

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

October 13, 2025

Preface

This document provides an introduction to the complex topic of drones with artificial intelligence. Its focus is on the development (including the selection of suitable hardware and software components), construction, and operation of drones for teaching and research purposes.

The insights presented in this document stem from the research project *AI-Assisted Drone Platform*, funded by the Connectom Networking and Innovation Fund of hessian.AI, and from the course *Drones with Artificial Intelligence* at the Frankfurt University of Applied Sciences.

Key criteria for selecting the components presented in this document include adaptability to different application scenarios, cost, robustness, long-term market availability, and the quality of documentation and manufacturer support.

The goal of this document is not to provide an exhaustive treatment of drones and AI, but rather to focus on the technologies and solutions that were current during its creation and with which practical experience was gained in the Computer Science program of Faculty 2 (Computer Science and Engineering) at the Frankfurt University of Applied Sciences.

Chapters 1 and 2 provide a concise overview of the hardware and software components required for building and operating FPV drones. For the AI projects presented here, drones primarily serve as tools and/or transport platforms. Chapter 3 contains helpful information for before and after the first flight.

Vorwort

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

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

Maßgebliche Kriterien bei der Auswahl der in diesem Dokument vorgestellten Komponenten sind unter anderem die Anpassbarkeit an unterschiedliche Einsatzszenarien, der Anschaffungspreis, die Robustheit, die langfristige Marktverfügbarkeit sowie die Qualität der Dokumentation und des Herstellersupports.

Die vollständige Abhandlung zu den Themen Drohnen und KI ist nicht Ziel dieses Dokuments. Der Fokus liegt auf den Technologien und Lösungen, die während der Erstellung aktuell waren und mit denen im Studienfeld Informatik des Fachbereichs 2 (Informatik und Ingenieurwissenschaften) der Frankfurt University of Applied Sciences praktische Erfahrungen gesammelt wurden.

Kapitel 1 und 2 stellen knapp die Hard- und Softwarekomponenten vor, die zum Bau und Betrieb von FPV-Drohnen nötig sind. Diese dienen zur Realisierung der hier vorgestellten KI-Projekte in erster Linie als Werkzeug und/oder Transportvehikel. Kapitel 3 enthält hilfreiche Hinweise vor dem ersten Flug und danach.

From Chapter 4 onward, various AI applications are described that use FPV drones for data collection and/or as transport platforms. The chapter presents applications developed, implemented, and evaluated in research projects, courses, and theses within the Computer Science unit at the Frankfurt University of Applied Sciences. Each project description includes the required additional hardware and software components, implementation steps, and associated costs.

The components typically used to build FPV drones are not capable of providing AI functionality on their own. Flight controllers lack the necessary computing and memory resources to run AI applications locally. Additional hardware and software are therefore required. These additional components can either be integrated into the drone or remain on the ground to control the drone and/or process data received from it. The respective chapters discuss different implementation options, their advantages and disadvantages, and associated costs.

We greatly appreciate your comments and suggestions for improvement.

Frankfurt am Main

Ab Kapitel 4 folgen Beschreibungen verschiedener KI-Anwendungen, die FPV-Drohnen zur Datenerfassung und/oder als Transportvehikel nutzen. Vorgestellt werden Anwendungen, die in Forschungsprojekten, Lehrveranstaltungen und Abschlussarbeiten in der Lehreinheit Informatik der Frankfurt University of Applied Sciences entwickelt, implementiert und evaluiert wurden. Das Kapitel beschreibt zu jeder dieser KI-Anwendungen die benötigten zusätzlichen Hard- und Softwarekomponenten, die Umsetzungsschritte und die Kosten.

Die üblicherweise zum Bau von FPV-Drohnen verwendeten Komponenten sind nicht in der Lage, KI-Funktionalität bereitzustellen. Die Flugcontroller verfügen nicht über die notwendigen Rechen- und Speicherressourcen, um KI-Anwendungen lokal auszuführen. Zusätzliche Hard- und Software ist daher erforderlich. Diese kann entweder in die Drohne integriert werden und mitfliegen oder am Boden verbleiben, um die Drohne zu steuern und/oder Daten zu empfangen und dort die KI-Funktionalität zu realisieren. In den jeweiligen Kapiteln werden verschiedene Realisierungsmöglichkeiten, deren Vor- und Nachteile sowie die Anschaffungskosten beschrieben.

Über Ihre Kommentare und Verbesserungsvorschläge freuen wir uns sehr.

*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	37
2.1.3 ArduPilot	43
2.2 Remote Control Firmware: EdgeTX	44
2.3 Transmitter and Receiver Firmware: ExpressLRS	46
3 Important Things before the first Flight	53
3.1 Security during Flight	53
3.2 Security before Flight	53
3.3 Secure use of LiPo Batteries	54
3.4 Loading of Batteries	54
3.5 Secure Attachment of loose Cables and other Components	54
3.6 Use the Appropriate Flight Mode	55
3.7 Practice with a Simulator	57

3.8 Automate the Pairing	57
4 Object Detection	59
4.1 Object Detection by addition Hardware on the Drone	60
4.1.1 Comparison of AI Accelerators	61
4.1.2 Construction and Implementation	64
4.1.3 Total Weight and Purchase Cost	65
4.2 Object Detection by using the Live Image on the Ground	66
4.2.1 Total Weight and Purchase Cost	67
5 Auto Pilot	69
6 Follow Me Function	71

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	37
2.1.3 ArduPilot	43
2.2 Fernbedienung Firmware: EdgeTX	44
2.3 Sendemodul- und Empfänger-Firmware: ExpressLRS	46
3 Wichtige Punkte vor dem ersten Flug	53
3.1 Sicherheit beim Flug	53
3.2 Sicherheit vor dem Flug	53
3.3 Sichere Verwendung von LiPo-Akkus	54
3.4 Laden von Akkus	54
3.5 Sichere Befestigung loser Kabel und sonstiger Komponenten	54
3.6 Den geeigneten Flugmodus verwenden	55
3.7 Mit einem Simulator üben	57

3.8 Die Kopplung automatisieren	57
4 Objekterkennung	59
4.1 Objekterkennung mit zusätzlicher Hardware an der Drohne	60
4.1.1 Vergleich von KI-Beschleunigern	61
4.1.2 Aufbau und Implementierung	64
4.1.3 Gesamtgewicht und Anschaffungskosten	65
4.2 Objekterkennung durch Auswertung des Livebilds am Boden	66
4.2.1 Gesamtgewicht und Anschaffungskosten	67
5 Autopilot	69
6 Follow-Me-Funktion	71

1

Hardware Components for Building FPV Drones

This chapter presents the most important hardware components required to build FPV drones. It does not aim to provide a comprehensive overview of the current state of technology. Likewise, recent developments in FPV drone technology are intentionally not addressed.

The goal of this chapter is to provide beginners with an easily understandable introduction to FPV drones. It aims to enable them to identify the components needed to design and build drones for their own projects. This forms the basis for selecting and installing the necessary software (see Chapter 2) and implementing AI functionality using (see Chapter 4, 5, and 6).

The typical components of an FPV drone without AI extensions are shown in Figure 1.1.

Hardware-Komponenten zum Bau von FPV-Drohnen

Dieses Kapitel stellt die wichtigsten Hardware-Komponenten zum Bau von FPV-Drohnen vor. Es erhebt nicht den Anspruch, einen vollständigen Überblick über den Stand der Technik zu geben. Auch die Entwicklung der FPV-Drohnen in den letzten Jahren wird bewusst ausgeklammert.

Ziel dieses Kapitels ist es, Einsteigern einen leicht verständlichen Zugang zum Thema FPV-Drohnen zu ermöglichen. Sie sollen in der Lage sein, die für ihre Projekte benötigten Komponenten zu identifizieren, um eigene Drohnen zu entwerfen und zu bauen. Dies ist die Voraussetzung für die Auswahl und Installation der notwendigen Software (siehe Kapitel 2) sowie die Realisierung KI-basierter Funktionen mit (siehe Kapitel 4, 5 und 6).

Die typischen Komponenten einer FPV-Drohne ohne KI-Erweiterung sind in Abbildung 1.1 dargestellt.

1.1

Frames

Der Rahmen verbindet alle Komponenten der Drohne miteinander. Das verwendete Material ist üblicherweise Carbon, ein leichtes, aber äußerst stabiles und verwindungssteifes Verbundmaterial aus Kohlenstofffasern. Seltener kommen Rahmen aus Kunststoff zum Einsatz. Der

Rahmen

The frame connects all components of the drone. It is usually made of carbon fiber, a lightweight yet highly rigid and strong composite material. Frames made of plastic are less common. The frame determines the propeller size (see Section 1.4).

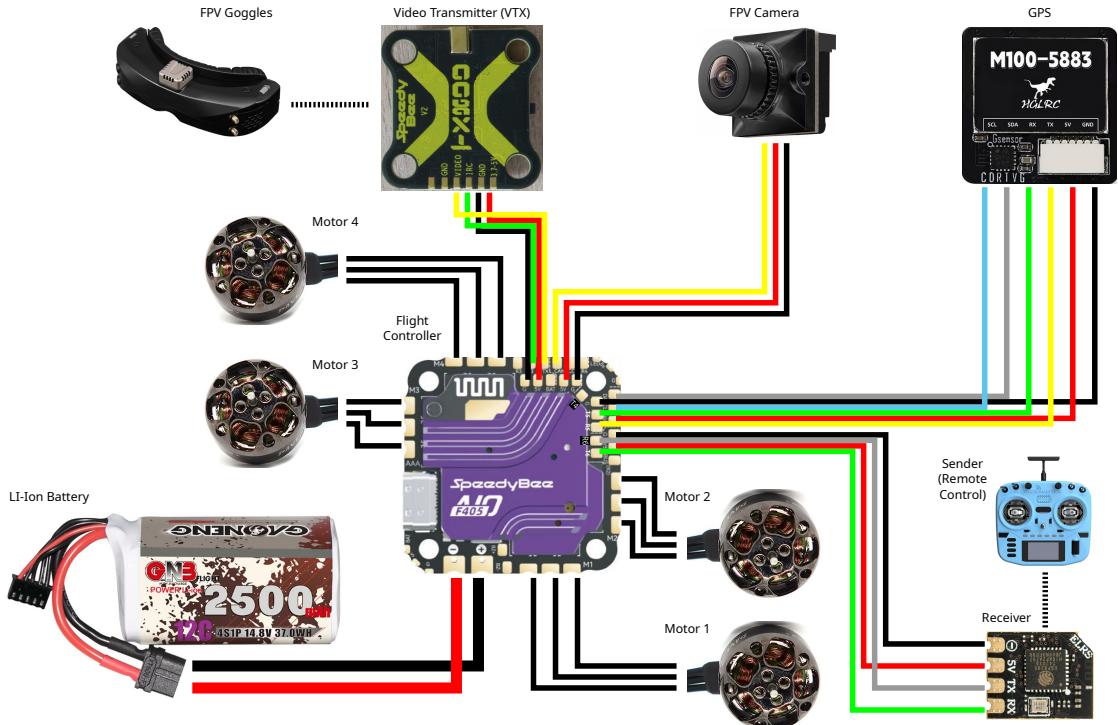


Figure 1.1: Components of a FPV Drone)

Rahmen bestimmt die Propellergröße (siehe Abschnitt 1.4).

The main electronic components such as the flight controller, video transmitter, receiver, and camera are mounted centrally on the frame for protection. The battery is typically placed on top of the drone to prevent damage during landings.

Larger frames provide more space for components and allow the use of more powerful motors (see Section 1.3) and larger propellers. However, frame size also increases the overall weight. Common frame sizes and their typical applications are listed in Table 1.1.

Important distinguishing criteria when selecting an appropriate frame include the hole spacing for mounting the flight controller and the video transmitter. Common dimensions are:

- 30.5×30.5 mm
- 25.5×25.5 mm
- 20×20 mm

Die wichtigsten elektronischen Komponenten wie Flugcontroller, Videosender, Empfänger und Kamera werden zentral auf dem Rahmen montiert, um sie 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 und ermöglichen die Nutzung leistungsstärkerer Motoren (siehe Abschnitt 1.3) und größerer Propeller. Mit zunehmender Rahmengröße steigt jedoch auch das Gesamtgewicht. Gängige Rahmengrößen und deren typische Anwendungen sind in Tabelle 1.1 aufgeführt.

Wichtige Unterscheidungskriterien bei der Auswahl des passenden Rahmens sind auch die Abstände der Bohrlöcher zur Befestigung des Flugcontrollers und des Videosenders. Gängige Maße sind:

- $30,5 \times 30,5$ mm
- $25,5 \times 25,5$ mm
- 20×20 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

If a frame does not provide matching mounting holes for the selected flight controller and video transmitter, a 3D-printed adapter can help — provided there is sufficient space within the frame.

Another distinguishing feature of frames is their geometry. The most straightforward design is the True-X shape, where all arms are of equal length. Another variant is the Squashed-X shape, in which the arms are slightly angled to improve flight characteristics. The asymmetrical Deadcat design positions the front arms farther outward and slightly backward so that the propellers do not enter the camera's field of view. Other variants, such as the H-frame and box frame, aim to increase frame stability through additional reinforcements.

If drones are to be flown indoors or near people, propeller guards are highly recommended. They protect not only the propellers but also the surroundings. Drones intended for racing, freestyle, or long-range applications typically have no propeller guards, as they increase the overall weight. For TinyWhoops and CineWhoops, however, propeller protection is standard.

Verfügt ein Rahmen nicht über passende Bohrlöcher für den ausgewählten Flugcontroller und den Videosender, kann ein per 3D-Drucker hergestellter Adapter helfen, sofern im Rahmen genügend Platz dafür vorhanden ist.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Rahmen ist deren Geometrie. Die naheliegendste Form ist die True-X-Form, bei der alle Arme gleich lang sind. Eine weitere Variante ist die Squashed-X-Form (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 der Kamera hineinragen. Weitere Varianten sind unter anderem H-Frame und Box, die die Stabilität des Rahmens durch zusätzliche Verstrebungen verbessern sollen.

Wenn Drohnen in Innenräumen oder in der Nähe von Personen geflogen werden sollen, ist ein Propellerschutz sehr empfehlenswert. Er schützt nicht nur die Propeller, sondern auch die Umgebung. Drohnen für Racing-, Freestyle- und Long-Range-Anwendungen haben normalerweise keinen Propellerschutz, da er das Gesamtgewicht der Drohne erhöht. Bei TinyWhoops und CineWhoops ist ein Propellerschutz hingegen Standard.

1.2

Flight Controller and Electronic Speed Controller

The flight controller (FC) is the central component of every drone. It processes sensor data

Flugcontroller und Motorsteuerung

Der Flight Controller (FC) ist die zentrale Komponente jeder Drohne. Der FC verarbeitet die

from the gyroscope, accelerometer, barometer, and GPS module. Using control algorithms, it stabilizes the drone's attitude and receives pilot commands through the receiver. In addition, the FC controls the motors via the electronic speed controllers (ESC).

The FPV camera and video transmitter are also connected to the FC, which supplies them with power from the battery and controls their operation. The FC additionally transmits telemetry data as an on-screen display (OSD) to the video transmitter.

Common flight controllers use an STM32 microcontroller, which also stores the firmware. Modern MCUs include the F4, F7, and H7 series. These differ in clock speed and memory capacity (see Table 1.2). The available processing power and memory limit which firmware versions can be used effectively.

Sensordaten von Gyroskop, Beschleunigungssensor, Barometer und GPS-Modul. Er stabilisiert die Fluglage durch Regelalgorithmen und empfängt über den Empfänger die Steuerbefehle des Piloten. Zudem steuert der FC die Motoren über die Electronic Speed Controller (ESC).

Auch die FPV-Kamera und der Videosender sind mit dem FC verbunden. Er versorgt sie mit Strom aus dem Akku und steuert ihre Funktionen. Zudem überträgt der FC Telemetriedaten als On-Screen-Display (OSD) an den Videosender.

Gängige Flight Controller verwenden einen STM32-Mikrocontroller, auf dem auch die Firmware gespeichert ist. Moderne MCUs sind die Serien F4, F7 und H7. Sie unterscheiden sich in ihrer Taktfrequenz und Speicherkapazität (siehe Tabelle 1.2). Die vorhandenen Rechen- und Speicherressourcen begrenzen, welche Firmware-Versionen sinnvoll eingesetzt werden können.

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

Betaflight (see Section 2.1.1) runs on all, and INAV (see Section 2.1.2) on almost all of the microcontrollers listed in Table 1.2. ArduPilot (see Section 2.1.3) requires at least 1 MB of flash memory for limited operation. The full range of functions is available only with 2 MB of flash memory.

The electronic speed controllers (ESCs) control the motors. The ESC is one of the most heavily stressed components of a drone, as it often handles continuous currents of 10 to 20 amperes.

Separate ESCs mounted as individual boards are now uncommon. In modern drones, four or more ESCs are combined on a single board—known as a 4-in-1 ESC—for motor control. The motors and the power supply connection to the battery (see Section 1.5) are soldered directly to this board.

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

Die Electronic Speed Controller (ESCs) steuern die Motoren. Der ESC ist eines der am stärksten belasteten Bauteile der Drohne, da durch ihn häufig Dauerströme von 10 bis 20 Ampere fließen.

