

Erstellen eines digitalen 3D-Landschaftsmodells mit Hilfe einer selbst gebauten Flugdrohne

Betreuer Dr. Ralf Kretzschmar | Gymnasium Thun-Schadau | August 2014

Maturaarbeit | Werk mit Werkbericht

Dominic Grandjean 15gD



1 Abstract

In diesem Werkbericht beschreibe ich den Entstehungsprozess eines digitalen 3D-Landschaftsmodells, das ich selbstständig mit Hilfe eines aus Einzelteilen zusammengebauten und teilweise selbst entwickelten Modellflugzeuges erstellt habe. Die dazu notwendigen Luftaufnahmen lieferte eine im Flugkörper integrierte Kamera.

Die zahlreichen Planungs-, Recherche-, Konstruktions- und Flugetappen wurden fortlaufend prozessbegleitend während der gesamten Arbeit in Form eines Blogs ausführlich dokumentiert.

Trotz etlicher erlittener Rückschläge und zeitweise intensiver Arbeits- und Demotivationsphasen, bedingt durch Konstruktionsfehler, falsche Materialwahl, mangelhafte Informationen, schwierige Flugmanöver oder schlechte Wetterbedingungen, ist es mir schlussendlich gelungen, meine Ziele vollständig zu erreichen: Das Flugzeug flog, die Kamera hielt, die Aufnahmen entsprachen den Anforderungen und das 3D-Modell konnte verwirklicht werden.

2 Vorwort

Von klein auf hat mich das Fliegen in jeder erdenklichen Art fasziniert und in seinen Bann gezogen. Dieses Gefühl von Unbeschwertheit, von Freiheit, der natürliche Zustand des Schwebens und Dahingleitens fesselt mich bis heute.

Bereits als 6-jähriger baute ich einen ca. 5 x 2 m grossen Gleitschirm mit Doppelkammersystem aus braunen Robidog-Säckchen, meterweise Klebeband und Haushaltsschnur. Später folgten unzählige selbst gebaute, mehr oder weniger flugfähige Flugobjekte, Drachen und Papierflieger. Mit 12 Jahren gewann ich sogar mit meinem Papierflieger einen Wettbewerb anlässlich der Belper Flugtage. Mit knapp 17 m flog mein Modell bei einem Wurf aus dem Stand am weitesten.

Mit zunehmendem Alter, Taschengeld und Geschicklichkeit hielt die Technik Einzug. Zunächst mit ferngesteuerten Mini-Helikoptern, dann mit Fertigbausätzen von Flugobjekten aus Styropor mit Elektromotor, die in Grösse und Komplexität wuchsen. Als letztes Projekt setzte ich im vergangenen Sommer einen schon länger gehegten Traum in die Tat um: Ich baute einen V-Tail-Quadrocopter.

Ohne all diese Vorkenntnisse und Erfahrungen hätte ich mir niemals zugetraut, ein solches Projekt im Rahmen meiner Maturaarbeit in Angriff zu nehmen.

Danken möchte ich an dieser Stelle meinen beiden Betreuern, Herrn Dr. Ralf Kretschmar und Herrn Jürg Barblan, die mir, wann immer nötig, mit Rat und Tat zur Seite standen. Auch mein Vater verdient ein Dankeschön. Er war bei allen Startmanövern ein unverzichtbarer Begleiter.

3 Inhaltsverzeichnis

1 Abstract	1
2 Vorwort	2
3 Inhaltsverzeichnis	3
4 Einleitung	5
4.1 Zielsetzung.....	5
4.2 Problemstellung	5
4.3 Einschränkungen	5
4.4 Eigenleistungen	5
5 Planung	6
5.1 Recherche.....	6
5.1.1 Erste Resultate und Erkenntnisse	6
5.1.2 Zeitplan.....	7
5.2 Machbarkeitsstudie	8
5.2.1 Flugdrohne	8
5.2.2 Navigation und Steuerung	8
5.2.3 Luftaufnahmen	9
5.2.4 3D-Modell.....	10
5.3 Vorschriften und Gesetze.....	10
5.3.1 Frequenzen und Sendeleistungen.....	11
5.3.2 Luftaufnahmen	11
6 Flugzeug	12
6.1 Evaluation des Flugkörpers.....	12
6.2 Material	15
6.2.1 Long Range System (LRS).....	15
6.2.2 Autopilot-Steuerungseinheit	16
6.2.3 FPV-System	16
6.2.4 Fernsteuerung	17
6.2.5 Einzelteile	17
6.3 Bestellungen	18
6.4 Zusammenbau	19
6.5 Erstflug.....	23
6.6 Härtetests.....	24
6.6.1 FPV-Vorbereitungen.....	25
6.6.2 Flüge	25

6.7 Autonomer Erstflug	26
6.7.1 Mission Planner Software	26
6.7.2 Erstellen einer Mission	27
6.7.3 Weitere Flüge	28
6.8 Leitfrage 1	28
7 Luftaufnahmen.....	29
7.1 Mechanische Vorrichtung.....	29
7.1.1 Prototyp	29
7.1.2 Bau der finalen Kamera-Aufhängung	30
7.1.3 Test Kamera-Aufhängung	35
7.2 Leitfrage 2	36
7.3 Abschlussmission.....	36
7.3.1 Vorbereitungen	37
7.3.2 Durchführung der Abschlussmission	39
8 3D-Modell	41
8.1 Bildbearbeitung	41
8.1.1 Software Bildbearbeitung	41
8.1.2 Ergebnis	42
8.2 Software Modellberechnung	42
8.3 Ergebnis.....	45
8.4 Dateien 3D-Modell	46
8.5 Augment-App	46
8.6 Leitfrage 3	46
9 Fazit	47
10 Literaturverzeichnis.....	48
10.1 Quellenverzeichnis.....	48
10.2 Abbildungsverzeichnis	48
10.3 Tabellenverzeichnis.....	50
11 Anhang	51
11.1 Zeitplan	51
11.2 Einkaufsliste	53
12 Bewertungskriterien	54

4 Einleitung

4.1 Zielsetzung

Das Ziel meiner Maturaarbeit besteht darin, selbstständig eine Flugdrohne aus handelsüblichen Modellbau-Bauteilen zu konstruieren. Die Drohne soll in der Lage sein, autonom zu fliegen und eigenständig Bilder eines überflogenen Gebietes aufzunehmen. Diese Bilder sollen anschliessend in ein 3D-Landschaftsmodell umgewandelt werden. Da derartige Versuche bereits mit so genannten Multirotern (Quadrocopter z. B.) erfolgreich durchgeführt werden, verwende ich hingegen als Flugkörper ein aus einzelnen Bauteilen selbst zusammengestelltes Modellflugzeug (keinen fertigen Bausatz).

4.2 Problemstellung

Im Verlauf dieser Maturaarbeit möchte ich folgende Fragen klären:

- Ist es möglich, ein autonom fliegendes Modellflugzeug aus handelsüblichen Modellflug-Einzelbauteilen zu konstruieren?
- Wird dieses Modellflugzeug in der Lage sein, eine Kamera zu tragen und mit ihr selbstständig Luftaufnahmen anzufertigen?
- Kann auf Basis dieser Fotografien ein digitales 3D-Landschaftsmodell geschaffen werden?

4.3 Einschränkungen

Den Rumpf der Flugdrohne und die benötigten technischen Einzelteile werde ich aus zeitlichen Gründen nicht selbst herstellen. Auch für die Umsetzung der Bilder in ein 3D-Modell werde ich bereits vorhandene Softwareapplikationen einsetzen.

4.4 Eigenleistungen

Meine Eigenleistungen sind hauptsächlich in den Kapiteln 6 bis 8 beschrieben.

5 Planung

Mit der aufwändigen Planung dieser Maturaarbeit begann ich bereits sehr früh. Am Anfang meiner Recherchen stand eine ausführliche Machbarkeitsstudie, von der die Realisierbarkeit des Projektes abhing.

Der zu Beginn erstellte Zeitplan bildete die Basis für das jeweilige Vorgehen. Er fungierte zugleich als eine Art Grobkonzept. Sobald unerwartete Ereignisse auftraten, wurde er entsprechend aktualisiert und den neuen Gegebenheiten angepasst.

Während der gesamten Projektzeit führte ich einen Blog, in dem ich meine Fortschritte chronologisch festhielt. Teile meiner schriftlichen Arbeit stammen aus diesem Blog. [1]

5.1 Recherche

Folgende Fragen leiteten mich in der Anfangsphase meiner Recherchearbeiten:

- Wie weit ist der aktuelle Stand der Technik?
- Gab es bereits ähnliche Projekte und wenn ja, wie wurden sie umgesetzt?
- Welche Baukomponenten können gekauft bzw. selbst hergestellt werden?
- Wie viel Zeit und Geld wird mich dieses Projekt kosten?

Fündig wurde ich in erster Linie im Internet. Gedruckte Werke, welche sich mit den für mich relevanten Themen beschäftigen, existieren fast nicht. Als besonders hilfreich erwiesen sich Internetforen für Modellflugpiloten und Hobbybastler. Da Teilbereiche der Modellflugtechniken, die ich zu verwenden beabsichtigte, zu diesem Zeitpunkt in Europa noch nicht weit verbreitet waren, musste ich mich mehrheitlich im US-Raum auf die Suche machen. Infolgedessen waren die meisten Quellen in englischer Sprache verfasst.

5.1.1 Erste Resultate und Erkenntnisse

Es stellte sich bald heraus, dass das autonome Fliegen von Modellflugzeugen erst seit wenigen Jahren betrieben wird. Mittlerweile sind die Ergebnisse, die mit der vorhandenen erforderlichen Technik erzielt werden können, erstaunlich präzise und bis auf wenige Ausnahmen einigermassen erschwinglich. Sogenannte kamerabestückte Quadrocopter liefern bereits Aufnahmen überflogener Gebiete. Doch dazu später mehr.

Eine erste Kostenaufstellung sowie eine erste Schätzung des zeitlichen Aufwandes zeigten von Beginn an deutlich, dass in beiden Bereichen mit Einigem zu rechnen sein würde. Dass die Modellfliegerei ein sowohl teures als auch zeitintensives Hobby ist, habe ich schon bei früheren Projekten feststellen dürfen. Von grossem Vorteil war nun, dass ich bereits über eine geeignete Fernbedienung und ein Akkuladegerät verfügte. Dennoch musste ich die meisten Teile neu beschaffen.

Kostenüberschlag:

Rumpf	250 Fr.
Technik im Flugzeug	600 Fr.
Technik am Boden	800 Fr.
weiteres Zubehör	150 Fr.
<hr/>	
Total	1'800 Fr.

Es handelt sich hierbei um eine sehr grobe Schätzung. Lediglich die wichtigsten Komponenten sind darin berücksichtigt.

Schätzung des zeitlichen Aufwandes:

Planung	70 Std.
Bau	70 Std.
Tests	20 Std.
Flüge	20 Std.
3D-Modell	40 Std.
<hr/>	
Total	220 Std.

Damit war schnell klar, dass ich mit einer Arbeitszeit von mehr als 200 Std. alleine für den praktischen Teil dieser Arbeit die minimale Arbeitszeit von 100 Std., die für eine klassische Maturaarbeit veranschlagt wird, grosszügig überschreiten würde. Doch das hielt mich nicht ab.

5.1.2 Zeitplan

Um ein derartiges Arbeitspensum zu schaffen, erstellte ich einen möglichst detaillierten Zeitplan. Er sollte mich sicher durch den Arbeitsprozess leiten. Der komplette Zeitplan ist im Anhang (11.1) ersichtlich.

5.2 Machbarkeitsstudie

In den folgenden Abschnitten beschreibe ich die aufgrund meiner Recherchen möglicherweise auftretenden Probleme und Herausforderungen und überprüfe sie auf ihre Lös- und Machbarkeit.

5.2.1 Flugdrohne

Das Fluggerät sollte folgendes Anforderungsprofil erfüllen:

- ruhiges und stabiles Flugverhalten
- Transportieren eines hohen Gewichts
- Lange Flugzeit ähnlich einem Segelflieger
- Fliegen auf konstanter Höhe mit gleich bleibender Geschwindigkeit ähnlich einem Elektro-Modellflugzeug
- Wetterbeständigkeit

Lösung: Flugkörper für Modellflugzeuge sind in unterschiedlichen Grössen und Formen im Fachhandel erhältlich. → **machbar**

5.2.2 Navigation und Steuerung

Ich muss mit der Flugdrohne in der Lage sein, ein Gebiet flächendeckend und effizient abzufliegen. Dazu bieten sich folgende Lösungsansätze an:

- manuelles Steuern mit Fernsteuerung
 - + sicher/gut kontrollierbar
 - nicht effizient
- autonomes Fliegen der Drohne
 - + sehr effizient bei guter Umsetzung
 - Dem Piloten wird die Kontrolle entzogen. → Sicherheitsrisiko

Lösung: Das GPS-gestützte-Fliegen erlaubt es der Flugdrohne, autonom und zugleich präzise zu fliegen. Vor jedem Flug übergibt der Pilot der Drohne die zuvor programmierte Flugroute. Dies ermöglicht ein hoch effizientes Fliegen.

Derzeit gibt es verschiedene GPS-Steuerungssysteme auf dem Markt, die je nach Typ mit mehr oder weniger Programmieraufwand verbunden sind. Sie können je nach Einsatz und Präzisionswunsch mit weiterer Sensorik aufgerüstet werden.

→ **machbar**

Sicherheit

Um während des autonomen Fluges bei Komplikationen besser eingreifen zu können, sollte auch ein Sicherheitssystem für den Notfall nicht fehlen.

- Die Mission muss jederzeit abgebrochen werden können.
- Allfällige Gefahren oder Programmierfehler müssen frühzeitig erkannt und vermieden werden (z. B. Vogelschwarm/Kollision mit Felswand).

Lösung: Die meisten Autopilot-Systeme erlauben dem Piloten, die Mission mittels spezieller Befehle zu beenden oder zu ändern, selbst wenn sich die Flugdrohne in der Luft befindet.

Auch das Fliegen in der First Person View (FPV)¹ muss als Lösungsvariante überdacht werden. Mit FPV kann aus der Ferne alles live mitverfolgt und im Notfall kontrolliert eingegriffen werden. → **machbar**

Topologie

Die Topologie des Fluggeländes spielt ebenfalls eine wichtige Rolle und kann unter Umständen problematisch sein (z. B. hügeliges oder alpines Terrain).

- Anpassen der Flughöhe an die Umgebung
- Sammeln exakter Koordinaten
- Erkennen und Berücksichtigen von Hindernissen

Lösung: Das Fluggebiet muss ausgekundschaftet und genau analysiert werden. Zur Berechnung der einzelnen Flughöhen dienen Karten und Messungen vor Ort.

