

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 21, 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.

Ab Kapitel 3 folgenden Beschreibungen verschiedener KI-Anwendungen, die FPV-Drohnen zur Datenerfassung und/oder als Tarnsportvehikel nutzen. Vorgestellt werden Anwendungen,

TBD

die in Forschungsprojekten, Lehrveranstaltungen und Abschlussarbeiten in der Lehreinheit Informatik an der Frankfurt University of Applied Sciences entwickelt, implementiert und evaluiert wurde. Das Kapitel beschreibt zu jeder dieser KI-Anwendungen die benötigten zusätzlichen Hard- und Softwarekomponenten, nötige Schritte zur Realisierung und die Kosten.

Die üblicherweise zum Bau von FPV-Drohnen verwendeten Komponenten sind nicht in der Lage eine KI-Funktionalität bereitzustellen. Die Flugcontroller haben nicht die nötigen Rechen- und Speicherressourcen, um KI-Anwendungen lokal zu betreiben. Es ist in jedem Fall zusätzliche Hard- und Software nötig. Prinzipiell können die zusätzlichen Komponenten in der Drohne integriert werden und mitfliegen. Alternativ können die zusätzlichen Komponenten die die Drohnen vom Boden aus Steuern und/oder Daten von Ihnen abrufen und die KI-Funktionalität am Boden realisieren. In den jeweiligen Kapiteln werden verschiedene Realisierungsmöglichkeiten, deren Vor- und Nachteile und die Anschaffungskosten beschrieben.

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 | 3 |
| 1.2.1 Stack or AIO | 5 |
| 1.3 Motors | 8 |
| 1.3.1 Size of the Motors | 8 |
| 1.3.2 Electrical Voltage | 9 |
| 1.3.3 KV Value | 9 |
| 1.3.4 Propeller Mounting | 10 |
| 1.3.5 Frame Attachment | 10 |
| 1.4 Propeller | 11 |
| 1.4.1 Propeller Size (Diameter) | 11 |
| 1.4.2 Number of Blades | 11 |
| 1.4.3 Pitch | 12 |
| 1.5 Batteries | 13 |
| 1.5.1 Charge and Discharge Rate (C-Rate) | 13 |
| 1.5.2 Number of Cells (S4/S6) | 14 |
| 1.5.3 Plugs (XT30/XT60/XT90) for Discharge and Charge | 15 |
| 1.6 GPS | 16 |
| 1.7 Receiver | 17 |
| 1.8 Remote Control (Sender) | 18 |
| 1.9 Video Transmitter | 19 |
| 1.10 Camera | 21 |
| 1.11 FPV Goggles | 23 |
| 2 Software for Using FPV Drones | 25 |
| 2.1 Flight Controller Firmware | 25 |
| 2.1.1 Betaflight | 26 |
| 2.1.2 INAV | 27 |
| 2.1.3 ArduPilot | 27 |
| 2.2 Remote Control Firmware | 28 |
| 2.2.1 EdgeTX | 28 |
| 2.3 Transmitter and Receiver Firmware | 28 |
| 2.3.1 ExpressLRS | 28 |
| 3 Object Detection | 29 |
| 3.1 Object Detection by addition Hardware on the Drone | 30 |
| 3.1.1 Construction and Implementation | 32 |
| 3.1.2 Cost | 33 |
| 3.2 Object Detection by using the Live Image on the Ground | 33 |
| 3.2.1 Construction and Implementation | 33 |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 3.2.2 Cost | 33 |
| 4 Auto Pilot | 35 |
| 5 Follow Me Function | 37 |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Hardware-Komponenten zum Bau von FPV-Drohnen | 1 |
| 1.1 Rahmen | 1 |
| 1.2 Flugcontroller und Motorsteuerung | 3 |
| 1.2.1 Stack oder AIO | 5 |
| 1.3 Motoren | 8 |
| 1.3.1 Motoraufbau und -größe | 8 |
| 1.3.2 Elektrische Spannung | 9 |
| 1.3.3 KV-Wert | 9 |
| 1.3.4 Propelleraufnahme | 10 |
| 1.3.5 Rahmenbefestigung | 10 |
| 1.4 Propeller | 11 |
| 1.4.1 Propellergröße (Durchmesser) | 11 |
| 1.4.2 Anzahl der Blätter | 11 |
| 1.4.3 Steigung (Pitch) | 12 |
| 1.5 Akkus | 13 |
| 1.5.1 Lade- oder Entladerate (C-Wert) | 13 |
| 1.5.2 Anzahl der Zellen (S4/S6) | 14 |
| 1.5.3 Stecker (XT30/XT60/XT90) zum Entladen und Laden | 15 |
| 1.6 GPS | 16 |
| 1.7 Empfänger | 17 |
| 1.8 Fernbedienung (Sender) | 18 |
| 1.9 Videosender | 19 |
| 1.10 Kamera | 21 |
| 1.11 Videobrille (FPV-Brille) | 23 |
| 2 Software zum Betrieb von FPV-Drohnen | 25 |
| 2.1 Flight Controller Firmware | 25 |
| 2.1.1 Betaflight | 26 |
| 2.1.2 INAV | 27 |
| 2.1.3 ArduPilot | 27 |
| 2.2 Fernbedienung Firmware | 28 |
| 2.2.1 EdgeTX | 28 |
| 2.3 Sendemodul- und Empfänger-Firmware | 28 |
| 2.3.1 ExpressLRS | 28 |
| 3 Objekterkennung | 29 |
| 3.1 Objekterkennung mit zusätzlicher Hardware an der Drohne | 30 |
| 3.1.1 Aufbau und Implementierung | 32 |
| 3.1.2 Kosten | 33 |
| 3.2 Objekterkennung durch Auswertung des Livebilds am Boden | 33 |
| 3.2.1 Aufbau und Implementierung | 33 |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 3.2.2 Kosten | 33 |
| 4 Autopilot | 35 |
| 5 Follow-Me-Function | 37 |

1

Hardware Components for Building FPV Drones

Hardware-Komponenten zum Bau von FPV-Drohnen

TBD

Dieses Kapitel stellt die wichtigen Hardware-Komponenten zum Bau von FPV-Drohnen vor. Das Kapitel hat nicht den Anspruch, einen vollständigen Überblick über den Stand der Technik der jeweiligen Komponenten zu geben. Auch die Entwicklung der FPV-Drohnen in den letzten Jahren wird ausgeblendet.

