast in der Zeitreihe des Flugdatenschreibers registriert. Der Kontroller (Abbildung 60) wurde in Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Arne Neiser vom IEF/Institut für Gerätesysteme und Schaltungstechnik der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik entwickelt und von Arne Neiser gebaut. Es können bis zu 5 Kameras und die MD4-1000 angeschlossen werden. Der Kontroller ist programmierbar. So können die Nutzlastdaten-IDs und die Messwerte für jede der fünf Anschlüsse individuell eingestellt werden.

Die Steuereinheit ist via USB mit dem Kontroller verbunden. Über den USB-Port kann ein Signal an den Kontroller geschickt werden. Der Kontroller ist in der Lage daraufhin alle Kameras synchron auszulösen, was in den meisten Anwendungsfällen erwünscht ist. Die Kameras müssen für diese Zwecke jedoch umgestellt werden, was eine Software erledigt.



Abbildung 60: Kontroller zur Übertragung des Strobe-Signals von der Kamera zur MD4-1000 und zum synchronen Auslösen aller 5 Kameras

5.3.8 Kamerahalterung

Eine Kamerahalterung soll alle Bauteile verbinden und dem Kamerasystem so Stabilität verleihen. Das Kamerasystem sollte insgesamt so leicht wie möglich und nicht schwerer als 1 kg sein. Das UAV ist zwar offiziell in der Lage 1.2 kg zu tragen, dennoch sollte nicht das volle Traglastpotential ausgenutzt werden, um bei Änderungen am Kamerasystem noch etwas Spielraum zu behalten. Da das anvisierte Ziel von 1 kg Gesamtgewicht durch die einzelnen Bauteile zu ca. 90% ausgenutzt wurde, be-

³⁰ https://www.cartft.com/support_db/support_files/DCDC-USB_Advanced.pdf

stand für das Halterungssystem eine Gewichtsvorgabe von lediglich 100 g (siehe Tabelle 10). Zu diesem Zeitpunkt bestand das Speichermodul aus einer 64 GByte Compact Flash Card und Adapter.

Tabelle 10: Ausgangssituation und Gewichtsbilanz der Bauteile des "Four Vision"-Kamerasystem

Bauteil	Gewicht[g]
Kamera Crevis (MV-CS27U) x 5 + Objektiv + Abstandsringe	99 x 5 = 495
Pico ITX-SP, 1,6 Ghz Plus (Mainboard) + 64 GByte Compact Flash Card + Adapter	267.4
Stromkonverter	56.0
Servomotoren	2 x 42 = 84
Summe:	902.4

Die Problemstellung der Kamerahalterungskonstruktion wurde in Verbindung mit dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik und Leichtbau der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock in Form einer Bachelorarbeit durch Florian Schmidt (SCHMIDT, 2011) gelöst. Die Aufgabe bestand darin, eine Leichtbaukonstruktion zur Aufhängung der photogrammetrischen Nutzlast unter speziellen Voraussetzungen, wie z.B. Tragkraft, Stabilität und Gewichtsgrenzen, zu entwickeln. Es entstanden verschiedene Trägerkonzepte unter Berücksichtigung einer Anforderungsliste, die anhand bestimmter Bewertungskriterien verglichen wurden.

Abbildung 61 zeigt den endgültigen Entwurf und damit die erste Version des „Four Vision“-Kamerasystem der Bachelorarbeit. Die seitwärts blickenden Kameras können laut Vorgabe zwischen 30° und 60° geneigt werden. Das Kamerasystem teilt sich in einen Oberbau, der fest mit dem UAV verbunden ist und CPU, Speichermodul und Stromkonverter enthält und einen Unterbau, in dem die Kameras installiert sind. Zwischen Ober- und Unterbau sitzen zwei Gelenke (Nick- und Rollgelenk), die über Servomotoren die Flugmanöver des UAV gegenüber dem Kamerasystem kompensieren. Das Kameragestell wurde so konzipiert, dass es Beschleunigungen bis zu 4 g aushält. Abbildung 62 gibt einen Eindruck über die Größenverhältnisse.

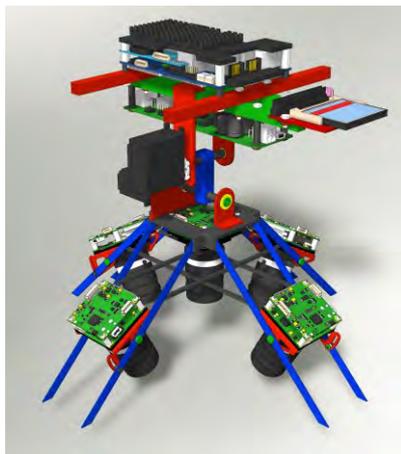


Abbildung 61: Entwurf der Kamerahalterung



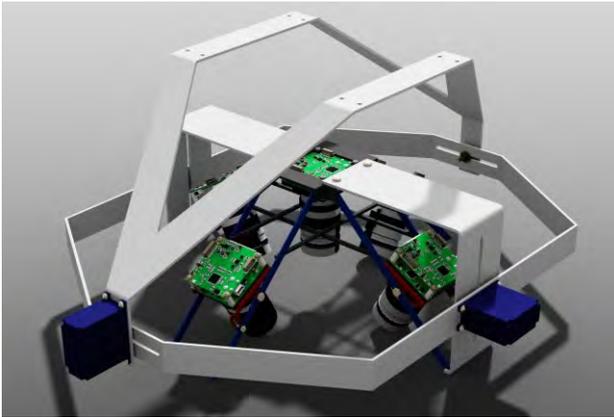
Abbildung 62: Entwurf "Four Vision"-Kamerasystem unter MD4-1000

Bei allen Bauelementen wurde darauf geachtet, möglichst Teile zu verwenden, die aus standardisierten Halbzeugen herstellbar sind, um dem Kriterium der einfachen Fertigung gerecht zu werden (SCHMIDT, 2011). Als Material wurde aufgrund seiner hohen spezifischen Steifigkeit und Festigkeit karbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) verwendet. Zudem wurden in der Bachelorarbeit detaillierte Baupläne gezeichnet und das Kamerasystem im Anschluss an die Bachelorarbeit gebaut. Insgesamt

hatte die Kamerahalterung ein Gewicht von ca. 100 g und das komplette Kamerasystem ein Gesamtgewicht von gerade mal 1004 g.

Wie sich später herausstellte war die erste Version für den Flugeinsatz nur bedingt tauglich. Die Gelenke zwischen dem Oberbau und dem Unterbau bewirken eine Massenverlagerung des Unterbaus. Diese Massenverlagerung muss die MD4-1000 zusätzlich kompensieren, was zum Taumeln des Flugsystems und beinahe zum Absturz führte. Außerdem entstand durch die Massenverlagerung ein zusätzliches Drehmoment auf die direkt verbundenen Servomotoren. Dadurch wurden die Servomotoren zusätzlich belastet, was zum Stillstand ab einer bestimmten Schiefelage führte.

a)



b)

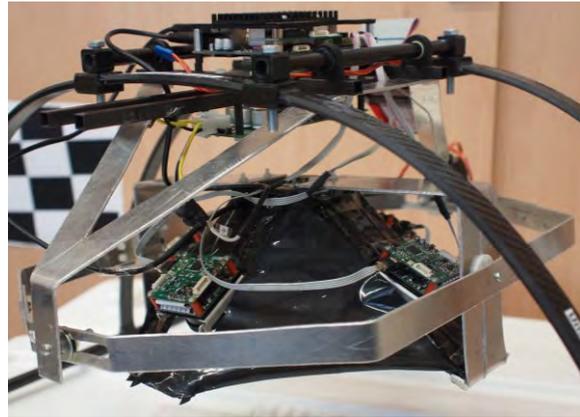


Abbildung 63: Überarbeiteter Kamerahaltungsrahmen aus Aluminium, Kameraunterbau befindet sich im Schwerpunkt, Kompensationen werden von UAV nicht bemerkt

Es wurde ein neuer Entwurf einer Kamerahalterung so entwickelt, dass das Kamerasystem im Schwerpunkt aufgehängt ist. Die Kameraneigungs- und Rollkompensation ist so konstruiert, dass keine Massenverlagerungen mehr stattfinden. Das UAV merkt quasi nichts von den Ausgleichsbewegungen (Abbildung 63 a und b). Außerdem werden die Servomotoren entlastet. In jeder Neigungseinstellung wirkt nun die gleiche Kraft auf die Servomotoren. Theoretisch kann der Unterbau während der Flüge auch schräg gestellt werden. Zudem wurde die Steuerungseinheit (CPU) und das Speichermodul ausgetauscht.

Aus Zeitgründen wurde eine Aluminiumkonstruktion entwickelt und gebaut (Abbildung 63). Dazu wurden der Ober- und Unterbau der ersten Version benutzt. Das Kamerasystem der zweiten Version hat ein Gesamtgewicht von 1435 g und lag somit nicht mehr im offiziellen Traglastbereich der MD4-1000. Ein Feldversuch mit der MD4-1000 und dieser Kamerakonstruktion zeigte, dass die MD4-1000 in der Lage ist, auch mit diesem Zusatzgewicht zu fliegen. Jedoch werden die Ressourcen der MD4-1000 stärker belastet, die bspw. gegen stärkeren Wind benötigt werden. Die Flüge wurden daher nur bei optimalen Wetterbedingungen durchgeführt.

Eine dritte Version des Kamerasystems wurde in der Bachelorarbeit von Richard Bienasch auch in Verbindung mit dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik und Leichtbau entwickelt (BIENASCH, 2013). Abbildung 64 zeigt seinen endgültigen Entwurf. Im Vergleich zur zweiten Version aus Aluminium unterscheidet sich diese Konstruktion durch ihre Größe und ihre Gewichtsersparnis von ca. 200 g. Als alternative Entwürfe entstanden einseitig aufgehängte Systeme, bei denen weitere Gewichtseinsparungen zu Lasten der Stabilität möglich wären. Das Gesamtgewicht wird mit 1270 g angegeben und liegt somit knapp über dem offiziellen Zuladungsgewicht. Derzeit befindet sich die dritte Version in der Bauphase. Als Neuerung wurde der Unterbau um 45° zur Flugrichtung gedreht und somit die Ausdehnungen des Kameraunterbaus und der zu berücksichtigenden Schwenkradien verkleinert. Diese Veränderung kann durch die Flugeigenschaften der MD4-1000 ausgeglichen werden. Zudem wurde die CPU neu angeordnet, um an die Anschlüsse zu gelangen.

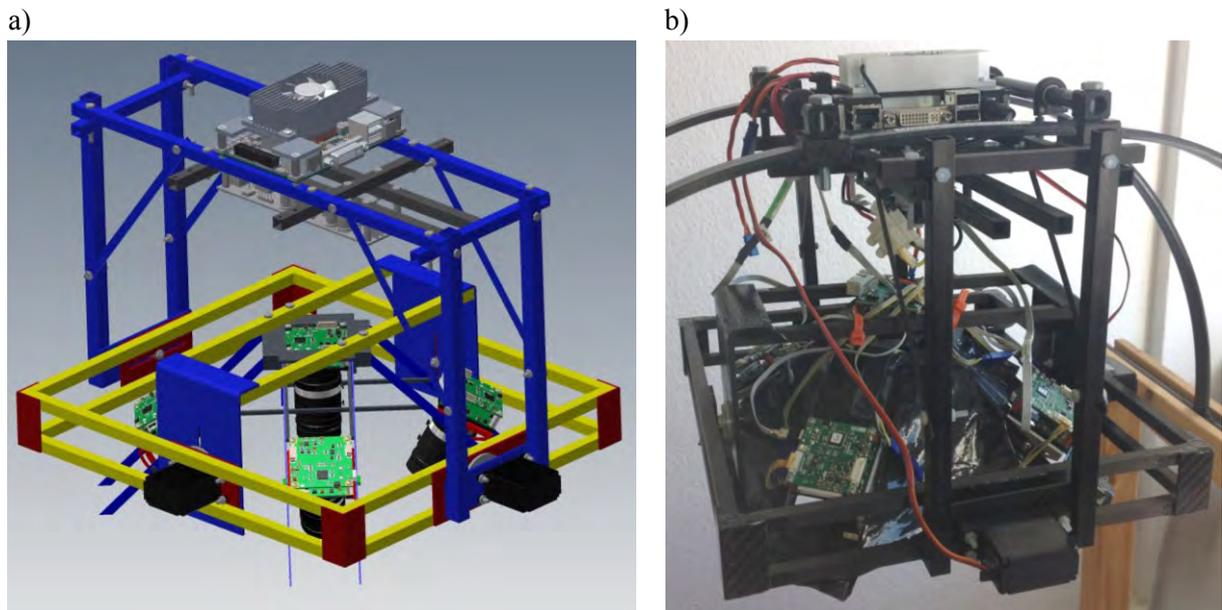


Abbildung 64: Entwurf und Umsetzung der Kamerahalterung von (BIENASCH, 2013)

5.4 Bodenauflösung und Fokussierung

Die schrägblickenden Kameras des „Four Vision“-Kamerasystems haben jeweils eine Brennweite von 9 mm und eine Pixelgröße von $4.65 \times 4.65 \mu\text{m}^2$. Zudem sollen sie im Bereich zwischen 30° und 60° neigbar sein. In Tabelle 11 werden die entsprechenden Roll- und Nicköffnungswinkel angegeben.

Tabelle 11: Roll- und Nicköffnungswinkel der Kamera-Objektiv-Kombination des "Four Vision"-Systems nach den Gleichungen (2.5) und (2.6) (c =Brennweite)

	$c=6 \text{ mm}$	$c=9 \text{ mm}$
Nicköffnungswinkel	43.29°	29.63°
Rollöffnungswinkel	52.76°	36.59°

Abbildung 65 skizziert die Einstellungsmöglichkeiten der Neigungen der schrägblickenden Kameras des „Four Vision“-Kamerasystems zusammen mit dem Nicköffnungswinkel von 29.63° .

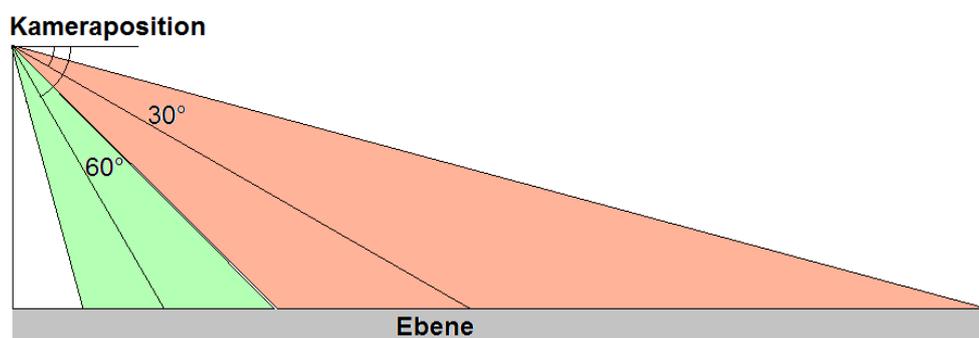


Abbildung 65: Neigungsmöglichkeiten der schrägblickenden Kameras mit Nicköffnungswinkel

In Abbildung 66 ist die Kurve aus Abbildung 1 dargestellt und der Nicköffnungswinkel für die beiden Neigungswinkel für 60° (grün) und 30° (rot) eingezeichnet. Man erkennt, um welchen Faktor sich die Bodenauflösung im Bezug zu einer Ebene ändert. Bei dem Neigungswinkel von 60° , also einer Winkelabweichung zum Lot von 30° , ergäbe sich der abgebildete Bereich zwischen 15.185° und 44.815° Winkelabweichung vom Nadir. In diesem Bereich ändert sich die Bodenauflösung vom 1.04-fachen bis zum 1.41-fachen. Bei einem Neigungswinkel von 30° , also einer Winkelabweichung vom Nadir von 60° , ergäbe sich der abgebildete Bereich zwischen 45.185° und 74.815° Winkelabweichung

vom Nadir. In diesem Bereich ändert sich die Bodenauflösung vom 1.42-fachen bis zum 3.82-fachen. An dieser Stelle muss über die Aufgabenstellung entschieden werden, welche Neigungswinkel gewünscht sind. Erst dann kann man Aussagen zur Flugstreifenbreite machen.

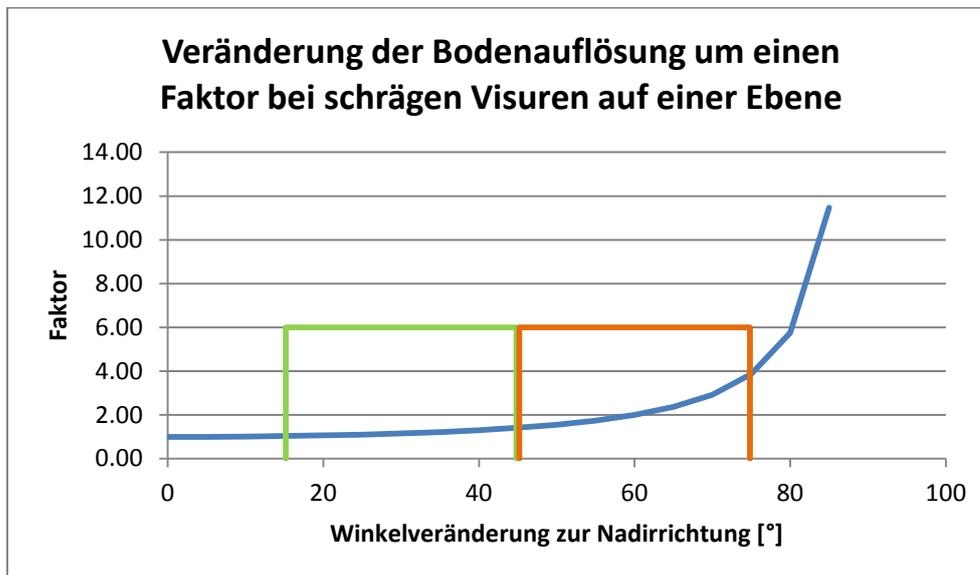


Abbildung 66: Veränderung der Bodenauflösung für die schrägen Visuren des „Four Vision“-Systems

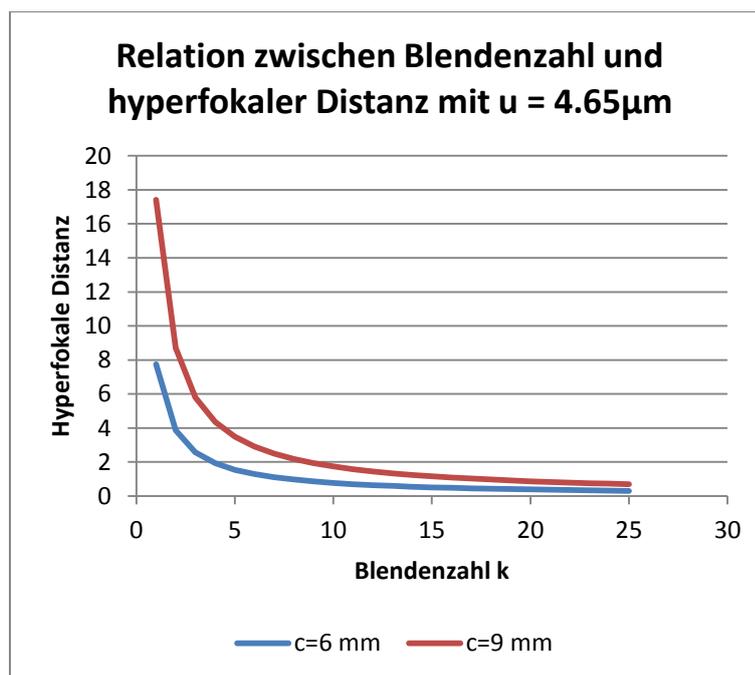


Abbildung 67: Relation zwischen Blendenzahl und hyperfokaler Distanz bei einer Tiefenschärfe von $u = 1 \text{ Pixel} = 4.65 \mu\text{m}$ für die Objektive des „Four Vision“-Kamerasystems

Das „Four Vision“-Kamerasystem verwendet fünf baugleiche Kameras mit zwei unterschiedlichen Objektivarten ($c=6 \text{ mm}$ und $c=9 \text{ mm}$). Nimmt man als Tiefenschärfe (u) die Größe eines Pixels an ($u=4.65 \mu\text{m}$), kann man nach (2.14) die hyperfokale Distanz, also die Gegenstandsweite, ab der die Schärfentiefe von der Vordertiefe bis unendlich reicht, der einzelnen Blendeneinstellungen berechnen (Abbildung 67). Für Blende 4 würde das Objektiv mit $c=6 \text{ mm}$ bei einer eingestellten Gegenstandsweite von 1.94 m den Bereich von 0.97 m bis unendlich scharf abbilden. Das Objektiv mit $c=9 \text{ mm}$ würde bei Blende 4 bei einer eingestellten Gegenstandsweite von 4.36 m den Bereich von 2.18 m bis unendlich scharf abbilden. So ist es möglich, die Kameras mit den Objektiven, die auf die hyperfokale

Distanz fokussiert sind, am Kalibrierstand der Professur für Geodäsie und Geoinformatik zu kalibrieren und unter Benutzung der Kalibrierwerte ohne weitere Veränderungen die Befliegung durchzuführen. Während der Kalibrierung muss dabei ein Mindestabstand von 2.18 m eingehalten werden.

Jedoch basiert die Kalibrierung der Kameras auf automatisch erkannten Targets (Abbildung 7). (LUHMANN, 2010) gibt hierzu an, dass für zentrische Zielmarken gegebenenfalls auch eine leichte Unschärfe tolerierbar ist. Der optische Schwerpunkt bleibt für digitale Bildmessungen erhalten. Somit könnte man auch dichter an den Kalibrierstand heran.

In Abbildung 68 ist die resultierende Schärfentiefe für unterschiedliche Gegenstandsweiten bei einer Tiefenschärfe von $u=4.65\ \mu\text{m}$ (1 Pixel) und der Blendenzahl 4 für beide Objektiven des „Four Vision“-Kamerasystems nach (2.13) dargestellt. Bei einer Gegenstandsweite von z.B. 1.5 m würde sich für das 6 mm-Objektiv eine Schärfentiefe von 5.73 m und für das 9 mm-Objektiv von 1.16 m ergeben. Vergrößert sich die Gegenstandsweite, nimmt auch die Schärfentiefe zu und nähert sich asymptotisch der hyperfokalen Distanz an. Die hyperfokale Distanz bildet hier eine mathematische Polstelle, da ihr Funktionswert unendlich groß ist.

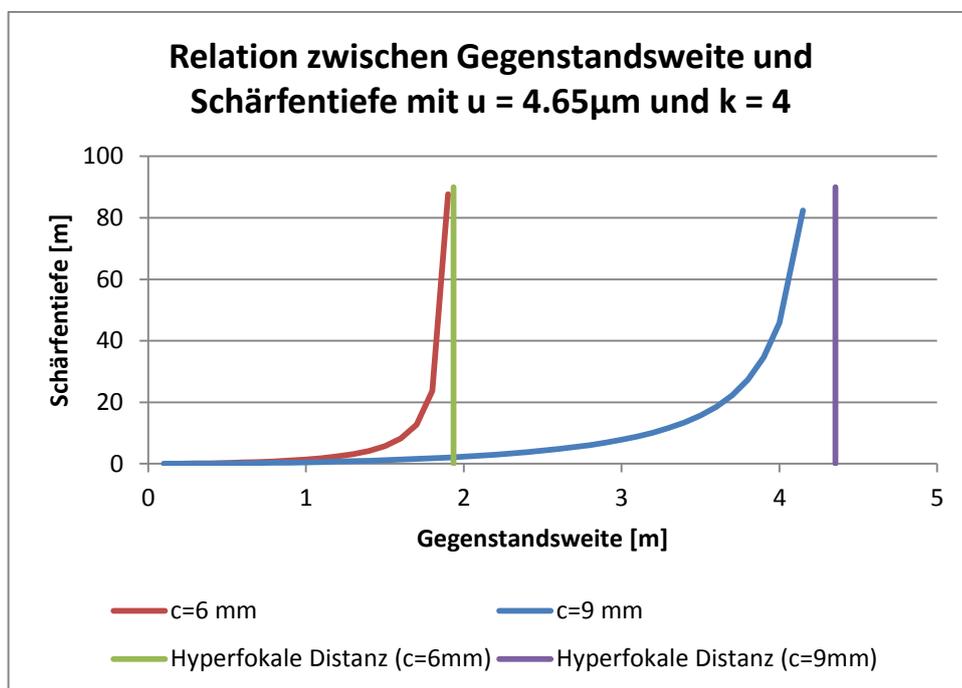


Abbildung 68: Relation zwischen Gegenstandsweite und Schärfentiefe bei einer Tiefenschärfe von $u = 1\ \text{Pixel} = 4.65\ \mu\text{m}$ und der Blendenzahl 4 für die Objektive des „Four Vision“-Kamerasystems

5.5 Softwarekomponenten

Wie im Kapitel der Kameramodelle erläutert (Kap. 5.3.2), müssen bestimmte Funktionen für die Industriekameras programmiert werden. Zu den Kameras wird ein SDK für die Programmiersprachen C, C++, C#, Visual Basic .NET und Delphi mitgeliefert. Zu den wichtigsten benötigten Funktionen zählen:

- Speicherung der Bilder (RAW-Format)
- Belichtungszeit automatisch berechnen
- Weißabgleich automatisch berechnen
- Protokollierung der Kameraeinstellungen und der Aufnahmen
- Synchrones Auslösen der Kameras
- Variable Intervallzeit zwischen den Aufnahmen

Als Entwicklungsumgebung wurde Visual C++ 2010 gewählt und direkt auf dem Kamerasystem installiert, um auf die Hardware während der Programmierungsphase zugreifen zu können. Die Software wurde kommandozeilenorientiert programmiert. Eine grafische Benutzeroberfläche wird nicht benötigt, da das Kamerasystem automatisch während des UAV-Betriebs laufen soll.

Voraussetzung der Bedienung des „Four Vision“-Kamerasystems ist eine Remoteverbindung. Ein Laptop wird mit einem LAN-Kabel in einem lokalen Netzwerk mit dem Kamerasystem verbunden. Nachdem das Kamerasystem eingeschaltet wurde, erkennt man anhand der LEDs an den Kameras (rot: keine Verbindung zur CPU; grün: Verbindung zur CPU), ab wann man sich Remote verbinden kann. Zum Start der Programme benötigt man die Eingabeaufforderung.

Das Softwarekonzept besteht im Aufruf einer Konfigurationsdatei als Parameter des Hauptprogrammes. Tabelle 12 enthält die Reihenfolge der Kameraparameter in dieser Datei. Die Bedeutung einzelner Parameter sind in Tabelle 8 erklärt. Es können verschiedene Konfigurationsdateien im Vorfeld erstellt und dann individuell benutzt werden.

Tabelle 12: Beispiel des Aufbaus einer Konfigurationsdatei

Zeile	Parameter	Bedeutung
1	1	synchron Auslösen (0-nein, 1-ja)
2	1	Aufnahmemodus (0-S/W, 1-RGB)
3	28000	Belichtungszeit (10-65535 μ Sek.)
4	0	GainRaw (0-100)
5	1600	GainBlueRaw (0-5000)
6	1600	GainRedRaw (0-5000)
7	0	BlackLevelRaw (0-255)
8	0	BalanceWhiteAuto (0-off, 1-Once, 2-Continuous)
9	0	ColorCorrection (Adjust RGB sensitivity of Sensor)
10	25	Durchläufe

Das Hauptprogramm „VirtualFG_ColorCam_v2.exe“ wurde aus einer Beispieldatei des SDK abgeleitet und erweitert. Bei jedem Start wird nach angeschlossenen Kameras gescannt und mit den ansprechbaren Kameras weitergearbeitet. **Das Scannen der Kameras und die interne Zuordnung einer Nummer geschehen zufällig. Die Kameras erhalten dadurch eine interne Nummer (Cam0, Cam1 etc.), die nicht mit der Gerätenummer übereinstimmt. In der Protokolldatei wird die Zuordnung hinterlegt.** Wird keine Kamera gefunden oder wird die Konfigurationsdatei nicht mit übergeben oder falsch angegeben, bricht das Programm mit einer entsprechenden Fehlermeldung ab. Wurden die Parameter in der Konfigurationsdatei erkannt und zugeordnet, werden die einzelnen Kameras anhand der Parameter neu konfiguriert und eine Schleife, in der die Bilder der gefundenen Kameras ausgelöst und gespeichert werden, so oft durchlaufen, wie es der Parameter ‚Durchläufe‘ angibt.

In der derzeitigen Konfiguration ist das Kamerasystem in der Lage, 5 RGB-Bilder (eins pro Kamera) in unter einer Sekunde auszulösen und zu speichern. Höhere Durchlaufgeschwindigkeiten lassen sich erzielen, wenn die Kameras im S/W-Modus arbeiten, also weniger Datenvolumen gespeichert werden muss, oder wenn nicht alle Kameras angeschlossen werden. Die Vorgabe, eine variable Intervallzeit zwischen den Bildern zu programmieren, wurde noch nicht implementiert. Wird das Programm gestartet, so werden nach der Initialisierungsphase die Durchläufe automatisch gestartet. Dementsprechend muss die Zeit der Startphase bei der Anzahl der Durchläufe berücksichtigt werden. Diese Lösung erscheint nicht besonders elegant, ist aber während der Entwicklungsphase sehr praktikabel.

Die Kameraeinstellungen werden vor und nach einem Parameterwechsel und Zwischenergebnisse mit Zeitstempel in eine Protokolldatei geschrieben, um z.B. die Bildpositionen rekonstruieren zu können. Die Protokolldatei ist eine Textdatei und hat standardmäßig den Namen „FourVision.prt“. Die Protokolldatei wird auch von zusätzlichen Hilfsprogrammen genutzt. Jedes Programm erweitert die Protokolldatei um Einträge. Dabei werden keine Einträge überschrieben oder gelöscht. Zu welchem Programm die Protokollergebnisse gehören, wird kenntlich gemacht. Die Protokolldatei sollte zusammen mit den Bildern gespeichert und analysiert werden, um Rückschlüsse auf die Metadaten der Bil-

der zu bekommen. Der Bilddateiname wird aus dem Zeitstempel bis in die Millisekunde und aus der internen Kameranummer (z.B. Cam1) abgeleitet und das Bild im verlustfreien TIF-Format gespeichert.

Das Hilfsprogramm „FN_get_ExPo_Gain_v2.exe“ bestimmt Belichtungszeit und Weißabgleich. Auch dieses Programm ist kommandozeilenorientiert und fordert einen die folgenden Parameter:

- 1 - Belichtungszeit im S/W Modus bestimmen
- 2 - nur Belichtungszeit im RGB Modus bestimmen
- 3 - nur Weißabgleich im RGB Modus bestimmen
- 4 - Belichtungszeit und Weißabgleich im RGB Modus bestimmen

Möchte man die Belichtungszeit und den Weißabgleich bestimmen, muss das Kamerasystem z.B. auf das Holzstativ des UAV im Fluggebiet gestellt und eine graue Unterlage im Sichtfeld der Kamera gelegt werden. Die Belichtungszeit wird iterativ und individuell für jede Kamera ermittelt und kann Werte zwischen 10 μ Sek ($\approx 1/100000$ Sek) und 65535 μ Sek ($\approx 1/15$ Sek) annehmen. Der verwendete Algorithmus bestimmt den Mittelwert zwischen maximalem und minimalem Wert der Belichtungszeit, nimmt mit dieser Belichtungszeit ein Bild auf und wertet die Helligkeitswerte der einzelnen Pixel aus.

Bei der Helligkeitsauswertung werden die Intensitätswerte (0-255) pro Kanal der einzelnen Pixel gemittelt. Danach werden die Mittelwerte der Kanäle zu einem Gesamtmittel zusammengefasst und mit einem Referenzwert verglichen. Alle Zwischenergebnisse werden in der Protokolldatei protokolliert. Der Referenzwert wurde empirisch durch verschiedene Versuche bestimmt und hat einen Wert von 150. Momentan muss dieser Wert noch im Quellcode verändert werden.

Sollte das Gesamtmittel gegenüber dem Referenzwert zu niedrig sein, so ist das Bild unterbelichtet. Als neuer minimaler Wert für die Belichtungszeit wird dann die aktuelle Belichtungszeit übergeben. Sollte das Gesamtmittel gegenüber dem Referenzwert zu hoch sein, so ist das Bild überbelichtet. Als neuer maximaler Wert für die Belichtungszeit wird dann die aktuelle Belichtungszeit übergeben. Wurde der minimale bzw. maximale Wert der Belichtungszeit neu gesetzt, beginnt die Schleife von vorn. Nach und nach wird die benötigte Belichtungszeit eingegrenzt, bis ein Wert erreicht wird, der Ergebnisse in einem Toleranzbereich (hier 2) um den Referenzwert erzeugt.

Die berechneten Belichtungszeiten der einzelnen Kameras werden sowohl auf dem Monitor ausgegeben als auch in die Protokolldatei eingetragen. Wegen der verschiedenen Blickrichtungen der Kameras können unterschiedliche Belichtungszeiten entstehen. Es macht wenig Sinn, jeder Kamera eine individuelle Belichtungszeit zu übergeben, da sich die Blickrichtungen während des Fluges ändern. Sie dienen dem Anwender lediglich als Orientierung für die endgültige Belichtungszeit, die in die Startkonfigurationsdatei eingetragen wird. Ändert sich während der Bestimmung der Belichtungszeit die äußere Helligkeit, muss die Routine neu gestartet werden, da der Algorithmus nicht mehr in Skalenbereiche springen kann, die außerhalb der minimalen und maximalen Belichtungswerte liegen.

Der Weißabgleich ist der einzige Wert der Kameras, der über die Funktion „ST_SetBalanceWhiteAuto“ automatisch angepasst werden kann. Diese Funktion kann abgeschaltet (Modus 0: off), während der Initialisierungszeit angeschaltet und danach automatisch abgeschaltet (Modus 1: once) oder dauerhaft angeschaltet werden (Modus 2: continuous). Der Weißabgleich wird über die Parameter GainBlueRaw und GainRedRaw durchgeführt, indem die blauen und roten Farbanteile im Bild verstärkt bzw. abgeschwächt werden. Der Wertebereich dieser Variablen reicht von 0 bis 3000. Die Anpassung kann einige Zeit in Anspruch nehmen.

