



FACHHOCHSCHUL-BACHELORSTUDIENGANG

Automatisierungstechnik

**Konstruktion und Berechnung des Landegestells
eines Rescue-Oktocopters**

ALS BACHELORARBEIT EINGEREICHT

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science in Engineering

von

Berger Andreas

Juli 2011

Betreuung der Bachelorarbeit durch
Prof. (FH) Priv.Doiz. Dipl.-Ing. Dr. Martin Egger



Campus Wels

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, die den benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

.....
Berger Andreas

Freilassing, den 02.07.2011

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Bachelorarbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, Franz und Dagmar Berger, die mir das Studium durch ihr Verständnis und ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. (FH) Priv.Doz. Dipl.-Ing. Dr. Martin Egger, sowie bei Dipl.-Ing. (FH) Raimund Edlinger und Ing. Zauner Michael, BSc für die Betreuung meiner Bachelorarbeit und deren zahlreiche Ratschläge, welche zur Verbesserung der Arbeit beigetragen haben.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich speziell bei dem gesamten Robo-Racing-Team und meinen Kollegen der FH OÖ Campus Wels für ihre Unterstützung und Zusammenarbeit.

KURZFASSUNG

Im Zuge der Erforschung von Rescuedrohnen und der Vorbereitungen für die RoboCup Rescue League¹ wurde für ein bestehendes Rescue-Oktocopterkonzept ein Landegestell entwickelt.

Inhalt dieser Bachelorarbeit ist eine Recherche über bereits bestehende Landegestellkonzepte, sowie eine exemplarische Entwicklung eines solchen.

Zur Hinführung auf dieses Themengebiet wird zunächst das Grundprinzip von Quadrocoptern bzw. Oktocoptern und deren Steuerung erläutert. Im Anschluss daran werden die Anforderungen an eine Rescuedrohne herausgestellt und der bereits entwickelte Oktocopter erklärt. Ausgehend von diesen Grundlagen folgt die Konzeption eines eigenen Landegestells. Abschließend wird eine Grenzwertberechnung der Flughöhe für einen unbeschadeten Absturz bei freiem Fall durchgeführt.

Des Weiteren dient diese Arbeit als Basis für weitere Entwürfe von fliegenden Robotern, die im Zuge der Weiterentwicklung und Konzeptionierung von verschiedenen Problemstellungen in den nächsten Jahren im Robo-Racing-Team² der FH OÖ Campus Wels entwickelt werden.

„Mache die Dinge so einfach wie möglich - aber nicht einfacher.“

Albert Einstein

¹ <http://www.robocuprescue.org>

² <http://rrt.fh-wels.at>

ABSTRACT

In the course of researching some possibilities of rescuedrones and during the preparations for the RoboCup Rescue League³, a landing gear was developed for an existing concept of a rescueoctocopter.

A content of this bachelor thesis is to research existing landing gear concepts and the exemplary development of an own one.

Lead-in to the main theme, the basic principle of quadrocopter or octocopter and their control are explained. After that, the requirements of a rescue drone are mentioned and the developed octocopter is shown. On this basis the conception of an own landing gear is made. Finally the altitude limit for an undamaged free fall crash is calculated.

Additionally, this work serves as base for further designs of flying robots being engineered in line with the development and conception of various problems in the next few years in the Robo-Racing-Team⁴ at FH OÖ Campus Wels.

³ <http://www.robocuprescue.org>

⁴ <http://rrt.fh-wels.at>

INHALTVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG.....	1
1.1	MOTIVATION	1
1.2	ABGRENZUNG.....	1
2	TECHNISCHE GRUNDLAGEN.....	2
2.1	GRUNDPRINZIP DES QUADROPTERS.....	2
2.2	AUFBAU UND STEUERUNG.....	3
3	EINSATZGEBIETE UND ANFORDERUNGEN	4
3.1	ROBOCUP RESCUE LEAGUE.....	4
3.2	MÖGLICHE EINSATZGEBIETE.....	5
3.3	MECHANIK UND AUFBAU	5
4	KONSTRUKTION	6
4.1	BENÖTIGTE KOMPONENTEN	6
4.2	CARBON-QUADROPTER.....	7
4.3	KUBUS DES QUADROPTERS	7
4.4	ANBAUKOMPONENTEN	8
4.4.1	Laser Range Finder	8
4.4.2	Xbox Kinect und Pico ITX.....	9
4.5	GESAMTSYSTEM.....	9
5	LANDEGESTELL	11
5.1	MATERIALAUSWAHL	11
5.2	KOMMERZIELL VORHANDENE SYSTEME.....	11
5.2.1	Draganflyer X6.....	11
5.2.2	Ascending Technologies GmbH.....	12
5.2.3	Eigenbau.....	13
5.3	KONZEPT- UND DESIGNFINDUNG.....	14
6	BERECHNUNG DES LANDEGESTELLS	15
6.1	GRUNDLAGEN DER BERECHNUNG	15
6.2	VEREINFACHUNGEN	17
6.3	BERECHNUNG DER MAXIMALEN FALLHÖHE	18
6.3.1	Nullpunkt.....	18
6.3.2	Berechnung von $s(y)$	19
6.3.3	Berechnung der Fallhöhe h :.....	20
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	22

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: H-Form (links), X-Form (mitte), +-Form (rechts) (Quelle [1])	3
Abbildung 2: Quadrocopter-Modell md4-200 von der Firma Microdrones (Quelle [2])	3
Abbildung 3: Darstellung der Luft-Arena der RoboCup Rescue League 2009(Quelle: [3]) ...	4
Abbildung 4: Draufsicht des Carbon-Oktocopterkubus mit acht Auslegern	7
Abbildung 5: Längsschnittdarstellung des Oktocopterkubus	8
Abbildung 6: Seitenansicht (links) und Vorderansicht (rechts) des Laser Range Finders mit Ausregelungsturm	9
Abbildung 7: Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts) der Halterung für Xbox Kinect, Pico-ITX Board und SSD-Festplatte.....	9
Abbildung 8: Isometrische Ansicht des Carbon-Quadrocopterkonzepts mit allen Komponenten.....	10
Abbildung 9: Hexacoptermodell Draganflyer X6 (Quelle [5]).....	11
Abbildung 10: Quadrocopter Firma Ascending Technologies GmbH (Quelle [6]).....	12
Abbildung 11: Amateurcopter mit Federungs-Landegestell(Quelle [7]).....	13
Abbildung 12: Seitenansicht des Landegestellkonzepts anhand eines Carbon-Landefußes..	14
Abbildung 13: Federbein mit zwei Stoßdämpfern (links) und vereinfacht mit einem Stoßdämpfer (rechts).....	17
Abbildung 14: Landegestell in Nulllage mit Konstanten.....	18
Abbildung 15: Geometriedarstellung des Landefußes	19
Abbildung 16: Graph $F(y)$	20

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Gewichtsaufstellung des Oktocopters.....	10
Tabelle 2: Variablendefinition für (6.1.1), (6.1.2), (6.1.3), (6.1.4), (6.1.5) und (6.1.6)	16
Tabelle 3: Messung der Federkonstante.....	16
Tabelle 4: Variablendefinition für (6.1.7).....	16
Tabelle 5: Konstantendefinition für Abbildung 14.....	18

1 Einführung

In diesem Kapitel werden die Motivation für dieses Bachelorprojekt sowie die Abgrenzung zu den Teilbereichen Komponentenauswahl und Konstruktion des Rescue-Oktocopters erläutert.

