

AI Drones

**A Bilingual Handbook on the Design, Construction, and
Use of AI-Enabled Drones for Scientific and Educational
Projects**

KI-Drohnen

**Ein zweisprachiges Handbuch über Entwurf, Bau und
Einsatz von KI-fähigen Drohnen für wissenschaftliche
Projekte und Lehre**

Christian Baun, Theodor Bloch, Matthias Deegener, Oliver Hahm, Martin Kappes,
Nur Uddun Syeed

Frankfurt University of Applied Sciences

September 19, 2025

Preface

TBD

TBD

TBD

TBD

TBD

TBD

Vorwort

Dieses Dokument bietet einen Einstieg in das komplexe Thema Drohnen mit künstlicher Intelligenz. Schwerpunkte sind die Entwicklung (inkl. Auswahl geeigneter Hard- und Softwarekomponenten), Bau und Betrieb von Drohnen in der Lehre und für Forschungsprojekte.

Beim Schreiben dieses Dokuments flossen Erkenntnisse aus dem vom Connectom Vernetzungs- und Innovationsfond des hessian.AI geförderten Forschungsprojekt *KI-gestützte Drohnenplattform* und aus der Lehrveranstaltung *Drohnen mit Künstlicher Intelligenz* an der Frankfurt University of Applied Sciences an.

Maßgebliche Kriterien der Auswahl der in dieses Dokument vorgestellten Komponenten sind unter anderem: Anpassbarkeit an verschiedene Einsatzszenarien, Anschaffungspreis, Robustheit, langfristige Marktverfügbarkeit sowie Qualität der Dokumentation und Herstellersupport.

Die Realisierung einer vollständigen Abhandlung zu den Themen Drohnen und KI ist nicht Ziel dieses Dokument. Der Fokus liegt auf den Technologien und Lösungen, die während der Erstellung aktuell waren und mit denen praktische Erfahrung im Studienfeld Informatik des Fachbereich 2 an der Frankfurt University of Applied Sciences gemacht wurden.

Kapitel 1 und 2 stellen knapp die Hard- und Softwarekomponenten vor, die zum Bau und Betrieb von FPV-Drohnen nötig sind. Dieses sind zur Realisierung der hier vorgestellten KI-Projekte in erster Linie ein Werkzeug und/oder Transportvehikel. Kapitel 3 stellt verschiedene KI-Projekte vor, stellt die zur Realisierung nötigen Hard- und Softwarekomponenten vor und beschreibt die Implementierung.

Über Ihre Kommentare und Verbesserungsvorschläge freuen wir uns sehr.

Frankfurt am Main

*Christian Baun,
Theodor Bloch,
Matthias Deegener,
Oliver Hahm,
Martin Kappes,
Nur Uddun Syeed*

Contents

1 Hardware Components for Building FPV Drones	1
1.1 Frames	1
1.2 Flight Controller and Electronic Speed Controller	2
1.2.1 Stack or AIO	3
1.3 Motors	4
1.3.1 Size of the Motors	4
1.3.2 Electrical Voltage	5
1.3.3 KV Value	5
1.3.4 Propeller Mounting	6
1.3.5 Frame Attachment	6
1.4 Propeller	6
1.4.1 Propeller Size (Diameter)	7
1.4.2 Number of Blades	7
1.4.3 Pitch	8
1.5 Batteries	8
1.5.1 Charge and Discharge Rate (C-Rate)	8
1.5.2 Number of Cells (S4/S6)	10
1.5.3 Plugs (XT30/XT60/XT90) for Discharge and Charge	10
1.6 GPS	11
1.7 Receiver	12
1.8 Remote Control (Sender)	13
1.9 Video Transmitter	14
1.10 Camera	16
1.11 FPV Goggles	18
2 Software for Using FPV Drones	21
2.1 Flight Controller Firmware	21
2.1.1 Betaflight	22
2.1.2 INAV	22
2.1.3 ArduPilot	22
2.2 Remote Control Firmware	23
2.2.1 EdgeTX	23
2.3 Transmitter and Receiver Firmware	23
2.3.1 ExpressLRS	23
3 AI Drone Projects	25
3.1 Object Detection	25
3.2 Auto Pilot	25
3.3 Follow Me Function	25

Inhaltsverzeichnis

1 Hardware-Komponenten zum Bau von FPV-Drohnen	1
1.1 Rahmen	1
1.2 Flugcontroller und Motorsteuerung	2
1.2.1 Stack oder AIO	3
1.3 Motoren	4
1.3.1 Motoraufbau und -größe	4
1.3.2 Elektrische Spannung	5
1.3.3 KV-Wert	5
1.3.4 Propelleraufnahme	6
1.3.5 Rahmenbefestigung	6
1.4 Propeller	6
1.4.1 Propellergröße (Durchmesser)	7
1.4.2 Anzahl der Blätter	7
1.4.3 Steigung (Pitch)	8
1.5 Akkus	8
1.5.1 Lade- oder Entladerate (C-Wert)	8
1.5.2 Anzahl der Zellen (S4/S6)	10
1.5.3 Stecker (XT30/XT60/XT90) zum Entladen und Laden	10
1.6 GPS	11
1.7 Empfänger	12
1.8 Fernbedienung (Sender)	13
1.9 Videosender	14
1.10 Kamera	16
1.11 Videobrille (FPV-Brille)	18
2 Software zum Betrieb von FPV-Drohnen	21
2.1 Flight Controller Firmware	21
2.1.1 Betaflight	22
2.1.2 INAV	22
2.1.3 ArduPilot	22
2.2 Fernbedienung Firmware	23
2.2.1 EdgeTX	23
2.3 Sendemodul- und Empfänger-Firmware	23
2.3.1 ExpressLRS	23
3 KI-Drohnen-Projekte	25
3.1 Objekterkennung	25
3.2 Autopilot	25
3.3 Follow-Me-Function	25

1

Hardware Components for Building FPV Drones

TBD

1.1

Frames

TBD

TBD

TBD

TBD

Hardware-Komponenten zum Bau von FPV-Drohnen

TBD

Rahmen

Der Rahmen aus verbindet alle Komponenten der Drohne. Das verwendete Material ist üblicherweise Carbon. Dabei handelt es sich um einen leichtgewichtigen und dennoch hochfesten und verwindungssteifen Verbundwerkstoff aus Kohlenstofffasern. Seltener kommen auch Rahmen aus Kunststoff zum Einsatz. Der Rahmen definiert die Propellergröße (siehe Abschnitt 1.4).

Die wichtigsten elektronischen Komponenten wie Flugcontroller, Videosender, Empfänger und Kamera nimmt der Rahmen zentral auf, um diese zu schützen. Der Akku befindet sich in den meisten Fällen oben auf der Drohne, um Beschädigungen beim Landen zu vermeiden.

