

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Fakultät für Maschinenbau

FE-Projektarbeit

Entwicklung eines Hexakopters



von

Tobias Kuentzle (Matr. Nr. 46287)

Ulrich Wahl (Matr. Nr. 43555)

Betreuer an der Hochschule Karlsruhe:

Prof. Jürgen Walter

Karlsruhe 03.2014 — 09.2014

Kurzfassung

Der folgende Bericht befasst sich mit der Konstruktion und Leistungsauslegung eines auf Leichtbaubasierenden Hexakopters. Mit Hilfe methodischer Werkzeuge werden zunächst verschiedene Konzepte für mögliche Multikopteranordnungen untersucht. Als wirtschaftlich und technisch sinnvollste Variante erweist sich eine achsensymmetrische Anordnung, dessen Rotoren auf einer Kreisbahn um den Schwerpunkt herum angeordnet sind.

Für das gewählte Konzept erfolgt eine Leistungsauslegung, welche eine analytische Berechnung, einen Prüfstand sowie eine Modellierung und Strömungssimulation umfasst. Ausgehend davon erfolgt die Konstruktion und Auswahl des Rahmens sowie aller weiteren benötigten Komponenten. Darüber hinaus wird der Hexakopter mit einem elektrisch einfahrbarem Landegestell ausgestattet.

Im Anschluss erfolgen die Fertigung sowie der Zusammenbau aller konstruierten Teile. Die elektrische Anbindung umfasst Motoren, Regler, Flugregelung, GPS-Modul sowie die elektrische Verkabelung.

Abschließend erfolgt die Inbetriebnahme, Konfiguration und Testphase.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	6
1.1 Aufgabenstellung.....	6
1.2 Anforderungsliste	7
2 Konzeptphase.....	8
2.1 Vorgänger-Plattform	8
2.2 Konzipierung	9
2.3 Konzeptausarbeitung	11
2.4 Gewichtsauslegung.....	12
3 Leistungsauslegung	14
3.1 Leistungsbedarf im Schwebeflug	15
3.2 Simulation mit Hilfe von JavaProp	16
3.3 Verifizierung anhand eines Leistungsprüfstands	17
3.3.1 Aufbau	18
3.4 Auswertung und Vergleich.....	19
3.5 Leistungsbedarf im Steigflug	21
4 Konstruktion	24
4.1 Ausleger.....	24
4.2 Zentralpod	25
4.2.1 Akkuplatte.....	26
4.3 Motorpod.....	26
4.4 Landegestell.....	27
5 Elektrische Anbindung und Inbetriebnahme	29
5.1 Motoren und Brushless-Regler.....	30
5.2 Landegestell Servomotoren	30
5.3 Flugsteuerung	30
6 Fazit und Ausblick.....	32
Anhang	33
Bestellliste.....	33
Zeichnungen.....	34
Datenblätter.....	39
7 Quellenverzeichnis	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hexakopter-Plattform Hochschule Karlsruhe	8
Abbildung 2: Grundstruktur und Rotoranordnung	12
Abbildung 3: Schematische Darstellung Strahltheorie [1]	14
Abbildung 4: Digitalisierung des Propellerprofils [2]	17
Abbildung 5: Leistungsprüfstand	18
Abbildung 6: Leistungsbedarf Strahltheorie und JavaProp	19
Abbildung 7: Schubvergleich von JavaProp und Prüfstand	20
Abbildung 8: Leistungsbedarf im Schwebeflug bei 500g Schub	21
Abbildung 9: Übersicht Hacker Brushless Motoren [3]	23
Abbildung 10: Anordnung der Ausleger	24
Abbildung 11: Konstruktion des Zentralpods	25
Abbildung 12: Konstruktion des Motorpods	26
Abbildung 13: Motorpods mit Rohrschellen	27
Abbildung 14: Ausfahrbares Landegestell	27
Abbildung 15: Landegestell Servomotor	28
Abbildung 16: Ringleitung und Zusammenbau	29
Abbildung 17: DJI NAZA V2 mit GPS Modul [4]	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Morphologischer Kasten – Konzeptfindung	10
Tabelle 2-2: Technische Wertigkeit - Konzeptfindung	10
Tabelle 2-3: Bewertungstabelle - Raddrehzahlerfassung	11
Tabelle 2-4: Gewichtsabschätzung.....	13
Tabelle 3-1:Leistungsdaten	15
Tabelle 3-2: Verlustquellen	15

1 Einleitung

An der Hochschule Karlsruhe werden Multikopter sowie die dafür benötigte Steuerungssoftware entwickelt. In diesem Themengebiet werden seit mehreren Jahren im Rahmen der Studiengänge Mechatronik, Maschinenbau, Fahrzeugtechnologie und Effiziente Mobilität in der Fahrzeugtechnik diverse Projekt- und Abschlussarbeiten durchgeführt. Hierbei sollen die aus den Vorlesungen gewonnenen Erkenntnisse im Bereich Sensorik, Antriebstechnik, Software und Konstruktion praktisch angewandt werden.

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen der Projektarbeit soll ein voll funktionsfähiger Hexakopter mit allen dazugehörigen Komponenten entwickelt werden. Dazu gehören Konstruktion, Fertigung sowie Inbetriebnahme. Bei der Entwicklung soll besonderen Wert auf eine auf Faserverbundwerkstoff basierenden Leichtbaukonstruktion gelegt werden. Der Hexakopter dient in Zukunft als Testplattform für das an der Hochschule entwickelte Multikopter Steuerungskonzept und als Testbasis für weitere Zusatzfunktionen wie beispielsweise eine gyroskopisch geregelte Kamerahalterung.

Der Multikopter soll sechs Ausleger besitzen und über ein Leergewicht $< 2,5$ kg verfügen. Die Flugdauer sollte mehr als 10 Minuten betragen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Leistungsauslegung. Hier muss für den Antrieb eine geeignete Motor-Luftschrauben-Kombination gefunden werden. Dies umfasst auch die Auswahl passender Brushless Regler und die Wahl eines Lipo-Akkus.

Optional ist der Hexakopter mit einem fernsteuerbaren Fallschirmsystem auszustatten.

Komponenten wie Empfänger, Fernsteuerung, Flight Control Computer, IMU, aktive GPS Antenne und Telemetriedatenübertragung werden gestellt.

1.2 Anforderungsliste

Ausgehend von der Aufgabenstellung wurde eine Anforderungsliste mit Unterteilung in Allgemeines, Mechanik, Antrieb und Elektronik erstellt.

Konfiguration / Allgemeines

- Hexakopter (6 Ausleger)
- Ein Antrieb pro Ausleger
- Motoren auf Kreisbahn angeordnet
- Achsensymmetrische Anordnung
- Flugzeit >10 min
- Entwicklung eines Fallschirmsicherungssystems

Mechanik

- Leergewicht < 2,5 kg
- Abfluggewicht < 5 kg
- CFK Leichtbauweise
- Kamerahalterung mit 3/8" Aufnahme
- Carbonrohrausleger 16*14mm 3K
- Rohrschellen als Zukaufteil

Antrieb

- Es sind Hacker Brushless Motoren zu verwenden
- Rotordurchmesser 8" – 12"

Elektronik

- Verwendung von ESC Brushlessreglern >400 Hz
- Integration/Aufnahme von FlightControl und Navigationsboard mit IMU
- Mechanische Anbindung des Empfängers und der bestehenden Telemetriedatenübertragung
- Je nach Leistungsbedarf Verwendung von 1 oder 2 Lipos mit 3 oder 4 Zellen

2 Konzeptphase

Im folgenden Kapitel wird die methodische Vorgehensweise bei der Konzeptfindung beschrieben. Ausgehend von der Betrachtung der bestehenden Vorgänger-Plattform wird diese auf Schwachstellen und Verbesserungspotentiale untersucht. Ausgehend davon wird anschließend ein neues technisch optimiertes Konzept erstellt und ausgelegt.

2.1 Vorgänger-Plattform

Anhand der abgeleiteten Anforderungen erfolgt die Entwicklung eines groben Konzepts. Dazu wird zunächst Augenmerk auf die Vorgängerplattform gelegt:

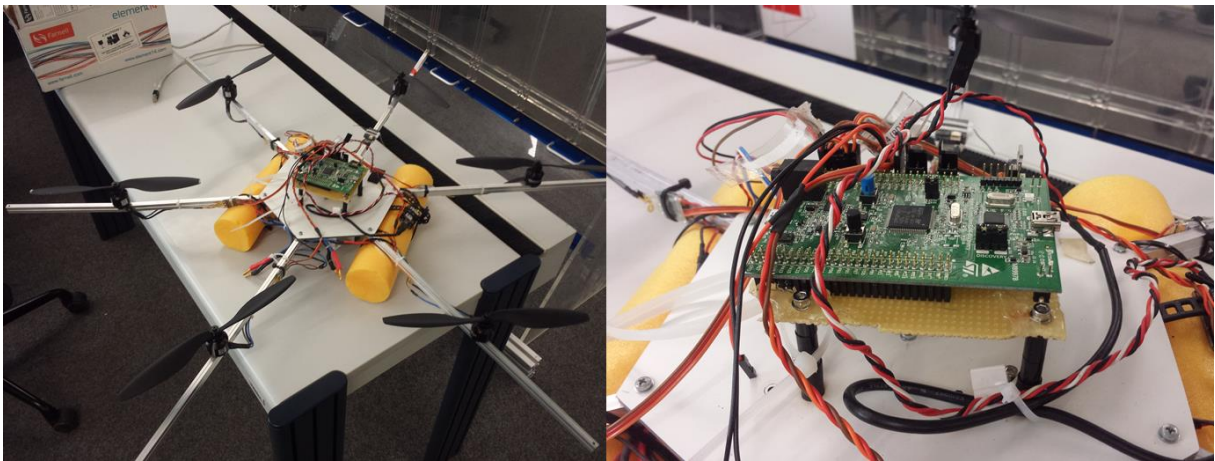


Abbildung 1: Hexakopter-Plattform Hochschule Karlsruhe

Abbildung 1 zeigt die Vorgängerplattform. Der Zentralpod hat die Form eines Hexagons, von dessen Mittelpunkt die sechs Ausleger symmetrisch angeordnet sind. Diese bestehen aus Aluminium-Vierkantrrohr. Die Motoren sind mit 10 Zoll Rotoren bestückt. Außerdem ist zu erwähnen, dass die Ausleger aus Sicherheitsgründen überstehen um Beschädigungen des Rotors vorzubeugen. Der Gesamtdurchmesser der Plattform beträgt dadurch knapp einen Meter. Die Elektronik ist provisorisch mittig auf dem Zentralpod befestigt. Die Lipo-Akkus werden unterhalb des Pods angebracht. Das Gesamtgewicht beträgt **2,5 kg**.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass es sich hierbei um eine sehr einfache, dafür jedoch solide Konstruktion handelt. Dennoch sind vielseitige Verbesserungspotentiale zu erkennen. Allein durch modernen Leichtbau und der Verwendung von immer leistungsfähiger werdenden Faserverbundmaterialien, ist eine deutliche Gewichtsersparnis möglich. Außerdem ist bei dieser Plattform eine geringe Steifigkeit feststellbar, wodurch Vibrationen auftreten,

welche die Sensorik negativ beeinflusst. Hier kann beispielsweise eine Sandwichbauweise des Zentralpods sowie die Verwendung steifere Materialien anstelle von Aluminium Abhilfe verschaffen. Eine weitere große Schwachstelle liegt in der einseitigen Befestigung der Ausleger mittels einfacher M3 Schrauben. Des Weiteren bietet sich eine Entkopplung der Sensorik bspw. Über Dämpferelemente an. Auch die offene Verkabelung und unstrukturierte Elektronik zeigt großes Verbesserungspotential auf.