Es kann nur schlecht abgeschätzt werden, wie lange der Weißabgleich dauert. Deshalb fragt das Programm „FN_get_ExPo_Gain_v2.exe“ im Modus 2 mit konstanter Belichtungszeit jede Sekunde die Werte des GainBlueRaw und des GainRedRaw ab und berechnet die Differenz während dieser Zeit. Während die Differenzen anfänglich in Abhängigkeit der Startwerte größer sind, werden sie mit der Zeit immer kleiner, bis sich schließlich die Werte gar nicht mehr ändern und die Differenzen minimiert sind. Es werden parallel alle gefundenen Kameras abgefragt und solange gewartet, bis sich alle Werte nur noch um die Differenz 1 ändern. Alle Zwischenergebnisse werden in die Protokolldatei

geschrieben. Dann schaltet das Programm die Kameras in den Modus 0, beendet die Routine und gibt die Werte auf dem Bildschirm und in die Protokolldatei aus. Es können Unterschiede zwischen den Kameras entstehen, wobei es sich auch hier nur um Orientierungswerte handelt, aus denen sich der Benutzer seine eigenen Werte ableiten kann und in die Startkonfigurationsdatei einträgt.

Zur allgemeinen Kontrolle der Einstellungen kann das Hauptprogramm nur mit einem Durchlauf gestartet werden. Die entstandenen Bilder können danach betrachtet und die Initialisierungsparameter in der Startkonfigurationsdatei nachjustiert werden.

5.6 Emittierendes Elektromagnetisches Feld

Nachdem das Kamerasystem gebaut wurde, sollten Testflüge durchgeführt werden. Vor dem Start des UAV muss eine Weile (ca. 1 min) gewartet werden, bis der GNSS-Receiver eine für die Befliegung genaue Position berechnet hat. Die MD4-1000 gibt über hörbare Tonsignale mit größer werdenden Folgezeiten an, dass die Positionsqualität zunimmt. Ist die nötige Genauigkeit erreicht, gibt die MD4-1000 andere Töne von sich. Zudem kann über die Basisstation die absolute Positionsgenauigkeit sowie die Anzahl der empfangenen Satelliten abgelesen werden (Abbildung 69). Für einen sicheren Flug benötigt die MD4-1000 eine absolute Positionsgenauigkeit von ca. 2.5 m.



Abbildung 69: Anzeige „mdCockpit“ absolute GNSS-Genauigkeit in [m] und Anzahl der empfangenen Satelliten

Die Genauigkeit der GNSS-Position hängt u.a. von folgenden Einflussfaktoren ab:

- Anzahl der empfangenen Satelliten (mind. 4)
- Stand der Satelliten am Himmel, horizontnähe wegen Refraktion problematisch
- Verteilung der Satelliten am Himmel, DOP-Wert (Dilution of Precision), wünschenswert ist eine gleichmäßige Verteilung im kompletten azimuthalen Bereich und im Elevationsbereich zwischen 15° und 90°
- Himmelsabschirmungen in der Nähe des GNSS-Receivers, z.B. Gebäude, Bäume
- Multipatheffekte, mehrfache Reflexion des Satellitensignal z.B. an Häuserwänden
- Ausrichtung des UAV und somit der GNSS-Antenne, UAV schirmt sich bei starken Schwan- kungen selbst ab und kann dadurch Satellitenverbindungen verlieren

Mit eingeschaltetem Kamerasystem wurde eine stark schwankende absolute Genauigkeit der GNSS-Position (ca. 3-4 m) sowie eine Verringerung der Anzahl der empfangenen Satelliten beobachtet. Wurde hingegen das Kamerasystem von der Stromquelle getrennt, stabilisierte sich die Genauigkeit an der gleichen Position auf ca. 2.5 m und die Anzahl der Satelliten stieg wieder. Dieses Experiment wurde mehrfach wiederholt, um sicher zu sein, dass die Beobachtungen unabhängig von GNSS-Einflussfaktoren sind.

Grund ist ein vom Kamerasystem emittierendes elektromagnetisches Feld (EM-Feld). Da das emittierende EM-Feld zu stark für eine genaue GNSS-Messung ist, kann das UAV alle Funktionen, die mit dem GNSS-System verbunden sind, nicht ordnungsgemäß ausführen. Somit entsteht ein Sicherheitsproblem. Man sollte so nicht in Verbindung mit dem Autopilotsystem fliegen. Um das Kamerasystem dennoch einsetzen zu können, müssen entsprechende Gegenmaßnahmen durchgeführt werden.

Elektromagnetische Felder entstehen durch elektrischen Strom. Überall dort, wo Strom fließt, der sich in seiner Stärke oder Polarität ändert, werden elektrische Ladungen bewegt und erzeugen elek-

tromagnetische Felder³¹. Der Elektromagnetismus wird durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben³². Sie besagen, dass jede zeitliche Änderung des elektrischen Feldes stets mit einer räumlichen Änderung des magnetischen Feldes verknüpft ist. Ebenso ist wiederum jede zeitliche Änderung des magnetischen Feldes mit einer räumlichen Änderung des elektrischen Feldes verknüpft. Für periodisch (insbesondere sinusförmig) wechselnde Felder ergeben diese Effekte zusammen eine sich im Raum ausbreitende elektromagnetische Welle (BSI, 2008).

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der elektrischen und der magnetischen Komponente werden Nah- und Fernfeldbereiche unterteilt. Im Nahfeldbereich ist z.B. der Magnetismus stärker ausgeprägt. Deshalb werden hier Spulen zur Induktion verwendet, um Energie oder Informationen zu übertragen (near field communication (NFC)). Beispiele finden sich in der Handytechnik oder bei der Mensakarte (elektronisches Bezahlsystem). Im Fernfeld ist die induktive Komponente kaum vorhanden. Hier ist eher das elektrische Feld ausgeprägt und wird zur Funkübertragung genutzt.

Hat man eine elektrische Leitung, auf die man ein hochfrequentes Signal gibt, wie es in jedem kleinen Prozessor und in jedem kleinen elektronischen Bauelement der Fall ist, dann entstehen elektromagnetische Wellen.

Das „Four Vision“-Kamerasystem führt zu einem Nahfeldproblem, da das UAV wie auch das Kamerasystem komplexe Multisensorplattformen sind. Eine Reihe von empfindlichen Bauteilen, wie z.B. das Magnetometer, die Inertial Measurement Unit, die GNSS-Antenne, der Stromkonverter, die CPU etc. arbeiten auf einem relativ engen Raum. Diese Enge kann dazu führen, dass sich die Bauteile untereinander beeinflussen. Man kann im Nahfeld nur schwer sagen, ob die elektrische oder die magnetische Feldkomponente stört. Bei abgeschirmten Geräten müssen die einzelnen Chips gekapselt werden (Faraday'scher Käfig), damit dort die elektromagnetischen Wellen abgefangen werden. Bspw. benutzt das Militär abgeschirmte Elektronik, um Rückschlüsse über Positionen nicht zu ermöglichen.

Bauteile aus dem Konsumerbereich sind i.d.R. nicht abgeschirmt und auf verschiedenen Potentialen aufgebaut, z.B. Computer. Das ist im Endeffekt aber auch nicht schlimm, weil meist eine umhüllende Abschirmung existiert, z.B. das Computergehäuse, das auf Masse (Potential) verbunden ist und somit alle EM-Feldstrahlung abschirmt. Außerdem taucht die Abschirmungsproblematik im Konsumerbereich so eigentlich gar nicht auf, da die meisten anderen Signale (außer GNSS oder SatellitenTV) so stark sind, dass sie nicht beeinflusst werden. Die Streustrahlung der Geräte ist im Vergleich meist schwächer.

Auf dem Campus der Universität wurden verschiedene Versuche unter freiem Himmel für einen ungehinderten GNSS-Empfang durchgeführt, um zu sehen, in welcher Art und Weise die Störungen auftreten und welche Gegenmaßnahmen durchgeführt werden können. Die MD4-1000 wurde dafür auf ein ca. 60 cm hohes Holzstativ gestellt und mittels der Bodenstation in einiger Entfernung überwacht. Das Kamerasystem befand sich an der vorgesehenen Position unterhalb des Zentrums der MD4-1000 und konnte ein und ausgeschaltet werden, indem es an die Stromquelle angeschlossen oder von ihr getrennt wurde. Als CPU wurde das Pico-ITX-Board mit 1.6 GHz bei den ersten Versuchen verwendet.

Die Untersuchungen am 26.04.2013 zeigen den störenden Einfluss des Kamerasystems ganz deutlich. Bevor das Kamerasystem eingeschaltet wurde, wurde die MD4-1000 samt Bodenstation eingeschaltet und die GNSS-Genauigkeit mit ca. 2.5 m bei 9 empfangenen Satelliten angezeigt (Normalfall). Wurde das Kamerasystem eingeschaltet, verschlechterte sich die GNSS-Genauigkeit auf 4.2-4.5 m. Gegenproben zeigten im Anschluss, dass sich die GNSS-Genauigkeit wieder auf normale Werte stabilisiert, wenn das Kamerasystem von der Stromquelle getrennt wurde. Die Versuche zeigten, dass dieser Effekt auch mit elektronisch komplett entkoppeltem Kamerasystem (externe Stromversorgung, ohne RS232 Anschluss) auftrat.

Erste Abschirmungsversuche mit Alufolie zwischen Kamerasystem und MD4-1000 brachten GNSS-Genauigkeiten von 3.4 m. Zudem wurde Aluminiumfolie direkt im Deckel vor dem Receiver

³¹ <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/electromagnetic-field-EMF-Elektromagnetisches-Feld.html>

³² <http://de.wikipedia.org/wiki/Maxwell-Gleichungen>

geklebt. Die Genauigkeit schwankte dabei zwischen 3.1 und 4.2 m. Um zu schauen, welche Bauelemente für diese Störungen verantwortlich waren, wurden die Versuche auf das Dach des Universitätsgebäudes verlegt. Die Kameras, der Controller und der Stromkonverter konnten durch entsprechende Kombinationen und Verbindungen als Störquellen ausgeschlossen werden. Zudem wurden Abstandsveränderungen von 20 cm (Normalfall) bis 40 cm vorgenommen. Dabei blieb die GNSS-Genauigkeit relativ konstant zwischen 3.0 und 4.0 m. Demzufolge muss das EM-Feld im Nahbereich sehr stark sein.

Nachdem der Einfluss des Kamerasystems auf das Genauigkeitsverhalten der GNSS-Position nachgewiesen wurde, wurden in Zusammenarbeit mit dem IEF/Institut für Gerätesysteme und Schaltungstechnik der Universität Rostock spektrale EM-Feld-Analysen vorgenommen. Zum Einsatz kam der Spektrumanalysator RSA 6100A der Firma Tektronix. Mit Hilfe von Fouriertransformation wird ein Frequenz-Feldstärke-Diagramm für einen Frequenzbereich (Span) angezeigt. Die Besonderheit dieses Gerätes bestand in einer über den Frequenzbereich von 100MHz real-time-fähigen Überwachung des Spektralbereichs. Normale Spektrometer tasten die Frequenzen im Frequenzbereich nacheinander ab, wozu eine gewisse Zeit (Sweep-Time) benötigt wird. Dabei kann es passieren, dass zeitlich kürzere Signale nicht erkannt werden, da das Gerät gerade auf anderen Frequenzen abtastet. Das RSA 6100A unterliegt durch die Real-Time-Fähigkeit nicht diesem Fehlereinfluss. Somit werden auch kürzeste Signale registriert. Der Spanbereich kann auch erhöht werden, jedoch verliert das Gerät dabei die real-time-Fähigkeit und arbeitet wie ein normales Spektrometer.

Sollten innerhalb des überwachten Span in der Nähe befindliche elektromagnetische Sender etwas senden, so werden an entsprechenden Frequenzpositionen Ausschläge (Peaks) dargestellt. Über die Höhe des Peaks lässt sich die Stärke des Signals am Immissionsort feststellen. So können z.B. Untersuchungen über Handyabstrahlungen vorgenommen werden.

Zudem verfügt das Spektrometer über auswechselbare, via Kabel verbundene Sondenköpfe, mit denen einzelne Bauteile untersucht werden können. Abbildung 70 zeigt einen Screenshot während der Messung. Das farbliche Rauschen stellt die Frequenzdichte (Dichte der einzelnen Spektren) dar. Viele Frequenzen überlagern sich hier. Dabei gibt es Bereiche, wo die Frequenzen besonders dicht beieinander liegen (meist mittig, hier grün) und Bereiche (meist Randlage, hier blau), wo sich weniger Frequenzen überlagern, also wo die Dichte nicht so hoch ist. Eine bestimmte Sendefrequenz wird als Peak dargestellt und zieht sich farblich durch das Grundrauschen.

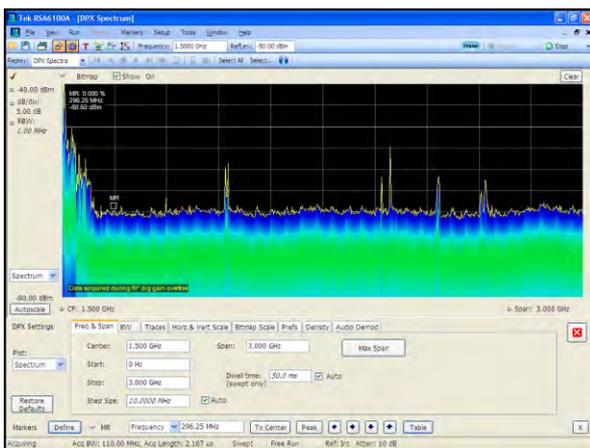


Abbildung 70: Anzeige Spektrumanalysator RSA 6100A ohne Einfluss des Kamerasystems

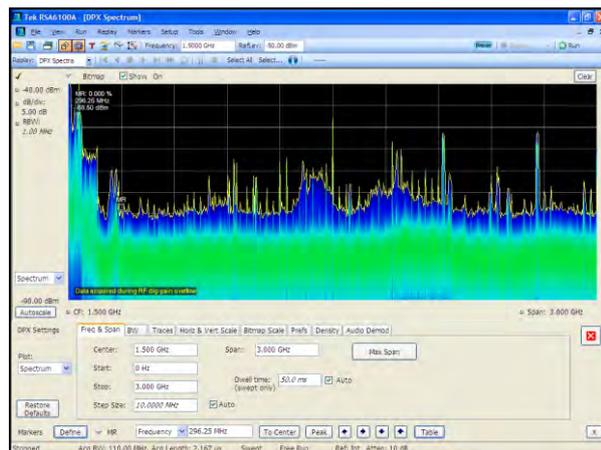


Abbildung 71: Anzeige Spektrumanalysator RSA 6100A mit Einfluss des Kamerasystems

Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen das Verhalten des EM-Feldes im Nahbereich über einen Frequenzbereich von 1 GHz bis 3 GHz an, bevor und nachdem das Kamerasystem eingeschaltet wurde. Man erkennt deutlich, dass das Kamerasystem auf vielen unterschiedlichen Frequenzen ein EM-Feld emittiert u.a. auch bei 1575 MHz. Das GNSS-System sendet auf den Frequenzen L1 (1575.42 MHz) und L2 (1227.60 MHz) (TORGE, 2008). Auf diesen Trägerfrequenzen sind unterschiedliche

Nachrichten moduliert. Der GNSS-Empfänger an der MD4-1000 berechnet die Position mit Hilfe der Daten der L1-Frequenz. Da eine Störfrequenz sehr dicht bei der L1-Frequenz liegt, kann es zu Interferenzen kommen, die sich negativ auf die GNSS-Positionsgenauigkeit auswirken. Jedoch können auch die anderen Frequenzen störend wirken.

Aus diesem Grund wurden komplexere Abschirmungen gebaut und am 30.04.2013 wieder auf dem Dach der Universität ausprobiert. Als umhüllender Körper um das Mainboard wurde ein Tetra Pak Karton benutzt und mit Aluminiumfolie eingewickelt. Dabei entstanden Genauigkeiten zwischen 3.1 und 12.4 m. Diese Abschirmung wurde nicht auf Masse verbunden und hatte somit keinen Potentialanschluss an das Kamerasystem. Eine vielversprechendere Methode war die Abschirmung des Verbindungskabels zwischen GNSS-Receiver und MD4-1000 mit Aluminiumfolie. Zudem wurden mehrere Lagen Aluminiumfolie in den Deckel der Drohne eingelegt. Es konnte eine GNSS-Genauigkeit von 2.5 m bei laufendem Kamerasystem mit Strom vom Bordnetz bei 11 Satelliten erreicht werden. Jedoch ist es nicht gelungen, diese Ergebnisse in gleicher Art und Weise zu reproduzieren.

Am 04.05.2013 wurden weitere Versuche mit einer noch stärkeren Abschirmung vorgenommen. Dazu wurde der in Aluminiumfolie eingepackte Tetra Pak zusätzlich mit zweilagiger Kupferfolie ummantelt und ein aufgetrennter Tetra Pak-Karton (40 cm x 40 cm) zwischen MD4-1000 und Kamerasystem platziert. Anfänglich konnten Genauigkeiten von 2.9-3.9 m bei 7-10 Satelliten erreicht werden. Nach einiger Zeit (ca. 12 min) stabilisierte sich die Genauigkeit sogar bei 2.4 m bei 11 Satelliten. Das zeigte, dass während des Bootvorgangs des Kamerasystems besonders viele EM-Feldstörungen stattfinden. Der Tetra Pak-Karton wurde weiterhin mit Kupferfolie beklebt, worauf hin sich die GNSS-Genauigkeit wieder auf 3.6 m verschlechterte. Erst bei einem Abstand von ca. 70 cm wurde das GNSS-Signal mit der Abschirmung nicht mehr gestört.

Da davon ausgegangen wurde, dass die Taktfrequenz der CPU für das EM-Feld im Frequenzbereich der GNSS-Signale verantwortlich sei, wurde eine andere CPU mit einem Dual-Core-Prozessor mit 1 GHz benutzt.

Die Untersuchungen vom 03.06.2013 zeigten, dass mit diesem Board weitaus bessere GNSS-Genauigkeiten zu erreichen sind. Dazu wurde lediglich das Verbindungskabel zwischen Receiver und MD4-1000 mit Kupferfolie ummantelt und der Receiver im Deckel mit extra Kupferfolie beklebt. Erste Tests mit einem Abstand von 70 cm brachten zwar Genauigkeiten von 3.0-3.7 m, jedoch konnten für den Normalfall (Abstand ca. 20 cm) Genauigkeiten von 2.8-3.5 m erreicht werden, die sich bei etwa 2.8 m stabilisierten. Selbst während des Bootvorgangs wurden Genauigkeiten von 2.9-3.3 m beobachtet. Beim nochmaligen Anschalten wurden Genauigkeiten von 3.1-3.7 m erreicht. Damit hat die neue CPU einen positiven Effekt. Starke Schwankungen, wie bei der ersten CPU, wurden nicht beobachtet. Dennoch reicht diese Genauigkeit zum Fliegen nicht aus.

Schließlich wurde der GNSS-Empfänger an der MD4-1000 in Folge eines Hardware-Upgrades durch eine neuere Version (μ Blox6) ausgetauscht. Der neue Empfänger verfügt über bessere Filter, um noch aus stark verrauschten Daten Informationen zu extrahieren. Im Zusammenspiel mit einer zusätzlichen Abschirmung aus Tetra Pak-Karton und Kupferfolie, die sowohl CPU, SSD und Stromkonverter umhüllte, konnte eine absolute GNSS-Positionsgenauigkeit von 2 - 2.5 m bei eingeschaltetem Kamerasystem erreicht werden. Ohne Kamerasystem erzielt dieser Receiver eine vergleichbare Genauigkeit von 0.9 m. Befliegungen waren somit mit dem Autopilotensystem möglich und wurden auch sicher durchgeführt.

Weitere Maßnahmen gegen das EM-Feld, die aber nicht weiter verbaut wurden, stellen abgeschirmte Verbindungskabel dar, die nicht nur eine Abschirmung von außen nach innen sondern auch von innen nach außen bieten. Zudem sollte die Kupferoberfläche mit dem Massepotential verbunden werden. Ohne Anschluss gibt es zwar auch einen Abschirmeffekt, jedoch wird das Potential dann aus der Luft gegriffen und kann u.U. verstärkend wirken.

6 Photogrammetrische Eigenschaften des „Four Vision“-Kamerasystems

6.1 Einführung

Das „Four Vision“-Kamerasystem besteht aus fünf voneinander unabhängigen Kameras, die über einen zentralen Computer gesteuert werden. Auch wenn die verwendeten Kameras und Objektive jeweils gleichen Typs sind, unterscheiden sie sich produktionsbedingt geringfügig. Wichtige Fragen diesbezüglich lauten: Inwieweit unterscheiden sich die Kameras und Objektive jeweils voneinander? Liegen diese Unterschiede unterhalb einer bestimmten Schwelle und können damit vereinheitlicht werden oder müssen die Kameras als eigenständig mit individuellen Korrekturparametern betrachtet werden? Inwieweit sind die einzelnen Parameter stabil?

(LUHMANN, 2010) benennt die wichtigsten Abbildungsfehler. Zu den geometrischen Abbildungsfehlern zählen u.a. die radialsymmetrische, die radialasymmetrische bzw. tangentielle, die tonnenförmige und die kissenförmige Verzeichnung, die Affinität und Scherung, die entfernungsabhängige Verzeichnung und das geometrische Auflösungsvermögen. Weitere Fehlereinflüsse sind bei der Kontrast- oder Modulationsübertragung, der chromatischen Aberration, der sphärischen Aberration, dem Astigmatismus, der Bildwölbung und dem Koma zu finden.

Die folgenden Abschnitte gehen auf die wichtigsten Eigenschaften der Kameras und der Objektive ein. Die Ergebnisse bezüglich des „Four Vision“-Kamerasystems wurden größtenteils in (GRENZDÖRFFER ET AL., 2012), (NIEMEYER ET AL., 2013a) und (NIEMEYER ET AL., 2013b) untersucht und publiziert.

6.2 Geometrische Eigenschaften

6.2.1 Einheitlichkeit baugleicher Komponenten

„Die Parameter der inneren Orientierung einer Aufnahmekamera beschreiben das geometrische Kameramodell. [...] Die räumliche Lage des Projektionszentrums in einem kamerafesten Bezugssystem (Bildkoordinatensystem) sowie Abweichungen von der idealen zentralperspektiven Abbildung (Abbildungsfehler) werden durch die innere Orientierung beschrieben. [...] Die Parameter der inneren Orientierung müssen daher durch Kalibrierung für jedes Aufnahmesystem individuell ermittelt werden.“ (LUHMANN, 2010)

Die Parameter der inneren Orientierung werden durch Kalibrierung bestimmt und hängen von der jeweiligen Fokussierungs- und Blendeneinstellung ab. Als Kalibrierungsplattform wurde das Programm „Australis“ und der Kalibrierstand der Professur für Geodäsie und Geoinformatik genutzt.

Untersucht wurde zum einen die Bildhauptpunktlage aller fünf Kameras in Kombination mit einem Objektiv (Abbildung 72) und zum anderen die radialsymmetrische Verzeichnung aller fünf Objektive in Kombination mit der gleichen Kameraeinheit (Abbildung 73). Es wurden 20-22 Aufnahmen für jede Kamera-Objektiv-Kombination in Richtung des Kalibrierhintergrunds des Versuchsstands so ausgelöst, dass so viele Marken wie möglich aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen wurden. Die retroreflektierenden Marken wurden mit einer Ringbeleuchtung, die hinter dem Objektiv angebracht war, angestrahlt. Die Belichtungszeit der Kamera wurde so weit verkürzt, dass ein stark unterbelichtetes Bild mit weiß-grauen Punkten (reflektierende Flächen der Marken) abgebildet wurde. Die Fokussierung wurde den Gegebenheiten vor Ort angepasst und Blende 4 einheitlich ausgewählt. Für jede Kamera-Objektiv-Kombination wurden die Brennweite (c), die Koordinaten der Bildhauptpunktlage (x_p , y_p), drei Koeffizienten (K_1 , K_2 , K_3) für die radialsymmetrische Verzeichnung sowie zwei Koeffizienten der tangentialen Verzeichnung (P_1 , P_2) bestimmt.

Abbildung 72 zeigt die Bildhauptpunktlagen der einzelnen Kameraeinheiten in Verbindung mit demselben Objektiv. Die Bildhauptpunktlage variiert dabei sehr stark ($\max = 388 \mu\text{m} = 83 \text{ Pixel}$). Gründe hierfür sind z.B. im Produktionsprozess der Kameras zu suchen. Zum einen kann der Sensor

unterschiedlich platziert worden sein und zum anderen könnte die Sensorebene nicht 100%ig rechtwinklig zur Blickrichtung liegen. Die Brennweiten variierten dabei im Bereich von $c_{\min} = 9.2141$ mm bis $c_{\max} = 9.2321$ mm (Differenz: 0.018 mm \rightarrow 3.9 Pixel).

Abbildung 73 zeigt die radialsymmetrische Verzeichnung aller fünf Objektive mit derselben Kameraeinheit. Die Verzeichnungskurven der Objektive mit 9 mm Brennweite sind sehr ähnlich. Das Objektiv mit 6 mm Brennweite hat eine stärker gekrümmte Verzeichnungskurve als die 9 mm Objektive.

Die Brennweite für das 6 mm-Objektiv betrug 6.1358 mm und die Brennweiten für die 9 mm-Objektive variierten im Bereich von $c_{\min} = 9.2296$ mm bis $c_{\max} = 9.2676$ mm (Differenz: 0.038 mm \rightarrow 8.1 Pixel).

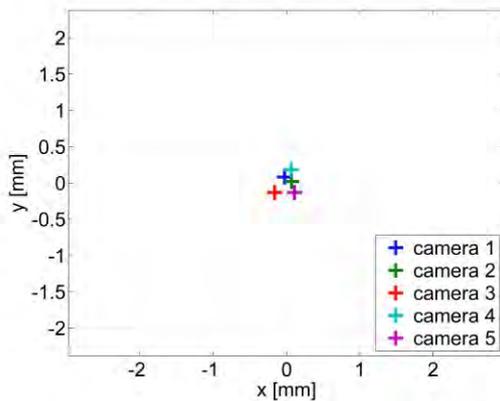


Abbildung 72: Bildhauptpunktlage für ein Objektiv und fünf Kameras

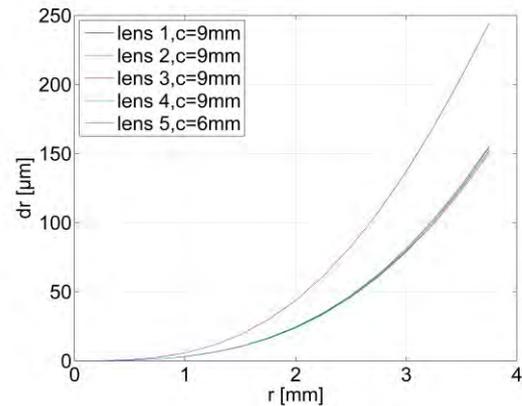


Abbildung 73: Radialsymmetrische Verzeichnung für eine Kamera und fünf Objektive

Aus diesen Ergebnissen muss geschlussfolgert werden, dass eine Vereinheitlichung der Parameter der inneren Orientierung keineswegs für die baugleichen Objektive oder Kameraeinheiten vorgenommen werden darf. Vielmehr muss jede Kamera-Objektiv-Kombination individuell kalibriert werden.

6.2.2 Parameterstabilität der inneren Orientierung

Da das „Four Vision“-Kamerasystem während des Einsatzes unterschiedlichen Einflüssen unterworfen ist, besteht die Frage, inwieweit die inneren Orientierungsparameter der Kameras stabil genug sind. Können die Werte der Laborkalibrierung im Einsatz genutzt werden oder sind die Schwankungsbreiten zu stark?

Um diese Fragen zu beantworten, wurden exemplarisch die inneren Orientierungsparameter einer Kamera-Objektiv-Kombination (9 mm-Objektiv, MV-CS27U_5) unter verschiedenen Einflüssen mit Hilfe des Kalibrierstands und der Software „Australis“ bestimmt.

Der erste Versuch soll den Einfluss der Blende zeigen, da diese am Objektiv mechanisch stufenlos und später im Einsatz ein wenig schwierig einzustellen und zu arretieren ist. Dazu wurde vor jeder Kalibrierung die Blende verstellt und wieder neu eingestellt. Beim zweiten Versuch wurde das Objektiv von der Kamera getrennt und wieder anmontiert, da es in der Entwicklungsphase aber auch später im Einsatz durchaus zu baulichen Veränderungen kommen kann. Beim dritten Versuch stand der Einfluss der Temperatur im Fokus, da das Kamerasystem in der Realität diesen Einflüssen unterworfen sein wird. Dazu wurde für die Kalibrierungen 1 und 6 die Kamera auf der Heizung erhitzt. In den Kalibrierungen 2 und 5 wurde die Kamera untersucht, nachdem sie sich auf Raumtemperatur abgekühlt hatte. In den Kalibrierungen 3 und 4 wurde die Kamera bei normaler Betriebstemperatur kalibriert. Weitere Versuche waren unnötig, da bereits mit den drei Versuchen gezeigt werden konnte, dass die inneren Orientierungsparameter nicht stabil genug sind.

Es wurde jeweils die Brennweite (c), die Koordinaten der Bildhauptpunktlage (x_p , y_p), drei Koeffizienten (K_1 , K_2 , K_3) für die radialsymmetrische Verzeichnung und zwei Koeffizienten der tangentialen Verzeichnung (P_1 , P_2) mit „Australis“ berechnet. Die drei Versuche wurden mit jeweils 6 Kalibrierun-

gen (a 15 Bilder) durchgeführt. Hierfür wurden immer wieder drei gleiche Kamerastandpunkte pro Kalibrierung (a 5 Bilder) unterhalb der Kalibriervorrichtung gewählt.

Abbildung 74 zeigt die von „Australis“ berechneten Brennweiten und deren Standardabweichungen aller 18 Kalibriervorgänge. Dabei haben die Brennweiten im ersten Versuch bei den Kalibrierungen 1 und 6 relativ hohe Standardabweichungen im Vergleich zu den anderen Werten (± 0.008 mm und ± 0.010 mm). Eine mögliche Ursache ist bei den abgebildeten Marken zu suchen. Es ist wichtig, wie in Kap. 2.8.1 beschrieben, eine ausreichende Anzahl von Marken pro Bild abzubilden. Je mehr Marken abgebildet werden, desto sicherer wird das Ergebnis. Zwar wurden die Kameras immer wieder an den gleichen Positionen platziert, jedoch kann die Ausrichtung der Kameras leicht unterschiedlich sein. Außerdem deaktiviert „Australis“ unterrepräsentierte Marken oder Marken mit größeren Fehlern und minimiert so die Anzahl. Jedoch wurden die einzelnen Brennweiten mit einer ausreichenden Qualität berechnet.

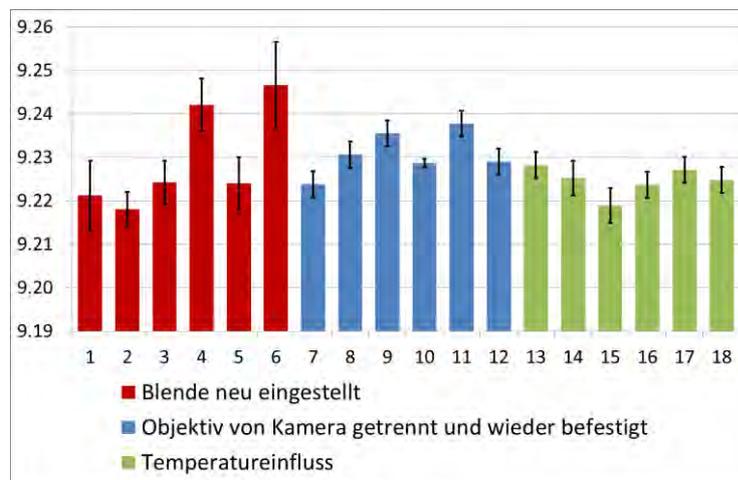


Abbildung 74: Brennweiten mit Standardabweichung in [mm]

Tabelle 13: Mittlere Brennweite für jeden Versuch und deren mittlerer Fehler sowie die maximalen und minimalen Werte der Testreihen und ihre Differenzen (je 1.Zeile [mm], je 2.Zeile [Pixel])

Versuch	Brennweiten				
	Mittelwert	σ	Max.	Min.	Differenz
Blende	9.2294	± 0.0119	9.2466	9.2180	0.0286
	1984.8	± 2.6	1988.5	1982.4	6.2
Objektiv ab/an	9.2309	± 0.0050	9.2377	9.2238	0.0139
	1985.1	± 1.1	1986.6	1983.6	3.0
Temperatur	9.2247	± 0.0033	9.2282	9.2189	0.0093
	1983.8	± 0.7	1984.6	1982.6	2.0

Die berechneten Mittelwerte der Brennweiten sowie deren mittlere Fehler, maximale und minimale Werte und die Differenzen sind in Tabelle 13 gesammelt. In der jeweils ersten Zeile sind die Werte in [mm] und in der jeweils zweiten Zeile in [Pixel] berechnet.

Die gemittelten Brennweiten aus Tabelle 13 unterscheiden sich um maximal 0.0062 mm ≈ 1.3 Pixel (Versuch2-Versuch3). Jedoch ist die Schwankungsbreite innerhalb der Messreihen größer. Die größten Schwankungen sind im ersten Versuch mit einem mittleren Fehler von ± 0.0119 mm (± 2.6 Pixel) bei einer maximalen Differenz von 0.0286 mm (6.2 Pixel) zu finden. Dem folgt der zweite Versuch mit einem mittleren Fehler von ± 0.0050 mm (± 1.1 Pixel) mit einer maximalen Differenz in den Messwerten von 0.0139 mm (3.0 Pixel). Der letzte Versuch hatte lediglich einen mittleren Fehler von ± 0.0030 mm (± 0.7 Pixel) bei einer maximalen Differenz von 0.0093 mm (2.0 Pixel).

Abbildung 75 skizziert die Positionen der Bildhauptpunkte. Die einzelnen Versuche sind hier, ähnlich wie in Abbildung 74, farblich unterschieden dargestellt. Das blaue Grundraster zeigt die einzelnen Sensorzellen ($4.65 \times 4.65 \mu\text{m}^2$) im richtigen Maßstab.

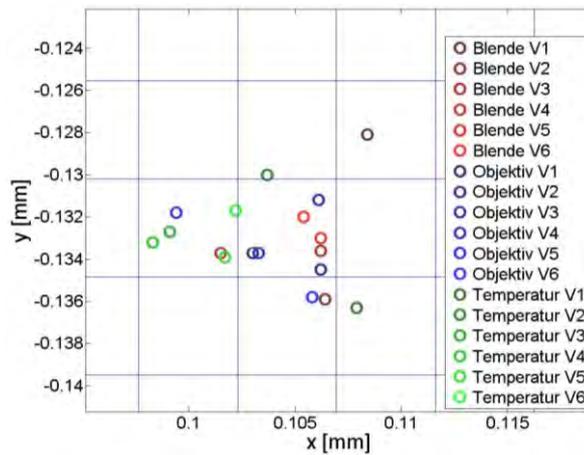


Abbildung 75: Bildhauptpunktlage [mm], 1 Kästchen entspricht einem Pixel

Es stellt sich die Frage, ob es einen Zusammenhang zwischen den Abweichungen der Brennweiten und den Abweichungen der Bildhauptpunktlagen gibt. Hierfür wurden in Excel die Korrelationskoeffizienten der Datenreihe der Brennweite jeweils in Verbindung mit den Datenreihen von x_p und y_p berechnet. Für die Beziehung zwischen Brennweiten und x -Werten ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von -0.21 und für die Beziehung zwischen Brennweiten und y -Werten von 0.07 . Da diese Werte sehr klein sind, kann davon ausgegangen werden, dass lediglich eine schwache bis gar keine Korrelation vorliegt. Es sei angemerkt, dass der Stichprobenumfang hier lediglich 18 Wertepaare umfasste.