→ **machbar**

5.2.3 Luftaufnahmen

Um schliesslich ein 3D-Modell erstellen zu können, benötige ich geeignetes Bildmaterial. Folgende Bereiche könnten während der Aufnahmen Probleme bereiten:

- Vibrationen
- Belichtungszeit
- Fokussieren von Objekten
- Positionieren und Ausrichten der Kamera
- Gewichtsverteilung
- Luftwiderstand

¹ FPV = frei übersetzt „Sicht aus der Ich-Perspektive“, gemeint ist aus der Sicht des Piloten

Lösung: Diese Punkte sollten alle dank guter Planung und Umsetzung der Flugdrohne zu umgehen sein. → **machbar**

5.2.4 3D-Modell

Schlussendlich müssen die während des Fluges erzeugten Bilder zu einem 3D-Modell verarbeitet werden. Je nach Zielsetzung könnte man das fertige Modell als Beweis für ein gelungenes Projekt ansehen. Problempunkte:

- Kompatibilität von Software und Bildmaterial
- Finden einer geeigneten Software
- Verstehen und Umsetzung der Software

Lösung: Es existiert bereits eine kleine Software-Produktpalette, die den Anforderungen gerecht wird, allerdings sprengen die meisten mein Budget. → **machbar**

Fazit

Aufgrund dieser Studie und auf Basis meines Wissensstandes zu jenem Zeitpunkt, hielt ich mein Projekt trotz einiger noch zu überwindender Hürden durchaus für realisierbar. Was für mich sehr schwer einschätzbar war, ist der zeitliche Aspekt. Ich war mir absolut nicht sicher, ob mein Projekt im vorgegebenen Zeitrahmen umsetzbar sein würde.

5.3 Vorschriften und Gesetze

Beim Fliegen eines Modellflugzeugs gilt es einige Regeln zu befolgen. Diese Vorschriften werden vom Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) auferlegt. Um rechtlich auf der sicheren Seite zu sein, muss ich folgende Punkte berücksichtigen:

- Das Fliegen in der Nähe eines Flugplatzes ist verboten. Es muss ein Sicherheitsabstand von mindestens 5 Kilometern eingehalten werden.
- Fliegen ausserhalb der Sichtweite ist ohne Bewilligung nicht erlaubt.
- Auch bei autonomisierten Flügen oder beim Fliegen mit Videobrille muss auf Sichtweite geflogen werden.
- Beim Fliegen mit Videobrille muss zusätzlich ein zweiter „Operateur“ den Flug überwachen und im Notfall eingreifen können. [2]

5.3.1 Frequenzen und Sendeleistungen

Der Sender, auch Fernsteuerung genannt, kommuniziert mit dem Empfänger, der sich im Fluggerät befindet. Diese Kommunikation spielt sich auf bestimmten Frequenzen ab. Dabei dürfen in der Schweiz lediglich die vom Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) eigens für den Modellflug zugelassenen Frequenzen benutzt werden. Für mich sind folgende Frequenzbereiche relevant:

5.8-GHz-Frequenzband (5725 - 5875 MHz)

Maximale Sendeleistung 25 mW

Dieses Frequenzband wird für das drahtlose Übertragen von Video-Bildmaterial genutzt. Es kommt hauptsächlich beim FPV-Flug zum Einsatz. [3]

433-MHz-Frequenzband (433.2375 - 434.5125 MHz)

Maximale Sendeleistung 500 mW

Seit dem 1. Januar 2014 steht auch dieser Frequenzbereich für den Modellflug zu Verfügung. Genutzt wird er für das Übertragen von Telemetrie-Daten² zwischen Flugzeug und Bodenstation. Der Pilot kennt so zu jedem Zeitpunkt die aktuelle Akkuspannung, Geschwindigkeit, Höhe etc. seines Flugkörpers. [4]

2.4-GHz-Frequenzband (2400.0 - 2483.5 MHz)

Maximale Sendeleistung 100 mW

Im 2.4-GHz-Frequenzbereich werden normale Funkfernsteuerungen betrieben. [5]

5.3.2 Luftaufnahmen

„Luftaufnahmen sind zulässig, sofern die Vorschriften zum Schutz militärischer Anlagen berücksichtigt werden. Zu beachten sind dabei auch der Schutz der Privatsphäre respektive die Vorschriften des Datenschutzgesetzes.“ [2]

² Telemetrie-Daten = Messwerte kleiner Sensoren. (z.B. Spannungsmesser, Höhenmesser)

6 Flugzeug

Jetzt stand fest, mein Projekt würde in die Tat umgesetzt werden. Nun war es an der Zeit, Entscheidungen zu treffen und konkret zusammenzustellen, welche Bauteile beschafft werden mussten, deren Lieferbedingungen und -fristen einzukalkulieren und zu bestellen.

Meine Einkaufsliste:

- geeigneter Flugzeugrumpf
- technische Komponenten für das Flugzeug (Motor, Akkus, ...)
- technische Komponenten für die Bodenstation (Receiver, Antennen, Videobrille zur Überwachung per FPV, ...)
- Digitalkamera
- bewegliche Kamera-Aufhängung bzw. die dazu benötigten Bauteile

6.1 Evaluation des Flugkörpers

Neben den unter Punkt 5.2.1 genannten Eigenschaften wie einer langen Flugzeit oder ruhigem, stabilem Flugverhalten, musste der Flugkörper auch über ausreichend Platz im Inneren verfügen, um zusätzliches Material (Kamera, Aufhängungsvorrichtung) darin befestigen zu können. Ich habe mich bei der Suche auf zwei verschiedene Flugkörperarten konzentriert: den Nurflügler und das Segelflugzeug. Als dritte Vergleichsvariante stelle ich bei meinem Auswahlverfahren den Quadrocopter entgegen, der in aller Regel zum Erstellen von Luftbildern bevorzugt wird.

- **Nurflügler:** Er besteht aus nur einer grossen Tragfläche und besitzt dadurch kein separates Höhenleitwerk. Der Rumpf des Nurflüglers ist oft komplett in den Flügel eingelassen. Je nach Bauart bietet er genügend Platz für zusätzliches Equipment. Die Steuerung ist vergleichsweise einfach. Seine aerodynamische Form verleiht ihm sein typisches und unverwechselbares Aussehen.



Abb. 1 mein Nurflügler

- **Segelflugzeug:** Das Segelflugzeug zeichnet sich durch seine extrem leichte und stromlinienförmige Bauweise aus. Es ist für lange und motorlose Flüge bei schönem Wetter ausgelegt. In puncto Effizienz ist es unschlagbar.



Abb. 2 Modellsegelflugzeug

- **Quadrocopter:** Er besteht aus einem in Kreuzform angeordneten Rahmen, vier je nach Typ horizontal ausgerichteten Rotoren und komplexer Flugtechnik, die ihm das aussergewöhnlich stabile Fliegen erlaubt. Dieser Multirotor gehört zur Gattung der Helikopter und kann, wie sein bekannter Bruder, ebenfalls senkrecht starten und landen. Dank seiner vier Motoren ist er in der Lage, grosse zusätzliche Lasten zu tragen.



Abb. 3 typischer Hobby-Quadrocopter

Als Grundlage für mein Auswahlverfahren ordnete ich allen drei Flugkörpern individuelle Eignungszahlen zu. Ausschlaggebend waren die 7 wichtigsten Kriterien. Pro Kriterium vergab ich zwischen 0 und 10 Punkten; 0 = schlecht, 10 = sehr gut.

Tabelle 1	Nurflügler	Segelflugzeug	Quadrocopter
grosser Rumpf	9	4	6
Starten/Landen	4	4	10
Flugzeit	8	10	7
max. Ladegewicht	9	5	10
wetterbeständig	6	5	8
stabiler Flug	7	7	10
Preis	10	8	5
Total	53	43	56

Tab. 1 Vergleich drei verschiedener Flugkörper

Mit 53 Punkten scheint ein Nurflügler neben einem Quadrocopter - den ich als Modell ausschliesse - die beste Grundlage für dieses Projekt zu sein. Doch auch unter den Nurflüglern gibt es grosse Unterschiede. Ich entscheide mich für den Vergleich dreier Modelle.

- **Skywalker X8:** Mit über zwei Metern Spannweite und einem riesigen Rumpf ist er mit Abstand der grösste Nurflügler. Doch diese Grösse bringt auch viele Nachteile mit sich: Der Skywalker X8 ist unhandlich und bedarf viel Platz beim Transport. Zudem liest man im Internet von mehreren Konstruktions- und Produktionsfehlern.
- **RVJET:** Der RVJET ist deutlich kleiner und handlicher als der Skywalker X8, bietet daher aber auch weniger Raum im Rumpf des Flugzeugs. Seine Flügel können bei Bedarf verlängert werden und dank seiner bereits eingebauten Kamerahalterung an der Flugzeugspitze wäre er ein geeigneter Kandidat.
- **Zephyr II:** Er ist ein klassischer Nurflügler und unter Hobbypiloten weit verbreitet. Er ist robust und übersteht auch waghalsige Flugmanöver ohne Probleme. Seine Flügel sind allerdings aus Stabilitätsgründen nicht zerlegbar. Zusätzlicher Platz im Innern des Flügels steht ebenfalls nicht viel zur Verfügung.



Abb. 4 Skywalker X8



Abb. 5 RVJET



Abb. 6 Zephyr II

Tabelle 2	Skywalker X8	RVJET	Zephyr II
grosser Rumpf	10	5	3
Handlichkeit	5	8	4
Ladegewicht	10	8	8
Preis	8	8	9
Total	33	29	24

Tab. 2 Vergleich dreier Nurflügler

Das Ergebnis ist eindeutig. Der Rumpf eines Skywalker X8 wird als Grundgerüst für mein Projekt dienen. Die oben kurz angesprochenen Konstruktions- und Produktionsmängel werde ich - so gut wie möglich - ausbessern.

6.2 Material

Nun zu den noch fehlenden Bauteilen. Neben einer Fernsteuerung und Kleinteilen wie Motor und Batterien benötige ich noch drei grosse Hauptsysteme: ein Long Range System, eine Autopilot-Steuerungseinheit und ein FPV-System.

6.2.1 Long Range System (LRS)

Ein Long Range System, kurz LRS, vergrössert die Flugreichweite. Es erweitert eine durchschnittliche Flugdistanz von 1 bis 2 Kilometern auf 5 bis 10 Kilometer. Mir geht es dabei nicht in erster Linie um die gewonnene Reichweite. Das Fliegen ausserhalb der Sichtweite ist in der Schweiz verboten. Es geht darum, kurzzeitig eine annähernde Verdoppelung der Sendeleistung zu erreichen. Dies kann im Notfall (Kommunikationsabbruch wegen zu starker Störsignale) genutzt werden, um ein Notsignal (return to home position³) an das Flugzeug zu übertragen und so einen Absturz zu verhindern.



Abb. 7 Komponenten des Long Range Systems

Ein Long Range System besteht aus drei Hauptkomponenten:

- **Transmitter (1):** Er verstärkt das von der Fernsteuerung ausgehende Signal und sendet es mit einer neuen Frequenz zum Empfänger im Flugzeug.
- **Receiver (2):** Er empfängt das vom Transmitter verstärkte Signal und gibt es an die Bordelektronik im Flugzeug weiter.
- **Akku, Antennen und Kabel (3):** Der Transmitter wird von einem externen 7.4-V-Lithium-Akku gespeist. Antennen für Transmitter und Empfänger sowie diverse Kabel zum Verbinden von Fernsteuerung und Transmitter sind ausserdem notwendig.

Ich habe mich für das System EZUHF COMBO TX/RX PRO der Marke „immersionrc“ entschieden. Es beinhaltet alle oben genannten Komponenten (ohne Akku).

³ Das Flugzeug fliegt nach Aktivierung dieser Funktion selbstständig zu seinem Startpunkt zurück.

6.2.2 Autopilot-Steuerungseinheit

Der Autopilot ist das Herzstück des Flugzeugs. Über ihn laufen sämtliche Befehle und gesammelte Daten der einzelnen Sensoren. Sie werden während des Fluges an Bord ausgewertet. Der Autopilot entscheidet auf Basis der gewonnenen Daten über die nächsten Steuerbewegungen.

Für mein Vorhaben verwende ich das APM⁴ 2.6 von „3D-Robotics“, eine mit Prozessor, Neigungsmessgerät und anderen Einheiten bestückte Platine. Über Steckverbindungen können externe Komponenten wie GPS- oder Telemetrie-Module hinzugefügt werden.

Der Autopilot setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Komponenten zusammen:

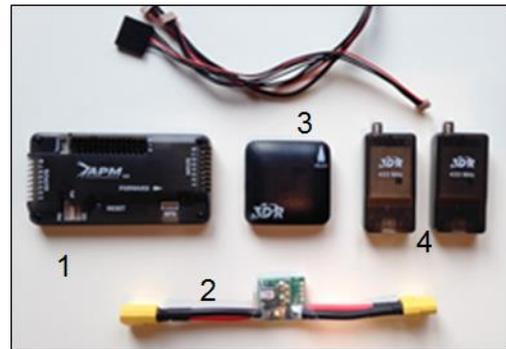


Abb. 8 Einzelteile der Autopilot-Steuerungseinheit

- **APM-2.6-Board (1):** Es wertet die gewonnenen Daten während des Fluges aus, speichert sie auf dem Board ab und gibt die daraus resultierenden Befehle.
- **Speisungs- und Messmodul (2):** Es misst die noch verbleibende Spannung des Akkus und den aktuellen Stromverbrauch der Bordelektronik.
- **GPS-Modul (3):** Über das GPS-Modul kann das APM-2.6-Board die exakte Position, Geschwindigkeit und Höhe ermitteln.
- **Telemetrie-Module (4):** Die Telemetrie-Module erlauben dem Piloten, die gesammelten Daten live, also noch während des Fluges, an einem Computer zu verfolgen. Der Pilot kann dem Flugzeug sogar kurze Befehle vom Computer aus erteilen.

6.2.3 FPV-System

Das First-Person-View-System gestattet das Fliegen eines Flugzeugs aus der Perspektive des „echten“ Piloten. Eine Videokamera, die an der Nase des Flugzeugs befestigt wird, filmt während des Fluges. Das Videomaterial wird während des Fluges zum Empfänger am Boden gesandt. Der Pilot lässt es sich auf einem Display (kleiner Monitor, Videobrille) anzeigen.

⁴ APM = steht für „ArduPilot Mega“ und ist der Name des Steuerungsboards

- **FPV-Core (1):** Er ist das Herzstück des FPV-Systems. Über ihn läuft das Videomaterial im Flugzeug, bevor es über den Sender versandt wird.
- **Sender (2):** Er befindet sich im Flugzeug und sendet das Videomaterial aus.
- **Empfänger (3):** Er empfängt das Signal des Senders.
- **Videobrille (4):** Sie gibt das empfangene Video-Bildmaterial mit einer kurzen Verzögerung wieder.
- **Akku, Antennen und Kabel (5):** Der Akku speist die Videobrille und den Empfänger am Boden. Die Kabel verbinden sie miteinander. Zwei Antennen für Sender und Empfänger sind erforderlich.

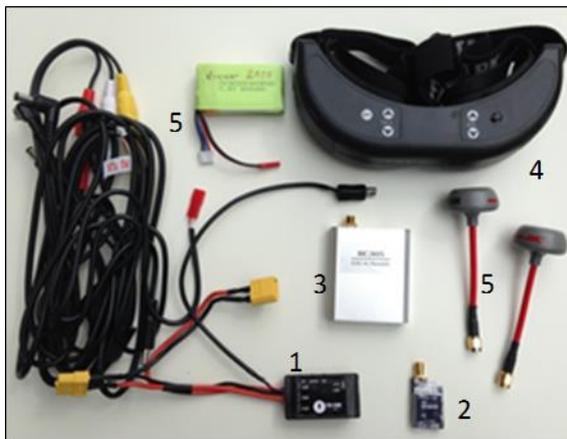


Abb. 9 Komponenten des FPV-Systems



Abb. 10 meine DX8 Fernsteuerung

6.2.4 Fernsteuerung

Die Fernsteuerung kommuniziert mit dem Empfängermodul im Flugzeug. Ich besitze bereits eine DX8 des Herstellers „Spektrum“ und bin mit ihr mehr als zufrieden. Sie ist derzeit eine der besten Handsender auf dem Markt und punktet vor allem durch ihre relativ unkomplizierte Bedienbarkeit.