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

1.2.1

Stack or AIO

The combination of a separate board for motor control and a flight controller is called a stack.

If the ESCs are located on the same board as the flight controller, the unit is referred to as an All-In-One Flight Controller (AIO FC).

In smaller drones (2 to 4 inches), AIO FCs are commonly used due to limited space. Larger drones typically use stacks. One advantage of stacks is that separate motor controllers with higher continuous current ratings are available on the market—typically between 45 and 70 A. In addition, FCs used in stacks generally offer more soldering pads, larger pads, often additional connectors, and more usable UART interfaces for sensors and actuators compared to AIO FCs.

Stack oder AIO

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

Befinden sich die ESCs auf der gleichen Platine wie der Flugcontroller, 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 Stacks ist, dass separate Motorsteuerungen mit höheren Dauerströmen am Markt verfügbar sind – typischerweise zwischen 45 und 70 A. Zudem bieten die FCs von Stacks tendenziell mehr Platz für Lötpads, größere Lötpads, häufig zusätzliche Steckverbindungen und mehr nutzbare UART-Schnittstellen für Sensoren und Aktoren als AIO FCs.



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

Figure 1.2 shows an AIO flight controller. Figures 1.3 and 1.4 show the front and back sides of a stack consisting of a flight controller and a separate ESC board.

An important selection criterion for flight controllers is the number of usable UART interfaces for connecting sensors and actuators. The flight controller shown in Figure 1.2, the SpeedyBee F405 AIO, has six UART interfaces. However,

Abbildung 1.2 zeigt einen AIO-Flight-Controller. Die Abbildungen 1.3 und 1.4 zeigen die Vorder- und Rückseite eines Stacks, bestehend 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

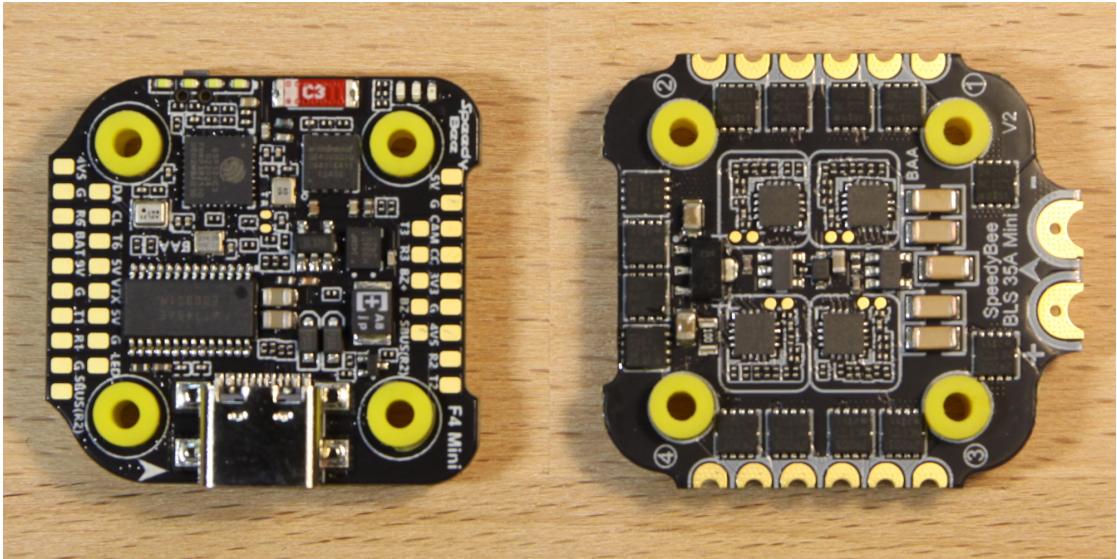


Figure 1.3: Flight Controller SpeedyBee F405 Mini and BSC 35A 20x20 Stack (Front)

one is used for Wi-Fi and USB administration, and another operates only unidirectionally (simplex), meaning it can only receive data. This leaves only four fully functional (bidirectional) UART interfaces, of which three are typically occupied by the video transmitter, receiver, and GPS module. Therefore, only one free UART interface usually remains.

The flight controller shown in Figures 1.3 and 1.4, the SpeedyBee F405 Mini 35A Stack, also has six UART interfaces. Here, too, after connecting the commonly used components — video transmitter, receiver, and GPS module — only one interface remains available. This is because one UART is used by the Bluetooth interface for administration, and another is used by the ESC for telemetry data transmission.

For comparison, the flight controller shown in Figure 1.5, the Flywoo GOKU GN745 AIO 45A, offers seven UART interfaces. None of them is used for USB, but one is reserved for telemetry data transmission. After connecting the common components — video transmitter, receiver, and GPS module — three UART in-

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

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

Zum Vergleich: Der in Abbildung 1.5 gezeigte Flugcontroller Flywoo GOKU GN745 AIO 45A verfügt über sieben UART-Schnittstellen. Keine davon ist für die USB-Schnittstelle belegt, jedoch wird eine für die Übertragung von Telemetriedaten verwendet. Nach dem Anschluss der üblichen Komponenten – Videosender, Empfänger und GPS-Modul – bleiben somit drei

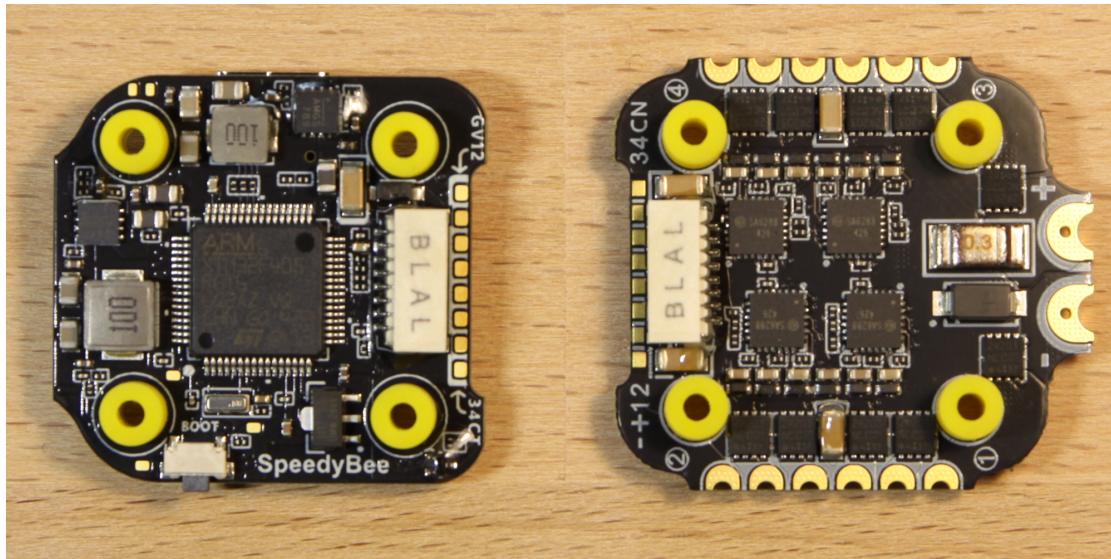


Figure 1.4: Flight Controller SpeedyBee F405 Mini and BSC 35A 20x20 Stack (Back)

terfaces remain available for additional sensors and actuators.

UART-Schnittstellen für weitere Sensoren und Aktoren verfügbar.

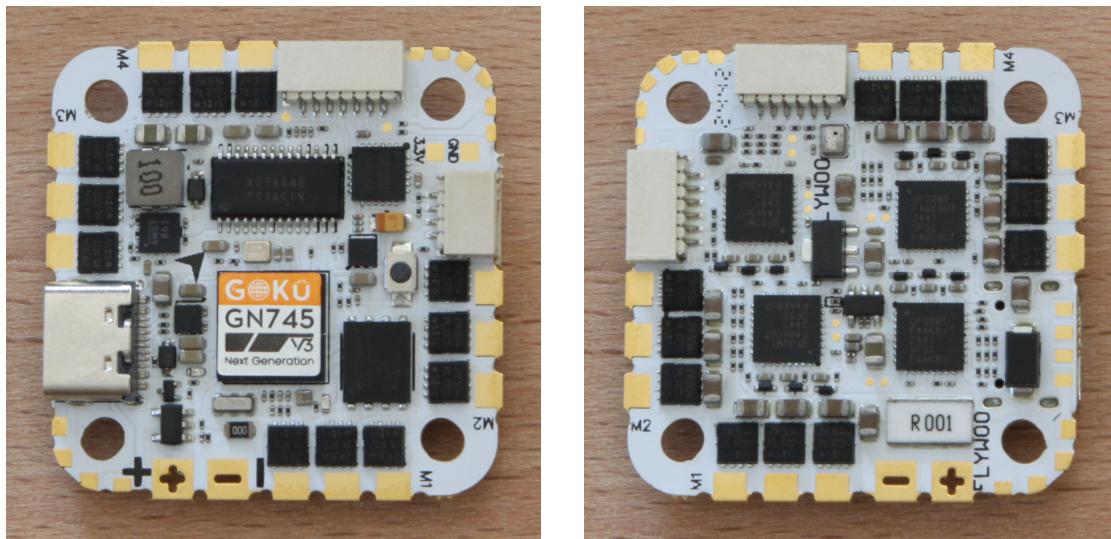


Figure 1.5: Flight Controller Flywoo GOKU GN745 AIO 45A 25.5x25.5 (Front and Back)

Table 1.3 shows the typical use of the available UART interfaces of selected flight controllers and the resulting limitations regarding their suitability for AI projects, which often require connecting additional sensors and actuators.

Tabelle 1.3 zeigt die typische Nutzung der verfügbaren UART-Schnittstellen einiger ausgewählter Flugcontroller und die damit einhergehenden Einschränkungen hinsichtlich ihrer Eignung 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 / F4V4 Stack	VTX	Receiver	available	MSP ^a	Telem. ^c	GPS	—	—
Flywoo F722 PRO MINI V2	available ^b	Receiver	VTX	available	GPS	Telem. ^c	—	—
Flywoo F722 PRO V2	available ^b	Receiver	VTX	available	GPS	Telem. ^c	—	—
GEPRC F722 35A AIO	VTX	Receiver	GPS	available	available	—	—	—
SpeedyBee F7V3 Stack	VTX	Receiver	available	Telem. ^c	—	GPS	—	—
Flywoo GN745 AIO V3	available	Receiver	VTX	available	available	GPS	Telem. ^c	—
Axisflying F745 40A AIO AM32	VTX	Receiver	GPS	?	available	available	available	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

Motors differ in their design (construction and size), the operating voltage (in volts), rotational speed (KV rating), propeller mount, and the method of attachment to the frame.

Motoren

Motoren unterscheiden sich in ihrem Aufbau (Konstruktion und Größe), der elektrischen Spannung (in Volt), mit der sie betrieben werden, der Drehzahl (KV-Wert), der Aufnahme des Propellers und der Befestigung am Rahmen.

1.3.1

Size of the Motors

The motors used in FPV drones are three-phase, brushless DC motors. Each motor has three connection wires that are soldered to the electronic speed controller (ESC) or directly to an AIO flight controller. The ESC sends time-shifted alternating currents through these three wires. By switching the current phases, a rotating magnetic field is created, which drives the rotor equipped with permanent magnets. The three wires are equivalent, so the order in which they are soldered to the ESC or flight controller does not matter. The motor's rotation direction can be changed by swapping any two of the three wires. Alternatively, the direction can be checked and reversed in the firmware's graphical interface for each motor individually.

The motors consist of a stator and a rotor. The stator contains the windings and the bear-

Motoraufbau und -größe

Die Motoren von FPV-Drohnen sind dreiphasige, bürstenlose Gleichstrommotoren. Jeder Motor besitzt 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 Bewegung versetzt. Die Leitungen sind gleichwertig – die Reihenfolge, in der sie angelötet werden, spielt keine Rolle. Die Drehrichtung des Motors kann durch Vertauschen von zwei beliebigen der drei Kabel geändert werden. Alternativ lässt sich die Drehrichtung in der grafischen Benutzeroberfläche der Firmware für jeden Motor separat prüfen und anpassen.

Die Motoren bestehen aus einem Stator und einem Rotor. Der Stator enthält die Wicklun-

ing, while the rotor—the motor bell—carries the magnets and performs the actual rotation. Each motor is identified by a numerical code that specifies the stator's diameter and height in millimeters. For example, a motor labeled *2306* has a stator with a diameter of 23 mm and a height of 6 mm.

The larger the stator volume, the higher the motor's torque and overall performance. Larger motors also have better thermal robustness. Smaller motors, by contrast, are lighter and more efficient under low loads.

Propellers (see Section 1.3.4) are typically mounted on an M5 shaft with a 5 mm diameter using a matching nut, or alternatively on a 1.5 mm shaft secured with two small M2 screws.

gen und das Kugellager, während der Rotor – die Motorglocke – die Magnete trägt und die eigentliche Drehbewegung ausführt. Jeder Motor ist mit einer Zahlenkombination gekennzeichnet, die den Durchmesser und die Höhe des Stators in Millimetern angibt. Ein Motor mit der Bezeichnung *2306* besitzt beispielsweise einen Stator mit 23 mm Durchmesser und 6 mm Höhe.

Je größer das Statorvolumen, desto höher sind Drehmoment und Gesamtleistung des Motors. Größere Motoren sind zudem thermisch robuster, während kleinere Motoren leichter und bei geringer Last effizienter arbeiten.

Die Propelleraufnahme (siehe Abschnitt 1.3.4) erfolgt in der Regel auf einer M5-Welle mit 5 mm Durchmesser und einer passenden Mutter oder alternativ auf einer 1,5 mm-Welle, die mit zwei kleinen M2-Schrauben am Motor befestigt wird.

1.3.2

Electrical Voltage

Motors and batteries (see Section 1.5) must be compatible. 4S motors require 4S batteries with a maximum voltage of 16.8 V, while 6S motors require 6S batteries with a maximum voltage of 25.2 V.

4S components are usually cheaper and lighter but provide less power. 6S components offer more power or longer flight time but are generally heavier – especially the batteries. For lightweight and cost-effective drones, 4S is often the better choice. Some motors can handle both 4S and 6S voltages, making them more versatile in use.

Elektrische Spannung

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

Komponenten für 4S sind meist günstiger und leichter, bieten dafür aber weniger Leistung. 6S-Komponenten liefern mehr Leistung oder längere Flugzeiten, sind jedoch in der Regel schwerer – insbesondere die Akkus. Für leichte und kostengünstige Drohnen ist 4S häufig die bessere Wahl. Es gibt auch Motoren, die sowohl mit 4S- als auch mit 6S-Akkus betrieben werden können und dadurch flexibler einsetzbar sind.

1.3.3

KV Value

The KV value describes how fast a motor spins per volt under no load, measured in revolutions per minute (RPM). For example, a 3000 KV motor spins at 3000 RPM per volt. When powered by a 4S battery (see Section 1.5) with approximately 16 V, this motor would have a no-load speed of about $3000 \times 16 \approx 48000$ RPM.

KV-Wert

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

Motors with high KV values (2800–7000 KV) are more agile and provide faster response times but generate less torque per ampere. They are well suited for smaller propellers and lighter drones. Motors with lower KV values (1500–2450 KV) deliver higher torque per ampere and are better suited for larger propellers and heavier drones.

A higher KV value does not mean that a motor is more powerful than one with a lower KV value. It simply means the motor spins faster, but also draws more current to produce thrust.

1.3.4

Propeller Mounting

Larger motors (e.g., 22xx, 23xx, 24xx) for drones of 5 inches and above typically feature an M5 shaft with a 5 mm diameter for propeller mounting. The propellers are placed directly onto the motor shaft and secured with a nut. Smaller motors (e.g., 13xx, 14xx, 18xx) for drones up to 3.5 inches usually have much smaller shafts of 1.5 mm in diameter, where the propellers are attached with two screws. Motors for medium-sized drones (e.g., 20xx, 21xx) with 3.5 or 4-inch propellers are available in both M5 and 1.5 mm shaft variants.

1.3.5

Frame Attachment

When selecting motors, it is important to ensure that the mounting holes on the frame match in number, spacing, and diameter. Motors are typically attached to the frame using three or four screws (M1.4, M2, or M3). On smaller frames, the holes are arranged in an equilateral triangle or a square pattern. Common mounting hole distances are 7 mm, 9 mm, 12 mm, 16 mm, or 19 mm.

Motoren mit hohen KV-Werten (2800–7000 KV) sind agiler und ermöglichen schnellere Reaktionen, erzeugen jedoch ein geringeres Drehmoment pro Ampere. Sie eignen sich gut für kleinere Propeller und leichtere Drohnen. Motoren mit niedrigen KV-Werten (1500–2450 KV) liefern ein höheres Drehmoment pro Ampere und sind für größere Propeller und schwerere Drohnen besser geeignet.

Ein hoher KV-Wert bedeutet nicht, dass ein Motor stärker ist als ein Motor mit einem niedrigeren KV-Wert. Er dreht lediglich schneller, benötigt dafür aber auch mehr Strom, um denselben Schub zu erzeugen.