Ausgehend von der aus der Plattform gewonnenen Erkenntnisse folgt die Konzeptfindung der Neuentwicklung.

2.2 Konzipierung

Um die technisch und wirtschaftlich optimale Variante zu finden, werden Hilfsmittel wie der Morphologischen Kasten sowie das Prinzip der technischen Wertigkeit verwendet.

Für die Konzipierung wurden folgende Entscheidungskriterien herangezogen:

1. Gewicht: Aus der Struktur und dem Aufbau resultierende Gewicht
2. Wirkungsgrad / Dynamik: Die Anordnung der Luftschrauben beeinflusst direkt die Flugdynamik sowie den Wirkungsgrad. Koaxiale Luftschraubenanordnungen besitzen durch Strömungsverluste einen geringeren Wirkungsgrad.
3. Funktionalität: Die Form des Zentralpods beeinflusst maßgeblich eine sinnvolle Anordnung aller Einzelkomponenten.

Mit Hilfe eines Morphologischen Kastens (Tabelle 2-1) soll die technisch und wirtschaftlich sinnvollste Variante gefunden werden.

Tabelle 2-1: Morphologischer Kasten – Konzeptfindung

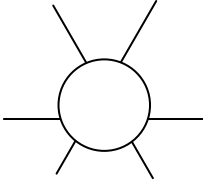
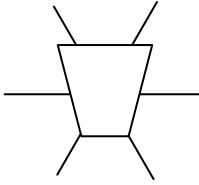
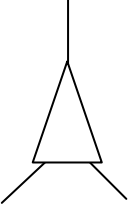
Konzept	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Struktur	 <p>Punkt u. Achsensymmetrisch</p>	 <p>Achsensymmetrisch</p>	 <p>Koaxiale-Rotoranordnung</p>
Gewicht	normal	normal	leicht
Wirkungsgrad / Dynamik	optimal	optimal	eingeschränkt
Funktionalität	mittel	hoch	mittel

Tabelle 2-2: Technische Wertigkeit - Konzeptfindung

Kriterien	Gewicht	Wirkungsgrad / Dynamik	Funktionalität	Anzahl der +	Gewichtsfaktor g_k^1
Gewicht		-	-	0	0,00
Wirkungsgrad / Dynamik	+		-	1	0,33
Funktionalität	+	+		2	0,66
$\Sigma +$				3	$\Sigma g_k = 1$
$1/\Sigma +$					0,33

$$g_k^1 = \frac{(\text{Anzahl der } +)}{(\Sigma +)}$$

Mit den Gewichtungsfaktoren der jeweiligen Kriterien wird die bestgeeignetste Variante ausgewählt.

Tabelle 2-3: Bewertungstabelle - Raddrehzahlerfassung

	Gewichtungsfaktor g_k	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Idealerfüllung
Gewicht	0,00	3	3	5	5
↳ $*g_k$		0	0	0	0
Wirkungsgrad / Dynamik	0,33	5	5	3	5
↳ $*g_k$		1,66	1,66	1	1,66
Funktionalität	0,66	3	4	2	5
↳ $*g_k$		2	3	1,33	3,33
Σ technischer Eigenschaften		3,66	4,66	2,33	5
Technische Wertigkeit		0,732	0,932	0,466	1

Variante 2 erweist sich entsprechend dem Morphologischen Kasten als optimale Lösung. Das Konzept überzeugt durch eine hohe Funktionalität. Die länglich variable Form des Zentralpods eignet sich hervorragend als Montageplattform für den Lipo-Akku und aller weiteren Komponenten. Durch die konventionelle Motoranordnung wird ein stabiler Flugbetrieb bei gutem Wirkungsgrad gewährleistet.

2.3 Konzeptausarbeitung

Für die ausgewählte Struktur wird im Folgenden eine detaillierte geometrische Form festgelegt. Darüber hinaus werden die Abmessungen und eine Gewichtsabschätzung vorgenommen.

Der Zentralpod soll achsensymmetrisch aufgebaut werden. Dies erleichtert die Orientierung und Steuerbarkeit. Dennoch sollen die Rotoren symmetrisch auf einer Kreisbahn angeordnet werden. Dies ist auf Abbildung 2 zu erkennen.

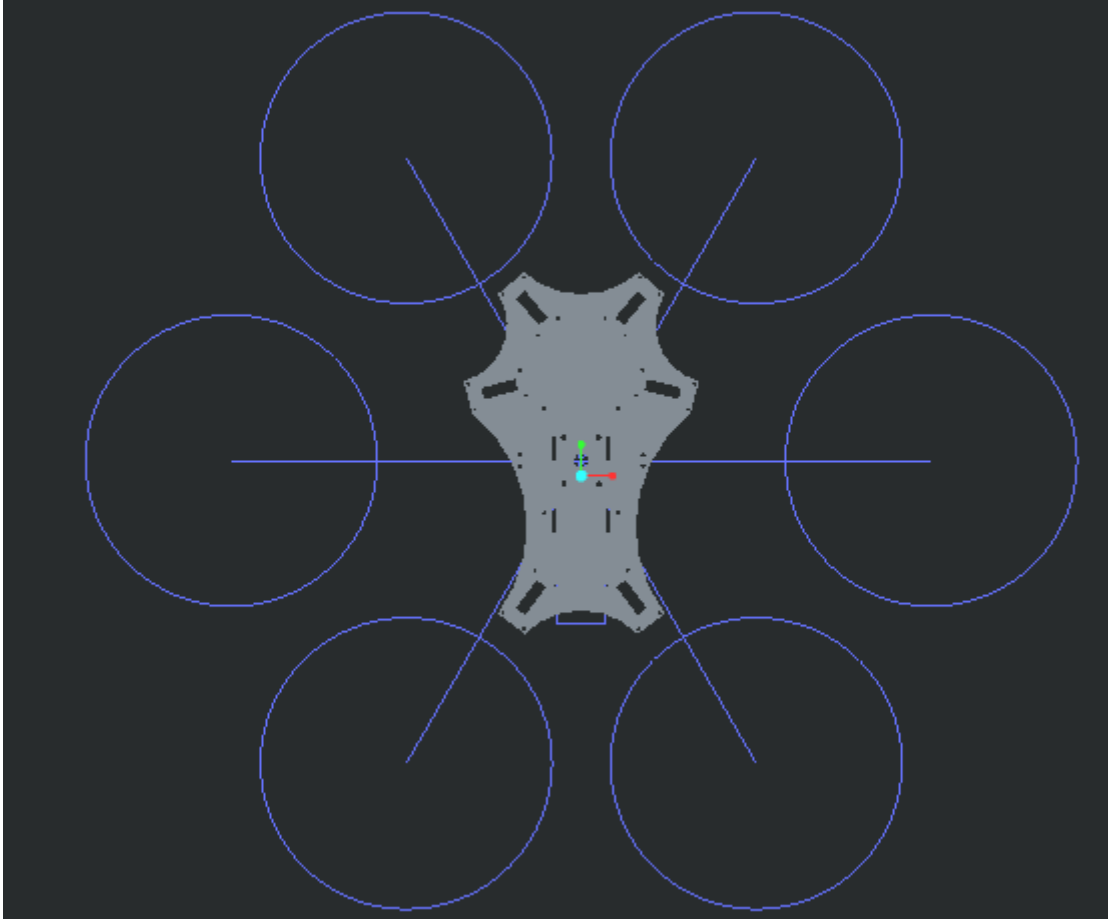


Abbildung 2: Grundstruktur und Rotoranordnung

Zur Gewichtsersparnis soll die gesamte Konstruktion mittels Leichtbau realisiert werden. Der Zentralpod soll aus einer Sandwichkonstruktion aus Carbonplatten bestehen. Die Ausleger sind als Carbonrohre geplant. Dies ermöglicht ein geringes Gewicht bei einer sehr hohen Steifigkeit.

2.4 Gewichtsauslegung

Um eine mögliche präzise Leistungsauslegung der Motoren durchzuführen wird zunächst das Gesamtgewicht aller Einzelkomponenten erfasst und zusammengerechnet.

Die folgende Tabelle listet die zu erwartende Gewichtsabschätzung des Hexakopters auf:

Tabelle 2-4: Gewichtsabschätzung

Komponenten	Anzahl	Einzelgewicht	Gesamtgewicht
Rahmen	1	500g	500g
Landegestell	2	100g	200g
Motoren	6	89g	534g
Regler	6	13,7g	83g
4S Lipo	1	612g	612g
Empfänger	1	12g	12g
Steuerung	1	100g	100g
Sonstiges	1	150g	150g
Σ			2191g

Bei Bedarf muss zu dem Abfluggewicht von 2,2kg noch das Gimbal mit Kamera hinzugerechnet werden, so dass mit einem maximalen Abfluggewicht von 3kg zu rechnen ist.

3 Leistungsauslegung

Die gezeigte Leistungsauslegung beruht auf der Strahl- bzw. Stromfadentheorie nach Bernulli. Die in Abbildung 3 zu sehende Skizze zeigt einen idealen Rotor, der als kreisförmiges Kontinuum in der Lage ist, Luft nach unten zu Beschleunigen.

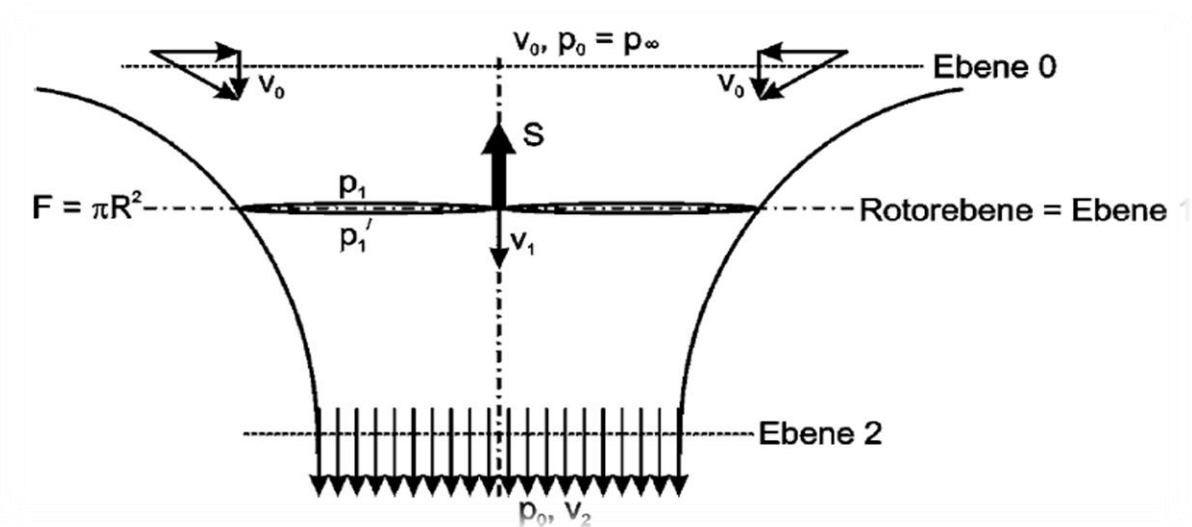


Abbildung 3: Schematische Darstellung Strahltheorie [1]

Der nötige Schub entsteht durch die Beschleunigung der durch den Rotor strömenden Luftmassen. Dabei entsteht oberhalb des Rotors ein Unterdruck und unterhalb ein Überdruck. Der resultierende Druckunterschied wirkt auf die Rotorkreisfläche und erzeugt den Schub.