6.2.5 Einzelteile

Neben den drei Hauptsystemen benötige ich eine Menge Einzelteile, ohne die das Flugzeug nicht abheben könnte. Bei meiner Wahl stütze ich mich auf Erfahrungsberichte anderer Modellbauer, die ebenfalls den Skywalker X8 als Flugkörper verwendet haben.

- **Motor (1):** Ich entscheide mich für den NTM Prop Drive Series 3548 900 kv⁵ von Hobby King.

⁵ kv = gibt an, wie viele Umdrehungen pro Minute pro Volt der Motor zu leisten vermag [6]

- **ESC (2):** ESC bedeutet „Electronic Speed Controller“. Er sitzt zwischen der Spannungsquelle und dem Motor.
- **Akkus (3):** Ich bestelle 4 Akkus (5 wurden geliefert) der Marke „Turnigy“ mit 5000 mAh 4S 20C.
- **Servos⁶ (4):** Ich benötige 2 analoge Servos zum Bewegen der beiden Steuerklappen. Ich bestelle weitere 6 Mini-Servos für spätere Arbeiten an der Kamera-Aufhängung.
- **Propeller:** Ein Fehlgriff bei der Propellerwahl kann schlimme Folgen haben, z. B. das Überhitzen des Motors oder zu wenig Schubkraft. Ich verwende zunächst einen einklappbaren Propeller aus dem Einzelhandel.
- **Kabel und Stecker (5):** Zuletzt fehlen noch einige spezielle Kabel und Stecker.

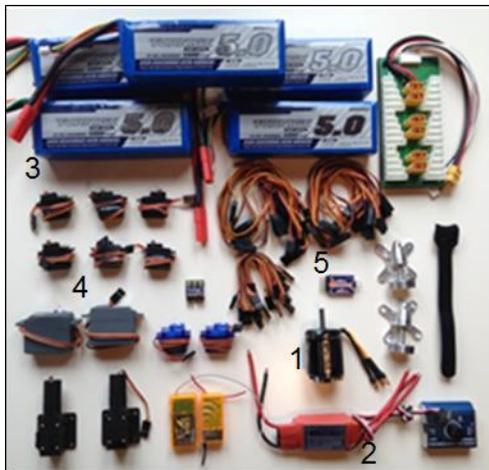


Abb. 11 restliche Einzelteile



Abb. 12 alle Bauteile

6.3 Bestellungen

Die im vorherigen Kapitel (6.2) beschriebenen Komponenten findet man nicht alle bei einem Händler. Alle drei Hauptsysteme stammen von verschiedenen Herstellern.

Meine Onlinebestellungen setzen sich aus zwei grossen Einkäufen bei Hobby King und Team Black Sheep sowie aus 3 kleineren Bestellungen bei topd.ch, 3D-Robotics und hobbytec zusammen.

Die Lieferzeit sämtlicher Pakete betrug etwa zwei Wochen (aus Hongkong/USA). Bis auf eine waren alle Lieferungen vollständig. Das fehlende Bauteil wurde zwei Tage später nachgeliefert.

Die komplette Einkaufsliste ist im Anhang (11.2) ersichtlich.

⁶ Servo = kleiner Elektromotor, der dank einer guten Übersetzung sehr kräftig ist

6.4 Zusammenbau

Der Inhalt der folgenden Kapitel (6.4 bis 6.8) entspricht einer leicht überarbeiteten Version meines Blogs (*kursiv*). Das Kapitel 6.4 umspannt einen Zeitraum von knapp eineinhalb Wochen und beinhaltet die erste Bauphase des Flugzeugs. Das Ziel dieser Bauphase bestand gemäss Zeitplan darin, am Ende ein für den Erstflug bereites flugfähiges Flugzeug vorweisen zu können.

15.02.2014 und 16.02.2014

Alle Lötarbeiten sind beendet. Die Akkus besitzen alle denselben Steckertyp. Beide Flügelhälften sind nach kleinen Abänderungen mit je einem Servo bestückt. An der Fernsteuerung konnte ich den Transmitter des Long Range Systems (LRS) montieren. Ein kleiner Lipo⁷-Akku versorgt ihn mit genügend Strom. Anschliessend aktualisierte ich per USB-Kabel die auf dem Transmitter und Empfänger vorinstallierte, bereits veraltete Firmware. Dafür gibt es extra ein kleines vom Hersteller zur Verfügung gestelltes Computerprogramm. Mit ihm lässt sich auch der Frequenzbereich festlegen, in dem die beiden operieren. Ich passte ihn an den in der Schweiz zugelassenen 433 MHz Frequenzbereich an.



Abb. 13 Grössenvergleich

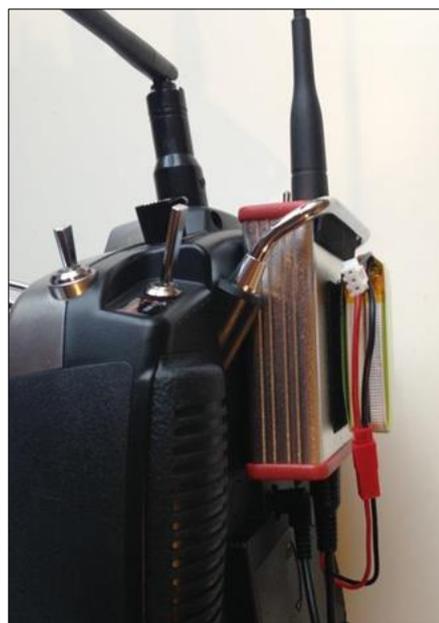


Abb. 14 Fernsteuerung mit montiertem Long Range System

17.02.2014

Heute musste ich feststellen, dass die Motorwelle zu dick für das Gewinde des Propellers ist. Daraufhin habe ich mich in einem Spezialgeschäft nach einem grösseren

⁷ Lipo = Abkürzung für Lithium-Polymer-Akku [7]

Propellergewinde umgesehen. Fazit nach einem Gespräch mit dem Fachmann: Ich muss die Aufhängung des Motors neu überdenken.

Einen ersten Prototyp für die neue Aufhängung konnte ich bereits zusammenbasteln. Erste Tests mit dem Kontrollboard (APM 2.6) und dem Empfänger des LRS (Verknüpfung der beiden Komponenten).

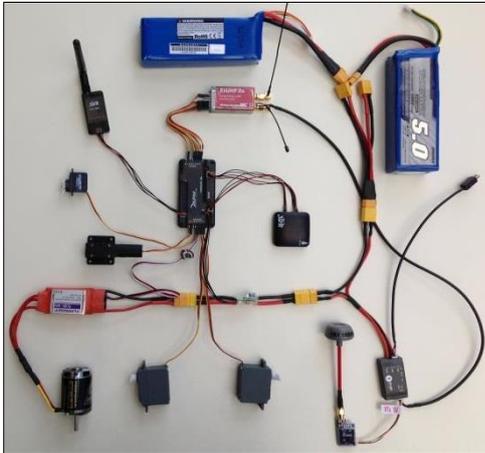


Abb. 15 komplette Bordelektronik im Überblick

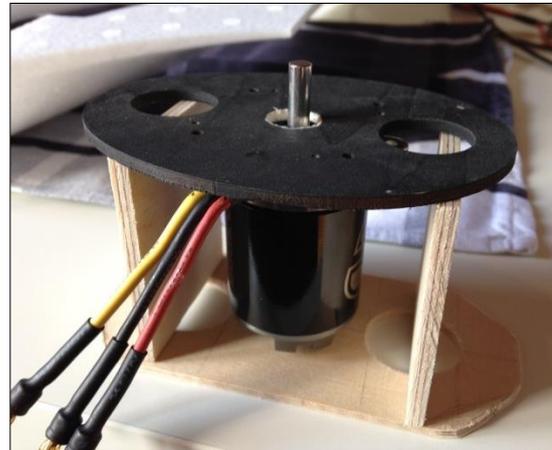


Abb. 16 Bau der neuen Motoraufhängung

18.02.2014

Die neue Motoraufhängung ist fertig und muss nur noch eingebaut werden. Sie besteht aus sechs unterschiedlich dicken Holzplatten, welche mit Holzleim zu einem stabilen Holzkasten verbaut sind. Der Motor kann sich innerhalb dieses Kastens frei drehen. Dabei habe ich viel Wert auf das Dämpfen des Motors gelegt. (Ausprobieren verschiedener Materialien). An der Flügelfixierung wurde ebenfalls weiter gearbeitet. Ich befasse mich dabei mit der Frage, wie ich die beiden Flügelhälften möglichst stabil, und trotzdem zerlegbar am Flugzeugkörper fixieren kann. Weitere Gedanken habe ich mir über die künftige Aufteilung der Technik im Innern des Flugzeugs gemacht.



Abb. 17 gedämpfter Motor vor dem Einbau

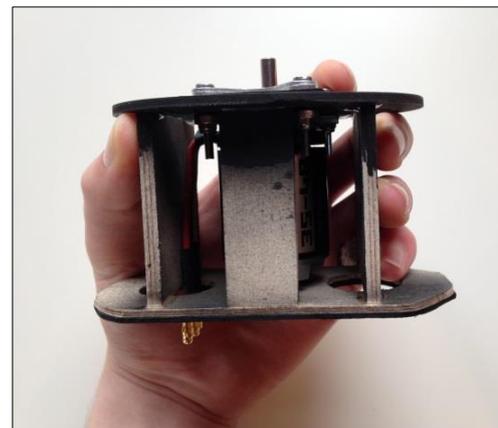


Abb. 18 fertige Motoraufhängung bereit für den Einbau ins Flugzeug

19.02.2014

Beide Flügelhälften sind nun fertig verleimt und können mit dem Flugzeugrumpf verbunden werden. Fixiert werden sie mit Hilfe zweier entfernbarer Schrauben in den Flügelhälften. Die Winglets⁸ sind montiert und die Flügel somit einsatzbereit. Die zwei Schalenhälften sind ebenfalls aufeinander geklebt. Der erste Teil der Technik (ohne FPV und Kamera) ist in der Drohne eingebaut. Das Verkabeln von Empfänger, APM 2.6, ESC, dem Motor sowie den beiden Servos in den Flügelhälften klappte trotz eines derzeit noch überschaubaren Kabelsalats erstaunlich gut. Auch die externen Kompass- und Telemetrie-Module sind eingebaut.



Abb. 19 Bordelektronik

20.02.2014

Das Aufsetzen des APM 2.6 Boards klappte ohne grössere Zwischenfälle. Ich musste lediglich die Open Source Software „Mission Planner“ herunterladen und mit ihr mittels USB-Kabel die vorinstallierte Firmware des APM 2.6 Boards aktualisieren. Nach stundenlangem Tüfteln und Ausprobieren gibt es aber immer noch Probleme bei der Auto-Stabilisation des Flugzeugs. Die manuelle Steuerung funktioniert einwandfrei.

21.02.2014

Die Auto-Stabilisierung sollte jetzt ebenfalls funktionieren. Allerdings trat ein neues Problem auf. Beim ersten Test des Motors mit Propeller hat sich der Motor unerwartet aus seiner Verankerung gelöst. Er wurde aus der Motoraufhängung gerissen, verursachte aber glücklicherweise keine grossen Schäden. Die Isolierungen der Kabel wurden leicht beschädigt, der Motor leicht verkratzt.

Die Ursache lag darin, dass sich der Motor während eines Checks bereits nach kurzer Laufzeit stark erwärmte. Die Hitze liess den Leim, den ich zum Bau der Motoraufhängung verwendet hatte, wieder flüssig werden. Der Motor zerstörte mit seinem Gewicht und seinen Vibrationen die Aufhängung. Ich habe den Motor ausgebaut, um ihn auf weitere Schäden zu untersuchen. Die beschädigten Stecker und Kabel sind wieder neu isoliert.



Abb. 20 herausgerissener Motor kurz nach dem Zwischenfall

⁸ Winglet = äusserster gebogener Teil des Flügels, dient als Stabilisierung während des Fluges und senkt den Luftwiderstand.

22.02.2014

Der Motor ist glücklicherweise noch voll funktionstüchtig. Ich habe heute zwei neue Sicherheitsmassnahmen erfolgreich umgesetzt, welche ein Überhitzen des Motors und das "Zerfallen" der Motoraufhängung verhindern sollen.

- *Alle zugänglichen Klebestellen sind jetzt mit kleinen Schrauben besser fixiert.*
- *Zwei neue Öffnungen auf der Oberseite des Rumpfes ermöglichen eine bessere Kühlung des Motors. Kleine Holzaufbauten sollen den Fahrtwind in die Motorkammer führen.*

Die folgenden Motortests werde ich nur mit der Unterstützung eines Föhns wagen. Er soll den Fahrtwind während eines Fluges simulieren.



Abb. 21 kleine Schrauben zur Stabilisierung der Motoraufhängung



Abb. 22 neue Lüftungsklappen zur besseren Kühlung des Motors

23.02.2014

Die letzten Änderungen an den Einstellungen der Fernsteuerung und der Gewichtsverteilung im Flugzeug sind vorgenommen. Alle Batterien sind geladen und die wichtigsten Steckverbindungen überprüft. Meiner Meinung nach ist alles bereit für den Erstflug!



Abb. 23 Das Flugzeug ist bereit.

6.5 Erstflug

Die beiden Erstflüge erfolgten beide wie geplant an einem der dafür vorgesehenen Wochenenden. Das Flugzeug war zu jenem Zeitpunkt ausschliesslich mit den für einen Flug essenziellen Komponenten ausgestattet. Eine Kamera befand sich nicht an Bord.

01.03.2014

Heute war es so weit. Der Erstflug ist geschafft. Allerdings kann man da nicht von "Fliegen" sprechen. Es war eher eine kurze, unkontrollierte Achterbahnfahrt mit einem zum Glück mehr oder weniger glimpflich ausgegangenen Crash als Krönung.

Eine kurze Analyse des Fluges:

- *Der Handstart verlief reibungslos.*
- *Auf Grund der Rotation des Motors auf die linke Seite, vollzog das Flugzeug eine leichte Linkskurve. (Das hatte ich zuvor schon erwartet und wäre auch nicht weiter schlimm gewesen.)*
- *Allerdings lag der Schwerpunkt leicht im hinteren Teil des Flugzeugs. Es flog dadurch konstant und mit einer Steigung von etwa 45° aufwärts.*
- *Ich verringerte den Schub, was sich als Fehler herausstellen sollte.*
- *Mit dem geringeren Schub verlor der Flieger an Geschwindigkeit. Ich hatte Probleme, ihn kontrolliert zu steuern. Es war, als ob die Signale mit etwa 5 Sekunden Verzögerung einträfen oder mir der Autopilot dazwischenfunken würde.*
- *Wegen mangelnder Geschwindigkeit kam es zum Strömungsabriss an beiden Flügeln.*
- *Das Flugzeug stürzte unkontrollierbar trudelnd etwa 10 m von mir entfernt auf ein Feld ab.*

Schäden:

Die Schäden hielten sich glücklicherweise in Grenzen, da ich den Flieger kurz vor dem Aufprall auf seinen Bauch drehen konnte.