Größere Rahmen bieten mehr Platz für Komponenten innerhalb und oberhalb und ermöglichen die Nutzung leistungsstärkerer Motoren (siehe Abschnitt 1.3) und größerer Propeller. Allerdings steigt mit der Rahmengröße auch dessen Eigengewicht. Gängige Rahmengrößen und deren typische Anwendung enthält Tabelle 1.1.

Wichtige Unterscheidungskriterien bei der Auswahl des passenden Rahmens sind auch die Abstände der Bohrlöcher zur Befestigung des

Table 1.1: Overview of different Frame Sizes and Drone Categories

Drone Category	Typical Frame Size	Typical Propeller Diameter
TinyWhoop	1.2 - 2.5 Inch	31 - 64 mm
Toothpick	2 - 3 Inch	51 - 76 mm
Cinewhoop	2.5 - 3.5 Inch	64 - 90 mm
Freestyle	3 - 6 Inch	76 - 152 mm
Racing	5 Inch	127 mm
Long-Range, Cinelifter	4 - 10 Inch	100 - 254 mm
Heavy-Lift	10 - 12 Inch	254 - 304 mm

TBD	Flugcontrollers und des Videosenders. Gängige Maße sind: <ul style="list-style-type: none"> • 30,5 x 30,5 mm • 25,5 x 25,5 mm • 20 x 20 mm
TBD	Verfügt ein Rahmen nicht über passende Bohrlöcher für den ausgewählten Flugcontrollers und den Videosender, kann ein per 3D-Drucker gedruckte Adapter helfen, wenn der Platz im Rahmen dafür ausreicht.

1.2

Flight Controller and Electronic Speed Controller

TBD

Flugcontroller und Motorsteuerung

Der Flight Controller (FC) ist die zentrale Komponente jeder Drohne. Der FC verarbeitet die Sensordaten von Gyroskop, Beschleunigungssensor, Barometer und GPS-Modul. Er stabilisiert die Fluglage durch Regelalgorithmen und nimmt über den Empfänger Steuerbefehle durch den Piloten entgegen. Zudem steuert der FC die Motoren über die Electronic Speed Controller (ESC).

Auch FPV-Kamera und Videosender sind mit dem FC verbunden und werden durch ihn gesteuert und vom Strom des Akkus versorgt. Der FC gibt auch Telemetriedaten als On Screen Display an den Videosender weiter.

Gängige FC enthalten einen STM32-Mikrocontroller. Hier wird auch die Firmware gespeichert. Moderne MCUs sind F4, F7 und H7. Diese unterscheiden sich im Takt und

TBD

TBD

Speicher (siehe Tabelle 1.2). Der genannten Rechen- und Speicherressourcen schränken die sinnvolle Nutzung der Firmwares ein.

Table 1.2: Overview of modern Flight Controller STM32 MCUs

CPU (MCU)	Clock	Flash Memory	RAM
F405	168 MHz	1 MB	192 kB
F411	100 MHz	512 kB	128 kB
F745	216 MHz	1 MB	320 kB
F722	216 MHz	512 kB	256 kB
H743	480 MHz	2 MB	1 kB

TBD

Betaflight (siehe Abschnitt 2.1.1) und funktioniert auf allen und INAV (siehe Abschnitt 2.1.2) auf fast allen in (siehe Tabelle 1.2) genannten Mikrocontrollern. Der Betrieb von ArduPilot (siehe Abschnitt 2.1.3) erfordert für einen reduzierten Betrieb mindestens 1 MB Flash-Speicher. Erst mit 2 MB Flash-Speicher steht der komplette Funktionsumfang zur Verfügung.

TBD

Die Electronic Speed Controller (ESCs) steuert die Motoren. Der ESC ist eines der am stärksten belasteten Teile der Drohne, weil durch ihn teils 10 bis 20 Ampere Dauerstrom fließen.

TBD

Separate ESCs als einzelne Platinen sind heute unüblich. Bei modernen Drohnen sind die vier oder mehr ESCs auf einer einzelnen Platine, einem sogenannten 4-in-1-ESCs zur Motorsteuerung integriert. An dieser werden die Motoren und die Verbindung zum Akku (siehe Abschnitt 1.5) angelötet.

1.2.1

Stack or AIO

TBD

Stack oder AIO

Die Kombination einer separaten Platine zur Motorsteuerung und dem Flugcontroller heißt Stack.

TBD

Befinden sich die ESCs auf der gleichen Platine wie der FC, spricht man von einem All In One Flight Controller (AIO FC).

TBD

Bei kleineren Drohnen (2 bis 4 Zoll) sind schon aus Platzgründen AIO FCs üblich. Bei größeren Drohnen kommen meist Stacks zum Einsatz. Ein Vorteil von ist, dass separate Motorsteuerungen mit höheren Dauerströmen am Markt verfügbar sind. Separate Motorsteuerungen gibt es mit 45 bis 70 A. Zudem bieten die FCs von Stacks tendenziell gegenüber AIO FCs mehr

TBD

Platz für Lötpads, größere Lötpads, häufig zusätzlich Steckverbindungen und mehr nutzbare UART-Schnittstellen für Sensoren und Aktoren.

Abbildung 1.1) zeigt einen einen AIO Flight-Controller. Die Abbildungen ?? und ?? zeigen die Vorder- und Rückseite eines Stack bestehen aus Flight-Controller und separater ESC-Platine.



Figure 1.1: Flight Controller SpeedyBee F405 AIO 40A Bluejay 25.5x25.5 (Front and Back)

1.3

Motors

TBD

Motoren

Motoren unterscheiden sich in ihrem Aufbau (Motoraufbau und -größe), der elektrischen Spannung (Volt), mit der sie arbeiten können, Drehzahl (KV-Wert), der Aufnahme des Propellers und der Befestigung mit der Rahmen.

1.3.1

Size of the Motors

TBD

Motoraufbau und -größe

Die Motoren bestehen aus einem Stator und einem Rotor. Der Stator enthält die Wicklungen und das Kugellager. Der Rotor ist die Motorglocke mit den Magneten, die die eigentliche Drehbewegung ausführt. Jeder Motor ist mit einer Zahlenkombination ausgezeichnet, die den

Durchmesser und die Höhe des Stators in Millimeter angibt. Bei einem Motor mit der Zahlenkombination 2306 beispielsweise hat der Stator einen Durchmesser von 23 mm und eine Höhe von 6 mm.

TBD

Je größer das Statorvolumen, desto höher ist die Motorleistung im Bezug auf Drehmoment. Zudem ist die thermische Robustheit von großen Motoren besser. Motoren mit kleinem Statorvolumen sind hingegen leichter und sparsamer bei kleinen Lasten.