Entsprechend der obigen Skizze lässt sich die folgende Gleichung herleiten, um die nötige Leistung eines idealen Rotors bei gefordertem Schub zu berechnen:

$$P_{Ro,ges,ideal} = G * \sqrt{\frac{G}{2 * \rho * A_{E1}}} \quad (3.1)$$

Auf eine detaillierte Herleitung der Gleichung wird hier verzichtet. Sie kann in „Flugmechanik der Hubschrauber“ von Walter Bittner nachgelesen werden.

3.1 Leistungsbedarf im Schwebeflug

Für die Berechnung gelten die folgenden Randbedingungen:

Tabelle 3-1:Leistungsdaten

Gesamtgewicht [kg]:	3
Rotordurchmesser [m]:	0,254
Wirkungsgrad (Schwebegüte Rotor):	1
Anzahl Rotoren:	6
Luftdichte 20°C [kg/m ²]:	1,293
Gewichtskraft [N]:	29,43
Rotorkreisfläche gesamt [m ²]	0,30402449

Ideale benötigte Gesamtleistung:

$$P_{\text{Ro,ges,ideal}} = G * \sqrt{\frac{G}{2 * \rho * A_{E1}}} = 29,43 \text{ N} * \sqrt{\frac{29,43 \text{ N}}{2 * 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,3 \text{ m}^2}} \quad (3.2)$$

$$= 180,06 \text{ W}$$

Dies entspricht einer idealen Leistung pro Rotor von 30,01 W.

Abzug Gütegrad Luftschraube/ Schwebegüte

Ein realer Rotor besitzt im Schwebeflug die folgenden Verluste:

Tabelle 3-2: Verlustquellen

Profilwiderstand	20-30 %
Ungleichförmiger Durchfluss	5-7 %
Restdrall im Luftstrom	2 %
Blattspitzenverluste	2-4 %

Der Wirkungsgrad eines für Multikopter eingesetzten Rotors liegt im Schnitt bei ca. 0,6. Unter dieser Berücksichtigung beträgt die benötigte Motorleistung des einzelnen Motors:

$$P_{\text{Mech}} = \frac{P_{\text{Ro}}}{\eta_{\text{Rotor}}} = \frac{30,01 \text{ W}}{0,5} = 60,02 \text{ W} \quad (3.3)$$

Um die elektrische Eingangsleistung des Motors zu bestimmen, müssen noch der Motorwirkungsgrad und der des Reglers miteinbezogen werden:

$$P_{\text{El}} = \frac{P_{\text{Mech}}}{\eta_{\text{Motor}} * \eta_{\text{Regler}}} = \frac{42,87 \text{ W}}{0,92 * 0,9} = 72,49 \text{ W} \quad (3.4)$$

3.2 Simulation mit Hilfe von JavaProp

JavaProp ist ein java-basierendes Freeware Tool zur Auslegung und Berechnung von Luftschrauben. Die Berechnung erfolgt nach dem Verfahren der Blattelementmethode.

Der Arbeitsablauf ist in Abbildung 4 zusammengefasst:

Für die Simulation wird zunächst die ausgewählte Luftschraube vermessen und die ermittelten Koordinaten in JavaProp eingetragen. Die Vermessung erfolgt durch Angabe der Geometrie an vier Schnitten entlang der Luftschraube. Durch die Auswahl eines Profils (hier Ara D6% für Modellschrauben), werden die restlichen Koordinaten durch das Programm interpoliert und somit ein nahezu identisches Luftschraubenprofil erzeugt. Das nun digitalisierte Profil dient als Basis für die Simulation und kann darüber hinaus als CAD Modell exportiert werden.

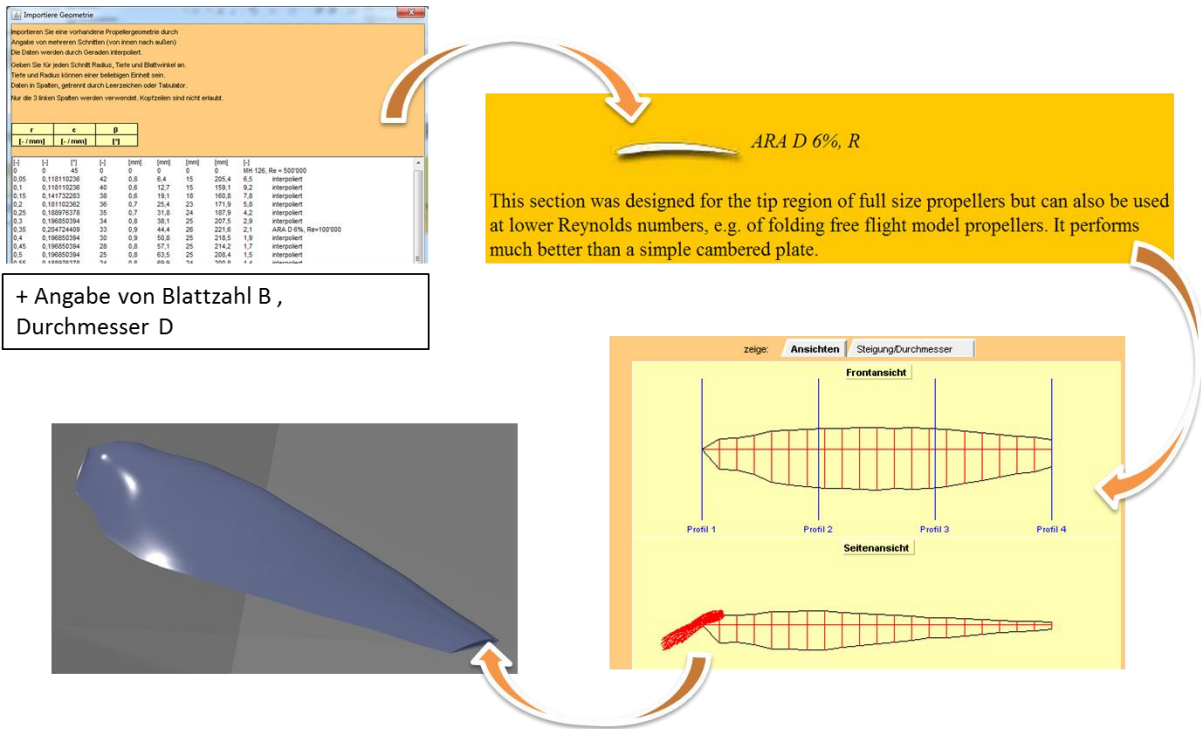


Abbildung 4: Digitalisierung des Propellerprofils [2]

3.3 Verifizierung anhand eines Leistungsprüfstands

Damit die aufgezeigte Leistungsauslegung unter Realbedingungen verifiziert werden kann, wird ein Prüfstand aufgebaut.

Ziel des Prüfstands ist die Ermittlung des resultierenden Schubs und die damit verbundene elektrische Leistungsaufnahme. Als Motor- Luftschraubenkombination wird eine 10x5,5“ in Verbindung mit einem Hacker A40 Motor verwendet.

3.3.1 Aufbau

Der Leistungsprüfstand in Abbildung 5 besteht aus einem mittig drehbar gelagertem Hebelarm (1), an dessen Ende der Brushless Motor mit Luftschraube (2) montiert ist. Das andere Ende liegt auf eine Waage (3) auf und überträgt somit eins zu eins den an der Luftschraube erzeugten Schub.

Bei der Versuchsdruchführung wird die Spannung direkt am Lipo mit Hilfe eines Multimeters (4) gemessen. Der Strom zwischen Lipo und Regler wird mit einer Strommesszange (5) gemessen. Zusätzlich wird die Propellerdrehzahl mit Hilfe eines optischen Sensors (6) gemessen. Das PWM Signal für den Motorregler wird über ein STM Discovery Board (7) erzeugt. Die Stellgröße kann dabei Schrittweise von 0 – 100% variiert werden.

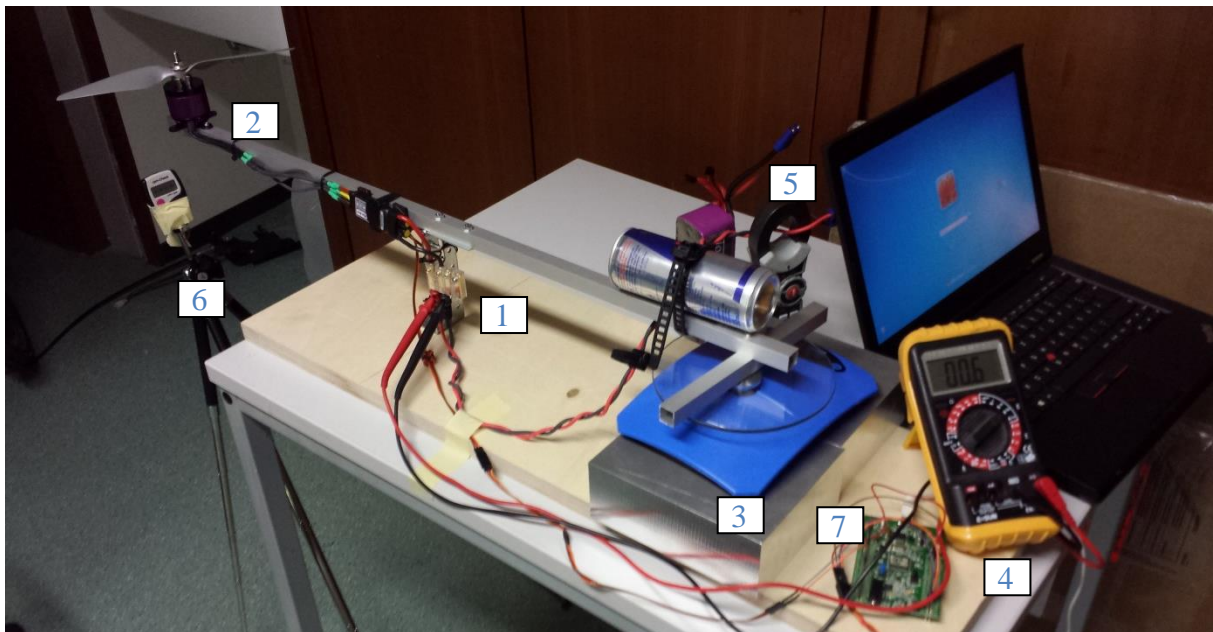


Abbildung 5: Leistungsprüfstand

3.4 Auswertung und Vergleich

Im folgenden Kapitel werden die Berechnung mit Strahltheorie sowie die Simulationsergebnisse aus JavaProp mit den am Prüfstand gemessenen Ergebnissen und Werten verglichen und ausgewertet.