- *Die beiden Winglets wurden herausgerissen und mussten neu montiert werden.*
- *Der rechte Flügel wurde ein Stück aus seiner Halterung herausgezogen und verbog sich leicht.*
- *Zudem entstanden an der Unterseite einige Kratzer.*

Massnahmen:

- *Sensibilität der Steuerknüppel erhöhen.*
- *Gewichtsverteilung verbessern, die Batterie muss weiter nach vorne.*
- *leichte Linksbewegung austrimmen*
- *Batterie und Flügel mit Klebeband besser sichern*
- *Nie zu wenig Gas geben! Ich möchte nicht noch einen zweiten Strömungsabriss verursachen.*

Alles in allem hatte ich grosses Glück und hoffe, dass der nächste Flug ohne derartige Pannen ablaufen wird.

05.03.2014

Bei nahezu perfekten Wetterverhältnissen konnte ich wie geplant den zweiten Testflug absolvieren; und dieses Mal ohne Crash!

Vor dem Flug war ich ziemlich aufgeregt und nervös, da ich den "Flug" vom vorigen Tag noch immer nicht ganz verdaut hatte. Da wurde mir auch zum ersten Mal wirklich bewusst, wie viel Risiko jedes Mal mitfliegt. Wie sich herausstellte, war die nicht optimale Gewichtsverteilung das Hauptproblem des letzten Fluges. Nun funktionierte endlich alles bestens.

Ich bin beeindruckt, wie stabil und träge das Flugzeug fliegt und wie gut es gleiten kann. Bis jetzt bin ich mit meiner Wahl der Komponenten zufrieden.



Abb. 24 Aufbau der Bodenstation vor dem Flug



Abb. 25 Es fliegt!

6.6 Härtetests

Nach einem erfolgreichen Erstflug folgten Tests, die das Flugzeug an seine Grenzen bringen sollte. Auch die FPV-Ausrüstung kam dabei zum ersten (und letzten) Mal zum Einsatz.

6.6.1 FPV-Vorbereitungen

Dank der einfachen Stecktechnik der einzelnen FPV-Komponenten kann man das gesamte FPV-Equipment innerhalb von 10 Minuten in das Flugzeug ein- bzw. ausbauen. Die notwendigen Vorbereitungen an der Bodenstation sind ebenfalls überschaubar. Der Empfänger und die Videobrille müssen lediglich miteinander verkabelt werden. Zwei kleine Lipo-Akkus versorgen beide Komponenten mit der nötigen Betriebsspannung.

6.6.2 Flüge

08.03.2014

Erster Flug - mit einer Batterie und kompletter FPV-Ausrüstung

- Der Start verlief wie geplant. Das zusätzliche Gewicht war beim Fliegen allerdings deutlich zu spüren. Das Flugzeug wurde träger und schwerer zu kontrollieren. Das Gewicht schlug sich ebenfalls in einer kürzeren Flugzeit und einer höheren Sinkrate (- 2 m/s) beim Gleitflug nieder. Dies ist beides logisch und nachvollziehbar, aber stärker, als ich erwartet hätte.
→ Flugzeit: ca. 10 min.

Zweiter Flug - mit zwei Batterien und kompletter FPV-Ausrüstung

- Der erste Start misslang. Das Flugzeug war so schwer, dass es trotz 100 % Schub direkt in den Boden krachte. (Glücklicherweise ohne Schäden zu verursachen.) Beim zweiten Start war es schon etwas besser aber trotzdem knapp. Diese zweite Batterie war eindeutig zu viel des Guten. Die Sinkrate lag zwischen - 3 und - 4 m/s und machte das Gleiten ohne Motor fast unmöglich. Dies wiederum führte dazu, dass die Akkus keine Ruhepause hatten, um sich zu erholen. → Flugzeit: ca. 6 min.

Dritter Flug - mit einer Batterie und der GoPro Hero 3+, ohne FPV-Zubehör

- Eindeutig die beste Konstellation. Sinkrate: - 2 m/s und eine Flugzeit von rund 15 min.

Fazit:

- Gewicht wird noch eine sehr grosse Rolle spielen. Ich muss daher ein noch grösseres Augenmerk auf das Endgewicht des Flugzeugs legen und es so gering wie möglich halten.
- Das Fliegen mit FPV wird wahrscheinlich wegen des zusätzlichen Gewichts und des Stromverbrauchs vorerst in den Hintergrund treten. Die Qualität der Bildübertragung liess ebenfalls zu wünschen übrig.

- *Möglicherweise könnte ein neuer, grösserer Propeller einen noch effizienteren Flug ermöglichen. Ich werde mich daher auf die Suche nach einem Propeller mit den geeigneten Massen begeben.*

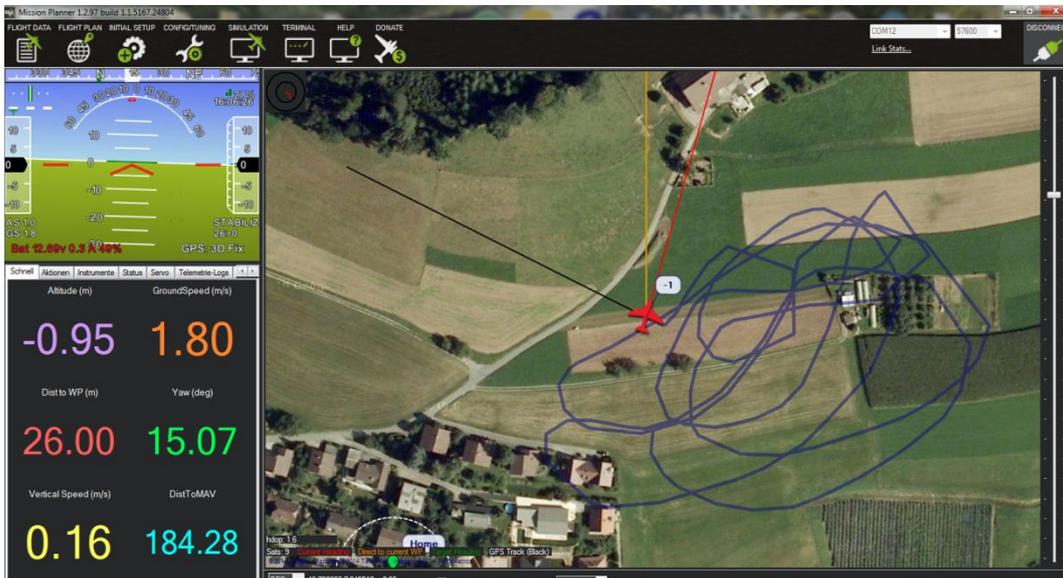


Abb. 26 die von der Mission Planner Software aufgezeichnete Flugroute (blau)

6.7 Autonomer Erstflug

Um einen autonomen Flug durchzuführen, benötige ich neben meinem erfolgreich getesteten Flugzeug auch noch eine passende Software.

6.7.1 Mission Planner Software

„Mission Planner“ ist der Name des Programmes, das während des Fluges über das zweite Telemetrie-Modul mit dem Flugzeug verbunden ist. In diesem Programm sehe ich live unter anderem die aktuelle Flughöhe, -geschwindigkeit, und exakte Position der Drohne.

Mit dieser Software bin ich aber auch in der Lage, im Vorhinein eine Flugstrecke zu definieren. Diese Flugroute kopiere ich vor dem Flug auf das APM 2.6. Durch das Betätigen eines Schalters an der Fernsteuerung wechselt der Flugmodus in „autonom“. Damit gebe ich der Drohne den Befehl, die vorgefertigte Mission GPS-gestützt abzufliegen. Nach Beendigung der Mission kann ich den Flugmodus wieder auf „manuell“ ändern und das Flugzeug sicher von Hand landen.

6.7.2 Erstellen einer Mission

Ich möchte hier in 5 Schritten zeigen, wie man in der Mission Planner Software eine kleine Mission erstellt:

1. Programm öffnen.
2. Unter „Flight Plan“ einen Ort für seine Mission auf der Karte suchen.
3. Ein Linksklick auf die Karte erstellt einen „Wegpunkt“. Alle Wegpunkte werden durchnummeriert. Das Flugzeug wird nacheinander zu den einzelnen Wegpunkten fliegen. Die gelben Verbindungslinien zwischen den Wegpunkten symbolisieren die spätere Flugstrecke.
4. Jedem Wegpunkt wird eine individuelle Flughöhe zugeteilt.
5. Die Mission ist fertig und kann auf das APM 2.6 übertragen werden.

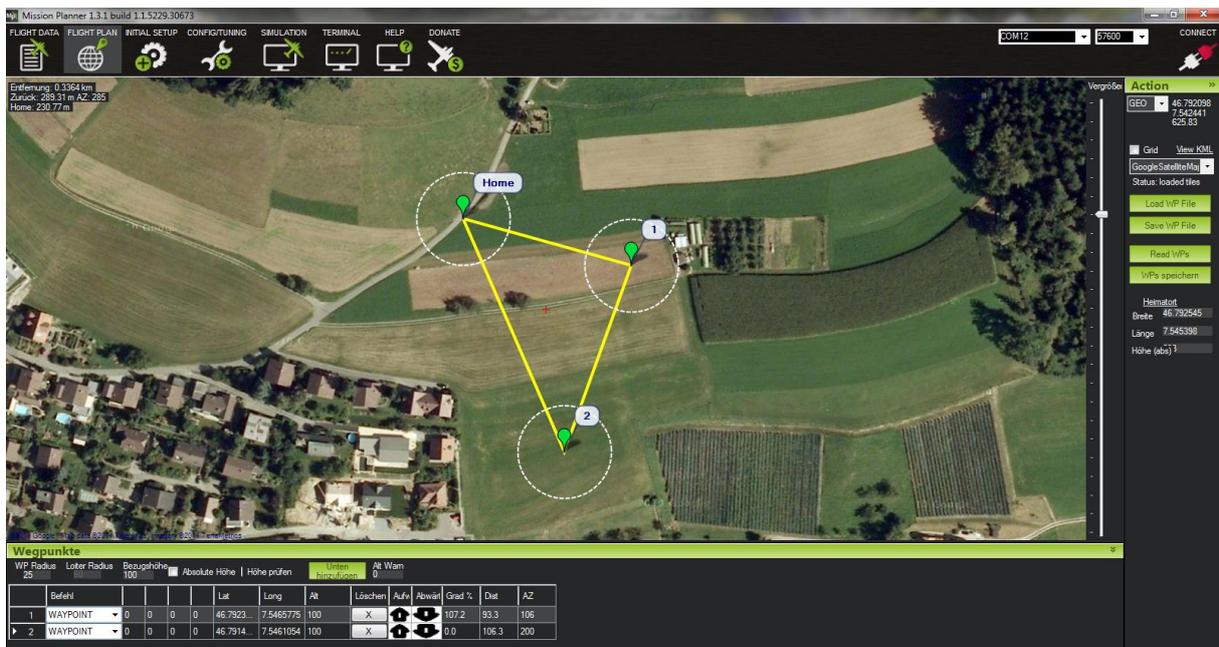


Abb. 27 Bei dieser Mission flöge das Flugzeug vom Start (Home) über „Wegpunkt 1“ zu „Wegpunkt 2“ auf einer Höhe von 100 m über dem Startpunkt.

Es handelt sich hierbei um die kleinstmögliche Form einer autonomen Flugmission. In meinen Missionen erstelle ich bis zu 50 Wegpunkte und steuere sogar einzelne Servos gezielt an.

6.7.3 Weitere Flüge

16.03.2014

Die ersten beiden Testmissionen, bei denen die Drohne selbstständig zuvor festgelegte Ziele ansteuerte, sind abgeschlossen. Die wichtigsten Erkenntnisse aus diesen jeweils etwa 5-minütigen Flügen sind folgende:

- Anfangs hatte ich noch Schwierigkeiten bei der Übermittlung der Flugziele vom Laptop auf die Steuereinheit der Drohne. Diese Probleme konnte ich beheben.
- Ich kann nun zwischen 5 statt 3 Flugmodi wechseln. Bei Bedarf bestünde sogar die Möglichkeit, einen weiteren hinzuzufügen.
- Die Reichweite der Verbindung zwischen Drohne und Laptop ist nun bekannt. Diese ist während des Fluges von grosser Bedeutung, da ich über sie wichtige Live-Daten wie etwa die aktuelle Position der Drohne erhalte. Sie beträgt etwa 450 m. Auf der Abbildung 28 ist das Verlieren und Wiedererlangen einer Verbindung deutlich zu erkennen.

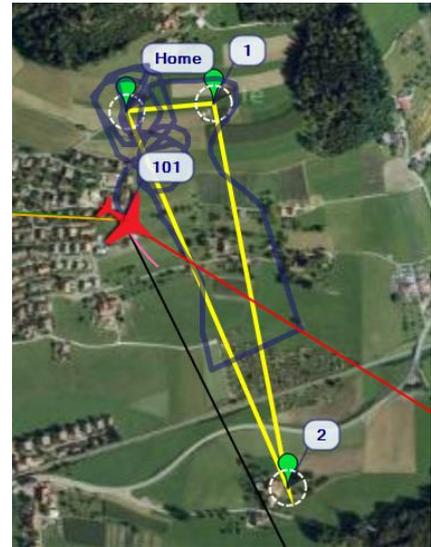


Abb. 28 Auf dem Weg von Punkt 1 zu Punkt 2 brach die Verbindung ab. Der Laptop konnte nur die halbe Mission mit der blauen Linie aufzeichnen.

6.8 Leitfrage 1

Meine erste Leitfrage (siehe Kapitel 4.2), ob es möglich ist, ein autonom fliegendes Modellflugzeug aus handelsüblichen Modellflug-Einzelbauteilen zu konstruieren, kann an dieser Stelle eindeutig mit „ja“ beantwortet werden. Es ist mir gelungen, ein autonom fliegendes Modellflugzeug aus diversen Einzelteilen aus aller Welt zusammenzubauen.

7 Luftaufnahmen

Ich bin nun im Besitz eines Flugzeuges, das autonom zuvor definierte Ziele ansteuern kann. Der nächste Schritt zu einem 3D-Landschaftsmodell ist das Erstellen von Fotos während eines Fluges.

Der Inhalt der folgenden Unterkapitel (7.1 - 7.3) entspricht wieder einer überarbeiteten Version meines Blogs. Kapitel 7.1 bezieht sich auf einen Zeitraum von knapp zwei Wochen und beinhaltet die zweite Bauphase. Das Ziel dieser Bauphase bestand darin, während einer Mission Fotos des überflogenen Gebietes aufzunehmen. Es sollten dabei sowohl horizontale/frontale als auch seitwärts gerichtete Fotos entstehen.

7.1 Mechanische Vorrichtung

Die mechanische Vorrichtung muss einige Eigenschaften erfüllen, um als Kamera-Aufhängung tauglich zu sein:

- Schutz der Kamera während der Start- und Landephase. Der Skywalker X8 besitzt kein Landegestell. Die nach unten gerichtete Kamera würde Schaden nehmen.
- Aufnahme horizontaler/frontaler Fotos des überflogenen Gebietes
Horizont und Bildebene sind parallel
- Aufnahme seitwärts gerichteter Fotos, z. B. Bilder von Hausfassaden
- geringes Gewicht der Kamera-Aufhängung
- Nutzungsmöglichkeit sowohl per Fernsteuerung als auch in autonomer Mission

Ich beginne zunächst mit dem Testen eines zuvor gebauten Prototyps.