1.3.2

Electrical Voltage

TBD

Elektrische Spannung

Motoren und Akkus (siehe Abschnitt 1.5) müssen zusammenpassen. 4S-Motoren benötigen 4S-Akkus mit maximal 16,8 V und 6S-Motoren benötigen 6S-Akkus mit maximal 25,2 V.

TBD

Komponenten für 4S sind meist günstiger und leichter, bieten dafür aber weniger Leistung. Komponenten für 6S bieten mehr Leistung oder mehr Flugzeit, haben dafür aber auch meist mehr Gewicht (insbesondere die Akkus). Für leichte kostengünstige Drohnen ist 4S die bessere Wahl. Es gibt auch Motoren, die 4S und 6S vertragen und dadurch flexibler eingesetzt werden können.

1.3.3

KV Value

TBD

KV-Wert

Der KV-Wert beschreibt, wie schnell sich ein Motor pro Volt im Leerlauf dreht. Ein Motor mit beispielsweise 3000 KV dreht also ohne Propeller bei 1 V Versorgungsspannung 3000 U/min. An einem 4S-Akku (siehe Abschnitt 1.5) mit ≈ 16 V Spannung hat dieser Motor also eine Leerlaufdrehzahl von $3000 \times 16 \approx 48000$ U/min.

TBD

Motoren mit hohen KV-Werten (2800-7000 Kv) sind agiler (ermöglichen schnellere Reaktion), haben ein geringeres Drehmoment pro Ampere und sind für kleinere Propeller und leichtere Drohnen gut geeignet. Motoren mit niedrigen KV-Werten (1500-2450 Kv) haben ein höheres Drehmoment pro Ampere und sind für größere Propeller und schwerere Drohnen gut geeignet.

TBD

Ein hoher KV-Wert bedeutet nicht, dass ein Motor stärker ist als ein Motor mit einem niedri-

geren KV-Wert. Der Motor dreht nur schneller, braucht aber auch mehr Strom für Schub.

1.3.4

Propeller Mounting

TBD

Propelleraufnahme

Größere Motoren (z.B. 22xx, 23xx, 24xx) für Drohnen ab 5 Zoll haben zur Propelleraufnahme meistens eine M5-Welle mit 5 mm Durchmesser. Die Propeller werden direkt auf die Motorwelle gesteckt und mit einer Mutter gesichert. Kleineren Motoren (z.B. 13xx, 14xx, 18xx) für Drohnen bis 3,5 Zoll haben meist eine viel kleinere Wellen mit 1,5 mm Durchmesser. Hier werden die Propeller mit zwei Schrauben am Motor befestigt. Motoren (z.B. 20xx, 21xx) für mittelgroße Drohnen (3,5 oder 4 Zoll) gibt es für M5-Wellen und Wellen mit 1,5 mm Durchmesser.

1.3.5

Frame Attachment

TBD

Rahmenbefestigung

Bei der Auswahl der Motoren ist darauf zu achten, dass die Bohrlöcher des Rahmens bezüglich Anzahl, Abstand und Durchmesser übereinstimmen. Üblich ist die Befestigung der Motoren am Rahmen mit drei oder vier Schrauben (M1,4, M2 oder M3). Die Schrauben sind bei kleinen Rahmen als gleichseitiges Dreieck oder als Quadrat angeordnet. Der Lochabstand kann 7 mm, 9 mm, 12 mm oder 16 mm oder 19 mm betragen.

1.4

Propeller

TBD

Propeller

Die Propeller wandeln die Drehbewegung des Motors in Schub (Lift) und Steuerkraft um. Die Propellergröße (Durchmesser), Steigung (Pitch) und Blätterzahl beeinflussen Schub, Effizienz, Geräuschenwicklung und Flugverhalten. Dieses Dokument berücksichtigt nur Drohnen mit vier Propellern. Andere Konfigurationen wie Hexacopter und Octocopter sind möglich.

1.4.1

Propeller Size (Diameter)

TBD

TBD

TBD

Propellergröße (Durchmesser)

Die Propellergröße bestimmt, einfach gesagt, wie viel Luft bewegt wird.

Die Angegebene Propellergröße ist immer der Durchmesser in Zoll. Die Propeller müssen zum verwendeten Rahmen (siehe Abschnitt 1.1) passen.

Kleinere Propeller sind wendiger. Das bedeutet, dass schnellere Reaktion auf Steuerbefehle möglich sind. Die Drohne reagiert agiler. Der Grund dafür ist, dass kleinere Propeller einen geringeren Luftwiderstand haben und insgesamt leichter sind. Sie haben eine geringere Rotationsmasse (Trägheitsmoment). Dadurch kann der Motor die Drehzahl schneller erhöhen oder verringern. Da kleinere Propeller typischerweise mit kleineren Motoren mit höherem KV-Wert kombiniert sind, drehen sie zusätzlich schneller, was die Agilität bzw. das Ansprechverhalten erneut steigert.

Größere Propeller erzeugen mehr Schub und haben eine bessere Effizienz. Zudem machen Sie den Flug ruhiger – auf Kosten der Agilität. Mit der Propellergröße steigt auch die Belastung für die Motoren und die Motorsteuerung (ESC), denn die größere Blattfläche erzeugt einen höheren Luftwiderstand. Zudem haben größere Propeller ein höheres Eigengewicht.

1.4.2

Number of Blades

TBD

TBD

Anzahl der Blätter

Es gibt Propeller mit 2 bis 8 Blättern. Je weniger Blätter ein Propeller hat, desto höher sind die erreichbare Geschwindigkeit und Effizienz (Schub pro aufgenommenem Watt oder pro Ampere). Mit steigender Anzahl an Blättern verbessern sich Kontrolle, Laufruhe und Beschleunigung und gleichzeitig auch der Stromverbrauch.

Für Long-Range-Anwendungen, bei denen Effizienz das Maß aller Dinge ist, kommen in der Regel 2-Blatt-Propeller zum Einsatz. Racing- und Freestyle-Drohnen sind häufig mit 3-Blatt-Propellern ausgestattet. Cinewhoop verwenden häufig Propeller mit 5 oder mehr Blättern, da diese möglichst stabil in der Luft liegen und präzise steuerbar sein sollen.

1.4.3

Pitch

TBD

Steigung (Pitch)

Neben der Anzahl der Propeller beeinflusst auch die Steigung (Pitch) der Blätter die Geschwindigkeit und die Effizienz (Stromverbrauch). Ein niedriger Pitch ist durch den geringeren Luftwiderstand effizienter bei Schweben und führt zu ruhigerem Flugverhalten. Ein hoher Pitch ermöglicht eine höhere Geschwindigkeit und aggressivere Flugmanöver, steigert aber auch den Stromverbrauch.