TBD

Ziel dieses Kapitels ist es, Einsteigern einen leicht verständlichen Einstieg in das Themengebiet FPV-Drohnen zu geben, damit diese rasch die für sie nötigen Komponenten identifizieren können, um Drohnen für eigene Projekte zu entwerfen und zu bauen. Dieses ist Voraussetzung für die Identifikation und Installation der benötigten Software (siehe Kapitel 2) auf diesen Drohnen und der Realisierung einer KI-Funktionalität mit zusätzlicher Hardware (siehe Kapitel ??).

TBD

Die zum Bau einer FPV-Drohne typischen Komponenten zeigt Abbildung 1.1.

1.1

Frames

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

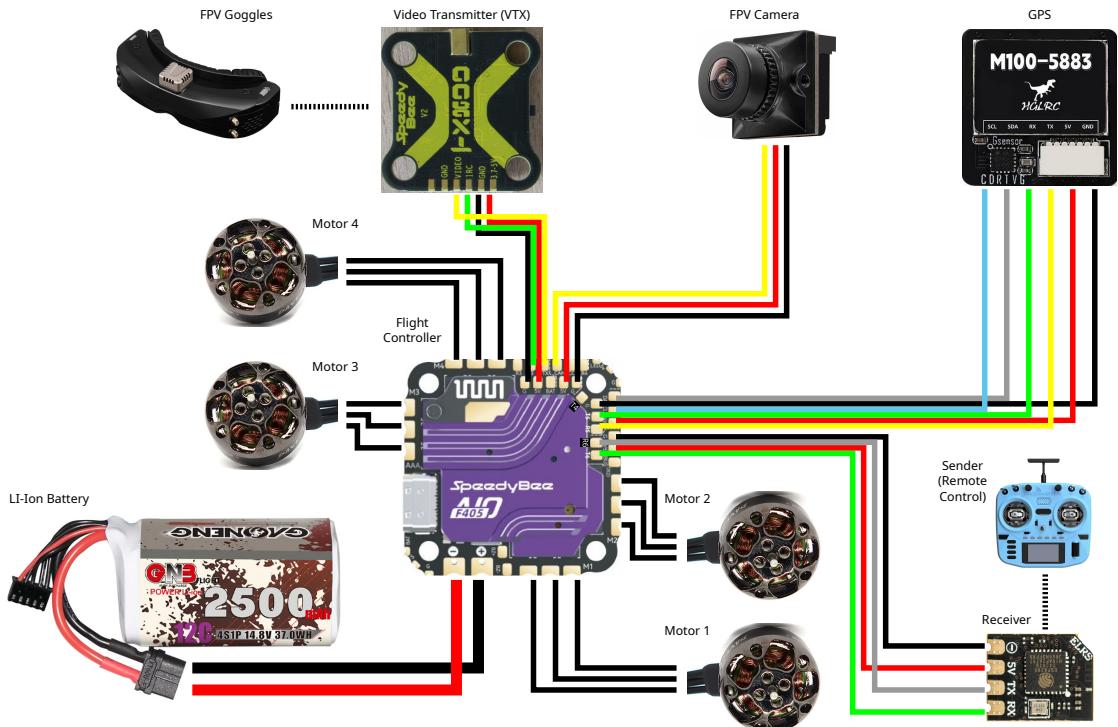


Figure 1.1: Components of a FPV Drone)

TBD

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 Flugcontrollers und des Videosenders. Gängige Maße sind:

TBD

TBD

TBD

- 30,5 x 30,5 mm
- 25,5 x 25,5 mm
- 20 x 20 mm

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

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.

TBD

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Rahmen ist die Form (Geometrie). Die nahe-liegendste Form ist True-X. Bei dieser symmetrischen Form sind alle Arme gleich lang. Eine weitere Form ist Squashed-X (gequetschtes X), bei der die Arme leicht abgewinkelt sind, was sich positiv auf die Flugeigenschaften auswirken soll. Bei der asymmetrischen Form Deadcat sind die vorderen Arme weiter außen und nach hinten versetzt, damit die Propeller nicht in das Sichtfeld hineinragen. Weitere Varianten sind unter anderem H-Frame und Box, die die Stabilität des Rahmens durch zusätzliche Verstrebungen verbessern sollen.

TBD

Wenn Drohnen auch in Innenräumen und in der Nähe von Personen geflogen werden sollen, ist ein Propellerschutz hilfreich. Dieser schützt nicht nur die Propeller, sondern auch die Umgebung. Drohnen für Racing, Freestyle- und Long-Range-Anwendungen haben normalerweise keinen Rahmen, da sie das Gesamtgewicht der Drohne erhöhen. Bei TinyWhoops und CineWhoops ist ein Propellerschutz Standard.

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, Beschleunigungs-

| | | |
|-----|--|--|
| TBD | | sensor, 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). |
| TBD | 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. | |
| TBD | 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 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

TBD

TBD

Stack oder AIO

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

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

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



Figure 1.2: Flight Controller SpeedyBee F405 AIO 40A Bluejay 25.5x25.5 (Front and Back)

TBD

TBD

Abbildung 1.2) zeigt einen einen AIO Flight-Controller. Die Abbildungen 1.3 und 1.4) zeigen die Vorder- und Rückseite eines Stack bestehen aus Flight-Controller und separater ESC-Platine.

