

Eine Schwebezeit von 50 Minuten wird nur durch geringes Gewicht in Kombination mit gut ausgelegten Antrieben erreicht. Gut ausgelegt bedeutet, dass die Wirkungsgrade da optimal sind, wo die Motoren am häufigsten drehen. Es wäre sinnlos, einen guten Motor zu verwenden, der in den am meisten genutzten Drehzahlbereichen ineffizient ist.

Ein Tricopter oder Quadrocopter würde Gewicht sparen, weil weniger Ausleger, weniger Motoren mit Propellern und weniger Geschwindigkeitsregler benötigt würden. Die Rechnung ist aber nicht ganz so einfach.

Um mit drei Motoren nur die Hälfte der Leistung zu benötigen, müssten auch der Rahmen, die Flugsteuerung und der Akku nur die Hälfte wiegen. Die Flugsteuerung zu halbieren funktioniert nicht. Der ist auch egal, ob drei oder sechs Motoren angesteuert werden. Auch die Rahmenkonstruktion kann nicht beliebig leichter gemacht werden. Diese muss für einen Multicopter mit einer bestimmten Größe für alle Bauformen etwa ähnlich stabil sein. Ähnliches gilt auch für ein Landegestell.

Weniger Antriebe haben aber auch Nachteile. Ein Tricopter ist wackeliger als ein Hexacopter. Bei einem Hexacopter können mehrere Antriebe zusammenarbeiten und müssen einzeln weniger Arbeit leisten. Zudem hat ein Hexacopter einen redundanten Antrieb und kann, entsprechende Flugsteuerung vorausgesetzt, den Ausfall eines Motors kompensieren.

Damit der Hexacopter ins Auto passt, darf er nicht beliebig groß werden. Eng wird es auch schnell, wenn zwei oder mehr Multicopter im Gepäck sind. Um sicher zu gehen, begrenze ich den Motorabstand auf maximal 75 cm.

Die Anforderungen in der Übersicht:

- Schwebezeit 50 Minuten
- FPV-Reichweite 500 m mit gutem Bild
- Motorabstand maximal 75 cm
- Sehr gute Beleuchtung
- Gesamtkosten von etwa 1000 Euro ohne Fernsteuerung, Empfänger und FPV-Bodenstation
- Alle Teile sind in Deutschland erhältlich

7.2 Planung

Zunächst stelle ich ein paar Überlegungen an, ob sich meine Anforderungen überhaupt umsetzen lassen.

Akkuleistung

Ein Akku mit 5.000 mAh kann rechnerisch 50 Minuten lang 6.000 mA zur Verfügung stellen, bis er komplett leer ist. Bei einem Hexacopter sind das pro Motor 1 A. Wobei ein Akku nie leer geflogen wird, sondern mindestens 10 % übrig bleiben. Akkus gibt es in gebräuchlichen Formen etwa bis 20.000 mAh. Damit können 50 Minuten sechs Motoren mit 3 A versorgt werden und es bleiben noch 10 % Rest.

Je mehr Energie ein Akku liefern kann, desto größer und schwerer wird dieser. Das Gewicht muss der Multicopter auch tragen. Für den Strom von 3 A spielt es keine Rolle, wie viele Zellen der Akku hat. Akkus mit der gleichen elektrischen Ladung liefern den gleichen Strom für dieselbe Dauer, nur bei unterschiedlicher Spannung. Der Hexacopter sollte also mit 3 A oder weniger pro Motor zum Schweben gebracht werden. Über Akku-Lösungen mit mehr als 20.000 mAh möchte ich nicht nachdenken.

Abmessungen

Wie Sie wissen, sind große und langsam drehende Propeller effizienter als kleine schnell drehende. Durch den Motorabstand ist die Größe der Propeller beschränkt. Sind diese zu lang, überlappen die Propeller. Bei einem Hexacopter kann die maximale Propellergröße berechnet werden. Wie das geht, sehen Sie in Abbildung 7-1.