Abbildung 8 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Strahltheorie mit denen aus der Simulation mit JavaProp.

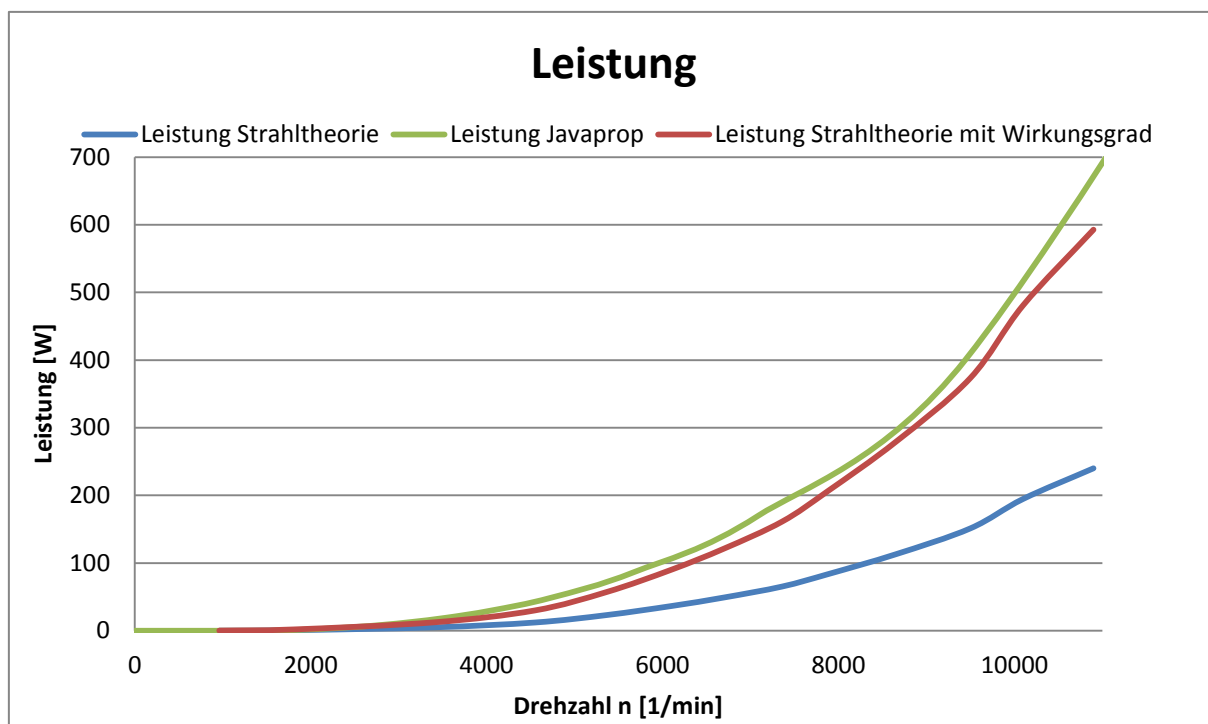


Abbildung 6: Leistungsbedarf Strahltheorie und JavaProp

Grundsätzlich weicht die die Simulationskurve von JavaProp (grün) gravierend von der der Strahltheorie (blau) ab. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Strahltheorie nur einen idealen Rotor betrachtet und jegliche Verluste vollständig vernachlässigt. Die Strahltheorie kann somit nur in Verbindung mit einem Propellerwirkungsgrad verwendet werden. Für den Vergleich wird somit ein Wirkungsgrad von 0,6 angenommen wodurch ein nahezu identischer Verlauf (rot) erzielt wird. Somit bestätigt die Simulation die analytischen Berechnungen.

In Abbildung 7 erfolgt abschließend der Vergleich zwischen Simulation und Prüfstand.

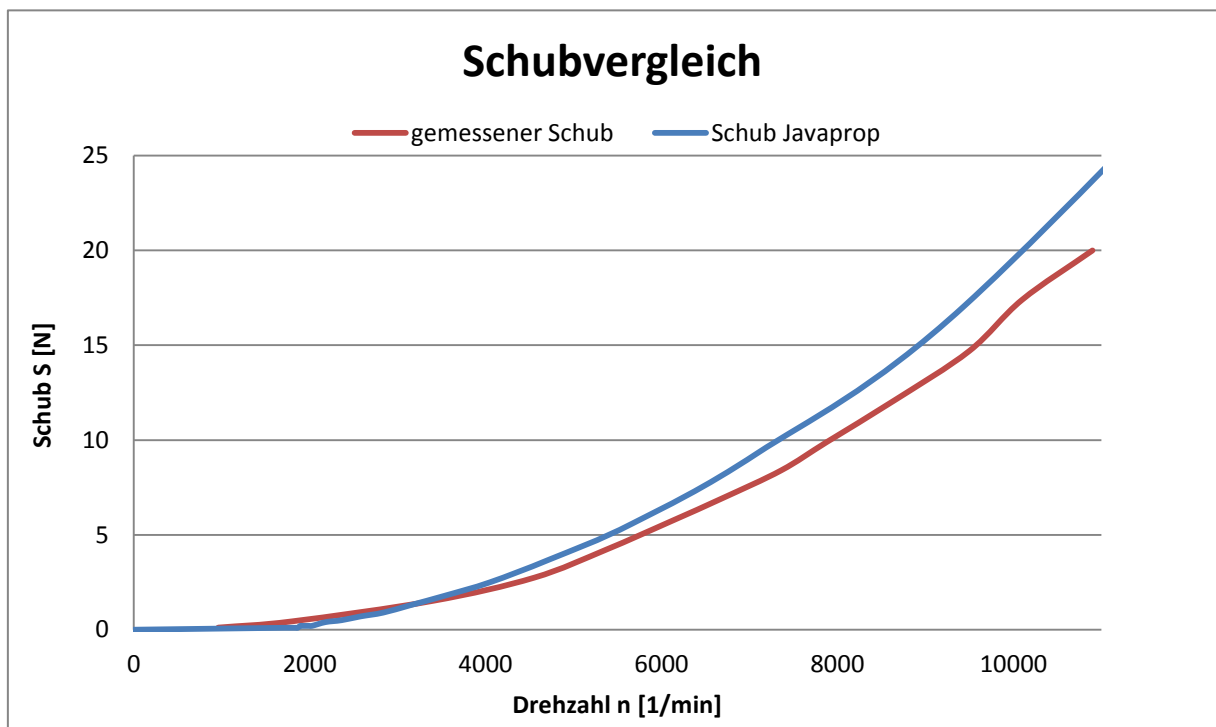


Abbildung 7: Schubvergleich von JavaProp und Prüfstand

Grundsätzlich sind ähnlicher Verläufe der beiden Kurven zu beobachten, so dass der Prüfstand die Gültigkeit der Simulation bestätigt. Die dennoch erkennbaren Abweichungen resultieren aus den nicht berücksichtigten Querströmungen von JavaProp durch die Verwendung eines 2-dimensionalen Verfahrens. Dies erklärt den leicht höheren Verlauf der simulierten Schubkurve. Des weiteren unterscheidet sich das digitalisierte Blattprofil durch Messungenauigkeiten vom realen Profil.

Somit lassen sich aus den Ergebnissen aus der analytischen Berechnung, der Simulation sowie den aus der Messung gewonnen Erkenntnissen eine geeignete Motorauswahl durchführen.

Die folgende Abbildung zeigt die elektrisch gemessene Leistung über der Drehzahl und Schub. Entscheiden für die Motorauswahl ist der Leistungsbedarf bei einem Schub von 500g, da dies den Anforderungen an den Schwebeflug des Hexakopter entspricht.

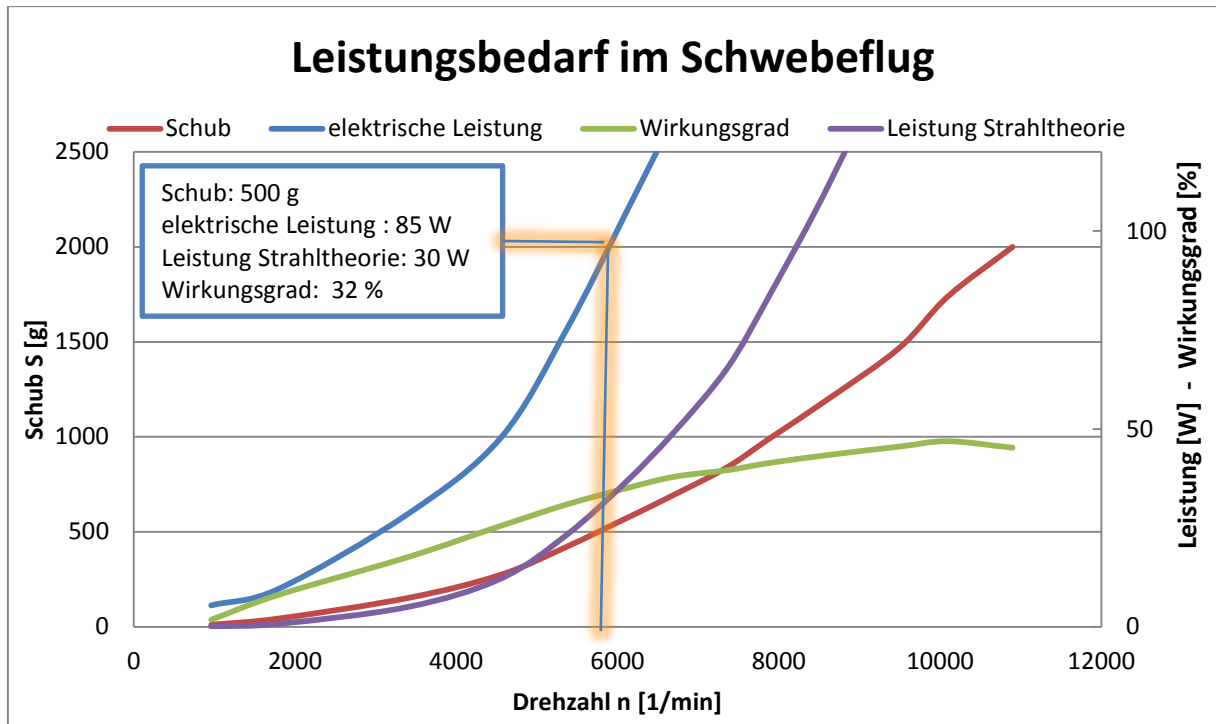


Abbildung 8: Leistungsbedarf im Schwebeflug bei 500g Schub

Die gemessene elektrische Leistung liegt bei 85W und einem Wirkungsgrad von 32%. Für die Motorauswahl wird folgende Faustformel verwendet:

$$P_{\text{Motor}} = P_{\text{Schweben}} * 2,5 = 85 \text{ W} * 2,5 = 212 \text{ W}$$

Da bei den Motoren auf die Firma Hacker zurückgegriffen werden soll, wird ein Multikoptermotor der Baureihe A30 verwendet:

A30 52S UAV 200W Dauerleistung / 250 W Spitzenleistung

3.5 Leistungsbedarf im Steigflug

Entsprechend der Strahltheorie, ergibt sich die notwendige Steigleistung je Motor nach folgender Formel:

$$P_{\text{St,ideal}} = \frac{P_{\text{Ro,ideal}}}{\frac{v_i}{v_{i_0}}} \quad (3.5)$$

Der Quotient $\frac{v_i}{v_{i0}}$ ergibt sich aus:

$$\frac{v_i}{v_{i0}} = -\frac{v_z}{2 * v_{i0}} + \sqrt{\left(\frac{v_z}{2 * v_{i0}}\right)^2 + 1} \quad (3.6)$$

Dabei ist

$$v_{i0} = \sqrt{\frac{G}{2 * \rho * A_{E1}}} \quad (3.7)$$

und v_z die Steiggeschwindigkeit des Kopters. Die Steiggeschwindigkeit wird mit 6 m/s angenommen.

