

Daniel Bachfeld

Quadrokooper- Know-how

Quadrokooper sind faszinierende Fluggeräte, in denen modernste Technik eingebaut ist. Wir erklären Komponente für Komponente, wie ein Quadrokooper funktioniert und was ihn in der Luft hält.

Wenn man sich als Computerspezialist oder Hobbyelektroniker das erste Mal mit dem faszinierenden Thema Quadrokooper beschäftigt, erkennt man zwar viele dazugehörige Gebiete wieder, die man bereits beherrscht. Trotzdem stößt man auf sehr viele neue Begriffe, Techniken und Zusammenhänge, die man sich erst aneignen muss. Und wie das meist beim Einarbeiten in neue Gebiete so ist, kommt man schnell von Hölzchen auf Stöckchen und verliert sich im Dickicht interessanter, aber oft nicht immer so wichtiger Feinheiten. Wir haben die wichtigsten Informationen zusammengetragen, die zum Verständnis der Funktion aller Komponenten sowie ihres Zusammenspiels wichtig sind und bei der Auswahl für den Eigenbau helfen.

Nach der Lektüre dieses Artikels und des Bauvorschlags sollten Sie in der Lage sein, einen eigenen Quadrokooper fertigzustellen. Das ist jedoch nur der erste Schritt, danach heißt es raus aufs Feld und üben, üben, üben. Denn selbst wenn Quadrokooper sich stabil in der Horizontalen halten können, muss man einiges Geschick aufbringen, um sie auch auf konstanter Höhe

und Position zu halten. Auf diverse Rück- und Einschläge sollte man sich schon mal einstellen. Mit PC-Simulatoren kann man zusätzlich noch auf dem Trockenen üben.

Grundsätzliches

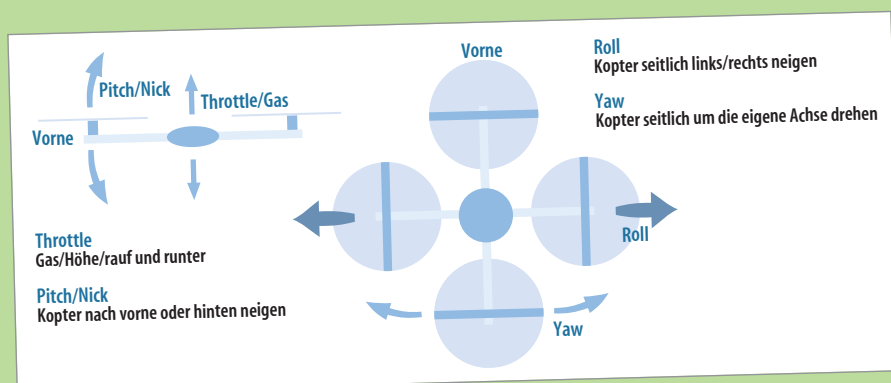
Der Begriff Multikooper bezeichnet einen Hubschrauber mit mehr als einer Luftschraube respektive Propeller. Grundsätzlich gehören auch Kopter mit nur zwei Propellern dazu, in der Praxis zählt man aber eigentlich erst Fluggeräte ab drei dazu. Je mehr Luftschrauben ein Multikooper hat, desto mehr Schubkraft kann er entwickeln und umso mehr Gewicht kann er tragen. Im Folgenden beziehen sich die Erklärungen auf Quadrokooper, also auf vier Antriebe.

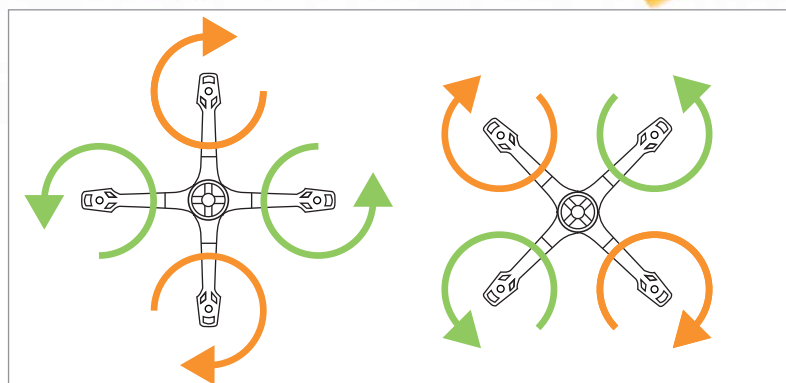
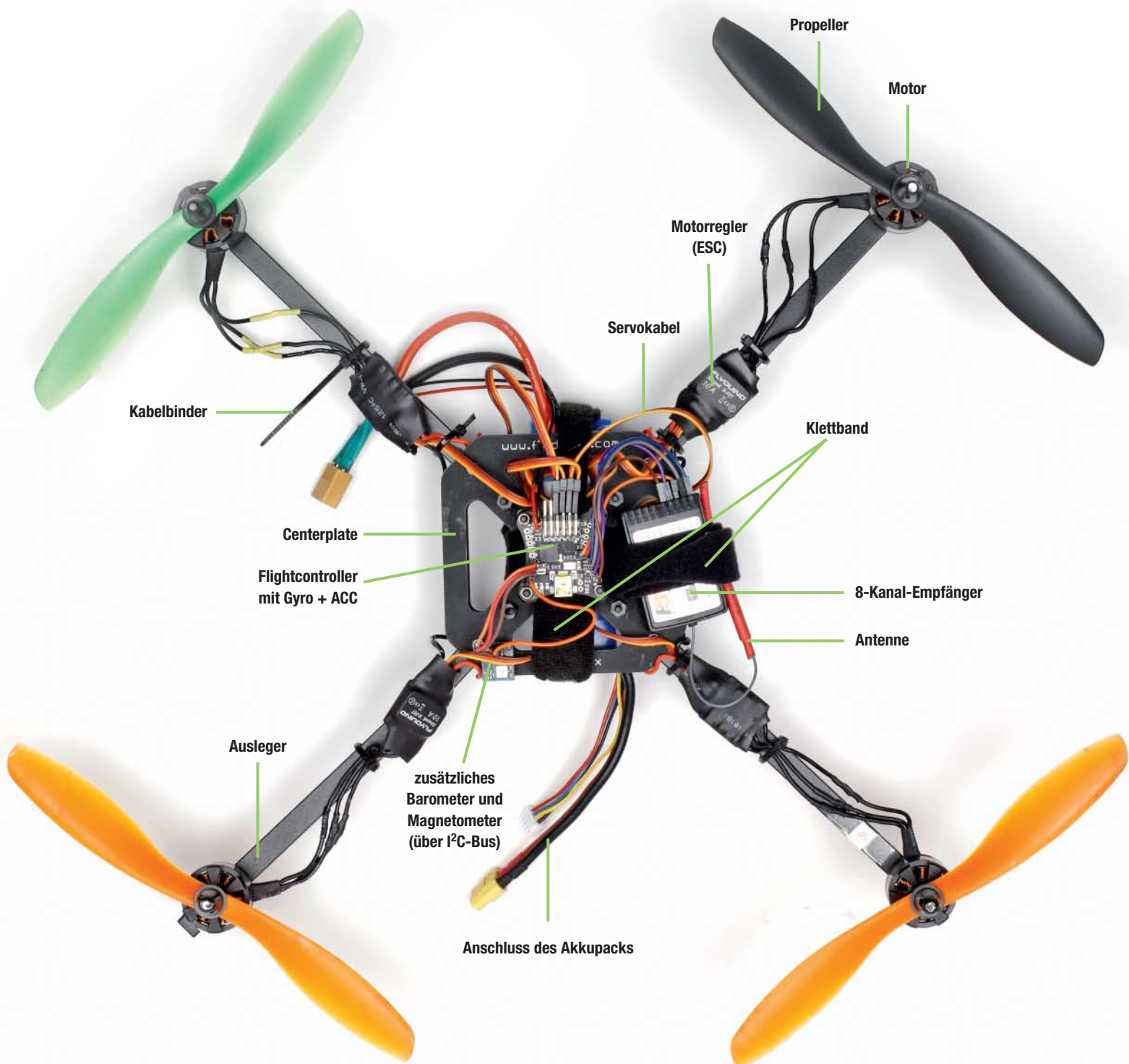
Beim Quadrokooper sind die Motoren immer über Kreuz angeordnet, je nach Drehung kann das ein x oder ein + sein. Manche Quadrokooper haben auch eine H-Form. Handelsübliche Flugregler unterstützen verschiedene Konfigurationen und zumeist auch Antriebszahlen von drei bis acht Motoren.