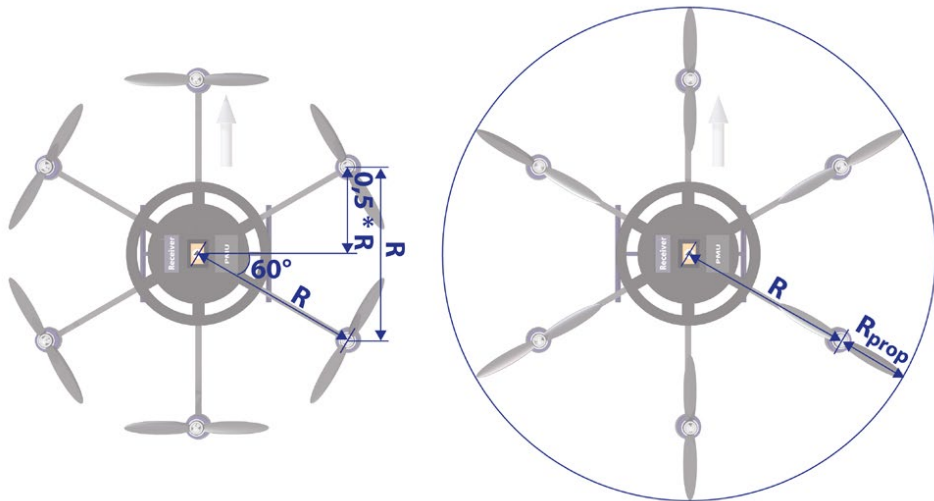


Abb. 7-1 Berechnung der Hexacopter-Maße

Ein Hexacopter, sofern er rotationssymmetrisch ist, besteht geometrisch aus sechs gleichseitigen Dreiecken, die durch die Ausleger gebildet werden. Die Länge der Ausleger vom Mittelpunkt zur Motorachse ist der halbe Motorabstand R . Da das Dreieck gleichseitig ist, ist auch der Abstand zweier nebeneinanderliegender Motoren somit auch R .

Wenn die Propeller sich nicht berühren dürfen, muss ein Propellerblatt von der Propellermitte bis außen weniger als $0,5R$ lang sein. Da Propeller außen mit mehreren Hundert Stundenkilometern rotieren, können Sie sich vielleicht vorstellen, was passiert, wenn zwei gegenläufige Propeller mit jeweils 300 km/h im Abstand von ein paar Millimetern aneinander vorbei rasen. Das würde zu Turbulenzen und Vibrationen oder sogar zur Zerstörung der Propeller führen. Dabei geht zudem Leistung verloren und die Flugzeit wird kürzer.

Da ich kein Flugzeugingenieur bin, bleibt mir nichts anderes übrig, als eine Bauchschätzung zu machen. Ich entscheide mich für mindestens ein Zoll Abstand und runde auf 3 cm auf.

$$\text{Motorabstand}_{\max} < 75 \text{ cm}$$

$$R_{\max} < \frac{\text{Motorabstand}_{\max}}{2} = 37,5 \text{ cm}$$

$$\text{Propellerlänge}_{\max} = R_{\max} - 3 \text{ cm} = 34,5 \text{ cm} \approx 13,58 \text{ ''}$$

Die nächstkleineren passenden Propeller haben 13 Zoll . Der Hexacopter könnte auch noch kleiner werden, wenn kürzere Propeller verwendet werden. Mit 12 '' -Propellern würde der Motorabstand mindestens 67 cm betragen. Bei 11 '' wären es noch 62 cm . Mit R und der Propellerlänge kann auch noch der minimale und maximale Umkreis berechnet werden, wenn dieser benötigt wird.

Antrieb

Damit stehen zwei wichtige Werte fest. Gesucht wird ein Motor, der mit einem 13 '' -Propeller bei maximal 3 A das Abfluggewicht des Hexacopters in der Schwebelage hält. Weniger wäre natürlich besser. Dadurch ist die Auswahl an Komponenten schon deutlich eingeschränkt. Da aber noch kein Gewicht feststeht, ist nicht bestimmbar, welcher Antrieb die Anforderungen für den Multicopter insgesamt erfüllen kann. Ich kann aber die Motordaten der Hersteller durchforschen und prüfen, welche Schübe Motoren mit 3 A und 13 '' -Propellern erzeugen. Wenn ich diese Daten kenne, kann ich berechnen, wie hoch das Abfluggewicht des Multicopters sein darf.

Manche Hersteller führen Leistungsdaten in Tabellen mit verschiedenen Propellern und Spannungen auf. Viele dokumentieren die Leistungsdaten aber nicht gut oder überhaupt nicht. Eine ausführliche Suche kann sich lohnen. Vor allem wenn viel Geld im Spiel ist, sollte ein wenig mehr Zeit dafür investiert werden. Schubmessungen verschiedener Motor-Propeller-Kombinationen finden sich auch in einige Foren. Mit der Schubwaage aus Abschnitt 4.4.6 lässt sich das auch einfach selbst ermitteln. Aber zum Messen müssen Motor und Propeller auch vorliegen.