1.1 Motivation

Das Robo-Racing-Team hat bereits zahlreiche autonome mobile Roboter für verschiedene Bewerbe entwickelt und diese erfolgreich eingesetzt. Im Bachelorprojekt des fünften Semesters, „Recherche, Gegenüberstellung, Bewertung und Auswahl von Hardwarekomponenten für den Aufbau eines Quadrocopters⁵“, konnte ich mich bereits vertiefend in die Thematiken Robotik und Konzepterstellung, sowie in das Thema Quadrocopter einarbeiten.

Ausgehend von den Erfahrungen und Ergebnissen der vorangegangenen Bachelorarbeit habe ich mich für die Dimensionierung und Berechnung eines Landegestells für den Rescue-Oktocopter entschieden. Dieses Projekt bietet die Möglichkeit, eigenverantwortlich die Konzeptionierung und Entwicklung einer Baugruppe zu erarbeiten. Hiermit war es mir nicht nur möglich, mein persönliches Interesse an der Planung und Konstruktion von Robotern mit einem Projekt zu verbinden, sondern auch in einem jungen und dynamischen Team der Fachhochschule Wels mitzuwirken.

1.2 Abgrenzung

Die Konstruktion und Komponentenauswahl für den Aufbau des Rescue-Oktocopters wurde bereits in einem vorangegangenen Projekt behandelt und ist nicht Thema dieser Arbeit. Den Schwerpunkt bilden Konzeptionierung und Berechnung des Landegestells für den Oktocopter, sowie die Herausstellung von bereits bestehenden Konzepten.

⁵ Vgl.: Bachelorarbeit I „Berger Andreas, WS 10/11“

2 Technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden zum besseren Verständnis der Materie die technischen Grundlagen eines Oktocopters erläutert. Ein Oktocopter beruht auf den gleichen Prinzipien wie ein Quadrocopter, lediglich die Anzahl der Rotoren ist verschieden. Ein Quadrocopter besitzt vier Rotoren, ein Oktocopter hingegen acht. Zum leichteren Verständnis wird als Anschauungsobjekt der Quadrocopter gewählt. Abschließend folgt der theoretische Aufbau.

2.1 Grundprinzip des Quadrocopters

Ein Quadrocopter, auch als quadrotor Helicopter oder Quadcopter bezeichnet, ist ein Luftfahrzeug, welches durch vier Luftschrauben angetrieben wird. Anders als Starrflügler haben sie keine starren Tragflächen, welche den Auftrieb erzeugen. Aus diesem Grund werden Quadrocopter in die Klasse der Drehflügler eingestuft, da ihr gesamter Auftrieb auf vier Rotoren zurückzuführen ist. Des Weiteren können sie auch in die Klasse der Hubschrauber eingeordnet werden. Im Gegensatz zu Standard-Hubschraubern verwenden Quadrocopter allerdings starre Luftschrauben, deren Steigung sich während des Fluges nicht ändert. Ein Quadrocopter kann durch Drehzahl-Variation der einzelnen Luftschrauben und dem daraus resultierenden unterschiedlichen Schub und Drehmoment gesteuert werden.

Der Vorteil von modernen Quadrocoptern gegenüber vergleichbaren Hubschraubern liegt darin, dass alle drei Achsen des Luftfahrzeugs allein durch Änderung von Schub und Drehmoment angesteuert werden. Speziell mechanische Komponenten, wie Taumelscheiben bzw. Gestänge zur Blattverstellung entfallen. Hierdurch ergibt sich ein im Vergleich sehr einfacher mechanischer Aufbau, hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.

Weiters ist die leichte und intuitive Steuerung zu nennen, da die gesamte Ausregelung des Systems im Gegensatz zum Hubschrauber von Sensoren und der Elektronik übernommen wird. (Quelle [1])

2.2 Aufbau und Steuerung

Ein Quadrocopter wird nach einem der drei folgenden Schemata aufgebaut. Die vier Motoren werden in „H“, „X“ bzw. „+“ - Form angeordnet (siehe Abbildung 1).

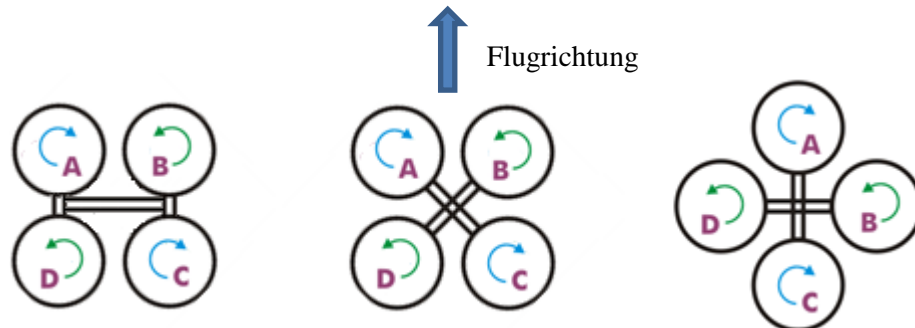


Abbildung 1: H-Form (links), X-Form (mitte), +-Form (rechts) (Quelle [1])

Die beiden jeweils gegenüberliegenden Rotoren (A, C und B, D) haben bei allen drei Konfigurationen die gleiche Drehrichtung; zwei drehen sich im Uhrzeigersinn und zwei dagegen. Hierdurch ergibt sich bei gleicher Drehzahl aller vier Rotoren eine Aufhebung des Drehmoments des gesamten Systems. Somit steht der Quadrocopter, trotz drehender Rotoren, ohne Drehung um die eigene Achse in der Luft. (Quelle: [1])



Abbildung 2: Quadrocopter-Modell md4-200 von der Firma Microdrones (Quelle [2])

Die hier gezeigte „+“-Konfiguration ist weit verbreitet und bedeutet eine einfache Ansteuerung, indem für Roll- und Nickachse jeweils nur ein Motorenpaar angesteuert werden muss. Der rote Ausleger zeigt in Flugrichtung. Bei der H- oder auch x-Konfiguration sind die Rotoren um 45° zur Flugrichtung versetzt. Hier sind bei Nick- oder Rollbewegungen stets alle vier Motoren zu regeln, jedoch sind höhere Drehbeschleunigungen erlaubt. In diesem Fall ist bei der Montage einer Kamera kein Rotor im Sichtbereich. (Quelle [1])

3 Einsatzgebiete und Anforderungen

Zur Erläuterung des Aufbaus, sowie der notwendigen Eigenschaften des Landegestells werden in diesem Kapitel die Anforderungen an das Gesamtsystem herausgearbeitet. Als Grundlage dienen das Reglement der RoboCup Rescue League und mögliche Szenarien für spätere Einsatzgebiete. Zuletzt werden die daraus abgeleiteten Anforderungen an Mechanik und Aufbau dargestellt.

3.1 RoboCup Rescue League

Der Zweck der Luft-Arena bei der RoboCup Rescue League ist die Förderung der Entwicklung von autonomen Kleinst-Luftfahrzeugen für Aufklärungs- und Rettungseinsätze. Diese Veranstaltung legt ihren Schwerpunkt auf vertikal startende und landende Fahrzeuge, Quadrocopter bzw. Helikopter.