Propelleraufnahme

Größere Motoren (z. B. 22xx, 23xx, 24xx) für Drohnen ab 5 Zoll besitzen zur Propelleraufnahme meist eine M5-Welle mit 5 mm Durchmesser. Die Propeller werden direkt auf die Motorwelle gesteckt und mit einer Mutter gesichert. Kleinere Motoren (z. B. 13xx, 14xx, 18xx) für Drohnen bis 3,5 Zoll haben in der Regel eine deutlich kleinere Welle mit 1,5 mm Durchmesser, an der die Propeller mit zwei Schrauben befestigt werden. Motoren (z. B. 20xx, 21xx) für mittelgroße Drohnen (3,5 oder 4 Zoll) sind sowohl mit M5-Wellen als auch mit 1,5 mm-Wellen erhältlich.

Rahmenbefestigung

Bei der Auswahl der Motoren ist darauf zu achten, dass die Bohrlöcher des Rahmens in Anzahl, Abstand und Durchmesser übereinstimmen. Üblicherweise werden die Motoren mit drei oder vier Schrauben (M1,4, M2 oder M3) am Rahmen befestigt. Bei kleinen Rahmen sind die Schraubenlöcher in Form eines gleichseitigen Dreiecks oder als Quadrat angeordnet. Gängige Lochabstände sind 7 mm, 9 mm, 12 mm, 16 mm oder 19 mm.

1.4

Propeller

Propellers convert the motor's rotational movement into thrust (lift) and control forces. Their diameter, pitch, and number of blades influence thrust, efficiency, noise level, and flight behavior. This document considers only drones with four propellers, although other configurations such as hexacopters and octocopters are also possible.

Propeller

Die Propeller wandeln die Drehbewegung des Motors in Schub (Lift) und Steuerkräfte um. Propellergröße (Durchmesser), Steigung (Pitch) und Blätterzahl beeinflussen Schub, Effizienz, Geräuschentwicklung und Flugverhalten. Dieses Dokument berücksichtigt ausschließlich Drohnen mit vier Propellern, auch wenn andere Konfigurationen wie Hexacopter und Octocopter ebenfalls möglich sind.

1.4.1

Propeller Size (Diameter)

TBD

Die Propellergröße bestimmt vereinfacht gesagt, wie viel Luft bewegt wird. Die angegebene Propellergröße entspricht immer dem Durchmesser in Zoll. Die Propeller müssen zum verwendeten Rahmen passen (siehe Abschnitt 1.1).

Kleinere Propeller machen die Drohne wendiger und ermöglichen schnellere Reaktionen auf Steuerbefehle. Der Grund dafür ist, dass kleinere Propeller weniger Luftwiderstand haben und insgesamt leichter sind. Sie besitzen eine geringere Rotationsmasse (Trägheitsmoment), wodurch der Motor die Drehzahl schneller erhöhen oder verringern kann. Da kleinere Propeller typischerweise mit kleineren Motoren mit höherem KV-Wert kombiniert werden, drehen sie zusätzlich schneller, was die Agilität und das Ansprechverhalten weiter steigert.

Größere Propeller erzeugen mehr Schub und arbeiten effizienter. Sie sorgen zudem für ein ruhigeres Flugverhalten, allerdings auf Kosten der Agilität. Mit zunehmender Propellergröße steigt auch die Belastung für die Motoren und die Motorsteuerung (ESC), da die größere Blattfläche einen höheren Luftwiderstand erzeugt. Außerdem haben größere Propeller ein höheres Eigengewicht.

Propellergröße (Durchmesser)

The propeller size determines, in simple terms, how much air is moved. The specified propeller size always refers to the diameter in inches. The propellers must fit the frame used (see Section 1.1).

Smaller propellers make the drone more agile, allowing quicker responses to control inputs. This is because smaller propellers have less air resistance and lower rotational mass (moment of inertia). As a result, the motor can increase or decrease its rotational speed faster. Since smaller propellers are typically used with smaller motors that have a higher KV rating, they also spin faster, which further enhances agility and responsiveness.

Larger propellers generate more thrust and are more efficient. They also provide smoother flight characteristics but at the cost of agility. As propeller size increases, so does the load on the motors and ESCs, since the larger blade area produces more air resistance. In addition, larger propellers are heavier.

1.4.2

Number of Blades

Propellers can have between two and eight blades. The fewer blades a propeller has, the

Anzahl der Blätter

Es gibt Propeller mit zwei bis acht Blättern. Je weniger Blätter ein Propeller hat, desto höher

higher the possible speed and efficiency (thrust per watt or per ampere). With an increasing number of blades, control, smoothness, and acceleration improve – but power consumption also increases.

For long-range applications where efficiency is the top priority, two-blade propellers are typically used. Racing and freestyle drones often use three-blade propellers. CineWhoops commonly use propellers with five or more blades, as these provide maximum flight stability and precise control.

sind die erreichbare Geschwindigkeit und Effizienz (Schub pro Watt oder pro Ampere). Mit steigender Anzahl an Blättern verbessern sich Kontrolle, Laufruhe und Beschleunigung, gleichzeitig steigt jedoch auch der Stromverbrauch.

Für Long-Range-Anwendungen, bei denen Effizienz oberste Priorität hat, werden in der Regel Zweiblattpropeller verwendet. Racing- und Freestyle-Drohnen sind häufig mit Dreiblattpropellern ausgestattet. CineWhoops nutzen oft Propeller mit fünf oder mehr Blättern, da sie ein besonders stabiles Flugverhalten und präzise Steuerung ermöglichen.

1.4.3

Pitch

In addition to the number of blades, the pitch of the propeller also affects speed and efficiency (power consumption). A low pitch provides greater efficiency when hovering due to lower air resistance and results in smoother flight behavior. A high pitch allows for greater speed and more aggressive flight maneuvers but increases power consumption.

The pitch is specified in inches and describes the theoretical distance the propeller would move forward during one full rotation if there were no slippage.

For example, with a pitch of 4.3 inches per rotation and a motor speed of 3000 RPM, the theoretical distance traveled per minute is $3000 \times 4.3 = 12,900$ inches per minute. Since one inch equals 25.4 mm, the theoretical speed is $12,900 \times 0.0254 \approx 327.7$ m/min, or approximately $327.7/60 \approx 5.46$ m/s.

In practice, these theoretical values are reduced by about 20–30% due to slippage. This occurs because air is not a solid medium but a fluid one. As air is displaced and swirled, part of it *slips away*, meaning the propeller generates less thrust in reality than predicted theoretically.

Steigung (Pitch)

Neben der Anzahl der Blätter beeinflusst auch die Steigung (Pitch) der Propeller die Geschwindigkeit und Effizienz (Stromverbrauch). Ein niedriger Pitch ist aufgrund des geringeren Luftwiderstands beim Schweben effizienter und führt zu einem ruhigeren Flugverhalten. Ein hoher Pitch ermöglicht höhere Geschwindigkeiten und aggressivere Flugmanöver, steigert jedoch den Stromverbrauch.

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

Bei einem Pitch von 4,3 Zoll pro Umdrehung und einer Motordrehzahl von 3000 U/min ergibt sich ein theoretischer Weg von $3000 \times 4,3 = 12,900$ Zoll/min. Ein Zoll entspricht 25,4 mm. Daraus ergibt sich eine theoretische Geschwindigkeit von $12,900 \times 0,0254 \approx 327,7$ m/min bzw. $327,7/60 \approx 5,46$ m/s.

In der Praxis werden diese theoretischen Werte durch Schlupfverluste um etwa 20–30% verringert. Der Grund dafür ist, dass Luft kein festes, sondern ein bewegliches Medium ist. Durch das Ausweichen und Verwirbeln rutscht immer ein Teil der Luft weg, wodurch der Propeller in der Realität weniger Vortrieb erzeugt als in der Theorie.

1.5

Batteries

FPV drones traditionally use lithium-polymer (LiPo) or lithium-ion (Li-Ion) batteries. Batteries are also classified by their capacity (mAh), voltage (number of cells), discharge rate (C rating, or capacity rate), and connector type. Table 1.4 provides an overview of the characteristic properties of LiPo and Li-Ion batteries.

Akkus

Klassischerweise verwenden FPV-Drohnen Lithium-Polymer- (LiPo) oder Lithium-Ionen-Akkus (Li-Ion). Akkus werden zudem nach ihrer Kapazität (mAh), Spannung (Zellenzahl), Entladerate bzw. C-Wert (*Capacity Rate*) und dem Steckertyp unterschieden. Eine Übersicht der charakteristischen Eigenschaften von LiPo- 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)

Batteries consist of one or more cells connected in series. FPV drones typically use LiPo batteries because they offer very high C-rates, ranging from 75 to 120 C. The C-rate indicates how quickly a battery can be discharged. In contrast, Li-Ion batteries usually have C-rates of only 10–12 C.

For example, a 1500 mAh LiPo battery (see Figure 1.7) with a C-rate of 100 can deliver $1.5A \times 100 = 150A$ of continuous current.

Lade- oder Entladerate (C-Wert)

Akkus bestehen aus einer oder mehreren in Reihe geschalteten Zellen. FPV-Drohnen verwenden meist LiPo-Akkus, da diese sehr hohe C-Werte zwischen 75 und 120 C erreichen. Der C-Wert gibt an, wie schnell ein Akku entladen werden kann. Li-Ion-Akkus bieten im Gegensatz dazu nur 10–12 C.

Ein 1500 mAh LiPo-Akku (siehe Abbildung 1.7) mit einem C-Wert von 100 kann somit $1.5A \times 100 = 150A$ Dauerstrom liefern.



Figure 1.6: 4S Lithium-Polymere Battery with 1500 mAh Capacity and 100 C Capacity Rate

Such high current levels are only needed for very dynamic flight maneuvers. For typical use in education and research projects, this is not relevant. Patrol flights or hovering for data collection do not require high C-rates.

LiPo batteries have several disadvantages. They can be easily over-discharged, which permanently damages or destroys them. Crashes often lead to physical damage, and improper handling — such as charging too quickly or using a damaged battery — carries a latent risk of fire. A much more robust alternative to LiPo batteries are lithium-ion batteries, although they provide much lower C-rates.

Li-Ion batteries are ideal for scenarios where long flight times, smooth flight behavior, and extended range are desired. LiPo batteries, on the other hand, are better suited for fast flight maneuvers and racing applications.

The C-rate also indicates the recommended charging rate. Unless the manufacturer explicitly specifies a higher value, the standard charging rate is 1C. For the 1500 mAh LiPo battery mentioned earlier, a 1C charging rate corresponds to a current of 1.5 A, meaning that a full charge theoretically takes one hour. However, this is a hypothetical value, as a deeply discharged battery can no longer be recharged.

Solch hohe Ströme werden nur für sehr dynamische Flugmanöver benötigt. Für typische Anwendungen in Lehre und Forschungsprojekten ist das jedoch uninteressant. Patrouillenflüge oder das Verharren an einer Position zur Datensammlung erfordern keine hohen C-Werte.

LiPo-Akkus haben mehrere Nachteile. Sie können leicht tiefentladen werden, was sie dauerhaft beschädigt oder zerstört. Abstürze führen häufig zu Beschädigungen, und bei unsachgemäßer Handhabung – etwa durch zu schnelles Laden oder den Betrieb trotz beschädigter Außenhülle – besteht ein latentes Brandrisiko. Eine deutlich robustere Alternative zu LiPo-Akkus sind Lithium-Ionen-Akkus, die allerdings wesentlich geringere C-Werte bieten.

Li-Ion-Akkus sind ideal für Szenarien, in denen lange Flugzeiten, ruhiges Flugverhalten und gegebenenfalls große Reichweiten (Long-Range) angestrebt werden. LiPo-Akkus hingegen eignen sich besser für schnelle Flugmanöver und Rennanwendungen.

Der C-Wert gibt auch die empfohlene Laderate an. Diese beträgt 1C, sofern der Hersteller nicht ausdrücklich eine höhere Laderate, wie etwa 2C, freigegeben hat. Beim eingangs erwähnten 1500 mAh LiPo-Akku entspricht eine Laderate von 1C einem Strom von 1,5 A, wodurch das vollständige Laden theoretisch eine Stunde dauern würde. Dies ist jedoch ein hypothetischer Wert, da ein derart tiefentladener Akku nicht mehr geladen werden kann.

1.5.2

Number of Cells (S4/S6)

LiPo and Li-Ion batteries contain one or more cells connected in series. The so-called S rating of a battery indicates the number of cells it contains. Each LiPo cell has a nominal voltage of approximately 3.7 V (fully charged around 4.2 V, discharged around 3.0 V). When multiple cells are connected in series, their voltages add up.

The most common battery types are 4S and 6S. A 4S battery has four cells connected in series, resulting in a nominal voltage of $4 \times 3.7 \text{ V} = 14.8 \text{ V}$. When fully charged, its voltage is 16.8 V. Table 1.5 provides an overview of different LiPo battery configurations.

Anzahl der Zellen (S4/S6)

LiPo-Akkus und Li-Ion-Akkus enthalten eine oder mehrere in Reihe geschaltete Zellen. Der sogenannte S-Wert eines Akkus gibt die Anzahl der enthaltenen Zellen an. Jede LiPo-Zelle hat eine Nennspannung von etwa 3,7 V (voll geladen etwa 4,2 V, entladen etwa 3,0 V). Werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet, addieren sich die Spannungen.

Die gängigsten Akkutypen sind 4S und 6S. Bei einem 4S-Akku sind vier Zellen in Reihe geschaltet, wodurch sich eine Nennspannung von $4 \times 3,7 \text{ V} = 14,8 \text{ V}$ ergibt. Ist ein solcher Akku voll geladen, beträgt seine Spannung 16,8 V. Eine Übersicht über verschiedene LiPo-Akkus zeigt 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

At higher voltages, a motor requires less current for the same power output and operates more efficiently. 6S components are more powerful but also heavier and more expensive. Larger or performance-oriented drones usually use 6S batteries, while smaller and medium-sized drones typically use 4S batteries and correspondingly lightweight components.

As battery capacity increases, not only does flight time improve, but total weight also increases. Very small 4S batteries with a capacity of 450 mAh weigh around 60 g, while the battery shown in Figure 1.7 with a capacity of 1500 mAh weighs about 185 g. Higher total weight also affects flight characteristics.

Li-Ion batteries typically consist of 18650 cells connected in series. The capacity of individual cells depends on the manufacturer and cell quality, typically ranging from 2500 mAh to 3500 mAh. To achieve higher capacity, additional cells must be connected in parallel. The number of cells and their configuration are indicated on the Li-Ion battery using the letters S (series) and P (parallel). Common Li-Ion battery configurations on the market include 3S1P, 4S1P, 4S2P, 6S1P, and 6S2P.

Bei höherer Spannung benötigt ein Motor bei gleicher Leistung weniger Strom und arbeitet effizienter. 6S-Komponenten sind leistungsstärker, jedoch auch schwerer und teurer. Größere oder leistungsorientierte Drohnen verwenden meist 6S-Akkus, während kleinere und mittlere Drohnen in der Regel 4S-Akkus und entsprechend leichte Komponenten nutzen.

Mit steigender Kapazität eines Akkus erhöht sich nicht nur die Flugdauer, sondern auch das Gesamtgewicht. Sehr kleine 4S-Akkus mit 450 mAh Kapazität wiegen etwa 60 g, während der in Abbildung 1.7 gezeigte Akku mit 1500 mAh rund 185 g wiegt. Ein höheres Gesamtgewicht beeinflusst auch das Flugverhalten.

Li-Ion-Akkus bestehen üblicherweise aus in Reihe geschalteten 18650-Zellen. Die Kapazität der einzelnen Zellen hängt vom Hersteller und von der Zellqualität ab und liegt typischerweise zwischen 2500 mAh und 3500 mAh. Soll eine höhere Kapazität erreicht werden, müssen zusätzliche Zellen parallel geschaltet werden. Die Anzahl der Zellen und deren Verschaltung sind auf den Li-Ion-Akkus mit den Buchstaben S (Serie) und P (Parallel) angegeben. Häufig verfügbare Li-Ion-Akkus sind beispielsweise 3S1P, 4S1P, 4S2P, 6S1P und 6S2P.

1.5.3

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

The battery is usually connected to the flight controller via an XT30 or alternatively an XT60 DC connector. Some larger batteries use an XT90 plug. Two wires with a connector are soldered either to the electronic speed controller (in a stack) or directly to the flight controller in an AIO configuration (see Section 1.2).

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

Der Anschluss der Akkus an den Flugcontroller erfolgt in der Regel über einen XT30- oder alternativ einen XT60-Gleichstromstecker. Einige größere Akkus verwenden einen XT90-Stecker. Zwei Kabel mit einer Buchse sind an die Motorsteuerung (bei einem Stack) oder am Flug-

For small and lightweight drones up to 4 inches, XT30 connectors are commonly used. 5- and 6-inch drones typically use XT60 connectors, while larger drones often rely on XT90 connectors. The higher the number, the higher the current the connector can safely handle. However, larger connectors are also heavier and bulkier. The wire gauge must also match the connector size.