Da sich beim Quadrokooper je zwei Propeller im Uhrzeigersinn und zwei entgegengesetzt drehen, heben sich praktischerweise die auf das Traggestell übertragenen Drehmomente bei gleicher Drehzahl auf. Anders als beim Helikooper muss kein Heckrotor einer Rotation um die Hochachse (Gierachse, Yaw) entgegenwirken. Soll sich der Quadrokooper doch um seine Hochachse drehen, genügt es, die links- und rechtsdrehenden Propeller mit unterschiedlicher Drehzahl anzusteuern. Damit er dabei nicht an Höhe verliert, darf nicht einfach nur ein Propellerpaar langsamer drehen, sondern eines muss proportional schneller drehen.

Bei der +-Konfiguration muss man für die Drehung um die Längs- (Roll) oder Querachse (Nick/Pitch) nur die Drehzahlen eines Motorenpaars ändern. Eine X- oder H-Konfiguration erfordert immer die Änderungen der Drehzahlen aller Motoren, erlaubt aber höhere Drehbeschleunigungen für Kunstflüge. Bei Drehungen um die Längs- oder Querachse ändert man die Drehzahl der auf der gegenüberliegenden Achse liegenden Motoren. Auch hier muss man das Gieren durch entsprechende Anpassungen aller Drehzahlen verhindern. Soll der Quadrokooper nach vorne fliegen, muss er beispielsweise bei x-Konfiguration die Drehzahlen der beiden hinteren Propeller erhöhen und die der vorderen verringern. Bei +-Konfiguration müsste der Kopter jeweils nur die Drehzahl zweier Motoren ändern.

Die wichtigsten Elemente eines Quadrokoopers sind im Bild auf der gegenüberliegenden Seite zu sehen.





Die Ausrichtung des Quadrokopters lässt sich im Flightcontroller konfigurieren.

Rahmen

Der Aufbau eines Quadrokooper ist im Wesentlichen immer der Gleiche: vier über Kreuz angeordnete Motoren und in der Mitte der Flightcontroller. Daneben platziert man den Fernsteuerempfänger und darunter den Akku. In der Regel konstruiert man das Kreuz über eine sogenannte Centerplate, an die vier Ausleger montiert sind. Je kürzer die Ausleger, desto sportlicher fliegt sich der Kopter. Längere Ausleger verringern die Wendigkeit, erhöhen jedoch die Flugstabilität. Bevor man sich für einen Rahmen entscheidet, sollte man überlegen, ob man eher Kunststücke mit dem Gerät fliegen oder ihn als Schwebplattform für Kameraflüge einsetzen will. Quadrokooper für Kunstflüge in Hallen haben etwa 20 Zentimeter Spannweite, große Kamerakopter beispielsweise 80 Zentimeter. Für Anfänger sollte die Spannweite zwischen 40 und 60 Zentimeter liegen.

Die Anforderungen an den Rahmen sind ähnlich wie im Flugzeugbau: Leicht, verwindungssteif und leicht zu bearbeiten soll er sein. Auf der anderen Seite sollte er günstig sein, um bei Crashes nicht jedes Mal teure Ersatzteile kaufen zu müssen. Zur Wahl stehen etwa Ausleger aus kohlenfaserverstärktem Kunststoff (CFK) oder aus Alu-Vierkantrohr. Alu-Vierkantrohre (10 bis

15 mm, 1 mm Dicke) haben den Vorteil, dass man sie im Baumarkt kaufen und recht einfach selbst bearbeiten kann. Dafür halten sie nicht so lange wie solche aus CFK. Holz hingegen ist eher ungeeignet. Rahmen aus normalem Kunststoff lassen sich nur dann einsetzen, wenn sie zur Stabilitätserhöhung zahlreiche Verstrebungen aufweisen. Nur dann biegen und verwinden sie sich unter den Belastungen nicht.

Die Centerplate muss extrem stabil sein, da sie die vier Ausleger tragen muss. Die Hebelkräfte können dabei sehr groß werden. Als Material ist deshalb ebenfalls CFK oder glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) zu empfehlen. Die Centerplate muss zudem Montagemöglichkeiten für die Elektronik bieten. Praktischerweise sollte eine Centerplate gleich noch Leitungen für die Stromverteilung zu den Motoren mitbringen. Der Rahmen von Warthox bietet beispielsweise diese Möglichkeit, sodass man sich eine separate Stromverteilung sparen kann.



Mit den anklemmbaren Motoren von „Drone it yourself“ kann man jedes Objekt als Frame benutzen.

Wo man die Motoren montiert, ist ebenfalls eine Überlegung wert. Sind sie am äußersten Ende der Ausleger montiert, müssen sie einen möglichen Absturz abfangen. Sind sie vom Ende zur Mitte gerückt, liegt je nach Aufprallwinkel die Wahrscheinlichkeit höher, dass nur der Rahmen statt der teuren Motoren getroffen wird.

Besitzer eines 3D-Druckers können auf diverse Modelle auf Thingiverse zurückgreifen und sich den Rahmen daheim ausdrucken. Das Projekt „Drone it yourself“ bietet 3D-Modelle von Motorhalterungen an, die wie die Klemmen von Schreibtischlampen aussehen. Damit lassen sich die Motoren im Prinzip an jedes beliebige Objekt klemmen, das dann als Frame fungiert, beispielsweise das Laufrad eines Fahrrads, ein Schwimmbrett oder eine Tastatur.

Damit der Frame bei Start und Landung nicht auf dem Boden rumkratzt, stattet man ihn mit Landefüßen aus. Je näher diese an der Mitte stehen, desto leichter kippt der Kopter bei nicht so sachten Landungen um. Anfänger sollten deshalb die Füße so weit wie möglich von der Mitte montieren, sofern das möglich ist. Statt Landefüße haben wir Isolierrohre aus dem Baumarkt mit Kabelbindern unter den Auslegern befestigt. Die elastischen Rohre konnten zumindest leichte Bruchlandungen gut abfedern.

Vier einzelne Ausleger und Centerplates mit Stromverteiler (oben) ergeben einen Frame für Quadrokooper.



Flightcontroller

Wichtigstes Element eines Kopters ist der Flightcontroller. Er liest die Sensoren aus und nimmt die Befehle der Fernsteuerung entgegen. Aus allen Daten berechnet er die erforderlichen Drehgeschwindigkeiten der Motoren und gibt sie an die ESCs (siehe Seite 48) weiter. Daraus ergibt sich eine neue Lage, die wiederum eine Anpassung der Drehgeschwindigkeiten erfordert. Das ständige Nachführen der Ist-Lage an die Soll-Lage erfolgt über einen Regelkreis, genauer einen PID-Regler. P, I und D stehen für die einzelnen Glieder, mit denen der Regler versucht, die Abweichung von Soll und Ist möglichst schnell zu korrigieren.

Die große Kunst ist es, die richtigen PID-Parameter für die Regelstrecke eines Quadropters von den ESCs, über die Motoren bis zu den Gyro- und Beschleunigungssensoren zu finden. Die Werte kann man zwar bei Kenntnis aller technischen Daten vorher berechnen, in der Praxis arbeitet man sich aber eher durch Ausprobieren verschiedener Wertekombinationen an die richtigen Koeffizienten heran.

Der PID-Regler ist als ein in Software implementierter Algorithmus umgesetzt, den ein Mikrocontroller abarbeitet. Auf handelsüblichen Flightcontrollern kommt dafür meist ein AVR oder ein ARM zum Einsatz, dem Sensoren, Spannungsregler sowie Servo-Ausgänge und Fernsteuereingänge zur Seite stehen. Mit Luftdrucksensoren (Barometer) auf der Controller-Platine kann ein Kopter in gewissen Grenzen sogar die Flughöhe selbst einhalten. In Kombination mit GPS sind die Flightcontroller sogar in der Lage, per Autopilot selbstständig Wegpunkte abzufliegen.