Die Aufgabe des Quadrocopters ist der autonome Start und Flug, das Halten einer bestimmten Position und das eigenständige Erkennen von Zielen in der Testumgebung. Diese Ziele können Opfer darstellen, welche Lebenszeichen wie Wärme, Bewegung und Schall aussenden, oder Warn- und Gefahrenzeichen, welche erkannt und kategorisiert werden müssen. Der Aufbau der Luft-Arena ist ähnlich der Boden-Arena. Es gibt Boxen mit Zielen, welche frei im Luftraum hängen, und Wände mit schematischen Fenstern, welche die Sicht ins Innere eines Hauses darstellen sollen (siehe Abbildung 3). (Quelle: [3])

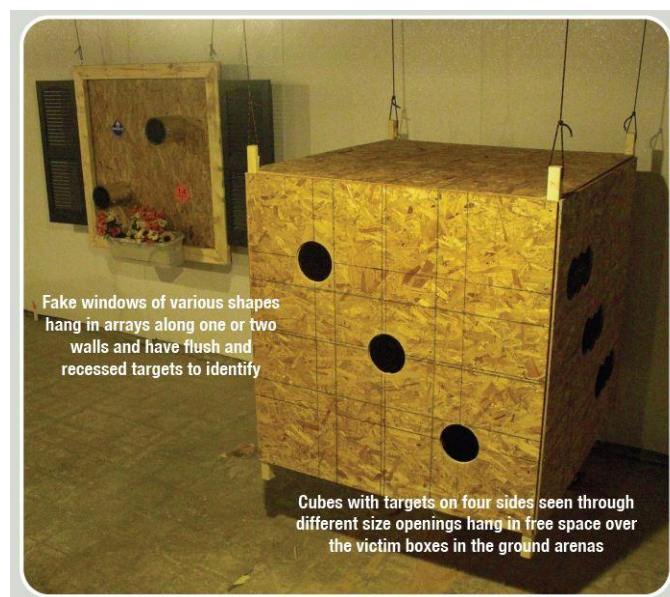


Abbildung 3: Darstellung der Luft-Arena der RoboCup Rescue League 2009(Quelle: [3])

3.2 Mögliche Einsatzgebiete

Verbreitete Anwendung findet der Quadrocopter zurzeit in der Luftbildfotografie und – videografie. Ebenfalls entstehen vermehrt Privatprojekte, welche hauptsächlich für den Spaß- und Kunstflug eingesetzt werden. Weitere Beispiele für Einsatzgebiete, wie in Amerika und Großbritannien, wären Szenarien zur Unterstützung der Polizei und Feuerwehr in Unfall- und Gefahrensituationen. Diese Art des Einsatzes ist in vielen weiteren Bereichen möglich. Denkbar sind Situationen zur Detektion von Lawinenopfern mit Hilfe von Peilsendern oder zur Aufrechterhaltung von Funk- und Bildübertragungen in zerstörten Gebieten, beispielsweise nach Erdbeben und Überschwemmungen. Aus aktuellem Anlass sollte ebenfalls der sehr nützliche Einsatz eines solchen Systems bei der Atomkatastrophe von Fukushima genannt werden. Hiermit hätten sehr schnell und einfach Luftproben genommen, sowie Luftbildaufnahmen und Strahlungsmessungen in unzugänglichen Gebieten gemacht werden können. (Quelle: [4])

3.3 Mechanik und Aufbau

Der Aufbau des Fluggeräts als Oktocopter wurde aufgrund der erhöhten Absturzsicherheit bei Ausfall eines Motors gewählt. Nur einem Copter mit acht oder mehr Motoren ist es möglich, trotz Motorausfall noch stabil weiter zu fliegen. Der Oktocopter sollte ebenfalls robust und zuverlässig sein, da man sich an dem autonomen Einsatz in Gefahrenbereichen orientiert. Aus diesem Grund wird außerdem die Überdimensionierung der Festigkeit und Stabilität des Flugkörpers angestrebt. Seine Komponenten müssen jedoch leicht austauschbar und zugänglich sein, um eine hohe Verfügbarkeit zu erreichen. Der Aufbau sollte modular sein, um ein Höchstmaß an Flexibilität zu gewährleisten.

Ebenfalls wurde ein großes Augenmerk auf die Größe gelegt, da der Oktocopter sich ebenfalls im Indoor-Bereich bewegen können soll. Das Fluggerät muss somit durch Türen und Fenster fliegen können und darf eine maximale Spannweite⁶ von 80cm nicht überschreiten. Des Weiteren soll es möglich sein, das Gesamtsystem platzsparend zu verstauen. Der Oktocopter muss somit zusammensteckbar sein, um ihn einfach und schnell transportieren zu können, z.B. in einem Rucksack oder Koffer.

⁶ Spannweite: Propellerspitze zu Propellerspitze, betrachtet im 90° Winkel zur Flugrichtung

4 Konstruktion

Im nachfolgenden Kapitel wird das Carbonkonzept vorgestellt und auf die verschiedenen Baugruppen eingegangen. Abschließend wird eine Gewichtsrechnung aufgrund der 3D-CAD Daten durchgeführt.

4.1 Benötigte Komponenten

Die Aufgabe der Orientierung im Raum und die Erstellung eines 2D- bzw. 3D-Mappings, sowie einer Hindernisdetektion als Grundvoraussetzung für autonomen Flug wurden mit Hilfe eines Laser Range Finders⁷ realisiert. Mit dem vordergründigen Gedanken an einen späteren autonomen Flug entschied man sich, die Auswertung der Daten und die Erstellung des Mappings an Bord der Drohne zu errechnen.

Zur Realisierung dieser Lösung wurde eine komprimierte Version des Windows XP Betriebssystems verwendet, welche auf einem VIA PICO PX 10000G Pico-ITX⁸ Mini-Mainboard installiert ist.

Ein Kamerasystem auf dem Oktocopter soll Rettungsteams an den Bodenstationen einen Überblick geben und Informationen bereitstellen über Bereiche, in denen sich der Quadrocopter bewegt. Ebenfalls kann die Drohne mit Hilfe von Bildverarbeitung Opfer, Gefahrenstellen, Hinweise aus der Umwelt, wie Gefahrenschilder und Zeichen erkennen und entsprechend reagieren.

Als weiteres Hilfsmittel für die Orientierung im Raum und das Erkennen von Hindernissen ist bereits der Platz für die Montage der Microsoft Xbox Kinect⁹ eingeplant worden.

⁷ <http://www.hokuyo-aut.jp/>

⁸ <http://www.via.com>

⁹ <http://www.xbox.com/kinect>

4.2 Carbon-Quadrocopter

Aufgrund der geforderten schnellen Einsatzfähigkeit wurde ein System entwickelt, welches aus einem Kubus und acht Auslegern besteht (siehe Abbildung 4). Diese Ausleger werden mit Spezialsteckern in den Kubus eingesteckt.