Ein wichtiges Auswahlkriterium für Flugcontroller ist die Anzahl der nutzbaren UART-Schnittstellen zum Anschluss von Sensoren und Aktoren. Der in Abbildung 1.2 gezeigte Flugcontroller SpeedyBee F405 AIO verfügt über

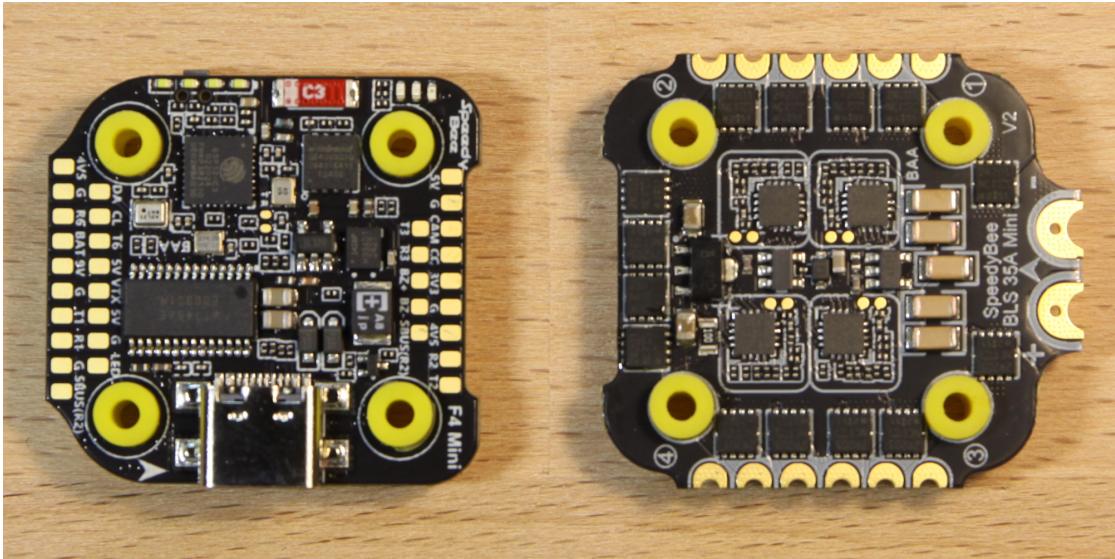


Figure 1.3: Flight Controller SpeedyBee F405 Mini 35A 20x20 Stack (Front)

TBD

TBD

sechs UART-Schnittstellen. Allerdings wird eine für die WLAN und USB-Schnittstellen zur Administration benötigt und eine weitere funktioniert nur unidirektional (Simplex). Sie kann nur Daten empfangen. Damit stehen lediglich vier vollwertige (bidirektionale) UART-Schnittstellen zur Verfügung, von denen üblicherweise drei durch die üblicherweise vorhandenen Komponenten Videosender, Empfänger und GPS-Modul belegt sind. Somit bleibt nur eine einzige freie UART-Schnittstelle.

Auch der in den Abbildung 1.3 und 1.4 gezeigte Flugcontroller SpeedyBee F405 Mini 35A Stack verfügt über sechs UART-Schnittstellen und auch hier bleibt nach Anschluss der üblicherweise vorhandenen Komponenten Videosender, Empfänger und GPS-Modul nur eine Schnittstelle frei verfügbar, da die Bluetooth-Schnittstelle zur Administration eine UART-Schnittstelle benötigt und die Motorsteuerung benötigt eine weitere UART-Schnittstelle zur Übertragung der Telemetriedaten.

Zum Vergleich ein anderer Flugcontroller, der in Abbildung 1.5 gezeigte Flywoo GOKU GN745 AIO 45A, verfügt über sieben UART-Schnittstellen, von denen keine für die USB-Schnittstelle belegt wird. Dadurch sind nach Anschluss der üblicherweise vorhandenen Komponenten Videosender, Empfänger und GPS-

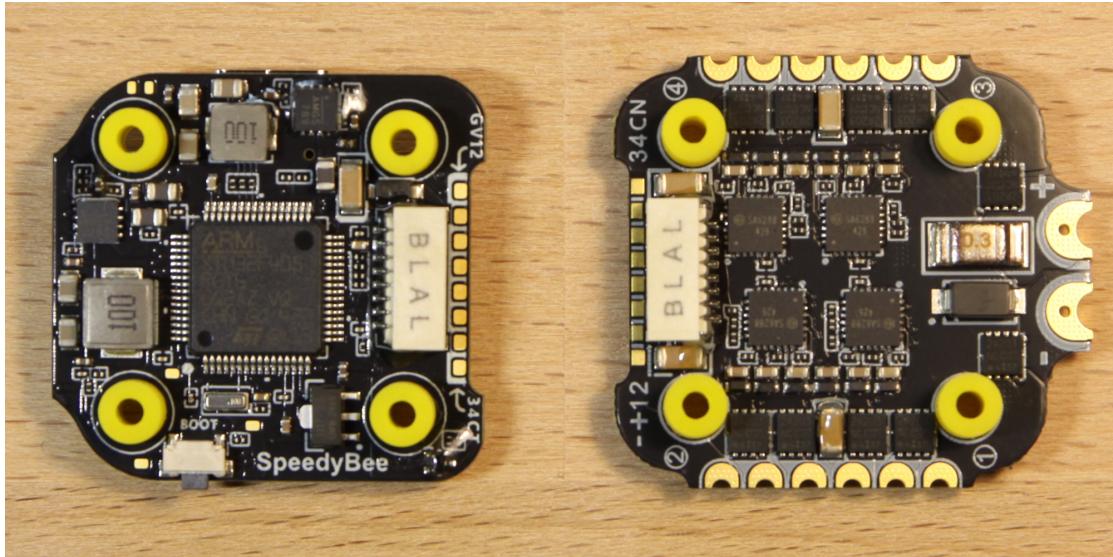


Figure 1.4: Flight Controller SpeedyBee F405 Mini 35A 20x20 Stack (Back)

Modul vier UART-Schnittstelle für weitere Sensoren und Aktoren verfügbar.