Auf dem Markt sind fertige Lösungen erhältlich, die man einfach in seinen Kopter einbaut und verkabelt. Die asiatischen Hersteller DJI und Gaii bieten beispielsweise Module im Anfängerbereich zwischen 200

Aus China bekommt man günstige Controller für MultiWii, auf denen bereits alle wichtigen Sensoren sowie Anschlüsse zur Steuerung einer externen Kamera vorhanden sind.

(GU-344) und 250 (Naza V2) Euro an. Das rund 400 Euro teure Naza-M bringt bereits einen GPS-Empfänger mit und unterstützt Funktionen wie Return to Home (RTH) bei Abbruch der Verbindung zur Fernsteuerung und Position Hold für Luftaufnahmen.

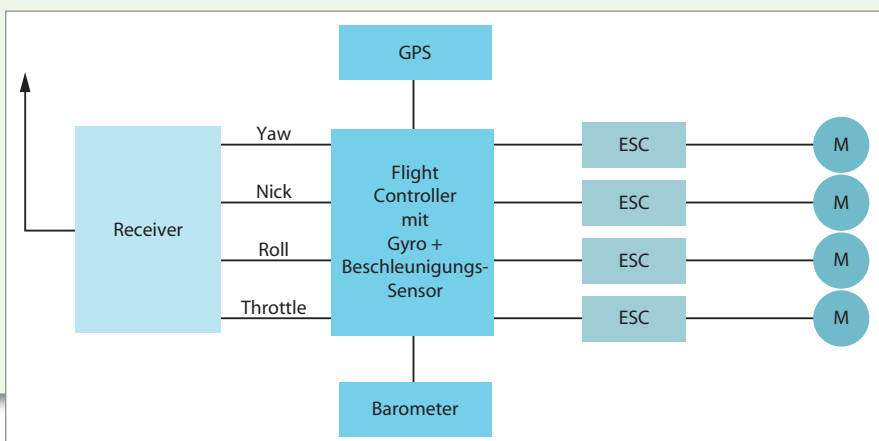
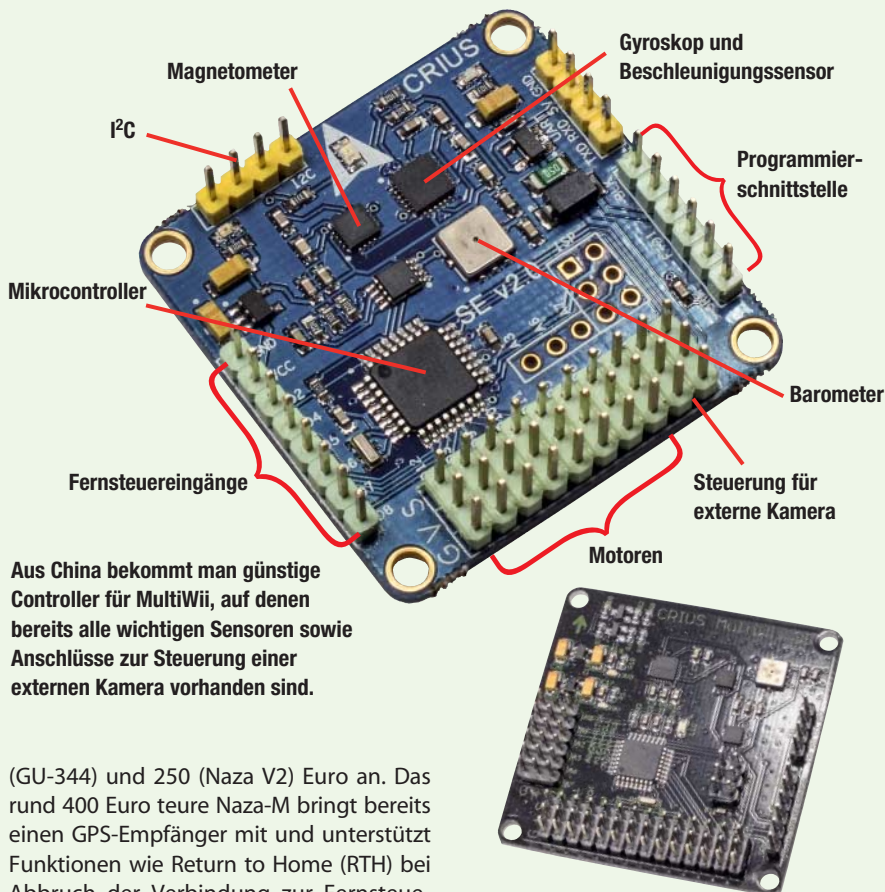
Daneben gibt es eine Vielzahl an Open-Source-Lösungen, bei denen die Software grundsätzlich frei ist, die dazugehörige Hardware aber mitunter Closed Source ist. Populär sind etwa das ArduCopter-Projekt, das neben Vorschlägen für Rahmen und Motoren aus der gleichnamigen Software und der ArduPilot-Mega-Hardware besteht. Wie der Name vermuten lässt, beruht das Projekt auf Arduino und hat als Kern einen Arduino Mega mit zahlreichen Sensoren. Mit Preisen ab 180 Euro für das fertig bestückte Board gehört die Lösung allerdings nicht gerade zu den preisgünstigen.

Ebenfalls auf der Grundlage von Arduino steht das MultiWii-Projekt, das nur Soft-

ware zur Verfügung stellt. Ursprünglich entstand es aus der Verknüpfung eines Arduino Pro Mini mit dem Gyroskopsensor aus der günstigen Wii Motion Plus (WMP) – elektronische Gyroskopsensoren waren im Elektronikhandel früher sehr teuer. Mittlerweile läuft die Software auf diversen fertigen Mikrocontroller-Plattformen, die extra für MultiWii konstruiert wurden und relativ günstig sind, beispielsweise NanoWii und Crius für jeweils rund 40 Euro – da lohnt das Selberbauen nicht mehr. Daneben gibt es leistungsfähigere Lösungen, wie OpenPilot und AutoQuad, die etwa auf ARM-Controllerboards mit STM32F4 setzen.

Für welchen Flightcontroller man sich entscheidet, hängt letztlich von der Sensorausstattung, der weiteren Ausbaufähigkeit und dem eigenen Bastelaufwand ab. Weitere Projekte haben wir unter dem Softlink zusammengefasst.

Der Flightcontroller berechnet aus allen anfallenden Steuer- und Lageinformationen die Drehzahlen der Motoren und gibt sie an die Motorregler weiter.



Brushless-Motoren

Bei billigen Kopter-Modellen sorgen Gleichstrommotoren für den Antrieb der Propeller. In ihnen sind eine oder mehrere Spulen um einen Rotor respektive Anker gewickelt, die bei Stromdurchfluss ein Magnetfeld erzeugen. Ein den Anker umgebender Stator hält einen oder mehrere Permanentmagnete, in dessen Felder sich der Rotor durch das Magnetfeld der Spulen dreht. Die Spulen sind mit dem sogenannten Kommutator verbunden, auf den Schleifbürsten den Strom übertragen. Durch die Drehung des Kommutators mit dem Rotor wechselt zwangsläufig auch die Polung der Ankerwicklungen, sodass immer die Wicklungen von Strom durchflossen werden, die sich quer zum Statorfeld bewegen. Damit ergibt sich eine kontinuierliche Drehung des Rotors. Die Ansteuerung von Gleichstrommotoren mit Bürsten ist unkompliziert, allerdings unterliegen die Bürsten dem Verschleiß. Zudem führt die Drehung des Kommutators unter den Bürsten zum sogenannten Funkenflug, der sich als hochfrequente Störung bemerkbar macht.

Bürstenlose Motoren (auch Brushless DC-Motor, BLDC) sind leise, wartungsarm

und kraftvoll. Ursprünglich wurden sie in der Computertechnik als Antriebe für Festplatten, Floppy-Laufwerke, Lüfter und CD-ROMs eingesetzt. Seit einigen Jahren setzt man sie auch im Modellbau ein. Ihr Aufbau und ihre Ansteuerung ist erheblich komplexer als bei normalen Gleichstrommotoren. Zwar sind die elektromagnetischen Grundlagen ähnlich, allerdings sitzen beim BLDC die Permanentmagneten auf dem Rotor und der Stator besteht aus mindestens drei Spulen. Bei Quadrokoptern setzt man in der Regel sogenannte Außenläufer ein, bei der sich eine Glocke mit innenliegenden Magneten außen um den Stator dreht. Daneben gibt es noch Innenläufer, bei denen sich der Rotor im Stator dreht.