In addition to the main DC connector, every battery with two or more cells has a balance connector for safe charging. This connector, which in modern batteries typically follows the JST-XHR standard, allows the charger to measure the voltage of each individual cell and control the charging process accordingly. The number of pins equals the number of cells plus one (for the common ground). Thus, a 4S battery has five wires, and a 6S battery has seven. Using the data from the balance connector, the charger balances the voltage across all cells, preventing overcharging of individual cells and reducing the risk of damage or fire, while also avoiding deep discharge of single cells during operation.

controller eines AIO-Systems 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, während größere Drohnen häufig XT90-Buchsen nutzen. Je größer die Zahl, desto höhere Ströme kann der Stecker sicher übertragen. Größere Buchsen und Stecker sind allerdings auch schwerer und sperriger. Auch der Leitungsquerschnitt muss zur jeweiligen Buchse passen.

Neben dem Gleichstromstecker verfügt jeder Akku mit zwei oder mehr Zellen über einen Balancerstecker zum sicheren Laden. Dieser Stecker, der bei modernen Akkus meist dem JST-XHR-Standard entspricht, ermöglicht es dem Ladegerät, die Spannung jeder einzelnen Zelle zu messen und den Ladevorgang entsprechend zu steuern. Die Anzahl der Pins entspricht der Anzahl der Zellen plus eins (für die gemeinsame Masse). Ein 4S-Akku hat somit fünf Leitungen, ein 6S-Akku sieben. Mithilfe der über den Balancerstecker ausgelesenen Werte gleicht das Ladegerät die Spannung der einzelnen Zellen an. Dies verhindert die Überladung einzelner Zellen während des Ladevorgangs und damit das Risiko einer Beschädigung des Akkus oder gar eines Brandes und beugt einer Tiefentladung einzelner Zellen im späteren Betrieb vor.

1.6

GPS

A GPS module (Global Positioning System) is essential for many useful functions such as Return-to-Home (automatic return flight), speed measurement, altitude determination, position hold, autonomous flight, and more.

Not every GPS module is compatible with all common flight controller firmwares. While Betaflight supports almost any GPS module, this is not the case for INAV and ArduPilot.

A GPS module with six connections (pads or wires) typically includes a magnetic compass. If the module has only four connections, it lacks this compass. Without a magnetic compass, a

GPS

Ein GPS-Modul (Global Positioning System) ist für viele nützliche Funktionen wie Return-to-Home (automatisches Heimfliegen), Geschwindigkeitsmessung, Höhenbestimmung, Unterstützung der Positionsaltung oder autonomen Flug unverzichtbar.

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

Ein GPS-Modul mit sechs Anschlüssen (Löt-pads oder Kabeln) verfügt in der Regel über einen integrierten magnetischen Kompass. Hat das Modul hingegen nur vier Anschlüsse, fehlt

drone cannot determine its heading when stationary—meaning it does not know which direction it is facing. Consequently, several useful functions, such as GPS position hold in ArduPilot, are unavailable.

Common GPS modules (see Figure 1.7) with an integrated magnetic compass are typically between 20×20 mm and 25×25 mm in size.

der Kompass. Ohne magnetischen Kompass kann eine Drohne im Stillstand nicht erkennen, in welche Richtung sie ausgerichtet ist. Dadurch sind mehrere sinnvolle Funktionen, wie etwa GPS-Position-Hold bei ArduPilot, nicht nutzbar.

Gängige GPS-Module (siehe Abbildung 1.7) mit integriertem magnetischem Kompass sind in der Regel zwischen 20×20 mm und 25×25 mm groß.

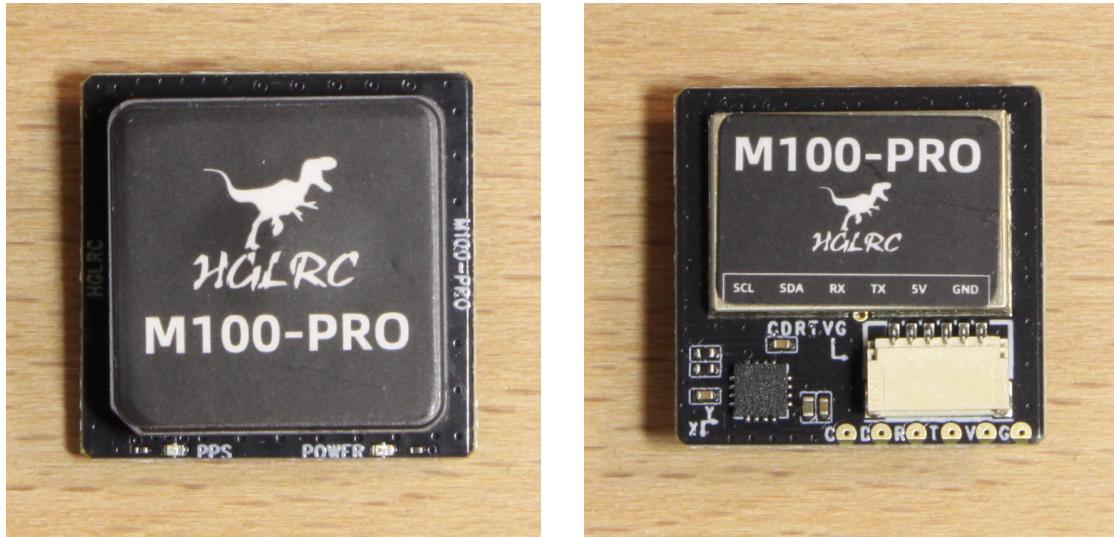


Figure 1.7: HGLRC M100-5883 M10 GPS Module 21x21 mm with built-in magnetic Compass (Front and Back)

1.7

Receiver

The receiver receives the control signals (various channel values) from the remote controller and passes them on to the flight controller. It demodulates the incoming signals and converts them into digital channel values.

The receiver and transmitter must be compatible, meaning they must use the same protocol and operate in the same frequency band. Common frequency bands are 2.4 GHz and, for long-range applications, 868 MHz in the EU or 915 MHz in the USA. In Germany, the use of these frequency ranges is permitted at a maximum transmission power of 25 mW.

Empfänger

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

Empfänger und Fernsteuerung müssen zueinander kompatibel sein, das heißt, sie müssen dasselbe Protokoll und denselben Frequenzbereich verwenden. Gängige 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 Nutzungszeit von 20:00 bis 06:00 Uhr verboten.

Two popular protocols are the open-source system ExpressLRS (ELRS) and the proprietary TBS Crossfire. Because ELRS is open source, there are many hardware providers, and development progresses rapidly. For this reason, this document focuses entirely on the ELRS standard. ELRS devices (transmitters and receivers) run the ExpressLRS firmware, and ideally, both should use the same firmware version.

There are receivers with an integrated ceramic antenna (see Figure 1.8) mounted directly on the circuit board, as well as receivers with one (see Figure 1.9) or two detachable antennas. The commonly used connector is the delicate U.FL (also called *pigtail*). Receivers with fixed ceramic antennas are more compact, as no antenna cable needs to be routed, but the small antenna height of only a few millimeters significantly reduces range.

zung 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 von Hardwarekomponenten, und die Weiterentwicklung schreitet schnell voran. Aus diesem Grund konzentriert sich dieses Dokument vollständig auf den Standard ELRS. ELRS-Geräte (Sender und Empfänger) verwenden die ExpressLRS-Firmware, und idealerweise sollten beide die gleiche Firmware-Version nutzen.

Es gibt Empfänger mit einer integrierten Keramikantenne (siehe Abbildung 1.8), die direkt auf der Platine montiert ist, sowie Empfänger mit einer (siehe Abbildung 1.9) oder zwei abnehmbaren Antennen. Der üblicherweise verwendete Steckverbinder ist auch hier der filigrane U.FL-Stecker (*Pigtail*). Empfänger mit fester Keramikantenne sind kompakter, da kein Antennenkabel verlegt werden muss; durch die nur wenige Millimeter hohe Antenne reduziert sich jedoch die Reichweite deutlich.

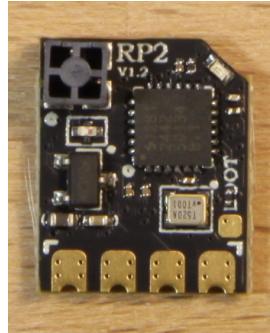


Figure 1.8: RadioMaster RP2 ELRS 2.4GHz Nano Receiver 13x11 mm with integrated Antenna (Front and Back)

1.8

Remote Control (Sender)

The remote control must implement the same protocol as the receiver in use and operate in the same frequency band. Manufacturers that produce remote controllers compatible with the ELRS protocol include RadioMaster, Axisflying, and Jumper.

Fernbedienung (Sender)

Die verwendete Fernbedienung muss dasselbe Protokoll implementieren wie der eingesetzte Empfänger und denselben Frequenzbereich nutzen. Zu den Herstellern von mit dem ELRS-Protokoll kompatiblen Fernbedienungen gehören RadioMaster, Axisflying und Jumper.



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

ELRS remote controls (transmitters) use ExpressLRS as the firmware for the radio protocol and transmitter module, and EdgeTX as the operating system – a modernized version of OpenTX. EdgeTX generates the control signals, while ExpressLRS transmits them.

ELRS-Fernbedienungen (Sender) verwenden ExpressLRS als Firmware für das Funkprotokoll und das Sendermodul sowie EdgeTX als Betriebssystem, eine modernisierte Variante von OpenTX. EdgeTX erzeugt die Steuersignale, und ExpressLRS überträgt sie.

1.9

Video Transmitter

The video transmitter (VTX) transmits the live image from the FPV camera to the FPV goggles using the selected channel within the defined frequency band. In addition to analog video transmitters, there are several digital systems that are incompatible with one another. Video transmitters are sold either as standalone devices or as kits that include a camera and antenna(s). Figure 1.10 shows an example of an analog video transmitter.

In Germany, the frequency range from 5725 MHz to 5875 MHz may be used with a maximum transmission power of 25 mW. The channels permitted for analog video transmission within the respective bands are shown in Table 1.6. Notably, the Race Band has wide channel spacing of 37 MHz to prevent channel overlap.

The channel and band used by the video transmitter for image transmission are configured in the graphical interface of the flight controller firmware.

Analog video transmitters are cross-compatible among manufacturers, while this

Videosender

Der Videosender (VTX) überträgt das Livebild der FPV-Kamera über den eingestellten Kanal im festgelegten Frequenzband an die FPV-Brille. Neben analogen Videosendern existieren auch verschiedene digitale Systeme, die untereinander nicht kompatibel sind. Videosender werden entweder als Einzelgerät oder als Kit mit Kamera und Antenne(n) verkauft. Abbildung 1.10 zeigt einen analogen Videosender.

In Deutschland ist die Nutzung des Frequenzbereichs von 5725 MHz bis 5875 MHz bei einer maximalen Sendeleistung von 25 mW zulässig. Die für die analoge Bildübertragung in den jeweiligen Bändern zugelassenen Kanäle zeigt Tabelle 1.6. Auffällig sind beim Race Band die großen Kanalabstände von 37 MHz, die Kanalüberlagerungen verhindern.

Der vom Videosender zur Übertragung verwendete Kanal und das Band werden in der grafischen Benutzeroberfläche der Firmware des Flugcontrollers festgelegt.

Analoge Videosender sind herstellerübergreifend mit analogen Videobrillen kompatibel. Bei

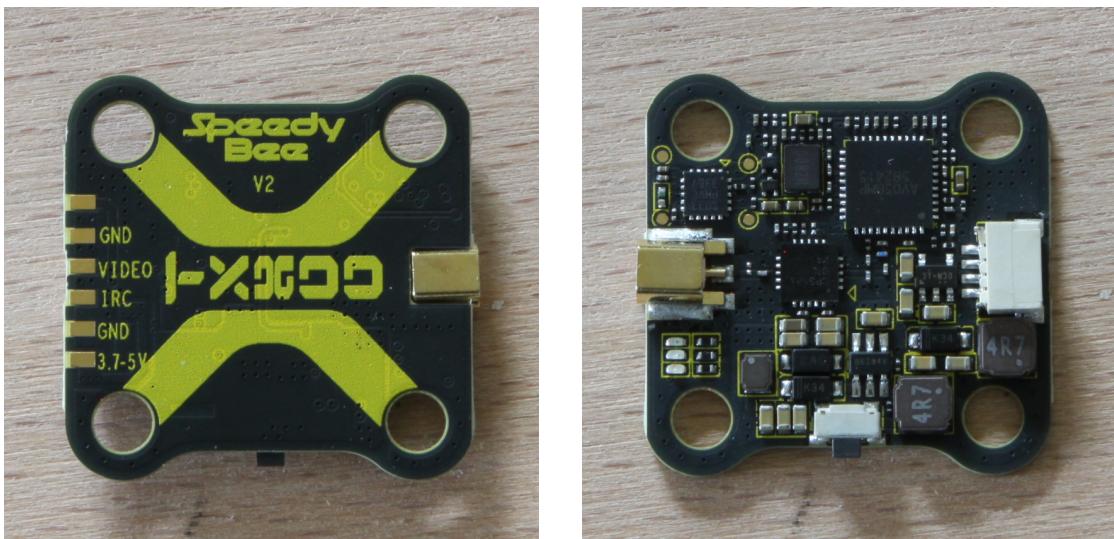


Figure 1.10: SpeedyBee TX800 FPV VTX Video Transmitter (Front and Back)

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)

is not the case for digital systems. For digital video transmission, the transmitter and receiver must be from the same manufacturer. Digital systems for live video transmission are available from DJI, HDZero, and CaddxFPV under the brand name Walksnail.

The advantages of digital live video transmission include excellent image quality and the ability to record HD footage directly without the need for an additional action camera.

Analog transmission, on the other hand, offers advantages such as cross-manufacturer compatibility, low latency, a gradual rather than abrupt degradation of image quality under interference, and significantly lower hardware costs.

Antennas have a major impact on both image quality and transmission range. Operating a video transmitter without an antenna is not recommended, as it can overheat and become

digitalen Systemen ist das nicht der Fall – hier müssen Sender und Empfänger vom selben Hersteller stammen. Digitale Systeme zur Übertragung des Livebilds werden von DJI, HDZero und CaddxFPV unter dem Namen Walksnail angeboten.

Vorteile der digitalen Livebildübertragung sind die hervorragende Bildqualität und die Möglichkeit, Videos in HD-Qualität direkt ohne zusätzliche Action-Cam aufzuzeichnen.

Analoge Übertragung bietet hingegen Vorteile wie herstellerübergreifende Kompatibilität, geringe Latenz, ein schrittweises statt abruptes Verschlechtern des Bildes bei Störungen und deutlich geringere Anschaffungskosten der Komponenten.

Die verwendeten Antennen haben großen Einfluss auf Bildqualität und Reichweite. Der Betrieb eines Videosenders ohne Antenne ist nicht empfehlenswert, da dieser überhitzen und be-

damaged. Analog systems typically use delicate high-frequency connectors following the U.FL standard, commonly known as *pigtail* connectors (also used in Wi-Fi devices). Digital systems, such as those from DJI, generally use MMCX connectors. Antennas with larger and more robust SMA screw connectors can be attached using adapter cables, which are often included with the video transmitter.

The antennas on both the transmitter and receiver sides should match. Available video transmitter antennas differ by their polarization. There are two types:

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

LP antennas are the simplest and most cost-effective type. They are often included with video transmitters and FPV goggles and typically have a rod-like shape.

CP antennas provide better image quality and greater range. With circular polarization, the signal's polarization rotates as it propagates. There are two variants: right-hand circular polarization (RHCP) and left-hand circular polarization (LHCP).

RHCP antennas are typically used with analog FPV drones, while LHCP antennas are commonly used with digital FPV systems.

schädigt werden kann. Analoge Systeme verwenden in der Regel sehr filigrane Hochfrequenzsteckverbinder nach dem U.FL-Standard, umgangssprachlich auch *Pigtail* genannt, wie sie auch bei WLAN-Geräten üblich sind. Digitale Systeme, z. B. von DJI, nutzen meist MMCX-Steckverbinder. Antennen mit größerem und robusterem SMA-Schraubgewinde können über Adapterkabel angeschlossen werden, die häufig dem Videosender beiliegen.

Die Antennen auf Sender- und Empfängerseite sollten zueinander passen. Die verfügbaren Antennen für Videosender unterscheiden sich in ihrer Polarisierung. Es gibt:

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

LP-Antennen sind die einfachste und kostengünstigste Variante. Sie werden häufig mit dem Videosender oder der Videobrille mitgeliefert und besitzen meist eine stabförmige Bauweise.

CP-Antennen ermöglichen eine bessere Bildqualität und größere Reichweite. Bei zirkularer Polarisation dreht sich die Polarisation des Signals während der Ausbreitung. Es gibt zwei Varianten: rechtsdrehende (RHCP) und linksdrehende (LHCP) Polarisation.

RHCP-Antennen werden in der Regel bei analogen FPV-Drohnen eingesetzt, während LHCP-Antennen häufig bei FPV-Drohnen mit digitaler Bildübertragung verwendet werden.

1.10

Camera

This section focuses exclusively on analog FPV cameras. Digital systems for live video transmission have not been used in the projects carried out so far.

The camera generates a video signal (NTSC or PAL), which is passed through the flight controller to the video transmitter. In digital systems, the cameras are directly connected to the video transmitter.

The image quality of analog cameras appears outdated due to noise and blurriness, far from HD standards. The perceived quality ranges from VHS-level at worst to DVD-level at best.