An dieser Stelle kann man schlussfolgern, dass die wiederholende Blendeneinstellung den größten Einfluss ausübt. Die Montage des Objektivs hat nach den ermittelten Werten einen etwa halb so großen Einfluss. Die Temperaturschwankungen hatten den geringsten Einfluss.

Anhand kleiner Überschlagsrechnungen soll der Einfluss verdeutlicht werden. Abbildung 76 skizziert den Zusammenhang zwischen einer variierenden Brennweite und der resultierenden Verschiebung am Boden. Dabei ist zu erkennen, dass sich eine variierende Brennweite besonders auf den Bildbereich auswirkt, der am weitesten vom Bildhauptpunkt entfernt ist. Für die Überschlagsrechnungen wird die Variable d als Abstand zwischen Bildmitte (annähernd Bildhauptpunkt) und äußerer Ecke angenommen und ergibt nach (6.1) eine Entfernung von 3.811 mm bzw. 819.6 Pixel . Der Parameter c_1 repräsentiert entweder die mittlere Brennweite minus der Standardabweichung oder die minimale Brennweite bei Differenzen. Analog dazu repräsentiert c_2 entweder die mittlere Brennweite plus der Standardabweichung oder die maximale Brennweite bei Differenzen. Weiterhin wird angenommen, dass die Variation der Brennweite so gering ist, dass sie bei der Höhenbestimmung des Projektionszentrums keine Rolle spielt.

$$d = \left(\frac{\sqrt{1280^2 \cdot 1024^2}}{2} \right) \cdot 4.65 \mu\text{m} \quad (6.1)$$

Abbildung 77 zeigt, wie sich die Variation der Brennweite auf die Sensorebene auswirkt. Abbildung 78 erläutert den Zusammenhang, wie sich eine Verschiebung in der Sensorebene auf eine orthogonale ebene Oberfläche in einer bestimmten Höhe äußert. Da die Bildhauptpunktlage nahe dem Sensorzentrum liegt, können die Auswirkungen nach (6.6) einfach berechnet werden. Alle Modelle enthalten einfache mathematische Sachverhalte (meist Dreisatz) die folgend erläutert werden.

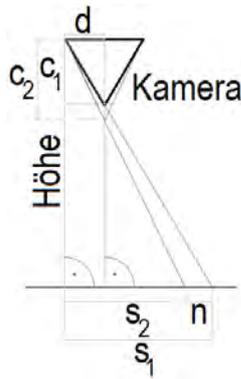


Abbildung 76: Verschiebung der Aufnahmegeometrie auf Oberfläche bei veränderter Brennweite

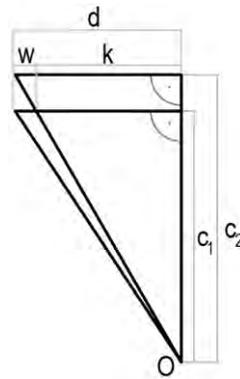


Abbildung 77: Verschiebung der Aufnahmegeometrie in Bildebene bei veränderter Brennweite

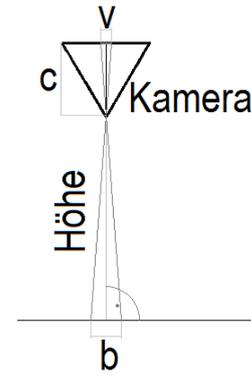


Abbildung 78: Strahlenverhältnisse zwischen Kamera und Boden

Die Gleichungen (6.2), (6.3) und (6.4) beinhalten das funktionale Modell zu Abbildung 76 und berechnen den Versatz ,n‘ an einer orthogonalen ebenen Oberfläche (z.B. am Boden) in einer vorgegebenen Entfernung (z.B. bestimmte Höhe).

$$s_1 = \frac{\text{Höhe} \cdot d}{c_1} \quad (6.2)$$

$$s_2 = \frac{\text{Höhe} \cdot d}{c_2} \quad (6.3)$$

$$n = s_1 - s_2 \quad (6.4)$$

Tabelle 14: Gegenüberstellung der Auswirkungen der Brennweitenabweichungen an einer orthogonalen ebenen Oberfläche für ausgewählte Höhen nach (6.4)

Höhe [m]	,n‘ [m] nach (6.4) für					
	V1 (Blende)		V2 (Objektivmontage)		V3 (Temperatur)	
	$n_{\sigma(c)}$	$n_{\text{Max. Diff.}}$	$n_{\sigma(c)}$	$n_{\text{Max. Diff.}}$	$n_{\sigma(c)}$	$n_{\text{Max. Diff.}}$
10	0.063	0.075	0.026	0.036	0.017	0.024
20	0.125	0.150	0.053	0.073	0.034	0.049
50	0.313	0.375	0.132	0.182	0.085	0.122
70	0.438	0.525	0.185	0.255	0.119	0.171
100	0.626	0.750	0.264	0.365	0.171	0.244

Tabelle 14 enthält die entsprechenden Verschiebungen (n) an der Oberfläche für ausgewählte Höhen und entsprechende Variationsbereiche (mittlerer Fehler von c und maximale Differenz innerhalb der Messreihen siehe Tabelle 13). Bei einer Flughöhe von bspw. 50 m erhält man bei einer Schwankung von 0.0286 mm (maximale Differenz des ersten Versuchs) eine Verschiebung von 37.5 cm bezogen auf die äußeren Bildecken und bei senkrechtem Blick auf eine ebene Oberfläche. Dagegen wirkt sich bei 50 m Flughöhe der Bereich des mittleren Fehlers des dritten Versuchs (± 0.0033 mm) lediglich mit 8.5 cm am Boden aus.

Mit Hilfe von (6.5), die sich auf Abbildung 77 bezieht, kann der Versatz in der Sensorebene ,w‘ berechnet werden.

$$w = d - \left(\frac{d \cdot c_2}{c_1} \right) \quad (6.5)$$

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die Auswirkungen in den Einheiten [mm] und [Pixel] der Bereiche der mittleren Fehler und der maximalen Differenzen für jeden Versuch (Eingangswerte siehe Tabelle 13). Die resultierenden Verschiebungen in der Sensorebene liegen demnach im Bereich von 0.6-2.5 Pixel.

Tabelle 15: Gegenüberstellung der Auswirkungen der Brennweitenabweichungen auf die Bildebene nach (6.5)

	,w' nach (6.5) für			
	$\sigma(c)$		Max(c)-Min(c)	
	[mm]	[Pixel]	[mm]	[Pixel]
Blende	0.0098	2.1	0.0118	2.5
Objektiv ab/an	0.0041	0.9	0.0057	1.2
Temperatur	0.0027	0.6	0.0038	0.8

Die berechneten Mittelwerte der Bildhauptpunktlagen sowie deren mittlere Fehler, maximale und minimale Werte und die Differenzen daraus sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Auch hier sind jeweils in den ersten Zeilen die Werte in der Einheit [mm] und in den zweiten Zeilen in der Einheit [Pixel] gegeben.

Tabelle 16: Gemittelte Bildhauptpunktlagen, deren mittlere Fehler, maximale und minimale Werte und deren Differenzen

	Blende		Objektivmontage		Temperatur	
	x	y	x	y	x	Y
Mittelwert [mm]	0.1057	-0.1327	0.1040	-0.1335	0.1022	-0.1330
[Pixel]	22.7	-28.5	22.4	-28.7	22.0	-28.6
σ [mm]	± 0.0023	± 0.0026	± 0.0027	± 0.0017	± 0.0035	± 0.0021
[Pixel]	± 0.5	± 0.6	± 0.6	± 0.4	± 0.7	± 0.5
σ_{Gesamt} [Pixel]	± 0.7		± 0.7		± 0.9	
Max. [mm]	0.1084	-0.1281	0.1062	-0.1312	0.1079	-0.1300
[Pixel]	23.3	-27.5	22.8	-28.2	23.2	-28.0
Min. [mm]	0.1015	-0.1359	0.0994	-0.1358	0.0983	-0.1363
[Pixel]	21.8	-29.2	21.4	-29.2	21.1	-29.3
Differenz	0.0069	0.0078	0.0068	0.0046	0.0096	0.0063
[Pixel]	1.5	1.7	1.5	1.0	2.1	1.4
Diff. _{Gesamt} [Pixel]	2.2		1.8		2.5	

Man erkennt, dass die mittleren Gesamtpunktfehler der Bildhauptpunktkoordinaten zwischen ± 0.7 und ± 0.9 Pixel (± 0.0035 mm - ± 0.0041 mm) schwanken. Die maximalen Differenzen innerhalb der einzelnen Versuche schwanken zwischen 1.8 und 2.5 Pixel (0.0082-0.0115 mm). Da die Bildhauptpunktlage nahe dem Sensorzentrum liegt, können die Auswirkungen nach Abbildung 78 und der zugehörigen Gleichung (6.6) einfach berechnet werden. ,v' ist dabei die Verschiebung in der Sensorebene und ,b' die resultierende Verschiebung am Boden für eine bestimmte Höhe und Brennweite c.

Tabelle 17 vermittelt einen Überblick über die Verschiebungen an einer orthogonalen ebenen Oberfläche für unterschiedliche Höhen und drei Genauigkeitsklassen. Die erste Genauigkeitsklasse beträgt ± 0.7 Pixel und steht damit stellvertretend für den besten mittleren Gesamtpunktfehler der drei Versuche. Die zweite Genauigkeitsklasse beträgt ± 0.9 Pixel und steht damit stellvertretend für den schlechtesten mittleren Gesamtpunktfehler der drei Versuche. Die dritte Genauigkeitsklasse beträgt 2.5 Pixel und repräsentiert damit die maximale Differenz innerhalb der Messreihen.

$$b = \frac{v}{c} \cdot \text{Höhe} \quad (6.6)$$

Tabelle 17: Auswirkung der unterschiedlichen Verschiebungen des Bildhauptpunktes auf eine orthogonale ebene Oberfläche für verschiedene Flughöhen nach (6.6)

Höhe [m]	± 0.7 Pixel [m]	± 0.9 Pixel [m]	2.5 Pixel [m]
10	0.007	0.009	0.013
20	0.014	0.018	0.025
50	0.035	0.045	0.063
70	0.049	0.064	0.088
100	0.071	0.091	0.126

In Abbildung 79 sind die radialsymmetrischen Verzeichnungen der einzelnen Kalibrierungen zusammen in einem Diagramm dargestellt. Sie liegen fast perfekt auf einer Linie. Die maximale Verzeichnung beträgt 3.03 µm (0.65 Pixel) an der äußeren Ecke.

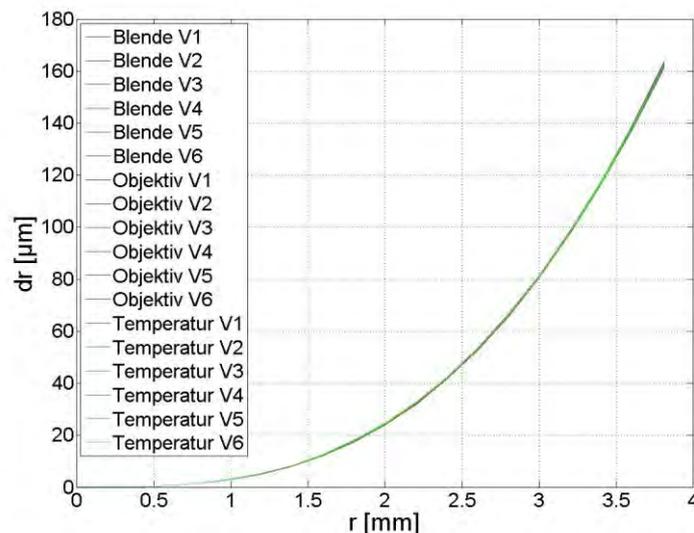


Abbildung 79: Radialsymmetrische Verzeichnungen [µm] für halbe Bilddiagonalachse

Fazit

Es gibt eine Reihe von Einflüssen auf die inneren Orientierungsparameter, von denen in diesem Unterkapitel nur 3 exemplarisch untersucht wurden. Weitere Einflüsse ergeben sich aus der Fokussierung des Objektivs, die auch vor jedem Einsatz individuell angebracht werden kann.

Nachdem einige Einflüsse und deren Auswirkungen bekannt sind, kommt man zum Ergebnis, dass eine einmalige laborseitige Kalibrierung nicht ausreicht, um mit diesen inneren Orientierungsparametern Luftbilder auswerten zu können. Einerseits lässt die Stabilität der Kameraparameter dies nicht zu, da hier schon in Abhängigkeit zur Höhe signifikante Veränderungen stattfinden und andererseits der Einfluss der einzustellenden Optik am Objektiv (Blende und Fokussierung) sehr groß ist und zudem mit relativ wenig Aufwand verändert werden kann. Als Gegenmaßnahmen könnte man die Blendeneinstellung und die Fokussierung fixieren, was aber für individuelle Einsätze mit dem „Four Vision“-Kamerasystem nicht vorgesehen ist.

Die Werte der inneren Orientierungsparameter können jedoch als gute Näherungswerte für eine Simultan-Kalibrierung benutzt werden. Moderne Luftbildauswertesoftwarepakete mit automatischen Punktidentifikationsalgorithmen (z.B. SIFT) und entsprechend sichtbaren GCPs am Boden machen es möglich. Bei einer ausreichend großen Anzahl von GCPs könnte sogar auf eine Kamerakalibrierung vor und nach dem Flug verzichtet werden.

6.3 Radiometrische Eigenschaften

Das „Four Vision“-Kamerasystem besteht aus bis zu fünf Bildsensoren. Auch wenn diese Kameras baugleich sind, unterliegen die Aufnahmen verschiedenen Einflüssen, die dazu führen, dass ihre Aufnahmen radiometrisch inhomogen zueinander sind, d.h. die Aufnahmen passen farblich nicht absolut zueinander. Das kann dazu führen, dass die Inhalte der Aufnahmen unterschiedlich klassifiziert werden, z.B. für die Bestimmung der Vegetationsindizes.

Unter idealen Verhältnissen würde man erwarten, dass die aufgezeichneten Bilddaten die am Sensor ankommende Strahlung in geeigneten Maßeinheiten fehlerfrei erfassen. Dazu müsste die Messung störungsfrei sein, zwischen den Messwerten und der Strahlungsleistung müsste ein einfacher (linearer) Zusammenhang bestehen und die Messwerte müssten vor Ort im Bild bzw. von der Beobachtungsrichtung unabhängig sein. Tatsächlich treten erhebliche Abweichungen von diesem Idealfall auf (ALBERTZ, 2009).

Es gibt eine Menge von Einflüssen, die auf die Intensität des Bildpunktes einwirken und durch Kalibrierung eliminiert werden können. Zu den sensorbasierten Einflüssen zählen das Signal/Rausch-Verhältnis (SNR, signal to noise ratio) des Sensors und der Helligkeitsrandabfall der Objektive. Auf beide Einflüsse wird nachfolgend mit Bezug auf das „Four Vision“-Kamerasystem näher eingegangen.

Eine absolute Korrektur der Sensormesswerte kann anhand von Referenzwerten festgestellt werden. Hierfür werden spezielle Gerätschaften, wie z.B. die Ulbrich-Kugel als homogen isotrope Lichtquelle mit definierten Wellenlängen, benötigt. Andere Einflüsse entstehen durch die Atmosphäre, z.B. Luftlicht, Aerosolstreuung und Albedo oder auch durch die richtungsabhängigen Reflexionseigenschaften von Oberflächen. Hierfür existieren entsprechende Modelle.

Diese Einflüsse werden besonders durch das Wetter verändert. Ändert sich bspw. die Beleuchtung von Oberflächen durch Wolkenbildung während der Aufnahmen, so schlägt sich dieser Effekt negativ während der Auswertung nieder. Einige Kameramodelle registrieren bereits diese Helligkeitsunterschiede für die aufgenommenen spektralen Bandbreiten (z.B. Tetracam Mini MCA mit Lichtsensor³³).

6.3.1 Helligkeitsrandabfall, Randabschattung (Vignettierung)

Der Helligkeitsrandabfall, auch Randabschattung oder Vignettierung genannt, äußert sich in den Bildern als eine Abdunkelung zum Rand des Bildes. Diese Veränderung ist von Objektiv und Blende abhängig. Je kleiner die Blende ist, umso geringer ist die Randabschattung. (KRAUS, 2004) gibt für ein einliniges Kamerasystem das $\cos^4\tau$ -Gesetz (6.7) (τ =Bildwinkel, I =Intensität) an. Demnach würde bei einem Bildwinkel von 50 gon lediglich 25% der Helligkeit in Relation zum zentralen Bereich abgebildet werden. Kraus gibt weiterhin an, dass bei modernen Objektiven der Exponent zwischen 1.5 und 2.5 liegt.

$$I' = I \cdot \cos^4\tau \quad (6.7)$$

Da die Aufnahmen des „Four Vision“-Kamerasystems radiometrisch verarbeitet werden sollen (z.B. für die BRDF), müssen die Bilder um den Helligkeitsrandabfall korrigiert werden. Um den Helligkeitsrandabfall in den Bildern zu bestimmen, wurde eine Milchglasscheibe während einer Referenzaufnahme vor das Objektiv gehalten. Damit sollte erreicht werden, dass die abgebildete Fläche einen homogenen Farbton besitzt, also alle Sensorzellen mit der gleichen Intensität beleuchtet werden. Im Bild wären die Verdunklungen zum Rand zu erkennen.

Um einen flächenhaft homogenen Farbton zu bekommen, sollten die Aufnahmen möglichst im Freien bei starker Bewölkung (diffuses Licht) gemacht werden. Diese Referenzbilder können dann im Nachgang mittels digitaler Bildverarbeitung zur Korrektur verwendet werden. Dazu müssen die Bilder im raw-Format gespeichert werden. Voraussetzung ist, dass sich die Einstellungen des Objektivs zwi-

³³ http://www.tetracam.com/Products-Mini_MCA.htm

schen Referenzaufnahme und eigentlicher Aufnahme nicht ändern. Abbildung 80 zeigt als Beispiel für ein Korrekturprogramm einen Screenshot von „Vignetting Reducer“ von Marek Jablonski.

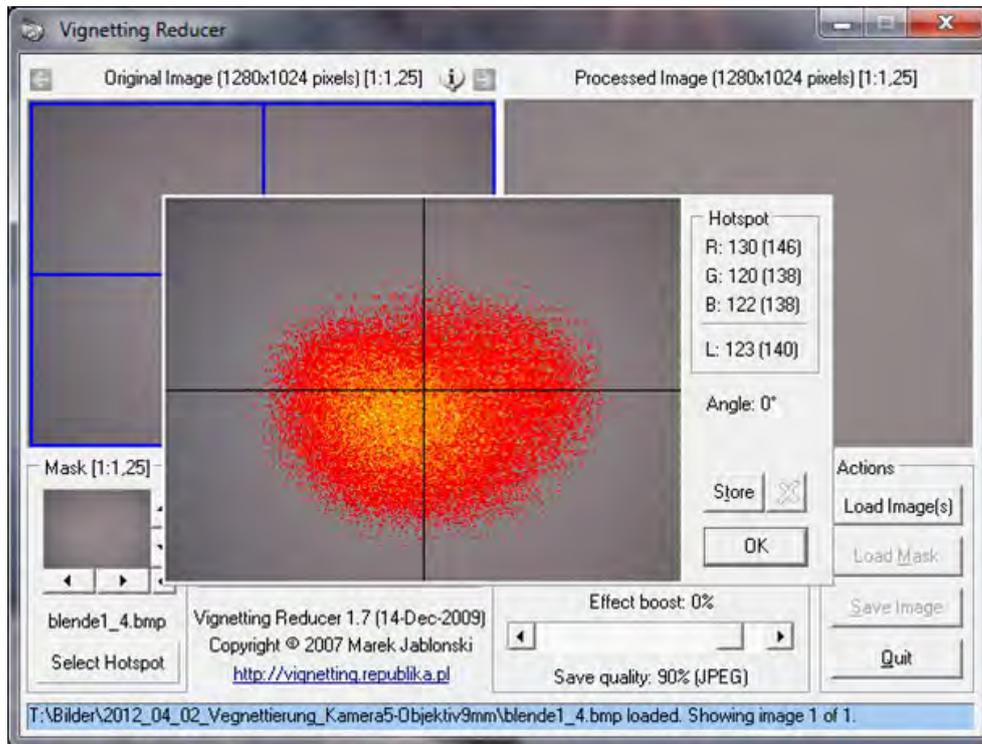


Abbildung 80: Vignetting Reducer (Screenshot)

Das Referenzbild wird ausgewertet und die Helligkeitsunterschiede durch unterschiedliche Einfärbungen sichtbar gemacht. Es entsteht ein Bild, in dem der Bereich mit höherer Intensität als Hotspot angezeigt wird. Anschließend kann diese „Schablone“ auf alle weiteren Bilder angewendet und somit der Helligkeitsrandabfall korrigiert werden.

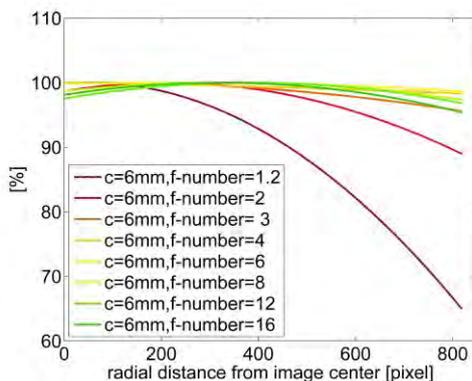


Abbildung 81: Vignettierung in Abhängigkeit der Blendenzahl des Objektivs mit 6 mm Brennweite

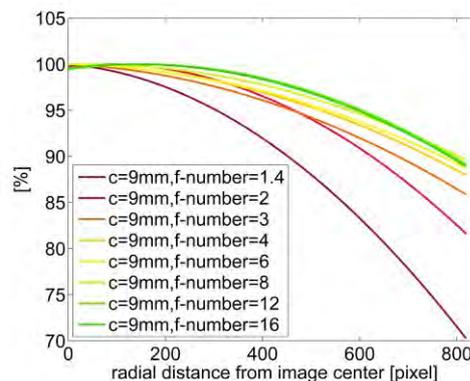


Abbildung 82: Vignettierung in Abhängigkeit der Blendenzahl des Objektivs mit 9 mm Brennweite

Da der Helligkeitsrandabfall blendenabhängig ist, wurden für das „Four Vision“-Kamerasystem mit Hilfe der Milchglasscheibe unterschiedliche Aufnahmen mit gleicher Fokussierung jedoch unterschiedlichen Blendeneinstellungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Diagrammen in Abbildung 81 und Abbildung 82 für die beiden Objektivarten dargestellt. Es wird das Intensitätsverhalten vom Bildmittelpunkt zum Eckpunkt gezeigt. Auch wenn der Versuchsaufbau nicht ideal ist und Effekte während der Aufnahmen entstanden sein können, so erkennt man ganz deutlich, dass der Helligkeitsrandabfall bei kleinen Blendenzahlen, also großen Öffnungen, größer ist. Bei Blende 1.2 des

6 mm-Objektivs sind nur noch ca. 65% der Intensität am äußersten Bildrand zu sehen. Bei Blende 1.4 des 9 mm-Objektivs sind hingegen noch ca. 70% Helligkeit vorhanden.

Es fällt auf, dass zwischen Blende 4 und Blende 6 im Vergleich zu den anderen Blendeneinstellungen die geringsten Helligkeitsunterschiede zu finden sind. Wahrscheinlich wurden die Objektive für diesen Bereich konzipiert. Hieraus ergibt sich die Empfehlung, mit diesen Blendenvorgaben die Luftbilder aufzunehmen.

6.3.2 Signal/Rausch-Verhältnis

Das Signal/Rausch-Verhältnis (SNR), das auch als radiometrische Auflösung bezeichnet wird, gibt das Verhältnis zwischen der Intensität des elektrischen Signals (S) und des Systemrauschens in Form der Standardabweichung (σ_S) an (siehe (6.8)). Das Rauschen hat verschiedene Ursachen. Zu ihnen zählen das Dunkelstrom-Rauschen (thermische Effekte erzeugen Photonenstrom ohne Lichteinfall), das Ladungstransfer-Rauschen (Ladungsverschiebung zwischen benachbarten Detektoren während des Ausleseprozesses), das Übertragungs-Rauschen (Übertragungsdeformation der Signale vor der Analog/Digital-Wandlung) und das Quantifizierungs-Rauschen (Rundungseffekte bei der Analog/Digital-Wandlung). Die radiometrische Auflösung wird umso besser, je größer die Ausdehnung der Detektorfläche ist und je länger die Belichtungszeit dauert (KRAUS, 2004). Das maximale SNR eines Systems wird Dynamikbereich genannt (ALBERTZ & WIGGENHAGEN, 2009).

Die Verbesserung (v) ergibt sich als Differenz aus Wert und Mittelwert. ‚ n ‘ ist die Anzahl der Werte. Radiometrische und geometrische Auflösung stehen in Konkurrenz zueinander. Das Verhältnis aus beiden muss z.B. beim Kamerabau in Abhängigkeit des Zwecks berücksichtigt werden.

Um das Signal/Rausch-Verhältnis zu bestimmen, kann eine farblich homogene Fläche bei diffuser gleichmäßiger Bestrahlung aufgenommen werden. Theoretisch sollten alle Sensorzellen den gleichen (Grau-)Wert abbilden. Über die Abweichungen (Verbesserungen) bzgl. eines Mittelwerts kann der Rauschanteil in Form der Standardabweichung (siehe (6.9)) berechnet werden. Jedoch ist es schwierig, die Umgebungsbedingungen stabil zu erzeugen. (KRAUS, 2004) schlägt daher ein weiteres Verfahren vor, bei dem die äußere Orientierung der Kamera konstant bleibt und mehrere Aufnahmen nacheinander ausgelöst werden. Danach kann die Standardabweichung jedes einzelnen Pixels über die Anzahl der Bilder berechnet und zudem der Einfluss des Helligkeitsrandabfalls kompensiert werden.

$$SNR = \frac{S}{\sigma_S} \quad (6.8)$$

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{[vv]}{(n-1)}} \quad (6.9)$$

Da die Voraussetzungen für eine derartige Untersuchung nicht gegeben waren, wird lediglich das Rauschen des Dunkelstroms berechnet. Um das Dunkelstrom-Rauschen der Kameras zu bestimmen, wird ein Bild mit abgedunkeltem Objektiv erzeugt (Schwarzbild). Im Idealfall sollten alle Bildpixel einen Betrag von konstant 0 aufweisen. Die Variationen der einzelnen Sensorwerte spiegeln das Rauschen wider. Zu diesen Zwecken sollte die Kamera auf Betriebstemperatur gebracht sein, um repräsentative Werte zu erhalten. Je höher die thermischen Effekte sind, also je wärmer die Kamera wird, umso größer wird der Einfluss des Dunkelstroms. Hochempfindliche Kameras, wie sie z.B. in der Astronomie eingesetzt werden, müssen daher gekühlt werden.

Um den Lichteinfall zu unterbinden, wurden die Sicherheitskappen auf die Objektive der Kameras montiert und die Kameras auf Betriebstemperatur gebracht. Alle fünf Kameras wurden einheitlich konfiguriert. Die Belichtungszeit wurde in Anlehnung an die längste Belichtungszeit für eine Befliegung mit vertretbarer Bewegungsunschärfe auf 1/800 Sekunde (1250 μ Sek) gesetzt. Außerdem wurden die Kameras im Schwarz/Weiß-Bildmodus ausgelöst. Es wurden 30 Durchläufe vollzogen und für jedes Bild ein Mittelwert und dessen Standardabweichung berechnet.

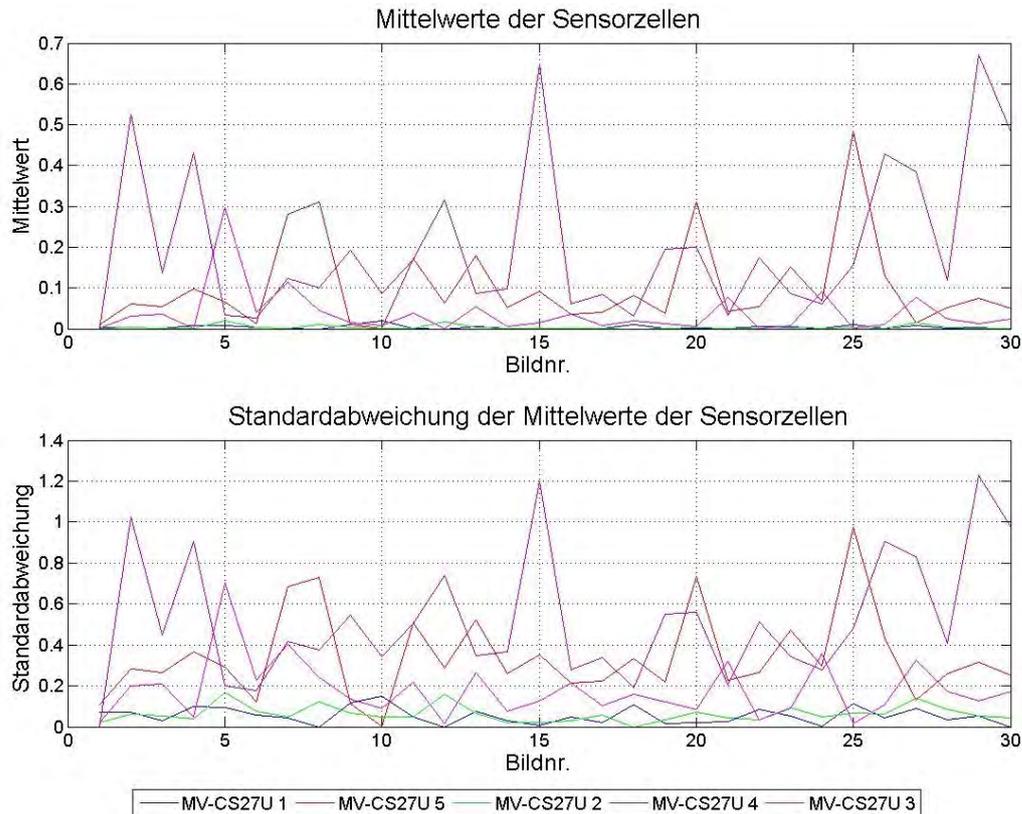


Abbildung 83: Mittelwert und Standardabweichung des Dunkelstrom-Rauschens

In Abbildung 83 sind Mittelwert und dessen Standardabweichung für alle fünf Kameras grafisch dargestellt. Bei einer Auflösung von 1280 x 1024 Pixel liegen insgesamt $n=1310720$ Pixel vor. Die Auswertung wurde mit Hilfe von selbstprogrammierten MatLab-Routinen durchgeführt. Auf den ersten Blick erkennt man, dass die Kameras ein unterschiedliches Rauschen aufweisen. Während die MV-CS27U_5 und die MV-CS27U_2 relativ geringe Abweichungen produzierten, zeigt die MV-CS27U_4 stärkere Ausschläge. Jedoch liegen die Mittelwerte alle zwischen 0 und 1, also sehr nahe am idealen Schwarzwert 0. Das stärkste Rauschen liegt bei etwa ± 1.2 Grauwerten für die Bilder 15 und 29 der MV-CS27U_4 vor.

6.4 Auflösungsvermögen

Die zentrale Frage: „Wie groß muss ein Objekt sein, damit es in einem Luft- oder Satellitenbild noch erkennbar ist?“ stellt u.a. (ALBERTZ, 2009) und gibt einen kurzen Überblick über die Einflussfaktoren, die in ihrem Zusammenwirken darüber bestimmen, ob ein Objekt in einem Bild erkennbar ist oder nicht. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren zählt (ALBERTZ, 2009) dabei:

- das Auflösungsvermögen des Aufnahmesystems als Maß für die Wiedergabe, das wiederum von den Aufnahmemethoden und den technischen Parametern des verwendeten Sensors abhängt,
- die Eigenschaften der Objekte und ihrer Umgebung, hier die Helligkeits- und Farbkontraste,
- den Maßstab der Bildwiedergabe.

Die erreichbare Auflösung eines Aufnahmesystems hängt nach (ALBERTZ, 2009) und (LUHMANN, 2010) ab von den Eigenschaften:

- der photographischen Schicht in Bezug auf die Kornstruktur (bei photographischen Bildern),
- der Ebenheit der photographischen Schicht (bei photographischer Aufnahmetechnik),

- des Objektivs,
- der Bewegungsunschärfe,
- der Ebenheit der Sensorfläche (bei digitaler Aufnahmetechnik).

Die folgenden Ausführungen sind sinngemäß (ALBERTZ, 2009) entnommen. Die Auflösung kann mit Hilfe von Bildaufnahmen standardisierter Testtafeln unterschiedlicher Figuren paralleler Linien mit jeweils unterschiedlichen Abständen, also verschiedenen Ortsfrequenzen, bestimmt werden. In den Bildaufnahmen kann man über die Maßstabsverhältnisse zwischen der Testvorlage und ihrer Bildwiedergabe feststellen, bei welcher Testanordnung die Linien noch erkennbar sind, also wie viele Linien pro Millimeter im Bild noch aufgelöst werden. Die Maßeinheit ist daher Linienpaare pro Millimeter [Lp/mm]. Ein Linienpaar besteht dabei aus einem hellen und dem benachbarten dunklen Strich.

(ALBERTZ, 2009) gibt für das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges einen Wert von etwa 6 Lp/mm an. Das Auflösungsvermögen von photographischen Luftbildern wird mit Werten im Bereich von 20-50 Lp/mm angegeben. (KRAUS, 2004) gibt sogar einen Wert von 90 Lp/mm für filmbasierte Luftbildmesskameras an.

Wichtig ist, dass die Kontrastverhältnisse der Testtafel für die Kontrastverhältnisse der gewünschten Aufnahmen repräsentativ sind. Höhere Objektkontraste verbessern, geringere Kontraste verschlechtern die Bildwiedergabe. Das Auflösungsvermögen nimmt zum Rand des Bildes ab, da die Wirkung der Aberration der optischen Abbildung zunimmt. Außerdem verschlechtert sich die Auflösung bei kleinen Blendenöffnungen, da sich die Beugung am Blendenrand verstärkt.