In dem man die Spulen nacheinander mit einer Phasenverschiebung von 120 Grad ansteuert, dreht sich der Rotor kontinuierlich im Feld. Da diese Ansteuerung eine elektronische Schaltung übernimmt, nennt man diese Ansteuerung auch „elektronische Kommutierung“. Für eine optimale Ansteuerung der Phasen ist es wichtig, die aktuelle Rotorposition zu kennen. Diese kann man über Hall-Sensoren mes-

sen oder durch die elektromagnetische Kraft (EMK). Motoren sind nämlich immer Antrieb und Generator zugleich, das heißt, durch die Drehung induziert das äußere Magnetfeld einen Strom in den Spulen. Das hat zwei Effekte: Zum einen setzt es den Strom in den kommutierten Spulen herab, zudem kann man die Spannung in den nicht kommutierten Spulen messen. Letzteres ermöglicht über einen Analog-Digital-Wandler die Ermittlung der Position des Rotors.

Die Höhe der EMK wird durch eine der wichtigsten Kenngrößen bürstenloser Motoren vorgegeben: Die elektromotorische oder Generatorspannungskonstante K_e in der Ein-

Bei Quadrokoptern kommen in der Regel Außenläufer zum Einsatz, die Glocke mit den Magneten ist der Rotor. Der Rotor hat zwölf Pole und der Stator zwölf Nuten.

heit Newtonmeter pro Ampere beziehungsweise Voltsekunden. Aus ihr berechnet sich neben der Gegenspannung auch das Drehmoment des Motors, das in einem verlustfreien Motor proportional zum Strom ist. Der Kehrwert von K_e ist die von den Motorherstellern angegebene Konstante K_v – dort allerdings in der Einheit Umdrehungen pro Minute pro Volt. Ein Motor mit beispielsweise einem K_v -Wert von 1100 kann mit einer Spannung von 11,1 Volt theoretisch 12 210 Umdrehungen pro Minute erreichen. Dann heben sich Motorstrom und Gegenstrom auf und das Drehmoment wird 0.

Andersherum ist das Drehmoment dann am höchsten, wenn ein Motor losläuft und noch keine Gegenspannung induziert wird. Dann ist auch der Strom am höchsten, weil er nur durch den ohmschen Anteil der Spulen begrenzt wird. Durch unterschiedliche Polzahlen (Zahl der Magnete), Nut-Zahlen (Slots) und Anzahl der Wicklungen auf den Nuten lassen sich maximales Drehmoment und Drehzahl der Motoren variieren. Viele Magnete ergeben ein höheres Drehmoment, allerdings auch eine niedrigere Drehzahl. Die Anzahl der Nuten muss durch drei teilbar sein. Die Anzahl der Pole muss immer gerade sein. Das Verhältnis von Polen zu Nuten bestimmt, wie schnell sich der Rotor im Verhältnis zum elektrischen Drehfeld dreht.

Die Drehzahl eines Motors ergibt sich jedoch nicht einfach durch die abwechselnde Kommutierung der Phasen. Aufgrund der Differenz von angelegter Spannung und Gegenspannung entsteht ein Strom, der dem „abgegebenen“ Drehmoment entspricht. Die Ansteuerspannung wird über ein pulsweitenmoduliertes Signal (PWM) erzeugt, die abhängig vom Tastverhältnis in ihrer Höhe in den Spulen variiert. Diese relativ komplexe Ansteuerung der Motoren übernimmt der Electronic Speed Controller (ESC).

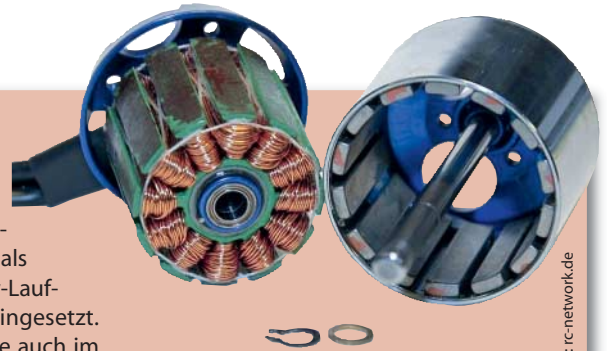
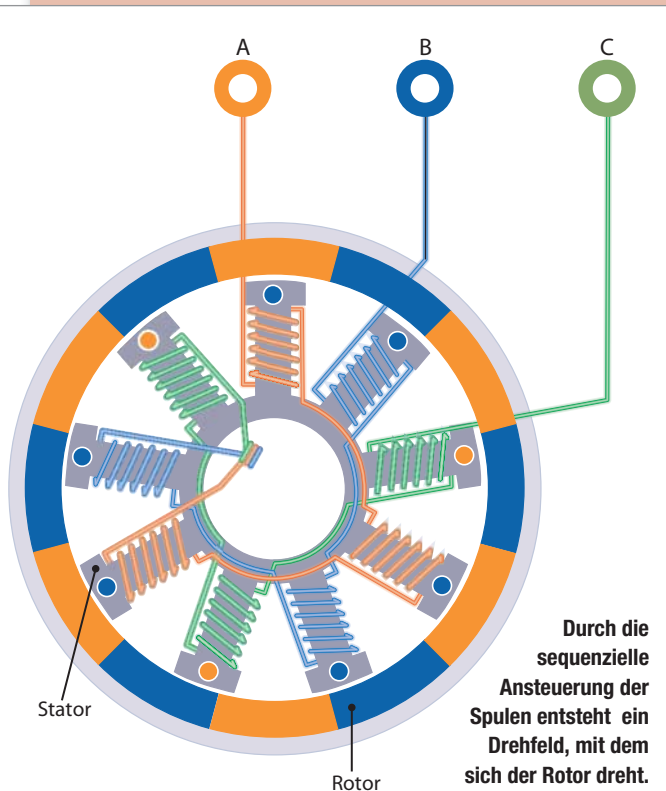


Bild: rc-network.de



Propeller

Ohne Propeller, auch Luftschraube genannt, hebt kein Kopter ab. Allerdings kann man nicht einfach einen beliebigen Propeller auf den Motor schrauben – beide müssen zueinander passen. Der Propeller muss in der Lage sein, die Leistung des Motors aufzunehmen und in Schub umzusetzen. Ein großer Propeller erfordert mehr Leistung des Motors, benötigt aber weniger Umdrehungen, um Schubkraft zu entwickeln. Zu große Propeller können den Motor und den ESC jedoch überlasten. Kleine Propeller drehen schneller, sind aber unter Umständen zu ineffizient und liefern zu wenig Schubkraft auf unpassenden Motoren.

Daneben ist aber nicht nur der Durchmesser des Propellers entscheidend, auch die Steigung der Luftschraube hat einen Einfluss. Eine große Steigung schiebt bei gleichem Durchmesser mehr Luft durch, als eine kleine Steigung. Eine Steigung von 4,5 Zoll würde bei einer vollständigen Umdrehung theoretisch zu 4,5 Zoll (114 Millimeter) Vor- oder Auftrieb führen. Je größer die Steigung im Verhältnis zum Durchmesser, desto schneller die Strahlgeschwindigkeit. Allerdings führt ein zu hohes Verhältnis wiederum zu einer schwierigeren Lagerung. In der Regel wählt man Verhältnisse von 1:2 bis 1:3.

Die Motorhersteller geben oftmals für ihre Motor geeignete Propeller-Kombinationen an, an deren Eckdaten man sich gut orientieren kann – selbst wenn die Daten oft geschönt sind. Für einen Außenläufer gibt der Hersteller Turnigy beispielsweise für eine Spannung von 11,1 Volt folgende Werte an:

Propeller	Strom	Schub
9 × 5	8,6 A	650 g
10 × 4,7	11,5 A	860 g
11 × 4,7	19,5 A	1140 g

Damit lässt sich auch grob überschlagen, wie viel Zulast der Kopter mitführen kann.