Somit ergibt sich folgende Rechnung:

$$v_{i0} = \sqrt{\frac{29,43 \text{ N}}{2 * 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,3 \text{ m}^2}} = 6,118 \quad (3.8)$$

$$\frac{v_i}{v_{i0}} = -\frac{6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 * 6,118 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + \sqrt{\left(\frac{6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 * 6,118 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right)^2 + 1} = 0,623 \quad (3.9)$$

Die nötige ideale Steigleistung eines Motors ergibt sich somit zu:

$$P_{\text{St,ideal}} = \frac{30,01 \text{ W}}{0,623} = 48,14 \text{ W} \quad (3.10)$$

Die tatsächlich nötige Steigleistung beläuft sich auf:

$$P_{St} = \frac{P_{St,ideal}}{\eta_{Rotor}} = \frac{48,14 \text{ W}}{0,5} = 96,28 \text{ W} \quad (3.11)$$

Mit Hilfe des berechneten und am Prüfstand ermittelten Leistungsbedarfs und der Vorgabe einen Motor der Firma Hacker auszuwählen, wird der Motor A30 52S UAV ausgewählt (siehe Abbildung 9).

Übersicht Hacker BLDC-Motoren für Multikopter



Motor	RPM/V	Akku	max. AUW Quadro	max. AUW Hexa	max. AUW Okto	Regler	Prop
A20-26M	1130kV	3S LiPo	1200g	1800g	2400g	12..20 A	8 - 10 Zoll
A20-20L	1022kV	3S LiPo	1600g	2400g	3200g	18..25 A	8 - 10 Zoll
A20-22L	924kV	3S - 4S LiPo	1600g	2400g	3200g	20..30 A	8 - 10 Zoll
A30-42S-UAV	850kV	3S LiPo	2000g	3000g	4000g	20..30 A	10 - 11 Zoll
A30-52S-UAV	680kV	4S LiPo	2000g	3000g	4000g	20..30 A	10 - 11 Zoll
A30-24M-UAV	680kV	4S LiPo	2800g	4200g	5600g	25..35 A	12 - 13 Zoll
A30-30M-UAV	550kV	5S LiPo	2800g	4200g	5600g	25..35 A	12 - 13 Zoll
A30-18L-UAV	680kV	4S LiPo	4000g	6000g	8000g	30..40 A	13 - 14 Zoll
A30-28L-UAV	450kV	6S LiPo	4000g	6000g	8000g	30..40 A	13 - 14 Zoll

Abbildung 9: Übersicht Hacker Brushless Motoren [3]

Der Motor ist speziell für Multikopter und für Hexakopter mit einem Abfluggewicht von 3 kg von Hacker empfohlen. Das Datenblatt des Motors befindet sich im Anhang.

4 Konstruktion

Dieses Kapitel befasst sich mit der Rahmenkonstruktion des Hexakopters. Dies umfasst die Entwicklung der Ausleger, die Konstruktion des Zentralpods sowie der Motorpods und die Auslegung des Landegestells.

4.1 Ausleger

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben soll der Zentralpod achsensymmetrisch aufgebaut werden. Dies erleichtert die Orientierung und Steuerbarkeit. Dennoch sollen die Rotoren symmetrisch auf einer Kreisbahn angeordnet werden. Abbildung 10 zeigt die Anordnung der Ausleger.

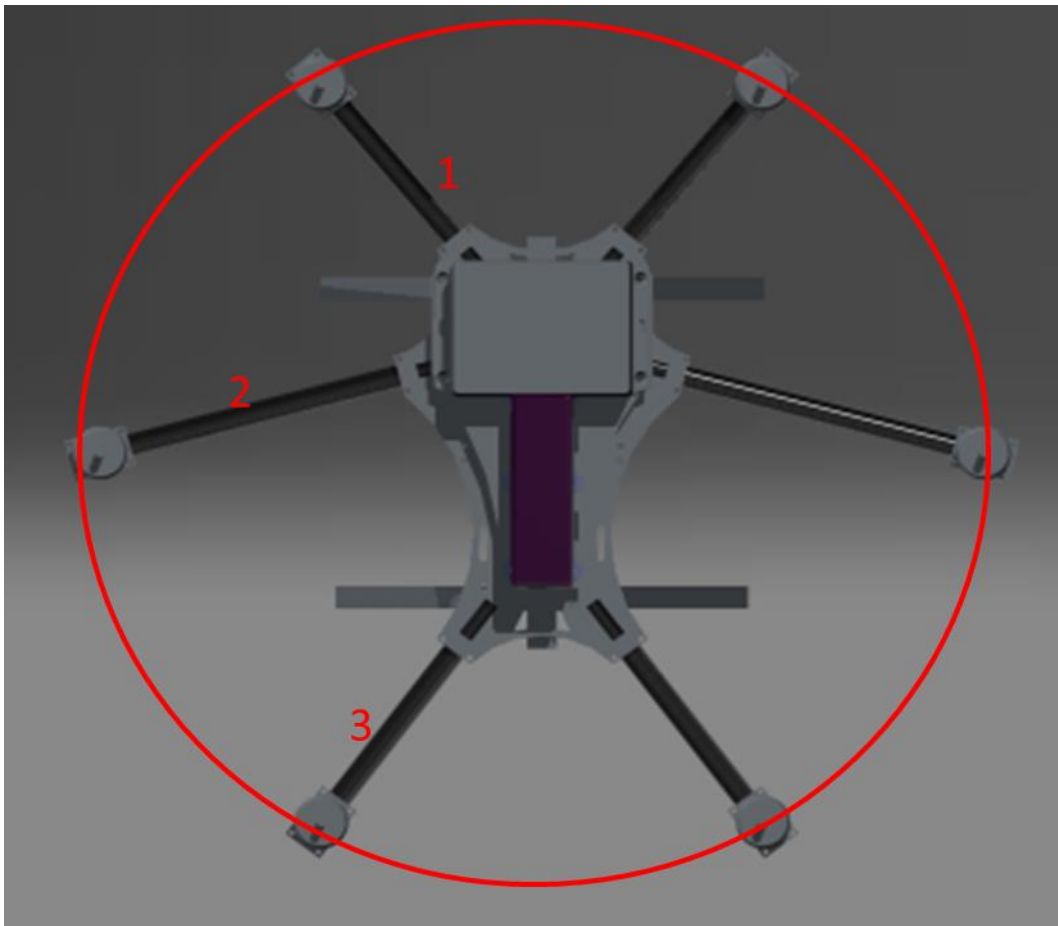


Abbildung 10: Anordnung der Ausleger

Sowohl die vorderen (1), die mittleren (2) als auch die hinteren Ausleger (3) verbinden den jeweiligen Motorpod mit dem Zentralpod, sodass die Motorwelle auf der Kreisbahn liegt. Konstruktiv sind die Ausleger aus Carbonrohr mit einem Durchmesser von 16mm. Diese aus 3K Fasern mit 2/2 Körper Gewebe Bindung zeichnen sich durch eine sehr hohe Steifigkeit bei

äußerst geringem Gewicht aus. Damit erfüllen sie die Anforderungen und die auftretenden Belastungen. Die Hauptbelastungen treten in vertikaler Richtung auf (Steigflug, Sinkflug, Schwebeflug).

4.2 Zentralpod

Der Zentralpod bildet das Zentrum sowie die Grundlage für den Anbau von Steuerung, Akku etc.. Außerdem werden an diesen die sechs Ausleger angebunden. Auch dieser muss die Hauptbelastungen aufnehmen, sodass besonderes Augenmerk auf die Biegesteifigkeit sowie auf die Aufnahmen der Ausleger gelegt wird.

In der Konzeptphase wurde zur Gewichtsersparnis festgelegt, dass die gesamte Konstruktion mittels Leichtbau zu realisieren ist. Der Zentralpod soll außerdem aus einer Sandwichkonstruktion aus Carbonplatten bestehen.



Abbildung 11: Konstruktion des Zentralpods

Abbildung 11 zeigt die Konstruktion des Zentralpods. Die Ausleger werden jeweils über zwei Rohrschellen aufgenommen. Diese sind aus Aluminium gefertigt. Gleichzeitig verbinden die insgesamt 24 Rohrschellen die obere Zentralplatte mit der unteren Zentralplatte. Durch diese Sandwichbauweise besitzt der Zentralpod eine äußerst hohe Steifigkeit. Zur Gewichtsersparnis befinden sich auf den Platten an wenig belasteten Stellen Aussparungen. Außerdem befinden sich am Zentralpod Bohrungen und Langlöcher für die Befestigung und Montage von:

- Akkuplatte
- Steuerung
- Empfänger
- GPS- Empfänger
- Landegestell

- Gimbal
- Fallschirm
- Reserveslots

4.2.1 Akkuplatte

Die Akkuplatte wird über acht Dämpfergummis (siehe Abbildung 11) auf der oberen Zentralplatte angebracht. Grund ist die schwingungstechnische Entkopplung von Steuerung bzw. dessen Sensorik vom Rest der Rahmenkonstruktion. Durch die speziell für das Gewicht ausgelegten Dämpfergummis werden die Vibrationen der Motoren gedämpft und somit die Sensorik nicht beeinflusst. Auf der Akkuplatte sind Befestigungsmöglichkeiten für den Akku und die Steuerung.

4.3 Motorpod

Die Außenläufermotoren sollen über Motorpods an den Auslegern befestigt werden. Die Konstruktion muss die Kräfte und Momente die durch den Motor erzeugt werden sicher aufnehmen können. Abbildung 12 zeigt die Konstruktion des Motorpods.