Kamera

Dieser Abschnitt befasst sich ausschließlich mit analogen FPV-Kameras. Digitale Systeme zur Übertragung des Livebilds kamen in den bisher durchgeführten 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.

Die Bildqualität analoger Kameras wirkt durch Bildfehler und Unschärfen nicht mehr zeitgemäß und liegt weit unter HD-Qualität. Der Bildeindruck ist subjektiv im schlechtesten

However, analog video transmission offers several advantages, such as lower cost, minimal latency, lightweight design, and broad cross-manufacturer compatibility of available components.

Recording high-quality video is not possible with an analog camera. If this requirement exists, an additional action camera or a similar device must be mounted on the drone.

Cameras available on the market differ primarily in resolution, lens focal length (which determines the field of view), and physical size (width).

The camera must not be too wide for the frame used (see Section 1.1). Modern cameras typically have widths of 14 mm (nano cameras) or 19 mm (micro cameras). Figure 1.11 shows a nano camera, and Figure 1.12 shows a micro camera.

ten Fall mit VHS-Kassetten und im besten Fall mit DVDs vergleichbar. Die analoge Bildübertragung hat jedoch mehrere Vorteile: geringere Kosten, minimale Latenz, geringes Gewicht und eine herstellerübergreifende Kompatibilität der Komponenten.

Die Aufnahme qualitativ hochwertiger Videos ist mit einer analogen Kamera nicht möglich. Wenn diese Anforderung besteht, muss eine zusätzliche Actioncam oder ein vergleichbares Gerät auf der Drohne mitgeführt werden.

Die am Markt verfügbaren Kameras unterscheiden sich in erster Linie 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. Moderne Kameras sind in der Regel 14 mm (Nano-Kamera) oder 19 mm (Micro-Kamera) breit. Abbildung 1.11 zeigt eine Nano-Kamera und Abbildung 1.12 eine Micro-Kamera.

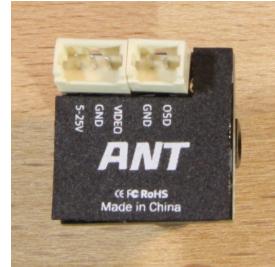


Figure 1.11: Caddx ANT Nano Analog Camera 1200 TVL 14x14 mm (Top and Back)



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

The horizontal resolution is specified in TV lines (TVL), typically 1000, 1200, or 1500 TVL. The higher this value, the better the potential image quality.

The focal length determines the field of view. The smaller the value, the wider the field of view,

Die horizontale Auflösung wird in TV-Lines (TVL) angegeben und beträgt 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,

which is advantageous for flying. However, a low focal length (e.g., 1.8 mm or 2.1 mm) creates a fisheye effect, resulting in image distortion that can cause eye fatigue and make small objects harder to recognize.

Higher focal lengths (e.g., 2.5 mm or 2.8 mm) provide a more natural image but narrow the field of view, which can make orientation during flight more difficult.

was beim Fliegen vorteilhaft ist. Eine niedrige Brennweite (z. B. 1.8 mm oder 2.1 mm) führt jedoch zu einem Fischaugen-Effekt und damit zu Verzerrungen, die die Augen 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, verengen jedoch das Sichtfeld und erschweren dadurch möglicherweise die Orientierung während des Fluges.

1.11

FPV Goggles

The FPV goggles used must be compatible with the video transmitter. Components for digital live video transmission are generally only compatible if they come from the same manufacturer. Analog FPV goggles, on the other hand, are cross-compatible with all analog video transmitters.

FPV goggles available on the market differ primarily in resolution, display technology, and the available interfaces (inputs and outputs). Table 1.7 compares several key characteristics of some analog FPV goggles currently available on the market.

Videobrille (FPV-Brille)

Die verwendete Videobrille muss zum Videosender passen. Komponenten für die digitale Livebildübertragung sind in der Regel nur dann zueinander kompatibel, wenn sie vom gleichen Hersteller stammen. Analoge Videobrillen sind hingegen herstellerübergreifend mit allen analogen Videosendern kompatibel.

Die am Markt verfügbaren Videobrillen unterscheiden sich in erster Linie hinsichtlich der Auflösung, der verwendeten Display-Technologie und der vorhandenen Schnittstellen (Ein- und Ausgänge). Tabelle 1.7 zeigt eine Gegenüberstellung einiger relevanter Merkmale ausgewählter analoger Videobrillen.

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

The ability to output the video signal through an interface and process it in real time on another device is particularly interesting for many potential AI projects. Although numerous FPV

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 inter-

goggles feature an HDMI port, it is typically used only for playing back video from external sources. No common FPV goggle currently supports video output via HDMI.

Most FPV goggles include a 3.5 mm AV port that allows analog video and audio input and output. Using a video capture device, the output signal can be transmitted to a computer for further processing.

If FPV goggles have a USB-C port for video output, it depends on whether the signal is exported as USB Video Class (UVC), like a webcam, or as HDMI. In the case of a UVC device, the video stream can be processed directly. If the signal is HDMI, a suitable video capture device is also required to forward and process the signal on a computer.

essante Option. Zahlreiche Videobrillen verfügen zwar über einen HDMI-Port, dieser dient jedoch ausschließlich zum Abspielen von Videos von externen Quellen. Eine Ausgabe des Videosignals über HDMI wird von keiner gängigen FPV-Brille unterstützt.

Die meisten Videobrillen verfügen über eine 3,5 mm AV-Schnittstelle, über die Video und Audio analog ein- und ausgegeben werden können. Mithilfe eines Videograbbers kann das Ausgabesignal an einen Computer weitergeleitet und dort verarbeitet werden.

Verfügt eine Videobrille über eine USB-C-Schnittstelle zur Ausgabe des Videosignals, hängt es davon ab, ob das Videosignal – wie bei einer Webcam – als USB Video Class (UVC) exportiert wird oder als HDMI-Signal. Bei einem UVC-Gerät kann der Videostream direkt weiterverarbeitet werden. Handelt es sich hingegen um ein HDMI-Signal, ist ein geeigneter Videograbber erforderlich, um das Ausgabesignal an einen Computer weiterzuleiten und zu verarbeiten.

2

Software for Using FPV Drones

This chapter introduces the essential software components required for operating FPV drones. Similar to Chapter 1, it does not aim to provide a complete overview of all available software. Instead, it presents a selection of popular firmware options for flight controllers, transmitters, and receivers, as well as several useful tools. The chapter provides an overview of their core functionalities and suitable use cases, offering guidance for installation and initial configuration.

Software zum Betrieb von FPV-Drohnen

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

2.1

Flight Controller Firmware

Every flight controller requires an operating system that primarily processes sensor data (including gyroscope, accelerometer, GPS, and magnetic compass) and user control inputs into motor commands. In addition, flight controller operating systems implement various flight modes (e.g., Acro, Angle, Horizon), route video data from the camera to the video transmitter, provide an on-screen display (OSD), generate and store flight logs (Blackbox logs) for post-flight analysis, allow fine-tuning of flight behavior using filters and mixers, and offer multiple interfaces for communication and configuration.

Flight Controller Firmware

Jeder Flugcontroller benötigt ein Betriebssystem, das in erster Linie die Sensordaten (u. a. Gyroskop, Beschleunigungssensor, GPS, magnetischer Kompass) und die Steuerbefehle des Benutzers in Motorbefehle umsetzt. Darüber hinaus implementieren die Betriebssysteme der Flugcontroller verschiedene Flugmodi (z. B. Acro, Angle, Horizon), leiten Videodaten der Kamera an den Videosender weiter, bieten ein On-Screen-Display (OSD), erzeugen und speichern Log-Daten (Blackbox-Logs) zur nachträglichen Analyse des Flugverhaltens, ermöglichen die Feineinstellung des Flugverhaltens mithilfe von Filtern und Mixern und stellen verschiedene Schnittstellen zur Kommunikation und Konfiguration bereit.

Das Betriebssystem des Flugcontrollers wird als Firmware implementiert, die im Flash-Speicher abgelegt ist. Da alle gängigen Flugcontroller-Firmwares Open-Source-

The operating system of the flight controller is implemented as firmware stored in the flash memory. Since all common flight controller firmwares are open-source projects, it occasion-

ally happens that developer groups split off and create forks that, through new features and more active development, may eventually surpass the original project. Likewise, projects may become obsolete over time due to developer inactivity or shifting priorities.

This document introduces the flight controller firmwares Betaflight, INAV, and ArduPilot.

2.1.1

Betaflight

Betaflight is a firmware for flight controllers used in FPV drones. Its focus lies on supporting manual flight modes such as freestyle and racing. The main goals of Betaflight are fast response to user input and extensive configuration options for optimizing flight behavior (tuning).

Unlike alternative firmwares such as INAV or ArduPilot, Betaflight provides almost no support for autonomous flight. The only exceptions are the *Rescue Mode*, which allows the drone to return automatically in case of connection loss using GPS, and an experimental mode for maintaining altitude and position automatically.

Betaflight is compatible with almost all flight controllers and receivers available on the market and provides an intuitive graphical user interface.

Installation and Configuration

The installation and configuration of the firmware are carried out using the locally installed Betaflight Configurator or the web application available at app.betafight.com. Figure 2.1 shows the option for installing Betaflight via the web application. The model of the flight controller is usually detected automatically. This page can be accessed via the *Update Firmware* button at the top of the website. Existing configuration backups can also be restored to the flight controller on this page. A backup of the current settings is automatically created when a new version is installed.

Projekte sind, kommt es immer wieder vor, dass sich Entwicklergruppen abspalten und Forks gründen, die durch neue Funktionen und aktivere Weiterentwicklung mittelfristig das ursprüngliche Projekt verdrängen. Ebenso kann es passieren, dass Projekte aufgrund fehlender Entwickleraktivität oder veränderter Lebensumstände nicht weiterentwickelt werden und mit der Zeit obsolet werden.

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

Betaflight

Betaflight ist eine Firmware für Flugcontroller von FPV-Drohnen. Der Fokus von Betaflight liegt auf der Unterstützung des manuellen Fliegens (Freestyle, Racing usw.). Ziele von Betaflight sind eine schnelle Reaktion auf Benutzereingaben und umfangreiche Einstellungsmöglichkeiten zur Optimierung des Flugverhaltens (Tuning).

Im Gegensatz zu alternativen Firmwares wie INAV oder ArduPilot unterstützt Betaflight kaum autonomes Fliegen. Ausnahmen sind der *Rescue Mode*, der die Drohne bei Verbindungsproblemen mithilfe eines GPS-Moduls automatisch zurückkehren lässt, sowie ein experimenteller Modus zum automatischen Halten von Höhe und Position.

Betaflight ist mit nahezu allen am Markt verfügbaren Flugcontrollern und Empfängern kompatibel und bietet eine intuitive grafische Benutzeroberfläche.

Installation und Konfiguration

Die Installation und Konfiguration der Firmware erfolgt entweder mit der lokal installierten Software Betaflight Configurator oder über die Webanwendung app.betafight.com. Abbildung 2.1 zeigt die Möglichkeit, Betaflight über die Webanwendung zu installieren. Das Modell des Flugcontrollers wird in der Regel automatisch erkannt. Diese Seite erreicht man über den Button *Update Firmware* am oberen Rand der Webseite. Ein vorhandenes Backup von Einstellungen kann auf dieser Seite ebenfalls in den Flugcontroller eingespielt werden. Ein Backup

der aktuellen Einstellungen wird bei der Installation einer neuen Version automatisch angelegt.

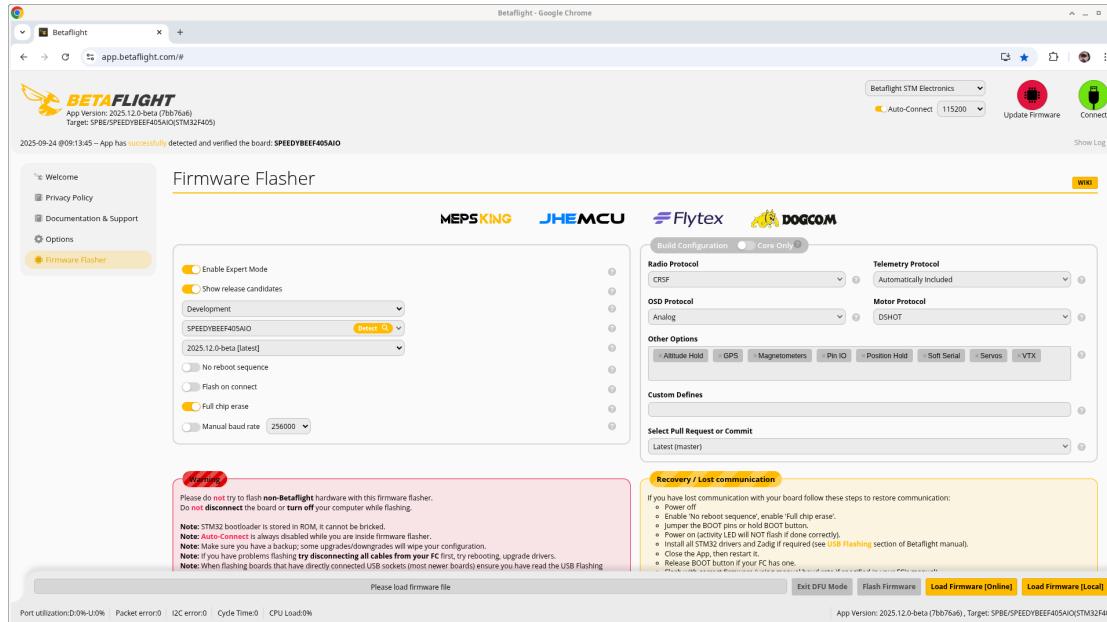


Figure 2.1: Installation of Betaflight and Option to Backup / Restore of Configuration Settings

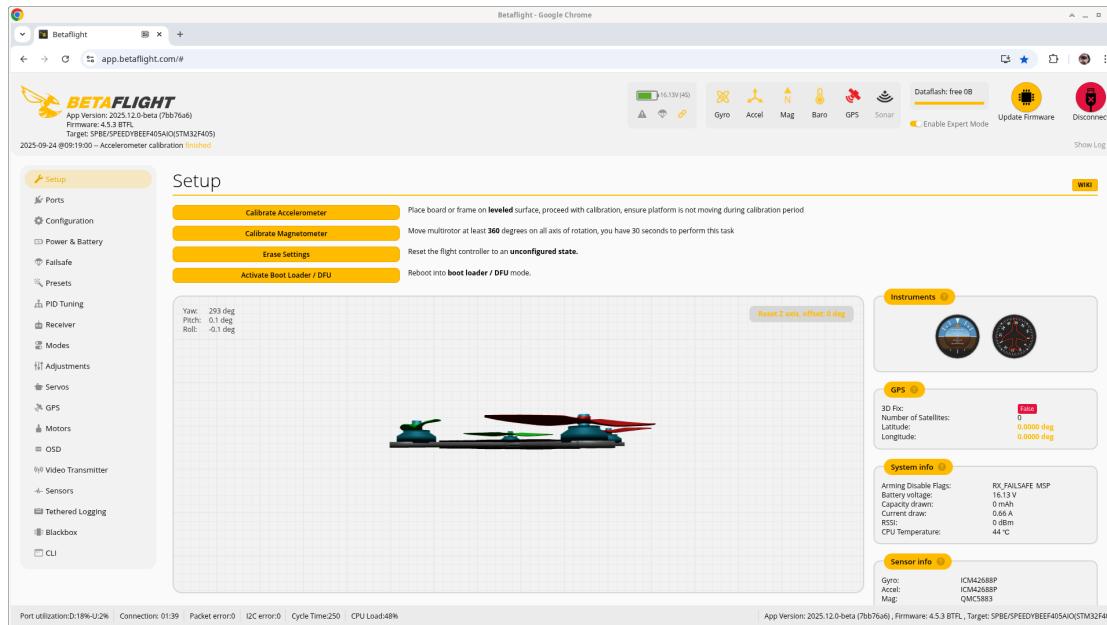


Figure 2.2: Main Page of Betaflight

Figure 2.2 shows the main page (*Setup*) of Betaflight when accessed through the web application. On the main page, the accelerometer

Abbildung 2.2 zeigt die Startseite (*Setup*) von Betaflight beim Zugriff über die Webanwendung. Auf der Startseite können der Beschleunigungs-

and magnetic compass can be calibrated. It also provides general information about the drone's current status and its components. The main page is a valuable tool for verifying the correct orientation configuration of the flight controller within the frame. Especially in flight controller stacks and small drones, it often happens that the flight controller is mounted rotated or upside down. The main page displays the drone's position as a live 3D model corresponding to the orientation configuration set on the *Configuration* page.

Figure 2.3 shows the *Ports* page, where the available UART interfaces are configured. Correctly setting up the UART functions is essential for using many components connected to the drone, such as the video transmitter (in Figure 2.3 on UART3), GPS module (on UART5), and receiver (on UART6).

sensor und der magnetische Kompass kalibriert werden. Sie enthält zudem allgemeine Informationen über den Zustand der Drohne und ihrer Komponenten. Ein wertvolles Werkzeug ist die Startseite bei der Kontrolle der korrekten Konfiguration der Ausrichtung des Flugcontrollers im Rahmen. Besonders bei Flight-Controller-Stacks und kleineren Drohnen kommt es häufig vor, dass der Flugcontroller gedreht oder auf dem Kopf stehend verbaut ist. Die Startseite zeigt die Position der Drohne als Live-Bild entsprechend der in der Seite *Configuration* eingestellten Ausrichtung des Flugcontrollers.