7.1.1 Prototyp

23.03.2014

Nach einigen kleinen Anpassungen ist der Prototyp für die Kamera-Aufhängung fertig. Die Ergebnisse diverser Gewichtstests haben dazu geführt, dass ich das Design komplett überarbeiten musste. Die Kamera-Aufhängung ist ausschliesslich mit einer „GoPro Hero“ kompatibel. Theoretisch könnte nach kleinen Umbauten auch eine andere Kamera benutzt werden.

Ich habe mich für die GoPro entschieden, da sie leicht und gut zu montieren ist. Sie wäre eigentlich als FPV-Kamera gedacht gewesen, wird aber, da das Fliegen per FPV auf Eis gelegt ist, nicht mehr in der Art genutzt.

Die Kamera-Aufhängung habe ich aus möglichst viel leichtem und dafür nicht ganz so stabilem Material zusammenmontiert. Sie dient lediglich zur Überprüfung meiner Pläne.

Als nächster Schritt steht das Koppeln des Prototyps an das Flugzeug an, um die Bewegungen der drei Servos zu testen.



Abb. 29 Prototyp aus Depron mit der GoPro Kamera

7.1.2 Bau der finalen Kamera-Aufhängung

06.04.2014

Laut Zeitplan hat die zweite Bauphase begonnen. Somit starte ich nach dem erfolgreichen Bau eines Prototyps für die Montage der Kamera mit der endgültigen Version. Anstatt der leichten Depron⁹-Platten verwende ich dünne und stabile Holzplättchen mit 2 mm Dicke. Bei Tests hat sich gezeigt, dass sich die Depron-Konstruktion unter der Last der Kamera biegt und instabiler macht. Aus dem Fachhandel konnte ich mir Kleinteile wie Plastikdraht, Control Horns¹⁰ und diverse Schrauben besorgen. Für die Montage des Rotationsservos - Er soll die GoPro um die eigene Achse rotieren lassen. - und die Verbindung zwischen Kamera und Aufhängung muss ich mir noch eine geeignete Lösung überlegen.

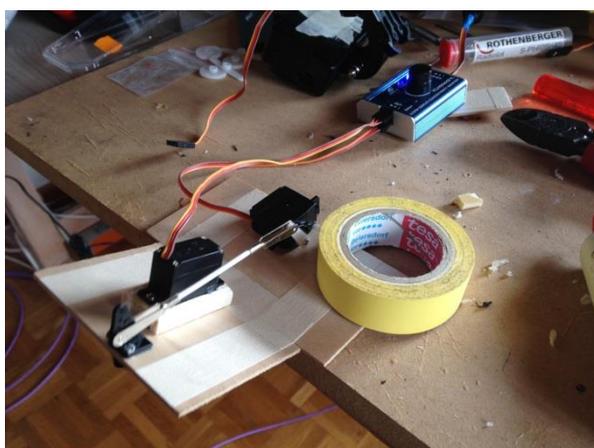


Abb. 31 funktionierender Ausklappmechanismus der finalen Kamera-Aufhängung



Abb. 30 Chaos am Arbeitsplatz

⁹ Depron = ähnelt Styropor, ist aber dank seiner feineren Körnung leichter zu verarbeiten

¹⁰ Control Horns = kleine, meist aus Plastik oder Holz hergestellte Bauteile, von denen jeweils eines in jede Lenkklappe eingebaut wird, werden mittels Draht mit dem jeweiligen Servo verbunden, der Servo bewegt die Lenkklappe.

07.04.2014

Das Erarbeiten einer brauchbaren Lösung zum Verbinden der GoPro mit der Kamera-Aufhängung hat mich viel Zeit gekostet. Die beiden Teile werden nun von einer 2 mm dicken und 3 mm langen Schraube zusammengehalten. Auch der Rotations-servo ist einsatzbereit. Auf den Servo, welcher den Auslöser der Kamera betätigt, werde ich mich später konzentrieren. Nun geht es an den Einbau der Aufhängevorrichtung in die Drohne.

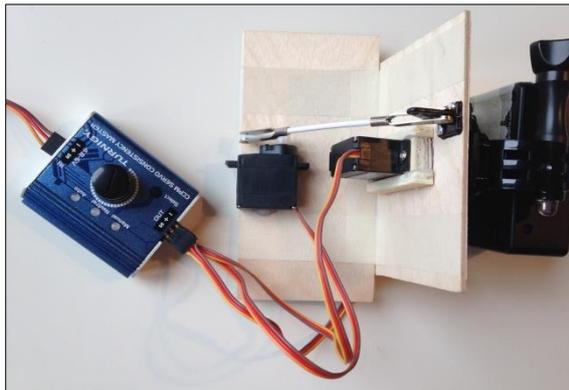


Abb. 32 Kamera-Halterung mit Servotester

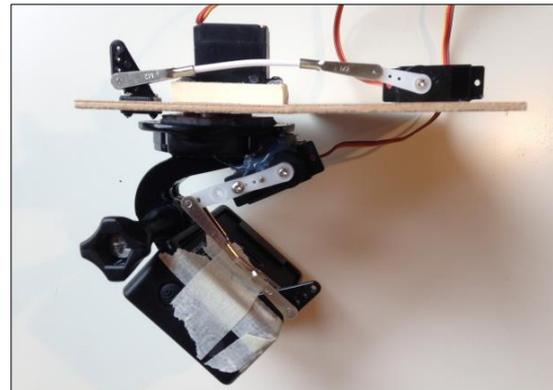


Abb. 33 Seitenansicht der beweglichen Aufhängung

08.04.2014

Die Aufhängung samt GoPro ist in der Nase meines Flugzeuges eingebaut. Ich habe mich für die Nase entschieden, da sie am meisten Platz bietet und am weitesten vom Motor entfernt ist. Durch die grösstmögliche Distanz und den Einbau von Schaumstoff erhoffe ich mir, die Vibrationen des Motors zu dämpfen.

Das neue Loch auf der Unterseite der Drohne, aus dem die Kamera-Halterung ausgefahren wird, versuche ich, so klein wie möglich zu halten, um die Stabilität des Rumpfes zu wahren. Bei Instabilität werde ich zusätzliche Karbonstangen einbauen. Die grösste Schwierigkeit beim Einpassen der Kamera-Aufhängung besteht darin, dafür zu sorgen, dass sich alle Servos ungehindert auf möglichst kleinem Raum bewegen können.

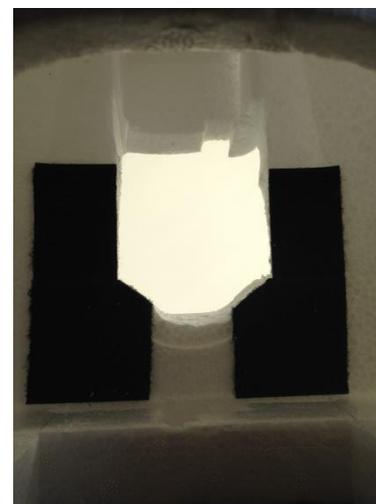


Abb. 34 herausgeschnittene Öffnung in der Flugzeugnase vor dem Einbau

Die Kamera-Aufhängung kann nun aus dem Flugzeugrumpf ausfahren. Dazu müssen zwei separate Kippschalter an der Fernsteuerung belegt werden. Da diese beiden Schalter die einzigen noch freien Schalter sind, stellt sich mir die Frage, wie ich die GoPro rotieren lassen und den Auslöser der Kamera betätigen soll.

09.04.2014

Heute ist es mir gelungen, das Ausfahren der Kamera-Halterung mit nur einem Kippschalter zu steuern. Der frei gewordene Schalter wird nun für das Rotieren der Kamera benutzt. Auf der Suche nach einer Lösung habe ich viel Zeit mit dem Programmieren des Senders verbracht. Nach stundenlangem Tüfteln wird jetzt beim Ausfahren der eine Servo stark verlangsamt und beim Einfahren der Aufhängung stark beschleunigt. Damit verhindere ich, dass sich die Kamera-Aufhängung bereits im Inneren der Drohne entfaltet, auf Grund des geringen Platzes verkantet und sich schliesslich selbst zerstört.

Für das Auslösen der GoPro habe ich noch keine zufriedenstellende Lösung gefunden.

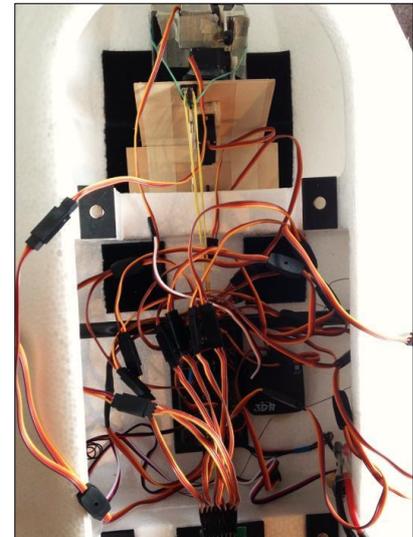


Abb. 35 Chaos auch im Innern der Drohne

10.04.2014

Das Rotieren der Kamera um ihre eigene Achse ist nun möglich. Ich konnte dazu - wie geplant - den frei gewordenen Kippschalter am Sender verwenden. Es zeigt sich allerdings ein neues Hindernis: Der verwendete Servo lässt sich nicht um 180° lenken. Ich erreiche lediglich 150°. Ohne diese 180° ergibt meine Konstruktion aber keinen Sinn.

Ursprünglich hatte ich geplant, die Kamera über ein Kabel auszulösen. Das Kabel verbindet Kamera und Steuerungsboard. Recherchen im Internet haben aber gezeigt, dass dieses Verfahren nur mit Kameras der Marke "Canon" funktioniert. Daher habe ich mich für das Auslösen per Servo entschieden. Das Montieren des zusätzlichen Servos am GoPro-Gehäuse klappte aber bisher noch nicht. Die Oberfläche des Gehäuses besteht nämlich aus einer speziellen Plastikschiicht, an der Heissleim nicht haftet. Andere Klebstoffe wie Sekundenkleber kommen nicht in Frage. Das Risiko einer Fehlplatzierung und die daraus resultierende Verschandelung der Kamera kann ich nicht eingehen.

12.04.2014

Heute stattete ich dem Fachhändler einen weiteren Besuch ab. Ich besorgte grössere Propellerblätter, um die Effizienz und somit auch die Flugdauer zu erhöhen. Leider wächst dadurch die Gefahr einer erneuten Überhitzung des Motors. Einen passenden Servo für das Rotieren meiner Kamera hatten sie nicht auf Lager.

13.04.2014

Der Kamera-Auslöser ist fast fertig. Ich habe einen Weg gefunden, wie ich den Servo an der Kamera befestigen kann (Klebeband auf Kamera → Servo mit Heissleim auf

Klebeband aufleimen). Im Moment versuche ich, den Anfangs- und den Endpunkt des Servo-Ausschlags festzulegen. Wird er zu wenig ausgelenkt, wird der Auslöser der GoPro nicht betätigt. Bei zu starker Auslenkung löst sich der Servo von der Kamera.



Abb. 36 der auf die GoPro geklebte Auslöseservo



Abb. 37 Gummknopf, der den Auslöser drückt

Um zu verstehen, wie ich den Servo ohne einen Kippschalter am Sender auslösen kann - und das zum exakt richtigen Zeitpunkt - muss ich viel recherchieren und viele verschiedene Vorschläge ausprobieren und an meine Konstruktion anpassen.

14.04.2014

Die langwierige Suche war ihre Mühe wert! Ich habe Einiges herausgefunden:

- *Die Anfangs- und Endpunkte des Auslöseservos sind gefunden und notiert.*
- *Ein Servo kann entweder per Kippschalter oder automatisch vom Autopiloten ausgelöst werden. Da ich dem Rotieren der Kamera bereits einen Schalter zugewiesen hatte, wäre es mir nicht möglich gewesen, eine automatische Rotation des Servos in einer autonomen Mission einzubinden. Das wäre ja nicht mehr "autonom".*
- *Ich weiss nun, wo ich den „Job“ jedes einzelnen Servos und den jeweiligen Mechanismus der Auslöseart definieren kann.*

Dank dieser neuen Erkenntnisse habe ich mein bisheriges Setup nochmals ein wenig abgeändert. Da ich bereits viel Zeit in dieses Arbeitsgebiet investiert hatte, gingen die Umbauten relativ rasch.

- *In einer autonomen Mission wird jetzt der Rotations- und der Kamera-Auslöseservo automatisch und ohne mein Zutun vom Autopiloten ausgelöst.*
- *Diese Änderung erlaubt es mir, die beiden Servos, die ich einige Tage zuvor auf einen Kippschalter gelegt hatte, wieder über je einen separaten Schalter auszulösen. Das gewährt mehr Flexibilität und Sicherheit.*

15.04.2014

Die letzten Verfeinerungen und Tests an der Kamera-Aufhängung sind abgeschlossen und eine neue Testmission erstellt. Rein zufällig hat sich beim Experimentieren auch das Problem mit der 180-Grad-Drehung gelöst. Wenn ich den Servo am Laptop auslöse, erreiche ich sogar bis zu 200° Auslenkung.

Der Bau der Kamerahalterung ist an dieser Stelle abgeschlossen. Mit den insgesamt 4 eingebauten Servos kann die Kamera in fast jede beliebige Position gebracht werden.

ausgelöst per **Kippschalter**:

- (1) Ausfahren der Kamera aus dem Rumpf
- (2) Bestimmen des Aufnahmewinkels (0°/15°/35°/65°)

ausgelöst vom **Autopiloten**:

- (3) Rotieren der Kamera um die eigene Achse
- Auslösen der GoPro

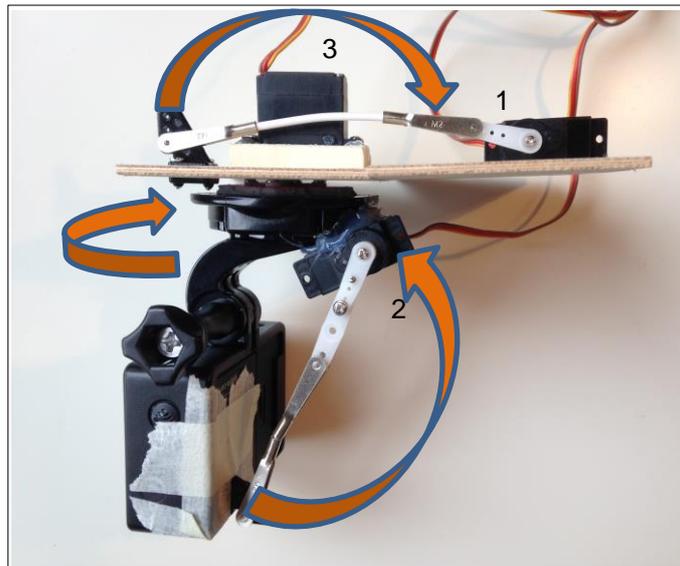


Abb. 38 fertige Aufhängung (ohne Kamera-Auslöser)

Leider blies heute bei uns eine kräftige Bise. Den ersten Flug mit Kamera-Halterung werde ich in der ersten Woche nach den Frühlingsferien wagen. (Ich verreise über Ostern).