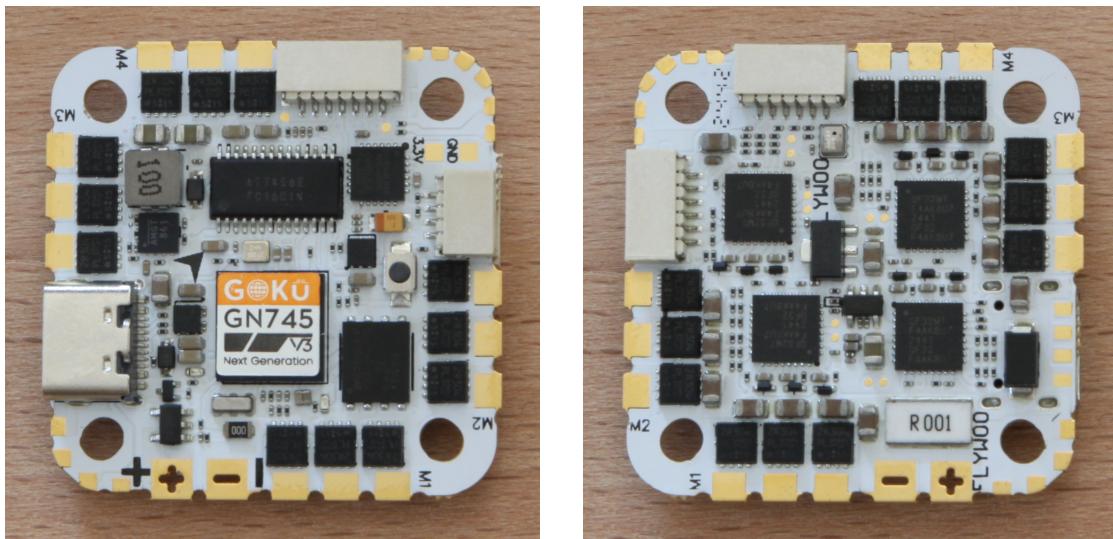


Figure 1.5: Flight Controller Flywoo GOKU GN745 AIO 45A 25.5x25.5 (Front and Back)

TBD

Tabelle 1.3 zeigt die typische Nutzung der verfügbaren UART-Schnittstellen einiger ausgewählter Flugcontroller und die damit einhergehenden Einschränkungen hinsichtlich Ihrer Nutzbarkeit für KI-Projekte, die häufig den Anschluss weiterer Sensoren und Aktoren erfordern.

Table 1.3: Recommended use and availability of UART Interfaces of some Flight Controllers

| Flight Controller | UART1 | UART2 | UART3 | UART4 | UART5 | UART6 | UART7 | UART8 |
|---------------------------|------------------------|------------------------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|
| SpeedyBee F405 AIO | MSP ^a | available ^b | VTX | available | GPS | Receiver | — | — |
| SpeedyBee F405 Mini Stack | VTX | Receiver | available | MSP ^a | Telem. ^c | GPS | — | — |
| SpeedyBee F4V3 Stack | VTX | Receiver | available | MSP ^a | Telem. ^c | GPS | — | — |
| Flywoo F722 PRO MINI V2 | available ^b | available | VTX | Receiver | GPS | Telem. ^c | — | — |
| Flywoo F722 PRO V2 | available | Receiver | VTX | available | GPS | Telem. ^c | — | — |
| SpeedyBee F7V3 Stack | VTX | Receiver | available | Telem. ^c | — | GPS | — | — |
| Flywoo GN745 AIO V3 | available | Receiver | VTX | available | available | GPS | available | — |
| MicoAir H743 V2 45A AIO | available | VTX | GPS | available | available | Receiver | Telem. ^c | available |
| T-Motor PACER H743 Stack | available | GPS | available | Telem. ^c | Receiver | VTX | MSP ^a | available |

^a MSP = Port for administration via the MultiWii Serial Protocol using Bluetooth and WIFI if available.

^b Offers unidirectional (simplex) communication. It can only receive data.

^c Receives telemetry data from the ESC.

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 von FPV-Drohnen sind dreiphasige, bürstenlose Gleichstrommotoren. Jeder Motor hat drei Anschlusskabel, die an die Motorsteuerung (ESC) oder direkt an einen AIO-Flugcontroller angelötet werden. Die Motorsteuerung schickt zeitlich versetzte Wechselströme in diese drei Leitungen. Durch das Umschalten der Ströme entsteht ein rotierendes Magnetfeld, das den Rotor mit Permanentmagneten in Drehung versetzt. Die Leitungen sind gleichwertig. Es spielt also keine Rolle in welcher Reihenfolge sie an den Motorsteuerung oder den AIO-Flugcontroller angelötet sind. Die Drehrichtung des Motors kann durch vertauschen von zwei beliebigen der drei Kabel erreicht werden. Alternativ ist es auch möglich die Drehrichtung in der grafischen Oberfläche der Firmware für jeden Motor separat zu prüfen und zu ändern.

Die Motoren bestehen aus einem Stator und einem Rotor. Der Stator enthält die Wicklungen und das Kugellager. Der Rotor ist die Mo-

TBD

torgloke 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.

TBD

Die Propelleraufnahme (siehe Abschnitt 1.3.4) geschieht auf einer M5-Welle mit 5 mm Durchmesser und einer passenden Mutter oder alternativ mit einer Welle mit 1,5 mm Durchmesser und zusätzlich zwei wenige M2-Schrauben am Motor befestigt.

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 (Drehzahl U/min) 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

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.

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

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.

TBD

1.4.2

Number of Blades

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. |
| TBD | | 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 | Steigung (Pitch) | |
| TBD | 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, <i>rutscht</i> 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. Eine Übersicht der charakteristischen Eigenschaften von LiPo-Akkus und Li-Ion-Akkus zeigt Tabelle 1.4).

Table 1.4: Comparison of Lithium-Polymere (LiPo) and Lithium-Ion (Li-Ion) Characteristics

| Feature | Li-Ion | LiPo |
|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Energy Density (Wh/kg) | Higher | Lower |
| Max. Discharge Current (C-Rate) | Lower (10-12 C) | Higher (75-120 C) |
| Weight (per stored energy) | Lighter | Heavier |
| Lifespan (number of charge cycles) | Longer | Shorter |
| Safety | More stable, more robust | More sensitive to over-/undercharge |
| Use Cases | Long-range, smooth flying, cruising | Racing, freestyle, aggressive maneuvers |

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. Der Grund dafür, dass bei FPV-Drohnen meist LiPo-Akkus verwendet werden, sind deren sehr hohe C-Werte von 75 bis 120 C. Der C-Wert gibt an, wie schnell ein Akku entladen werden kann. Li-Ion-Akkus bieten im Gegensatz dazu nur 10-12 C.

Bei einem 1500 mAh LiPo-Akku (siehe Abbildung 1.7) mit einem C-Wert 100 können somit $1,5A * 100 = 150$ Ampere dauerhaft abgegeben werden.

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.

LiPo-Akkus haben mehrere Nachteile. Die 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

TBD

TBD

TBD



Figure 1.6: A 4S Lithium-Polymer (LiPo) Battery with 1500 mAh Capacity and 100 C Capacity Rate

TBD

TBD

1.5.2

Number of Cells (S4/S6)

TBD

TBD

Bränden. Eine deutlich robustere Alternative zu LiPo-Akkus sind Lithium-Ionen-Akkus. Diese bieten allerdings viel geringere C-Werte.