Abbildung 2.3 zeigt die Seite *Ports*. Hier wird die Konfiguration der verfügbaren UART-Schnittstellen vorgenommen. Die korrekte Einstellung der Funktionsweise der UARTs ist Voraussetzung für die Nutzung vieler an die Drohne angeschlossener Komponenten, wie beispielsweise des Videosenders (in Abbildung 2.3 an UART3), des GPS-Moduls (an UART5) und des Empfängers (an UART6).

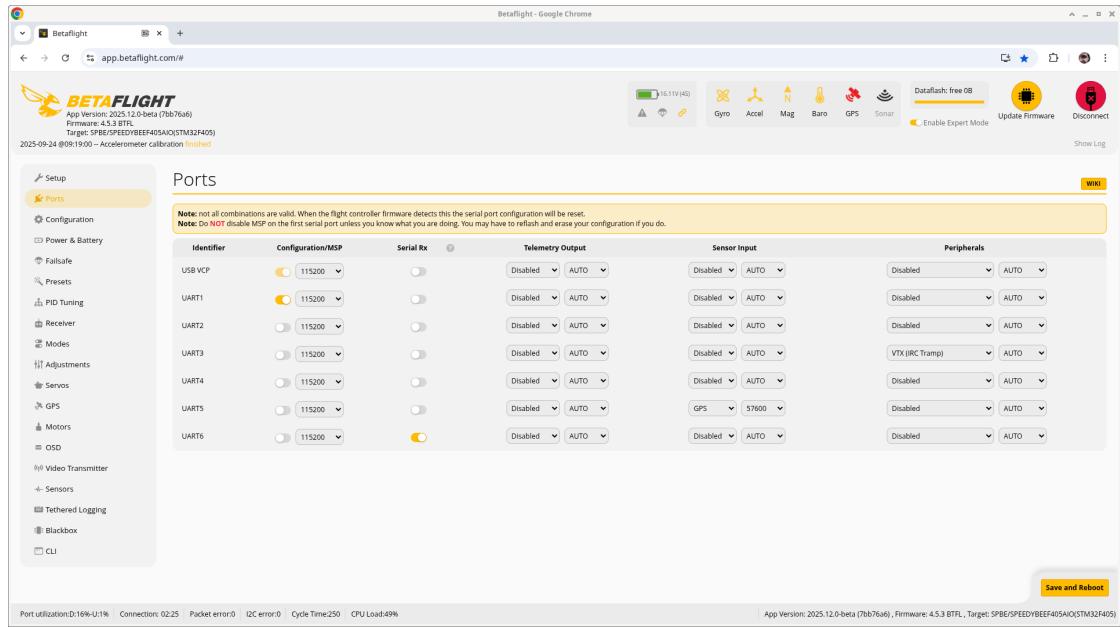


Figure 2.3: Ports Page of Betaflight

On the *Configuration* page (see Figures 2.4 and 2.5), settings are made for, among other things, the orientation of the flight controller and the gyro, which is essential for every drone as it serves as the core instrument for attitude determination.

Auf der Seite *Configuration* (siehe Abbildungen 2.4 und 2.5) werden unter anderem Einstellungen zur Ausrichtung des Flugcontrollers und des für jede Drohne unverzichtbaren Gyroskops (Kreiselinstrument zur Lagebestimmung) vorgenommen.

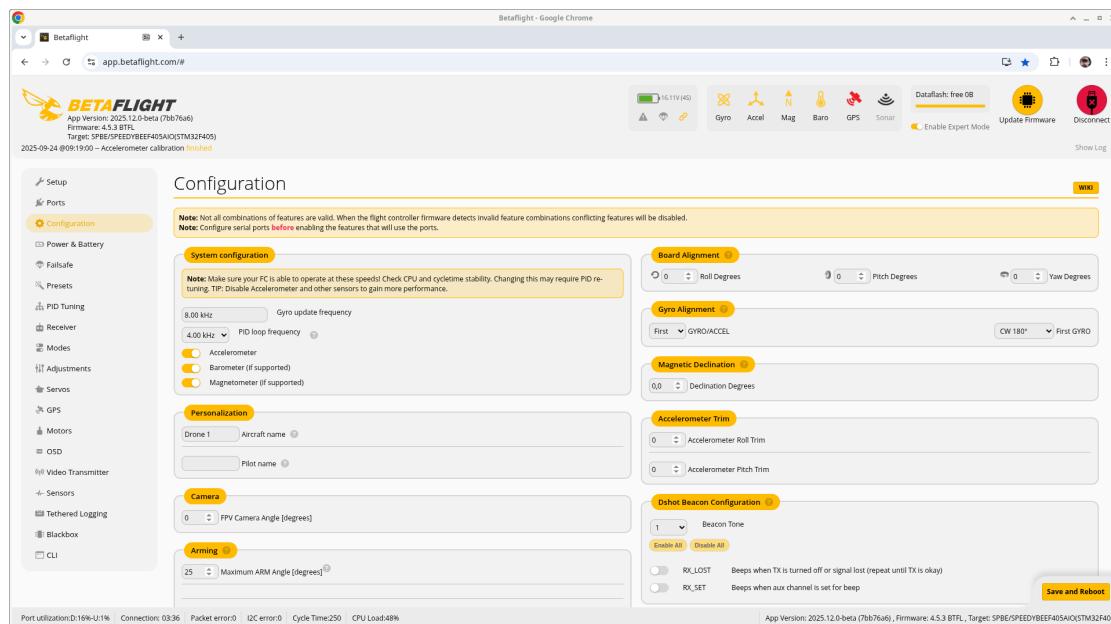


Figure 2.4: Configuration Page of Betaflight (Part 1/2)

Safety-relevant settings, such as the maximum tilt angle of the drone at which arming (activating the motors to prepare for flight) is allowed, are also configured on the *Configuration* page. If an on-screen display (OSD) is to be shown in the FPV live video by the flight controller, it must be enabled here. The *Airmode* option, shown as active in Figure 2.5, ensures that the motors continue to spin slightly even at zero throttle, which improves both the stability and controllability of the drone.

The *Power & Battery* page allows you to define the voltage levels at which the battery is considered fully charged or discharged, as well as the thresholds at which the flight controller should issue warnings.

On the *Failsafe* page, you can specify in great detail how the flight controller should respond if the pilot triggers a failsafe condition or if signal loss occurs. Useful settings include having the drone perform a controlled landing or, alternatively, return to its starting point using GPS.

The *Presets* page allows you to save and restore your own Betaflight configuration. It also provides access to a public database of shared

Auch sicherheitsrelevante Einstellungen, wie der maximale Neigungswinkel der Drohne, bei dem das Arming (das Aktivieren der Motoren zur Flugvorbereitung) überhaupt möglich ist, werden auf der Seite *Configuration* festgelegt. Soll im Livebild der FPV-Drohne durch den Flugcontroller ein On-Screen-Display (OSD) eingeblendet werden, muss es hier grundsätzlich aktiviert werden. Die in Abbildung 2.5 aktivierte Einstellung *Airmode* sorgt dafür, dass die Motoren auch bei null Throttle leicht weiterlaufen, was die Stabilität und Kontrollierbarkeit der Drohne verbessert.

Die Seite *Power & Battery* ermöglicht es, die Spannungswerte zu definieren, bei denen der Akku als vollständig geladen oder entladen gilt, sowie die Schwellen, bei denen der Flugcontroller entsprechende Warnungen ausgeben soll.

Auf der Seite *Failsafe* kann sehr detailliert festgelegt werden, wie der Flugcontroller reagieren soll, wenn der Pilot ein Problem meldet oder ein Signalverlust auftritt. Sinnvolle Einstellungen sind beispielsweise, dass die Drohne kontrolliert landen oder mithilfe des GPS-Moduls selbstständig zum Startpunkt zurückkehren soll.

Die Seite *Presets* ermöglicht es, die eigene Betaflight-Konfiguration zu speichern und wiederherzustellen. Zudem bietet sie Zugriff auf

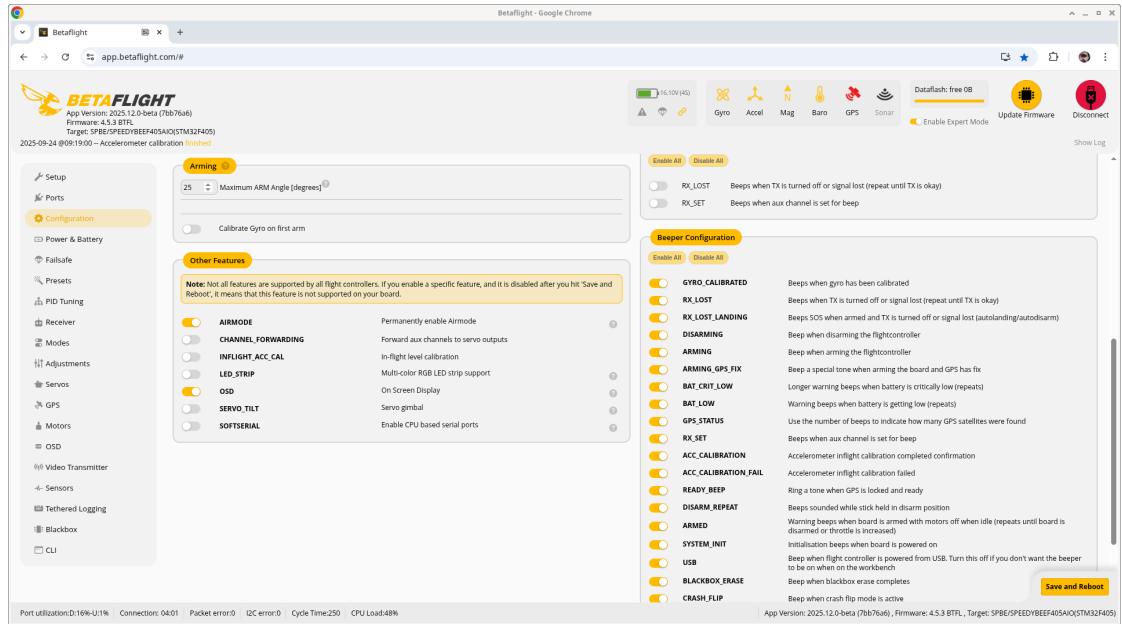


Figure 2.5: Configuration Page of Betaflight (Part 2/2)

configurations, which can be searched and applied based on various parameters.

On the *PID Tuning* (Proportional-Integral-Derivative) page, fine adjustments to the motor control can be made through the flight controller. The goal is typically to achieve more precise flight behavior and to counteract undesirable drone reactions such as oscillations or overly slow or aggressive responses to control inputs.

The correct operation of the receiver can be verified on the *Receiver* page (see Figure 2.6). Movements of the transmitter controls are displayed here when received by the receiver. The connection type and communication protocol are also defined on this page. For the receiver to operate correctly, it must be assigned to the correct UART on the *Ports* page.

If telemetry data is to be transmitted from the receiver to the transmitter, the corresponding option must be enabled on the *Receiver* page. Telemetry data typically include information such as battery voltage, current consumption, signal quality, GPS data (latitude, longitude,

eine öffentliche Datenbank veröffentlichter Konfigurationen, die nach verschiedenen Parametern durchsucht und angewendet werden können.

Auf der Seite *PID Tuning* (Proportional-Integral-Derivative) können Feineinstellungen in der Motorsteuerung durch den Flugcontroller vorgenommen werden. Ziel ist es meist, ein präziseres Flugverhalten zu erreichen und unerwünschte Reaktionen der Drohne – etwa Zittern oder ein zu langsames bzw. zu aggressives Reagieren auf Steuerbefehle – zu vermeiden.

Die korrekte Funktionsweise des Empfängers kann auf der Seite *Receiver* (siehe Abbildung 2.6) überprüft werden. Bewegungen an den Bedienelementen des Senders werden, sobald sie vom Empfänger empfangen werden, hier angezeigt. Auch die Anschlussart des Empfängers und das verwendete Protokoll sind auf dieser Seite definiert. Damit der Empfänger korrekt funktioniert, muss er auf der Seite *Ports* dem richtigen UART zugewiesen sein.

Soll der Empfänger Telemetriedaten an den Sender übertragen, muss die entsprechende Option auf der Seite *Receiver* aktiviert werden. Zu den Telemetriedaten gehören in der Regel Informationen wie Akkuspannung, Stromverbrauch, Signalqualität, GPS-Daten (Breitengrad, Län-

speed, number of satellites), altitude, and temperature.

gengrad, Geschwindigkeit, Anzahl der Satelliten), Höhe und Temperatur.

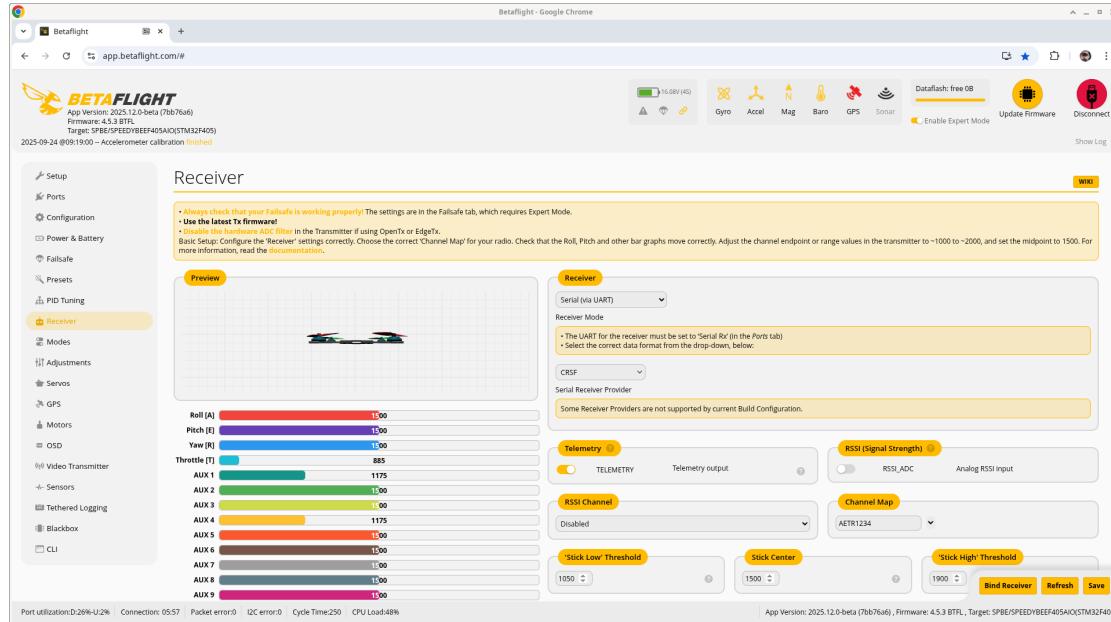


Figure 2.6: Receiver Page of Betaflight

The assignment of important drone functions to individual switches on the transmitter is configured on the *Modes* page (see Figure 2.7). The most important function here is arming the motors to prepare them for flight. Other functions that are sensibly assigned to transmitter switches include flight modes (Angle, Horizon, and Acro), the beeper (buzzer) for locating a crashed drone more easily, and the automatic return-to-home (GPS Rescue) function.

The SA switch (AUX1) is very often assigned to the arming function. However, using only one switch increases the risk of accidental arming, which can lead to injuries, such as to hands or fingers. To improve safety when holding the drone, it is therefore recommended to link the arming process to two switches – for example, SA (AUX1) + SB (AUX4) – that are not located next to each other. This exact configuration is shown in Figure 2.7.

Another common configuration is to assign a three-position switch for selecting the flight mode. As shown in Figure 2.7, the SB switch

Die Verknüpfung wichtiger Funktionen der Drohne mit einzelnen Schaltern des Senders erfolgt auf der Seite *Modes* (siehe Abbildung 2.7). Die wichtigste Funktion ist hier das Anlaufen („scharf schalten“) der Motoren, um sie für den Flug vorzubereiten. Weitere Funktionen, die sinnvollerweise Schaltern des Senders zugeordnet werden, sind unter anderem die Flugmodi (Angle, Horizon und Acro), der Pieper (Buzzer) zum leichteren Wiederfinden abgestürzter Drohnen sowie die automatische Rückkehr (GPS Rescue) zum Startpunkt.

Sehr häufig wird der Schalter SA (AUX1) mit dem Arming belegt. Da bei nur einem Schalter auch ein versehentliches Arming vorkommen kann, treten Verletzungen, z. B. an Händen und Fingern, häufiger auf. Zur Verbesserung der Sicherheit beim Halten der Drohne empfiehlt es sich daher, das Arming mit zwei Schaltern – z. B. SA (AUX1) + SB (AUX4) – zu verknüpfen, die nicht direkt nebeneinander liegen. Genau diese Einstellung ist auch in Abbildung 2.7 zu sehen.