Bei photographischen Schichten ist die Auflösung durch die Kornstruktur begrenzt. Bei digitalen Aufnahmen hat sich als Maß der geometrischen Auflösung die Kantenlänge der Bildelemente (Pixel) als zweckmäßig erwiesen. Die Pixelgröße beschreibt in diesem Kontext i.d.R. einen idealisierten Zustand, bei dem Vorverarbeitungsprozesse zur Aufbereitung der Bilddaten (z.B. Resampling-Prozess) unberücksichtigt bleiben.

Eine gängige Methode zur Berechnung des Auflösungsvermögens ist die Bestimmung des Unschärfekreises mit Hilfe eines Siemenssterns. Ein Siemensstern ist eine kreisförmige Anordnung von hellen und dunklen Keilen, die sich radial zum Zentrum verjüngen. Ein heller und ein dunkler Abschnitt ergeben zusammen ein Sektorpaar. Es gibt Siemenssterne mit unterschiedlichen Anzahlen von Sektorpaaren. Für die folgenden Untersuchungen wurde ein Siemensstern mit 48 Sektorpaaren benutzt.

Die Bestimmung der Auflösung geschieht beim Siemensstern entfernungsunabhängig. Die Größe des Siemenssterns muss jedoch auf das Kamerabild abgestimmt sein. Ist der Stern zu klein, kann es passieren, dass der Unschärfekreis der Kamera im Durchmesser größer ist als der abgebildete Sterndurchmesser und somit der Stern als grauer Kreis (kaum Kontrast) abgebildet wird. Auf der anderen Seite kann es passieren, dass die Kamera zu dicht am Siemensstern platziert ist. Einige Siemenssterne werden ab einer bestimmten Auflösung, bedingt durch die Auflösungsfähigkeit von Druckern, mittig mit einem schwarzen Vollkreis abgebildet. Sind Siemensstern und Kamera zu dicht beieinander, kann es passieren, dass der Unschärfekreisdurchmesser kleiner ist als der Durchmesser des schwarzen Vollkreises und somit der Siemensstern in allen Facetten scharf abgebildet wird.

Es muss die Distanz zwischen Kamera und Siemensstern so gewählt werden, dass der Durchmesser des Unschärfekreises größer ist als der Durchmesser des schwarzen Vollkreises im Zentrum und kleiner als der Sterndurchmesser. Außerdem sollte der Siemensstern orthogonal zur Kamerablickrichtung aufgenommen werden, da sonst die Kreisform ellipsenförmig abgebildet wird und das Bild in Richtung der kleinen Ellipsenachse gestaucht wird und sich somit negativ auf die Berechnungen des Auflösungsvermögens auswirkt.

Sehr wichtig sind zudem die Belichtungs- und Beleuchtungsverhältnisse. Ab dem Unschärfekreis geht die Abbildung des Siemenssterns in einen einheitlichen Grauton über. Es sind also kaum noch Kontrastunterschiede zu erkennen. Wird der Siemensstern von vornherein zu dunkel abgebildet (niedriger Ausgangskontrast), vergrößert sich der Unschärfekreis. Wird das Bild zu hell aufgenommen (überbelichtet), kann es von vornherein zu Überstrahlungseffekten führen, bei denen die dunklen Be-

reiche kleiner als die hellen Bereiche erscheinen. Auch hier vergrößert sich der Unschärfekreis. Da bei größer werdender Blendenzahl, also kleiner werdendem Blendendurchmesser, die Bildhelligkeit abnimmt, müssen somit die Belichtungszeiten für ein maximales Kontrastverhältnis individuell angepasst werden.

Ein weiterer Einfluss ist bei der Fokussierung zu suchen. Der Siemensstern sollte scharf abgebildet werden. Es leuchtet ein, dass sich Defokussierungen negativ auf den Unschärfekreis auswirken. Den Einfluss der Bewegungsunschärfe kann man mit Hilfe von Stativen eliminieren. Da das Auflösungsvermögen von vielen Einflussfaktoren abhängt, werden Siemenssterne, wo es möglich ist, zur Bestimmung der wahren Auflösung des Bildes während der Aufnahmen mit abgebildet. Das Auflösungsvermögen (AV in [Lp/mm]) wird über die Gleichung (6.10) bestimmt.

$$AV = \frac{48}{\pi \cdot d} \quad (6.10)$$

Der Parameter ‚d‘ enthält den Durchmesser des Unschärfekreises in der Einheit [mm]. In digitalen Aufnahmen kann ‚d‘ über die Anzahl der Pixel multipliziert mit der Größe des Pixels bestimmt werden (siehe (6.11)).

$$d = \text{Pixelanzahl} \cdot \text{Pixelgröße} \quad (6.11)$$

Die Pixelgröße des Kameramodells MV-CS27U des „Four Vision“-Kamerasystems beträgt 4.65 μm . Mit diesen Informationen können die Durchmesser verschiedener Auflösungen in Pixel berechnet werden. Abbildung 84 bis Abbildung 87 zeigen abgebildete Siemenssterne für das 6 mm und das 9 mm Objektiv in der Bildmitte und in der Bildrandlage (links oben).

In die Bilder wurden nachträglich maßstabsgerecht 8 konzentrische Kreise für verschiedene Auflösungsstufen eingezeichnet. Der äußere Kreis steht dabei für eine Auflösung von 20 Lp/mm. Der kleinste Kreis repräsentiert eine Auflösung von 90 Lp/mm. Die Kreise dazwischen sind in einer Abstufung von jeweils 10 Lp/mm dargestellt. Man erkennt, je höher die Auflösung ist, desto dichter liegen die Kreisdurchmesser beieinander.

Die Bilder wurden in einem konstanten Abstand unter annähernd gleichen Beleuchtungs- und gleichen Belichtungsverhältnissen mit Blende 4 im Farbmodus (RGB-Mode) aufgenommen. Da sich der Unschärfekreis nahe dem Zentrum befindet, wäre eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Kamera und Siemensstern noch möglich. Ganz deutlich sind an den Rändern der abgebildeten Kanten Rot- und Blauverschiebungen und im Zentrum des Siemenssterns systematische Farbverläufe zu erkennen (chromatische Aberration). Die Abschätzung des kleinsten Unschärfekreises wird dadurch erschwert. Hinzu kommt, dass in der Nähe des Zentrums schon geringe Veränderungen am Durchmesser sehr große Veränderungen am berechneten Auflösungsvermögen nach sich ziehen.

Aus der Abbildung 84 und der Abbildung 85 lässt sich das Auflösungsvermögen bei ca. 50 Lp/mm für die Randlage und ca. 60 Lp/mm für die Bildmitte für die Kombination aus 6 mm Objektiv und Kamera abschätzen. Aus der Abbildung 86 und der Abbildung 87 lässt sich das Auflösungsvermögen bei ca. 60 Lp/mm für die Randlage und ca. 70 Lp/mm für die Bildmitte für die Kombination aus 9 mm Objektiv und Kamera abschätzen. Jedoch sind die chromatischen Aberrationen dort schon teilweise so stark, dass diese Abschätzungen als optimistisch angesehen werden müssen. Man kann aber deutlich erkennen, dass das Auflösungsvermögen zum Rand hin in beiden Fällen erwartungsgemäß abnimmt und dass die Kombination des 9 mm Objektivs und Kamera erwartungsgemäß eine höhere Auflösung hat als mit dem 6 mm Objektiv.

Das Auflösungsvermögen beschreibt die Leistungsfähigkeit eines optischen photographischen Systems unvollständig. Eine genauere Beschreibung der Systemeigenschaften ermöglicht die Modulationsübertragungsfunktion (ALBERTZ, 2009).

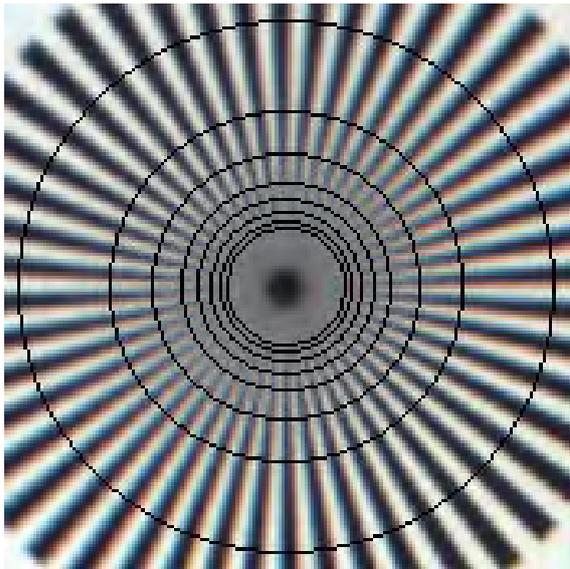


Abbildung 84: Siemensstern mit 6 mm Objektiv am oberen linken Rand (RGB-Mode)

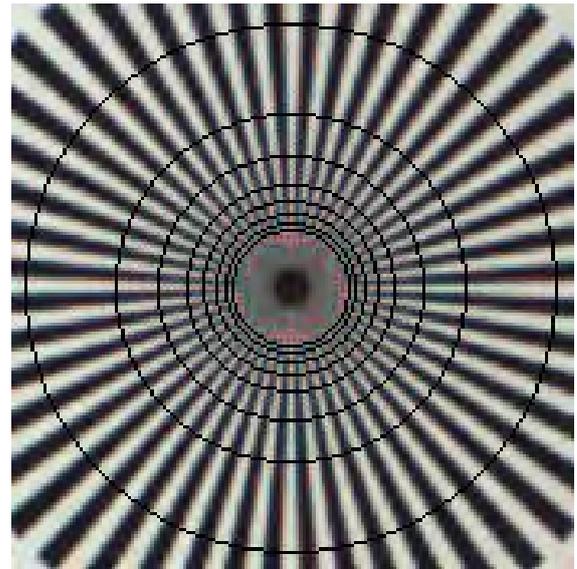


Abbildung 85: Siemensstern mit 6 mm Objektiv in Bildmitte (RGB-Mode)

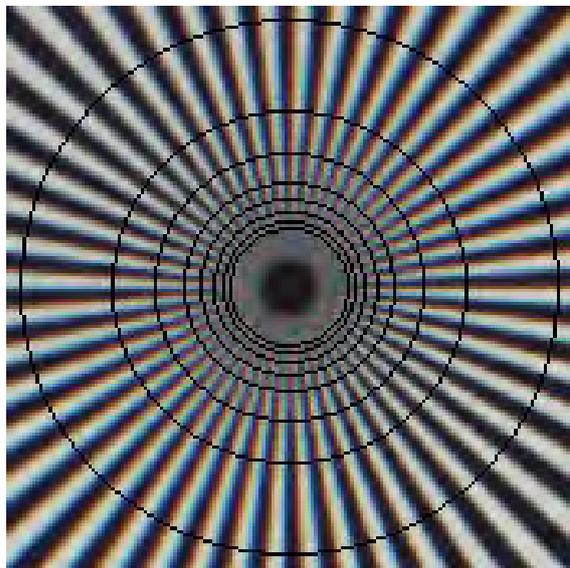


Abbildung 86: Siemensstern mit 9 mm Objektiv am oberen linken Rand (RGB-Mode)

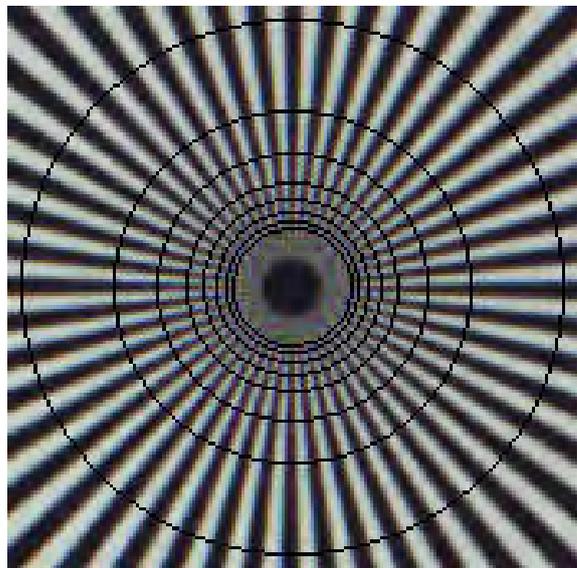


Abbildung 87: Siemensstern mit 9 mm Objektiv in Bildmitte (RGB-Mode)

6.5 Modulationsübertragungsfunktion

Die Modulationsübertragungsfunktion (engl. modulation transfer function MTF) beschreibt die Abbildungseigenschaften eines optischen Systems (oder eines Teilsystems) in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz, d.h. von der Anzahl der Wechsel zwischen hell und dunkel pro Längeneinheit (ALBERTZ, 2009). Das tatsächliche Auflösungsvermögen eines optischen Systems ist kontrastabhängig. Mit abnehmendem Kontrast verringert sich die Fähigkeit, Signale zu übertragen, insbesondere bei hohen Ortsfrequenzen. Jede einzelne Komponente eines optischen Systems hat seine eigene MTF (siehe (6.12)) (LUHMANN, 2010, S.125).

$$MTF_{Gesamt} = MTF_{Atmosphäre} \cdot MTF_{Objektiv} \cdot MTF_{Film} \cdot \dots \cdot MTF_n \quad (6.12)$$

Es gibt einige Methoden, um das Verhalten der MTF zu modellieren. Die Berechnungen und Modellierungen der MTF der Kamera-Objektiv-Kombinationen des „Four Vision“-Kamerasystems wurden mit Hilfe des Programms „QuickMTF“ durchgeführt. „QuickMTF“ benutzt Bilder, in denen

schräg verlaufende Kanten (schwarz-weiß-Übergänge) abgebildet werden (geneigte-Kanten-Messtechnik für diskrete ausgewählte Systeme). Diese Methode wird in der ISO 12233 beschrieben (Avangate B.V.). Dabei wird der Übergang zwischen dem hellen und dem dunklen Teil der Kante analysiert. Zudem besteht die Möglichkeit, sich das Linienbild (Breite der Linie) mit der Funktion „Line Spread Function“ (LSF) sowie das Kantenbild (Intensitätsverteilung entlang des Übergangs zwischen hell und dunkel) mit der Funktion „Edge Spread Function“ (ESF) anzeigen zu lassen.

Genauso wie das Auflösungsvermögen ist die MTF abhängig von der Position im Bild, der chromatischen Aberration, den Belichtungs- und Beleuchtungsverhältnissen (Bildkontrast), der Fokussierung, der Blendeneinstellung und der Bewegungsunschärfe. Um die Modulationsübertragungsfunktion für die Kamera-Objektiv-Kombinationen des „Four Vision“-Kamerasystems zu modellieren, wurden zwei Probeaufnahmen eines Kantenmusters jeweils mit einem Objektiv gemacht und ausgewählte Linien analysiert. Die Aufnahmen wurden mit Blende 4 durchgeführt, da der Helligkeitsrandabfall in dieser Stellung minimal ist und genug Licht am Sensor ankommt. Später sollen die Befliegungen auch mit Blende 4 stattfinden.

Leider waren die Beleuchtungsverhältnisse dieser beiden Aufnahmen nicht konstant. Daher können die Ergebnisse beider Kamera-Objektiv-Kombinationen untereinander nur bedingt verglichen werden. Die Aufnahme mit dem 9 mm-Objektiv erscheint im Vergleich dunkler. Das senkt die MTF-Kurve etwas ab, da insgesamt weniger Kontrast vorhanden ist. Folgerichtig werden die berechneten Auflösungsvermögen lediglich jeweils für diese eine Aufnahme gelten und verschieden vom Auflösungsvermögen sein, die mit dem Siemensstern gemacht wurden. Eine MTF-Kurve gilt aber nur für einen einzigen Punkt im Bild und selbst für diesen Punkt brauchen wir eigentlich mehrere Kurven, da die Punktbilder nicht unbedingt kreisrund sind (NASSE, 2008). Deshalb wurden jeweils eine horizontale (hori.) und eine vertikale (verti.) Kante für die Randlage (oben links → ob.li.) und die Bildmittellage (Mitte) untersucht.

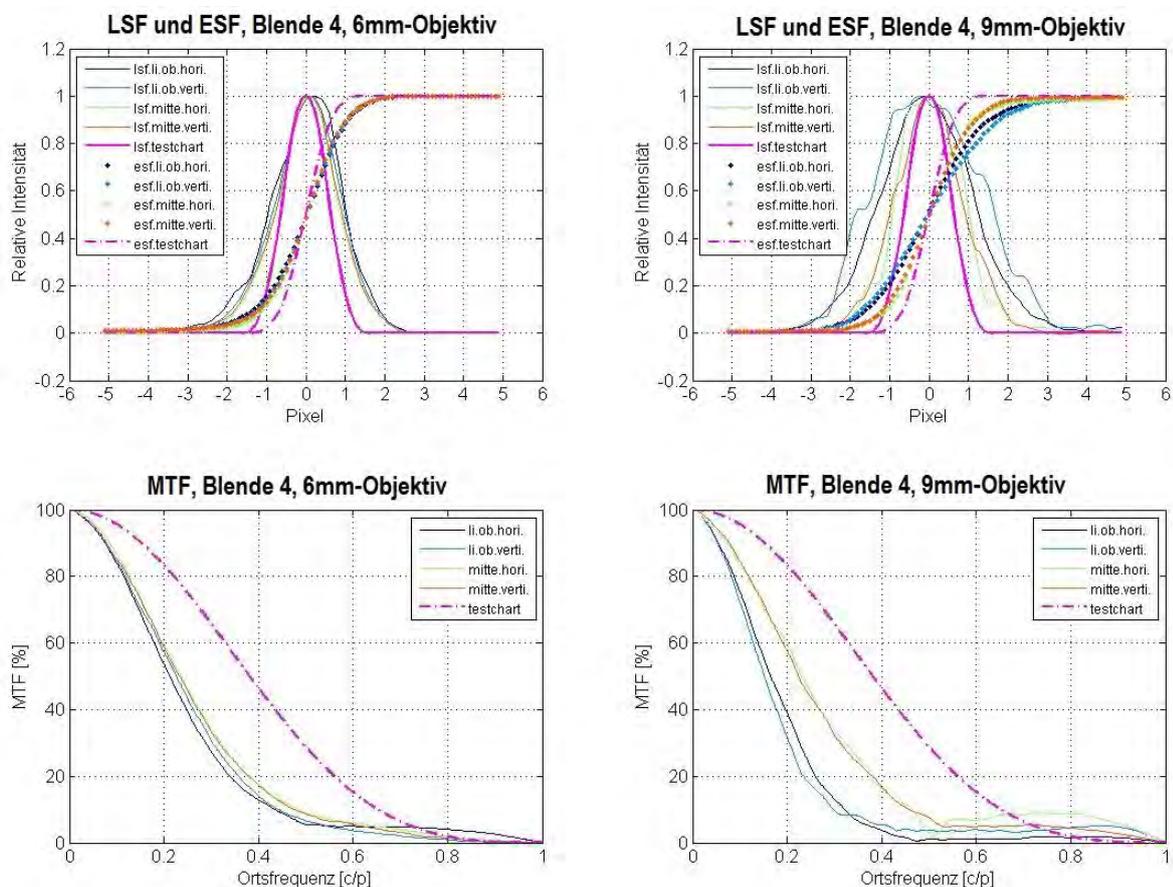


Abbildung 88: Gegenüberstellung der MTF-, ESF- und LSF-Werte für die Kamera-Objektiv-Kombinationen mit dem 6 mm und dem 9 mm Objektiv

Abbildung 88 zeigt vier Diagramme. Auf der linken Seite sind LSF und ESF (oben) und MTF (unten) für die Kamera mit 6 mm Objektiv abgebildet. Auf der rechten Seite befinden sich die gleichen Funktionen für die Kamera mit 9 mm Objektiv. Bei LSF und ESF werden die relativen Intensitäten über der Pixelanzahl aufgetragen. Man bekommt somit Informationen über die Breite der Kantendarstellung in Pixel. Bei der MTF wird die Ortsfrequenz in cycle/pixel [c/p] gegenüber den MTF-Werten in [%] angegeben. Dabei hat der Parameter ‚cycle‘ die Bedeutung einer Periode, für unsere Fälle Linienpaare [Lp]. Kennt man die Größe eines Pixels in [mm] (MV-CS27U \rightarrow 0.00465 mm), so kann die Einheit [c/p] sehr leicht in die Einheit [Lp/mm] umgerechnet werden (siehe (6.13)).

$$\frac{Lp}{mm} = \frac{cycle}{pixel} \cdot \frac{1}{0.00465mm} \quad (6.13)$$

Der Ortsfrequenzbereich bei 0.5 c/p der MTF-Kurve entspricht der Nyquist-Frequenz. Für die MV-CS27U ergäbe sich somit für die Nyquist-Frequenz ein theoretisches Auflösungsvermögen von 107.5 Lp/mm. Der Kurvenverlauf nach der Nyquist-Frequenz spielt für unsere Betrachtungen keine Rolle. In diesem Bereich kann es zu Aliasing Effekten und Scheinauflösungen kommen. Zudem ist die LSF als durchgängige Linie und die ESF als gepunktete Linie abgebildet. Für die verwendeten Abbildungen ist die ESF ausschlaggebender, da in den Abbildungen Kanten, also Übergänge von hell nach dunkel, vorhanden sind. Zur besseren Orientierung wurden die LSF-, ESF- und MTF-Kurven eines vergleichbaren künstlich erzeugten idealen Kantenbildes eingeblendet (Magenta). Diese Werte stellen eine Obergrenze dar, über die das Kamerasystem nicht hinaus kommt. Tabelle 18 gibt einige Werte der in Abbildung 88 dargestellten Bilder wieder. Dabei beinhaltet die Nr. nach MTF, z.B. MTF50, bei welcher Frequenz ein bestimmter Prozentsatz (hier 50%) vom ursprünglichen Kontrast vorhanden ist. Außerdem wird der prozentuale Unterschied zwischen dem MTF-Wert aus der Mitte und vom Rand der Bildaufnahme angegeben.

Tabelle 18: Ausgewählte MTF-Werte in Bezug zu Abbildung 88

		9 mm Objektiv				6 mm Objektiv			
		links oben		Mitte		links oben		Mitte	
		hori.	verti.	hori.	verti.	hori.	verti.	hori.	verti.
MTF50	[c/p]	0.165	0.154	0.231	0.224	0.212	0.226	0.236	0.233
	[Lp/mm]	35.5	33.1	49.7	48.2	45.6	48.6	50.8	50.1
	[%]	-28.6	-31.3			-10.2	-3.0		
MTF40	[c/p]	0.195	0.177	0.268	0.268	0.246	0.262	0.318	0.316
	[Lp/mm]	41.9	38.1	57.6	57.6	52.9	56.3	68.4	68.0
	[%]	-27.2	-33.9			-22.6	-17.1		
MTF30	[c/p]	0.226	0.203	0.323	0.311	0.288	0.303	0.376	0.378
	[Lp/mm]	48.6	43.7	69.5	66.9	61.9	65.2	80.9	81.3
	[%]	-30.0	-34.7			-23.4	-19.8		
MTF20	[c/p]	0.258	0.233	0.373	0.378	0.339	0.356	0.486	0.474
	[Lp/mm]	55.5	50.1	80.2	81.2	72.9	76.6	104.5	101.9
	[%]	-30.8	-38.4			-30.2	-24.9		

Kamera mit 6 mm Objektiv

Der Kurvenverlauf der MTF zeigt einen Durchhang im Bezug zur Obergrenzen-Kurve auf. Die vier MTF-Kurven liegen nahe beieinander. Das bedeutet, dass das Auflösungsvermögen zum Rand hin nicht so stark abfällt, was eigentlich untypisch für weitwinkligerer Objektive ist. Für MTF50 ergibt sich lediglich ein maximaler Unterschied bei der horizontal abgebildeten Linie von 10 %. Dabei wird ein Auflösungsvermögen von ca. 45 Lp/mm für den Randbereich und ca. 50 Lp/mm für den Mittenbereich der Bildaufnahme erreicht. Nimmt man einen niedrigeren MTF-Wert z.B. MTF30, so ergibt sich ein

maximaler Unterschied von ca. 23 % bei einer Auflösung von ca. 62 Lp/mm am Rand und 80 Lp/mm in der Mitte. Auch wenn die Kurve durchhängt, so sind keine lokalen Maxima bzw. Minima zu erkennen. Das bedeutet, dass der Kurvenverlauf homogen ist. Der Kurvenverlauf bei höheren Frequenzen ist eher flach und nähert sich asymptotisch der Null-Linie. Das macht es schwerer die Auflösungsgrenze zu identifizieren, denn wegen des sehr flachen Verlaufs im hohen Ortsfrequenzbereich hängt das Ergebnis sehr empfindlich vom geforderten Mindestkontrast ab (NASSE, 2008).

Die LSF-Kurven zeigen erwartungsgemäß eine Abnahme der Linienbreite zum Rand hin. Dennoch liegen alle Linienbreiten bei ca. 4 Pixel relativ eng beieinander. Die ideale Breite der künstlich erzeugten Abbildung beträgt dagegen ca. 2 Pixel. Bei der ESF wird der Bereich zwischen 10% und 90% betrachtet, da am Anfang und am Ende schleifende Übergänge stattfinden. Die Werte liegen bei ca. 2 Pixel. Die Ideale ESF-Kurve hat hingegen einen Wert von 1.3 Pixel.

Kamera mit 9 mm Objektiv

Der Kurvenverlauf für die Kamera-Objektiv-Kombination mit dem 9 mm Objektiv zeigt im Bildmittenbereich ein sehr ähnliches Verhalten wie mit dem 6 mm Objektiv. Jedoch hängen die Kurvenverläufe der MTF-Kurven für die Randlagen der Bildaufnahmen deutlich mehr durch. Für MTF50 ergibt sich ein maximaler Unterschied bei der vertikal abgebildeten Linie von ca. 31 %. Dabei wird ein Auflösungsvermögen von ca. 33 Lp/mm für den Randbereich und ca. 50 Lp/mm für den Mittenbereich der Bildaufnahme erreicht. Nimmt man einen niedrigeren MTF-Wert z.B. MTF30, so ergibt sich ein maximaler Unterschied von ca. 34 % bei einer Auflösung von ca. 49 Lp/mm am Rand und 70 Lp/mm in der Mitte. Die niedrigen Auflösungswerte sind der etwas unterbelichteten Aufnahme geschuldet. Hier zeigt sich ganz deutlich, wie sich ein geringerer Kontrastbereich im Bild auf das Auflösungsvermögen auswirkt. Auch hier wurde zum Vergleich die MTF-Kurve des vergleichbaren künstlich erzeugten Kantenbildes eingeblendet.

Die LSF-Kurven zeigen auch hier erwartungsgemäß eine Abnahme der Linienbreite zum Rand hin, die sich in diesem Fall deutlicher abzeichnet. Die Linienbreiten variieren im Bereich von min. 3 Pixel bis max. fast 6 Pixel. Zum Vergleich beträgt dagegen die ideale Breite der künstlich erzeugten Abbildung ca. 2 Pixel. Zudem erkennt man einzelne Maxima und Minima, die auf Fehlereinflüsse während der Aufnahme zurückzuführen sind (z.B. Fokussierung). Bei der ESF wird auch hier der Bereich zwischen 10% und 90% betrachtet. Die Werte liegen bei ca. 2 bis 3.5 Pixel (Ideale ESF-Kurve: 1.3 Pixel).

Fazit

Die Bestimmungen der MTF-Werte unterliegen einer Reihe von Fehlereinflüssen. Leider stand für die Untersuchung keine geeignete Laborumgebung mit ausreichend stabilen Lichtverhältnissen zur Verfügung. Das macht die Aufnahmen etwas realistischer. Man erkennt gut, wie sensibel die Untersuchungen zum Auflösungsvermögen auf äußere Einflüsse reagieren. Möchte man die Kamera-Objektiv-Kombinationen vergleichen, so sollte das vor dem Hintergrund der Fehlereinflüsse geschehen. Schaut man sich die MTF-Kurven beider Kamerasysteme an, so erkennt man zumindest für den Bildmittenbereich starke Ähnlichkeiten im Auflösungsvermögen. Hier hätte man erwarten können, dass das 6 mm Objektiv ein schwächeres Auflösungsvermögen zeigt. Die beiden Objektivtypen ähneln sich jedoch in ihrer Bauweise sehr stark und unterscheiden sich lediglich um 3 mm in der Brennweite. Ausgehend von der Homogenität der Kurve handelt es sich um Objektive mit guter Qualität, da jeder Frequenzbereich in Abhängigkeit vom Bildkontrast homogen abgebildet wird. Durch den Kurvenverlauf gerade in den höheren Frequenzen, ist es sehr schwierig, jeweils das Auflösungsvermögen zu bestimmen. Das kann man auch sehr gut in Abbildung 84 bis Abbildung 87 (Siemenssterne) erkennen. Kleine Veränderungen können hier große Auswirkungen verursachen. Schaut man sich die Auflösungen für den Bereich MTF50 an, so liegen sie zwischen 33 und 50 Lp/mm. Möchte man das Auflösungsvermögen von der Schätzung des Siemensstern ausgehenden Auflösung erreichen, so muss ein Mindestkontrastunterschied von 30% in den Aufnahmen erreicht werden.

6.6 Praktische Untersuchungen zur Stabilität der Kamerahalterung

Da die Kameras in einer Halterung (Leichtbaukonstruktion) im Unterbau befestigt sind und zudem synchron auslösen, könnten die relativen Orientierungsparameter aller fünf Kameras zueinander als zusätzliche Informationen bei der Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter der schrägblickenden Kameras genutzt werden. Wenn bspw. lediglich die äußeren Orientierungen der Nadirkameras vorhanden wären, wäre es möglich, die schrägblickenden Kameras anschließend relativ über die bekannten Hebelarme und Winkelbeziehungen zu orientieren, vgl. z.B. (JACOBSEN, 2009b).

Es muss die Frage geklärt werden, ob die relativen Orientierungsparameter im Kamerasystem bzw. in der Kameraaufhängung stabil genug bzw. genau genug bestimmt werden können, um sie sinnvoll für die äußeren Orientierungen nutzen zu können. Um einen Eindruck über die Abhängigkeiten der Stabilität der Kameraaufhängung zu bekommen, sind einige Einflussgrößen aufgezählt:

- Leichtbaukonstruktion, lässt sich schon mit ein wenig mechanischem Druck von außen verformen
- Fokussierungen der Kameras
- Blendeneinstellungen
- Montageschwachpunkte, z.B. Arretierung durch nicht festangezogene Schrauben
- Beschleunigungen während des Fluges, z.B. bei Wind oder Windböen
- Vibration durch Motorendrehzahl (große Bandbreite bei MD4-1000)
- Temperatureinfluss
 - o Sonne, z.B. Ausdehnung einzelner Teile bei (einseitiger) Bestrahlung
 - o Betriebstemperatur der Messsysteme

Zudem spielt die Synchronität der Kameraauslösungen während des Fluges eine wichtige Rolle. Auch wenn der Auslöseimpuls über die Parallelschaltung an allen Kameras gleichzeitig eintrifft, können im Kamerasystem softwareseitig Wartezeiten definiert sein, die das Auslösen wieder verzögern. Die Synchronität ist Voraussetzung für die Weiterverwertung der Informationen über die relativen Orientierungen der Kameras untereinander.

Die Modellierung der Einflüsse auf die Stabilität der Kamerahalterung ist äußerst komplex. Die Einflussgrößen zeigen, dass man mit sehr geringem Aufwand die relativen Orientierungen stark verändern kann, so dass die resultierenden äußeren Orientierungsparameter nicht mehr genau genug vorliegen. Als Gegenmaßnahmen könnte man bspw. die Blendeneinstellung (optimalste Blendenvorwahl), die Fokussierung (Hyperfokaldistanz) und das Objektiv (mit Kamera) fixieren. Aus diesen und weiteren nicht genannten Gründen muss jedoch davon ausgegangen werden, dass die Halterung der Kameras und somit die relativen Orientierungsparameter nicht stabil genug für die Berechnung der absoluten äußeren Orientierungen der schrägblickenden Kameras sind.

Die Stabilität der Halterung wird exemplarisch an zwei Bestimmungen der relativen Orientierungen vor und nach einem Testflug mit unterschiedlichen Fokussierungen gezeigt. Als Basiskamera fungiert die Nadirkamera, auf die sich dann die schrägblickenden Kameras beziehen. Die Orientierungsparameter des Kamerasystems werden an der Kalibriervorrichtung der Professur mit Hilfe der Kalibrierungssoftware „Australis“ bestimmt und verglichen (siehe Kap. 2.8.1).

Die Bestimmung der relativen Orientierungsparameter wurde in einer wissenschaftlichen angeleiteten Arbeit innerhalb des Forschungsprojektes von Robert Schima (SCHIMA, 2013) durchgeführt und in (NIEMEYER ET AL., 2013b) veröffentlicht.

6.6.1 Bestimmung der relativen Orientierungen mit Australis

Zur Bestimmung der relativen Orientierungen der fünf Kameras zueinander wurde eine Besonderheit von „Australis“ ausgenutzt. Gibt man „Australis“ einen Satz von Bildern, die die gleichen Zielmarken mit der gleichen Geometrie abbilden, so wird das übergeordnete Koordinatensystem an dem

ersten relativ orientierten Kamerastandpunkt ausgerichtet. In der 3D-Ansicht in „Australis“ lässt sich zudem diese „Start“-Kameraposition mit der Option „Set as origin“ wechseln.

Die Aufnahmen entstanden am Kalibrierstand der Professur für Geodäsie und Geoinformatik (Abbildung 8). Der Versuchsaufbau wurde so eingerichtet, dass alle Kameras des Kamerasystems gleichzeitig genügend kodierte Marken abbilden. Das Kamerasystem wurde auf einem Stativ montiert, um Bewegungen während der Belichtungszeit zu vermeiden. Da die Belichtungsverhältnisse am Versuchsstand keine automatische Detektion der retroreflektierenden Zielmarken im Bild zuließen, wurden 8 LED Lichter als Beleuchtungsquelle an jede Kamera angebracht und in Kamerablickrichtung ausgerichtet (SCHIMA, 2013).

Die Belichtungszeit von 63000 μ Sek. (ca. 1/16 Sek.) wurde im Vorfeld automatisch von einer Kamera über ein spezielles Programm ermittelt und von den anderen Kameras übernommen. Die angeleuchteten Marken kamen dabei zur vollen Geltung. Da lediglich Interesse an den relativen Orientierungen der Kameras zueinander bestand, wurden die einzelnen Bilder im Schwarz/Weiß-Modus (Mono8) erzeugt. Dadurch sind die Marken in den Bildern noch besser zu erkennen und der Speicherbedarf sank auf ein Drittel ab. Durch die Reflexionseigenschaften der Marken konnte sichergestellt werden, dass diese in den Bildern später durch den starken Helligkeitsunterschied automatisch erkannt werden. Nachdem ein Satz von 5 Bildern (pro Kamera ein Bild) aufgenommen wurde, wird die Ausrichtung und die Position des Kamerasystems verändert.