7.1.3 Test Kamera-Aufhängung

Das Testen der endgültigen Kamera-Aufhängung im Freien konnte nicht wie geplant stattfinden. Schlechtes Wetter machte das Fliegen unmöglich.

05.05.2014

Ich warte immer noch auf geeignete Wetterbedingungen. In der Zwischenzeit habe ich ausprobiert, ob das Ein- und Ausfahren der Kamera-Aufhängung auch bei Gegenwind funktioniert. Dabei habe ich den Gegenwind mit einem Föhn simuliert. Auch bei der höchsten Stufe funktionierte alles reibungslos.

10.05.2014

Nach nunmehr drei Wochen Warten auf gutes Flugwetter habe ich heute den schönsten Tag der Woche genutzt, um den ersten Flug mit Kamera-Aufhängung und neuem Propeller zu absolvieren. Die Bedingungen waren nicht optimal und starke Windböen während des Fluges führten sogar zu einem Absturz.

Eine kurze Analyse des Fluges:

- *Die Startbedingungen waren aufgrund einer kurzen Windflaute in Ordnung.*
- *Dank des neuen Propellers war ein rasches Aufsteigen nach dem Start möglich. Das zusätzliche Gewicht war kaum spürbar.*
- *Die zuvor erstellte Mission verlief planmässig und lieferte die gewünschten Ergebnisse. Der Autopilot löste alle 30 m den Auslöser der Kamera aus. So entstanden 7 Fotos. Das bedeutet, das Ein- und Ausfahren, das selbstständige Rotieren und das Auslösen der GoPro sind nun auch in der Luft und in einer autonomen Mission möglich.*

Nachdem das Ziel des Fluges erreicht war, setzte ich zum Landeanflug an. Unterdessen hatte der Wind aufgefrischt. Bei der letzten Kurve wurden die Kräfte auf eine Steuerklappe zu gross. Die Verbindung zwischen Servo und Steuerklappe riss aus dem Styropor aus. Das Flugzeug stürzte unkontrollierbar die restlichen 6 Meter bis zum Boden ab.

Schäden:

- *Der Rumpf brach auf der linken Seite in zwei Hälften.*
- *Die Batterie zerdrückte die Halterung für die Kamera. Die Halterung zerbrach in drei Teile.*
- *Kleine Kratzer an den Flügeln und der Unterseite des Flugzeugs.*

Massnahmen:

- *Das Kleben des Rumpfes und die Reparatur der Kamera-Halterung wird mich schätzungsweise etwa zwei Arbeitsstunden kosten. Das erneute Justieren weitere zwei Stunden.*
- *Der Motor wurde auf Grund des grösseren Propellers wie erwartet ziemlich heiss. Ich bin mir noch nicht sicher, ob ich ein erneutes Überhitzen riskieren soll.*

Fazit:

Ich hatte Glück, dass sich der Zwischenfall im Landeanflug und damit bei einer geringen Flughöhe ereignet hat. Die Schäden sind vergleichsweise leicht zu reparieren und die Elektronik blieb unbeschädigt. Das eigentliche Ziel dieses Fluges, der Test der Kamera-Aufhängung, verlief wie geplant. Die gewonnenen Bilder sind von guter Qualität. Ich weiss nun, dass mein Aufbau funktioniert.



Abb. 39 gebrochene Schnauze nach dem Absturz



Abb. 40 Bild nach rechts mit einem Teil des Flügels

7.2 Leitfrage 2

Meine zweite Leitfrage (siehe Kapitel 4.2), ob mein Modellflugzeug in der Lage ist, eine Kamera zu tragen und mit dieser selbstständig Fotos aufzunehmen, kann an dieser Stelle eindeutig mit „ja“ beantwortet werden. Es ist mir gelungen mein Flugzeug so zu optimieren, dass es Bilder des überflogenen Gebietes selbstständig und aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufnimmt.

7.3 Abschlussmission

Das Ziel der Abschlussmission besteht darin, das Bildmaterial für mein finales 3D-Landschaftsmodell zu erstellen. Zuvor müssen allerdings noch einige Vorbereitungen getroffen werden.

7.3.1 Vorbereitungen

Für die finale Mission sind unter anderem folgende Punkte von Bedeutung:

- geeigneter Einsatzort
- passende Wetterverhältnisse
- vorprogrammierte Mission

Einsatzort

Damit eine Gegend als Einsatzort geeignet ist, muss er folgende Kriterien erfüllen:

- keine oder nur wenige sich bewegende Objekte (Autos/Menschen)
- ausreichend Platz für Start und Landung
- keine störenden Hindernisse wie Hochspannungsleitungen oder Kabel
- ein möglichst abwechslungsreiches und interessantes Terrain (Bäume, Büsche, Wiesen, Felsen, Häuser, Strassen, Wasser, ...)

31.05.2014

Vergangenes Wochenende besichtigten meine Familie und ich den Seebergsee im Naturpark Diemtigtal (ca. 1'800 m.ü.M.). Vielleicht eine gute Location für meine finale Flugmission. Doch so schön es dort auch ist, ein Spaziergang wäre dieser Flug definitiv nicht! Während eines Rundganges fielen mir folgende Hindernisse auf:

- *Das Areal ist gross → Flug ausserhalb unserer Telemetrie-Reichweite*
- *Der Höhenunterschied zwischen See und dem höchsten Objekt beträgt fast 300 m. Unsere bisher höchsten Flüge absolvierten wir auf rund 100 m.*
- *Es gibt lediglich zwei potentielle Landeplätze.*
- *Während unserer Besichtigung blies ein kräftiger, böiger Wind.*



Abb. 41 Panoramabild des Seebergsees

Nach dieser "Begehung" bin ich der Meinung, dass eine Mission in diesem Gelände machbar wäre. Allerdings sind Vorbereitungen und die ausführliche Planung im Vorfeld sehr aufwändig und zeitintensiv. Eine definitive Entscheidung ist noch nicht gefallen.

Wetter

04.06.2014

Da für eine erfolgreiche Mission viel von den jeweiligen Wetterverhältnissen abhängt, habe ich mich diesbezüglich noch etwas genauer informiert. Für einen gelungenen Flug bräuchte es eigentlich gar nicht viel:

- *genügend Licht für gute Fotos*
- *kein Regen oder Dunst (kleine Wassertröpfchen könnten die Kommunikation zwischen Flugzeug und Fernsteuerung negativ beeinflussen)*
- *und das Wichtigste: kein Wind! (In diesem Bereich habe ich ja bereits meine Erfahrungen gemacht ...)*

Bei meinen ersten Testflügen vor etwa 3 Monaten war der Spätnachmittag die beste Flugzeit. Dies hat sich geändert. Laut meinen Beobachtungen ergeben sich die besten Flugmöglichkeiten am Morgen zwischen 7:00 und 8:00 Uhr. Zu dieser Zeit ist die Sonne bereits aufgegangen und es herrscht Windstille. Diese Beobachtungen habe ich an meinem Wohnort Seftigen gemacht. Sie gelten daher natürlich nicht für den Rest der Schweiz.

Wind							
2 Uhr	5 Uhr	8 Uhr	11 Uhr	14 Uhr	17 Uhr	20 Uhr	23 Uhr
→	→	↗	→	↘	↘	↘	→
Böenspitzen 9 km/h	Böenspitzen 7 km/h	Böenspitzen 9 km/h	Böenspitzen 13 km/h	Böenspitzen 22 km/h	Böenspitzen 24 km/h	Böenspitzen 22 km/h	Böenspitzen 15 km/h
Durchschnittl. Wind 4 km/h	Durchschnittl. Wind 4 km/h	Durchschnittl. Wind 4 km/h	Durchschnittl. Wind 7 km/h	Durchschnittl. Wind 11 km/h	Durchschnittl. Wind 13 km/h	Durchschnittl. Wind 11 km/h	Durchschnittl. Wind 6 km/h

Abb. 42 Windentwicklung in Seftigen, Samstag, 21.06.2014 (Quelle: SRFMeteo)

Die neu gewonnenen Informationen werde ich am kommenden Samstag mit einem Testflug prüfen.

Testmission

07.06.2014

Eine weitere erfolgreiche Testmission ist abgeschlossen. Erstmals entstanden horizontal aufgenommene Bilder des überflogenen Gebietes. Das dabei entstandene Bildmaterial deckt in etwa 120'000 m², also 0.12 km² ab. Die Mission bestand aus zwei separaten Flügen:

Erster Flug *Horizontaler Überflug des Gebietes auf 80 bzw. 170 m Höhe über dem Startpunkt in einer schlaufenförmigen Flugstrecke → 25 Fotos von „oben“.*

Zweiter Flug *Überflug mit seitlich ausgerichteter Kamera, ebenfalls auf ca. 80 bzw. 170 m. Flug in Schlaufenform. Die Kamera drehte sich stets selbstständig zum Berg. → 40 Fotos von der „Seite“ (Fassaden der Gebäude und seitliche Ansichten von Bäumen und Büschen)*

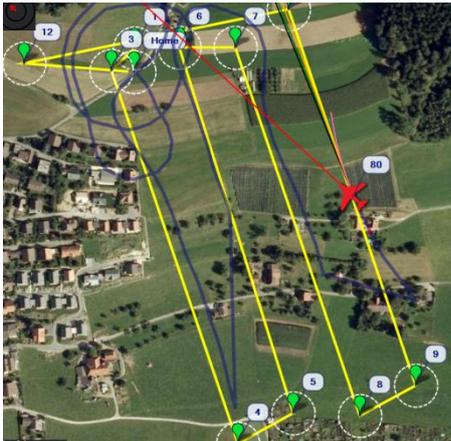


Abb. 43 erster Flug -> horizontale Bilder

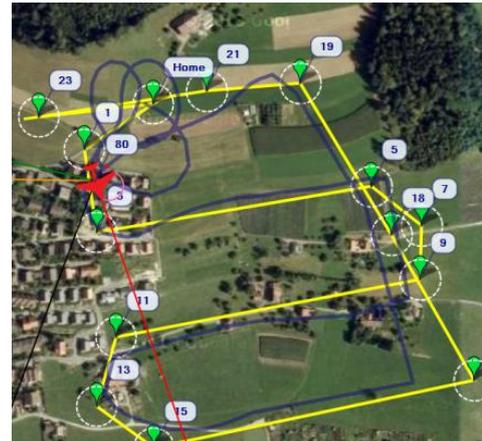


Abb. 44 zweiter Flug -> seitliche Bilder

Das Flugwetter war wie erwartet optimal und die beiden Flüge erfolgten ohne Zwischenfälle. Doch wie fast jedes Mal, bekam der Flieger dennoch ein paar Kratzer ab. Beim Start des dritten Fluges landete er erneut unsanft auf der Nase, sodass die bereits zuvor gebrochenen und wieder reparierten Stellen erneut aufsprangen. Dieser Flug hatte eigentlich darüber Aufschluss geben sollen, ob und wie ein Flug in 250 m Höhe im Hinblick auf die Situation am Seebergsee zu bewerkstelligen wäre. Die verbesserte Fixierung der Batterie bewahrte die Kamera-Aufhängung erfolgreich vor Schäden. Nach erneutem Leimen wird der Flieger wieder einsatzbereit sein.

Für die Flüge verwendete ich die grösseren Propeller. Die Hitzeentwicklung hielt sich ohne Gegenwind in Grenzen. Ich werde ihn weiterhin benutzen.

7.3.2 Durchführung der Abschlussmission

22.06.2014

Die endgültige Mission meines Projektes ist durchgeführt. Sie fand wie bereits meine Testmission in Seftigen statt. Ich habe mich gegen eine Mission am Seebergsee entschieden, da sie meiner Meinung nach einen zu grossen Aufwand und ein zu hohes Risiko darstellt. Bei den üblichen Sicherheitschecks am Vorabend brannte noch ein Servo der Kamera-Aufhängung aus, beschädigte dabei aber keine weiteren Komponenten. Ich tauschte ihn gegen einen Ersatzservo aus.

Die Mission fand zwischen 7:30 Uhr und 8:30 Uhr in Seftigen statt. Sie bestand aus drei Flügen:

Erster Flug Überflug 2/3 des gesamten Gebietes, durchschnittliche Flughöhe 130 m, schlaufenförmige Flugbahn → 155 Senkrechtfotos

Zweiter Flug Überflug des gesamten Gebietes mit seitlich ausgerichteter Kamera, Flughöhe 50, 80 und 90 m, schlaufenförmige Flugroute. Die Kamera drehte sich stets selbstständig zum Berg. (Fassaden der Gebäude und seitliche Ansichten von Bäumen und Büschen)
→ 108 Schrägbilder

Dritter Flug Überflug 1/3 des Fluggebietes, Flughöhe 60, 70 und 100 m, schlaufenförmige Flugroute → 42 Senkrechtfotos



Abb. 45 Flugstrecken der Flüge eins, zwei und drei der Abschluss-Mission (von links nach rechts)

Die gesamte Flugzeit belief sich auf knapp 25 Minuten. Das überflogene Gebiet hat eine Grundfläche von rund $540'000 \text{ m}^2$, also 0.54 km^2 , und ist somit fast vier Mal so gross wie die der vorangehenden Testmission. Die insgesamt zurückgelegte Flugstrecke betrug ca. 13 Kilometer.

Die Kamera-Halterung bekam bei der zweitletzten Landung noch ein paar Kratzer ab, die den Verlauf des dritten Fluges allerdings nicht behinderten. Alles in allem bin ich mit den entstandenen Bildern zufrieden und freue mich schon auf das fertige 3D-Modell.

8 3D-Modell

Die während der letzten Flüge gesammelten Luftbilder sollen zum Erstellen des 3D-Landschaftsmodells dienen. Dazu müssen die Aufnahmen zuerst ausgewertet und bearbeitet und anschliessend von einer dafür bestimmten Software erfasst werden. Aus den erfassten Daten wird in mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten ein 3D-Modell errechnet.

Der Wahl der am besten dafür geeigneten Software ging eine mehrere Wochen in Anspruch nehmende Test- und Experimentierphase voraus. Das Bildmaterial, das ich während der Testmission aufgenommen hatte, eignete sich gut als Testmaterial.

8.1 Bildbearbeitung

Bevor die Bilder zur Berechnung des Modells einsetzbar sind, müssen die durch die starke Krümmung der GoPro-Linse entstandenen Verzerrungen der einzelnen Bilder korrigiert und qualitativ ungeeignete Fotos aussortiert werden. Zahlreiche Bildbearbeitungsprogramme stehen dazu zur Auswahl. Nacheinander testete ich drei von ihnen und erläutere kurz die Ergebnisse.

8.1.1 Software Bildbearbeitung

- **Gimp:** Mit Gimp muss jedes Foto einzeln von Hand aufgerufen, bearbeitet und wieder gespeichert werden. Der zeitliche Aufwand ist eindeutig zu gross.
- **Photoshop CS4:** Mit Photoshop CS4 können dank einer eingebauten Funktion alle Bilder gleichzeitig bzw. automatisch bearbeitet werden. Wie stark die Verzerrung rückgängig gemacht wird, muss allerdings zu Beginn selbst eingestellt werden.
- **Lightroom 5:** Lightroom 5 liest die in jedem Bild encodierten Metadaten ein und stellt sogleich eine für die jeweils verwendete Kamera optimale Einstellung für das nachträgliche Ausbessern der Objektivverzerrungen bereit. Wie bereits bei Photoshop CS4 können alle Bilder gleichzeitig bearbeitet werden.