Eine weitere etablierte Konfiguration ist die Belegung eines Schalters mit drei möglichen Positionen, über den der Flugmodus eingestellt

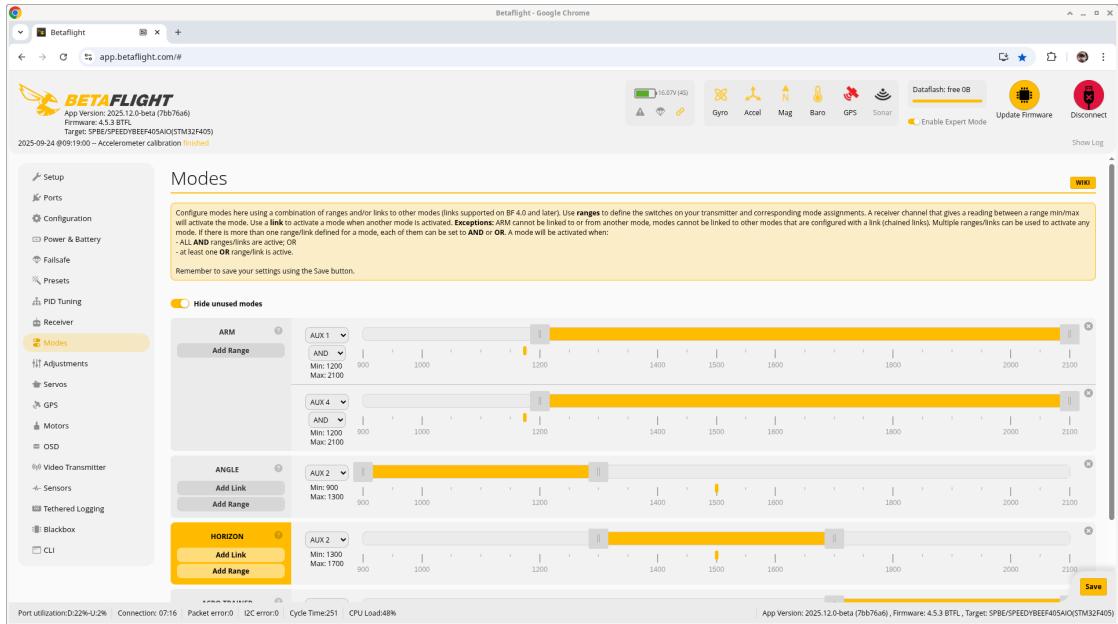


Figure 2.7: Modes Page of Betaflight

(AUX2) can be configured so that the lower position activates the Angle mode, the middle position activates Horizon mode, and the upper position activates Acro mode.

On the *Adjustments* page, it is possible to define which drone parameters can be adjusted live during flight using specific channels (switches) or potentiometers (dials). This feature allows advanced pilots to fine-tune flight behavior in real time.

The *Servos* page defines control options for servo motors. Here, transmitter channels (switches) are assigned to individual servos, and fine adjustments such as midpoint (neutral position) and endpoints (Min/Max) can be set. Typical applications include camera gimbal control or building a gripping mechanism for delivering or collecting small objects.

If a GPS module is connected to the drone's flight controller, configuration and monitoring of the GPS functionality can be performed on the *GPS* page. For the GPS module to operate correctly, it must be assigned to the correct UART

wird. So kann beispielsweise, wie in Abbildung 2.7 dargestellt, der Schalter SB (AUX2) so konfiguriert werden, dass bei der unteren Position der Flugmodus Angle, bei der mittleren Position Horizon und bei der oberen Position Acro verwendet wird.

Auf der Seite *Adjustments* ist es möglich zu definieren, welche Parameter der Drohne im Flug mit bestimmten Kanälen (Schaltern) oder Potentiometern (Drehreglern) live angepasst werden können. Diese Seite eröffnet Möglichkeiten zur Feineinstellung für fortgeschrittene Drohnenpiloten während des Fluges.

Die Definition von Steuermöglichkeiten für Servomotoren erfolgt auf der Seite *Servos*. Hier werden Kanäle (Schalter des Senders) einzelnen Servomotoren zugeordnet und nötige Feineinstellungen wie Mittelstellung (Null-Position) und Endpunkte (Min/Max) vorgenommen. Anwendungsszenarien sind zum Beispiel eine Gimbal-Steuerung der Kamera oder der Bau eines Greifmechanismus, um Objekte mit einer Drohne auszuliefern oder aufzusammeln.

Wenn an den Flugcontroller der Drohne ein GPS-Modul angeschlossen ist, können Kontrolle und Konfiguration der GPS-Funktionalität auf der Seite *GPS* erfolgen. Damit das GPS-Modul korrekt funktioniert, muss es auf der

on the *Ports* page. When a sufficient number of satellites are visible, this page displays the current coordinates (latitude and longitude), speed, direction of movement, and altitude. The distance from the home position is also shown here. During flight, this information is useful when it is transmitted to the transmitter via telemetry data.

Seite *Ports* dem richtigen UART zugewiesen sein. Besteht Sichtkontakt zu ausreichend vielen Satelliten, können hier unter anderem die aktuellen Koordinaten (Breiten- und Längengrad), Geschwindigkeit, Bewegungsrichtung und Höhe kontrolliert werden. Auch die Entfernung zum Startplatz ist hier sichtbar. Während des Fluges sind diese Informationen hilfreich, wenn sie über die Telemetriedaten an den Sender übertragen werden.

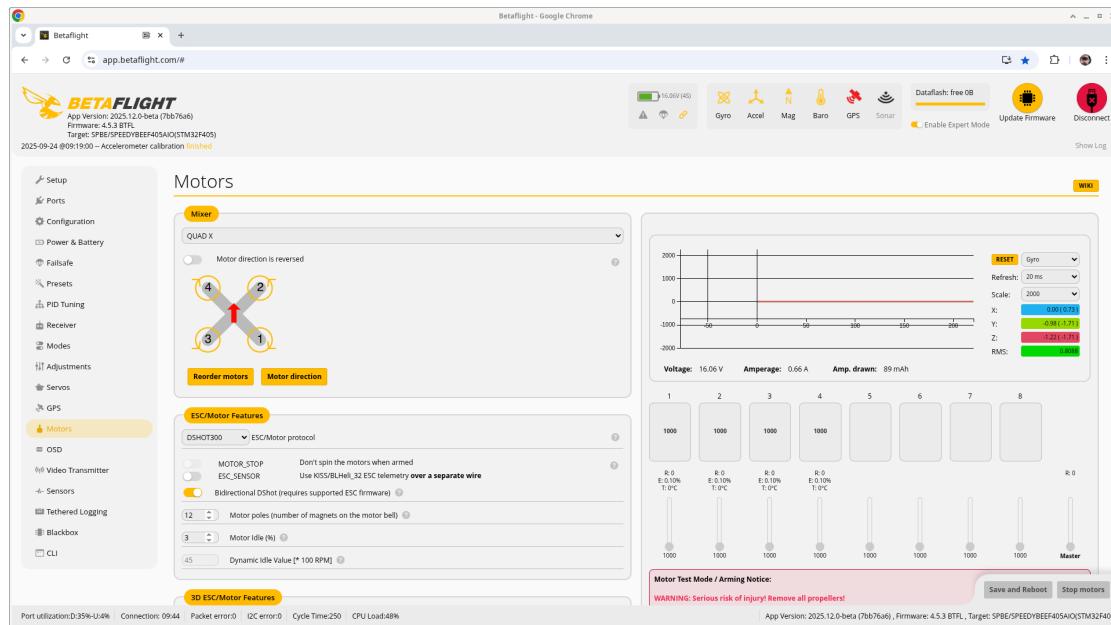


Figure 2.8: Motors Page of Betaflight

All motor-related settings and the testing of motor function, mapping, and rotation direction are performed on the *Motors* page. These tests must always be carried out without propellers, as otherwise damage or even injury can easily occur.

The precise configuration of the on-screen display (OSD) is done on the *OSD* page. Here, the positions and layout of the desired display elements can be freely arranged, and multiple configurations can be saved as profiles—for example, for racing, freestyle, or long-range flying. For OSD configuration to be possible at all, the flight controller must include an OSD chip. If it does not, an analog video transmitter cannot provide an OSD. Digital video transmitters (e.g.,

Alle Einstellungen bezüglich der Motoren sowie das Testen der korrekten Funktion, Zuordnung und Drehrichtung der einzelnen Motoren erfolgen auf der Seite *Motors*. Diese Tests müssen immer ohne Propeller durchgeführt werden, da es sonst leicht zu Beschädigungen oder gar Verletzungen kommen kann.

Die präzise Konfiguration des On-Screen-Displays erfolgt auf der Seite *OSD*. Hier können die Positionen und das Layout der gewünschten Anzeigen frei platziert und mehrere Konfigurationen als Profile – zum Beispiel für Racing, Freestyle oder Longrange – gespeichert werden. Damit die Konfiguration des OSD überhaupt möglich ist, muss der Flugcontroller über einen OSD-Chip verfügen. Ist das nicht der Fall, kann mit einem analogen Videosender kein OSD realisiert werden. Digitale Videosender (z. B. von

from DJI, HDZero, and Walksnail) implement their own OSD systems.

Settings for the video transmitter, such as the selected frequency (see Table 1.6) and transmission power, can be configured on the *Video Transmitter* page (see Figure 2.9). For the video transmitter to function correctly, it must be assigned to the appropriate UART on the *Ports* page.

DJI, HDZero und Walksnail) implementieren ein eigenes OSD.

Einstellungen zum Videosender, wie zum Beispiel die verwendete Frequenz (siehe Tabelle 1.6) und die Sendeleistung, können auf der Seite *Video Transmitter* (siehe Abbildung 2.9) vorgenommen werden. Damit der Videosender korrekt funktioniert, muss er auf der Seite *Ports* dem korrekten UART zugewiesen sein.

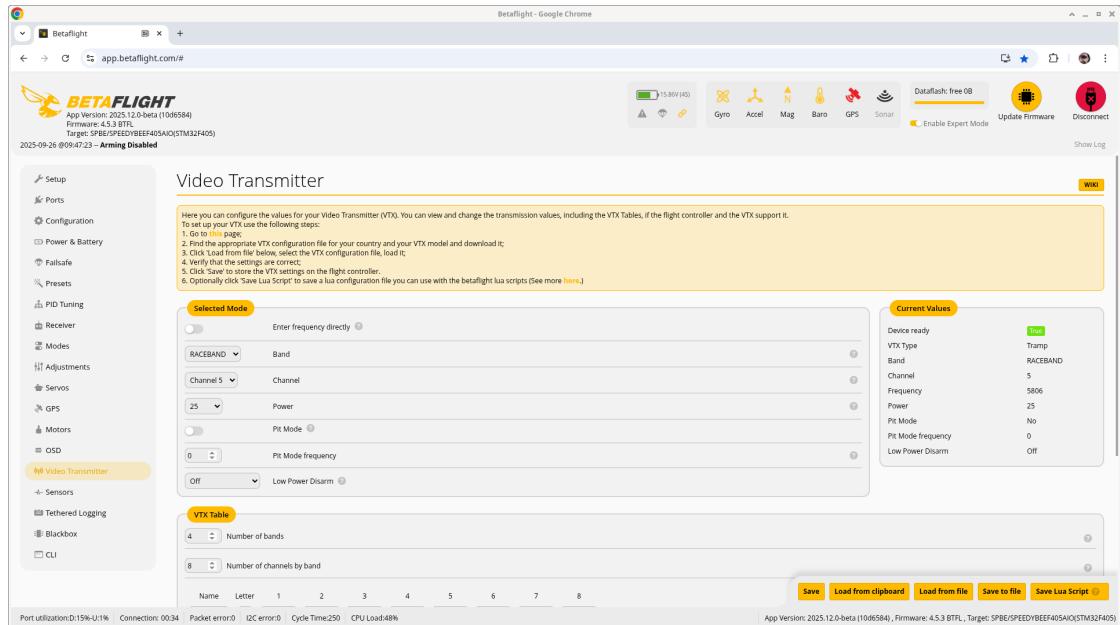


Figure 2.9: Video Transmitter Page of Betaflight

The *Sensors* page (see Figure 2.10) displays the sensor data both graphically and numerically – for example, values from the gyroscope, accelerometer, barometer, and magnetometer. This allows users to verify that all sensors are working correctly and delivering plausible data. The page is particularly useful for troubleshooting sensor orientation or calibration issues.

The live recording of sensor data (e.g. gyroscope, motor values, GPS data, altitude) while the flight controller is connected to a computer is available on the *Tethered Logging* page. In contrast to classic Blackbox logging, where data is stored locally on the flight controller, flash memory, or an SD card, Tethered Logging allows real-time data transmission and monitoring on the computer. It only works as long as a connection

Die Seite *Sensors* (siehe Abbildung 2.10) zeigt Sensorwerte sowohl grafisch als auch numerisch an – zum Beispiel Werte des Gyroskops, Beschleunigungssensors, Höhenmessers (Barometer) und magnetischen Kompasses. Dadurch lässt sich überprüfen, ob alle Sensoren korrekt funktionieren und plausible Werte liefern. Die Seite ist insbesondere hilfreich zur Fehlersuche bei Problemen mit der Sensororientierung oder Kalibrierung.

Die Live-Aufzeichnung von Sensordaten (z. B. Gyroskop, Motorwerte, GPS-Daten, Höhenmeter) während der Verbindung mit dem Computer ist auf der Seite *Tethered Logging* möglich. Im Gegensatz zum klassischen Blackbox-Logging, bei dem die Daten lokal im Flugcontroller, auf Flash oder SD-Karte gespeichert werden, erlaubt Tethered Logging die Übertragung und Überwachung der Daten in Echtzeit auf dem

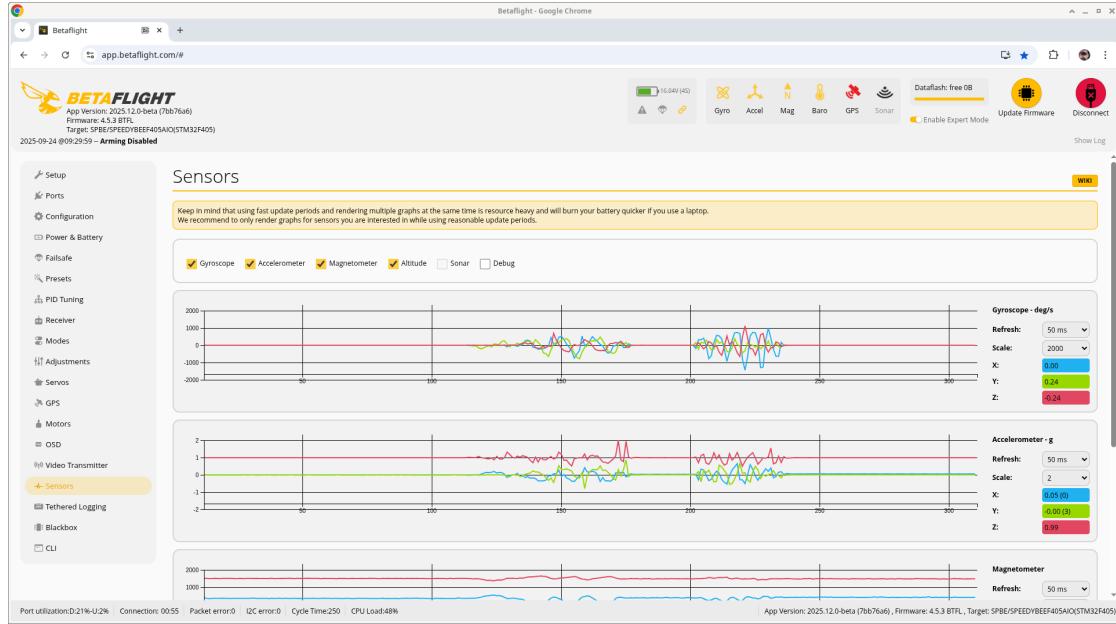


Figure 2.10: Sensors Page of Betaflight

tion (e.g. via USB) between the flight controller and the computer is active. If the connection is lost, the live recording stops immediately.

The flight data recorder for logging various sensor data is configured on the *Blackbox* page (see Figure 2.11). The collected data is recorded during flight and analyzed afterwards. The resulting insights can be used to analyze flight behavior, optimize filters, and diagnose issues. Recording typically starts automatically when arming and stops when disarming. Modern flight controllers store Blackbox data on an onboard flash chip or a microSD card. This page allows the selection of which sensors to log, the storage device to use, and the log rate, which defines how frequently data points are captured. The page also offers options to export or erase Blackbox data.

The *CLI* page in Betaflight (see Figure 2.12) provides access to the integrated command-line interface of the flight controller. This interface allows users to inspect and configure the con-

Computer. Das Tethered Logging funktioniert nur, solange eine Verbindung (z. B. via USB) zwischen Flugcontroller und Computer besteht. Wenn die Verbindung abreißt, bricht auch die Live-Aufzeichnung ab.