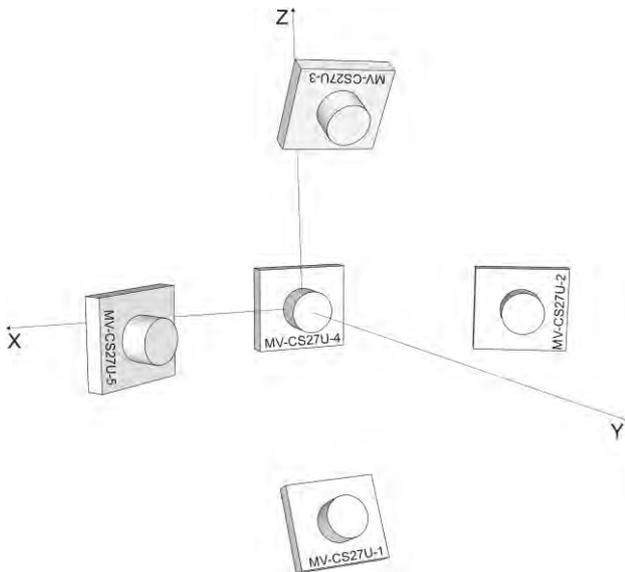


Abbildung 89: Orientierung des Kamerasystems in „Australis“ (SCHIMA, 14.02.2013)

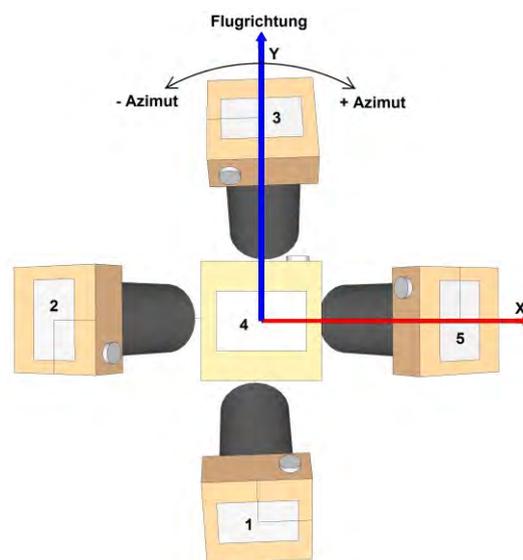


Abbildung 90: Orientierung des Kamerasystems am UAV (NIEMEYER ET AL., 2013b)

Für die weiteren Berechnungen wurde das Bezugssystem an der Nadirkamera ausgerichtet. Die Position des Projektionszentrums der Kamera ist somit $(0, 0, 0)$ und die Blickrichtungen sind Azimut= 0° , Elevation= 0° und Rollwinkel= 0° . Sukzessive wurden die Positionen der Nadiraufnahmen nacheinander als Koordinatenursprung definiert und die äußeren Orientierungsparameter der schrägblickenden Kameras des gleichen Satzes notiert. Die Parameter der inneren Orientierungen der Kameras verändern sich dabei nicht.

Da das Koordinatensystem in „Australis“ so definiert ist, dass die Blickrichtung des ersten orientierten Kamerastandpunktes in Y-Richtung erfolgt, erscheint das Kamerasystem um 90° um die X-Achse verkippt (Abbildung 89). Während des Fluges hängt das Kamerasystem jedoch nach unten schauend am UAV (Abbildung 90). Deshalb müssen die in „Australis“ berechneten relativen Orientierungsparameter in das UAV-System übertragen werden.

6.6.2 Relative Kameraorientierungen vor dem Testflug

Die relativen Orientierungsparameter wurden nach der vorgestellten Methode aus Kap. 6.6.1 bestimmt. Es wurden 30 Aufnahmesätze (jeweils 5 Bilder) mit insgesamt 56 abgebildeten, kodierten Marken für die Kalibrierung aufgenommen (siehe Kap. 2.8.1). Daraus ergaben sich für die inneren Orientierungsparameter der Kameras und deren Standardabweichungen die Werte aus Tabelle 19.

Tabelle 19: Parameter der inneren Orientierung für die rel. Kameraorientierungen vor dem Testflug

Parameter	MV-CS27U				
	4	1	2	3	5
c [mm]	6.132	9.251	9.242	9.257	9.222
σ_c [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
xp [mm]	0.082	-0.010	0.070	-0.175	0.151
σ_{xp} [mm]	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
yp [mm]	0.229	0.076	-0.024	-0.122	-0.145
σ_{yp} [mm]	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
K1	5.68E-03	3.03E-03	2.99E-03	2.98E-03	2.95E-03
σ_{K1}	6.85E-06	1.12E-05	1.25E-05	1.05E-05	1.25E-05
K2	-5.31E-05	-4.27E-06	2.92E-06	-5.71E-07	1.07E-05
σ_{K2}	1.04E-06	1.71E-06	2.00E-06	1.60E-06	1.93E-06
K3	-1.52E-06	-4.26E-07	-5.52E-07	-6.12E-07	-9.14E-07
σ_{K3}	4.89E-08	7.79E-08	9.74E-08	7.41E-08	8.94E-08
P1	1.03E-04	-3.90E-05	7.22E-05	-5.14E-05	4.70E-05
σ_{P1}	8.91E-07	1.34E-06	1.45E-06	1.42E-06	1.57E-06
P2	-8.85E-05	4.95E-05	-1.17E-05	-3.05E-06	-5.41E-06
σ_{P2}	8.18E-07	1.40E-06	1.49E-06	1.42E-06	1.59E-06

Es entstanden 30 vergleichbare Orientierungsparameter pro Kamera. Abbildung 91 zeigt die jeweiligen Abweichungen der Positionskoordinaten vom Mittelwert (X, Y, Z) der schrägblickenden Kameras. Abbildung 92 gibt die Abweichungen der Orientierungswinkel (Azimut, Elevation, Rollwinkel) zum jeweiligen Mittelwert der 30 Beobachtungssätze im Koordinatensystem von „Australis“ wieder. Die Kameras wurden mit Blende 4 auf etwa 2 m Entfernung fokussiert.

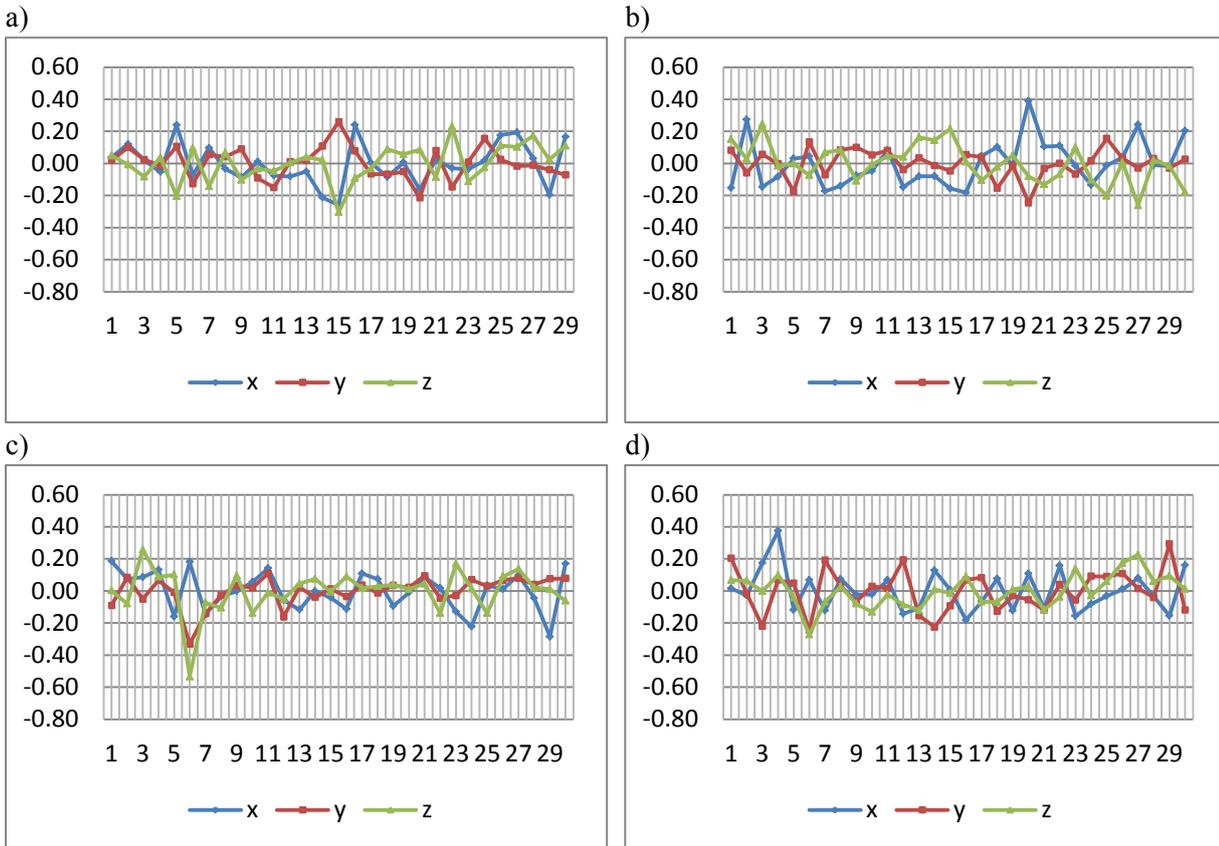


Abbildung 91: Abweichung der Kamerapositionskordinaten vom Mittelwert [mm] a) MV-CS27U_1, b) MV-CS27U_2, c) MV-CS27U_3, d) MV-CS27U_5

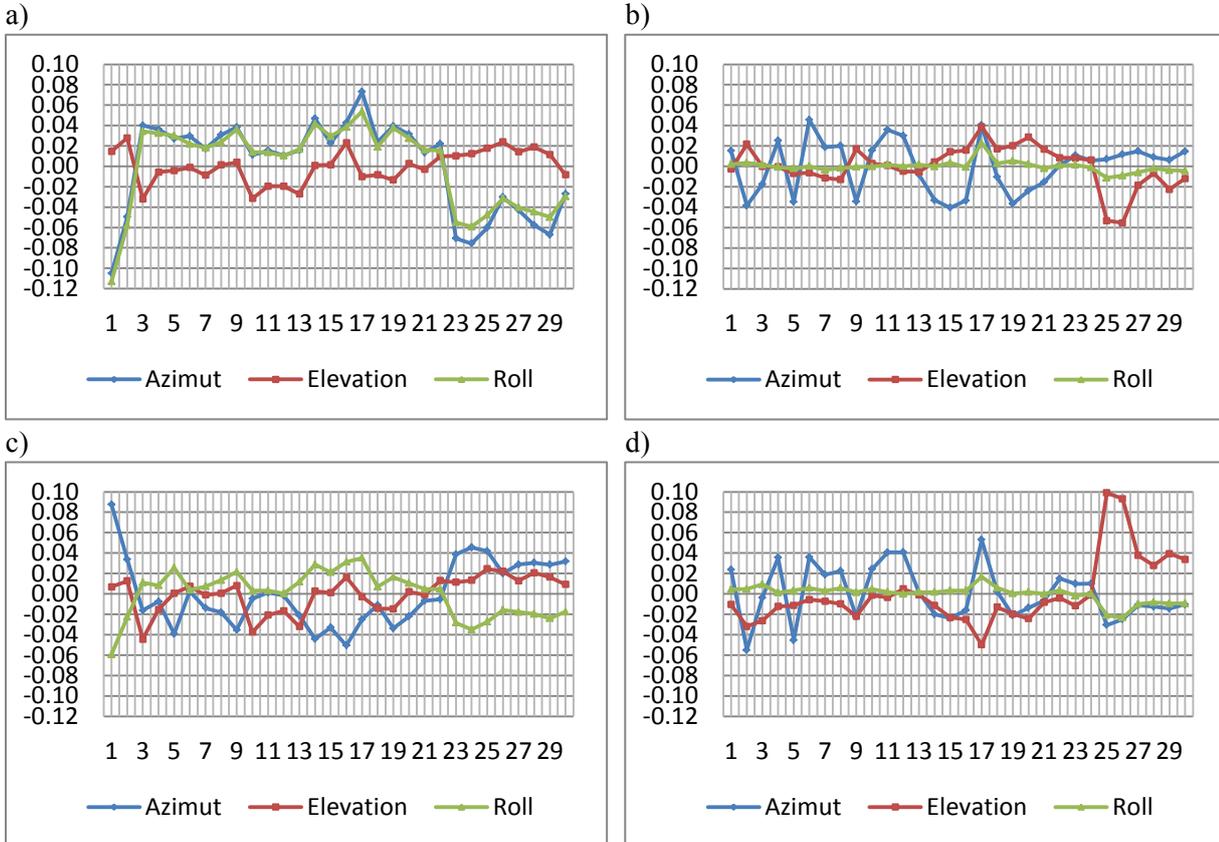


Abbildung 92: Abweichung der Orientierungswinkel vom Mittelwert [°] a) MV-CS27U_1, b) MV-CS27U_2, c) MV-CS27U_3, d) MV-CS27U_5

Tabelle 20 gibt einen Überblick über die resultierenden Positionen und Orientierungen und deren mittlere Fehler (σ) der 30 Aufnahmesets im von „Australis“ definierten Koordinatensystem.

Tabelle 20: Äußere Orientierungsparameter der schrägblickenden Kameras im Koordinatensystem von „Australis“

Parameter	MV-CS27U			
	1	2	3	5
x [mm]	-1.42	-76.58	-0.18	73.42
σ_x [mm]	0.13	0.14	0.12	0.13
y [mm]	33.93	31.33	31.84	34.30
σ_y [mm]	0.10	0.09	0.09	0.13
z [mm]	-75.34	0.07	74.93	-0.29
σ_z [mm]	0.11	0.12	0.14	0.10
Azimet [°]	2.22	-29.50	-0.63	32.07
σ_{Azimet} [°]	0.05	0.03	0.03	0.03
Elevation [°]	29.67	0.06	-31.74	0.16
$\sigma_{Elevation}$ [°]	0.02	0.02	0.02	0.03
Roll [°]	2.13	-89.50	-177.61	90.62
σ_{Roll} [°]	0.04	0.01	0.02	0.01

Die umgerechneten Kameraorientierungen für das Koordinatensystem in Relation zur Nadirkamera sind in Tabelle 21 zu finden.

Tabelle 21: Orientierungswinkel des Kamerasystems während des Fluges

Parameter	MV-CS27U				
	1	2	3	4	5
Azimet' [°]	2.13	89.94	-177.61	0	-89.84
Elevation' [°]	-60.33	-60.50	-58.26	0	-57.93
Roll' [°]	2.22	0.50	-0.63	0	-0.62

Die Ergebnisse der relativen Orientierungen der Kameras zueinander wurden mit mittleren Fehlern der Kamerapositionen zwischen 0.09 mm bis 0.14 mm und der Kameraorientierungen zwischen 0.01° bis 0.05° sehr genau bestimmt. Anhand der Abbildung 91 und Abbildung 92 wird deutlich, wie gering die Schwankungen innerhalb der Messreihen sind. Die relativen Positionen der Kameras zueinander können daher unter statischen Bedingungen, trotz wiederholtem Umsetzen des gesamten Systems, als konstant angesehen werden.

6.6.3 Relative Kameraorientierungen nach dem Testflug

Nach einem Flugversuch wurden die relativen Orientierungen nochmals nach der in Kap. 6.6.1 beschriebenen Methode bestimmt. Für die Bestimmung der relativen Orientierung wurden 30 Aufnahmesätze aufgenommen. Dabei ist jedoch ein Datensatz unvollständig. Es fehlt der erste Parametersatz der MV-CS27U_1, da hier nicht genug Marken abgebildet wurden. Die Kameras waren mit Blende 4 auf eine Entfernung von 45 m fokussiert. In Tabelle 22 sind die berechneten inneren Orientierungsparameter der fünf Kameras für diese 30 Aufnahmesets zu finden.

Tabelle 22: Parameter der inneren Orientierungen für die rel. Kameraorientierungen nach dem Testflug

Parameter	MV-CS27U				
	4	1	2	3	5
c [mm]	6.123	9.179	9.191	9.210	9.218
σ_c [mm]	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003
x_p [mm]	0.086	-0.009	0.055	-0.183	0.149
σ_{x_p} [mm]	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
y_p [mm]	0.221	0.082	-0.021	-0.130	-0.157
σ_{y_p} [mm]	0.000	0.003	0.003	0.003	0.003
K1	5.67E-03	2.97E-03	2.85E-03	2.97E-03	2.97E-03
σ_{K1}	1.51E-05	1.68E-05	1.62E-05	1.72E-05	1.99E-05
K2	-6.19E-05	-3.60E-08	1.71E-05	-1.02E-05	4.15E-06
σ_{K2}	2.06E-06	2.50E-06	2.47E-06	2.73E-06	3.23E-06
K3	-1.15E-06	-5.20E-07	-1.20E-06	6.99E-08	-7.60E-07
σ_{K3}	9.41E-08	1.13E-07	1.13E-07	1.32E-07	1.62E-07
P1	1.00E-04	-3.60E-05	8.96E-05	-5.85E-05	5.65E-05
σ_{P1}	1.75E-06	2.07E-06	2.10E-06	2.42E-06	2.32E-06
P2	-8.24E-05	2.40E-05	-4.45E-05	-2.40E-06	-4.02E-05
σ_{P2}	1.53E-06	2.38E-06	2.30E-06	2.52E-06	2.46E-06

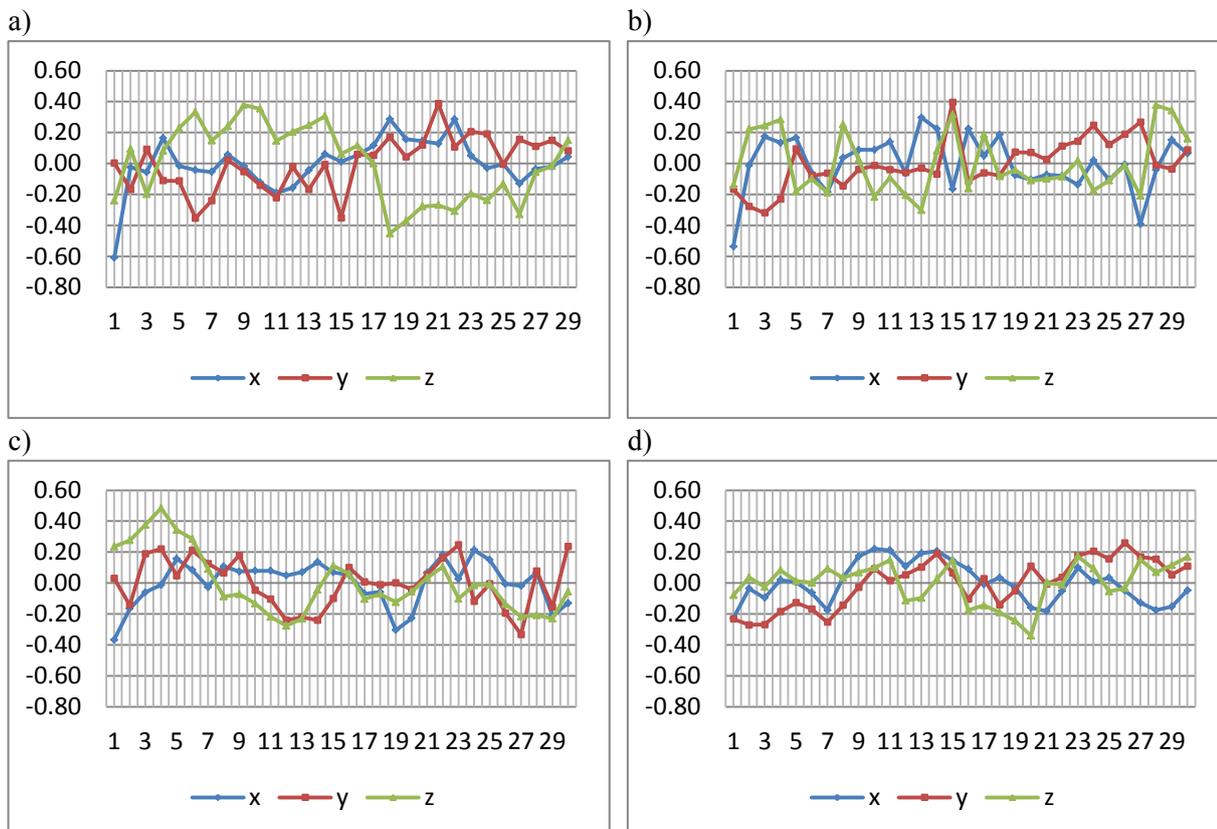


Abbildung 93: Abweichung der Kamerapositionskoordinaten vom Mittelwert [mm] a) MV-CS27U_1, b) MV-CS27U_2, c) MV-CS27U_3, d) MV-CS27U_5

In Abbildung 93 sind die Abweichungen der Kamerapositionskoordinaten und in Abbildung 94 die Abweichungen der Orientierungswinkel vom jeweiligen Mittelwert dargestellt.

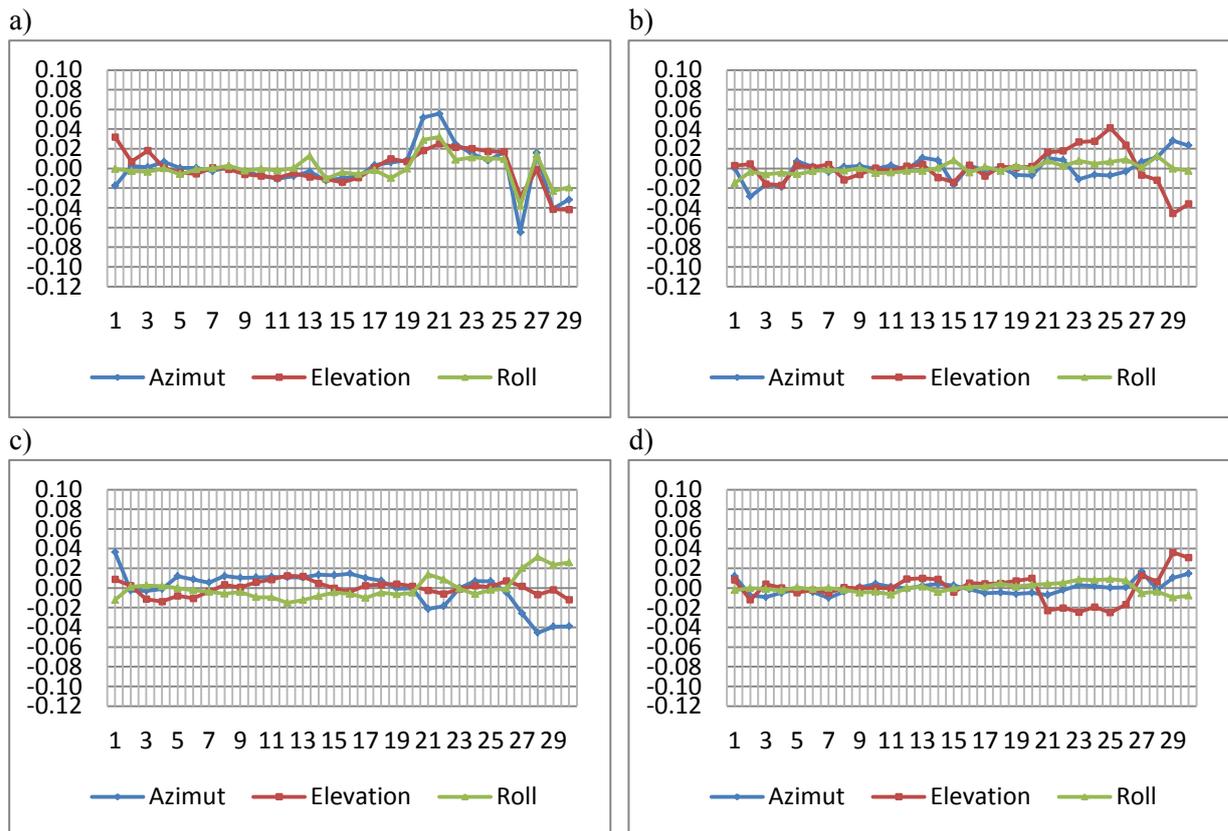


Abbildung 94: Abweichung der Orientierungen vom Mittelwert [°] a) MV-CS27U_1, b) MV-CS27U_2, c) MV-CS27U_3, d) MV-CS27U_5

Tabelle 23 gibt einen Überblick über die resultierenden Positionen und Orientierungen und den mittlere Fehler (σ) der 30 Aufnahmesets im von „Australis“ definierten Koordinatensystem. Daneben finden sich die Differenzen (rot) zu den Werten der äußeren Orientierungen aus Tabelle 20.

Tabelle 23: Äußere Orientierungsparameter der schrägblickenden Kameras im Koordinatensystem von „Australis“

Parameter	MV-CS27U							
	1	Diff	2	Diff	3	Diff	5	Diff
x [mm]	-2.57	1.15	-76.74	0.16	1.98	-2.16	73.31	0.11
σ_x [mm]	0.16		0.18		0.14		0.13	
y [mm]	33.75	0.18	30.64	0.69	32.23	-0.39	33.48	0.82
σ_y [mm]	0.17		0.16		0.16		0.16	
z [mm]	-76.12	0.78	-0.01	0.08	74.33	0.60	-0.62	0.33
σ_z [mm]	0.25		0.20		0.20		0.13	
Azimut [°]	2.81	-0.59	-29.56	0.06	-1.64	1.01	32.73	-0.66
σ_{Azimut} [°]	0.02		0.01		0.02		0.01	
Elevation [°]	29.05	0.62	-0.12	0.18	-32.23	0.49	0.33	-0.17
$\sigma_{Elevation}$ [°]	0.02		0.02		0.01		0.01	
Roll [°]	2.42	-0.29	-89.57	0.07	-177.01	-0.60	90.45	0.17
σ_{Roll} [°]	0.01		0.01		0.01		0.00	

Die Ergebnisse der relativen Orientierungen der Kameras zueinander wurden mit mittleren Fehlern der Kamerapositionen zwischen 0.13 mm bis 0.25 mm und der Kameraorientierungen zwischen 0.00° bis 0.02° sehr genau bestimmt. Anhand der Abbildung 93 und Abbildung 94 wird deutlich, wie gering

die Schwankungen innerhalb der Messreihen sind. Auf eine Umformung in das UAV-System wird hier verzichtet, da sich die Werte im Vergleich zu Tabelle 21 nur geringfügig ändern.

6.6.4 Fazit

Die Schwankungen in den einzelnen Aufnahmesets können durch die Anzahl und die Verteilung der abgebildeten Zielmarken verursacht werden. Die Kalibriervorrichtung der Professur für Geodäsie und Geoinformatik bemisst insgesamt ungefähr $4 \times 4 \text{ m}^2$, erscheint aber für das Mehrkamerasystem teilweise zu klein dimensioniert. Im Normalfall werden hier einzelne Kameras kalibriert. Durch die Anordnung der Kameras im „Four Vision“-Kamerasystem ist die Flächenleistung jedoch um ein Vielfaches höher als bei einer einzelnen Kamera. Dadurch kann es passieren, dass einige Bilder zu wenige oder gar keine Marken abbilden. Zudem gilt auch hier, je mehr Marken abgebildet werden, desto sicherer und belastbarer werden die Ergebnisse.

Die Parameter der relativen Orientierungen wurden mit Hilfe von „Australis“ sehr genau bestimmt. Schaut man sich die Differenzen vor und nach dem Versuchsflug an, so liegen die Werte um ein vielfaches höher als die Standardabweichungen von „Australis“ es vermuten lassen. Mögliche Ursachen könnten in erster Linie in der veränderten Fokussierung zu suchen sein. Vergleicht man die inneren Orientierungsparameter der Kameras vor und nach dem Flug, fallen hier größere Differenzen in den Brennweiten (max. $0.072 \text{ mm} \rightarrow \text{ca. } 16 \text{ Pixel}$ entlang der Blickrichtung) und in den Bildhauptpunktlagen (max. $0.015 \text{ mm} \rightarrow \text{ca. } 3 \text{ Pixel}$) auf. Außerdem ist zu vermuten, dass die Kamerahalterung ein wenig Spiel hat. Sie besteht aus verklebten Verstrebungen aus Kohlefasermaterial. Schwingungen oder Vibrationen können sich hier übertragen. Sollte eine Auswertung mit den Restriktionen der gegenseitigen Kameraorientierung berücksichtigt werden, müssten Fehler, mindestens in den Größenordnungen der Differenzen vor und nach dem Versuchsflug, berücksichtigt werden.

Wie wirken sich nun die einzelnen Parameter der äußeren relativen Orientierung aus? Betrachtet man die Positionsgenauigkeit der Kameras zueinander, entstehen laut Tabelle 23 Abweichungen bis max. 2.16 mm . Dieser Fehler wirkt sich auf die Bildpositionen translatorisch aus. Das bedeutet, dass die Bilder in ihrer Position in diesem Fall bis zu 2.16 mm abweichen können, was bei Befliegungen vernachlässigbar gering ist. Im Normalfall liegen die Passpunktkoordinaten außerhalb dieses Genauigkeitsspektrums und können außerdem in den Bildern i.d.R. auch nicht so genau bestimmt werden. Würde man diesen Wert als Ground Sampling Distance annehmen, dürfte das „Four Vision“-Kamerasystem in Bezug zum 6 mm Objektiv nicht höher als 2.78 m fliegen.

Tabelle 24: Auswirkungen verschiedener Rotationsfehlerklassen

Brennweite [mm]	Std 0.05°	Max-Min 0.2°	Vergleich 1°	Zul.Abweichung 0.5 Pixel
6	$5.236\text{E-}06 \text{ mm}$	$2.094\text{E-}05 \text{ mm}$	$1.047\text{E-}04 \text{ mm}$	0.0222°
	1.1 Pixel	4.5 Pixel	22.5 Pixel	
9	$7.854\text{E-}06 \text{ mm}$	$3.142\text{E-}05 \text{ mm}$	$1.571\text{E-}04 \text{ mm}$	0.0148°
	1.7 Pixel	6.8 Pixel	33.8 Pixel	

Im Gegensatz dazu wirken sich die Winkelabweichungen rotatorisch aus. Das bedeutet, dass dieser Fehlereinfluss entfernungs- bzw. höhenabhängig ist. Exemplarisch wird in Tabelle 24 gezeigt, wie sich dieser für beide Objektivarten auswirkt. Dazu werden drei Fehlerklassen definiert. Die erste Fehlerklasse soll bei 0.05° liegen und steht damit stellvertretend für die maximale Standardabweichung der 30 Aufnahmesets. Die zweite Fehlerklasse soll den Wert 0.2° haben und repräsentiert damit die maximalen Abweichungen innerhalb der 30 Aufnahmesets. Die dritte Fehlerklasse soll bei 1° liegen und spiegelt die maximale Differenz zwischen den Aufnahmesets vor und nach dem Versuchsflug wider. In der letzten Spalte steht die maximal benötigte Winkelabweichung für eine noch zulässige Verschiebung um 0.5 Pixel im Bild. Tabelle 24 macht deutlich, um wie viele Pixel das „Four Vision“-Kamerasystem in den einzelnen Fehlerklassen verschoben wird. Je nach Anforderung kann entschieden werden, ob die Rotationsparameter genau genug sind.

Es wurde gezeigt, dass das angewendete Verfahren zur Bestimmung der relativen Orientierungsparameter genau genug ist. Die Stabilität der Kamerahalterung lässt für die Rotationsparameter keinen Rückschluss auf die absoluten äußeren Orientierungen der schrägblickenden Kameras zu. Die relativen Orientierungsparameter können jedoch als Näherungswerte genutzt werden. Möchte man diese Werte für die absolute äußere Orientierung nutzen, sollten vor und nach dem Flug die relativen Orientierungsparameter ermittelt und verglichen werden.

Es ist jedoch zu überlegen, ob diese Zielstellung der Bestimmung der absoluten äußeren Orientierung über eine zentrale Kameraorientierung überhaupt noch zeitgemäß ist, denn das Mehrkameranensystem liefert i.d.R. einen stark redundanten Bildverband, in den über automatisch erkannte Verknüpfungspunkte die äußeren Orientierungen mit einer viel höheren Genauigkeit berechnet werden können.

Es konnte ein Versuchsaufbau entwickelt werden, der die Kalibrierung von Mehrkameranensystemen unter Zuhilfenahme der Software „Australis“ erlaubt. Insbesondere für photogrammetrische Belange liefert das vorgestellte Verfahren nicht nur belastbare sondern auch hinreichend genaue Ergebnisse. Ferner zeichnet sich die Methode durch einen vergleichsweise geringen experimentellen wie zeitlichen Aufwand aus.

7 Funktionstest und Anwendung des „Four Vision“-Kamerasystems

7.1 Voraussetzungen

Nachdem das „Four Vision“-Kamerasystem funktionstüchtig ist, wurden zwei Befliegungen durchgeführt. Die erste Befliegung fand auf dem Versuchsfeld der Universität Rostock als Beispielszenario für eine landwirtschaftliche Anwendung jedoch ohne GNSS-Unterstützung statt. Der zweite Flug fand auf dem Gelände der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock als Beispielszenario für eine kommunale Anwendung statt und wurde in der Bachelorarbeit (JAKOBI, 2013) ausgewertet. Es wurde dabei ein Teil des Campus und mehrere Gebäude aufgenommen.

Bei beiden Flügen wurden alle fünf Kameras synchron ohne ein vorgegebenes Zeitintervall zwischen den Aufnahmen ausgelöst. Das Kamerasystem wurde durch die Aluminiumhalterung (Abbildung 63) getragen. Durch Anschluss der Batterie ans Stromnetz der MD4-1000 werden sowohl das UAV als auch das Kamerasystem aktiviert. Während das UAV in der Initialisierungsphase das GNSS-Signal empfängt und somit stetig seine Positionsgenauigkeit erhöht, kann über eine LAN-Verbindung zwischen Kameracomputer und Laptop eine Remote-Verbindung zum Kamerasystem aufgebaut werden (siehe Abbildung 95).



Abbildung 95: MD4-1000 mit „Four Vision“-Kamerasystem und LAN-Verbindung kurz vor Flug über Campus (Quelle: (JAKOBI, 2013))



Abbildung 96: MD4-1000 mit „Four Vision“-Kamerasystem während des Fluges

Es folgen die Einstellungen der Belichtungszeit und des Weißabgleichs. Dazu ist es sinnvoll, die MD4-1000 samt Kamerasystem auf das eigens konzipierte Stativ zu stellen. Als Hilfsprogramm dient das programmierte Tool „FN_get_ExPo_Gain_v2.exe“. Die Ergebnisse werden protokolliert und angezeigt und können in die Konfigurationsdatei (Tabelle 12) für das Hauptprogramm manuell übernommen werden.