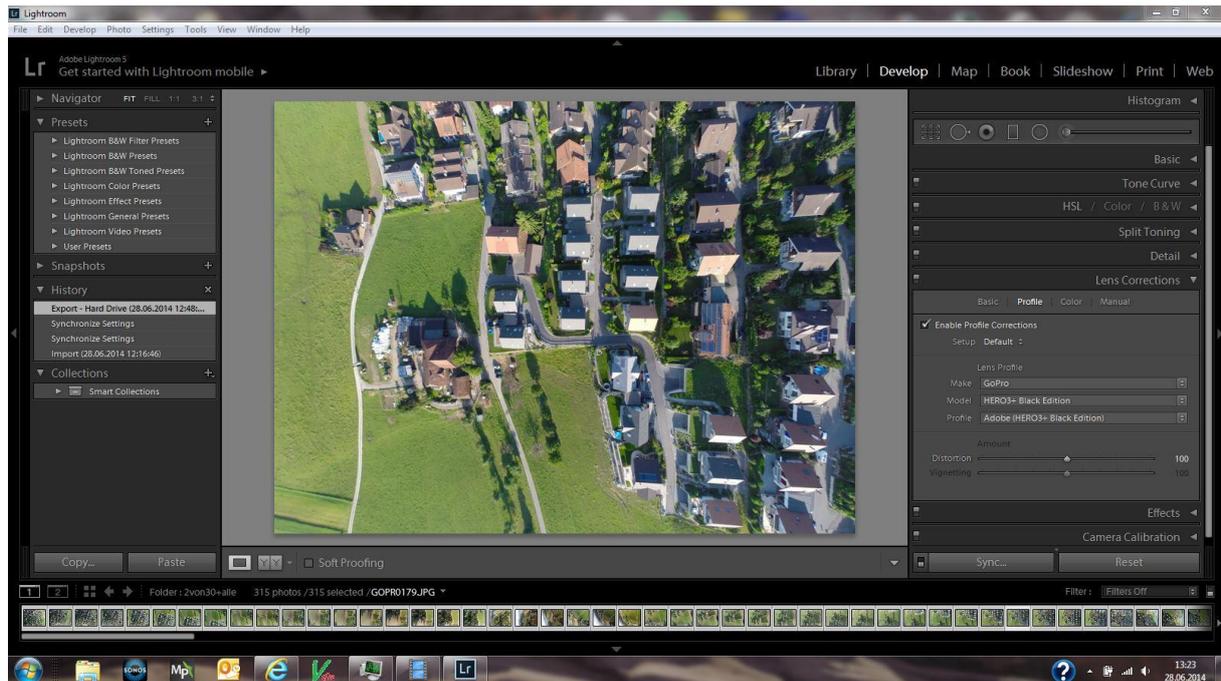


Abb. 46 Software Lightroom 5 im Einsatz

8.1.2 Ergebnis

Die Entscheidung fiel auf die 30-tägige Testversion von Lightroom 5. Alle bearbeiteten Bilder sind so gut wie möglich von der Linsenverzerrung befreit. Gleichzeitig konnten Kontrast, Schärfe und Farbintensität aller Aufnahmen leicht erhöht werden.

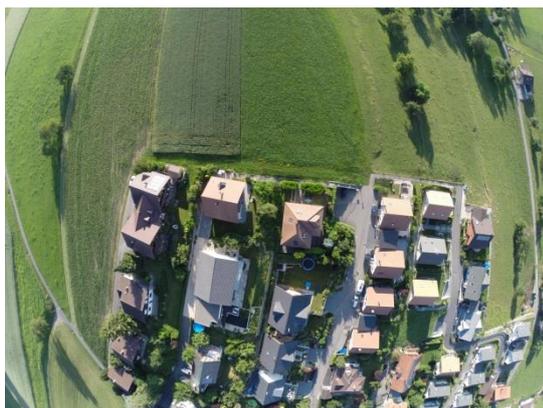


Abb. 47 Luftbild vor ...

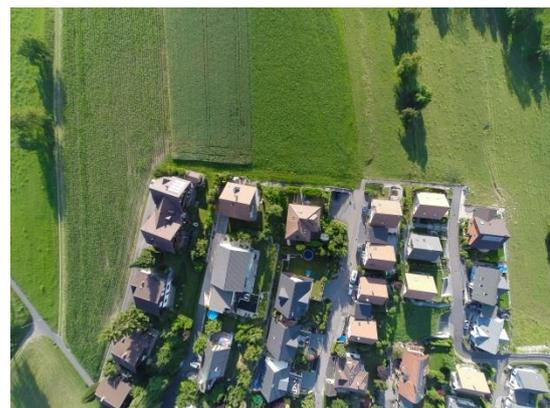


Abb. 48 ...und nach der Bearbeitung mit Lightroom 5

8.2 Software Modellberechnung

Die vier von mir getesteten Programme liefern sehr unterschiedliche 3D-Modelle, obwohl ihnen als Grundlage das gleiche Datenmaterial zur Verfügung steht. Bis auf Agisoft Photoscan sind alle Programme gratis. Hier meine Ergebnisse:

- **VisualSFM:** Es liefert das mit Abstand schlechteste 3D-Modell und ist umständlich zu bedienen.
- **ReCap 360:** Das Programm besticht durch ein schönes Design der Benutzeroberfläche. Die Bedienung ist leicht und das Ergebnis akzeptabel. Der Haken: Die Bildanzahl ist beschränkt.
- **123d catch:** Das Resultat ist mit dem von ReCap 360 vergleichbar. 123d catch besitzt allerdings ein höheres Fotolimit.
- **Agisoft PhotoScan:** Agisoft Photoscan ist ein kostenpflichtiges Programm. Aus reiner Neugierde testete ich die 30-tägige Testversion. Sie lieferte mit Abstand das beste Resultat. Das Programm ist vergleichsweise leicht zu bedienen und gewährt zudem viel Spielraum für individuelle Optimierungen.

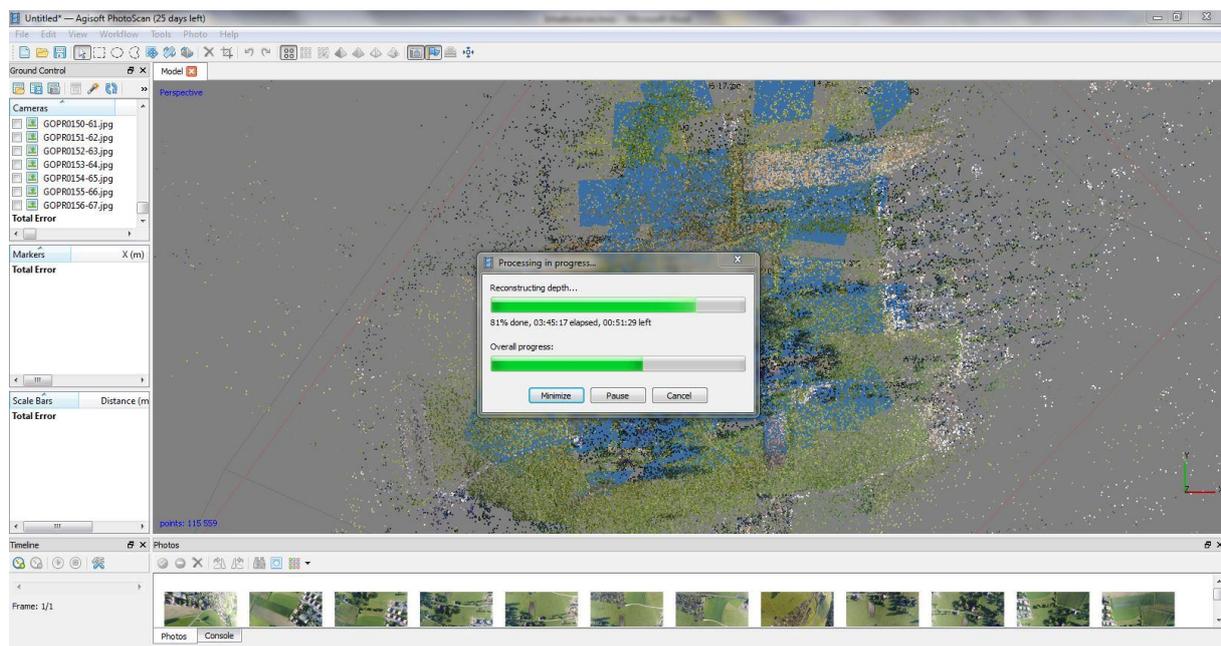


Abb. 49 Screenshot des Programms Agisoft PhotoScan

Verfahren

Grundsätzlich deckt sich der Ablauf von den einzelnen Aufnahmen bis zum fertigen 3D-Modell bei allen getesteten Programmen. Anhand des von mir favorisierten Programms Agisoft PhotoScan erläutere ich kurz das Verfahren.

Man installiert das Programm auf seinem eigenen Computer, startet ein neues Projekt und durchläuft einen Prozess, der in 5 aufeinander aufbauende Schritte unterteilt ist:

1. **Bilder laden:** Die zu verwendenden Bilder werden ausgewählt und ins Programm aufgenommen. Unbrauchbare Bilder werden automatisch aussortiert.
2. **Bilder aneinanderreihen:** PhotoScan ist mittels eines speziellen Verfahrens in der Lage, Position und Orientierung jedes Bildes im Raum zu bestimmen. Das Ergebnis wird in einer spärlichen Punktwolke angezeigt (max. 400'000 einzelne Punkte).
3. **Erstellen einer dichten Punktwolke:** Basierend auf den im zweiten Schritt gewonnenen Informationen, generiert PhotoScan eine dichte Punktwolke aus mehreren Millionen einzelner Punkte, welche die Oberfläche des Modells darstellt.
4. **Mesh erstellen:** Beim Erstellen eines Meshs wird jeder Punkt mit seinen jeweiligen Nachbarpunkten linear verbunden. Es bildet sich ein Polygonnetz. Anschliessend werden die entstandenen Flächen aufgefüllt.
5. **Textur:** Die Textur ist die letzte Schicht des Modells. Die für das 3D-Modell verwendeten Fotos werden über das Polygonnetz gelegt und verleihen ihm so die endgültige Farbe. [8]



Abb. 50 Entwicklungsprozess

Vor jedem Arbeitsschritt besteht die Möglichkeit, Parameter wie Präzision oder Genauigkeit anzupassen. Aber: Eine höhere Genauigkeit z. B. impliziert eine längere und Ressourcen zehrendere Verarbeitung. Aus diesem Grund erhöhte ich die Arbeitsspeicher-Kapazität meines Laptops von 4 GB auf 16 GB. Der Verarbeitungsprozess für mein 3D-Modell dauerte insgesamt ca. 35 Std.

8.3 Ergebnis

Nach unzähligen Testläufen und tagelangem Warten ist mein finales 3D-Modell fertig. Das aus der dichten Punktwolke entstandene Mesh besteht aus insgesamt 2'110'000 Polygonen. Die Auflösung ist mit etwa 10 cm pro Pixel nur leicht schlechter als die der ursprünglichen Bilder.

Im Grossen und Ganzen bin ich mit dem Resultat sehr zufrieden. Die geologischen Gegebenheiten des Terrains sind eindeutig zu erkennen und auch Objekte wie Häuser, Bäume und sogar einzelne Autos werden dargestellt.

Um ein noch optimaleres Ergebnis zu erhalten, müssten die Aufnahmen aus einer deutlich geringeren Höhe stammen. Sowohl die Genauigkeit als auch die Textur des Modells könnten dadurch verbessert werden. Eine weitere Möglichkeit bestünde darin, einzelne Bilder vom Boden aus zu erstellen (z. B. Hausfassaden, Bäume, kleine Details) und in den Arbeitsprozess einzubinden.



Abb. 51 Das finale 3D-Modell

8.4 Dateien 3D-Modell

Auf dem beigelegten USB-Stick sind folgende Dateien zu finden:

- Rohdaten Ordner → enthält alle Rohdaten (Punktwolke/Textur/3D-Modell)
- 3DModell.psz → vollständiges 3D-Modell (Nur für Agisoft PhotoScan)
- Orthophoto.jpg → zusammengesetzte Bilder

Um die oben genannten Dateien zu öffnen, wird eine dafür geeignete Software benötigt. Kompatibel wären z. B. folgende Programme: Agisoft PhotoScan, Adobe Photoshop, Blender, MeshLab.

Ich empfehle Agisoft PhotoScan. Es gibt eine zeitlich unlimitierte Demoversion, welche für das Betrachten des 3D-Modells ideal ist.

1. Herunterladen der neusten Version auf:
<http://www.agisoft.ru/products/photoscan/standard/demo/>
2. File → Open → 3DModell.psz
3. Klicken auf die kleinen Symbole in der Taskleiste macht die dem 3D-Modell zugrundeliegenden Schichten in verschiedenen Variationen sichtbar.



Abb. 52 Symbole der Taskleiste

8.5 Augment-App

Mit der Augment-App geht es noch einfacher. Mit ihr lässt sich ein Ausschnitt des 3D-Modells mit verminderter Auflösung in Augmented Reality anschauen.



Abb. 53 Augment Logo

1. Herunterladen der gratis App „Augment“ aus dem App Store / Google Play.
2. App öffnen und entweder nach dem Modell mit dem Namen „3DModell-Seftigen“ suchen, oder das Deckblatt dieser Maturaarbeit scannen.

8.6 Leitfrage 3

An dieser Stelle kann auch meine dritte und letzte Leitfrage (siehe Kapitel 4.2), ob mit den aufgenommenen Bildern ein 3D-Landschaftsmodell erstellt werden kann, eindeutig mit „ja“ beantwortet werden. Es ist mir gelungen, ein 3D-Modell aus meinen selbst gemachten Fotos zu errechnen.

9 Fazit

Während der vergangenen sechs Monate habe ich mich fast täglich mit diesem Projekt befasst. Es galt, immer wieder neu auftretende, unvorhergesehene, knifflige Probleme zu lösen, Entscheidungen zu treffen, Geduld zu bewahren, den Überblick zu behalten und „am Ball zu bleiben“.

Bis auf einzelne wetterbedingte Verzögerungen konnte ich meinen Zeitplan einhalten und die mir zuvor gesteckten Ziele und Bauabschnitte wie geplant erreichen.

Neben Einfallsreichtum, Flexibilität, Fleiss und Durchhaltevermögen war zur Vervollständigung meiner Arbeit auch ein erheblicher finanzieller Aufwand nötig. Die reinen Entwicklungs- und Materialkosten betragen am Ende ca. 2'065 Fr. Darin enthalten ist auch Material wie etwa die FPV-Ausrüstung (490 Fr.), welche leider nur kurz zum Einsatz kam. Die meisten neu erworbenen Komponenten werde ich künftig für andere Vorhaben wiederverwenden können. Eine vollständige Abrechnung ist unter Punkt 11.2 aufgelistet.

Die zu Beginn gestellten Leitfragen konnte ich im Laufe dieser Arbeit nacheinander klären. Ich habe es fertiggebracht, aus unzähligen Einzelteilen ein autonom fliegendes Modellflugzeug zu bauen, eine selbst kreierte Kamera-Aufhängung daran zu befestigen per Autopilot gesteuerte Flüge durchzuführen, selbstständig Fotoaufnahmen auszulösen und aus dem gewonnenen Bildmaterial ein hochwertiges, detailhaltiges 3D-Landschaftsmodell zu berechnen. Mission erfüllt!