Die Leistungsfähigkeit der Propeller hängt auch vom Material ab, aus dem sie gefertigt sind. Günstige sind aus Plastik und empfehlen sich insbesondere für Anfänger, die noch den einen oder anderen Crash verkraften müssen. Teurere Propeller etwa aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) nehmen mit sogenannten Prop-Savern weniger Schaden. Dabei sind



Beim Quadrokopter kommen sowohl linksdrehende (orange) als auch rechtsdrehende (schwarz) Propeller zum Einsatz. Die Ringe in der Mitte sind Adapter für verschieden große Motorwellen.

die Propeller nicht auf den Motorwellen verschraubt, sondern werden von einem Gummi gehalten. Bei einem Crash löst es sich, sodass die Luftschraube frei drehen kann.

In der Regel liegen einem Motor aber nur der Propellermitnehmer und ein Spinner bei. Der Propellermitnehmer kommt auf die Welle des Motors und nimmt den Propeller auf. Zur Befestigung des Propellers dient der Spinner. Oftmals nehmen Bastler auch normale Schrauben – Spinner sehen aber einfach schicker aus.

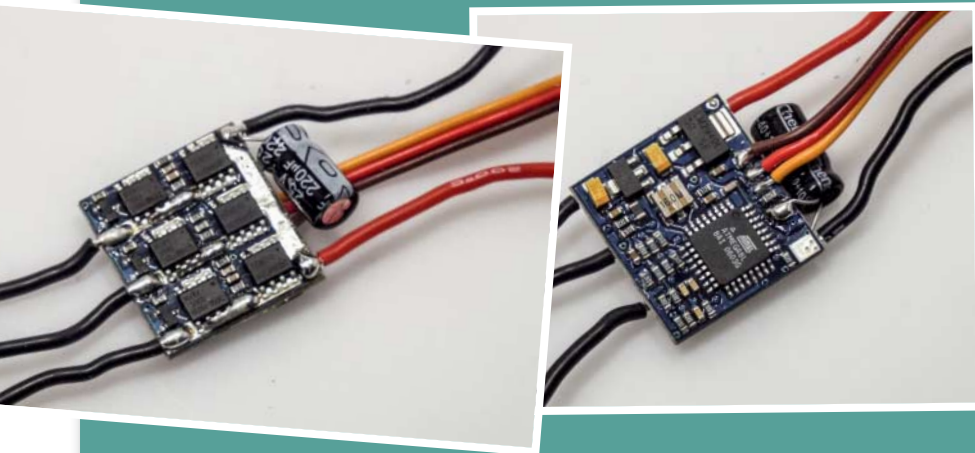
Bei einem Quadrokopter benötigt man je zwei links- (Counterclockwise, CCW) und rechtsdrehende (Clockwise, CW) Propeller. Ein Auswuchten der meist per Spritzguss hergestellten Kunststoffpropeller verringert Vibrationen, was zum einen die Lagesensoren weniger stört und bei Kameraflügen das Bildzittern verringert. Für erste Flugversuche kann man sich jedoch meist das Auswuchten sparen. Nur, wenn extreme Schwingungen an den Auslegern des Rahmens zu beobachten sind, sollte man korrigieren. Welches die schwerere Propellerseite ist, findet man

mit einer sogenannten Propellerwaage heraus, die man im Internet schon ab 20 Euro bekommt. Hat man die schwerere Propellerseite gefunden, schabt man entweder auf dieser Seite etwas Material ab oder klebt auf die leichtere Seite Klebestreifen auf.



Mit der Propellerwaage ermittelt man die Unwucht seiner Propeller.

Electronic Speed Controller (ESC)



In den meisten ESCs stecken ein Atmel-Controller und sechs oder mehr MOS-FETs. Durch Kontaktieren der richtigen Flash-Pins kann man nachträglich modifizierte Firmware aufspielen, etwa die SimonK-Firmware.

Die ESCs übernehmen die Ansteuerung der Phasen, die Messung der Gegenspannung zur Bestimmung der Rotorposition sowie den Abgleich mit der extern vorgegebenen Geschwindigkeitsreferenz. Moderne ESCs steuern je eine Phase über zwei Leistungstransistoren (MOSFET), die zu einer sogenannten Halbbrücke geschaltet sind. Insgesamt reichen bei geringer Stromlast, beispielsweise bis 10 Ampere, sechs FETs aus. Bei höheren Lasten schaltet man FETs parallel. Grundsätzlich muss der Regler zum Motor passen und für dessen maximalen Strom ausgelegt sein. Daneben muss der Controller auch für die maximale Akkuspannung geeignet sein – ein ESC für 11,1 Volt brennt an 14,8 Volt womöglich ab.

Die Ansteuerung der FETs übernimmt in der Regel ein Mikrocontroller, oft ein AVR-Controller von Atmel. Der hat den Vorteil, dass er bereits Analog-Digital-Wandler enthält, mit denen er die durch einen Tiefpass gefilterte induzierte Spannung der EMK messen kann. Denn für eine optimale Ansteuerung muss das im Stator erzeugte Magnetfeld den Polen des Stators vorausseilen.

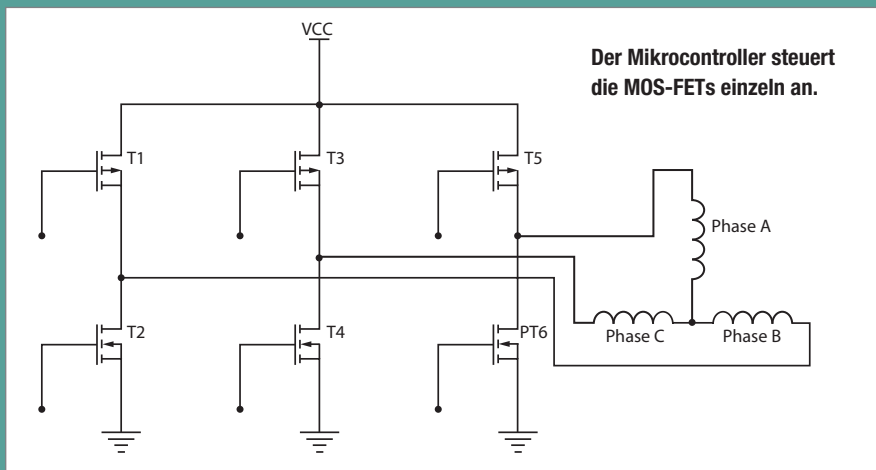
Um die am Motor angelegte Spannung variieren zu können, werden die FETs via PWM angesteuert, womit sich je nach Verhältnis von High zu Low eine Spannung am Motor zwischen 0 Volt und der maximalen Akkuspannung einstellt. Die Referenzgeschwindigkeit der Motoren gibt der

Flightcontroller dem ESC vor. Bei normalen Servo-Kanälen wird das Servo-Signal alle 20 Millisekunden (50 Hz) aktualisiert. Das ist für einen Quadrokooper jedoch zu langsam.

Flightcontroller mit der MultiWii-Software und ArduCopter etwa arbeiten mit 490 Hz. Die ESCs müssen diese höheren Update-Frequenzen unterstützen, was bei modernen ESCs der Fall sein sollte. Je nach Bauart kann man in die ESCs eine neue Firmware flashen. Bekannt ist etwa die Open-Source-Firmware SimonK für AVR-Controller. Sie sorgt neben einer höheren Update-Frequenz auch für eine feinere Regelung der Geschwindigkeit der Motoren und ist für den Einsatz in Multikoptern optimiert.

Neben dem Flashen neuer Firmware mit einem dedizierten Programmer lassen sich die meisten Controller über die Fernsteuerung konfigurieren. So kann man je nach Modell das Timing der Motoransteuerung, Langsamanlauf, Motorbremsen, Fail-Safe-Modes und andere Parameter einstellen. Indem man beim Zuschalten der Akkuspannung an den ESC auf der Fernsteuerung den Gasknüppel ganz oben hält, gelangt man in diesen Mode. Der ESC signalisiert seine aktuellen Einstellungen über bestimmte Piep-Sequenzen. Statt eines Buzzers oder Lautsprechers nutzt der Regler dafür die Spulen des Motors, die er in hörbare Schwingungen versetzt. Die genaue Bedeutung der Beeps ist den jeweiligen Bedienungsanleitungen zu entnehmen. Auf diesem Weg muss man bei manchen Reglern auch den Gasweg der Fernbedienung „anlernen“, damit die Regler sich auf die minimalen und maximalen Werte einstellen können. Einige Regler passen sich allerdings auch automatisch daran an.