Nachdem die Belichtungszeit und der Weißabgleich durchgeführt wurden, können optional die Objektive der Kameras auf den entsprechenden Entfernungsbereich fokussiert werden. Dazu muss das Videobild der entsprechenden Kamera angezeigt werden. Als Anzeigeprogramm eignet sich hierfür die mitgelieferte Software „SampleMFC“, worüber eine Kamera manuell eingestellt werden kann. Die Kameras können aber auch im Vorfeld der Befliegung auf die hyperfokale Distanz fokussiert und arretiert werden und müssen somit unmittelbar vor dem Einsatz nicht nachfokussiert werden. Standardmäßig wurden alle fünf Kameras mit Blende 4 eingestellt.

Signalisiert die MD4-1000, dass sie startklar ist, muss das Hauptprogramm „VirtualFG_ColorCam_v2.exe“ gestartet werden. Es werden alle Kameras mit den gleichen Kameraparametern gesetzt und eine vorgegebene Anzahl von Durchläufen abgearbeitet. Die resultierende Bilderanzahl beträgt somit 5 mal Anzahl der Durchläufe. Die Bilder werden im TIF-Format gespeichert. Das Kamerasystem nimmt nach dem Start des Hauptprogramms und einer kurzen Initialisierungsphase sofort Bilder auf. Das bedeutet, dass bereits Bilder vor und während des Starts bzw. während und nach

der Ladung, sollten nicht vorher alle vorgegebenen Schleifendurchläufe durchgeführt worden sein, gemacht werden, die später aussortiert werden sollten (vgl. Tabelle 25 und Tabelle 29, Anzahl aufgenommener versus verwendeter Bilder).

Läuft das Kamerasystem, muss die Remote-Verbindung getrennt und das Kabel vom Computer des Kamerasystems entfernt werden. Anhand der orange blinkenden LEDs auf dem Controller für synchrones Auslösen kann erkannt werden, ob das Kamerasystem noch läuft. Sind alle Kabelverbindungen getrennt und steht die MD4-1000 frei, kann das Startmanöver durchgeführt werden. Tests auf dem Versuchsfeld zeigten, dass die MD4-1000 in der Lage ist, mit dem Kamerasystem mindestens 15 min in der Luft zu fliegen und somit im üblichen Zeitrahmen für UAV-Flüge bleibt. Dabei absolvierte das UAV verschiedene Flugmanöver. Aus Sicherheitsgründen wurde der Flug nach 15 min beendet. Die Basisstation zeigte dabei noch eine Restflugzeit von 7 min an.

7.2 Befliegung: Versuchsfeld

Am 24.05.2013 wurde ein Testflug mit dem „Four Vision“-Kamerasystem über dem Versuchsfeld der Universität Rostock durchgeführt. Zum einen sollte die Funktionstüchtigkeit des Kamerasystems untersucht werden, zum anderen sollte das Versuchsfeld stellvertretend für Vegetationsaufnahmen in der Landwirtschaft kartiert werden.

Tabelle 25: Kenndaten zur Befliegung über dem Versuchsfeld

Zweck		„Four Vision“ Testflug
Datum	24.05.2013	
Wetter	bewölkt, leicht windig, wechselhaft	
Plattform	UAV Nutzlast	MD4-1000 "Four Vision"-Kamerasystem
Bilder	Anzahl	5x355
	Anzahl verwendeter Bilder bezogen auf Objekt	5x212
	Belichtungszeit [Sek.]	1/1000
	Blende	4
Flug (nach Flugdatenschreiber)	Flughöhe [m]	45
	Flugzeit [Min:Sek]	10:05
	Geschwindigkeit [m/s]	kein GNSS
	Wegstrecke [m]	kein GNSS
Auswertung	Software	„Photoscan“
	Fehler [Pixel] (mean reprojection error)	0.21
	Größe Gebiet [km ²]	0.03
	Ground Sampling Distanz [m/Pixel] (theoretisch)	0.035 (für 6mm Objektiv)
	Auflösung [m/Pixel] (laut Protokoll)	0.030
	Anzahl GCPs	14

Da bis dato das störende EM-Feldproblem nicht gelöst war, fand der Flug ohne GNSS-Unterstützung manuell statt. Einen Überblick über die wichtigsten Flugparameter gibt Tabelle 25.

Bei einer Auflösung von 1280 x 1024 Pixel, einer Zellengröße von 4.65 x 4.65 μm^2 , einer Flughöhe von 45 m und einer Brennweite von 6 mm ergibt sich theoretisch eine GSD von ca. 3.5 cm/Pixel für das Zentrum einer Nadiraufnahme. Für eine Brennweite von 9 mm ergibt sich bei Nadiraufnahmen

eine GSD von 2.3 cm. Bei den schrägblickenden Kameras wird dieser Wert in Abhängigkeit der Entfernung entsprechend größer und liegt bei einer Elevation von 60° (30° zum Lot) zwischen 2.4 und 3.3 cm.

Durch die fehlende GNSS-Unterstützung konnte der Flug zwar mit Hilfe der barometrischen Höhenbestimmung in der gewünschten Flughöhe durchgeführt werden, jedoch ist im manuellen Modus ein ordnungsgemäßes Abfliegen einer regelmäßigen Trajektorie kaum möglich (siehe Abbildung 97). Zudem wurden keine GNSS-Positionen für die Bildaufnahmepunkte als Näherungswerte für die Auswertung gespeichert. Für die spätere Georeferenzierung wurden GCPs durch Zielmarken am Boden im Testgebiet markiert (blaue Fähnchen in Abbildung 97) und per GNSS-RTK auf 2-3 cm genau eingemessen.

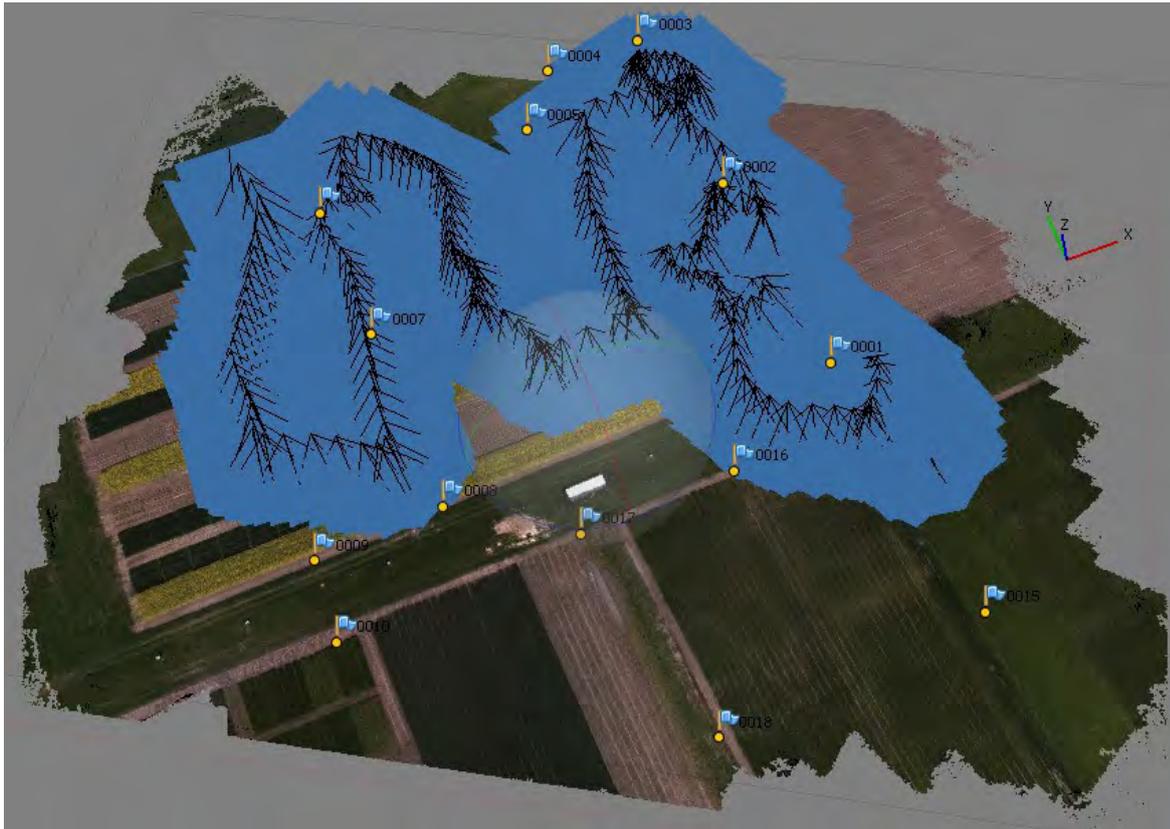


Abbildung 97: Flugtrajektorie des "Four Vision" Testflugs vom 25.05.2013

Mit Hilfe der Software „PhotoScan“ konnten die Bilder automatisch relativ zueinander orientiert und eine Flugtrajektorie berechnet werden. Die äußeren Orientierungsparameter jedes Bildes wurden photogrammetrisch unter Berücksichtigung von 14 Vollpasspunkten in den Bildern bestimmt.

Es wurden 212 brauchbare Bildersets (jeweils 5 Bilder) gemacht. Die übrigen Bilder zeigen den unmittelbaren Untergrund des Startpunktes, da das Kamerasystem vor dem UAV-Start schon läuft. Erst ab einer gewissen Höhe entstehen für die Auswertung brauchbare Bilder. Zudem unterbrach das Kamerasystem während des Fluges die Aufnahmen. Die Gründe dafür sind wahrscheinlich bei einem Wackelkontakt zu suchen, da der Kameraoberbau mit dem -unterbau über selbstgelötete Kabel mit Mini-USB Anschluss verbunden sind. Die Unterbrechung der Aufnahmen hatte keine Auswirkungen auf das Flugverhalten.

In Abbildung 97 sind die Kamerablickrichtungen (schwarze Linien) und die Bildebenen (blaue Flächen jeweils senkrecht zu schwarzen Linien) skizziert. Auch wenn „Photoscan“ über die relativen Orientierungsparameter der einzelnen Kameras keine Informationen hat, verlaufen die Kamerablickrichtungen augenscheinlich pro Bildersets in einem Punkt zusammen, was für ein synchrones Auslösen der Bilder spricht.



Abbildung 98: Orthophoto des Versuchsfluges über dem Versuchsfeld der Universität Rostock

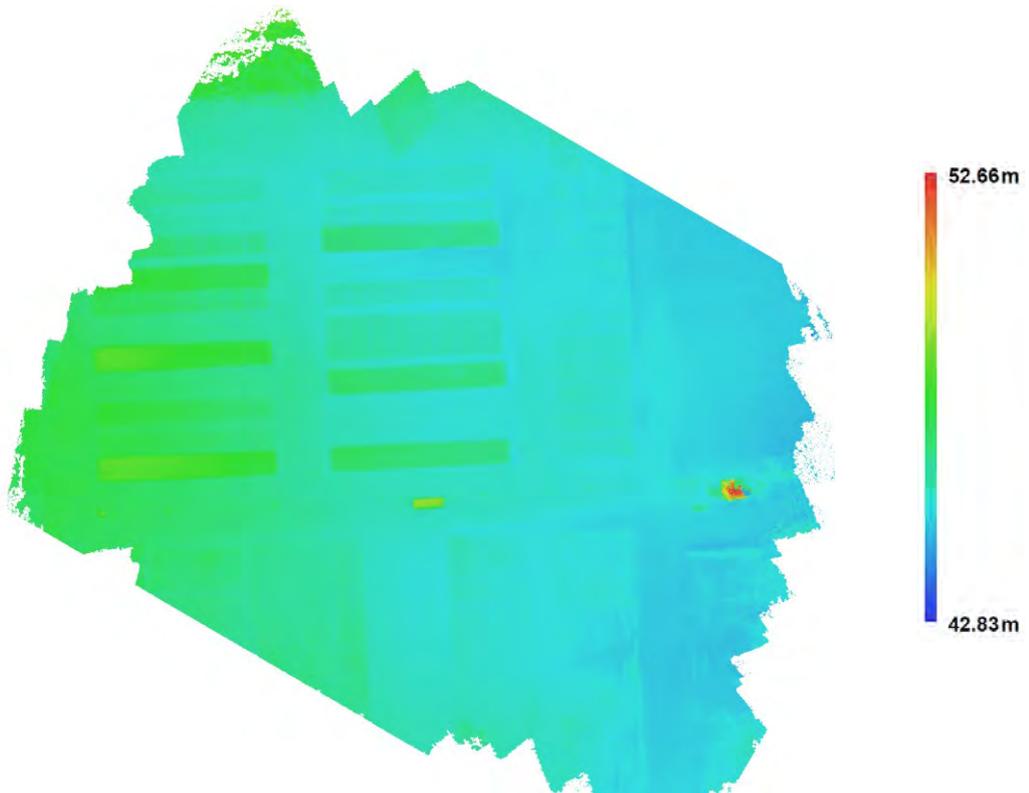


Abbildung 99: OrthoDEM des Versuchsfeldes der Universität Rostock

Als Ergebnis entstanden das Orthophoto in Abbildung 98, das OrthoDEM in Abbildung 99 und die 3D-Punktwolke in Abbildung 97, anhand derer die einzelnen Vegetationsarten klassifiziert oder sogar die Vegetationshöhen abgeleitet werden können. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Kameras nicht radiometrisch kalibriert sind, die Bilder aber durch „Photoscan“ radiometrisch angeglichen wurden. Normalerweise müssten die Bilder, da sie aus verschiedenen Blickrichtungen aufgenommen wurden, radiometrisch absolut durch die BRDF korrigiert werden, so wie es in Kap.4.2.4 angedeutet wurde. Jedoch sollen diese Korrekturen nicht Gegenstand dieser Dissertation sein. (KIRCHGÄBNER, 2013) beschreibt in ihrer Dissertation ausführlich diesen Weg.

Abbildung 100 zeigt die Bodenabdeckung des Zielgebietes zusammen mit den Kamerastandpunkten (schwarze Kreise). Man erkennt, dass im zentralen Bereich eine Bildüberlagerung von mehr als 9 Bildern pro Bodenpunkt erreicht werden konnte.

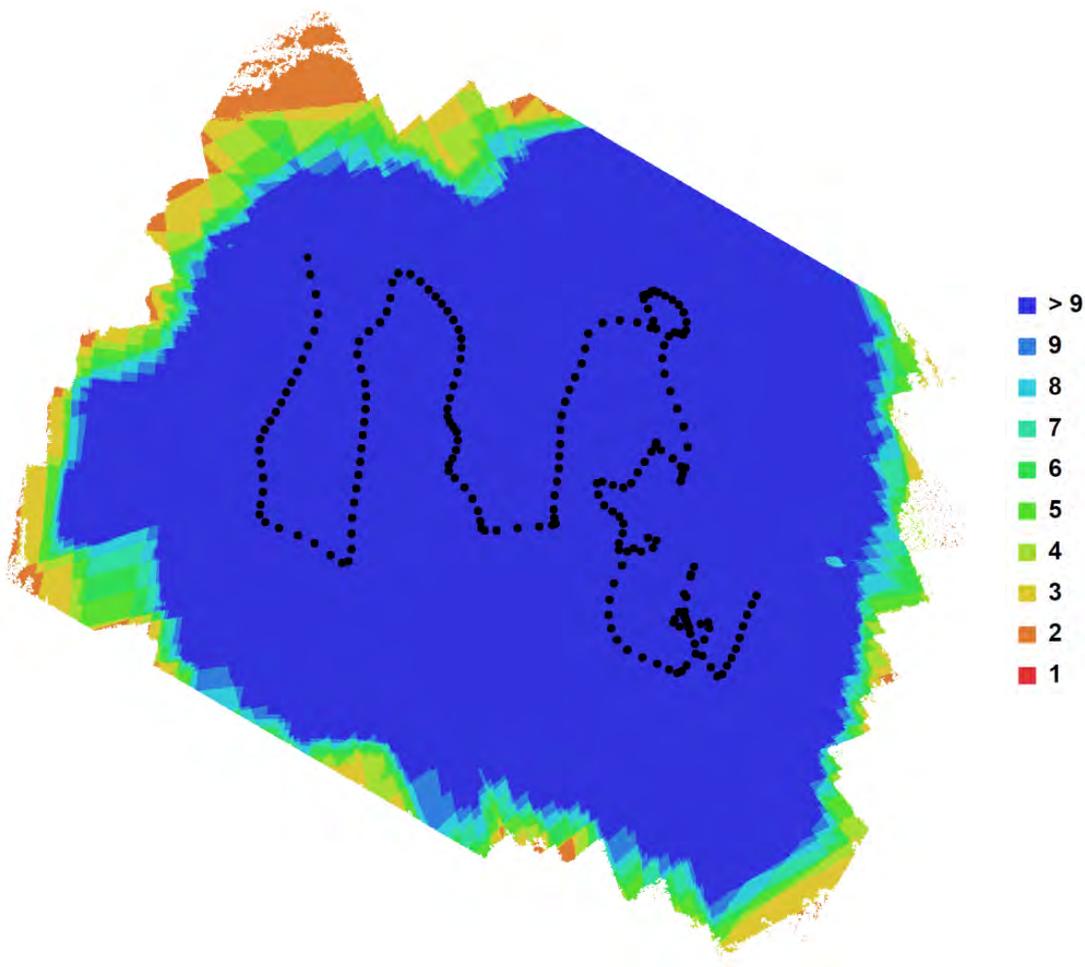


Abbildung 100: Bodenabdeckung (Footprints) des Versuchsfluges über dem Versuchsfeld der Universität Rostock

Da ein gleichmäßiges Raster mit konstanten Fluggeschwindigkeiten nicht realisiert werden konnte, sind auch die Überlappungen entsprechend unterschiedlich. Daher sind die Redundanzen der Bilder in Bezug zur abgebildeten Oberfläche (Footprints) wenig repräsentativ für ein regelmäßiges Flugraster.

Abbildung 101 zeigt ein zusammengehörendes Aufnahmeset der 5 Kameras dieses Fluges. Bei den einzelnen Bildern handelt es sich bereits um nachbearbeitete True-Orthophotos, bei denen sowohl die nachberechneten inneren Orientierungsparameter als auch das Geländemodell angebracht wurden. Daher sind die Bildränder ausgefrantzt, da hier unterschiedliche Objekthöhen mit steiler werdender Visur deutlich hervortreten.

Durch die 50%ige Transparenz der Bilder sind die Überlappungsbereiche der einzelnen Kameras sichtbar. Es ist zu erkennen, dass die Überlappungsbereiche nicht gleichmäßig sind. Das liegt an der

Montage der Kameras im Kameraunterbau bzw. den relativen Orientierungen der einzelnen Kameras zueinander (siehe Tabelle 21). Die anderen Bildersets zeigen ein ähnliches bis gleiches Verhalten. Die „Malteser Kreuz“-Konfiguration ist erkennbar. Zudem wird die Richtungsabhängigkeit der Aufnahmen verdeutlicht.



Abbildung 101: Aufnahmeset des „Four Vision“-Kamerasystems mit 50%iger Transparenz

Als innere Orientierungsparameter gingen die berechneten Parameter der laborseitigen Kamerakalibrierungen als Näherungswerte ein (Tabelle 26). „Photoscan“ ist in der Lage, Bilder entsprechend ihrer inneren Orientierungen zu gruppieren. Die Objektive der Kameras wurden vor dem Flug neu auf eine Entfernung von 45 m fokussiert. Dies änderte die inneren Orientierungsparameter der einzelnen Kameras geringfügig. Blende 4 wurde nicht geändert. Die von „Photoscan“ nachberechneten inneren Orientierungsparameter stehen in Tabelle 27.

Bei den Berechnungen der Orthophotos, OrthoDEMs bzw. Punktwolken mit „Photoscan“ als auch mit „Pix4UAV“ ist es leider nicht möglich, die Restriktionen bzgl. der Kameraorientierungen zueinander zu berücksichtigen. Daher wurden alle Bilder einzeln berechnet. Tabelle 28 zeigt die mittleren Entfernungen der einzelnen Projektionszentren der schrägblickenden Kameras in Bezug zur Nadirkamera eines Aufnahmesets und dazu entsprechende Statistiken. So wird der Abstand zwischen Cam0 und Cam1 mit dem Median von 14.47 cm berechnet. Der Mittelwert beträgt 13.98 cm bei einer Stan-

dardabweichung von 2.27 cm. Dabei schwanken die Werte zwischen 7.28 und 18.28 cm in einer Differenz von 11 cm. Ein ähnliches Verhalten ist bei den anderen Kamerapositionen in Bezug zur Nadirkamera zu beobachten.

Tabelle 26: Initiale innere Kameraparameter

Parameter (initial) [Pixel]	Cam0	Cam1	Cam2	Cam3	Cam4
c	1320.98	1975.67	1977.23	1971.21	1979.48
X	659.088	649.539	670.556	638.493	603.405
Y	463.068	514.708	545.435	496.914	539.992
K1	-0.213	-0.257	-0.252	-0.261	-0.256
K2	0.209	0.223	0.2	0.334	0.273
K3	-0.097	-0.031	0.018	-0.455	-0.239
P1	0	0	0	0	0
P2	0	-0.001	0	0	0

Tabelle 27: Nachberechnete innere Orientierungsparameter durch „Photoscan“

Parameter (refined) [Pixel]	Cam0	Cam1	Cam2	Cam3	Cam4
c	1314.19	1979.35	1984.31	1972.38	1981.85
X	661.241	651.025	672.946	638.428	598.606
Y	464.31	514.26	546.283	497.378	538.744
K1	-0.209	-0.257	-0.255	-0.253	-0.254
K2	0.190	0.222	0.208	0.243	0.251
K3	-0.075	-0.039	0.012	-0.143	-0.149
P1	0	0	0	0	0
P2	0	-0.001	0	0	0

Die Werte in Tabelle 28 zeigen ein sehr starkes Rauschverhalten, wenn man davon ausgeht, dass die Kameras fest über eine Halterung miteinander verbunden sind. Dieses Verhalten kann u.a. auf die Einflüsse bei der Prozessierung von „Photoscan“ zurückgeführt werden. Restfehler während der Berechnungen werden in die Parameter der äußeren Orientierung geschoben, da es kaum eine Rolle spielt, ob die Kameraposition bei der Flughöhe von 45 m 5 cm verschoben liegt. Diese Restfehler können z.B. aus fehlerhaften Werten der inneren Orientierung, aber auch durch Fehler, die bei der automatischen Verknüpfung der Bilder gemacht werden, entstehen.

Tabelle 28: Entfernung der Projektionszentren der schrägblickenden Kameras zur Nadirkamera

Distanzen zu Cam0	Cam1	Cam2	Cam3	Cam4
Median [m]	0.1447	0.1475	0.0813	0.0848
Mittelwert [m]	0.1398	0.1455	0.0815	0.0850
Standardabw. [m]	0.0227	0.0184	0.0168	0.0119
Max [m]	0.1828	0.1835	0.1296	0.1204
Min [m]	0.0728	0.0515	0.0246	0.0541

Es lässt sich darüber diskutieren, ob die relativen Orientierungen untereinander so genau und stabil sind, dass von der äußeren Orientierung einer Kamera auf die anderen Kameras umgerechnet werden kann. Jedoch belegt dieses Beispiel, dass der Schwankungsbereich, in diesem Fall der Kamerapositionen zueinander, so groß ist, dass man hier auch mit relativ schlechten Orientierungsgenauigkeiten

(siehe Tabelle 23) immer noch um ein Vielfaches besser ist und man damit die Fehleranteile an dieser Stelle minimieren könnte.

Auch wenn die Rahmenbedingungen für diesen Flug nicht optimal waren, so entstanden auswertbare Ergebnisse in Form von Orthophotos und Höhenmodellen. Dem Landwirt ist mit diesem „Four Vision“-Kamerasystem ein Instrument gegeben, mit dem er zusätzlich zu diesen standardmäßigen Ergebnissen noch richtungsabhängige Signaturen erfassen kann. Außerdem werden durch den schrägen Blick auf den Vegetationsbestand, natürlich in Abhängigkeit von der Wachstumsdichte und Wuchshöhe, Mischsignaturen anderen Gegenständen und Oberflächen, die kleiner als der Vegetationsbestand sind, wie z.B. vom Boden, vermieden. Jedoch ist wohl der wichtigste Aspekt im Vergleich zu Nadirkameras, dass eine größere Fläche aufgenommen werden kann und somit Flugzeit eingespart bzw. größere Flächen mit der gleichen Batterie befliegen werden können.

7.3 Befliegung: Universitätsgelände mit Gebäuden

Am 12.09.2013 wurde die zweite Befliegung mit dem „Four Vision“-Kamerasystem über dem Gelände der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock unter sehr guten Flugbedingungen (kaum Wind, leichte Bewölkung) durchgeführt. Ziel dieses Fluges war zum einen, die Autopilotfunktion im Zusammenhang mit dem „Four Vision“-Kamerasystem zu testen, da zu diesem Zeitpunkt das Problem der Interferenzen der emittierten EM-Felder soweit gelöst war, und zum anderen stellvertretend für kommunale Anwendungen bebaute Gebiete aufzunehmen, um entsprechende 3D-Modelle ableiten zu können.



Abbildung 102: geplante Flugroute (Screenshot mdCockpit, Quelle Hintergrundbild: Google Earth)

Die geplante Flugroute ist in Abbildung 102 zu erkennen. Sie bezieht sich in ihrer Planung auf eine 60%ige Querüberlappung der Nadirkamera. Die Längsüberlappung hängt hingegen vom Auslöseintervall ab und beträgt schätzungsweise 90-99%. Während des Fluges richtet sich das UAV entlang der Flugrichtung aus, so dass die Blickrichtungen der schrägblickenden Kameras diagonal wechselten. Tabelle 29 gibt einen Überblick über die wichtigsten Flugparameter.

Beim Flug über dem Campus dauerte ein Aufnahmezyklus, also gleichzeitiges Auslösen und Speichern der Bilder, in der derzeitigen Hardwarekonfiguration bei 1000 Durchläufen mit fünf Kameras im Durchschnitt 0.64 Sek. mit einer Standardabweichung von ± 0.12 Sek. Der kürzeste Durchlauf betrug 0.39 Sek. und der längste 1.67 Sek. Wahrscheinlich liegt das daran, dass das Betriebssystem (Windows XP) mit auf dem gleichen Speichermedium installiert ist und zwischenzeitlich Ressourcen benötigte.

Tabelle 29: Kenndaten der Befliegung über dem AUF-Campus

Zweck	
Datum	12.09.2013
Wetter	kaum Wind, leichte Bewölkung
Plattform	UAV Nutzlast
	MD4-1000 "Four Vision"-Kamerasystem
Bilder	Anzahl
	5x1000
Anzahl verwendeter Bilder bezogen auf Objekt	5x697
Belichtungszeit [Sek.]	1/500
Blende	4
Flug (nach Flugdatenschreiber)	
Flughöhe [m]	50
Flugzeit [Min:Sek]	9:39
Geschwindigkeit [m/s]	max. = 3
Wegstrecke [m]	1008
Auswertung	
Software	„Photoscan“
Fehler [Pixel] (mean reprojection error)	0.39
Größe Gebiet [km ²]	0.038
Ground Sampling Distanz [m/Pixel] (theoretisch)	0.039 (für 6mm Objektiv)
Auflösung [m/Pixel] (laut Protokoll)	0.029
Anzahl GCPs	11

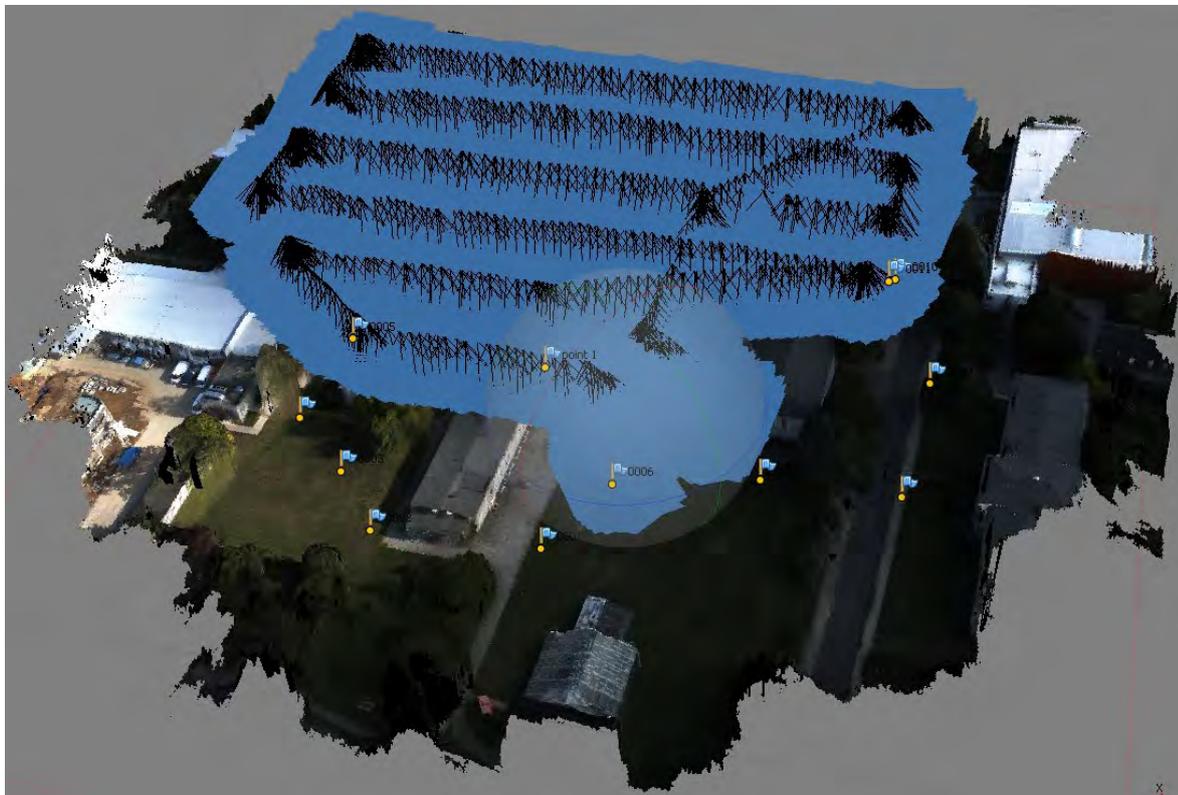


Abbildung 103: Berechnung des zweiten „Four Vision“-Kamerafluges mit „Photoscan“: schwarze Linien geben die Blickrichtung und den Kamerastandpunkt und blaue Fläche die Bildebene der Kameras wider



Abbildung 104: 3D-Punktwolke des zweiten „Four Vision“-Kamerafluges

Die Belichtungszeit wurde auf $2000 \mu\text{Sek.}$ ($1/500 \text{ Sek.}$) den Wettergegebenheiten angepasst. Da hier bereits Effekte der Bewegungsunschärfe entstehen können, wurde der Flug langsam mit einer Geschwindigkeit von 3 m/Sek. automatisch durchgeführt. Es kam während des Fluges zu keinen hektischen Ausgleichsmanövern. Die Fokussierung wurde im Vorfeld auf 45 m Entfernung eingestellt.

Es entstanden 3485 auswertbare Bilder. Mit dieser hohen Anzahl der Bilder ist das Gebiet überrepräsentiert. Trotzdem wurden alle Bilder mit „Photoscan“ verknüpft und über 11 Vollpasspunkte, die mit der GNSS-RTK auf $2\text{-}3 \text{ cm}$ genau eingemessen wurden, orientiert. Dieser Berechnungsvorgang lief 10 Tage auf einem Computer mit Intel® Core™ i5 CPU, 3.6 GHz , 16 GByte Arbeitsspeicher und einer NVIDIA GeForce GT 330 Grafikkarte.

Einen 3D-Eindruck in Form von Screenshots geben Abbildung 103 und Abbildung 104. Man erkennt in der Flugplanung, dass zwar mit 60% Querüberlappung geflogen wurde, dass aber die Längsüberlappung um ein Vielfaches höher ist. Zum einen liegt das an der programmierten Auslösesoftware, in der noch keine Bildintervallzeiten vorgegeben werden können, zum anderen ist diese Zahl aber auch repräsentativ für das Leistungspotenzial des „Four Vision“-Kamerasystems. Es obliegt dem Benutzer, die Anzahl der Bilder für seine Zwecke entsprechend ausdünnen.

Abbildung 105 gibt einen Eindruck über die Bodenabdeckung aus dem Report von „Photoscan“. Da dieser jedoch ab 10 Bilder pro Bodenpunkt keine größeren Werte ausgibt, wurden zu einem Punkt am Boden exemplarisch aus der Mitte der 3D-Szene mit Hilfe von „Photoscan“ die zugehörigen Bilder extrahiert. Tabelle 30 stellt die Anzahl der Bilder pro Kamera dar. Insgesamt wurde der ausgewählte Punkt am Boden in 413 Bildern aufgenommen. Bei dieser hohen Zahl macht es wenig Sinn, die Footprints der Bilder in einer Grafik darzustellen, da diese unübersichtlich werden würde.