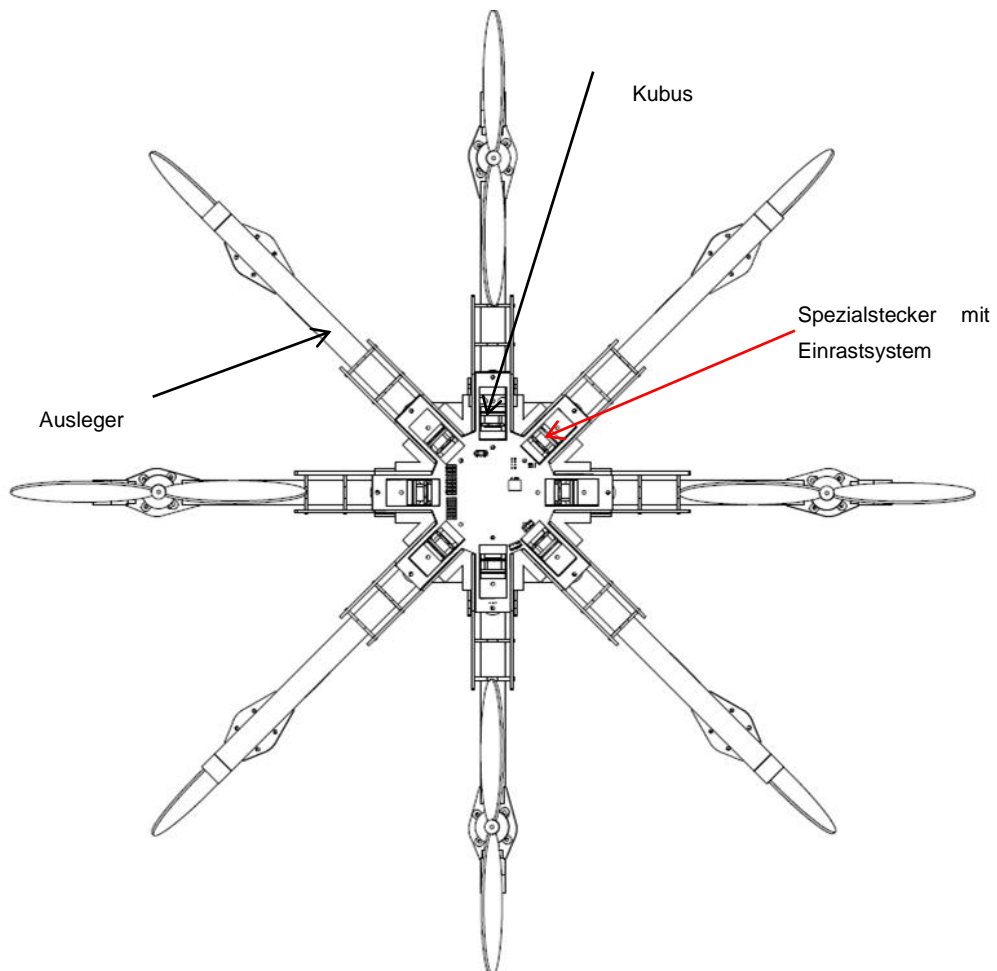


Abbildung 4: Draufsicht des Carbon-Oktocopter Kubus mit acht Auslegern

4.3 Kubus des Quadrocopters

Der Kubus (siehe Abbildung 5) ist in zwei Ebenen unterteilt. Die Bestandteile der unteren Ebene sind die Fluglageregelung, sowie die Energieversorgung mit den zwei Akkumulatoren. Die obere Ebene beinhaltet die Verteilerplatine mit einem ATxmega zum Up- und Downlink von Steuersignalen und Daten, sowie die Spannungsversorgung für Kamera, Laser Range Finder und Pico-ITX Board. Ebenfalls ist diese Ebene mit vielen Befestigungsmöglichkeiten ausgestattet, um ein hohes Maß an Flexibilität und Modularität zu gewährleisten.

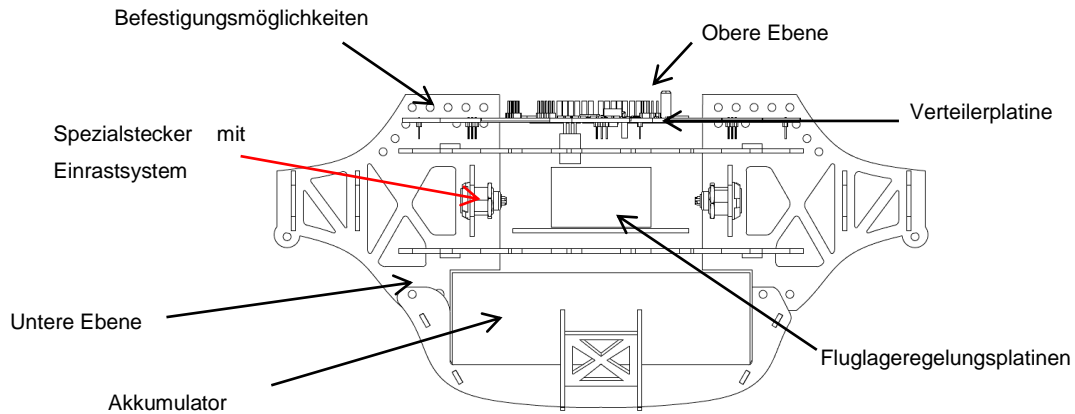


Abbildung 5: Längsschnittdarstellung des Oktocopter kubus

4.4 Anbaukomponenten

Als Anbaukomponenten sind die zwei folgenden Beispiele in Planung. Da diese nur mit wenigen Steckern und Schrauben verbunden werden, ist eine flexible und schnelle Umgestaltung möglich. Die bisher vorstellbaren Einsatzgebiete sind die Ausrüstung mit einem Laser Range Finder, der Xbox Kinect und dem Pico-ITX Board. Ebenfalls wären Anbauten mit einer Wärme- bzw. HD-Kamera denkbar. Es ist zudem möglich, weitere technische Geräte, wie Peilsender und Netzwerkgeräte zu installieren, um in Katastrophengebieten vermisste Personen zu orten und die Kommunikation aufrechtzuerhalten.

4.4.1 Laser Range Finder

Der Laser Range Finder (LRF) ist über eine bewegliche Konstruktion auf einem Turm montiert. Die Lage kann mit Hilfe von zwei Servomotoren geregelt werden. Dies ermöglicht den LRF immer parallel zum Boden zu halten. Der Turm, sowie die Fluglageregelung sind flexibel einsetzbar, da der LRF sich leicht durch andere Komponenten ersetzen lässt.