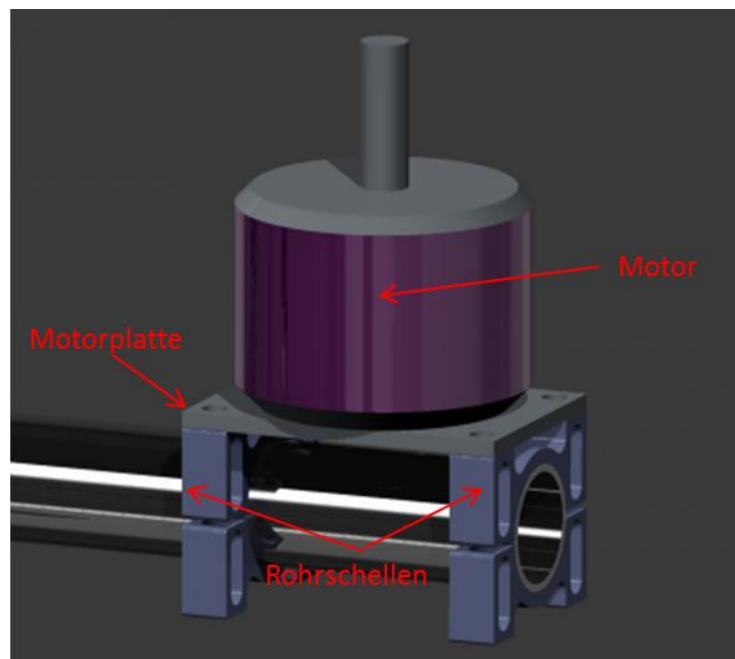


Abbildung 12: Konstruktion des Motorpods

Der Motor wird über die Montagebohrungen mit der Carbon Motorplatte verschraubt. Diese ist über zwei Rohrschellen mit dem jeweiligen Ausleger verbunden. Die fertigen Motorpods mit Verschraubung sind auf der folgenden Abbildung zu sehen.

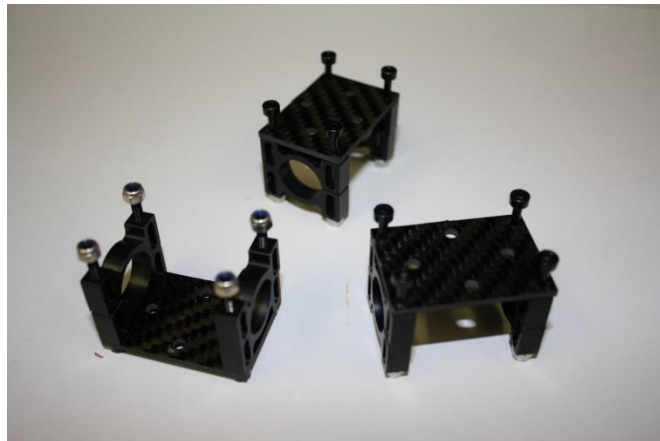


Abbildung 13: Motorpods mit Rohrschellen

4.4 Landegestell

Der Hexakopter benötigt ein Landegestell damit er sicher und beschädigungsfrei landen kann. Dieses soll auch stoßartige Kräfte beim Landevorgang aufnehmen können und ggf. ausfedern. Um eine Beeinflussung der Flugeigenschaften zu verhindern sowie ein rundum uneingeschränktes Kamerabild zu ermöglichen soll das Landegestell elektrisch ausfahrbar sein. Das klappbare Landegestell ist auf Abbildung 14 dargestellt.

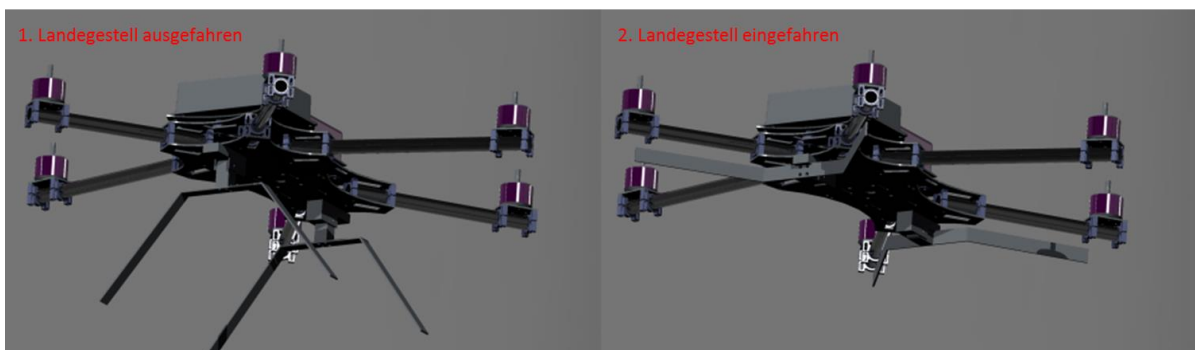


Abbildung 14: Ausfahrbares Landegestell

Über zwei Servos werden jeweils die Landegestellausleger ein- und ausgefahren. Im eingefahrenen Zustand (2) legen sich die Träger unterhalb der Ausleger an, sodass durch diese keine Strömungsverluste entstehen.

In Abbildung 15 ist der Servomotor mit CNC gefertigtem Servoadaptern und den damit befestigten Landegestellauslegern dargestellt.



Abbildung 15: Landegestell Servomotor

5 Elektrische Anbindung und Inbetriebnahme

Die Montage des Rahmens sowie die Anbindung der elektrischen Komponenten werden beim Zusammenbau gleichzeitig durchgeführt, da diese weitestgehend in die Sandwichkonstruktion zu integriert sind.

Für eine kompakte Bauweise wird eine Stromverteilende Ringleitung unter der oberen Rahmenplatte verlegt. Die Ringleitung verläuft entlang des Umfangs als ein geschlossener Kreis und kann somit alle Komponenten mit Strom zu versorgen. Eine derartige Anordnung gewährleistet kurze Kabelwege zwischen Verbraucher und Stromquelle und erspart das aufwändige Verlegen einzelner Leitungen.

Abbildung zeigt schematisch den Aufbau der Verteilerleitung.

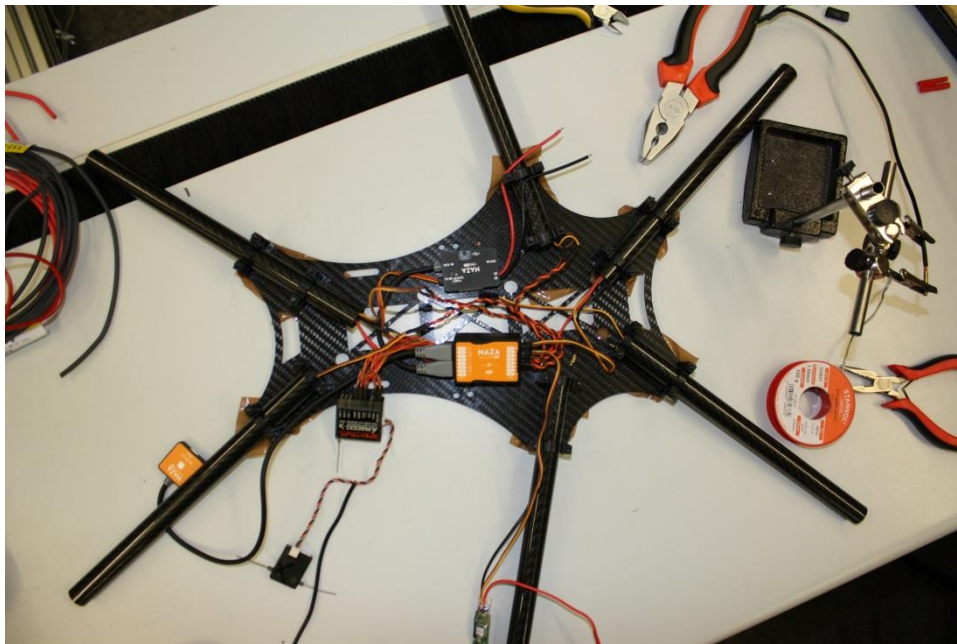


Abbildung 16: Ringleitung und Zusammenbau

5.1 Motoren und Brushless-Regler

Die A30-Motoren werden mit den 3-poligen Drehstromanschlüssen der Regler verbunden. Für möglichst kurze Leitungswege, befinden sich die „Slim“-Regler unmittelbar darunter in den Auslegerrohren. Eine ausreichende Kühlung der Regler soll durch den in Betrieb entstehenden Luftstrom der Rotoren gewährleistet werden. Bei zunehmender Drehzahl sinkt der statische Druck unterhalb des Rotors und somit auch an den sich darunter befindlichen Rohröffnungen. Wie bei einer Venturidüse wird Luft am anderen Rohrende angesaugt und durchströmt den gesamten Ausleger.

5.2 Landegestell Servomotoren

Die Servomotoren sollen parallel angesteuert werden damit das Landegestell auf beiden Seiten gleichzeitig ausfährt. Hierfür werden diese direkt mit einem freien Kanal des Empfängers über ein Y-Kabel verbunden.

5.3 Flugsteuerung

Als Flugsteuerung wird die NAZA V2 mit GPS Modul der Firma DJI verwendet. Diese zeichnet sich durch ihre bereits ausgereifte Technologie aus und überzeugt durch ihren zahlreichen Einsatz in Dronenprojekten.

Darüber hinaus erweitern die folgenden Funktionen erheblich das Potential des Kopters:

-IOC (Intelligent Orientation Control):

Der Kopter wird in diesem Modus über dynamische GPS-Punkte gesteuert. Die Ausrichtung des Kopters wird somit zweitrangig. Der Kopter bewegt sich in alle vier Richtungen immer aus der Sicht des Piloten. Eine Drehung der Kopters hat keine Auswirkung auf die Steuerung. Die Naza-Steuerung arbeitet somit nach GPS Punkten und nicht über die Ausrichtung des Kopters.

- PH (Position hold):

Dieser Modus eignet sich besonders für Luftbildaufnahmen. Durch GPS Unterstützung steuert der Kopter Luftströmungen entgegen und verweilt auf der festgelegten Position. Dies eignet sich besonders für 360° Aufnahmen. Desweiteren kann der Multikopter durch Windböhen "verweht" werden.

- RTH (Return to Home):

Dadurch kann der Kopter eigenständig ohne Eingreifen in die Steuerung zum Startpunkt zurückfliegen und selbstständig landen. Sobald der Kopter in den RTH-Modus wechselt, steigt dieser auf eine sichere Höhe auf, fliegt zum Startpunkt und landet den Kopter Punktgenau. Sollte der DJI Kopter aus dem Blickfeld des Piloten verschwinden kann die Naza-Gesteuerte Multikopter durch diesen Modus zurückgeführt werden. [4]

In **Abbildung 17** ist der gesamte Lieferumfang des NAZA Moduls zu sehen. Für die Montage und Konfiguration ist die Bedienungsanleitung des Herstellers zu empfehlen.