TBD

Der Pitch wird in Zoll angegeben und beschreibt den Vortrieb pro Umdrehung, also wie weit sich der Propeller bei einer Umdrehung durch die Luft schrauben würde, wenn es keine Schlupfverluste gäbe.

TBD

Bei einem Pitch von 4,3 Zoll pro Umdrehung und 3000 U/min gibt es einen theoretischen Weg von $3000 \times 4,3 = 12.900 \text{ Zoll/min}$. Ein Zoll entspricht 25,4 mm. Somit ist der theoretische Weg pro Zeit, also die Geschwindigkeit: $12.900 \times 0,0254 \approx 327,7 \text{ m/min}$ bzw. $327,7 \text{ m/min}/60 \approx 5,46 \text{ m/s}$.

TBD

Diese theoretischen Werte werden in der Realität durch Schlupfverluste um 20-30% verringert. Der Grund dafür ist, dass Luft kein festes Medium ist, sondern beweglich ist. Durch das Ausweichen und Verwirbeln, rutscht immer ein Teil der Luft weg und der Propeller erreicht in der Praxis weniger Vortrieb als in der Theorie.

1.5

Batteries

TBD

Akkus

Klassischerweise verwenden FPV-Drohnen Lithium-Polymer (LiPo) oder Lithium-Ionen-Akkus (Li-Ion). Unterschieden werden die Akkus zudem hinsichtlich Kapazität (mAh), Spannung (Zellenzahl) und Entladespannung bzw. C-Wert (Capacity Rate), und Stecker.

1.5.1

Charge and Discharge Rate (C-Rate) Lade- oder Entladerate (C-Wert)

TBD

Die Akkus bestehen aus einer oder mehreren in Reihe geschalteten Zellen und bieten sehr hohe C-Werte von 75 bis 120 C. Der C-Wert

TBD

(Capacity Rate) gibt an, wie schnell ein Akku entladen werden kann.

Bei einem 1500 mAh LiPo-Akku (siehe Abbildung 1.5) mit einem C-Wert 100 können somit $1,5A * 100 = 150$ Ampere dauerhaft abgegeben werden.



Figure 1.4: A 4S Lithium-Polymere (LiPo) Battery with 1500 mAh Capacity and 100 C Capacity Rate

TBD

Für sehr rasante Flugmanöver braucht man solche hohen Ströme. Für typische Anwendungen in Lehre und Forschungsprojekten ist das aber uninteressant. Patrouillenflüge oder gar das Verharren an einer Position zur Datensammlung erfordern keine hohen C-Werte.

TBD

LiPo-Akkus haben mehrere Nachteile. Sie werden sehr leicht tiefentladen, was sie dauerhaft beschäftigt oder zerstört. Abstürze führen auch häufig zu Beschädigungen und bei unsachgemäßer Handhabung wie dem zu schnellen Laden oder dem Betrieb trotz Beschädigungen der Außenhülle, besteht das latente Risiko von Bränden. Eine deutlich robustere Alternative zu LiPo-Akkus sind Lithium-Ionen-Akkus. Diese bieten allerdings viel geringere C-Werte.

TBD

Der C-Wert gibt auch die empfohlene Laderate an. Diese ist 1C, wenn der Hersteller nicht dediziert eine höhere Laderate wie z.B. 2C freigegeben hat. Bei dem eingangs erwähnten 1500 mAh LiPo-Akku entspricht 1C Laderate einem Strom von 1,5 A und dementsprechend dauert es eine Stunde den Akku vollständig zu laden. Das ist aber ein hypothetischer Wert, da ein derart tiefentladener Akku nicht mehr geladen werden kann.

1.5.2

Number of Cells (S4/S6)

TBD

Anzahl der Zellen (S4/S6)

LiPo-Akkus enthalten eine oder mehrere in Reihe geschaltete Zellen. Der sogenannte S-Wert bei Akkus definiert die Anzahl der Zellen. Jede LiPo-Zelle hat eine Nennspannung von ca. 3,7 V. (voll geladen ca. 4,2 V, entladen ca. 3,0 V). Sind mehrere Zellen in Reihe geschaltet, addieren sich die Spannungen.

TBD

Die gängigsten Akkus sind 4S und 6S. Bei einem 4S-Akku sind 4 Zellen in Reihe geschaltet. Die Nennspannung ist $4 \times 3,7\text{ V} = 14,8\text{ V}$. Ist ein solcher Akku voll geladen ist seine Spannung 16,8 V. Eine Übersicht über die verschiedenen LiPo-Akkus enthält Tabelle 1.3).

Table 1.3: Overview of Lithium-Polymere (LiPo) Batteries

Battery Type	Cells	Nominal Voltage	Fully Charged	Discharged
S1	1	3.7 V	4,2 V	3.0 V
S2	2	7.4 V	8.4 V	6.0 V
S3	3	11.1 V	12.6 V	9.0 V
S4	4	14.8 V	16.8 V	12.0 V
S5	5	18.5 V	21.0 V	15.0 V
S6	6	22.2 V	25.2 V	18.0 V

TBD

Bei einer höheren Spannung braucht ein Motor bei gleicher Leistung weniger Strom und läuft effizienter. S6-Komponenten sind leistungsstärker aber auch schwerer und teurer. Größere oder leistungsorientierte Drohnen verwenden meist 6S-Akkus. Kleinere und mittlere Drohnen verwenden meist S4-Akkus und entsprechende leichtgewichtige Komponenten.

TBD

Mit steigender Kapazität eines Akkus steigt nicht nur die Flugdauer, sondern auch das Gesamtgewicht. Sehr kleine S4-Akkus mit 450 mAh Kapazität wiegen ca. 60 g. Der in Abbildung 1.5 gezeigte Akku mit 1500 mAh Kapazität wiegt hingegen ca. 185 g. Ein höheres Gesamtgewicht beeinflusst auch das Flugverhalten.

1.5.3

Plugs (XT30/XT60/XT90) for Discharge and Charge

TBD

Stecker (XT30/XT60/XT90) zum Entladen und Laden

Der Anschluss der Akkus an den Flugcontroller geschieht in der Regel über einen XT30- oder al-

ternativ über eine XT60-Gleichstromstecker. Es gibt auch sehr große Akkus mit XT90-Stecker. Zwei Kabel mit einer Buchse sind an die Motorsteuerung (bei einem Stack) oder an den Flugcontroller bei einem AIO angelötet (siehe Abschnitt 1.2).

TBD

Bei kleinen und leichten Drohnen bis zu einer Größe von 4 Zoll sind XT30-Buchsen üblich. 5- und 6-Zoll-Drohnen verwenden üblicherweise XT60-Buchsen. Noch größere Drohnen verwenden häufig XT90-Buchsen. Je größer die Zahl, desto größere Ströme verträgt der Stecker. Größere Buchsen und Stecker sind allerdings auch größer und schwerer. Auch der Leitungsquerschnitt muss zu den Buchsen passen.