Da nicht nur Gewicht und Effizienz, sondern auch der Preis wichtig ist, lässt sich die Auswahl schnell auf wenige Motoren eingrenzen. Ich habe mir insgesamt vielleicht 50 Motoren angesehen. Viele davon sind gleich herausgefallen, weil diese zumindest eine Anforderung nicht erfüllt haben. In Tabelle 7–1 sind einige der Kandidaten aufgeführt, die es in die engere Auswahl geschafft haben:

Motor	Akku	Propeller	Schub bei 3 A	Gewicht Einzel	Gewicht Gesamt	Preis Einzel	Preis Gesamt
T-Motor MT3506 KV650	3S	T-Motor 13 x 4,4 CFK	382	70	420	52	312
T-Motor MT3506 KV650	4S	T-Motor 13 x 4,4 CFK	395	70	420	52	312
T-Motor MT2814 KV400	6S	T-Motor 13 x 4,4 CFK	717	121	726	42	252
EMAX MT3506 KV650	3S	13 x 4 APC	370	67	402	38	228
EMAX MT3506 KV650	4S	13 x 4 APC	440	67	402	38	228
RCTIMER HP4215-460KV	6S	13 x 6,5	600	100	600	26	156
RCTIMER HP4215-460KV	5S	13 x 6,5	500	100	600	26	156

Tab. 7–1 Einige Motoren mit Leistungsdaten bei 3 A

Schön wäre es, wenn alle Hersteller die Daten bei 3 A Stromaufnahme angeben würden. Das ist aber meistens nicht der Fall. Oft wird der Schub bei krummen Werten wie beispielsweise bei 1,9 A oder 3,7 A angeben. Wie wird aus diesen krummen Werten der Schub bei 3 A Strom ermittelt?

Hersteller geben oft mehrere Werte mit verschiedenen Schubwerten mit zugehörigen Amperezahlen für einen Propeller an. Gibt es zwei Werte, die den

gesuchten Wert eingrenzen, kann dieser daraus berechnet werden. Finden sich beispielsweise die zwei Werte 1,9 A bei 240 g Schub und 3,5 A bei 440 g Schub, kann der Schub bei 3 A berechnet werden.

Das Ergebnis ist zwar nicht absolut genau, weil der Schub nicht linear steigt. Wenn die bekannten Werte relativ nahe beieinander liegen, ist die Abweichung zum wirklichen Wert aber minimal.

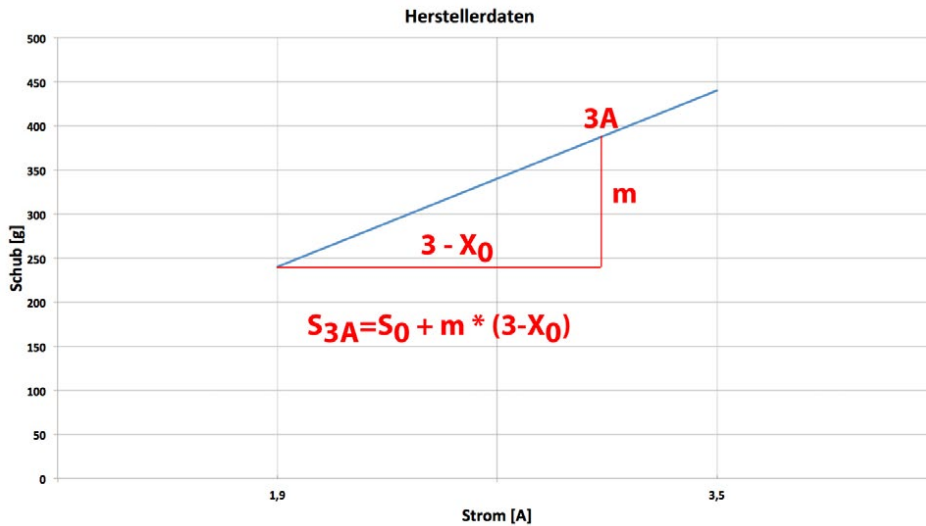


Abb. 7-2 Berechnung des Schubs bei 3 A

In Abbildung 7-2 stellt die blaue Gerade die gedachte Verbindung zwischen den beiden Punkten dar, die vom Hersteller angegeben wurden. Irgendwo dazwischen muss der Schub bei 3 A liegen. Aus dem Diagramm kann dann abgelesen werden, dass der Schub bei etwa 380 g liegt.