Viele ESCs enthalten als Besonderheit noch einen sogenannten Batterie Eliminator Circuit (BEC), der den Flightcontroller mit einer Spannung von 5 Volt versorgen kann. Damit spart man sich einen separaten Spannungswandler. Die meisten Flightcontroller sind für diese Art der Spannungsversorgung über den eigentlich als Ausgang gedachten Servo-Port vorbereitet. Allerdings sollte man dann darauf achten, eventuell vorhandene Jumper richtig zu setzen und nur einen ESC die Versorgung übernehmen zu lassen. Bei den Kabeln für die anderen ESCs muss man die 5-Volt-Leitung abklemmen.



Lageregelung

Anders als etwa bei Modellbauflugzeugen gibt es bei Quadroptern keine Eigenstabilität, also die Eigenschaft, eine stabile Fluglage von selbst einzunehmen. Bei Quadroptern ist eigentlich immer ein manueller oder automatischer Eingriff notwendig. Zur Stabilisierung des Fluges nutzt man verschiedene Sensoren, im einfachsten Fall nur Drehratensensoren, auch als Gyroskope bekannt.

Sie liefern Informationen über eine Winkeländerung um eine Achse pro Sekunde. Die Sensordaten sind immer auf eine Zeit und immer relativ auf den vorhergehenden Winkel bezogen. Abhängig von der Auslenkung der Sticks auf einer Fernbedienung wird dann der Kopter in der jeweiligen Achse um einen Winkel in einer bestimmten Zeit gedreht. In der Praxis nutzen Quadropterpiloten diese Konfiguration für den sogenannten Acrobat-Mode, kurz Acro-Mode, in der sie Kunststückchen in atemberaubender Geschwindigkeit fliegen. Um eine Drehung zu stoppen, muss man den Stick in die Gegenrichtung auslenken, andernfalls würde der Kopter einfach immer weiter um die Achse drehen.

Zur Lagestabilisierung, also dem Schwebestand in der Horizontalen, könnte man theoretisch eine Startposition kalibrieren und alle Winkeländerungen integrieren, um etwa den Winkel zur Horizontalen

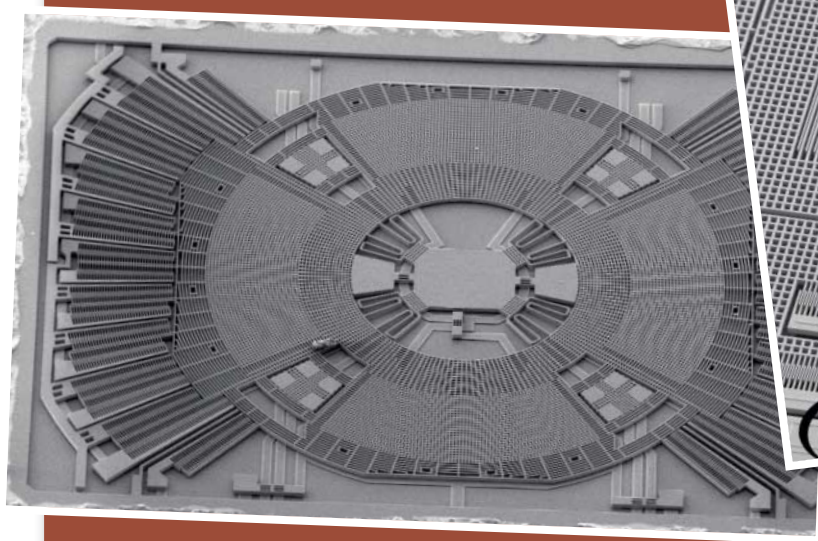
zu bestimmen. Leider driften die Werte vieler Gyrosensoren über die Zeit, sodass auch ohne Winkeländerungen eine Drehrate ausgegeben wird. Somit lässt sich mit einem Gyro allein kein stabiler Schwebestand halten. Aus diesem Grund nimmt man Beschleunigungsmesser hinzu. Anhand der Erdbeschleunigung lassen sich aus ihren Daten die Winkel des Kopters zur Erdoberfläche berechnen.

Das würde im Prinzip für die Lagestabilisierung einer Schwebepattform allein ausreichen. Allerdings können Beschleunigungssensoren Winkel nur dann gut messen, wenn sich das System mehr oder minder in Ruhe befindet. Schnellen Änderungen von Drehwinkeln kann der Sensor nicht folgen. Zudem kann er Beschleunigungen durch den Flug selbst nicht von der Erdbeschleunigung trennen. Deshalb kombiniert man die Gyro- und Beschleunigungsdaten, um Fehler zu minimieren; man nennt das auch Sensorfusion. In diesem Zusammenhang benutzt man verschiedene Filteralgorithmen, um Ausreißer in den Messungen zu eliminieren. In der Regel kommen dafür sogenannte (Extended) Kalman-, Madgwick oder Komplementär-Filter zum Einsatz.

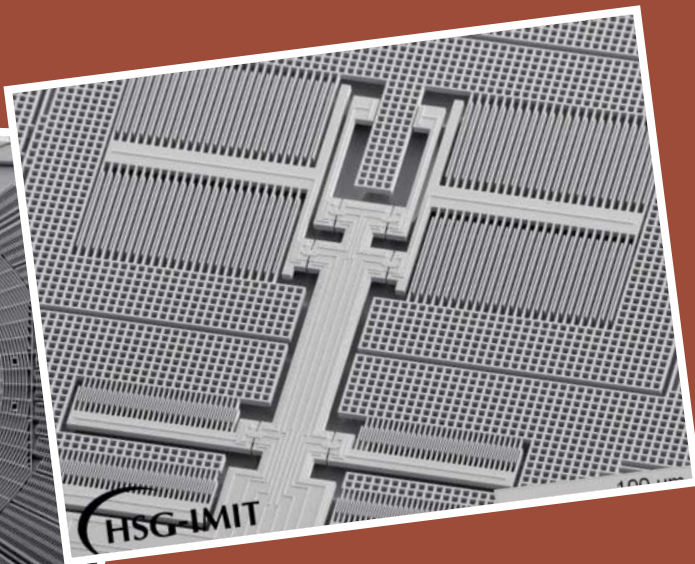
Das Ergebnis dieser Fusion führt man zusammen mit den Daten der Fernsteuerung einer Regelung zu, die wiederum die

einzelnen Motoren steuert. Je nach Umsetzung wird das Fliegen in diesem Mode ACC-, Level- oder Stable-Mode genannt. Oftmals wird der Mode erst während des Fluges aktiviert, um etwa mit einer montierten Kamera Aufnahmen zu machen.

Auf vielen Plattformen fügt man zur weiteren Verbesserung und zur Drift-Kompensation noch die Daten eines Magnetometers zur Regelung hinzu, der das Erdmagnetfeld in drei Achsen misst. Damit erhält man insgesamt 9 Freiheitsgrade – und automatisch eine Kompassfunktion. Die Kombination mehrerer (Inertial)-Sensoren nennt man auch inertielle Messeinheit (englisch Inertial Measurement Unit, IMU) die sich nicht nur zur Lageregelung, sondern auch zur inertialen Navigation (INS) respektive Trägheitsnavigation einsetzen lässt. Durch die ständige Überwachung der drei rotatorischen und drei translatorischen Freiheitsgrade kann man auch die Bahn und somit den bisherigen Weg berechnen. Bevor es GPS zur Positionsbestimmung gab, nutzten etwa Flugzeuge und Raketen diese Technik zur Positionsermittlung und zur Navigation.



Ein Drehratensensor in MEMS-Technik, allerdings nur in einer Ebene.



Die Kapazität ist bei diesem MEMS-Sensor ein Maß für den Abstand der Elektroden, aus der sich die Beschleunigung ableiten lässt.