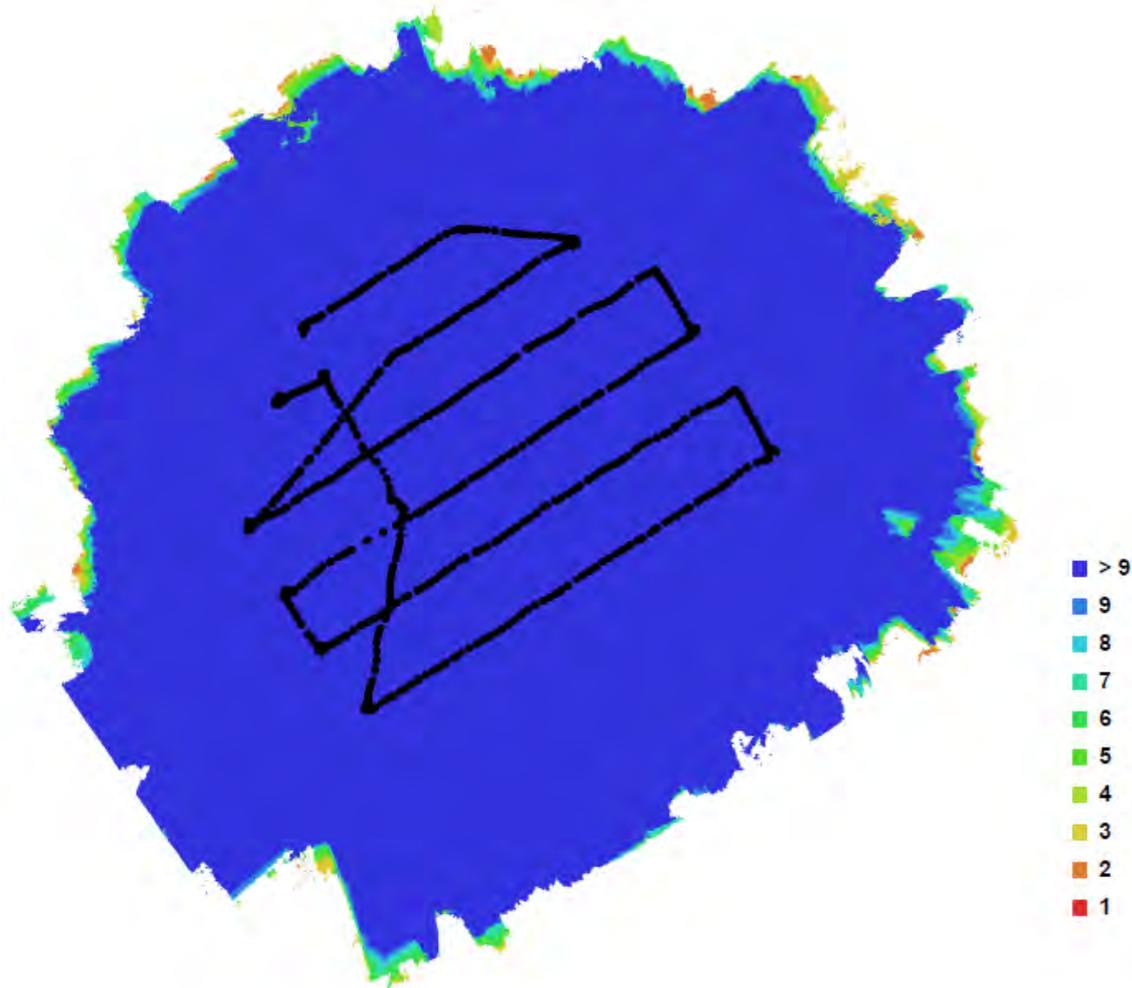


Abbildung 105: Bodenabdeckung (Footprints) der Bilder über dem Fakultätsgelände der Universität Rostock

Tabelle 30: Überblick über die Anzahl der Bilder pro Kamera für den gleichen Punkt am Boden und den abgebildeten Azimut- und Elevationswinkelbereich

Kamera	Bezeichnung	Anzahl Bilder	Azimutbereich [°]	Elevationsbereich [°]
Cam0	MV-CS27U_5	83	57.8 - 286.1	35.4 - 73.0
Cam1	MV-CS27U_4	116	1.4 - 357.6	54.7 - 86.9
Cam2	MV-CS27U_1	54	119.3 - 349.6	42.9 - 72.8
Cam3	MV-CS27U_2	83	14.9 - 302.5	37.2 - 78.6
Cam4	MV-CS27U_3	77	0.3 - 358.3	46.1 - 70.6
Summe:		413		

Über die Positionen der Bilder lassen sich aus den Blickrichtungen der Azimut- und der Elevationswinkel bestimmen. Der Rollwinkel der Kamera spielt für diese Betrachtung keine Rolle. Azimut- und Elevationswinkel wurden für jede der Kameras in einem Polarplot in Abbildung 106 dargestellt (Bodenpunkt=Plot-Zentrum). Der kleinste Elevationswinkel hat einen Wert von rund 35.4°.

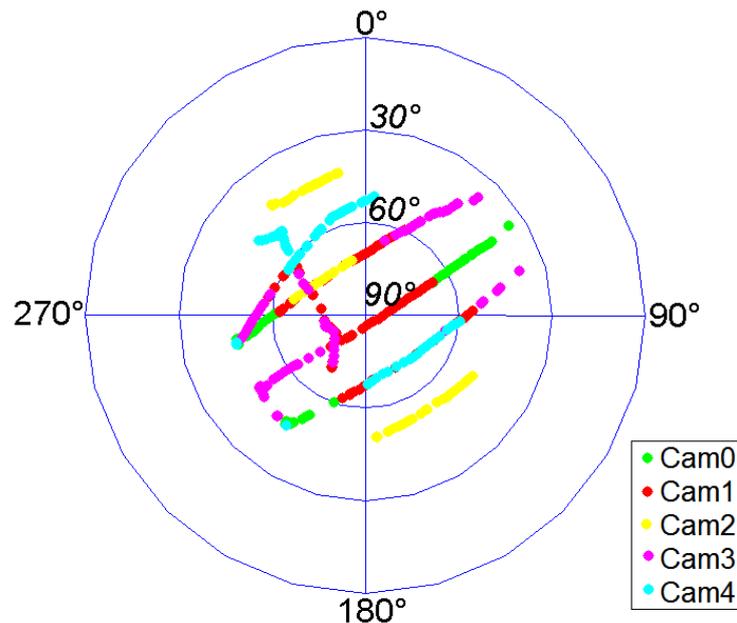


Abbildung 106: Azimut- und Elevationswinkel für jede Kamera, die den ausgewählten Punkt am Boden abbildet

Die Streifenstruktur des Fluges ist erkennbar. Die größten Redundanzen treten entlang der Flugstreifen auf. Jedoch erkennt man auch, dass der Bodenpunkt mit allen Kameras in 6 Streifen statt nur mit der Nadirkamera in lediglich 3 Streifen abgebildet wird. Die Flugstreifen sind in südwestlicher Richtung durch die Flugplanung bereits bei ca. 45° Elevation beendet. In nordöstlicher Richtung wurde der Flug noch nicht beendet. Hier wurden Aufnahmen bis zum Elevationswinkel von ca. 35° gemacht, bevor die schrägblickenden Kameras den Bodenpunkt nicht mehr abbildeten.

An einigen Bildpositionen erkennt man aber auch, dass sich der Bodenpunkt in zwei Bildern des gleichen Aufnahmesets abbildete. Besonders hoch ist die Redundanz in den Umkehrpunkten der Flugroute, da hier das UAV mehrere Sekunden über einem Punkt steht und sich dreht. Im Hinblick auf die mögliche Modellierung der BRDF liegen die Aufnahmeorte aber gut verteilt.

Auf eine Modellierung des Anisotropiefaktors wird an dieser Stelle verzichtet, da die Bilder ein wenig unterbelichtet und die Wetterbedingungen durch die Wolkenbildung wechselhaft waren. Der Flugversuch zeigte, dass ein Punkt am Boden bei einem regelmäßigen Flugraster aus sehr vielen Blickrichtungen mit dem „Four Vision“-Kamerasystem aufgenommen wird. Hieraus könnte man die bidirektionalen Reflexionseigenschaften für diesen Punkt ableiten, natürlich unter der Voraussetzung, dass der Aufnahmezeitraum kurz war und sich dabei das Wetter und die Beleuchtungsverhältnisse nicht gravierend geändert haben. Derzeitig stellt diese Herleitung aber noch ein Problem dar, da die Kameras nicht radiometrisch absolut bzw. relativ kalibriert sind. Diese Kalibrierung ist aufwendig und so an der Professur nicht durchführbar.

Die schrägblickenden Kameras waren um etwa 30° zur Blickrichtung der Nadirkamera während der Befliegungen geneigt (Elevationswinkel etwa 60°). Damit wird ein Blickfeld laut Tabelle 11 von insgesamt 89,63° erfasst. Theoretisch ist es möglich die schrägen Kameras auf etwa 60° zur Blickrichtung der Nadirkamera zu neigen. Das entspricht dann einem Blickfeld von insgesamt 149,63°. Dabei überlappen sich die Bildbereiche nicht mehr mit dem Nadirbildbereich. Es entstünden somit Lücken im Sichtbereich.

Ganz deutlich sind in Abbildung 104 Fassaden und Texturen von Gebäude zu erkennen, die bei Nadiraufnahmen kaum oder verzerrt aufgenommen werden. Durch die Möglichkeit, die schrägblickenden Kameras noch weiter zu neigen (bis ca. 60° vom Lot), könnten auch Fassaden noch genauer erfasst werden. Im Hinblick auf die automatische Modellierung von 3D-Gebäuden kann so ein höherer Level of Detail erreicht werden. Zudem wird die 3D-Punktwolke in Abhängigkeit der Auswertesoftware detaillierter und genauer.

Das „Four Vision“-Kamerasystem vereint in sich die Möglichkeit, sowohl Orthophotos und OrthoDEMs mit der Nadirkamera zu erzeugen, als auch durch die schrägen Visuren Fassaden verzerrungsfreier abzubilden. Zudem entstehen 5 synchron ausgelöste Bilder für verschiedene Blickrichtungen. Ein UAV mit nur einer Kamera müsste wahrscheinlich fünf mal so viel oder langsamer fliegen, um die Kamera immer wieder neu auszurichten, was zu Lasten des Akkus und des Gimbal geht.

7.4 Fazit



Abbildung 107: MD4-1000 mit „Four Vision“-Kamerasystem im Flugbetrieb

In den beiden Befliegungen mit dem „Four Vision“-Kamerasystem konnte gezeigt werden, dass die Kombination aus MD4-1000 und „Four Vision“-Kamerasystem in der Lage ist, Bilder aus der Luft aufzunehmen und somit die Operationalität gegeben ist. Dabei entstanden Orthophotos mit einer Bodenauflösung von ca. 3.5 cm bei einer Flughöhe von ca. 45 m. Das Kamerasystem ist zudem nicht zu schwer für die MD4-1000, so dass Flugmanöver sowohl manuell als auch mit Autopilot durchgeführt werden können. Durch die Lagerung im Schwerpunkt wirken sich Ausgleichsbewegungen des Gimbal nicht auf das Flugverhalten der Trägerplattform aus.

Außerdem entsteht eine sehr große Anzahl von Bildern. Ein Auslösezyklus liegt deutlich unter einer Sekunde. Damit nimmt das Kamerasystem i.d.R. zu viele Bilder auf, so dass das abgebildete Gebiet überrepräsentiert ist. Jedoch existiert noch Potential, das Kamerasystem zeitlich auszubremesen.

Im Vergleich mit einer einzelnen Nadirkamera liefert das Kamerasystem die fünffache Menge an Bildern mit synchron ausgelösten unterschiedlichen Blickrichtungen. Das Kamerasystem ist i.d.R. zwar schwerer als eine Nadirkamera, jedoch konnte gezeigt werden, dass die MD4-1000 durchaus in der Lage ist, zusammen mit dem Kamerasystem mehr als 10 min zu fliegen.

Es darf konstatiert werden, dass das Ziel, ein Mehrkamerasystem zu konzeptionieren, zu entwickeln und zu bauen, erreicht wurde. Es gibt noch Themen, wie z.B. die radiometrische Kalibrierung oder definierbare Bildfolgezeiten, die für das „Four Vision“-Kamerasystem noch untersucht werden müssen. Jedoch hat das Kamerasystem bewiesen, dass es bereits eingesetzt werden kann und auswertbare Bildersets liefert.

8 Ausblick

Im Hinblick auf das „Four Vision“-Kamerasystem gibt es natürlich noch Dinge, die verbessert werden können. Als dringendste Erweiterung im Funktionsumfang der Software ist hier eine Möglichkeit zum zeitlich gleichmäßigen Auslösen der Kameras mit unterschiedlichen Bildfolgezeiten zu nennen. Außerdem könnte zukünftig das Kamerasystem so erweitert werden, dass statt der LAN-Verbindung eine permanente WLAN-Verbindung zum Kamerasystem existiert und das Kamerasystem erst im Zielgebiet aktiviert wird. So könnte auch kontrolliert werden, ob das Kamerasystem während des Fluges noch ordnungsgemäß funktioniert. Zur Erhöhung der funktionalen Stabilität zählen auch stabile Kabelverbindungen zwischen den einzelnen elektronischen Komponenten.

Am Gewicht des „Four Vision“-Kamerasystems lässt sich mittlerweile einiges einsparen. VRmagic bietet bereits ein Kamerasystem mit bis zu vier synchron ausgelösten Kameras an³⁴, das augenscheinlich einen relativ hohen Gewichtsanteil einspart.

Zudem gab es während der Entwicklungs- und Bauphase diverse Neuerungen im UAV-Bereich, um die das Kamerasystem erweitert werden könnte. So existieren bereits autonome Gimbal, wie z.B. von Zenmuse³⁵, die unabhängig von der Trägerplattform und zudem sehr schnell reagieren. Außerdem ist der Gedanke an UAV-Schwärme, die ähnlich dem „Four Vision“-Kamerasystem jeweils aus verschiedenen Blickrichtungen Bildaufnahmen durchführen könnten, interessant.

Grundsätzlich vorstellbar ist im Bereich der UAV-Technologie, dass die Nutzlast immer mehr in den Fokus rückt. Bislang wurde an verschiedenen Arten unbemannter Trägerplattformen geforscht. Die Nutzlast hingegen wurde meistens separat entwickelt und dann mechanisch und elektronisch mit dem UAV verbunden. Die Kommunikation zwischen der Nutzlast und der Trägerplattform beschränkte sich oftmals in der Registrierung von Auslösemomenten, die Sammlung von Daten und die Übertragung von Daten an die Bodenstation. Die Leistungsfähigkeit eines Steuerungscomputers in einem UAV ist meist nicht voll ausgereizt. Microdrones geht bspw. einen Weg, bei dem Funktionen oder Computerroutinen auf die UAV-CPU ausgelagert werden können. Diese Schnittstellen lassen die Abfrage von UAV-Sensordaten zu. Die Nutzlast erfährt dadurch wichtige Informationen über die Flugparameter während des Fluges. Bspw. könnte das Auslösen der Kameras bei instabiler Fluglage unterbunden werden. Die Nutzlast könnte sich anpassen.

Der umgekehrte Weg, also das die Nutzlast Einfluss auf den Flightcommander nimmt, wäre jedoch auch denkbar und noch viel komplexer. Ein einfaches Beispiel wäre: Wegen Turbulenzen in der Luft konnte ein Bild nicht aufgenommen werden. Das UAV müsste dann auf die Kamera warten, bevor sie weiter fliegt. Einfache Kommandos, wie z.B. Stop oder Continue, würden auf einer niedrigen Ebene ins Flugeschehen eingreifen. Dabei könnte immer garantiert sein, dass das UAV die Kontrolle behält.

Die Ressourcen an Bord eines UAV werden mit der Zeit aber auch immer leistungsfähiger, so dass man sich vorstellen kann, Bilder an Bord in Real-Time zu verarbeiten. Dieses Szenarium geht schon stark in die Richtung Hinderniserkennung und autonomer Flug.

³⁴ <http://www.vrmagic.com/imaging/camera-designs/multi-sensor-cameras/>

³⁵ <http://www.youtube.com/watch?v=NwEqWqypuo>

Abkürzungsverzeichnis

Ø	Durchmesser
A	Amper (Stromstärke)
AGP	Anwendungszentrum für Großstrukturen in der Produktionstechnik
Akku	Akkumulator
AOV	Angle of View
AV	Auflösungsvermögen
Bft	Beaufortskala
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BRDF	Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion
bspw.	beispielsweise
c	Brennweite
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
CSM	Crop Surface Models
DEM	Digital Elevation Model
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
d.h.	das heißt
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DOP	Dilution of Precision
ESF	Edge Spread Function
EM-Feld	elektromagnetisches Feld
Fps	frames per second (Bilder pro Sekunde)
FOV	Field of View
ft	Fuß, 1 ft=0.3048 m
g	im Zusammenhang mit Gewicht Einheit Gramm
g	im Zusammenhang mit Beschleunigung die Erdbeschleunigung (9.81 m/s ²)
GCP	Ground Control Points
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSD	Ground Sampling Distance
HDRF	hemisphärisch-direktionaler Reflektanz-Faktor
hori.	horizontal
i.d.R.	in der Regel
IMU	Inertial Measurement Unit
inkl.	inklusive
INS	Inertiales Navigationssystem
K ₁ , K ₂ , K ₃	radialsymmetrische Korrekturkoeffizienten
k.A.	keine Angaben
Kml	Keyhole Markup Language
Lp	Linienpaare
LSF	Line Spread Function
m	Meter
mm	Millimeter
MACS	Modular-Airborne-Camera-System
max.	maximal
MIDAS	Multi-camera Integrated Digital Acquisition System
min.	im Zusammenhang entweder minimal oder Minute
µm	Mikrometer
MMS	Mobile Mapping Systeme

NN	Normal Null (Höhensystem)
MOD	Minimum Object Distance
MTF	Modulation Transfer Function
MTOW	Maximum Take-off Weight (maximales Abfluggewicht)
NDVI	Normalized Differenced Vegetation Index
NFC	near field communication
NFL	Nachrichten für Luftfahrer
NIR	Nahes Infrarot
nm	Nanometer
o.ä.	oder ähnliches
OGC	Open Geospatial Consortium
P_1, P_2	Koeffizienten der Tangentialverzeichnung
rad	Radiant
raw	engl. roh
RGB	Rot Grün Blau (Farbkanäle)
RMS	Root Mean Square (deutsch: quadratischer Mittelwert QMW)
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RTK	Real Time Kinematic
Sek.	Sekunde
SDK	Software Developer Kit
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SNR	Signal to Noise Ratio
SOS	Sensor Observation Service
SR	Simple Red Index
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSD	Solid State Disk
SURF	Speeded-Up Robust Features
TIF	Tagged Image File Format
TTL	Through the Lens
u	Unschärfekreis
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
u.a.	unter anderem
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unmanned Aircraft Systems
USGS	U.S. Geological Survey
u.U.	unter Umständen
V	Volt (Stromspannung)
VARI	Visible Atmospherically Resistant Index
verti.	vertikal
VIS	visible (sichtbares Licht)
VTOL	Vertical Takeoff and Landing
W	Watt (Leistung)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Veränderung der Bodenauflösung bei schräger werdender Blickrichtung für die Ebene 13	
Abbildung 2: Bestimmung der Schärfentiefe (KRAUS, 2004)	14
Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Belichtungszeit und Rotationsgeschwindigkeit für eine Bewegungsunschärfe von 0.5 Pixel	19
Abbildung 4: Abbildung der Oberfläche mit verschiedenen Kamerakonfigurationen	22
Abbildung 5: Midas-Kamerasystem ¹²	22
Abbildung 6: MIDAS - Kamerasystem, Kamerablickrichtungen ¹²	22
Abbildung 7: Kodierte Marke für „Australis“	24
Abbildung 8: Kalibriervorrichtung der Professur für Geodäsie und Geoinformatik	24
Abbildung 9: Workflow Pix4Dmapper (Quelle: https://support.pix4d.com/entries/27939633)	27
Abbildung 10: Automatisierter photogrammetrischer Workflow von UAV-Bilddaten (GRENZDÖRFFER, 2013c)	34
Abbildung 11: Überblick über die Baustelle des Projekts "DredgDikes" (Foto von Marcus Siewert)	41
Abbildung 12: Orthophoto "DredgDikes" vom 03.05.2012	43
Abbildung 13: OrthoDEM „DredgDikes“ vom 03.05.2012	43
Abbildung 14: 3D-Punktwolke „DredgDikes“ vom 03.05.2012	44
Abbildung 15: Orthophoto "DredgDikes" vom 23.05.2012	44
Abbildung 16: Orthophoto "DredgDikes" vom 11.06.2012	44
Abbildung 17: Orthophoto "DredgDikes" vom 03.12.2012	44
Abbildung 18: Gegenüberstellung der Oberflächenmodelle der ersten vier Überflüge zur Baustellendokumentation, Höhe in [m] ü. NN	45
Abbildung 19: Differenz der Höhenmodelle aus dem dritten und vierten Flug eingeblendet über dem Orthophoto des vierten Fluges	46
Abbildung 20: Anomalienbereich der dritten Befliegung	47
Abbildung 21: Anomalienbereich der vierten Befliegung	47
Abbildung 22: Darstellung von zu berücksichtigenden Anomalien	47
Abbildung 23: Deckwerk auf der Elbinsel „Lühesand“	48
Abbildung 24: Flugplanung für Projekt „Lühesand“, Flughöhe 20 m (Quelle Hintergrundbild: Google Earth)	48
Abbildung 25: Gegenüberstellung der beiden Epochen für das Projekt „Lühesand“, a) Epoche 1, b) Epoche 2, c) Differenz der Oberflächenmodelle beider Epochen [m]	50
Abbildung 26: Bildausschnitt Orthophoto (01.08.2012)	51
Abbildung 27: Bildausschnitt Orthophoto (15.11.2012)	51
Abbildung 28: Höhendifferenzen	52
Abbildung 29: Bestimmung der Steigung des Deckwerks	52
Abbildung 30: Vergrößerung Steine (01.08.2012)	52
Abbildung 31: Vergrößerung Steine (15.11.2012)	52
Abbildung 32: Detektion von Steinverlagerungen	53
Abbildung 33: Vogelschutzinsel Langenwerder	53
Abbildung 34: Flugplanung Langenwerder	56
Abbildung 35: Flugplanung Riether Werder	56
Abbildung 36: Brutgebiete Langenwerder 2012 (GRENZDÖRFFER & BOGDANOV, 2013)	56
Abbildung 37: Brutgebiete Riether Werder 2013	56
Abbildung 38: Beobachtungsgeometrie (Schrägperspektive)	58
Abbildung 39: Beobachtungsgeometrie (Draufsicht)	58
Abbildung 40: "FIGOS"-Projekt (SCHOPFER ET AL., 2008)	59
Abbildung 41: Geplante hemisphärische Flugroute	59
Abbildung 42: Bestimmung der äußeren Orientierung mit „Australis“	60
Abbildung 43: Übersicht über Untersuchungsbereiche im Feld (weiße Rechtecke)	60

Abbildung 44: Sonnenstand für 11.05.2011, blaue Linie = Sonnenstände,	60
Abbildung 45: Beispiel für die Darstellung der Anisotropie für einen spektralen Kanal	60
Abbildung 46: Anisotropie der drei ausgewählten Bereiche des beobachteten Versuchsfelds.....	61
Abbildung 47: Flächenleistungen von Nadiraufnahme und schrägblickenden Aufnahmen in (GRENZDÖRFFER ET AL., 2012)	64
Abbildung 48: MD4-1000 mit offenem Gehäuse.....	65
Abbildung 49: MD4-1000 mit Kamerasystem.....	65
Abbildung 50: MD4-1000 Basisstation zur Überwachung der UAV-Telemetriedaten	66
Abbildung 51: Fernbedienung für MD4-1000 auf 35Mhz	66
Abbildung 52: MV-CS27U von der Firma Crevis (MaxxVision, 2013a).....	66
Abbildung 53: MV-CS27U Schnittstellen (MaxxVision, 2013a).....	66
Abbildung 54: Zusammenhang zwischen Kameramodell und erreichbarer Bodenauflösung für die Brennweiten von 6 mm und 9 mm.....	67
Abbildung 55: Abgebildete Flächen in der Ebene („Malteser Kreuz“)	69
Abbildung 56: Fujinon C-Mount Objektiv mit 6 mm Brennweite (MaxxVision, 2013b).....	70
Abbildung 57: Fujinon C-Mount Objektiv mit 9 mm Brennweite (MaxxVision, 2013b)	70
Abbildung 58: Pico-ITX-Board, 1.6 GHz Intel® Atom™ Z510 / 530 Prozessor, 6 USB 2.0, 2 SATA- Ports, 1 PATA44-Port, 1 GByte RAM.....	70
Abbildung 59: DC-DC Netzteil.....	72
Abbildung 60: Kontroller zur Übertragung des Strobe-Signals von der Kamera zur MD4-1000 und zum synchronen Auslösen aller 5 Kameras	72
Abbildung 61: Entwurf der Kamerahalterung.....	73
Abbildung 62: Entwurf "Four Vision"-Kamerasystem unter MD4-1000	73
Abbildung 63: Überarbeiteter Kamerahaltungsrahmen aus Aluminium, Kameraunterbau befindet sich im Schwerpunkt, Kompensationen werden von UAV nicht bemerkt	74
Abbildung 64: Entwurf und Umsetzung der Kamerahalterung von (BIENASCH, 2013)	75
Abbildung 65: Neigungsmöglichkeiten der schrägblickenden Kameras mit Nicköffnungswinkel	75
Abbildung 66: Veränderung der Bodenauflösung für die schrägen Visuren des „Four Vision“-Systems	76
Abbildung 67: Relation zwischen Blendenzahl und hyperfokaler Distanz bei einer Tiefenschärfe von $u = 1$ Pixel = 4.65 μm für die Objektive des „Four Vision“-Kamerasystems.....	76
Abbildung 68: Relation zwischen Gegenstandsweite und Schärfentiefe bei einer Tiefenschärfe von $u = 1$ Pixel = 4.65 μm und der Blendenzahl 4 für die Objektive des „Four Vision“-Kamerasystems..	77
Abbildung 69: Anzeige „mdCockpit“ absolute GNSS-Genauigkeit in [m] und Anzahl der empfangenen Satelliten	80
Abbildung 70: Anzeige Spektrumanalysator RSA 6100A ohne Einfluss des Kamerasystems	82
Abbildung 71: Anzeige Spektrumanalysator RSA 6100A mit Einfluss des Kamerasystems	82
Abbildung 72: Bildhauptpunktlage für ein Objektiv und fünf Kameras	85
Abbildung 73: Radialsymmetrische Verzeichnung für eine Kamera und fünf Objektive	85
Abbildung 74: Brennweiten mit Standardabweichung in [mm]	86
Abbildung 75: Bildhauptpunktlage [mm], 1 Kästchen entspricht einem Pixel.....	87
Abbildung 76: Verschiebung der Aufnahmegeometrie auf Oberfläche bei veränderter Brennweite ...	88
Abbildung 77: Verschiebung der Aufnahmegeometrie in Bildebene bei veränderter Brennweite	88
Abbildung 78: Strahlenverhältnisse zwischen Kamera und Boden	88
Abbildung 79: Radialsymmetrische Verzeichnungen [μm] für halbe Bilddiagonalachse	90
Abbildung 80: Vignetting Reducer (Screenshot).....	92
Abbildung 81: Vignettierung in Abhängigkeit der Blendenzahl des Objektivs mit 6 mm Brennweite	92
Abbildung 82 Vignettierung in Abhängigkeit der Blendenzahl des Objektivs mit 9 mm Brennweite .	92
Abbildung 83: Mittelwert und Standardabweichung des Dunkelstrom-Rauschens.....	94
Abbildung 84: Siemensstern mit 6 mm Objektiv am oberen linken Rand (RGB-Mode)	97
Abbildung 85: Siemensstern mit 6 mm Objektiv in Bildmitte (RGB-Mode)	97

Abbildung 86: Siemensstern mit 9 mm Objektiv am oberen linken Rand (RGB-Mode).....	97
Abbildung 87: Siemensstern mit 9 mm Objektiv in Bildmitte (RGB-Mode).....	97
Abbildung 88: Gegenüberstellung der MTF-, ESF- und LSF-Werte für die Kamera-Objektiv-Kombinationen mit dem 6 mm und dem 9 mm Objektiv	98
Abbildung 89: Orientierung des Kamerasystems in „Australis“ (SCHIMA, 14.02.2013)	102
Abbildung 90: Orientierung des Kamerasystems am UAV (NIEMEYER ET AL., 2013b).....	102
Abbildung 91: Abweichung der Kamerapositionskoordinaten vom Mittelwert [mm] a) MV-CS27U_1, b) MV-CS27U_2, c) MV-CS27U_3, d) MV-CS27U_5.....	104
Abbildung 92: Abweichung der Orientierungswinkel vom Mittelwert [°] a) MV-CS27U_1, b) MV-CS27U_2, c) MV-CS27U_3, d) MV-CS27U_5.....	104
Abbildung 93: Abweichung der Kamerapositionskoordinaten vom Mittelwert [mm] a) MV-CS27U_1, b) MV-CS27U_2, c) MV-CS27U_3, d) MV-CS27U_5.....	106
Abbildung 94: Abweichung der Orientierungen vom Mittelwert [°] a) MV-CS27U_1, b) MV-CS27U_2, c) MV-CS27U_3, d) MV-CS27U_5.....	107
Abbildung 95: MD4-1000 mit „Four Vision“-Kamerasystem und LAN-Verbindung kurz vor Flug über Campus (Quelle: (JAKOBI, 2013))	110
Abbildung 96: MD4-1000 mit „Four Vision“-Kamerasystem während des Fluges.....	110
Abbildung 97: Flugtrajektorie des "Four Vision" Testfluges vom 25.05.2013.....	112
Abbildung 98: Orthophoto des Versuchsfluges über dem Versuchsfeld der Universität Rostock.....	113
Abbildung 99: OrthoDEM des Versuchsfeldes der Universität Rostock	113
Abbildung 100: Bodenabdeckung (Footprints) des Versuchsfluges über dem Versuchsfeld der Universität Rostock	114
Abbildung 101: Aufnahmeset des „Four Vision“-Kamerasystems mit 50%iger Transparenz.....	115
Abbildung 102: geplante Flugroute (Screenshot mdCockpit, Quelle Hintergrundbild: Google Earth)	117
Abbildung 103: Berechnung des zweiten „Four Vision“-Kamerafluges mit „Photoscan“: schwarze Linien geben die Blickrichtung und den Kamerastandpunkt und blaue Fläche die Bildebene der Kameras wider.....	118
Abbildung 104: 3D-Punktwolke des zweiten „Four Vision“-Kamerafluges.....	119
Abbildung 105: Bodenabdeckung (Footprints) der Bilder über dem Fakultätsgelände der Universität Rostock.....	120
Abbildung 106: Azimut- und Elevationswinkel für jede Kamera, die den ausgewählten Punkt am Boden abbildet.....	121
Abbildung 107: MD4-1000 mit „Four Vision“-Kamerasystem im Flugbetrieb.....	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der Entwicklungsphasen nach (LUHMANN, 2010).....	10
Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Belichtungszeit und Drehbewegung	18
Tabelle 3: UAV-Kategorisierung nach van Blyenburgh (BLYENBURGH & CO., 2012).....	29
Tabelle 4: Kenndaten der Befliegungen für „DredgDikes“	42
Tabelle 5: Kenndaten der Befliegungen für „Lühesand“	49
Tabelle 6: Kenndaten für die Befliegungen zur Vogelzählung	54
Tabelle 7: Kenndaten der Befliegung für den hemisphärischen Flug	59
Tabelle 8: Einstellungsmöglichkeiten der verwendeten Industriekameras (MV-CS27U)	68
Tabelle 9: Relation Flughöhe und Bodenauflösung für ein 6 mm Objektiv zusammen mit der MV-CS27U	69
Tabelle 10: Ausgangssituation und Gewichtsbilanz der Bauteile des "Four Vision"-Kamerasystem ..	73
Tabelle 11: Roll- und Nicköffnungswinkel der Kamera-Objektiv-Kombination des "Four Vision"-Systems nach den Gleichungen (2.5) und (2.6) (c=Brennweite)	75
Tabelle 12: Beispiel des Aufbaus einer Konfigurationsdatei	78
Tabelle 13: Mittlere Brennweite für jeden Versuch und deren mittlerer Fehler sowie die maximalen und minimalen Werte der Testreihen und ihre Differenzen (je 1. Zeile [mm], je 2. Zeile [Pixel])	86
Tabelle 14: Gegenüberstellung der Auswirkungen der Brennweitenabweichungen an einer orthogonalen ebenen Oberfläche für ausgewählte Höhen nach (6.4).....	88
Tabelle 15: Gegenüberstellung der Auswirkungen der Brennweitenabweichungen auf die Bildebene nach (6.5).....	89
Tabelle 16: Gemittelte Bildhauptpunktlagen, deren mittlere Fehler, maximale und minimale Werte und deren Differenzen.....	89
Tabelle 17: Auswirkung der unterschiedlichen Verschiebungen des Bildhauptpunktes auf eine orthogonale ebene Oberfläche für verschiedene Flughöhen nach (6.6)	90
Tabelle 18: Ausgewählte MTF-Werte in Bezug zu Abbildung 88.....	99
Tabelle 19: Parameter der inneren Orientierung für die rel. Kameraorientierungen vor dem Testflug	103
Tabelle 20: Äußere Orientierungsparameter der schrägblickenden Kameras im Koordinatensystem von „Australis“	105
Tabelle 21: Orientierungswinkel des Kamerasystems während des Fluges.....	105
Tabelle 22: Parameter der inneren Orientierungen für die rel. Kameraorientierungen nach dem Testflug	106
Tabelle 23: Äußere Orientierungsparameter der schrägblickenden Kameras im Koordinatensystem von „Australis“	107
Tabelle 24: Auswirkungen verschiedener Rotationsfehlerklassen.....	108
Tabelle 25: Kenndaten zur Befliegung über dem Versuchsfeld.....	111
Tabelle 26: Initiale innere Kameraparameter	116
Tabelle 27: Nachberechnete innere Orientierungsparameter durch „Photoscan“	116
Tabelle 28: Entfernung der Projektionszentren der schrägblickenden Kameras zur Nadirkamera	116
Tabelle 29: Kenndaten der Befliegung über dem AUF-Campus	118
Tabelle 30: Überblick über die Anzahl der Bilder pro Kamera für den gleichen Punkt am Boden und den abgebildeten Azimut- und Elevationswinkelbereich	120

Literatur

- ACKERMANN, F. (1967): Theoretische Beispiele zur Lagegenauigkeit ausgeglichener Blöcke, Zeitschrift Bildmessung und Luftbildwesen BuL, Heft 3/1967, Wichmann Verlag, Karlsruhe, S. 114–122.
- ACKERMANN, F. (1968): Gesetzmäßigkeiten zur absoluten Lagegenauigkeit von Blöcken, Zeitschrift Bildmessung und Luftbildwesen BuL, Heft 1/1968, Wichmann Verlag, Karlsruhe, S. 3–15.
- ALBERTZ, J. (2009): Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, WBG (Wiss. Buchges.), Darmstadt. 4. Aufl., 254 Seiten.
- ALBERTZ, J., WIGGENHAGEN, M. (2009): Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung – Guide for photogrammetry and remote sensing, Wichmann, Heidelberg. 5. Aufl., 334 Seiten.
- ALMER, A., PERKO, R., SCHNABEL, T., PALETTA, L., KASTNER, L. (2013): EVIVA - fluggestütztes Beobachtungs- und Analysesystem für Eventmonitoring mit videobasierter Verhaltensanalyse. In: STROBL, J. et al. [Hrsg.], Angewandte Geoinformatik 2013. Beiträge zum 25. AGIT-Symposium Salzburg, Wichmann, Berlin, S. 2–7.
- ALTSTÄDTER, B., LAMPERT, A., SCHOLTZ, A., BANGE, J., PLATIS, A., HERMANN, M., WEHNER, B. (2013): Aerosol Variability Observed with RPAS. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XL-1/W2, S. 1–4.
- AMICI, S., TURCI, M., GIULIETTI, F., GIAMMANCO, S., BUONGIORNO, M., LA SPINA, A., SPAMPINATO, L. (2013): Volcanic Environments Monitoring by Drones Mud Volcano Case Study. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XL-1/W2, S. 5–10.
- Avangate B.V.: Quick MTF - Software für die Bewertung von Objektiven, Download unter <http://www.quickmtf.com/index.html>. (15.01.2014).
- BAIOCCHI, V., DOMINICI, D., MORMILE, M. (2013): UAV Application in Post – Seismic Environment. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XL-1/W2, S. 21–25.
- BENDIG, J., WILLKOMM, M., TILLY, N., GNYP, M. L., BENNERTZ, S., LENZ-WEIDEMANN, V. I., BARETH, G., MIAO, Y. (2014): Very High Resolution Crop surface Models (CSM) from UAV-based Stereo Images for Rice Growth Monitoring in North-East China. GIS.Science Volume 27, (1), S. 1–9.
- BENFER, H. J. (2013): Texturierung von digitalen 3D-Stadtmodellen aus orientierten Schrägluftbildern. In: LUHMANN, T., MÜLLER, C. [Hrsg.], Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013, Wichmann VDE-Verl, Berlin, S. 272–279.
- BIENASCH, R. (2013): Entwicklung einer Leichtbaukonstruktion zur Stabilisierung der photogrammetrischen Nutzlast eines Micro-UAS. Bachelorarbeit, Universität Rostock, Rostock.
- BLÖSCH, M., WEISS, S., SCARAMUZZA, D., SIEGWART, R. (2010): Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010), S. 21–28.
- BLYENBURGH, P. (1999): UAVs: an overview. Air & Space Europe 1, (5-6), S. 43–47.
- Blyenburgh & Co. [Hrsg.] (2012): 2012 RPAS Yearbook - RPAS: The Global Perspective, Blyenburgh & Co., Den Haag.
- BOGATOV, S., MAZNY, N., PUGACHEV, A., TKACHENKO, S., SHVEDOV, A. (2013): Emergency Radiation Survey Device Onboard the UAV. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XL-1/W2, S. 51–53.
- BSI (2008): BSI TR-03209 Elektromagnetische Schirmung von Gebäuden -Theoretische Grundlagen – Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik.
- Bundesministerium für Verkehr (10.08.1963): Luftverkehrs-Ordnung – LuftVO, Download unter <http://www.gesetze-im-internet.de/luftvo/BJNR006520963.html>. (10.10.2012).
- COLOMINA, I., BLÁZQUEZ, M., MOLINA, P., PARÉS, M., WIS, M. (2008): Towards A New Paradigm for High-Resolution Low-Cost Photogrammetry and Remote Sensing. ISPRS (International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences), ISPRS Congress 2008, Beijing, China, XXXVII, S. 1201–1206.