Abb. 54 Seitenansicht

10 Literaturverzeichnis

10.1 Quellenverzeichnis

- [1]. Abgerufen am 07.07.2014 von dom!n!c - Passwort: marolus40!
<http://dominic.grandjean.ch/projects/projektm-2/news/>
- [2]. Abgerufen am 06.07.2014 von Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL:
<http://www.bazl.admin.ch/dienstleistungen/02658/index.html?lang=de>
- [3]. Abgerufen am 07.07.2014 von Swiss Federal Office of Communications OFCOM:
<http://www.ofcomnet.ch/cgi-bin/rir.pl?id=1008;nb=12>
- [4]. Abgerufen am 07.07.2014 von Swiss Federal Office of Communications OFCOM:
<http://www.ofcomnet.ch/cgi-bin/rir.pl?id=1021;nb=05>
- [5]. Abgerufen am 07.07.2014 von Swiss Federal Office of Communications OFCOM:
<http://www.ofcomnet.ch/cgi-bin/rir.pl?id=1010;nb=01>
- [6]. Abgerufen am 09.07.2014 von FPV-Community.de: <http://fpv-community.de/showthread.php?8258-Was-bedeutet-KV-Wert>
- [7]. Abgerufen am 09.07.2014 von Wikipedia-Lithium-Polymer-Akkumulator:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Polymer-Akkumulator>
- [8]. Abgerufen am 11.07.2014 von Agisoft PhotoScan User Manual:
http://www.agisoft.ru/pdf/photoscan_1_0_en.pdf

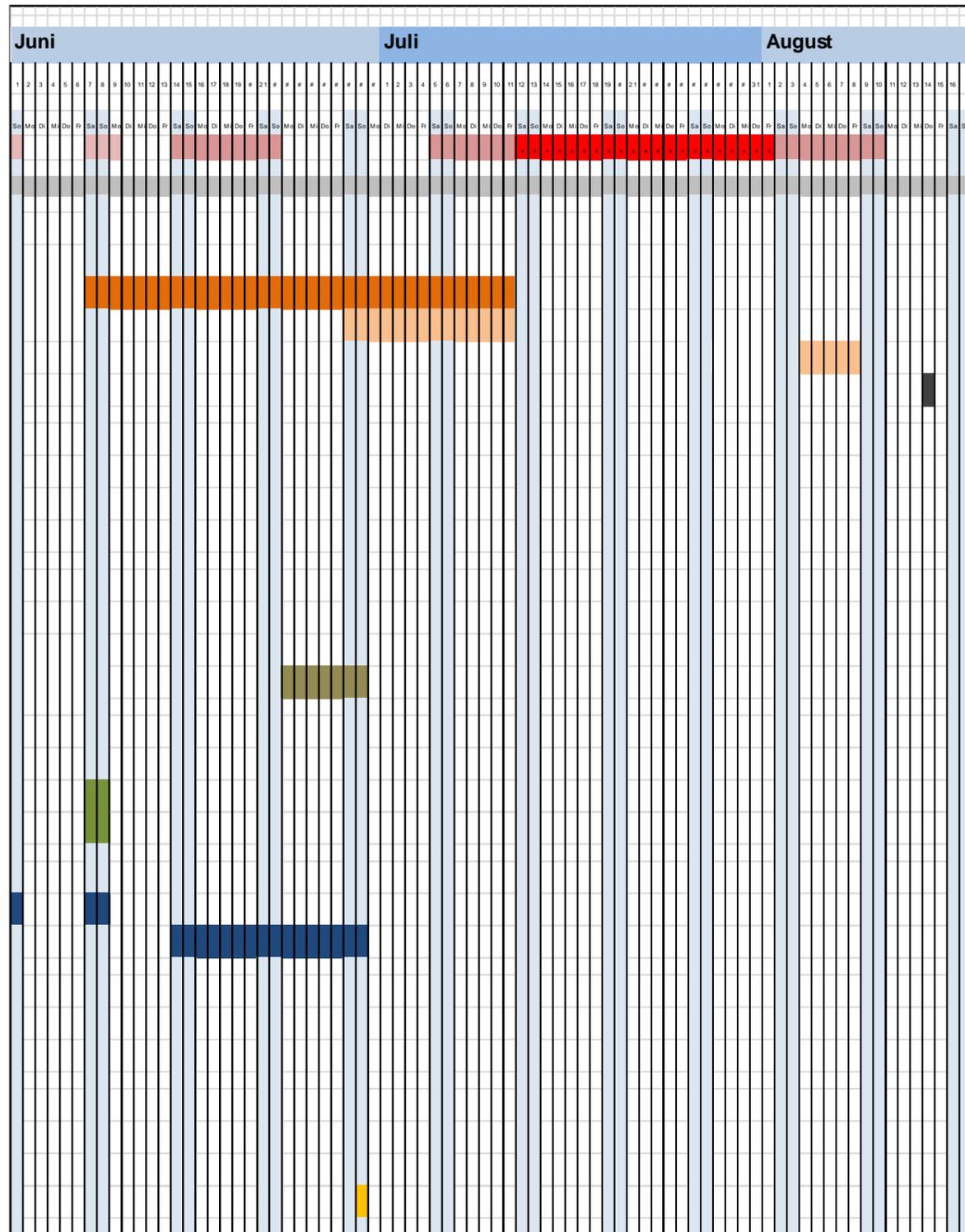
10.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	mein Nurflügler.....	12
Abb. 2	Modellsegelflugzeug.. http://tom620.bplaced.net/rc_modelle/rc_flaeche/maxion/maxion.htm (Stand 30.07.14).....	13
Abb. 3	typischer Hobby-Quadrocopter.. http://flugsachen.de/quadrocopter .(Stand 30.07.14).....	13
Abb. 4	Skywalker X8.. http://www.airelectronics.es/products/solutions/x8/ .(Stand 30.07.14).....	14
Abb. 5	RVJET.. http://blogs.yahoo.co.jp/pochitto1400/55850943.html .(Stand 30.07.14).....	14
Abb. 6	Zephyr II.. http://www.fpvhub.com/index.php?topic=18471.0 .(Stand 30.07.14).....	14
Abb. 7	Komponenten des Long Range Systems	15
Abb. 8	Einzelteile der Autopilot-Steuerungseinheit	16
Abb. 9	Komponenten des FPV-Systems.....	17
Abb. 10	meine DX8 Fernsteuerung.....	17
Abb. 11	restliche Einzelteile	18
Abb. 12	alle Bauteile.....	18
Abb. 13	Grössenvergleich	19
Abb. 14	Fernsteuerung mit montiertem Long Range System	19
Abb. 15	komplette Bordelektronik im Überblick.....	20
Abb. 16	Bau der neuen Motoraufhängung	20
Abb. 17	gedämpfter Motor vor dem Einbau	20
Abb. 18	fertige Motoraufhängung bereit für den Einbau ins Flugzeug.....	20

Abb. 19 Bordelektronik	21
Abb. 20 herausgerissener Motor kurz nach dem Zwischenfall	21
Abb. 21 kleine Schrauben zur Stabilisierung der Motoraufhängung	22
Abb. 22 neue Lüftungsklappen zur besseren Kühlung des Motors	22
Abb. 23 Das Flugzeug ist parat.	22
Abb. 24 Aufbau der Bodenstation vor dem Flug	24
Abb. 25 Es fliegt!	24
Abb. 26 die von der Mission Planner Software aufgezeichnete Flugroute (blau)	26
Abb. 27 Bei dieser Mission flöge das Flugzeug vom Start (Home) über „Wegpunkt 1“ zu „Wegpunkt 2“ auf einer Höhe von 100 m über dem Startpunkt.	27
Abb. 28 Auf dem Weg von Punkt 1 zu Punkt 2 brach die Verbindung ab. Der Laptop konnte nur die halbe Mission mit der blauen Linie aufzeichnen	28
Abb. 29 Prototyp aus Depron mit der GoPro Kamera	30
Abb. 30 funktionierender Ausklappmechanismus der finalen Kamera-Aufhängung	30
Abb. 31 Chaos am Arbeitsplatz	30
Abb. 32 Kamera-Halterung mit Servotester	31
Abb. 33 Seitenansicht der beweglichen Aufhängung	31
Abb. 34 herausgeschnittene Öffnung in der Flugzeugnase vor dem Einbau	31
Abb. 35 Chaos auch im Innern der Drohne	32
Abb. 36 der auf die GoPro geklebte Auslöseservo	33
Abb. 37 Gumminoppen, der den Auslöser drückt	33
Abb. 38 fertige Aufhängung (ohne Kamera-Auslöser)	34
Abb. 39 gebrochene Schnauze nach dem Absturz	36
Abb. 40 Bild nach rechts mit einem Teil des Flügels	36
Abb. 41 Panoramabild des Seebergsees	37
Abb. 42 Windentwicklung in Seftigen, Samstag, 21.06.2014 (Quelle: SRFMeteo)	38
Abb. 43 erster Flug -> horizontale Bilder	39
Abb. 44 zweiter Flug -> seitliche Bilder	39
Abb. 45 Flugstrecken der Flüge eins, zwei und drei der Abschluss-Mission (von links nach rechts)..	40
Abb. 46 Software Lightroom 5 im Einsatz	42
Abb. 47 Luftbild vor	42
Abb. 48 ...und nach der Bearbeitung mit Lightroom 5	42
Abb. 49 Screenshot des Programms Agisoft PhotoScan	43
Abb. 50 Entwicklungsprozess	44
Abb. 51 Das finale 3D-Modell	45
Abb. 52 Symbole der Taskleiste	46
Abb. 53 Augment Logo	46
Abb. 54 Seitenansicht	47

10.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Vergleich drei verschiedener Flugkörper	13
Tab. 2 Vergleich dreier Nurfügler	14
Tab. 3 Zeitplan.....	51
Tab. 4 Einkaufsliste	53



Tab. 4 Zeitplan

11.2 Einkaufsliste

Teil	Bezeichnung	Kosten USD	Kosten CHF
Flugzeug-Rumpf	EPO-Nurflügler Skywalker X-8/X8, FPV Segler Spannweite 2'120 mm		268.90
LRS-System	EZUHF COMBO TX/RX PRO, und Zubehör	374.90	335.10
Flugzeug-Steuerung	Autopilot APM 2.6 Set	159.99	143.00
Flugzeug-Steuerung	3DR Radio Set (Frequency: 433 Mhz)	99.00	88.50
Flugzeug-Steuerung	3DR uBlox GPS with Compass Kit	79.99	71.50
Flugzeug-Servos	2 HK 15138 Standard Analog Servo	6.82	6.10
Flugzeug-Motor	NTM Prop Drive Series 3548 900 kv	22.85	20.40
Flugzeug-Motor	Motorzubehör	4.06	3.60
Flugzeug-ESC	TURNIGY Plush 60A Brushless Speed Controller	33.41	29.90
Flugzeug-Propeller	11x7 - 13x8 und Zubehör		28.50
Flugzeug-Propeller2	10x8 - 14x5 und Zubehör		23.50
Flugzeug-Akkus	1 parallel charge board, 1 battery tape 150 m, 4 Turnigy 5'000 mAh 20 C	162.56	145.30
Flugzeug-Kabel	2 JR Y Servo Lead 30 cm	8.58	7.70
Flugzeug-Kabel	Male to Male Servo Lead (JR) 26AWG 10 cm	4.24	3.80
Flugzeug-Kabel	3 Patchkabel Stecker auf Stecker, JR, 15 cm lang		6.50
Flugzeug-Stecker	2 XT60 Hochstrom-Stecksystem bis 60A 5 Paar		20.50
FPV-System	TBS Core PNP50, EzUHF Link cable + GoPro A/V Cable	76.85	68.70
FPV-System	TBS GREENHORN (25 mW), SpiroNET 5G8 RPSMA antenna set	89.90	80.40
FPV-System	TBS RC305 (5G8)	31.95	28.60
FPV-System	Fatshark Dominator, 2S 7.4 Ah 1'000 mAh battery	349.85	312.70
Kamera-Servos	2 Digital Servoless Retractable System	15.06	13.50
Kamera-Servos	6 Turnigy TGY-R5180MG 180 Degree Metal Gear	28.85	25.80
Kamera-Servos	Servo Speed Regler/Servoweg-Reserver für 3 Servos		16.20
Kamera-Servos	Turnigy 760HV servo tester	9.92	8.90
Kamera-Zubehör	Hobbyking 3-Channel Video Switcher	4.93	4.40
Test-Empfänger	Orange Rx R615	6.99	6.20
Servos	2 Turnigy TG9e 9g	4.82	4.30
Kleinmaterial	Color-Spray, Abdeckband, Moosgummi, Heissleim, ...		30.00
Zollgebühren/Versandkosten			262.90
Total			2'065.40

Tab. 4 Einkaufsliste

Kurs USD-CHF/09.07.2014
0.8938

12 Bewertungskriterien

Bewertungskriterien und eidesstattliche Erklärung zur schriftlichen Maturaarbeit von Dominic Grandjean.

Form der Arbeit: Produkt mit Werkbericht

Aspekte	Maximalpunktzahl
Inhalt <ul style="list-style-type: none"> ▪ Problemstellung ▪ Aufbau, logische Gliederung ▪ Vollständigkeit, Überblick ▪ Themenbeschränkung- vertiefung, Differenziertheit ▪ Relevanz der Aussagen ▪ Richtigkeit der Schlussfolgerungen ▪ Kreativität, Eigenständigkeit ▪ Illustration (Abbildungen, Tabellen u.a.) ▪ Zusammenfassung/Abstract/Fazit ▪ Literatur, Dokumentationsbasis ▪ Fachspezifische Kriterien 	60
Sprache <ul style="list-style-type: none"> ▪ Klarheit, Verständlichkeit ▪ Textkohärenz und Logik der Formulierungen ▪ Textsorten-Angemessenheit ▪ Fachspezifische Wortwahl ▪ Syntaktische Richtigkeit ▪ Interpunktion, Rechtschreibung 	10
Form - Werkbericht <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einhaltung der formalen Anforderungen ▪ Gliederung und Übersichtlichkeit ▪ Unterscheidung Eigenes und Übernommenes ▪ Zweckmässigkeit der Darstellung ▪ Optischer Gesamteindruck 	15
Erarbeitungsprozess <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einhalten der Rahmenbedingungen ▪ Eigeninitiative und Selbstständigkeit des Arbeitens ▪ Arbeitstechnik ▪ Selbstkritische Haltung, Motivation ▪ Arbeitsprozessbericht 	15
	Total 100

Notenskala

Punkte	Note
100-95	6.0
94-85	5.5
84-75	5.0
74-65	4.5
64-55	4.0
54-45	3.5
44-35	3.0
34-25	2.5
24-15	2.0
14-5	1.5
4-0	1.0

Gewichtung der mündlichen Präsentation

Die mündliche Präsentation trägt zu **50 %** zur Gesamtnote bei.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit bestätige ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter Angabe aller benötigten Quellen verfasst zu haben.

Unterschriften

Die folgenden Personen erklären sich mit den Bewertungskriterien, der Notenskala und der eidesstattlichen Erklärung einverstanden:

Der Betreuer: Dr. Ralf Kretschmar

Dominic Grandjean