Akku

Die Stromversorgung von Quadrokooper-Modellen übernehmen heutzutage fast ausschließlich Lithium-Polymer-Akkumulatoren (LiPo), da sie ein gutes Verhältnis von Energie und Gewicht aufweisen. Eine Zelle hat eine Leerlaufspannung von 3,7 Volt, durch Reihenschaltung erhöht man die Spannung eines Akku-Packs. Ein Akku mit drei Zellen in Serie ist mit der Angabe 3S gekennzeichnet und hat eine Spannung von 11,1 Volt. Analog dazu bedeuten 2S 7,4 Volt und 4S 14,8 Volt. Die Kapazität des Akkus ist in Amperestunden angegeben, bei 2200 mAh kann der Akku im vereinfachten Fall eine Stunde lang 2,2 A liefern. Wie lange der eigene Quadrokooper damit in der Luft bleiben kann, hängt von vielen Faktoren und der Flugart ab und lässt sich beispielsweise über den Online-Rechner <http://ecalc.ch/xcopercalc.htm> näherungsweise berechnen. Mit dem genannten Akku kann man ein 500 Gramm schweres Modell sehr grob gerechnet sieben Minuten fliegen und 20 Minuten schweben lassen.

Daneben ist noch die maximale Stromstärke angegeben, mit denen ein Akku belastet werden darf: 25C bedeuten, dass er das 25-Fache der Kapazität verträgt. Bei 2,2 Ah dürfen maximale 55 Ampere fließen. Bei einer Konfiguration von vier Motoren, deren Regler jeweils maximal 10 Ampere ziehen, reicht solch ein Akku aus. Allerdings sollte man die Angaben der Hersteller immer kritisch betrachten. Insbesondere bei Akku-Packs asiatischer Herkunft sind die Angaben oft geschönt, sodass ein Produkt schon mal viel früher dicke Backen

macht. Das kann man durchaus wörtlich nehmen. Bei zu hoher Belastung blähen sich Akkus auf. In der Regel schwellen sie nach einigen Stunden aber wieder ab.

LiPo-Akkus sind empfindlich gegen Tiefentladungen, allerdings gibt es keine exakten Grenzwerte. Als Faustformel gilt: ab 3,2 Volt wird ein Schaden wahrscheinlich, unter 3,0 ist er gewiss. Um den Piloten vor drohender Tiefentladung zu warnen, haben einige Flightcontroller ein eigenes Warnsystem und piepen beispielsweise. Nachrüstbare LiPo-Warner können diese Aufgabe ebenfalls übernehmen.

Zum Laden eines (normal entladenen) LiPos benötigt man ein Ladegerät mit sogenanntem Balancer-Anschluss. Brauchbare digitale Modelle gibt es ab 30 Euro, etwa das unter diversen Marken angebotene Modell B6AC (IMAX et al). Es sorgt dafür, dass beim Aufladen der in Reihe geschalteten Zellen alle die gleiche Spannung haben. Andernfalls kann es zur Überlastung einer Zelle kommen, was zu einer kürzeren Lebensdauer führt. Die Ladeendspannung liegt pro Zelle bei knapp über 4,2 V.



Der Akku hat ein dickes Kabel zum Laden und Entladen, die dünnen Strippen sind die Balancer-Kabel zum Ausgleich abweichender Zellenspannungen.

Beim Kauf von Akku und Ladegerät sollte man unbedingt darauf achten, dass Stecker und Buchsen zueinander passen. Deutsche Akku-Hersteller verbauen für die Balancer-Anschlüsse andere Stecker (EH) als asiatische (XH). Falls der Akku nicht zum Ladegerät passt, kann ein Balancer-Adapter Abhilfe schaffen.

Analog zum maximalen Entladestrom geben die Hersteller einen maximalen Ladestrom (Max Charge Rate) in C an: Beim oben beschriebenen Akku würde die Angabe 4C einen Ladestrom von 8,8 A erlauben. Das sollte man aber nicht ständig ausreizen. Im Großen und Ganzen sind LiPo-Akkus erheblich zickiger als NiCd- oder NiMh-Akkus und müssen vorsichtig behandelt werden – auch um mögliche Brände zu verhindern.



Für unterschiedliche Zellenzahlen gibt es unterschiedliche Balancer-Anschlüsse. Wichtig ist, dass Stecker und Buchse zum gleichen System gehören.



Ein digitales Ladegerät mit Balancer. Praktischerweise hat es einen Netzanschluss für daheim und einen 12-Volt-Anschluss für den mobilen Betrieb.

Fernsteuerung

Moderne Fernsteuerungen sind mittlerweile kleine Computer, deren Funktion, Bedienung und Konfiguration im Grunde einen eigenen Artikel wert sind. Grundsätzlich reicht es am Anfang zu wissen, dass sie Stellwerte für Servos übertragen. Die Stellung der Knüppel (Sticks) wird sequenziell beispielsweise als Puls-Pausen-moduliertes (PPM) Signal per Funk an den Empfänger übertragen. Die Informationen der Stellungen wird durch die Länge von Pausen zwischen Pulsen signalisiert. Bei einem Acht-Kanal-Sender befinden sich acht Pausen mit einer variablen Länge zwischen 0,5 bis 1,5 Millisekunden zwischen neun Pulsen, die jeweils eine konstante Dauer von 0,5 Millisekunden haben. Das Signal wird der sogenannten Trägerfrequenz aufmoduliert, die üblicherweise bei 2,4 GHz liegt, ältere Systeme arbeiten mit 35 MHz.

Für die Übertragung setzt man Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) oder Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), was insbesondere auf vollen Modellflugplätzen weniger Probleme verursacht. Die Hersteller geben ihrer jeweiligen Implementierung Namen wie FASST (Futaba Advanced Spread Spectrum Technologie) oder Digital Spectrum Modulation (DSM(x), Spektrum), was mitunter verwirrt. Solange man jedoch Sender- und Empfänger zusammen kauft, treten keine Probleme auf.

Der Empfänger demoduliert das Signal und bereitet das PPM-Signal auf: bei einer steigenden Flanke wechselt er jeweils den Servokanal und gibt am jeweiligen Port einen Puls aus. Dessen Länge ergibt sich aus der Addition der 0,5 Millisekunden des Start-Pulses und der Länge der Pause bis zur nächsten steigenden Flanke. Bei einer Pause von 0,5 Millisekunden bis zum nächsten empfangenen Puls dauert der gesamte Servo-Puls 1 Millisekunde – zum Ansteuern des linken Anschlags. Analog dazu berechnen sich die 2 Millisekunden Pulsdauer für den rechten Anschlag aus dem Start-Puls von 0,5 Millisekunden und der maximalen Pausendauer von 1,5 Millisekunden.

Beim Quadrocopter benötigt man im einfachsten Fall ein Signal für Nick/Pitch,

Bei der Puls-Pausen-Modulation steckt die Information zur Knüppelsteuerung in der Länge der Pausen.



Mit den Knüppeln steuert man Richtung und Schub, mit den Schaltern kann man Funktionen wie „Höhe halten“ aktivieren.

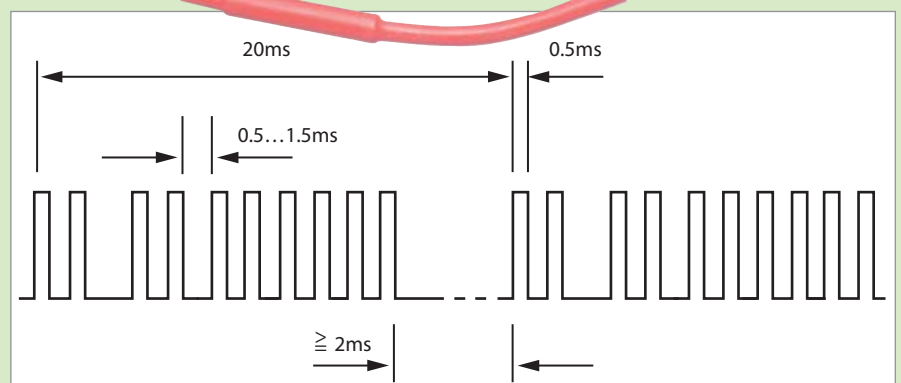
Roll, Yaw und Throttle, vier Kanäle würden für die Übertragung der Knüppelstellungen im Prinzip genügen. Will man jedoch die ein oder andere Funktion im Flug an- oder abschalten oder gar Servos für eine Kamera steuern, sollte man Systeme mit mehr Kanälen (und Schaltern) wählen. Die Kanäle werden einzeln aus dem Empfänger heraus und an die Servos beziehungsweise an die passenden Eingänge des Flightcontrollers geführt. Um Kabel vom Empfänger zum Flightcontroller zu sparen, gibt es Empfänger, die nur ein Summen-

signal nach außen führen. Dabei werden die Steuersignale seriell an den Controller übertragen – der muss dafür allerdings einen entsprechenden Eingang mitbringen und das Signal auch interpretieren können.