Li-Ion-Akkus sind ideal für Szenarien, bei denen lange Flugzeiten, ruhiges Flugverhalten und eventuell lange Strecken (Long-Range) angestrebt ist. LiPo-Akkus hingegen sind besser geeignet für rasante Flugmanöver und Rennen.

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.

Anzahl der Zellen (S4/S6)

LiPo-Akkus und Li-Ion-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.

Die gängigsten Akkus sind 4S und 6S. Bei einem 4S-Akku sind 4 Zellen in Reihe geschaltet. Die Nennspannung ist $4 \times 3,7 V = 14,8 V$. Ist ein solcher Akku voll geladen ist seine Spannung

16,8 V. Eine Übersicht über die verschiedenen LiPo-Akkus enthält Tabelle 1.5).

Table 1.5: Overview of Lithium-Polymer (LiPo) and Lithium-Ion (Li-Ion) 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 1.7 gezeigte Akku mit 1500 mAh Kapazität wiegt hingegen ca. 185 g. Ein höheres Gesamtgewicht beeinflusst auch das Flugverhalten.

TBD

Li-Ion-Akkus enthalten üblicherweise in Reihe geschaltete 18650-Zellen. Die Kapazität der einzelnen Zellen hängt immer vom Hersteller und der Qualität der Zellen ab. Typische Kapazitäten sind zwischen 2500 und 3500 mAh. Ist eine höhere Kapazität gewünscht, müssen zusätzliche Zellen parallel geschaltet werden. Die Anzahl der Zellen und die Art Ihrer Verschaltung ist auf den Li-Ion-Akkus mit den Buchstaben S (Serie) und P (Parallel) angegeben. Am Markt verfügbare Li-Ion-Akkus sind häufig 3S1P, 4S1P, 4S2P, 6S1P, 6S2P.

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 alternativ über eine XT60-Gleichstromstecker. Es gibt auch sehr große Akkus mit XT90-Stecker. Zwei Kabel mit einer Buchse sind an die Motor-

TBD

TBD

steuerung (bei einem Stack) oder an den Flugcontroller bei einem AIO angelötet (siehe Abschnitt 1.2).

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.

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 Akkos oder sogar einen Brand und beugt einer Tiefentladung einzelner Zellen beim späteren Betrieb vor.

1.6

GPS

TBD

TBD

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.

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.

Verfügt ein GPS-Modul nur für sechs Anschlüsse (Lötpads oder Kabel), enthält es einen magnetischen Kompass. Verfügt das Modul aller-

dings 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 1.7) mit integriertem magnetischem Kompass sind in der Regel zwischen 20x20 mm und 25x25 mm groß.

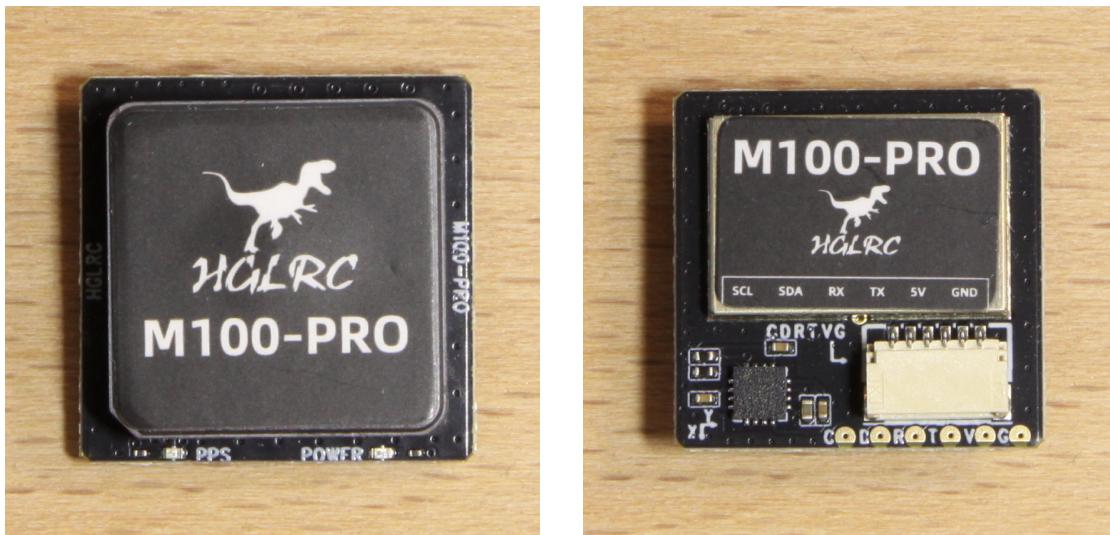


Figure 1.7: HGLRC M100-5883 M10 GPS Module 21x21 mm with built-in magnetic Compass (Front and Back)

1.7

Receiver

TBD

TBD

Empfänger

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 Frequenzbereich nutzen. Die gängigen Systeme nutzen die Frequenzbereiche 2.4 GHz und für Long-Range-Anwendungen 868 MHz in der EU bzw.

TBD

TBD

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 1.8), die auf der Platine integriert ist, und Empfänger mit einem (siehe Abbildung 1.9) oder zwei Anschlüssen für abnehmbare Antennen. Der üblicherweise verwendete Steckverbinder ist auch hier das filigrane 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.

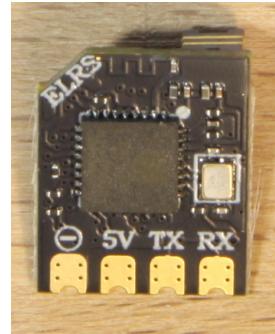
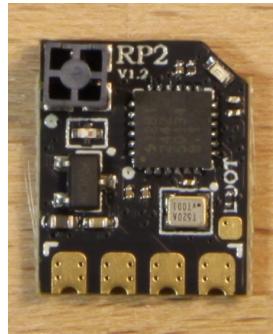


Figure 1.8: RadioMaster RP2 ELRS 2.4GHz Nano Receiver 13x11 mm with integrated Antenna (Front and Back)

1.8

Remote Control (Sender)

TBD

Fernbedienung (Sender)

Die verwendet Fernbedienung muss das gleiche Protokoll implementieren wie der verwendete Empfänger. Zudem müssen die gleichen Frequenzbereiche verwendet werden. Zu den Herstellern von zum ELRS-Protokoll kom-