TBD

Neben den Gleichstromstecker verfügt jeder Akku mit zwei oder mehr Zellen über einen Balancerstecker zum sicheren Laden. Dieser Stecker, der bei modernen Akkus meist der Norm JST-XHR entspricht, ermöglicht es dem Ladegerät die Zellspannung jeder einzelnen Zelle zu messen und den Ladevorgang entsprechend zu steuern. Die Anzahl der Pins entspricht der Anzahl der Zellen plus eins (wegen der gemeinsamen Masse). Ein 4S-Akku hat somit fünf Leitungen und ein 6S-Akku hat sieben Leitungen. Durch die Werte, die über den Balancerstecker ausgelesen werden, gleicht das Ladegerät die Spannung der einzelnen Zellen an. Das verhindert die Überladung einzelner Zellen beim Ladevorgang und damit das Risiko für eine Beschädigung des Akkus oder sogar einen Brand und beugt einer Tiefentladung einzelner Zellen beim späteren Betrieb vor.

1.6

GPS

TBD

GPS

Ein GPS-Modul (Global Positioning System) ist obligatorisch für viele nützliche Funktionen wie zum Beispiel Return-to-Home (automatisches Heimfliegen), Geschwindigkeitsmessung, Bestimmung der Höhe, Unterstützung der Positionsaltung, autonomer Flug, etc.

TBD

Nicht jedes GPS-Modul ist mit allen gängigen Firmwares für Flugcontroller kompatibel. Während Betaflight quasi jedes GPS-Modul unterstützt, ist das bei INAV und ArduPilot nicht der Fall.

TBD

Verfügt ein GPS-Modul nur für sechs Anschlüsse (Lötpads oder Kabel), enthält es einen magnetischen Kompass. Verfügt das Modul allerdings nur über vier Anschlüsse, fehlt der magnetische Kompass. Ohne magnetischen Kompass weiß eine Drohne aber ohne Vorwärtsbewegung nicht, wie sie positioniert ist, also in welche Richtung sie schaut. Mehrere sinnvolle Funktionen wie GPS-Position-Hold bei ArduPilot sind dann nicht möglich.

TBD

Gängige GPS-Module (siehe Abbildung 1.5) mit integriertem magnetischem Kompass sind in der Regel zwischen 20x20 mm und 25x25 mm groß.

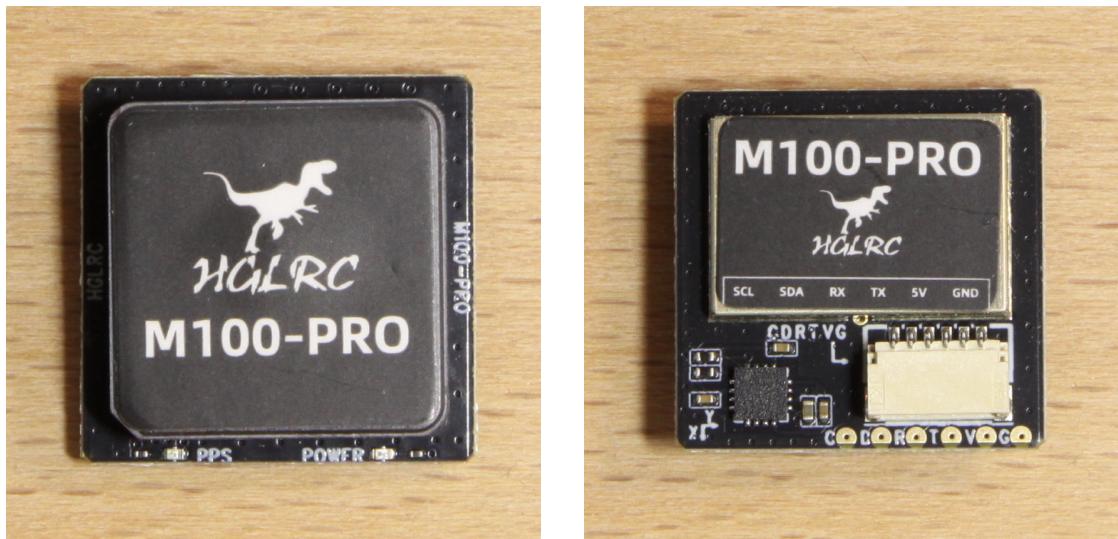


Figure 1.5: HGLRC M100-5883 M10 GPS Module 21x21 mm with built-in magnetic Compass (Front and Back)

1.7

Receiver

TBD

Empfänger

TBD

Der Empfänger nimmt die Steuersignale (verschiedene Kanalwerte) der Fernsteuerung entgegen und gibt Sie an den Flugcontroller weiter. Der Empfänger demoduliert die empfangenen Signale und wandelt sie in digitale Kanalwerte um.

Empfänger und Fernbedienung müssen zueinander kompatibel sein. Das bedeutet Sie müssen das gleiche Protokoll und den gleichen Frequenz-

TBD

TBD

bereich nutzen. Die gängigen Systeme nutzen die Frequenzbereiche 2.4 GHz und für Long-Range-Anwendungen 868 MHz in der EU bzw. 915 MHz in den USA. In Deutschland ist die Nutzung dieser Frequenzbereiche bei einer maximalen Sendeleistung von 25 mW zulässig.

Zwei populäre Protokolle sind das offene System ExpressLRS (ELRS) und das proprietäre TBS Crossfire. Da ELRS ein Open-Source-Protokoll ist, gibt es zahlreiche Anbieter für Hardwarekomponenten und die Weiterentwicklung ist schnell. Aus diesem Grund fokussiert dieses Dokument ganz auf den Standard ELRS. ELRS-Geräte (Sender und Empfänger) nutzen als Firmware ExpressLRS. Idealerweise verwenden Sender und Empfänger die gleichen Firmware-Version.

Es gibt Empfänger mit einer festen Antenne aus Keramik (siehe Abbildung 1.6), die auf der Platine integriert ist, und Empfänger mit einem (siehe Abbildung 1.7) oder zwei Anschlüssen für abnehmbare Antennen. Der üblicherweise verwendete Steckverbinder ist auch hier das füllgrane U.FL (*Pigtail*). Empfänger mit fester Keramikantenne sind kompakter, da kein Antennenkabel verlegt werden muss. Durch die nur wenige mm hohe Antenne reduziert sich allerdings die Reichweite signifikant.