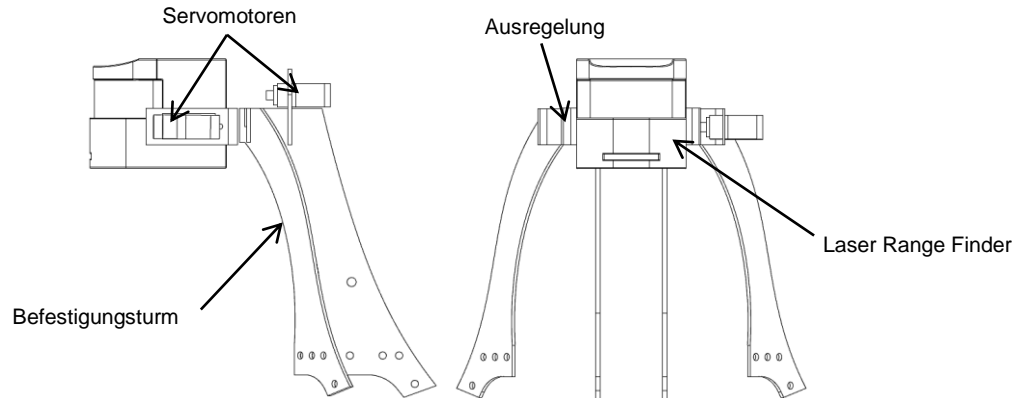


Abbildung 6: Seitenansicht (links) und Vorderansicht (rechts) des Laser Range Finders mit Ausregelungsturm

4.4.2 Xbox Kinect und Pico ITX

Diese Konstruktion bietet Platz für die Xbox Kinect, sowie das Pico-ITX Board und eine SSD (Solid State Drive) Festplatte¹⁰. Sie wird direkt über der Verteilerplatine angebracht, um den Schwerpunkt nahe am Oktocopter-Mittelpunkt zu halten. Außerdem ist durch die geringe Bauhöhe gewährleistet, dass der LRF-Turm und die Xbox Kinect gleichzeitig am Copter Platz finden.

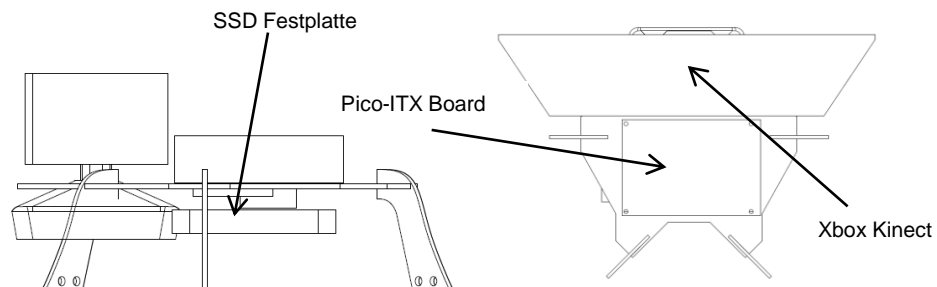


Abbildung 7: Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts) der Halterung für Xbox Kinect, Pico-ITX Board und SSD-Festplatte

4.5 Gesamtsystem

Nach Fertigstellung der Konstruktion (siehe Abbildung 8) in *Catia V5 R18* von *Dassault Systems*¹¹ ist eine Gewichtsrechnung durchgeführt worden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Auflistung aller Komponenten mit einem resultierenden Gesamtgewicht von 4,5 kg (siehe Tabelle 1). In den folgenden Berechnungen wird dieses Gewicht als Referenz genommen.

¹⁰ <http://www.ocztechnology.com>

¹¹ <http://www.3ds.com>

Anzahl	Beschreibung	Masse[g]
1	Akkuhalter + Akku	1238
8	Motorausleger	748
1	Kubus	796
1	LRF-Turm	475
1	Pico ITX, Xbox Kinect + Halterung	770
1	Kabel und Schrauben	500
	Gesamt:	4527

Tabelle 1: Gewichtsauflistung des Oktocopters

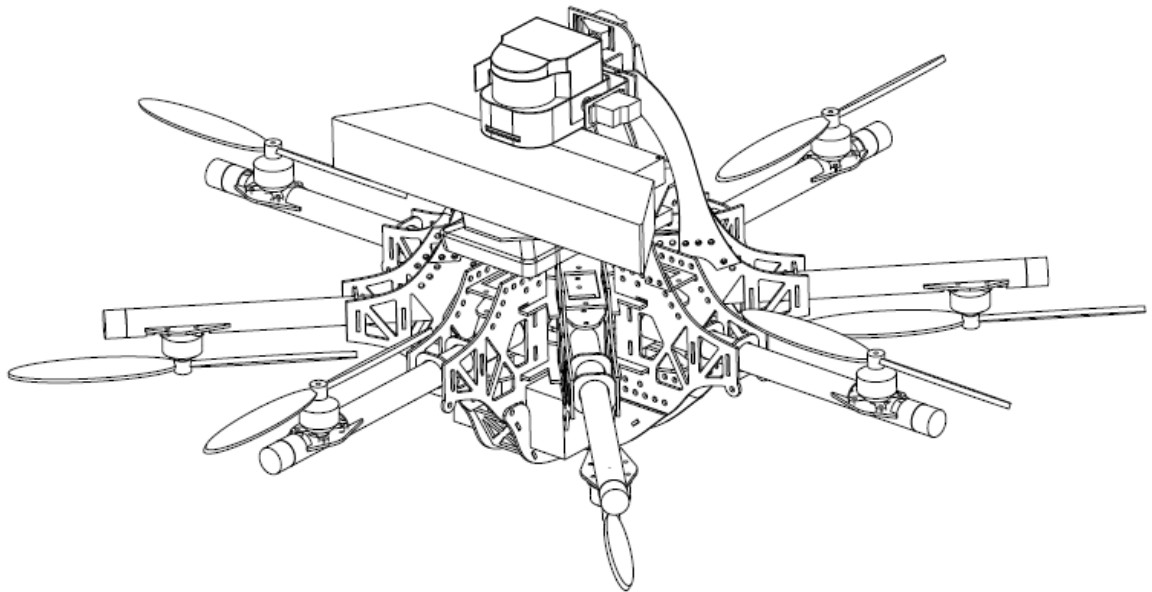


Abbildung 8: Isometrische Ansicht des Carbon-Quadcopterkonzepts mit allen Komponenten

5 Landegestell

In diesem Kapitel wird die Konzept- und Designfindung näher erläutert.

5.1 Materialauswahl

Nach einer intensiven Internetrecherche über Fluggestelle für Quadrocopter bzw. Oktocopter ist kein bereits bestehendes Konzept gefunden worden, welches als geeignet erschien, die Anforderungen zu erfüllen. Als Materialien für Landegestelle sind meist Kunststoff, Aluminium oder CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) verwendet worden. Da Aluminium zu schwer und normaler Kunststoff nicht robust genug ist, wurde der hochfeste Werkstoff CFK, auch Carbon genannt, gewählt. Wie bereits in den Anforderungen beschrieben sollte das Fluggestell widerstandsfähig und doch leicht zerlegbar sein. Daher wird ein Stecksystem von Carbon-Platten verwendet um die hohe Festigkeit des Werkstoffs optimal nutzen zu können.

5.2 Kommerziell vorhandene Systeme

Quadrocoptersysteme haben sich in den letzten Jahren stark verbreitet. Es gibt bereits eine Vielzahl an kommerziellen Lösungen, die in Forschungsprojekten an Universitäten oder im Hobby- und Amateurbereich entstehen. Aufgrund der steigenden Nachfrage und Entwicklung haben sich verschiedene Typen von Landesystemen etabliert. Nachfolgend werden drei Systeme vorgestellt.

5.2.1 Draganflyer X6



Abbildung 9: Hexacoptermodell Draganflyer X6 (Quelle [5])

Als Beispiel für eine sehr einfache Variante eines Landegestells gilt die Draganflyer X6 Drohne der Firma Draganfly (siehe Abbildung 9). Diese ist das Standardmodell für den kommerziellen Einsatz in den Vereinigten Staaten. Neben dem Hexacopter (X6) wird ebenfalls eine Quadro- (X4) und Oktocopter (X8) Version angeboten. Die maximale Spannweite dieses Modells beträgt 83cm, das maximale Abfluggewicht 1500g, die maximale Zuladung 500g.