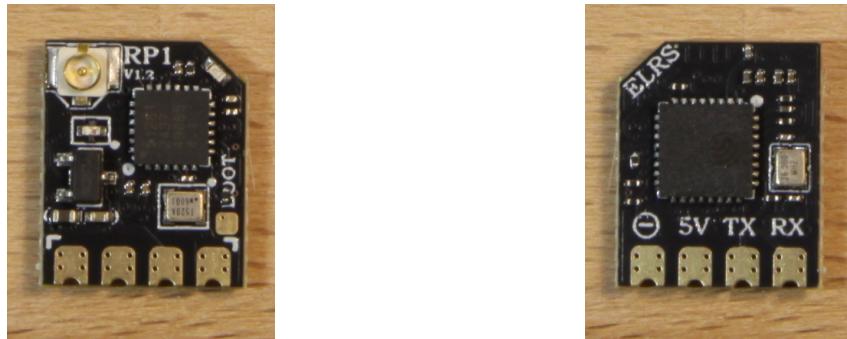


Figure 1.9: RadioMaster RP1 ELRS 2.4GHz Nano Receiver 13x11 mm with U.FL Antenna Connector (Front and Back)

TBD

patiblen 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.

1.9

Video Transmitter

TBD

Videosender

TBD

Der Videosender (VTX) überträgt das Livebild des der FPV-Camera über den eingestellten Kanal im festgelegten Band an die FPV Brille. Neben analogen Videosendern existieren auch verschiedene digitale Systeme, die zueinander inkompabil sind. Videosender werden als einzelnes Gerät oder als Kit mit Kamera und Antenne(n) verkauft. Einen analogen Videosender zeigt Abbildung 1.10.

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 1.6). Auffällig sind beim Race Band die großen Kanalabstände von 37 MHz, die Kanalüberlagerungen verhindern.

TBD

Der von einem Videosender zur Übertragung verwendete Kanal und das Band werden in der grafischen Oberfläche Firmware des Flugcontrollers festgelegt.

TBD

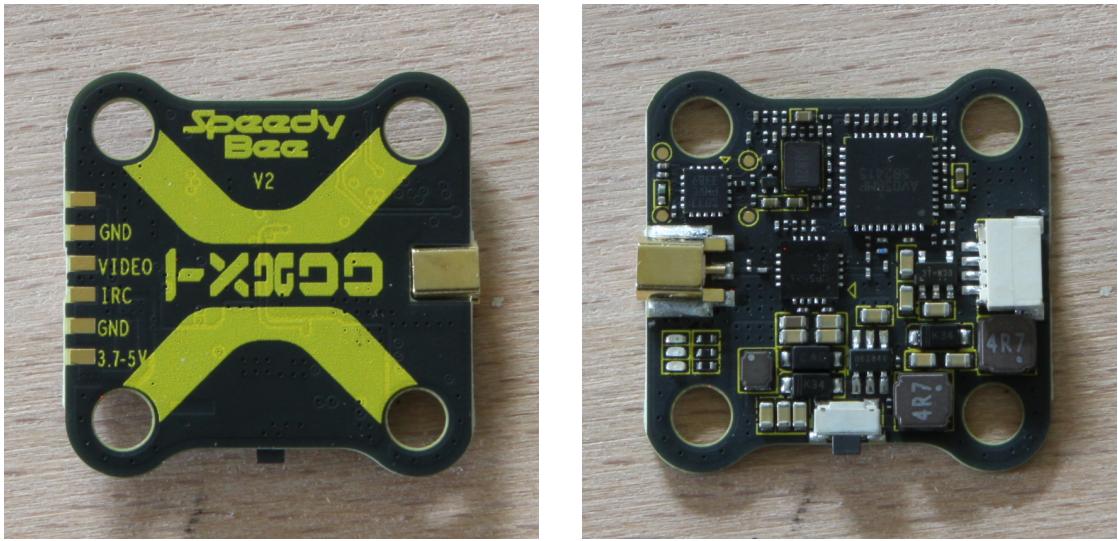


Figure 1.10: SpeedyBee TX800 FPV VTX Video Transmitter (Front and Back)

Table 1.6: 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

TBD

TBD

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 abreißt, und deutlich geringeren 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.

TBD

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)

TBD

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

TBD

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).

TBD

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

1.10

Camera

TBD

Kamera

Dieser Abschnitt befasst sich ausschließlich mit analogen analoge FPV-Kameras. Digitale Systeme zur Übertragung des Livebildes kamen bei den bisher durchgeführten Projekten nicht zum Einsatz.

TBD

TBD

TBD

TBD

TBD

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.

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.

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.

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

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 1.11 zeigt eine Nano-Kamera und Abbildung 1.12 zeigt eine Micro-Kamera.

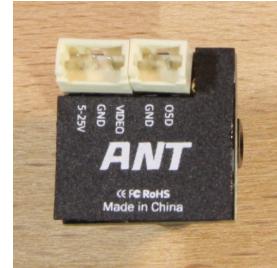


Figure 1.11: Caddx ANT Nano Analog Camera 1200 TVL 14x14 mm (Top and Back)

TBD

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.

Die Brennweite definiert das Sichtfeld. Je kleiner der Wert ist, desto größer ist das Sichtfeld, was vorteilhaft beim Fliegen ist. Eine niedrige Brennweite (z.B. 1.8 mm oder 2.1 mm) führt allerdings zu einem Fischaugen-Effekt und



Figure 1.12: RunCam Phoenix 2 Analog Camera 1000 TVL 19x19 mm (Top and Back)

TBD

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

Videobrille (FPV-Brille)

TBD

Die verwendete Videobrille muss zum Videosender passen. Komponenten, zur digitalen Livetickerübertragung 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 1.7) 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 Audio analog ein- und ausgegeben werden können. Mit Hilfe eines Videograbbers kann das Ausga-

TBD

TBD

Table 1.7: 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 |

TBD

besignal an einen Computer weitergeleitet und dort verarbeite werden.

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 Video-grabbers nötig, um das Ausgabesignal an einen Computer weiterzuleiten und zu verarbeiten.