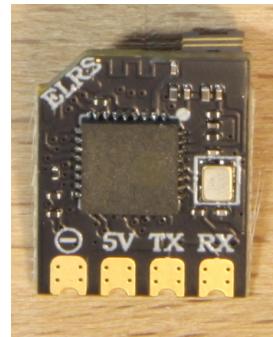
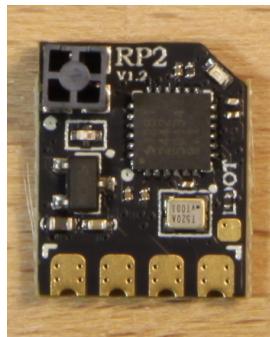


Figure 1.6: RadioMaster RP2 ELRS 2.4GHz Nano Receiver 13x11 mm with integrated Antenna (Front and Back)

1.8

Remote Control (Sender)

TBD

Fernbedienung (Sender)

Die verwendet Fernbedienung muss das gleiche Protokoll implementieren wie der ver-

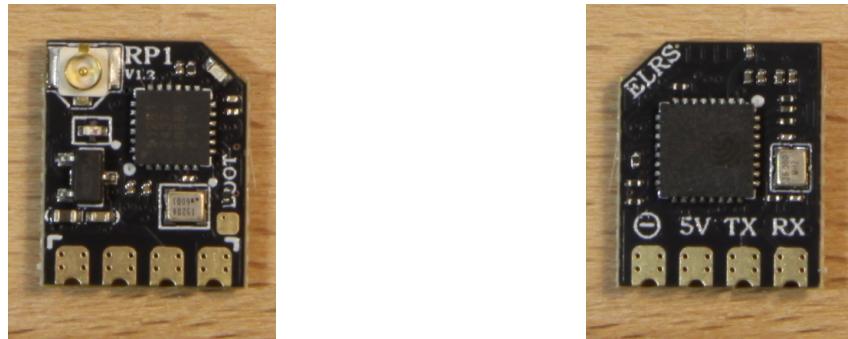


Figure 1.7: RadioMaster RP1 ELRS 2.4GHz Nano Receiver 13x11 mm with U.FL Antenna Connector (Front and Back)

wendete Empfänger. Zudem müssen die gleichen Frequenzbereiche verwendet werden. Zu den Herstellern von zum ELRS-Protokoll kompatiblen Fernbedienungen gehören RadioMaster, Axisflying und Jumper.

ELRS-Fernbedienungen (Sender) nutzen als Firmware für das Funkprotokoll und das Sender-Modul ExpressLRS und als Betriebssystem EdgeTX, eine modernere Form von OpenTX. EdgeTX erzeugt sozusagen die Steuersignale und ExpressLRS überträgt sie.

TBD

1.9

Video Transmitter

TBD

TBD

TBD

Videosender

Der Videosender (VTX) überträgt das Livebild der FPV-Camera über den eingestellten Kanal im festgelegten Band an die FPV Brille. Neben analogen Videosendern existieren auch verschiedene digitale Systeme, die zueinander inkompatibel sind. Videosender werden als einzelnes Gerät oder als Kit mit Kamera und Antenne(n) verkauft. Einen analogen Videosender zeigt Abbildung 1.8.

In Deutschland ist die Nutzung des Frequenzbereichs 5725-5875 MHz bei einer maximalen Sendeleistung von 25 mW zulässig. Die für analoge Bildübertragung zulässigen Kanäle in den jeweiligen Bändern zeigt Tabelle 1.4). Auffällig sind beim Race Band die großen Kanalabstände von 37 MHz, die Kanalüberlagerungen verhindern.

Der von einem Videosender zur Übertragung verwendete Kanal und das Band werden in der

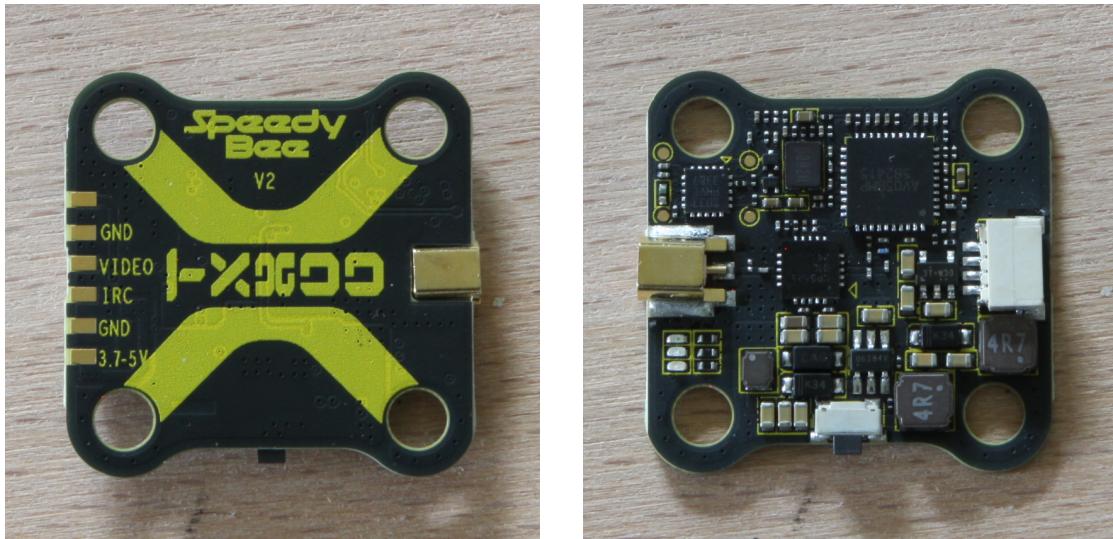


Figure 1.8: SpeedyBee TX800 FPV VTX Video Transmitter (Front and Back)

Table 1.4: Overview about permitted VTX Channels in Germany

CPU (MCU)	Channel Number (Frequency MHz)
Band A	7 (5745), 6 (5765), 5 (5785), 4 (5805), 3 (5825), 2 (5845), 1 (5865)
Band B	1 (5733), 2 (5752), 3 (5771), 4 (5790), 5 (5809), 6 (5828), 7 (5847), 8 (5866)
Band E	none Frequency permitted in Germany
Band F	1 (5749), 2 (5760), 3 (5780), 4 (5800), 5 (5820), 6 (5840), 7 (5860)
Race Band	3 (5732), 4 (5769), 5 (5806), 6 (5843)

TBD

grafischen Oberfläche Firmware des Flugcontrollers festgelegt.

Analoge Videosender sind herstellerübergreifend mit analogen Videobrillen kompatibel. Bei digitalen Systemen ist das nicht der Fall. Hier müssen die Hersteller von Sender und Empfänger übereinstimmen. Digitale Systeme zur Übertragung des Livebildes sind von den Herstellern DJI, HDZero und CaddxFPV unter dem Namen Walksnail verfügbar.