Höherwertige Fernsteuersysteme senden über Rückkanäle Telemetriedaten über den Status des Kopters wie Geschwindigkeit, Höhe und Akku-Stand an den Sender zurück, der sie auf seinem Display anzeigt. Für ein 14-Kanal-System T-14SG von Futaba mit 32-Telemetriedaten legt man dann aber schon mal 550 Euro auf den Tisch. Anfänger sollten eher auf einfache und günstige Lösungen wie die Turnigy 9X oder die baugleiche FlySky TH 9X zurückgreifen, die man auf eBay inklusive Empfänger schon für 100 Euro bekommt.

Beim Kauf der Fernbedienung – insbesondere auf eBay – sollte man auf die Angaben zum Mode achten. Bei sogenannten Mode-1-Sendern ist der Gashebel rechts, was gerade für Einsteiger den Modellflug schwieriger macht. Bei Mode-2-Modellen ist der Gashebel links. Allerdings kann man bei vielen Modellen durch mehr oder minder komplizierte Eingriffe (Federn tauschen) den Mode nachträglich wechseln.

Der Empfänger führt jeden Servo-Kanal einzeln nach außen.



Luftaufnahmen

Das Modellfliegen mit einem Quadrokooper ist allein bereits ein spannendes Thema. Richtig faszinierend wird es, wenn man ihn für Luftaufnahmen einsetzt – ein Gebiet, das vor wenigen Jahren für den Privatanwender unerreichbar war. Je nach Tragfähigkeit kann ein Kopter hochwertige Systemkameras mit eigener Kameraaufhängung und -steuerung heben – oder leichte, fest montierte Action-Cams wie die populäre GoPro Hero. Dazwischen sind viele Kombinationen in allen Preisklassen möglich.

Für erste Versuche reicht aber auch eine kleine und leichte Keycam, die einen eigenen Akku hat und Videos und Fotos auf eine MicroSD-Karte speichert. Wir haben beispielsweise eine nur wenige Gramm schwere Octocam von Pearl einfach mit Klebeband auf unserem Quadrokooper befestigt. Die Ergebnisse sind durchaus brauchbar und vermitteln einen Eindruck, was mit den eigenen Fähigkeiten und dem Kopter machbar ist.

Sobald man genug Erfahrung gesammelt hat, kann man beispielsweise zur Befestigung einer Kompaktkamera einen dedizierten Kamerahalter anbauen. Ein starrer Halter führt jedoch dazu, dass die Kamera jede Neigung des Kopters mitmacht und Bilder oder Videos schief und verackelt sind. Zudem schaut die Kamera immer dahin, wohin auch der Kopter zeigt. Mit sogenannten Gimbals bleibt die Kamera immer in der Horizontalen und lässt sich zudem in zwei Achsen mit Servos schwenken. Hochpreisige Gimbals enthalten eigene Gyros, um über Servos oder auch

Mit einem Video-Sender und -Empfänger lassen sich Bilder in Echtzeit übertragen.



Der Kamerahalter wird unter den Kopter montiert.

Schrittmotoren die Kamera ruhig zu halten. Günstigere Modelle nutzen dedizierte Ausgänge einiger Flightcontroller zur Stabilisierung.

Eine besonders faszinierende Spielart des Kameraflugs ist der First Person View (FPV). Bei ihm wird das Kamerabild per Funk live an einen Monitor übertragen. Mit einer speziellen Videobrille hat man den Eindruck, man würde selbst im Quadrokooper sitzen. Videobrillen mit Headtracker können zusätzlich die Kameraausrichtung im Quadrokooper steuern. Schwenkt man den Kopf nach links, schwenkt auch die

Kamera nach links. Da man quasi in eine andere Umgebung eintaucht, hat man dafür den Begriff Immersionsflug geprägt.

FPV-Sender und Empfänger arbeiten auf 5,8 GHz, um die Fernsteuerübertragung bei 2,4 GHz nicht zu stören. In der Regel liegt ihre Reichweite jedoch unter der von guten Fernbedienungen. Doof, wenn dann die Verbindung abreißt und der Kopter außerhalb der Sichtweite ist. Nützlich ist es dann, wenn der Flightcontroller mit einem GPS-Modul ausgestattet ist und den Weg selbstständig zurückfindet.



Mit Videobrille und Kamera ist man mittendrin, statt nur dabei.

Bild: Zeiss



Das geringe Gewicht einer Keycam sollten auch kleinere Quadrokooper heben können.

Rechtliches

Vor dem ersten Aufstieg des Quadropters sollte man unbedingt eine zusätzliche Haftpflichtversicherung für Flugmodelle abschließen – die normale Haftpflicht deckt solche Schäden nur selten ab. Das „vor“ sollte man nicht auf die leichte Schulter nehmen: Die „Wird schon nichts passieren“-Haltung bei den ersten Flugversuchen des Autoren änderte sich jäh, als sich der Quadropter von einer Windböe irritiert (oder wars der Pilot?) aus fünf Meter Höhe auf Nachbars Auto stürzen wollte. Glücklicherweise stand Sohnmanns Fahrrad im Weg und verhinderte vermutlich mehrere Tausend Euro Schäden an Karosserie und Lack.

Für Einsteiger bietet sich die Haftpflichtversicherung der Deutschen Modellsport Organisation (DMO) für 40 Euro im Jahr an (siehe Link). Sie deckt bis zu 1,5 Millionen Euro Schaden ab. Alternativ kann man auch Mitglied eines Modellfliegervereins werden und eine Zusatzversicherung abschließen.

Daneben gibt es noch weitere rechtliche Rahmenbedingungen, die aber den normalen, privaten Piloten in der Praxis tangieren könnten. So bedürfen Quadropter über einem Gewicht von 5 kg eine Aufstiegs-genehmigung durch die Luftfahrtämter, die den Landesverkehrsämtern beigeordnet sind. Die Aufstiegs-genehmigung benötigt man zudem auch bei leichteren Modellen, wenn man für gewerbliche Zwecke fliegt, etwa um Luftaufnahmen zu machen. Der Quadropter darf nur innerhalb der Sichtweite des Piloten fliegen, also je nach Sehstärke bis zu 300 Meter. Als maximale Höhe erlauben die meisten Bundesländer 100 Meter. Daneben sind bestimmte Gebiete Flugverbotszonen, etwa Atomkraftwerke, JVs oder das Regierungsviertel in Berlin. Zu Flugplätzen muss man einen Mindestabstand von 1,5 km einhalten.

Als Flugverbotszone sollte man auch Nachbars Garten einstufen, insbesondere wenn man eine Kamera auf dem Quadro-

kopter montiert hat. Rechtlich sollten Überflüge in größerer Höhe zwar kein Problem sein, das Schweben in geringer Höhe dürfte er jedoch als Angriff auf seine Privatsphäre werten – wer täte das nicht.

In einer rechtlichen Grauzone befinden sich die FPV-Flieger. Da sie ihre Modelle eigentlich auf Sicht fliegen müssen, ist FPV mit Videobrille nicht erlaubt. Grenzwertig ist das Fliegen mit Monitor, da man dabei immer über den Rand schauen kann. Verboten sind auch vollständig autonome Drohnenflüge, bei denen der Flightcontroller eine Reihe von Wegpunkten bekommt und diese mittels GPS-Modul nacheinander anfliegt. Viele Produkte bieten zwar diese Option, aber selbst die Polizei in Deutschland darf sie nicht für Überwachungsflüge einsetzen.



Links und Foren
www.ct.de/ch1303042

Anzeige