Landegestell und Drohne sind komplett aus CFK gefertigt und mit klappbaren Auslegern für den einfacheren Transport ausgestattet. Aufgrund der einfachen Handhabung hat sich hier das System der Carbon-Rundprofile durchgesetzt. Die Vorteile liegen im geringen Gewicht und der schnellen Austauschbarkeit. Einen Nachteil bildet das nur bedingte Abfedern von harten Landungen, da die gesamte Federung lediglich aus der Elastizität des Carbon-Rundprofils herrührt. (Quelle [5])

5.2.2 Ascending Technologies GmbH



Abbildung 10: Quadrocopter Firma Ascending Technologies GmbH (Quelle [6])

Die deutsche Firma Ascending Technologies GmbH bei München verfolgt in Sachen Landegestell eine ganz andere Philosophie. Wie in Abbildung 10 zu erkennen, wird hierbei komplett auf eine eigene Baugruppe als Landegestell verzichtet. Der Vorteil solcher Quadrocopter ist das geringere Gewicht, sowie die kleinere Bauform. Diese Copter, welche es neben dem gezeigten Quadrocopter auch noch in Hexa- und Oktocopterbauformen gibt, werden vorzugsweise von Universitäten und Firmen eingesetzt. Da es sich hierbei ausschließlich um sehr leichte Copter handelt, stellt das Fehlen des Landegestells oftmals noch kein großes Problem dar. Grundvoraussetzung für eine lange Lebensdauer ist jedoch ein geübter Pilot und ein weicher Untergrund als Landefläche, da bei einer solchen Konstruktion keine Federung vorhanden ist. Bei härteren Landungen wird allerdings der gesamte Copter, sowie alle Komponenten, in Mitleidenschaft gezogen. (Quelle [6])

5.2.3 Eigenbau



Abbildung 11: Amateurcopter mit Federungs-Landegestell(Quelle [7])

Das Landegestell dieses Quadrocopters (siehe Abbildung 11) ist eine Federungskonstruktion mit Stoßdämpfern aus dem Modellbau. Der Quadrocopter ist eine Eigenkonstruktion eines Amateurfliegers, sodass keine exakten Daten zu Größe und Gewicht vorhanden sind. Nachteilig an diesem Konzept sind das größere Gewicht, die höhere Trägheit bei dynamischen Flugmanövern, sowie die sperrige Bauform zu nennen. Vorteilhaft sind die Dämpfung von harten Landungen, sowie die stabilisierende Eigenschaften des Landegestells beim Aufsetzen in einem schiefen Winkel, da hierbei die Beweglichkeit und Nachgiebigkeit des Landegestells zu tragen kommt. Diese Konstruktion ist eine der wenigen, die auch für Copter mit wechselndem Abfluggewicht eingesetzt werden können, da Federhärte, Federweg und Anstellwinkel variierbar sind. (Quelle [7])

5.3 Konzept- und Designfindung

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der vorausgegangenen Landegestellsysteme, sowie unter Einbeziehung der Anforderungen aus Kapitel 3 und des Aufbaus des Rescue-Oktocopters aus Kapitel 4, wurde die Bauart des Landegestells von Unterkapitel 5.2.3 gewählt. Die Nachteile der verschlechterten dynamischen Flugeigenschaften, sowie der größeren Bauform und Trägheit kommen beim Rescue-Oktocopter nicht zum Tragen, da es sich um ein Gesamtgewicht von 4,5 kg handelt und das spätere Einsatzszenario der langsame Schwebeflug ist.

Die Umsetzung des Landegestellkonzepts besteht aus vier Landefüßen, welche jeweils aufgrund der hohen Bauform des Rescue-Oktocopters aus zwei gestapelten Stoßdämpfern bestehen. Diese Stoßdämpfer werden über Carbonelemente stabilisiert und an ihrem Platz gehalten (siehe Abbildung 12). Die gewählten Stoßdämpfer sind aus dem Modellbau übernommen und kommen ursprünglich bei RC Modellautos im Maßstab 1:16 zum Einsatz.

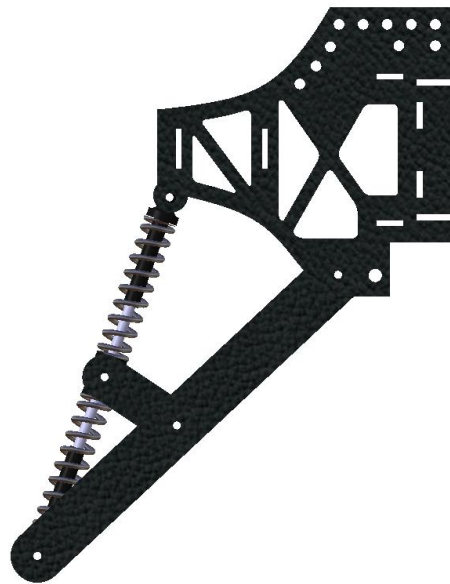


Abbildung 12: Seitenansicht des Landegestellkonzepts anhand eines Carbon-Landefußes

6 Berechnung des Landegestells

In diesem Kapitel wird die Grenzwertberechnung der Flughöhe für einen unbeschadeten Absturz bei freiem Fall durchgeführt. Anfangs werden die Grundlagen der Berechnung erläutert und die vorgenommenen Vereinfachungen aufgezeigt. Abschließend wird die Berechnung durchgeführt.

6.1 Grundlagen der Berechnung

Als Grundlage der Berechnung wurde der Energieerhaltungssatz (siehe Formel 6.1.1) der klassischen Mechanik benutzt. Die potentielle Energie V (siehe Formel 6.1.2) des schwebenden Oktocopters wird im Zuge des freien Falls in kinetische Energie (T) umgewandelt. Anschließend wird diese Energie in eine spezielle Form von potentieller Energie umgewandelt, die sogenannte Spannenergie der Feder E_{spann} (siehe Formel 6.1.5). Aufgrund des Energieerhaltungssatzes kann geschlussfolgert werden, dass die anfangs potentielle Energie des Oktocopters abschließend in Form von Spannenergie der Feder vorliegt. Die Grundlagen der Energieerhaltung sind dem Werk von Horst Wegener entnommen („Physik für Hochschulanfänger, 1991, Quelle [8]).

$$E = V + T = \text{const.} \quad (6.1.1)$$

$$V = \int_0^h F(h) dh \quad (6.1.2)$$

$$F(h) = m \cdot g(h) = \text{const.} \quad (6.1.3)$$

Bei konstanter Kraft über den gesamten Weg vereinfacht sich diese Formel zu:

$$V = F \cdot h = m \cdot g \cdot h \quad (6.1.4)$$

$$E_{\text{spann}} = \int_0^s F(s) ds \quad (6.1.5)$$

$$F(s) = k \cdot s \quad (6.1.6)$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
E	Gesamtenergie	[J]
V	Potentielle Energie	[J]
T	Kinetische Energie	[J]
F	Kraft	[N]
m	Gesamtmasse Oktocopter ¹²	[kg]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	Höhe	[m]
E_{spann}	Spannenergie	[J]
k	Federkonstante	[N/m]
Δs	Federweg	[m]

Tabelle 2: Variablendefinition für (6.1.1), (6.1.2), (6.1.3), (6.1.4), (6.1.5) und (6.1.6)

Die Federkonstante wurde mithilfe eines Zugversuches ermittelt.