Vorteile von digitaler Livebildübertragung sind die exzellente Bildqualität und die Möglichkeit, ohne weitere Action-Camera Videos in HD-Qualität aufnehmen zu können.

Vorteile von analoger Übertragung sind neben der bereits erwähnten herstellerübergreifenden Kompatibilität, die geringe Verzögerung (Latenz), das das Bild bei Störungen schlechter wird, aber nicht abrupt abbricht, und deutlich ge-

TBD

TBD

TBD

ringeren Anschaffungskosten für die benötigten Komponenten.

Einen wichtigen Einfluss auf die Bildqualität und Reichweite haben die verwendeten Antennen. Der Betrieb des Videosenders ohne Antenne ist nicht empfehlenswert, da der Videosender so überhitzt und Beschädigungen wahrscheinlich sind. Der Anschluss der Antenne geschieht bei analogen Systemen üblicherweise über sehr filigrane Steckverbinder für Hochfrequenzsignale gemäß dem Standard U.FL. Diese Steckverbinder sind auch von WLAN (WiFi) bekannt und heißen umgangssprachlich *Pigtail*. Digitale Systemen (z.B. von DJI) verwenden in der Regel MMCX-Steckverbinder. Der Anschluss von Antennen mit dem größeren und robusteren SMA-Schraubgewinde ist über Adapterkabel möglich. Häufig liegen diese dem Videosender bei.

Die Antennen sollten auf Sender- und Empfängerseite zusammenpassen. Die verfügbaren Antennen für Videosender unterscheiden sich anhand ihrer Polarisation. Es existieren:

- linearly polarized antennas (LP)
- circularly polarized antennas (CP)

- Antennen mit linearer Polarisation (LP)
- Antennen mit zirkularer Polarisation (CP)

TBD

LP-Antennen sind die kostengünstigste und einfachste Variante. Sie werden häufig mit dem Videosender und mit der Videobrille mitgeliefert und haben eine Stabform.

CP-Antennen ermöglichen eine bessere Bildqualität und eine höhere Reichweite. Bei zirkularer Polarisation dreht sich die Polarisation, während sich das Signal ausbreitet. Es existieren Antennen mit rechtsseitiger zirkularer Polarisation (RHCP) und mit linksseitiger zirkularer Polarisation (LHCP).

RHCP kommen in der Regel bei analogen FPV-Drohnen zum Einsatz und LHCP-Antennen bei FPV-Drohnen mit digitaler Bildübertragung.

TBD

1.10

Camera

TBD

Kamera

Dieser Abschnitt befasst sich ausschließlich mit analogen analoge FPV-Kameras. Digitale Systeme zur Übertragung des Livebildes kamen bei

TBD

den bisher durchgeföhrten Projekten nicht zum Einsatz.

Die Kamera erzeugt ein Videosignal (NTSC oder PAL), das über den Flugcontroller an den Videosender weitergeleitet wird. Bei digitalen Systemen sind die Kameras direkt mit dem Videosender verbunden.

TBD

Die Bildqualität analoger Kameras wirkt durch Bildfehler und Unschärfen nicht mehr zeitgemäß und weit entfernt von HD-Qualität. Der Bildeindruck ist subjektiv im schlechtesten Fall mit VHS-Kassetten und im besten Fall mit DVDs vergleichbar. Analoge Bildübertragung hat aber mehrere Vorteile wie den günstigeren Preis, der bestmöglichen Latenz, geringes Gewicht und die herstellerübergreifende Kompatibilität der verfügbaren Komponenten.

TBD

Die Aufnahme qualitativ hochwerter Videos ist über eine analoge Kamera nicht möglich. Wenn diese Anforderung vorliegt, ist eine zusätzliche Kamera Actioncam oder etwas Vergleichbares nötig und muss auf der Drohne mitfliegen.

TBD

Die am Markt verfügbaren Kameras unterscheiden sich primär in der Auflösung, der Brennweite der Linse, die das Sichtfeld beeinflusst, und der Bauform (Breite).

TBD

Die Kamera darf für den verwendeten Rahmen (siehe Abschnitt 1.1) nicht zu breit sein. Modernen Kameras sind 14 mm (Nano-Kamera) oder 19 mm (Micro-Kamera) breite. Abbildung 1.9 zeigt eine Nano-Kamera und Abbildung 1.10 zeigt eine Micro-Kamera.

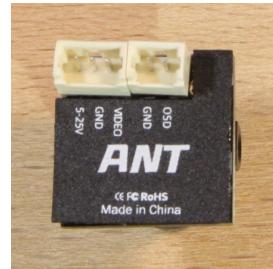


Figure 1.9: Caddx ANT Nano Analog Camera 1200 TVL 14x14 mm (Top and Back)

TBD

Die horizontale Auflösung ist in TV-Lines (TVL) angegeben und meist 1000, 1200 oder 1500 TVL. Je höher dieser Wert ist, desto besser ist die mögliche Bildqualität.

TBD

Die Brennweite definiert das Sichtfeld. Je kleiner der Wert ist, desto größer ist das Sichtfeld, was vorteilhaft beim Fliegen ist. Eine



Figure 1.10: RunCam Phoenix 2 Analog Camera 1000 TVL 19x19 mm (Top and Back)

TBD

niedrige Brennweite (z.B. 1.8 mm oder 2.1 mm) führt allerdings zu einem Fischaugen-Effekt und dementsprechend zu Verzerrungen, die das Auge schneller ermüden lassen und besonders kleine Objekte schwerer erkennbar machen.

Hohe Brennweiten (z.B. 2.5 mm oder 2.8 mm) bieten ein angenehmeres Bildgefühl, aber engen das Sichtfeld ein und erschweren so evtl. die Orientierung im Flug.

1.11

FPV Goggles

TBD

TBD

TBD

TBD

Videobrille (FPV-Brille)

Die verwendete Videobrille muss zum Videosender passen. Komponenten, zur digitalen Livebildübertragung sind in der Regel nur dann zueinander kompatibel, wenn sie vom gleichen Hersteller stammen. Analoge Videobrillen sind herstellerübergreifend zu allen analogen Videosendern kompatibel.

Die am Markt verfügbaren Videobrillen unterscheiden sich in erster Linie hinsichtlich der Auflösung, der verwendeten Display-Technologie und den Schnittstellen (Eingänge und Ausgänge). Tabelle 1.5) zeigt eine Gegenüberstellung einiger relevanter Merkmale bei einigen am Markt verfügbaren analogen Videobrillen.

Besonders die Möglichkeit, das Videosignal über eine Schnittstelle auszugeben und in einem anderen Gerät in Echtzeit zu verarbeiten ist für viele denkbare KI-Projekte eine interessante Option. Zahlreiche Videobrillen verfügen zwar über einen HDMI-Port, ermöglichen darüber aber ausschließlich das Abspielen von Videos von externen Quellen. Die Ausgabe über HDMI an ein bietet keine gängige FPV-Brille.