Mit der allgemeinen Geradengleichung lässt sich das auch direkt ausrechnen:

$$y = m \cdot x + n$$

Zur Vereinfachung wird der Anfang der Geraden in den Nullpunkt gelegt. So wird die Variable n aus der Gleichung eliminiert. Die Steigung berechnet sich durch:

$$m = \frac{\text{Schub}_2 - \text{Schub}_1}{\text{Strom}_2 - \text{Strom}_1} = \frac{440 - 240}{3,5 - 1,9} = 125 \text{ g / A}$$

Der gesuchte Schub bei 3 A ergibt sich dann folgendermaßen:

$$S_{3A} = 240 \text{ g} + (3A - 1,9A) \cdot \left(\frac{125 \text{ g}}{A} \right) = 377,5 \text{ g}$$

Falls es keine eingrenzenden Werte gibt, kann der gesuchte Wert auch extrapoliert werden. Dazu werden auch mindestens zwei bekannte Werte benötigt. Durch die beiden Werte wird einfach wieder eine Gerade gelegt. Dann wird geprüft, welchen Schub der Punkt bei 3 A darstellt. Auf der Webseite zum Buch finden Sie ein Excel-Dokument, das diese Berechnungen durchführt. Es müssen nur die bekannten Daten und der gesuchte Strom (oder Schub) eingegeben werden.

In der Tabelle 7–1 habe ich auch gleich den Gesamtpreis und das Gesamtgewicht für die sechs Motoren notiert. Damit stehen mir neue Informationen zur Verfügung, die ich in die Planung einbeziehen kann. Mit dem stärksten Antrieb kann ein Hexacopter mit etwa 4,2 kg Abfluggewicht 50 Minuten zum Schweben gebracht werden.

Um eine bessere Vorstellung vom Gesamtgewicht zu bekommen, muss ich die restlichen Komponenten betrachten. Eine Idee von Gewichten verschiedener Komponenten erhalte ich, indem ich mir Daten der Hersteller im Internet besorge. Damit kann ich alle Komponenten einigermaßen einschätzen.

- 6 Geschwindigkeitsregler, 20 g pro Stück: 120 g
- 6 Propeller, 20 g pro Stück: 120 g
- Flugsteuerung mit GPS und UBEC: 100 g
- Rahmenkonstruktion mit Grundplatte: 250 g
- Landegestell: 100 g
- Montagematerial: 50 g
- Empfänger: 10 g
- FPV-Kamera mit Sender: 60 g

Das macht nach Adam Riese 810 g. Motoren und Akkus sind noch nicht enthalten. Machen Sie sich noch keine Gedanken um genaue Gewichte. Das Feintuning kommt noch und spielt hier keine Rolle. Mit den Werten der Motoren aus Tabelle 7–1 erstelle ich eine neue Übersicht, erst einmal inklusive 10.000-mAh-Akku. Die 20.000 mAh sind das Maximum. Wenn möglich, will ich das aber nicht ausreizen, denn solche Akkus sind sehr teuer.

Motor	Akku	Gesamt- schub [g]	Gewicht 6 Motoren	Gewicht Hexacopter ohne Akku	Gewicht Akku 10000 mAh	Ab- flugge- wicht	Schwebe- strom Pro Motor
T-Motor MT3506 KV650	3S	2292	420	1230	710	1940	2,5
T-Motor MT3506 KV650	4S	2370	420	1230	940	2170	2,7
T-Motor MT2814 KV400	6S	4302	726	1536	1377	2913	2,0
EMAX MT3506 KV650	3S	2220	402	1212	710	1922	2,6
EMAX MT3506 KV650	4S	2640	402	1212	940	2152	2,4
RCTIMER HP4215- 460KV	6S	3600	600	1410	1377	2787	2,3
RCTIMER HP4215- 460KV	5S	3000	600	1410	1153	2563	2,5

Tab. 7-2 Erste Annäherung für den Antrieb und resultierende Flugzeiten

Die Akkugewichte habe ich mir alle von einem Anbieter besorgt. Ob in der finalen Version diese auch zum Einsatz kommen, spielt keine Rolle. Sie sind nur wichtig zur Ermittlung eines ungefähren Abfluggewichts.

Der Schwebestrom pro Motor berechnet sich aus den angenommenen 3 A multipliziert mit dem Verhältnis aus Abfluggewicht und Gesamtschub. Das ergibt nun Zahlen, die ich vergleichen kann. Damit werden erste Rückschlüsse auf die Flugdauer möglich. Multipliziert mit 6 ergibt sich der Schwebestrom für einen Hexacopter.

Auffällig sind die 2 A beim T-Motor MT2814 mit 6S-Akku. Der Hexacopter mit 2913 g Abfluggewicht würde mit dem 10.000-mAh-Akku etwa 50 Minuten schweben, wenn der Akku völlig entladen wird. Das ist die beste Kombination im Vergleich. Sie erfüllt aber noch nicht die Anforderungen, denn es sollen 10 % Rest im Akku verbleiben. Die Werte basieren aber auch noch auf zu vielen Schätzungen, als dass diese verlässlich wären. Als Orientierung sind sie aber sehr hilfreich. Ich hätte auch herausfinden können, dass ich nur mit 40.000 mAh bei 6S