$m[g]$	$F[N]$	$\Delta l[mm]$	$k[N/mm]$
150	1,47	3,1	0,4742
200	1,96	4,2	0,4667
250	2,45	5,6	0,4375
500	4,9	10,5	0,4667
1000	9,81	21	0,4671

Tabelle 3: Messung der Federkonstante

Anschließend wurde der Mittelwert der Messergebnisse gebildet. Dies ergibt $k = 0,462$ N/mm. Ebenfalls wurde die Federkonstante aus den Kenndaten des Stoßdämpfers berechnet (Quelle [9]).

$$k = \frac{G \cdot d_D^4}{8 \cdot n \cdot d_F^3} = \frac{81500 \text{ N/mm}^2 \cdot (1 \text{ mm})^4}{8 \cdot 8 \cdot (14 \text{ mm})^3} = 0,464 \text{ N/mm} \quad (6.1.7)$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
G	Schubmodul	[N/mm ²]
n	Federnde Windungen	
d_D	Drahtdurchmesser	[mm]
d_F	Mittlerer Federdurchmesser	[mm]

Tabelle 4: Variablendefinition für (6.1.7)

Das Ergebnis aus Formel 6.1.7 stimmt sehr gut mit den Messungen (siehe Tabelle 4) überein. Für den weiteren Verlauf der Arbeit wird mit einer Federkonstante $k = 0,463$ N/mm gerechnet.

¹² Gesamtmasse Oktocopter: Masse aus Tabelle 1 + Masse der Landegestell-Baugruppe

6.2 Vereinfachungen

Für die Berechnung der Fallhöhe wurden einige Vereinfachungen vorgenommen.

- Die Dämpfung der Stoßdämpfer wurde in der Berechnung nicht berücksichtigt, da es sich hierbei lediglich um die maximale Energieaufnahme handelt und hierfür hauptsächlich die Feder verantwortlich ist.
- Die Konstruktion wurde wie folgt vereinfacht:

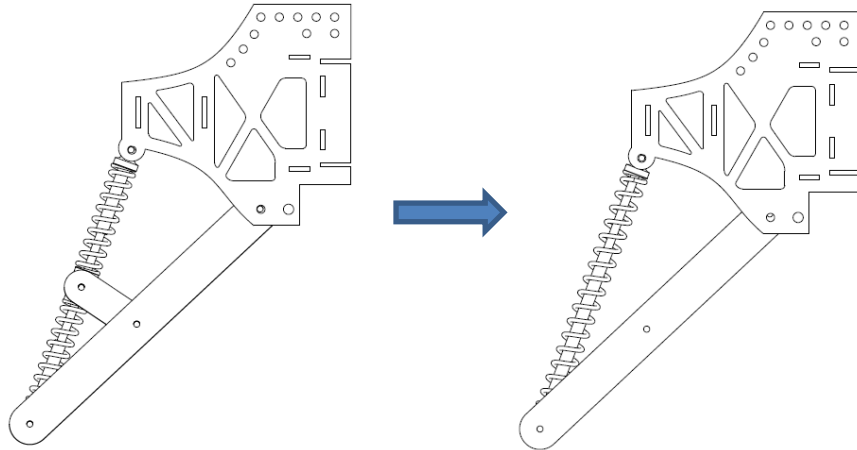


Abbildung 13: Federbein mit zwei Stoßdämpfern (links) und vereinfacht mit einem Stoßdämpfer (rechts)

Beim Zusammenfügen mehrerer Federn kann man eine Federkonstante der Gesamtschaltung, die sogenannte Ersatzfederkonstante, angeben. In Reihenschaltung ergibt sich die Ersatzfederkonstante aus:

$$\frac{1}{k'} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{k_i} \quad (6.2.1)$$

Hieraus ergibt sich eine Ersatzfederkonstante $k' = 0,232 \text{ N/mm}$.

6.3.2 Berechnung von $s(y)$

Gesucht ist $s(y)$, wobei s die Federlänge und y die Rahmenposition beschreibt.

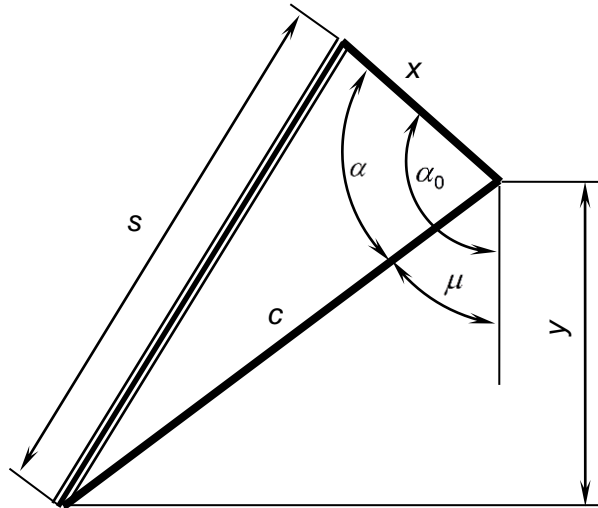


Abbildung 15: Geometriedarstellung des Landfußes

$$x = \sqrt{a^2 + b^2} = 69,35\text{mm} = \text{konst.} \quad (6.3.1)$$

$$\alpha_0 = 180^\circ - \cos^{-1}\left(\frac{b}{x}\right) = 114,72^\circ = \text{konst.} \quad (6.3.2)$$

$$\alpha(\mu) = \alpha_0 - \mu \quad (6.3.3)$$

$$\mu(y) = \cos^{-1}\left(\frac{y}{c}\right) \quad (6.3.4)$$

$$s(\alpha) = \sqrt{x^2 + c^2 - 2 \cdot x \cdot c \cdot \cos(\alpha)} \quad (6.3.5)$$

Nach dem Einsetzen erhält man:

$$s(y) = \sqrt{30091\text{ mm} - 22054,624\text{ mm} \cdot \cos(114,72^\circ - \cos^{-1}(\frac{y}{159\text{mm}}))} \quad (6.3.6)$$

6.3.3 Berechnung der Fallhöhe h:

Als untere Grenze wird die maximale Einfederung des Stoßdämpfers angenommen.

$$s_{max} = s_0 - 34 \text{ mm}$$

Diese ergibt einen maximalen Einfederungsweg y_{max} .

$$y_{max} = \cos(180^\circ - \cos^{-1}(\frac{c^2 + \sqrt{a^2 + b^2}^2 - s_{max}}{2 \cdot c \cdot \sqrt{a^2 + b^2}})) - \cos^{-1}(\frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}) \cdot c = 74,07 \text{ mm} \quad (6.3.8)$$

Nach dem Energieerhaltungssatz gilt:

$$V(h) = V(y_{max}) + E_{spann}(y_{max}) \quad (6.3.9)$$

Die Masse des Oktocopters geht nur zu 25 % ein, da nur ein Landfuß betrachtet wird. Nach dem Einsetzen der Formeln für V und E_{spann} und umformen der Gleichung ergibt sich:

$$0,25 \cdot m \cdot g \cdot (h - y_{max}) = \int_0^{y_{max}} F(y) dy \quad (6.3.10)$$

Zur Veranschaulichung der nicht linearen Kraft $F(y)$ wurde mit dem Programm Mathematica 7.0¹⁴ ein Graph erstellt. Die Fläche unter dem Graphen entspricht dem gesuchten Energiebetrag E_{spann} .