- CRAMER, M. (2010): Der DGPF-Test zur Evaluation digitaler Luftbildkameras - Überblick und Test-design. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. 100 Jahre ISPRS - 100 Jahre internationale Zusammenarbeit, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 1–10.
- CRAMER, M., HAALA, N. (2012): Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Erdblicke - Perspektiven für die Geowissenschaften, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 428–440.
- CRAMER, M., HAALA, N., ROTHERMEL, M., LEINSS, B., FRITSCH, D. (2013): UAV-gestützte Datenerfassung für Anwendungen der Landesvermessung – das Hessigheim-Projekt. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Dreiländertagung D - A - CH, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 450–469.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S. (2013): UAS-Luftbildbefliegung in Marokko - ein Anwendungsbeispiel zur Untersuchung von Bodenerosion. In: STROBL, J. et al. [Hrsg.], Angewandte Geoinformatik 2013. Beiträge zum 25. AGIT-Symposium Salzburg, Wichmann, Berlin, S. 20–28.
- DROESCHEL, D., SCHREIBER, M., BEHNKE, S. (2013): Omnidirectional Perception for lightweight UAVs using a continuously rotating 3D Laser Scanner, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, UAV-g2013, S. 107–112.
- DRÖSKE, N. (2010): Planung und Erprobung eines Messverfahrens zur Bestimmung der BRDF mit dem Stuttgarter Adler. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- EISENBEISS, H. (2009): UAV photogrammetry. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), Zürich.
- EISENBEISS, H., STEMPFHUBER, W., KOLB, M. (2009): Genauigkeitsanalyse der 3D-Trajektorie von Mini-UAVs. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 407–417.
- FEICHTNER, A. (2013): ArcGIS für die Wegpunktplanung, Dokumentation und Validierung von UAV Flügen. In: STROBL, J. et al. [Hrsg.], Angewandte Geoinformatik 2013. Beiträge zum 25. AGIT-Symposium Salzburg, Wichmann, Berlin, S. 29–34.
- FÖRSTNER, W., GÜLCH, E. (1987): A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centers of Circular Features, Proceedings of the ISPRS Intercommission Workshop on Fast Processing of Photogrammetric Data, S. 281–305.
- FRITZ, A., KATTENBORN, T., KOCH, B. (2013): UAV-based Photogrammetric Point Clouds – Tree Stem Mapping in Open Stands in Comparison to Terrestrial Laser Scanner Point Clouds. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XL-1/W2, S. 141–146.
- FURUKAWA, Y., PONCE, J.: Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis, 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 1–8.
- GAGEIK, N., MÜLLER, T., MONTENEGRO, S. (2012): Obstacle Detection and Collision Avoidance using Ultrasonic Distance Sensors for Autonomous Quadcopter, Workshop UAVweek 2012, Siegen.
- GAGEIK, N., STROHMEIER, M., MONTENEGRO, S. (2013): An Autonomous UAV with an Optical Flow Sensor for Positioning and Navigation. Int J Adv Robotic Sy, S. 1–9.
- GEBHARDT, N. (2003): Einige BRDF Modelle. Seminararbeit.
- GEHRKE, R., GREIWE, A. (2011): Sensoren zur kleinformatigen Aerophotogrammetrie mit UAV. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Geodaten - eine Ressource des 21. Jahrhunderts, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 75–82.

- Gesellschaft für Bildung und Technik mbH, unter Mitarbeit von BECKER, F.-M. (1994): Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II, Paetec Ges. für Bildung und Technik, Berlin. 5. Aufl., 119 Seiten.
- GETZIN, S., WIEGAND, K., SCHÖNING, I. (2012): Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods in Ecology and Evolution* 3, (2), S. 397–404.
- GINI, R., PASSONI, D., PINTO, L., SONA, G. (2012): Aerial Images from an UAV System: 3D Modeling and Tree Species Classification in a Park Area. ISPRS (International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences), ISPRS Congress 2012, Melbourne, Australia, XXII ISPRS, S. 361–366.
- GITELSON, A., KAUFMAN, Y., STARK, R., RUNDQUIST, D. (2002): Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* 80, (1), S. 76–87.
- GREIWE, A., GEHRKE, R. (2013): Foveon Chip oder Bayer Pattern - geeignete Sensoren zur Aerophotogrammetrie mit UAS. In: LUHMANN, T., MÜLLER, C. [Hrsg.], *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013*, Wichmann VDE-Verl, Berlin, S. 334–343.
- GRENZDÖRFFER, G. (2013a): UAS zur hochgenauen und flächenhaften Bestimmung der Bestandshöhe bzw. Biomasse. In: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam Bornim e.V. [Hrsg.], *Bornimer Agrartechnische Berichte. 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft*, Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam, S. 14–23.
- GRENZDÖRFFER, G. (2013b): UAS-based automatic bird count of a common gull colony. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-1/W2, S. 169–174.
- GRENZDÖRFFER, G. (2013c): Ziviler Einsatz unbemannter Luftfahrtsysteme - Informationen zu rechtlichen Aspekten und Innovationen in der Automation der Bildauswertung. In: KOCH, A. [Hrsg.], *Geoinformationssysteme 2013. Beiträge zum 18. Münchner Fortbildungsseminar 2013*, Wichmann, Berlin, S. 36–45.
- GRENZDÖRFFER, G., BOGDANOV, S. (2013): UAS-basierte automatisierte Vogelzählung am Beispiel einer Sturmmöwenkolonie der Vogelschutzinsel Langenwerder. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Dreiländertagung D - A - CH, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg*, S. 89–98.
- GRENZDÖRFFER, G., NIEMEYER, F. (2011): UAV BASED BRDF-Measurements of Agricultural Surfaces with PFIFFIKUS. In: EISENBEISS, H. et al. [Hrsg.], *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)*, Zürich.
- GRENZDÖRFFER, G., NIEMEYER, F., SCHMIDT, F. (2012): Development of Four Vision Camera System for a Micro UAV. ISPRS (International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences), ISPRS Congress 2012, Melbourne, Australia, XXII ISPRS, S. 369–374.
- GRUEN, A., HUANG, X., QIN, R., DU, T., FANG, W., BOAVIDA, J., OLIVEIRA, A. (2014): Joint Processing of UAV Imagery and Terrestrial MMS Data for very high Resolution 3D City Modeling. *GIS Science* Volume 27, (1), S. 10–20.
- HARWIN, S., LUCIEER, A. (2012): An Accuracy Assessment of Georeferenced Point Clouds produced via Multi-View Stereo Techniques applied to Imagery acquired via Unmanned Aerial Vehicle. ISPRS (International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences), ISPRS Congress 2012, Melbourne, Australia, XXII ISPRS, S. 475–480.
- HAUBECK, K., PRINZ, T. (2014): 3D-Oberflächenerfassung und Orthophotogenerierung mittels eines UAS-basierten Stereokamerasystems am Beispiel der Archäologischen Grabungsstätte Doliche (Türkei). *GIS Science* Volume 27, (1).
- HERDA, H., BREUER, M. (2013): Different Ways to Process UAV Imagery – Results of Comparative Benchmark Tests. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photo-*

- grammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Dreiländertagung D - A - CH, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 99–107.
- HOLZ, D., NIEUWENHUISEN, M., DROESCHEL, D., SCHREIBER, M., BEHNKE, S. (2013): Towards multimodal omnidirectional Obstacle Detection for autonomous Unmanned Aerial Vehicles, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, UAV-g2013, S. 201–206.
- HORMIGO, T., ARAÚJO, J. (2013): A MICRO-UAV SYSTEM FOR FOREST MANAGEMENT. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XL-1/W2, S. 211–216.
- JACOBSEN, K. (2009a): DGPF-Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme – Auswerteteam Geometrie. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 1–16.
- JACOBSEN, K. (2009b): Geometry of vertical and oblique image combinations. In: MAKTAV, D. [Hrsg.], Remote Sensing for a Changing Europe. Proceedings of the 28th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, Istanbul, Turkey, 2-5 June 2008, IOS Press, Amsterdam.
- JACOBSEN, K., CRAMER, M., LADSTÄDTER, R., CAMILLO, R., SPRECKELS, V. (2010): DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme - Themenschwerpunkt Geometrie. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. 100 Jahre ISPRS - 100 Jahre internationale Zusammenarbeit, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 11–21.
- JAKOBI, T. (2013): Erzeugung von 3D-texturierten Stadtmodellen (Baublock/Landmark) mit Hilfe unbemannter Flugroboter und des Four Vision Kamerasystems. Bachelorarbeit, Universität Rostock, Rostock.
- JUNG, A., MICHELS, R., GRASER, R. (2013): Nicht-scannende hyperspektrale Kamera für UAS Plattformen. In: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam Bornim e.V. [Hrsg.], Bornimer Agrartechnische Berichte. 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft, Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam, S. 141–147.
- KIRCHGÄBNER, U. (2013): Einsatz eines ferngesteuerten Kleinflugzeugs zur Erfassung von Umweltdaten, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie: Band 1: Photogrammetrie – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, de Gruyter, Berlin. 7. Aufl., 516 Seiten.
- KREMER, J. (2010): The Quattro DigiCAM - IGI's Versatile – Aerial Camera System for Various Aerial Imaging Tasks. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. 100 Jahre ISPRS - 100 Jahre internationale Zusammenarbeit, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 623–630.
- KUHNERT, K.-D., KUHNERT, L. (2013): Light-Weight Sensor Package for Precision 3D Measurement with Micro UAVS e.g. Power-Line Monitoring. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XL-1/W2, S. 235–240.
- KÜNG, O., STRECHA, C., BEYELER, A., ZUFFEREY, J.-C., FLOREANO, D., FUA, P., GERVAIX, F. (2011): The Accuracy of automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery. Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), (Vol XXXVIII-1/C22), S. 1–6.
- KURZ, F. (2003): Schätzung von Vegetationsparametern aus multispektralen Fernerkundungsdaten, Techn. Univ. München, München.

- KURZ, F., TÜRMER, S., MEYNBERG, O., ROSENBAUM, D., RUNGE, H., REINARTZ, P., LEITLOFF, J. (2012): Low-cost optical Camera Systems for real-time Mapping Applications. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* 2012, (2), S. 159–176.
- LEHMANN, F., BERGER, R., BRAUCHLE, J., HEIN, D., MEISSNER, H., PLESS, S., STRACKENBROCK, B., WIEDEN, A. (2011): MACS – Modular Airborne Camera System for Generating Photogrammetric High-Resolution Products. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* 2011, (6), S. 435–446.
- LILIENTHAL, H. (2003): Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 254*, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig.
- LINKIEWICZ, M. (2013): Extraktion von senkrechten Fassadenebenen aus 3DPunktewolken von Schrägluftbildern. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Dreiländertagung D - A - CH*, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 354–362.
- LOWE, D. (2004): Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60, (2), S. 91–110.
- LUHMANN, T. (2010): *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen*, Wichmann VDE-Verl, Berlin. 3. Aufl., 668 Seiten.
- LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S. (2006): *Close-range photogrammetry – Principles, methods and applications*, Whittles, Dunbeath, 510 Seiten.
- MADANI, M. (2012): Accuracy Potential and Applications of MIDAS Aerial Oblique Camera system. *ISPRS (International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences)*, ISPRS Congress 2012, Melbourne, Australia, XXII ISPRS, S. 127–132.
- MaxxVision (2013a): MV-CS27U, Download unter <http://www.maxxvision.com/produkte/kameras/usb-kameras/mv-cs27u.html>. (04.02.2013).
- MaxxVision (2013b): Objektive DF6HA-1B und HF9HA-1B, Download unter http://www.maxxvision.com/fileadmin/content/Produkte/Objektive/Downloads/Fujinon/Fujinon_Megapixel_Objektive_DF6HA_HF9HA-1B_Datenblatt.pdf. (04.02.2013).
- MEISTER, G. (1995): *Messung der spektralen Reflexionsfunktion (BRDF) ausgewählter Oberflächen bei natürlicher Beleuchtung*. Diplomarbeit, Universität Hamburg, Hamburg.
- MERINO, L., CABALLERO, F., MARTÍNEZ-DE-DIOS, J., MAZA, I., OLLERO, A. (2012): An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement. *J Intell Robot Syst* 65, (1-4), S. 533–548.
- microdrones (2012): mdCockpit3.1 – Benutzer-Handbuch, Download unter http://wp1143437.serverhe.de/md-redesign2011b/support/mdCockpit32Setup_3203.00_2013-06-06_Manual_GE.msi. (16.07.2013).
- MORI, T., SCHERER, S. (2013): First results in detecting and avoiding frontal obstacles from a monocular camera for micro unmanned aerial vehicles, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1750–1757.
- NASSE (2008): *Wie liest man MTF- Kurven ?*, Download unter [http://www.zeiss.de/C12567A8003B8B6F/EmbedTitelIntern/CLN_30_MTF_de/\\$File/CLN_MTF_Kurven_DE.pdf](http://www.zeiss.de/C12567A8003B8B6F/EmbedTitelIntern/CLN_30_MTF_de/$File/CLN_MTF_Kurven_DE.pdf). (15.01.2014).
- NAUMANN, M., BILL, R., NIEMEYER, F. (2014a): *Generierung digitaler Geländeoberflächen mittels Bilddaten von unbemannten Flugsystemen zum Monitoring von Küstenschutzbauwerken*. *GIS.Science* 27.Jahrgang, (1), S. 30–37.
- NAUMANN, M., BILL, R., NIEMEYER, F., NITSCHKE, E. (2014b): *Deformation Analysis of Dikes using Unmanned Aerial Systems (UAS)*. In: SAATHOFF, F., CANTRÉ, S. [Hrsg.], *Dredg Dikes. Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*; Rostock, Hohe Düne 10-11 April 2014, S. 119–126.

- NAUMANN, M., GEIST, M., BILL, R., NIEMEYER, F., GRENZDÖRFFER, G. (2013): Accuracy Comparison of Digital Surface Models Created by Unmanned Aerial Systems Imagery and Terrestrial Laser Scanner. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-1/W2, S. 281–286.
- NEITZEL, F., KLONOWSKI, J. (2011): Mobile 3D Mapping with a low-cost UAV System. In: ISPRS [Hrsg.], *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-1/C22, Zürich, S. 39–44.
- NICODEMUS, F. (1977): Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. Final Report National Bureau of Standards.
- NIEMEYER, F., BILL, R. (2013): Genauigkeitsabschätzung eines alternativen Verfahrens zur Bestimmung der äußeren Orientierung von fliegenden Trägerplattformen. In: WEISBRICH, S., KADEN, R. [Hrsg.], *Entwicklerforum Geodäsie und Geoinformationstechnik 2012. Junge Wissenschaftler forschen*, Shaker, Aachen, S. 19–30.
- NIEMEYER, F., BILL, R., GRENZDÖRFFER, G. (2012): Konzeption und Genauigkeitsabschätzungen für eine Bestimmung der äußeren Orientierung eines Unmanned Aerial Vehicles (UAV). *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation 2012*, (2), S. 141–157.
- NIEMEYER, F., SCHIMA, R., GRENZDÖRFFER, G. (2013a): Relative and Absolute Calibration of a Multihead Camera System with Oblique and Nadir Looking Cameras for a UAS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-1/W2, S. 287–291.
- NIEMEYER, F., SCHIMA, R., NEISER, A. (2013b): Konzept und Kalibrierung eines Mehrkameranensystems mit schrägblickenden Kameras für den UAV-Einsatz. In: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam Bornim e.V. [Hrsg.], *Bornimer Agrartechnische Berichte. 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft*, Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam, S. 116–124.
- NYARUHUMA, A., GERKE, M., VOSSelman, G., MTAALO, E. (2012): Verification of 2D building outlines using oblique airborne images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 71, S. 62–75.
- PETERMAN, V., MESARIC, M. (2012): Land Survey from Unmanned Aerial Vehicle. *ISPRS (International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences)*, ISPRS Congress 2012, Melbourne, Australia, XXII ISPRS, S. 447–451.
- PETRIE, G. (2009): Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Frame Cameras, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 75, (2), S. 102–107.
- RAGG, H., KLEINDIENST, H. (2013): Gut geplant ist halb geflogen - UAV-Flugplanung und Postprocessing. In: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam Bornim e.V. [Hrsg.], *Bornimer Agrartechnische Berichte. 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft*, Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam, S. 76–84.
- RESNIK, B. (2014): Kontrolle der Türme von Windenergieanlagen im Rahmen von periodischen Untersuchungen – Ansätze und Erfahrungen. *Forum, Zeitschrift des Bundes der Öffentlich bestellten Vermessungsingenieure e.V.* 40. Jahrgang, (1/2014), S. 4–13.
- ROSE, A., ZURHORST, A. (2013): Kommt der ÖbVI in den Himmel? *Forum, Zeitschrift des Bundes der Öffentlich bestellten Vermessungsingenieure e.V.* 39. Jahrgang, (3), S. 24–29.
- ROTHERMEL, M., WENZEL, K., FRITSCH, D., HAALA, N. (2012): SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery, *Proceedings LCD Workshop*, Berlin.
- SAATHOFF, F. PROF. (2012): *DredgDikes*, Rostock.
- SANDMEIER, S., SANDMEIER, W., ITTEN, K., SCHAEPMAN, M., KELLENBERGER, T. (1995): Swiss field-goniometer system (FIGOS). *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* 3, S. 2078–2080.
- SCHAEPMAN-STRUB, G., SCHAEPMAN, M., PAINTER, T., DANGEL, S., MARTONCHIK, J. (2006): Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment* 103, (1), S. 27–42.

- SCHERER, S., SINGH, S., CHAMBERLAIN, L., ELGERSMA, M. (2008): Flying Fast and Low Among Obstacles: Methodology and Experiments. *International Journal of Robotics Research* Volume 27, S. 549–574.
- SCHIMA, R. (2013): Bestimmung der inneren und relativen Orientierung einschließlich der Systemstabilität für das Kamerasystem Four Vision – Entwicklung eines Versuchsaufbaus und Erprobung einer Kalibriermethode für ein Mehrkamerasystem zur Luftbildphotogrammetrie mithilfe der Software Australis. wissenschaftliche Begleitarbeit, Universität Rostock, Rostock.
- SCHMIDT, F. (2011): Entwicklung einer Leichtbaukonstruktion zur Aufhängung einer Nutzlast an einer Drohne. Bachelorarbeit, Universität Rostock, Rostock.
- SCHNEIDER, T., MANAKOS, I. (2000): Anisotropie der Rückstrahlung - Störfaktor oder Informationsquelle? Erörterung anhand des Beispiels "precision farming". In: BIRKNER, U. [Hrsg.], Referate der 21 GIL-Jahrestagung in Freising-Weihenstephan 2000, Bonn, S. 187–190.
- SCHOPFER, J., DANGEL, S., KNEUBÜHLER, M., ITTEN, K. (2008): The Improved Dual-view Field Goniometer System FIGOS. *Sensors* 8, (8), S. 5120–5140.
- SCHWARZBACH, M. (2006): Zusammenfassung der Diplomarbeit „Konzipierung eines Gerätes zur Bodenmessung der bi-direktionalen Reflektanzverteilungsfunktion unter natürlichen Bedingungen“ und der Studienarbeit „Instrumentierung für ein ferngesteuertes Modellflugzeug zur Fernerkundung der Erdoberfläche“. Zusammenfassung der Diplomarbeit und der Studienarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- SCHWEIZER, C. (2009): Einsatz eines UAV (Unmanned Aerial Vehicle) zur teilflächenspezifischen Untersuchung der Heterogenität von Bodeneigenschaften. Masterarbeit, Universität Hohenheim, Hohenheim.
- SHETA, B., ELHABIBY, M., EL-SHEIMY, N. (2012): Comparison and Analysis of nonlinear Least Squares Method for Vision based Navigation (VBN) Algorithms. *ISPRS (International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences), ISPRS Congress 2012, Melbourne, Australia, XXII ISPRS*, S. 453–456.
- SKRZYPIETZ, T. (2011): Die Nutzung von UAS für zivile Aufgaben. *Standpunkt zivile Sicherheit*, (2), S. 1–28.
- SNAVELY, N., SEITZ, S., SZELISKI, R. (2008): Modeling the World from Internet Photo Collections. *Int J Comput Vis* 80, (2), S. 189–210.
- SUGIURA, R., NOGUCHI, N., ISHII, K. (2007): Correction of Low-altitude Thermal Images applied to estimating Soil Water Status. *Biosyst. Eng.* 96, (3), S. 301–313.
- TALLEY, B. (1938): Multiple lens aerial cameras, Chapter IV in *Aerial and Terrestrial Photogrammetry*, Pitman Publishing Corporation, New York & Chicago, S. 91–116.
- TEULIÈRE, C., ECK, L., MARCHAND, E. (2011): Chasing a moving target from a flying UAV. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, S. 4929–4934.
- THAMM, H.-P., MENZ, G., BECKER, M., KURIA, D., MISANA, S., KOHN, D. (2013): The use of UAS for Assessing Agricultural Systems in an Wetland in Tanzania in the Dry- and Wet-Season for Sustainable Agriculture and Providing Ground Truth for Terra-SAR X Data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-1/W2, S. 401–406.
- TORGE, W. (2008): *Geodäsie*, Walter de Gruyter GmbH Co.KG, s.l. 1. Aufl., 380 Seiten.
- TSINGAS, V. (1991): Automatische Aerotriangulation. In: Universität Stuttgart [Hrsg.], *Schriftenreihe Institut für Photogrammetrie*, Heft 15, Stuttgart, S. 253–268.
- VUICIN, L. (2014): Mapping a Large Coppre Mine – A Romanian UAV Projekt. *GEO Informatics, Magazine for Surveying, Mapping & GIS Professionals* Volume 17, (3), S. 22–24.
- WAGNER, R., LIECKFELDT, P., ROTHE, R., MARKRAM, J. (2013): The Leica Geosystems CityMapper Solution. In: FRITSCH, D. [Hrsg.], *Photogrammetric Week*, Wichmann, S. 89–99.
- WALLACE, L. O., LUCIEER, A., WATSON, C. S. (2012): Assessing the Feasibility of UAV-based LIDAR for high Resolution Forest Change Detection. *ISPRS (International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences), ISPRS Congress 2012, Melbourne, Australia, XXII ISPRS*, S. 499–504.

- WENZEL, K., ABDEL-WAHAB, M., CEFALU, A., FRITSCH, D. (2012): High-Resolution Surface Reconstruction from Imagery for close Range Cultural Heritage Applications. ISPRS (International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences), ISPRS Congress 2012, Melbourne, Australia, XXII ISPRS, S. 133–138.
- WIEDEMANN, A. (2009): Photogrammetrische Schrägluftbilder mit dem Aerial Oblique System AOS. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 1–8.
- WIEDEN, A., LINKIEWICZ, M. (2013): True- Oblique- Orthomosaik aus Schrägluftbildern zur Extraktion von 3D-Geoinformationen. In: SEYFERT, E. [Hrsg.], Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Dreiländertagung D - A - CH, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., Oldenburg, S. 373–383.
- Wikipedia (2012): Unmanned aerial vehicle, Download unter http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle. (19.02.2013).
- WIMMER, T., ISRAEL, M., HASCHBERGER, P., WEIMANN, A. (2013): Rehkitzrettung mit dem Fliegenden Wildretter: Erfahrungen der ersten Feldeinsätze. In: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam Bornim e.V. [Hrsg.], Bornimer Agrartechnische Berichte. 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft, Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam, S. 85–95.
- WITAYANG, A., NAGAI, M., HONDA, K., DAILEY, M., SHIBASAKI, R. (2011): Real-Time Monitoring system using Unmanned Aerial Vehicle integrated with Sensor Observation Service. In: EISENBEISS, H. et al. [Hrsg.], The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), Zürich, S. 107–112.

Danksagung

Ich möchte mich bei Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill und bei Dr.-Ing. Görres Grenzdörffer für die Möglichkeit bedanken, dass ich im Projekt „PFIFFikus - Innovative Photogrammetrie für Micro UAV's“ als wissenschaftlicher Mitarbeiter mitwirken konnte und mir somit die Möglichkeit der Dissertation gegeben wurde. Herrn Bill danke ich für seine engagierte Betreuung während des Schreibens, seine konstruktiven Hinweise und die schnelle Bearbeitung von Problemen.

Besonderer Dank geht an Herrn Grenzdörffer, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand und mir bei nicht immer leichten Befliegungsprojekten vertraute und mich ermutigte. Nicht unerwähnt soll sein, dass ohne die Unterstützung in Form von weiteren Einstellungen gerade im Anschluss an die Förderphase des Projekts „PFIFFikus“ diese Doktorarbeit wahrscheinlich nicht zustande gekommen wäre.

Herzlicher Dank geht auch an den Netzwerkadministrator Andreas Schenkel, der mich mit seinem Know-how sowohl im Bereich Administration von Computernetzwerken als auch bei Löt- und Bastelarbeiten tatkräftig unterstützte. Herrn Dankert danke ich für seine Hilfe bei der sehr filigranen Lötarbeit von Kabeln, Steckkontakten und Leiterplatten. Beiden verdanke ich einen großen Teil meines Wissens über Computerelektronik, das in die Entwicklung des „Four Vision“-Kamerasystems eingeflossen ist.

Des Weiteren danke ich Dipl.-Ing. Andreas Fink und Dipl.-Ing. Arne Neiser vom IEF/Institut für Gerätesysteme und Schaltungstechnik der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik für ihre Unterstützung und den Bau des Controllers zur Verbindung des „Four Vision“-Kamerasystems mit der MD4-1000. Den gleichen Dank richte ich an Florian Schmidt vom Lehrstuhl für Konstruktionstechnik und Leichtbau der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, der sich in seiner begleitenden Bachelorarbeit mit dem Gewichtsproblem der Kameraaufhängung auseinandersetzte.

Unserer studentischen Hilfskraft Robert Schima danke ich für seine wissenschaftliche Zuarbeit im Bereich gegenseitige Kameraorientierung des „Four Vision“-Kamerasystems.

Ein großer Dank geht an alle weiteren Reviewer, die sich auf verschiedenste Weise auf Fehlersuche begeben habe.

Ein besonderer Dank geht an meine Familie, die mir zeitliche Freiräume zum Forschen und Schreiben verschafft hat.

Frank Niemeyer



Adresse: Gauswisch 36
18195 Tessin

E-Mail: fniemeyer@freenet.de

Persönliche Daten

Geburtsdatum, -ort: 10.07.1976, Rostock
Staatsangehörigkeit: Deutsch
Stand: verheiratet
2 Kinder

Werdegang

1996 – 1999 Berufsausbildung zum Vermessungstechniker beim Vermessungsbüro Zokow, Cecilienstr. 173, 12683 Berlin

1999 – 2007 Studium an der Technischen Universität Berlin im Studiengang „Geodäsie und Geoinformationstechnik“
Abschluss: Diplom-Ingenieur

10/2003 – 3/2007 Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Geodäsie und Ausgleichsrechnung der Technischen Universität Berlin

07/2004 – 07/2006 Studentische Hilfskraft am GeoForschungsZentrum Potsdam, Sektion 1.3: Schwerefeld und Gravimetrie, Sektion 1.2: Erdbeobachtungssatelliten

04/2007 – 03/2009 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik im BMBF – Projekt: „SLEWS - A Sensorbased Landslide Early Warning System“

04/2009 – 08/2009 Dozent im Fach „Geodäsie“, Professur für Geodäsie und Geoinformatik der Universität Rostock

09/2009 – 06/2010 Wiedereinstellung als Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt „SLEWS“

08/2010 – 09/2010 Wiedereinstellung als Dozent im Fach „Geodäsie“

10/2010 – 02/2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Rostock an der Professur für Geodäsie und Geoinformatik im Projekt „PFIFFikus - Innovative Photogrammetrie für Micro UAV's“

10/2014 "Lilienthal-Preis" für Doktorarbeit

Dissertationsthese

1. UAV füllen die Lücke zwischen terrestrischer und flugzeuggestützter Vermessung. Sie sind in der Lage eine sehr genaue, zeitnahe und oftmals mit geringerem Aufwand versehene Vermessung kleiner Flächen zu leisten. Damit reichen sie einerseits über die Flächenreichweite terrestrischer Vermessungen hinaus, sind jedoch andererseits auch nur bedingt in der Lage, die sehr große Flächenleistung der flugzeug- oder satellitenbildgestützten Fernerkundung zu erreichen. Anhand verschiedener Anwendungsszenarien (Kap.4.2) konnte dies eindrücklich demonstriert werden.

2. Neben den klassischen Normalbildaufnahmen entsteht zunehmend ein Bedarf an Schrägaufnahmen, sei dies zur Texturierung von Fassaden in Stadtmodellen oder zur Bestandskartierung in der Landwirtschaft. Bisher ist dies nur durch mehrfache Bildflüge mit verschwenkten Kameras erreichbar. Mit dem hier entwickelten „Four Vision“-Kamerasystem wird ein Konzept präsentiert (Kapitel 5), welches Bilder unter verschiedenen Blickwinkeln gleichzeitig aufnehmen kann.

3. Die fortschreitende Entwicklung in der Computertechnik, der Sensortechnik, der Digitalkameratechnik und in der Materialforschung macht es heute möglich, ein Mehrkamerasystem für photogrammetrische Zwecke zu entwickeln, welches innerhalb des Abfluggewichts von Micro-UAV unter 5 kg liegt. Der entwickelte Prototyp „Four Vision“ leistet dieses und kann somit unter überschaubaren rechtlichen Rahmenbedingungen betrieben werden.

4. Die für ein solches System festgelegten Kriterien zur Hardware, zur Software und zur photogrammetrischen Auswertung können erreicht werden. In Kapitel 6 werden insbesondere die photogrammetrischen Eigenschaften des „Four Vision“-Kamerasystems untersucht. Kapitel 7 zeigt, dass das System auch im praktischen Einsatz diese Eigenschaften besitzt.

5. Die Entwicklung und der Bau eines Kamerasystems für Anwendungen in Kombination mit UAV sind nicht nur auf die Disziplin der Photogrammetrie bzw. Fernerkundung beschränkt. Vielmehr müssen Anforderungen aus anderen Fachdisziplinen, wie z.B. der Elektrotechnik, der Informationstechnik und den Materialwissenschaften, berücksichtigt werden. Die Kapitel 5 und 6 zeigen den hohen nötigen Vernetzungsgrad der einzelnen Fachbereiche, um ein solches Projekt erfolgreich durchzuführen.

6. Durch die vergleichsweise geringen Flughöhen der UAV ist es möglich, auch mit Amateurkameras bzw. Industrikameras mit vergleichsweise instabilen inneren Orientierungsparametern unter Zuhilfenahme von optimal verteilten Ground Control Points und der Simultankalibrierungsmethode adäquate Orthophotos, OrthoDEMs oder 3D-Punktwolken mit einer hohen Bodenauflösung bis in den Zentimeterbereich zu erzeugen.

7. In der UAV-Photogrammetrie mit mehreren Kameras werden Bilder aus verschiedenen Blickwinkeln erzeugt. Durch die unterschiedlichen Kamerablickrichtungen werden die Objekte aus den entsprechenden Richtungen abgebildet. Durch die oberflächenspezifischen Eigenschaften wird dabei das Licht in unterschiedlichen Intensitäten reflektiert. Kapitel 4.2.4 zeigt, dass dieses unterschiedliche Reflexionsverhalten in Form eines Anisotropiefaktors durch die unterschiedlichen Blickrichtungen bestimmt werden kann und somit Rückschlüsse auf das richtungsabhängige Reflexionsverhalten für die verwendeten spektralen Kanäle gezogen werden können.

8. Das „Four Vision“-Kamerasystem erhöht durch die spezielle Anordnung der Kameras in der „Malteser Kreuz“-Konfiguration die Flächenleistung. Abbildung 106 in Kapitel 7.3 zeigt den Zuwachs an abgebildeter Fläche in Form eines Polarplots und die damit verbundenen Redundanzen der Bilder eines ausgewählten Bodenpunktes.

9. Das „Four Vision“-Kamerasystem konnte in den Workflow der klassischen UAV-Photogrammetrie eingebunden werden und erweitert somit das photogrammetrische Spektrum dieser innovativen Luftbildbefliegung enorm.

10. Die Funktionstüchtigkeit des Kamerasystems konnte demonstriert werden. Durch zwei Befliegungen – für Anwendungen im Agrarbereich das Versuchsfeld der Universität Rostock und für kommunale Anwendungen der Campus der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät – konnte erfolgreich gezeigt werden, dass die Konzeptionierung, die Entwicklung und der Bau eines Mehrkamerasystems für den UAV-Einsatz gelungen ist.