Die meisten Videobrillen verfügen über eine 3,5 mm AV-Schnittstelle über die Video und Au-

Table 1.5: Overview about analog FPV Goggles

Goggle (Product)	Resolution	Display	Video Output
Skyzone Cobra X V4	1280x720 px	LCD	analog A/V
Skyzone SKY04X Pro	1920x1080 px	OLED	analog A/V
Skyzone SKY04O Pro	1280x720 px	OLED	analog A/V
Skyzone SKY02O	640x400 px	LCD	analog A/V
FatShark Dominator	1920x1080 px	OLED	USB-C video output
FatShark Dominator HDO+	1920x1080 px	OLED	analog A/V
FatShark Recon HD	1920x1080 px	LCD	USB-C video output
Fat Shark Echo	800x480 px	LCD	no video output
Eachine EV300O	1024x768 px	OLED	analog A/V
Eachine EV300D	1280x960 px	LCD	analog A/V
Rotorama 800D	800x480 px	LCD	no video output

dio analog ein- und ausgegeben werden können. Mit Hilfe eines Videograbbers kann das Ausgabesignal an einen Computer weitergeleitet und dort verarbeitet werden.

TBD

Verfügt eine Videobrille über eine USB-C-Schnittstelle zur Ausgabe des Videosignals, kommt es darauf an, um das Videosignal wie bei einer Webcam als USB Video Class (UVC) exportiert wird, oder als HDMI-Signal. Bei einem UVC-Gerät kann der Videostrom direkt weiterverarbeitet werden. Handelt es sich hingegen um ein HDMI-Signal, ist auch ein geeigneter Videograbbers nötig, um das Ausgabesignal an einen Computer weiterzuleiten und zu verarbeiten.

2

Software for Using FPV Drones

TBD

2.1

Flight Controller Firmware

TBD

TBD

TBD

Software zum Betrieb von FPV-Drohnen

TBD

Flight Controller Firmware

Jeder Flugcontroller braucht ein Betriebssystem, das in erster Linie die Sensordaten (u.a. Gyroskop, Beschleunigungssensor, GPS, magnetischer Kompass) und die Steuerbefehle des Benutzers in Motorbefehle umsetzt. Zusätzlich implementieren die Betriebssysteme für Flugcontroller verschiedene Flugmodi (z.B. Acro, Angle, Horizon) und sie leiten Datenströme der Kamera an den Videosender weiter, implementieren ein On-Screen-Display (OSD), erstellen und speichern Log-Daten (Blackbox-Logs) zur nachträglichen Analyse von Flugverhalten, ermöglichen die Feineinstellung des Flugverhaltens mit Hilfe von Filtern und Mixern und bieten verschiedene Schnittstellen zur Kommunikation und Konfiguration.

Das Betriebssystem des Flugcontrollers implementiert die Firmware, die im Flash-Speicher abgelegt ist. Da alle gängigen Flugcontrollers-Firmwares Open-Source-Projekte sind, passiert es alle paar Jahre, dass sich Entwicklergruppen abspalten und Forks initiieren, die durch neue Features und aktiver Weiterentwicklung mittelfristig eventuell dem Projekt, aus dem Sie hervor gekommen sind, verdrängen. Auch passiert es, dass Projekte durch den Fortgang von Entwicklern oder veränderte Lebensentwürfe nicht mehr weiterentwickelt werden und mit der Zeit Obsolet werden.

Dieses Dokument stellt die Flugcontroller-Firmwares Betaflight, INAV und ArduPilot vor.

2.1.1

Betaflight

TBD

TBD

TBD

Betaflight

Betaflight ist eine Firmware für Flugcontroller von FPV-Drohnen. Die Installation und Konfiguration der Firmware geschieht bis Betaflight 4.5 mit der lokal installierten Software Betaflight Configurator. Neue Versionen verwenden hierfür die Webanwendung app.betacode.org.

Der Fokus bei der Entwicklung von Betaflight ist die Unterstützung des manuellen Fliegens (Freestyle, Racing, etc.). Ziele von Betaflight sind schnelle Reaktion auf Benutzereingaben und umfangreiche Einstellungsmöglichkeiten um das Flugerhalten zu optimieren (tuning).

Einstellungsmöglichkeiten Autonomes Fliegen unterstützt Betaflight – ganz im Gegensatz zu den alternativem Firmwares INAV oder ArduPilot – fast gar nicht. Ausnahmen sind der Rettungsmodus (*Rescue Mode*), der die Drohne im Fall von Verbindungsproblemen mit Hilfe eines GPS-Moduls automatisch zurückzukehren lässt, und ein experimenteller Modus um Höhe und Position automatisch zu halten.

Betaflight ist kompatibel zu praktisch allen am Markt verfügbaren Flugcontrollern und Empfängern und bietet eine intuitive Benutzeroberfläche.

2.1.2

INAV

TBD

2.1.3

ArduPilot

TBD

TBD

INAV

TBD

ArduPilot

ArduPilot legt als Flugcontroller-Firmware den Fokus auf vollautonomen Flug und komplexe Missionsprofile. Es ermöglicht Missionsplanung mit Wegpunkten, automatische Starts und automatisches Landen, Hindernisvermeidung, Follow-Me, etc. Hierfür nutzt ArduPilot nicht nur die üblichen Sensoren wie GPS, magnetischer Kompass, Geschwindigkeit, sondern kann auch Lidar-Sensoren zur Entfernung und Kameras einbeziehen.

Von den in diesem Dokument vorgestellten Flugcontroller-Firmwares braucht ArduPilot am meisten Speicher. Idealerweise sind zum Betrieb

von ArduPilot 2 MB Flash-Speicher verfügbar. Das bieten nur Flugcontroller mit einem H743 Mikrocontroller. Mit 1 MB Flash-Speicher (F405 und F745 Mikrocontroller) ist der Betrieb mit einem reduzierten Funktionsumfang möglich. Mit nur 512 kB (F411 und F722 Mikrocontroller) kann ArduPilot gar nicht verwendet werden.

2.2

Remote Control Firmware

TBD

Fernbedienung Firmware

TBD

2.2.1

EdgeTX

TBD

EdgeTX

TBD

2.3

Transmitter and Receiver Firmware

TBD

Sendemodul- und Empfänger-Firmware

TBD

2.3.1

ExpressLRS

TBD

ExpressLRS

TBD

3

AI Drone Projects

TBD

3.1

Object Detection

TBD

3.2

Auto Pilot

TBD

3.3

Follow Me Function

TBD

KI-Drohnen-Projekte

TBD

Objekterkennung

TBD

Autopilot

TBD

Follow-Me-Function

TBD