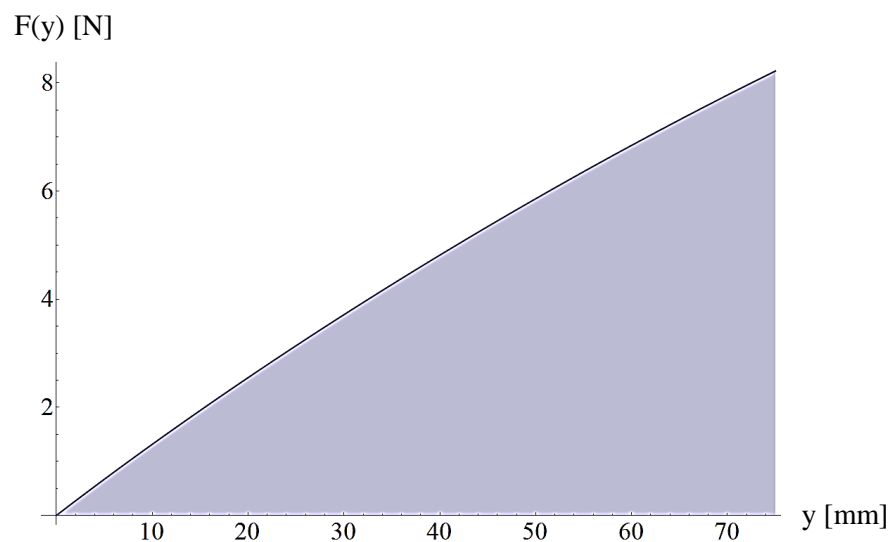


Abbildung 16: Graph $F(y)$

¹⁴ <http://www.wolfram.com/mathematica/>

Der Graph zeigt wie erwartet einen leicht degressiven Verlauf, welcher gegen Ende in einen annähernd linearen übergeht. Dieser Verlauf ist durch die konstruktionsbedingte Beschaffenheit des Landefußes zu erklären.

Der Betrag der Federwegsänderung Δs , um welchen die Feder zusammengedrückt wird, ist zu Beginn verhältnismäßig am größten. Je weiter das Federbein sich jedoch der horizontalen Ausrichtung annähert, umso weniger Federstrecke wird zurückgelegt. Da somit die prozentuale Wegänderung abnimmt, ist der Graph der Funktion leicht degressiv. Zusätzlich bewirkt die Konstruktion gegen Ende einen annähernd konstanten Wert der Federwegsänderung Δs .

Die Tatsache der abnehmenden Wegänderung, sowie der Konstruktionsweise bewirken schließlich einen fast linearen Verlauf der Funktion $F(y)$.

Kritisch anzumerken ist hierbei, dass bei Fahrwerken mit Stoßdämpfern meist ein progressiver Verlauf der Federkraft erwünscht ist um ein Durchschlagen des Stoßdämpfers zu verhindern. Dieser Funktionsverlauf könnte durch konstruktive Änderungen erreicht werden. Einerseits durch den Einsatz von Hebelwirkungen, andererseits durch eine Neupositionierung der Feder.

Nach dem Einsetzen der Formel 6.1.6 sowie der gesuchten Funktion $s(y)$ (Formel 6.3.6) für $F(y)$ und dem Auflösen nach der Variable h , ergibt sich:

$$h = \frac{1}{0,25 \cdot m \cdot g} \cdot \int_0^{y_{max}} k \cdot (s_0 - s(y)) dy - y_{max} = 837 \text{ mm} \quad (6.3.11)$$

Die Lösung der Formel (6.3.11) wurde mit Hilfe des Programms Mathematica 7.0 berechnet.

7 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Durchführung von Konstruktion und Berechnung des Landegestells für den Rescue-Oktocopter.

Aus dieser Aufgabe heraus wird in Kapitel 2 ein Überblick über die technischen Grundlagen von Quadrocoptern bzw. Oktocoptern gegeben, um einen leichteren Einstieg in die Materie zu ermöglichen. Anschließend werden in Kapitel 3 die denkbaren Einsatzgebiete und Anforderungen an den Rescue-Oktocopter herausgestellt und ein Eindruck für das Arbeitsumfeld von Qktocopter und Landegestell vermittelt. Da für die Dimensionierung und Konzeptionierung des Landegestells alle nötigen Komponenten des Rescue-Oktocopters berücksichtigt werden müssen, wird in Kapitel 4 der bereits entwickelte Rescue-Qktocopter vorgestellt und dessen Baugruppen erklärt. Am Ende des Kapitels wird eine Gewichtsberechnung auf Grundlage der 3D-CAD Daten durchgeführt. Hieraus folgt ein Gesamtgewicht des Rescue-Oktocopters von 4,5 kg. Auf Basis dieser gewonnen Erkenntnisse wird zu Anfang des Kapitels 5 ein Überblick über die bestehenden kommerziellen Landegestellsysteme gegeben. Da jedoch keines der Landegestelle die gewünschten Leistungsmerkmale aufweist, wird in Abstimmung mit dem bereits entwickelten Konzept des Rescue-Oktocopters eine Materialauswahl getroffen und ein eigenes Konzept für ein Landegestell erarbeitet. Mit diesem nun entwickelten Gesamtkonzept wird abschließend in Kapitel 6 eine Berechnung der maximalen Flughöhe für einen unbeschadeten Absturz bei freiem Fall des Rescue-Oktocopters durchgeführt. Daraus ergibt sich eine maximale Absturzhöhe von 83,7 cm. Diese Rechnung beruht auf einer rein theoretischen Überlegung, da das Landegestell lediglich die weiche Landung des Fluggerätes unterstützen soll.

Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass andere bzw. weniger bekannte Komponenten in gleicher Weise oder besser für den Einsatz geeignet sind.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1]. Wikipedia. *Quadrocopter*. [Online] 5. März 2011. <http://de.wikipedia.org/wiki/Quadrocopter>.
- [2]. **Microdrones GmbH**. Homepage. [Online] 21. März 2011. <http://microdrones.de/md4-200.php>.
- [3]. Homepage RoboCup Rescue League Thailand. [Online] 6. April 2011. <http://www.thailandrescuerobot.org/eng/index.html#>.
- [4]. **Valavanis, Kimon P.** *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*. Netherlands : Springer-Verlag, 2007.
- [5]. **Draganflyer**. Homepage . [Online] 21. März 2011. <http://www.draganfly.com/uav-helicopter/draganflyer-x6/specifications/>.
- [6]. **Ascending Technologies GmbH**. Homepage. [Online] 26. Juni 2011. <http://www.asctec.de>.
- [7]. **Schrell, Andreas**. Homepage. *Amateur-Quadrocopter*. [Online] 26. Juni 2011. http://schrell.de/Fotos/QC_Rheinbach_2008/html/_as77413.jpg.html.
- [8]. **Wegener, Horst**. *Physik für Hochschulanfänger*. s.l. : Vieweg +Teubner, 1991.
- [9]. DIN EN 13906-1.