2

Software for Using FPV Drones

TBD

Software zum Betrieb von FPV-Drohnen

Dieses Kapitel stellt die wichtigen Software-Komponenten zum Betrieb von FPV-Drohnen vor. Genau wie Kapitel 1 hat auf dieses Kapitel nicht den Anspruch, einen vollständigen Überblick über den Stand der verfügbaren Software zu geben. Vorgestellt werden eine Auswahl populärer Firmwares für Flugcontroller, Sender und Empfänger sowie einzelne nützliche Werkzeuge. Das Kapitel soll einen Überblick über die grundlegenden Funktionsumfang und sinnvolle Einsatzbereich geben und bei den ersten Schritten der Installation und Administration unterstützen.

2.1

Flight Controller Firmware

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-

TBD

TBD

Firmwares Open-Source-Projekte sind, passiert es alle paar Jahre, dass sich Entwicklergruppen abspalten und Forks initiieren, die durch neue Features und aktivere 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 Obsolete werden.

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

2.1.1

Betaflight

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.betaflight.com.

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.

TBD

Installation

TBD

Installation

TBD

Administration

TBD

Administration

TBD

2.1.2

INAV

TBD

INAV

TBD

Installation

TBD

Installation

TBD

Administration

TBD

Administration

TBD

2.1.3

ArduPilot

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.

TBD

Installation

TBD

Installation

TBD

Administration

TBD

Administration

TBD

2.2

Remote Control Firmware

TBD

Fernbedienung Firmware

TBD

2.2.1

EdgeTX

TBD

EdgeTX

TBD

Installation

TBD

Installation

TBD

2.3

Transmitter and Receiver Firmware

TBD

Sendemodul- und Empfänger-Firmware

TBD

2.3.1

ExpressLRS

TBD

ExpressLRS

TBD

Installation

TBD

Installation

TBD

3

Object Detection

TBD

TBD

- TBD

Objekterkennung

Objekterkennung ist eine der bekanntesten KI-Anwendungen. Zu den bekanntesten quelloffenen Softwarelösungen, die Objekterkennung ermöglichen, gehören das Framework TensorFlow (Lite) für Maschinelles Lernen in Zusammenarbeit mit der Bibliothek OpenCV (*Open Computer Vision*) zur Bildverarbeitung und Objekterkennung. Eine alternative Lösung ist das Objekterkennungs-Framework (*You Only Look Once*).

Objekterkennung mit FPV-Drohnen kann auf zwei grundsätzliche Methoden implementiert werden. Beide Realisierungskonzepte haben Vorteile und Nachteile, deren Gewichtung u.a. von den finanziellen Möglichkeiten, den verfügbaren Hardwarekomponenten, der Entfernung von Drohne und Benutzer, der Anzahl der Drohnen und nicht zuletzt den persönlichen Präferenzen abhängt.

- **Realisierungskonzept Edge-Knoten:** Die KI-Funktionalität erbringt ein Computer, der mit der Drohne mitfliegt. Diese Alternative beschreibt Abschnitt 3.1. Die Anschaffung zusätzlicher Hardware verursacht immer Kosten und macht die Drohne schwerer. Zudem benötigt zusätzliche Hardware Strom, was die Flugzeit reduziert. Ist ein Akkus mit höherer Kapazität erforderlich, steigt das Gewicht der Drohne zusätzlich. Vorteile dieses Realisierungskonzepts sind die potentiell sehr gute Skalierbarkeit. Die Verarbeitung der Sensordaten findet auf der Drohne statt. Nur die Ergebnisse (aggregierten Daten) müssen während des Drohnenflugs oder danach abgerufen. Dadurch reduziert sich die zu übertragene Datenmenge drastisch. Es handelt sich somit um eine Variante des Edge-Computing. Besonders wichtig ist

eine drastische Reduktion der zu übertragenen Daten in Szenarien mit mehreren Drohnen, die gleichzeitig fliegen und Daten sammeln, also Objekte erkennen sollen.

- TBD
- **Realisierungskonzept Übertragung aller Live-Daten:** Die KI-Funktionalität erbringt ein Computer am Boden indem er Zugriff auf das Livebild hat. Diese Alternative beschreibt Abschnitt 3.2. Eine einfache Möglichkeit der Implementierung eröffnet eine Videobrille mit AV-Schnittstelle und ein Videograbber. Vorteile dieses Realisierungskonzepts sind, dass es die Drohne nicht schwerer macht und die geringen zusätzlichen Anschaffungskosten, da ein Videograbber nur 15-20 € kostet. Zusätzliche Übertragungskapazitäten fallen bei diesem Implementierungskonzept nicht, wenn man davon ausgeht, dass die genutzten Drohne in jedem Fall Ihr Livebild über einen der verfügbaren Kanäle überträgt. Die Auswirkung dieser Sensordaten findet allerdings zentral auf einem Computer statt. In Szenarien mit mehreren Drohnen, die gleichzeitig fliegen und Daten sammeln, kann der Ressourcenaufwand der Datenauswertung, also der Objekterkennung, signifikant ansteigen und zusätzliche KI-Hardware am Boden erfordern.

3.1

Object Detection by addition Hardware on the Drone

TBD

Objekterkennung mit zusätzlicher Hardware an der Drohne

Es ist möglich, die zur Objekterkennung nötige Hard- und Software als zusätzliche Komponenten in der Drohne zu integrieren und diese Komponenten mitfliegen zu lassen. Sinnvollerweise handelt es sich dabei um einen platz- und stromsparenden Einplatinencomputer. Tabelle 3.1 zeigt die unterschiedlichen Dimensionen und Strombedarfe verschiedener Generationen des Einplatinencomputers Raspberry Pi.

Table 3.1: Generations of the Raspberry Pi Single-Board Computer

| Generation | CPU Cores | RAM | Size | Weight | Power Usage (idle) | Power Usage (peak) |
|-------------|--------------|---------|-------------|--------|-----------------------|-----------------------|
| Pi Zero W | 1 @ 1000 MHz | 512 MB | 65x30x5 mm | ~ 9 g | ~ 120 mAh | ~ 350 mAh |
| Pi Zero 2 W | 4 @ 1000 MHz | 512 MB | 65x30x5 mm | ~ 10 g | ~ 140 mAh | ~ 600 mAh |
| Pi 3 B+ | 4 @ 1200 MHz | 1 GB | 85x56x16 mm | ~ 50 g | ~ 500 mAh | ~ 1400 mAh |
| Pi 4 B | 4 @ 1500 MHz | 1-8 GB | 85x56x16 mm | ~ 50 g | ~ 600 mAh | ~ 1500 mAh |
| Pi 5 | 4 @ 2400 MHz | 2-16 GB | 85x56x16 mm | ~ 70 g | ~ 700 mAh | ~ 2500 mAh |

TBD

Im Vergleich zu den etwa scheckkartengroßen Modellreihen sind die Raspberry Zero Modelle deutliche kleiner, leichter und brauchen weniger Strom. Die Prozessorleistung des Raspberry Pi 2 W ist auch ausreichend um gängige KI-Frameworks neben dem Betriebssystem zu betreiben.