Abbildung 17: DJI NAZA V2 mit GPS Modul [4]

6 Fazit und Ausblick

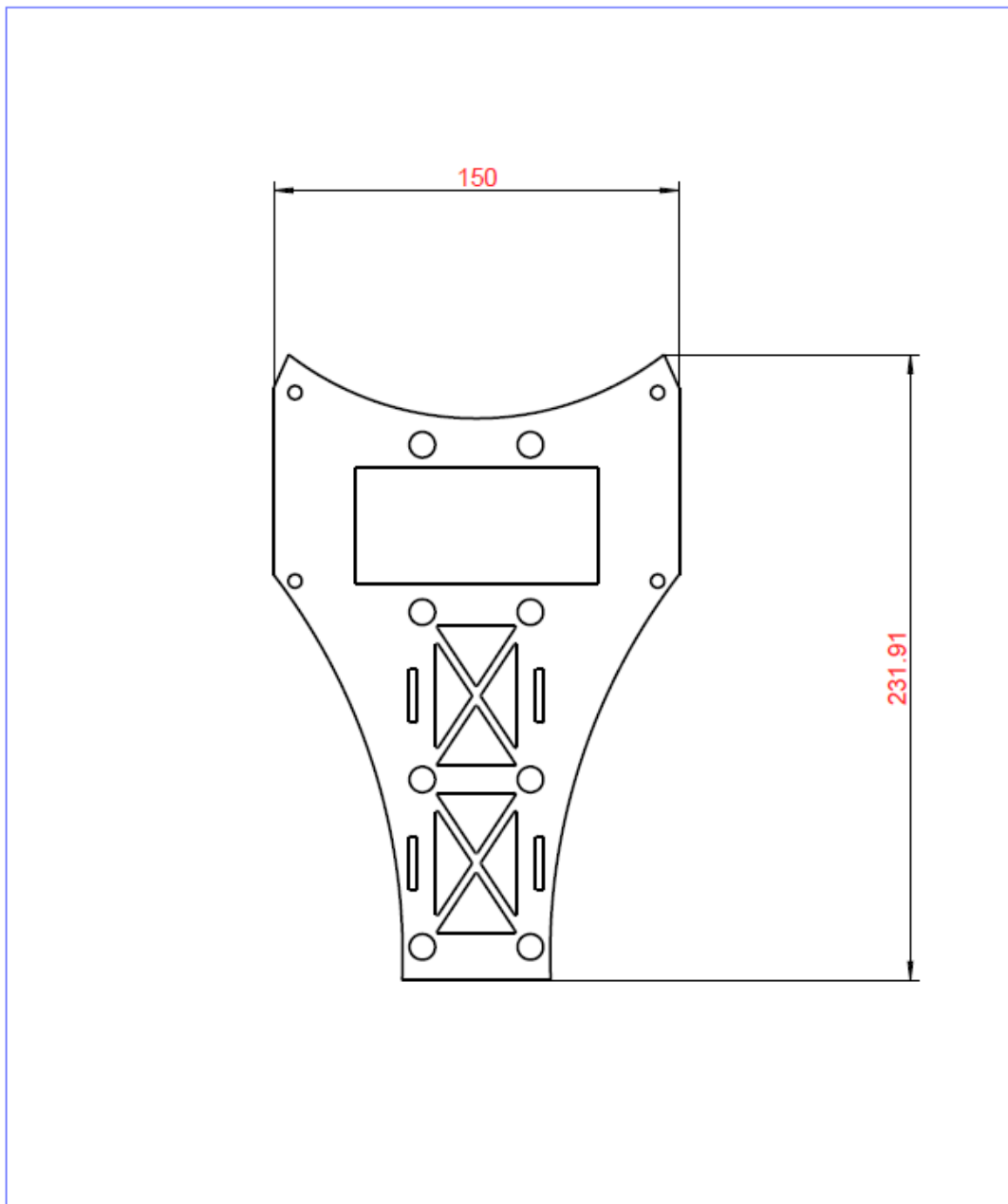
Im Rahmen des Projekts konnte die Aufgabenstellung vollständig erfüllt werden. Dabei entstand ein auf Leichtbau basierender Hexakopter mit einer achsensymmetrischen Anordnung, dessen Rotoren auf einer Kreisbahn um den Schwerpunkt herum angeordnet sind. Mit Hilfe von Simulationstools wie JavaFoil und einem eigens entwickeltem Prüfstand, konnte die passende Motorauswahl getroffen werden. Die Konstruktion, Fertigung der Teile und der anschließende Zusammenbau konnte problemlos durchgeführt werden. Auch die Montage der elektrischen Komponenten sowie die Inbetriebnahme dieser waren erfolgreich. Nach der bevorstehenden erfolgreichen Testphase, bietet die entwickelte Plattform vielfältiges Erweiterungspotential. So kann diese unter anderem um eine zusätzliche Absicherung mit einer Fallschirmeinrichtung erweitert werden. Darüber hinaus bietet der Rahmen hervorragende Montagemöglichkeiten für ein 3-D Kameragimbal und weitere Sensoren für Folgeprojekte.

Anhang

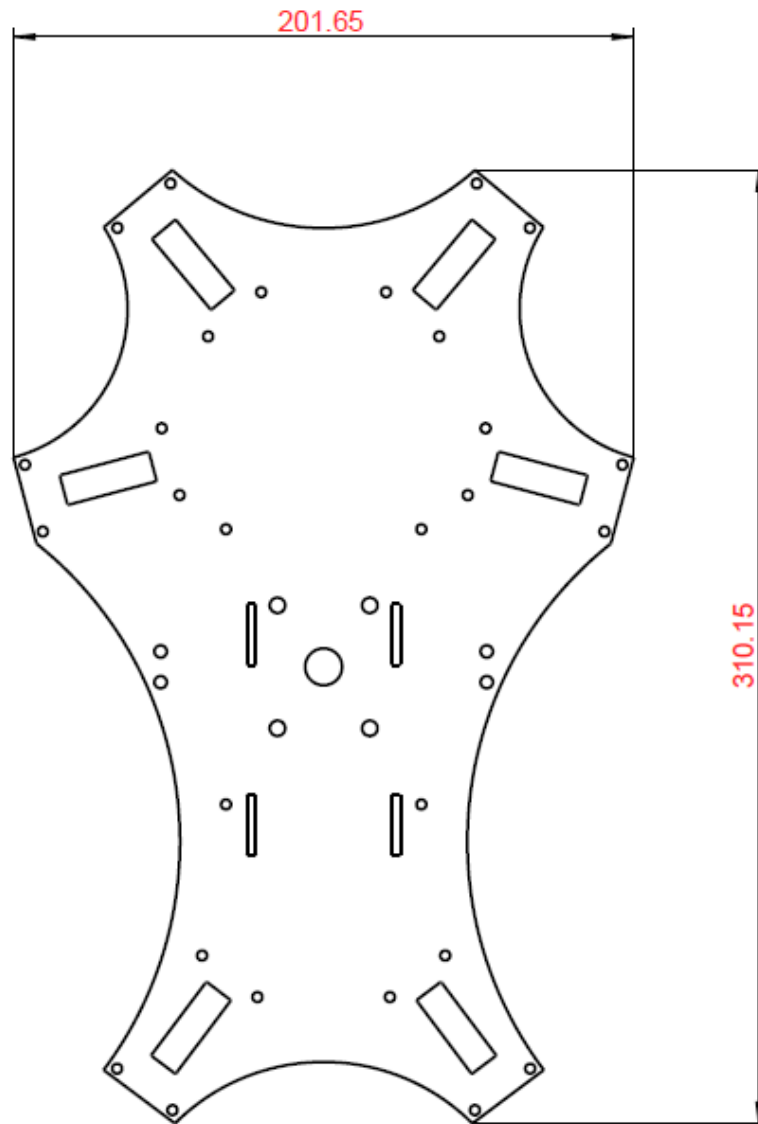
Bestellliste

Position	Artikelname	Artikelnummer	Beschreibung	Lieferant	Einzelpreis	Stückzahl	Gesamtpreis
1	Carbon Rohr Business Ø16mm		Länge: 1000 mm Rohrmaße: Ø16mm x 1,00mm	Composite Point	35,90 €	2	71,80 €
2	16mm Rohrschelle		16mm Rohrschelle aus Luftfahrtaluminium CNC gefräst	Composite Point	7,94 €	24	190,56 €
3	CFK-Platte Premium glänzend		Carbonplatte: Breite: 600 mm Länge: 300mm Materialstärke: 2,0mm	Composite Point	145,50 €	2	291,00 €
4	Motor A30-52S-UAV	19716450	Motor: Leerlaufdrehzahl pro Volt: 680 U/min*1 Gewicht: 66g	Hacker Motor GmbH	73,00 €	6	438,00 €
5	Afro Slim 20Amp Multi-rotor Motor Speed Controller (SimonK Firmware)	PRODUCT ID: 91920001.130-0	ESC Strom: 20A 2-4s Lipoly	HobbyKing	9,74 €	6	58,44 €
6	APC Multi Rotor 10x5,5 Pusher	28810551	Input Freq: 1KHz Luftschraube: linkslaufend	Hacker Motor GmbH	3,00 €	3	9,00 €
7	APC Multi Rotor 10x5,5	28810550	Luftschraube: rechtslaufend	Hacker Motor GmbH	3,00 €	3	9,00 €
8	Landgestellservo	PRODUCT ID: HK-150005-2	Einklappmechanik Landgestell 33mm x 35mm Mount 2 Stk.	HobbyKing	10,15 €	1	10,15 €
9	TopFuel Lipo 20C-ECO-X 5800mAh 4S	25800431	Akku: 4S 5800mAh	Hacker Motor GmbH	72,00 €	1	72,00 €
10	Dämpfergummi Set (4x) - hart	787	Vibrations Dämpfer hart 300-1000g 4 Stk.	globe-flight.de	9,95 €	2	19,90 €
11	Klettband-Gurt 300mm, 2er Pack	27875030	Klettband mit 300mm	Hacker Motor GmbH	4,50 €	1	4,50 €
12	DJI NAZA-M V2 + GPS Modul	DJI1000867	Multirotorsteuerung mit GPS Upgrade	freakware GmbH	229,00 €	1	229,00 €
13	AR8000 DSMX	SPMAR8000	Spektrum AR8000 DSUX 8 Kanal Flugentwänger	freakware GmbH	89,99 €	1	89,99 €
14	Spektrum DX8 Sender	SPMR8810EU	Fernbedienung ohne Empfänger	freakware GmbH	260,99 €	1	260,99 €
15	Fallschirm 2qm	8596	Fallschirm	Raketenmodellbau Klima GmbH	49,90 €	1	49,90 €
Gesamtpreis							1.804,23 €