TBD

Da ein Raspberry Pi Einplatinencomputer, egal welcher Baureihe, nicht über die Prozessorleistung verfügt, um Objekterkennung in einem Videoteam zu realisieren, ist eine zusätzliche Hardware zur Beschleunigung der KI-Anwendung nötig. Beim hier vorgestellten Lösungsweg kommt zur Beschleunigung ein Google Coral TPU Accelerator zum Einsatz. Dieser 2019 erschienene KI-Beschleuniger bietet 4 Billionen Operationen pro Sekunde (Teroperations per second – TOPS), verbraucht je nach Geschwindigkeitseinstellung ca. 500-900 mAh und ist nur 65x30x8 mm groß. Das Gewicht dieses KI-Beschleunigers ist ca. 20 g. Zusätzlich ist noch ein USB-Kabel zum Anschluss nötig, das weitere 10-15 g wiegt. Der Kaufpreis ist ca. 80-90 €.

TBD

Da es nicht möglich ist, über den Flugcontroller oder über den VTX das Livebild der FPV-Kamera auch an Raspberry Pi weiterzuleiten, muss die Drohne eine weitere, zum Einplatinencomputer kompatible Kamera transportieren. Eine einfache und kostengünstige Lösung sind die Raspberry Pi Camera Module v1, v2 und v3. Diese unterscheiden sich primär in der Auflösung. Sie wiegen alle nur 3-4 g und sind ähnlich groß (ca. 25x24x10 mm). Alternativ kann auch die 2024 erschienene Raspberry Pi AI Camera verwendet werden. Diese enthält bereits einen KI-Beschleuniger, der 30 Bilder pro Sekunde zur Objekterkennung verarbeiten kann. Der Kaufpreis der Raspberry Pi AI Camera ist mit ca. 80 €, zwar höher als der der ande-

TBD

TBD

ren Camera-Module, aber dafür kann Sie einen KI-Beschleunigers wie den Google Coral TPU Accelerator komplett ersetzen, was bei einem Gewicht von ca. 6 g zu einer deutlichen Gewichtersparnis und geringeren Gesamtkosten führt.

Aus verschiedenen Gründen wie kurzfristige Hardwareverfügbarkeit war es bislang nicht möglich, die Raspberry Pi AI Camera in ein Drohnen-Projekt zu integrieren. Aus diesem Grund verwendet der hier voreingestellte Lösungsweg den Google Coral TPU Accelerator.

Abbildung 3.1 zeigt die Komponenten der FPV-Drohne aus Abbildung 1.1, erweitert um die zur lokalen Bilderkennung nötigen Komponenten, nämlich den Raspberry Pi Einplatinencomputer, ein Kameramodul, den Google Coral TPU Accelerator und einen BEC zur Umwandlung der elektrischen Spannung des Akkus in 5 V.

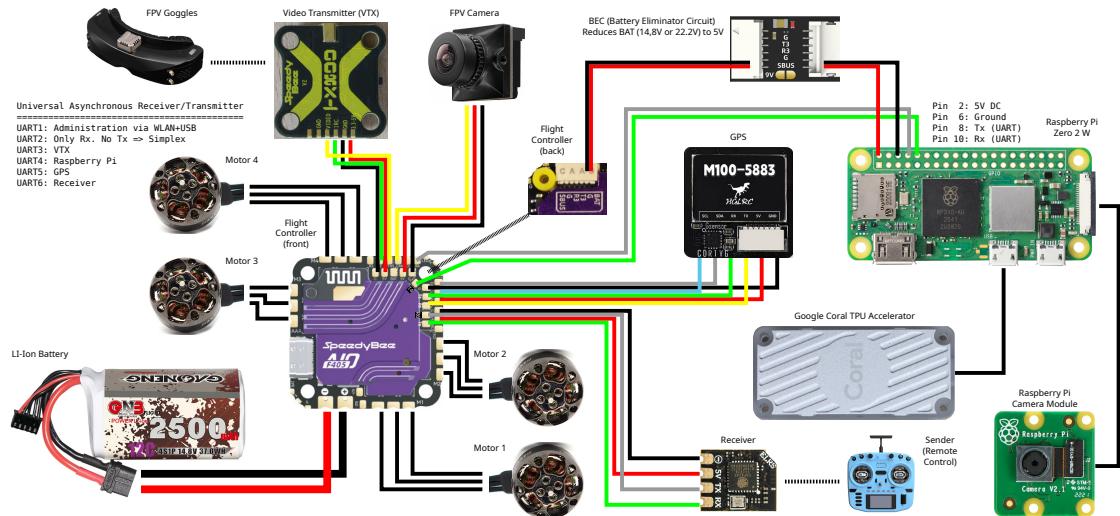


Figure 3.1: Components of a FPV Drone with additional Hardware Components for Object Detection by the Drone itself

3.1.1

Construction and Implementation

TBD

Aufbau und Implementierung

TBD

3.1.2

Cost

TBD

Kosten

TBD

3.2

Object Detection by using the Live Image on the Ground**Objekterkennung durch Auswertung des Livebilds am Boden**

TBD

Eine einfache Möglichkeit, auf das Livebild zugreifen, bietet die eventuell vorhandene AV-Schnittstelle der Videobrille. Das Videosignal kann mit Hilfe eines Videograbbers digitalisiert und an einen Computer zur Verarbeitung weitergeleitet werden.

3.2.1

Construction and Implementation

TBD

Aufbau und Implementierung

TBD

3.2.2

Cost

TBD

Kosten

TBD

4

Auto Pilot

TBD

Autopilot

TBD

5

Follow Me Function Follow-Me-Function

TBD

TBD