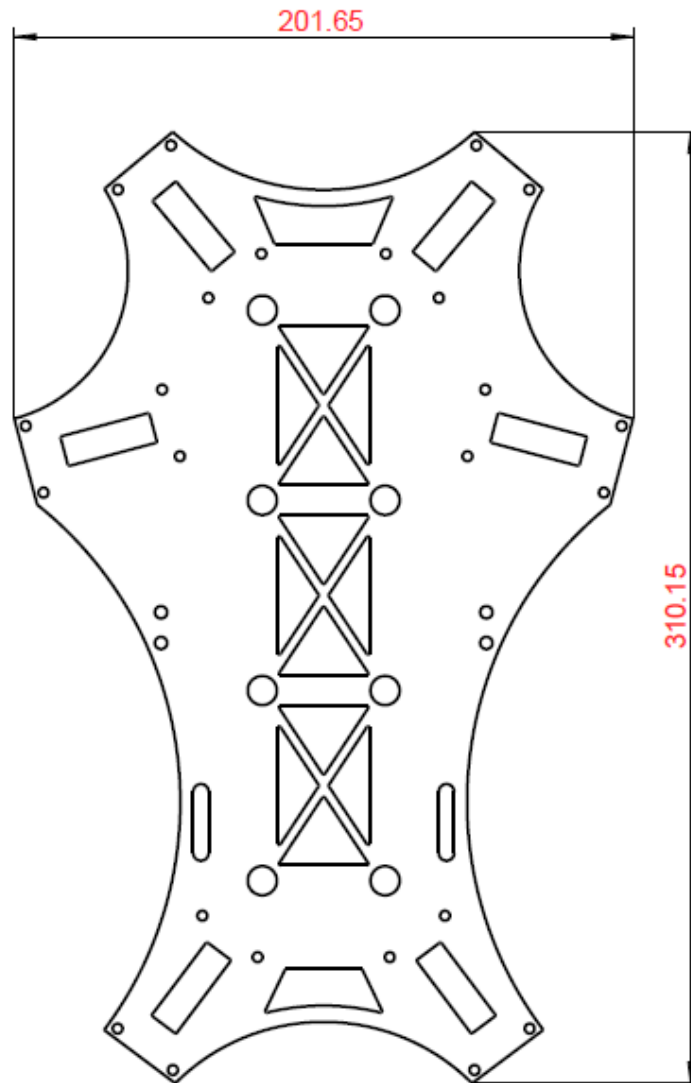
Zeichnungen



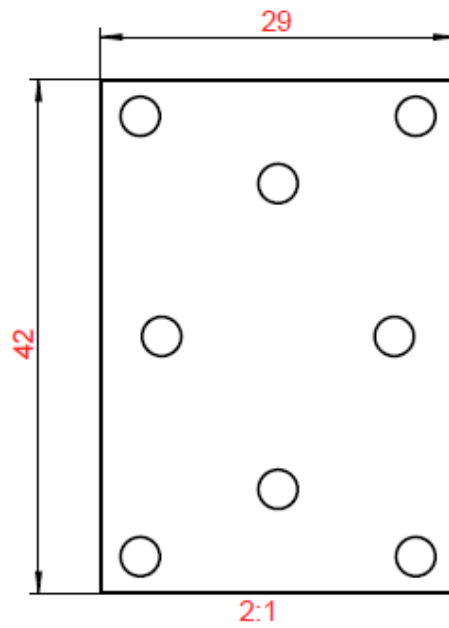
Dateiname		AKKUPLATTE		A4	
Modell		AKKUPLATTE		PART	
Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES			Maßstab 1:2		Gew.: 0.238 kg
			(Werkstoff) (Halbzeug)		
		Datum	Name		Akkuplatte (z.B. Projekt) (DIN/Zchn Nr)
		Bearb.	25.05.2018 (Bearb = USERNAME)		
		Gepr.			
		Nom			
		(Name, Vorname) (Matrikelnummer) (Semester)			
Zust.	Änderung	Datum	Name		1 1 Bl.



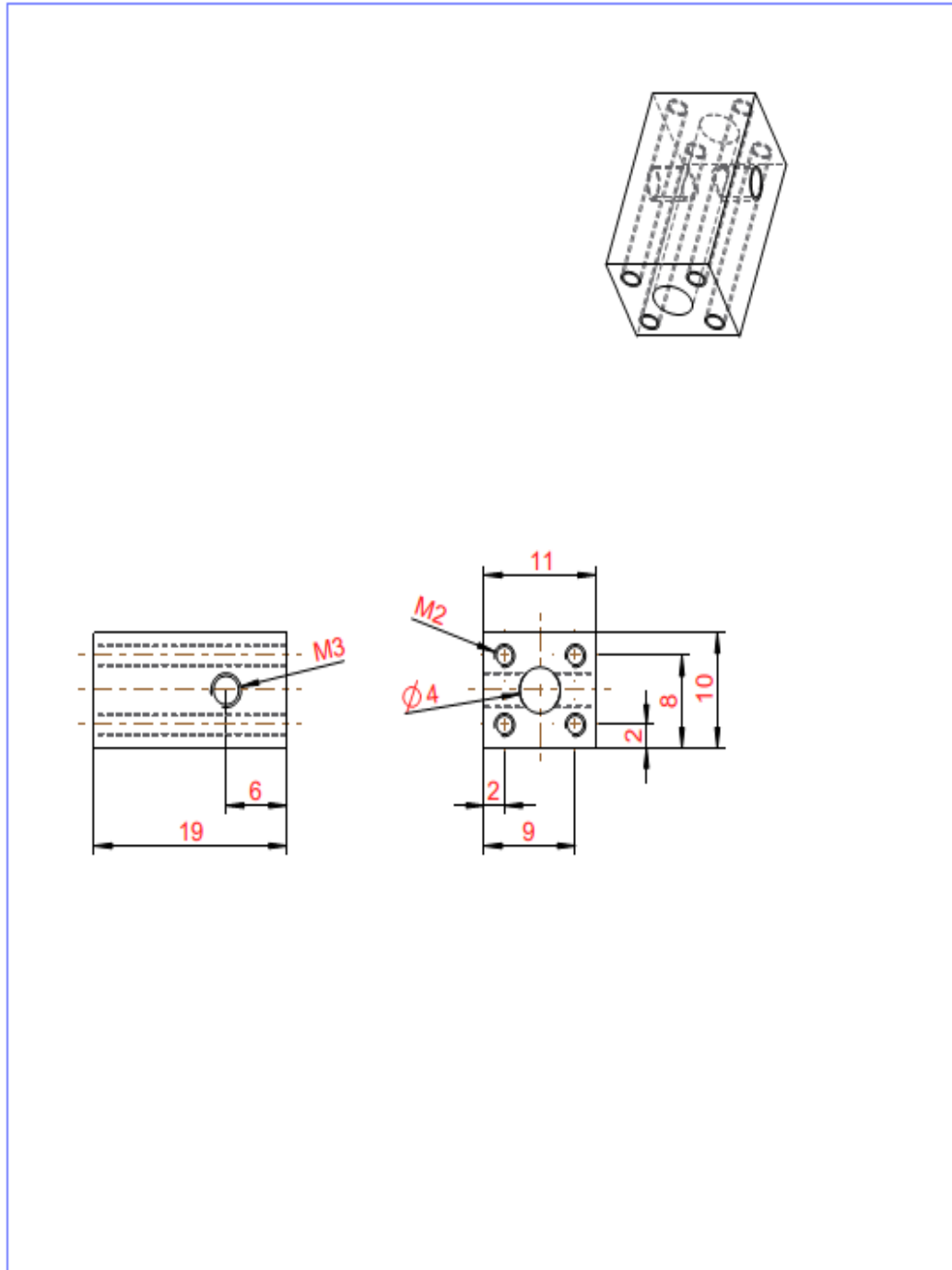
Dateiname		HEXAKOPTER_KONZEPT		A4	
Modell		HEXAKOPTER_KONZEPT		PART	
Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES			Maßstab 1:2		Gew.: 0.552 kg
			(Werkstoff) (Halbzeug)		
			Datum	Name	Hexakopter_Konzept (z.B. Projekt)
			Bearb. 25.05.14	Kuentzle	
			Gepr.		
			Norm		
			(Name, Vorname) (Matrikelnummer) (Semester)		(DIN/Zchn Nr)
Zust.	Änderung	Datum	Name		1 1 Bl.



Dateiname	HEXAKOPTER_OBERRAHMEN	A4
Modell	HEXAKOPTER_OBERRAHMEN	PART
Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES		Maßstab 1:2 Gew.: 0.475 kg
		(Werkstoff) (Halbzeug)
	Datum	Name
	Bearb. 25.05.14	Kuentzle
	Gepr.	
	Norm	
		Hexakopter_Oberrahmen
		(z.B. Projekt)
		(DIN/Zchn Nr)
		1
Zust.	Änderung	Datum Name
		1 Bl.



Dateiname	MOTORPLATTE	A4
Modell	MOTORPLATTE	PART
Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES		Maßstab 2:1 Gew.: 0.018 kg (Werkstoff) (Halbzeug)
	Datum	Name
	Bearb. 25.05.14	Kuentzle
	Gepr.	
	Norm	
	(Name, Vorname) (Matrikelnummer) (Semester)	Motorplatte (z.B. Projekt) (DIN/Zchn Nr)
		1
Zust.	Änderung	Datum Name
		1 Bl.



Dateiname	SERVO_ADAPTER		A4
Modell	SERVO_ADAPTER		PART
Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES			Maßstab 2:1 Gew.: 0.013 kg
			Aluminium 10x11x20
		Datum	Name
		Bearb. 22.07.14	Wahl
		Gepr.	
		Norm	
		U. Wahl, 45553	
		Servo_Adapter	
		Hexakopter	
		(DIN/Zchn Nr)	1
Zust.	Änderung	Datum	1 Bl.

Datenblätter

Motor:

<http://www.hacker-motor-shop.com/e-vendo.php?shop=hacker&a=article&ProdNr=19716450&t=6547&c=6550&p=6550>

Regler:

http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__42551__Afro_Slim_20Amp_Multi_rotor_Motor_Speed_Controller_SimonK_Firmware_.html

Servomotoren:

http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__23483__Servoless_Retract_with_Metal_Trunion_33mm_x_35mm_Mount_2pc_.html

Flugsteuerung NAZA V2:

<http://www.dji.com/product/naza-m-v2>

Rohrschellen:

http://composite-point.de/Gambio/product_info.php?info=p90_16mm-rohrschelle-aus-luftfahrtaluminium-cnc-gefraest.html

Akku:

<http://www.hacker-motor-shop.com/e-vendo.php?shop=hacker&SessionId=&a=article&ProdNr=25800431&t=28&c=5649&p=5649>

Dämpfergummis:

<http://www.globe-flight.de/DJI-daempfer-gummie-moongel-alphagel>

7 Quellenverzeichnis

- [1] Bittner Walter 2009: Flugmechnaik der Hubschrauber,Technologie, das flugdynamische SytemHubschrauber, Flugstabilitäten, Steuerbarkeit; 3. überarbeitete Auflage; 2009 Springer Verlag Berlin Heidelberg

- [2] Hepperle, Martin 2008: JavaProp Homepage,
<http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javaprop.htm>, aufgerufen am 01.06.14

- [3] hacker-motors.com,
http://www.hacker-motor.com/download/multikopter_motorempfehlung_v1-2-pdf/
aufgerufen am 11.07.14

- [4] Globe-flight.de,
<http://www.globe-flight.de/Naza-V2-DJI-GPS-Multikopter-Flamewheel>,
aufgerufen am 12.09.14