Der Flugdatenschreiber zur Aufzeichnung verschiedenster Sensordaten wird auf der Seite *Blackbox* (siehe Abbildung 2.11) konfiguriert. Die Aufzeichnung der gesammelten Daten geschieht während des Flugs und wird nachträglich ausgewertet. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können das Flugverhalten analysiert, Filter optimiert und Probleme diagnostiziert werden. Die Aufzeichnung beginnt üblicherweise automatisch beim Arming und stoppt beim Disarming. Moderne Flugcontroller speichern die Blackbox-Daten auf einem Onboard-Flashchip oder einer microSD-Karte. Die Seite erlaubt neben der Auswahl der zu erfassenden Sensordaten auch die Auswahl des Speichergeräts und die Einstellung der Log-Rate, die definiert, wie häufig Datenpunkte aufgezeichnet werden sollen. Auch der Export der Blackbox und das Löschen des Speichers sind auf dieser Seite möglich.

Betaflight bietet auf der Seite *CLI* (siehe Abbildung 2.12) Zugriff auf die integrierte Kommandozeileumgebung des Flugcontrollers. Hierüber kann der Flugcontroller direkt untersucht

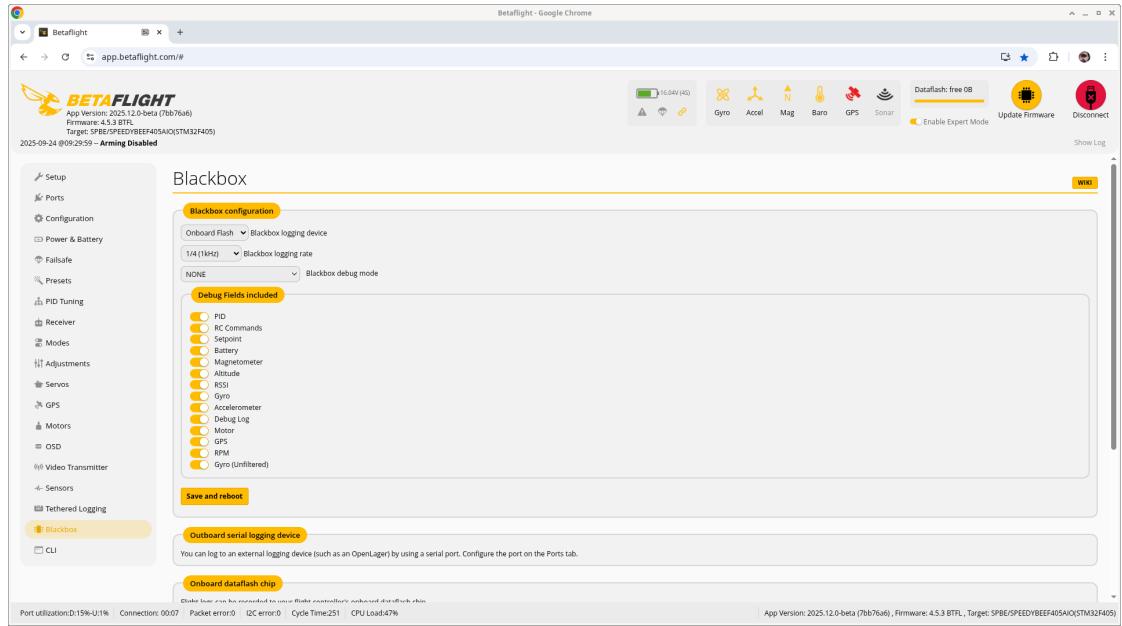


Figure 2.11: Blackbox Page of Betaflight

troller directly. Individual parameters can be displayed and changed using the commands `get` and `set`. The `save` command saves all changes and restarts the flight controller.

und konfiguriert werden. Einzelne Parameter können mit den Kommandos `get` und `set` angezeigt und geändert werden. Das Kommando `save` speichert alle Änderungen und startet den Flugcontroller neu.

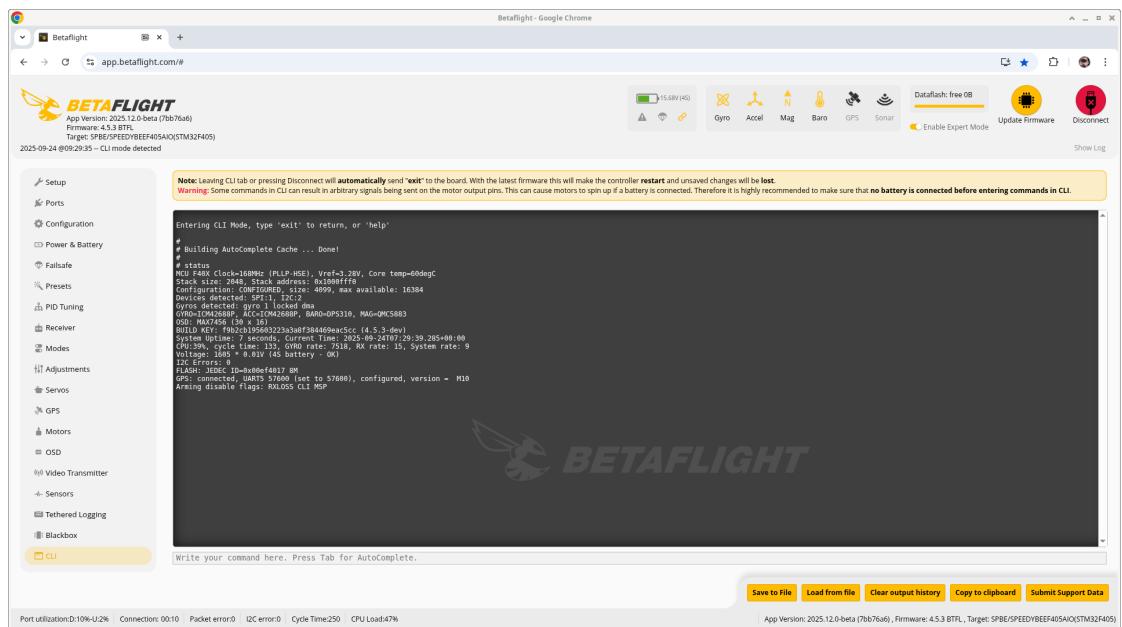


Figure 2.12: CLI Page of Betaflight

The current configuration of the flight controller can be displayed completely with the command `dump`. Only the differences from the default configuration are shown using the command `diff`. These outputs can be copied into text files and re-imported later using copy and paste. This makes it easy to create backups of all settings and restore them when needed.

Information about the flight controller and the installed firmware version can be retrieved with the command `version`. The `status` command provides current sensor readings and information about sensor configuration. The command `tasks` lists all currently running processes on the flight controller, and `resource` displays the pin and UART assignments.

2.1.2

INAV

INAV consists of two main components: the firmware that runs on the flight controller and the configuration tool that is used for installation and administration. There is no web app, as is the case with current Betaflight versions.

In addition to the Return-To-Home (RTH) and rescue functionality, INAV offers additional autopilot features such as waypoint missions, hold position, hold altitude, and more. These can also be used without a compass (since version 7.1), albeit with lower accuracy.

The software receives a major release every year and minor support updates as needed. The current version 8 supports the following STM flight controller chips: F405, F722, F745, F765, and H743. AT-F435 chips are also supported.

Installation

The installation of INAV is done using the *INAV Configurator*. A certain similarity to Betaflight is very apparent here, as the structure is quite similar to the Betaflight Configurator, which is used for versions up to 4.5 (Figure 2.13). This guide assumes that the flight controller is connected via USB to the computer used for flashing.

Die aktuelle Konfiguration des Flugcontrollers kann vollständig mit dem Kommando `dump` ausgegeben werden. Nur die Unterschiede zur Standardkonfiguration zeigt das Kommando `diff`. Diese Ausgaben können in Textdateien gespeichert und bei Bedarf per Copy-and-Paste wieder importiert werden. So lassen sich einfach Backups der Einstellungen erstellen und wiederherstellen.

Informationen zum Flugcontroller und zur installierten Firmwareversion liefert das Kommando `version`. Das Kommando `status` zeigt aktuelle Sensordaten und Informationen zur Konfiguration der Sensoren. Das Kommando `tasks` listet alle aktuell laufenden Prozesse des Flugcontrollers auf, und `resource` zeigt die Belegung der Pins und UART-Schnittstellen.

INAV

INAV besteht aus zwei Hauptkomponenten: Die Firmware, welche auf dem Flugcontroller läuft und dem Konfigurationstool, welches für die Installation und Administration genutzt werden kann. Es gibt keine Web-App, wie bei aktuellen Betaflight-Versionen.

Neben der Return-To-Home- (RTH) bzw. Rescuerfunktionalität bietet INAV weitere Autopilotenfunktionalitäten, wie Wegpunktmissionen, *Position halten*, *Flughöhe halten* und mehr. Diese können auch ohne Kompass genutzt werden (seit Version 7.1), jedoch mit geringerer Genauigkeit.

Die Software erhält jedes Jahr einen großen Release und kleinere Support-Updates, wie sie benötigt werden. Die aktuelle Version 8 unterstützt die folgenden STM-Flugcontrollerchips: F405, F722, F745, F765 und H743. Außerdem werden AT-F435 Chips unterstützt.

Installation

Die Installation erfolgt über den *INAV Configurator*. Der Aufbau dieses Prozesses ist sehr ähnlich zum Betaflight Configurator, welcher bis Version 4.5 verwendet wurde. (Abbildung 2.13). Dieser Guide geht davon aus, dass der Flugcontroller via USB an den Computer angeschlossen ist, mit welchem das Flashen durchgeführt wird.

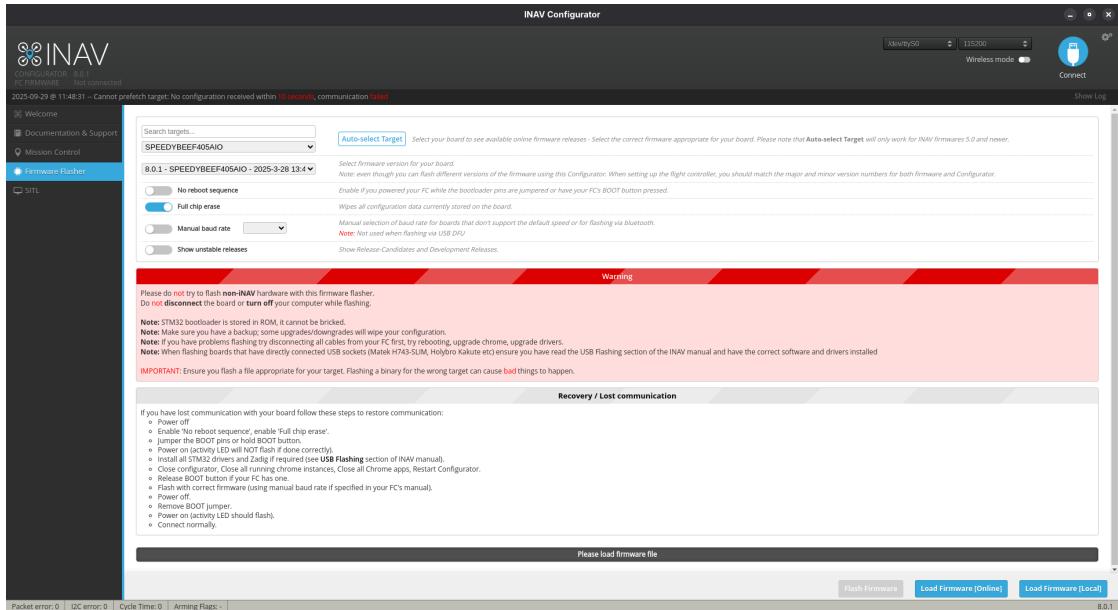


Figure 2.13: Firmware Flasher tab in the INAV Configurator

If the flight controller is not being flashed for the first time, it is good practice to create a backup of the configuration, as some upgrades reset it, or to be safe in case of a failure. This is done via the *CLI* tab. The command `diff all` outputs the corresponding parameters. These can then be saved to a text file using the *Save to File* button. The flashing process itself consists of the following steps:

1. Putting the flight controller into *Device Firmware Upgrade (DFU) mode* is the first step. This can usually be done using a button on the flight controller board or with the `dfu` command in the *CLI* tab.
2. Once the board is in DFU mode, the *Firmware Flasher* tab in the INAV Configurator must be opened. First, the target must be selected. If *Auto-select Target* does not work, the model name must be searched for manually in the list.
3. The available (stable) releases are then displayed in the drop-down menu below the board. The *Show unstable releases* option

Wird die Software nicht zum ersten Mal auf dem Flugcontroller installiert, sollte ein Backup der Konfiguration gemacht werden, da manche Upgrades die diese zurücksetzen. Dies geschieht über den *CLI*-Tab. Der Befehl `diff all` gibt die Parameter aus. Mit dem Button *Save to File* können diese in eine Textdatei gespeichert werden. Der Flashprozess besteht dann aus den folgenden Schritten:

1. Den *Device Firmware Upgrade (DFU)-Modus* aktivieren ist der erste notwendige Schritt. Dies kann in der Regel über einen Button am Flugcontrollerboard realisiert werden oder mit dem Befehl `dfu` im *CLI*-Tab.
2. Befindet sich das Board im DFU-Modus, so muss der *Firmware Flasher* Tab im INAV Configurator aufgerufen werden. In diesem muss zunächst das Target ausgewählt werden, sollte *Auto-select Target* nicht funktionieren, muss der Modellname händisch in der Liste gesucht werden.
3. Im Ausklappmenü unter dem Board werden dann die verfügbaren (stable) Releases angezeigt. Mit der Option *Show unstable*

tion allows you to select even more recent versions. However, these may not work as expected.

4. INAV offers three options that can be set for flashing:
 - *No reboot sequence* - Only required if the boot pins are bridged or the boot button remains pressed during the flashing process (depending on the model).
 - *Full chip erase* - Deletes all configuration options (backup available?). This should always be set if a different software was previously installed.
 - *Manual baud rate* - Set a fixed baud rate for Bluetooth or USB if the model in question does not support the standard speed.
5. The flashing process consists of two steps: First, the firmware is loaded (online or file), then the software is flashed onto the board via a separate button. The actual flashing should not be interrupted, as this will brick the device. However, the bootloader required for the flashing itself is stored in ROM and *cannot be bricked*. This means the device can always be re-flashed.
6. If necessary, the backup can now be restored via the *CLI* tab. This is done using the *Load from File* button. This allows the corresponding text file to be selected and executed using the *Execute* button.
4. INAV bietet drei Optionen die für das Flashen gesetzt werden können:
 - *No reboot sequence* - Wird nur benötigt, wenn die Bootpins überbrückt sind oder der Bootbutton während des Flashens gedrückt wird (modell-abhängig).
 - *Full chip erase* - Löscht alle Konfigurationsoptionen (Backup Vorhanden?). Sollte immer gesetzt werden, wenn vorher eine andere Software installiert war.
 - *Manual baud rate* - Festlegen der Baudrate für Bluetooth oder falls das zu flashende Modell die Standardgeschwindigkeit nicht unterstützt.
5. Der Prozess des Flashens besteht aus zwei Schritten: Zunächst wird die Firmware geladen (online oder Datei), dann wird das eigentliche Flashen über einen separaten Button gestartet. Dies sollte nicht unterbrochen werden, da hierdurch das Board gebrickt wird. Der zum Flashen benötigte Bootloader ist allerdings im ROM gespeichert und kann *nicht gebrickt* werden. Das bedeutet, dass das Board immer wieder neu geflasht werden kann.
6. Gegebenenfalls kann nun das Backup über den *CLI*-Tab wieder eingespielt werden. Dies geschieht über den Button *Load from File*. Damit kann die entsprechende Textdatei herausgesucht werden, um sie mit dem *Execute*-Button auszuführen.

Administration

The administration of INAV also occurs in the *INAV Configurator*. When the software is installed for the first time, a few things need to be configured to enable initial flight. These are described in this section.

Administration

Die Administration von INAV erfolgt ebenfalls über den *INAV Configurator*. Wenn die Software das erste Mal installiert wurde, müssen einige Punkte konfiguriert werden, um das Fliegen initial zu ermöglichen.

When the Configurator is launched for the first time after installation, windows appear for setting the *Default Values* (presets). Here, you need to select the preset that is closest to the model you have built. After that, you can configure the UART ports (for GPS, VTX, etc.). However, this can also be done via the Ports tab. The further configuration steps are as follows:

1. The *Status tab* provides a basic overview. Among other things, the *Pre-armng checks* overview shows whether the drone is ready for takeoff. It may be necessary to adjust the board orientation beforehand. To do this, place the drone upright with the camera facing the screen of the configuring computer and then press the *Reset Z axis* button.
2. The *Calibration tab* (Figure 2.14) is used to calibrate the accelerometer and compass. To do this, the drone must be placed in different positions.

Wird der Configurator zum ersten Mal nach der Installation aufgerufen, erscheinen Fenster zum Setzen der *Default-Values* (Presets). Hier gilt es das Preset auszuwählen, was am nächsten an dem gebauten Modell dran ist. Danach können die UART-Ports (für GPS, VTX, etc.) konfiguriert werden. Dies kann allerdings auch über den Ports-Tab durchgeführt werden. Die weiteren Konfigurationsschritte gestalten sich wie folgt:

1. Der *Status-Tab* stellt einen Überblick zur Verfügung. Unter anderem ist in der Übersicht *Pre-armng checks* zu sehen, ob die Drohne abheben kann. Eventuell muss hier vorher die Boardorientierung angepasst werden. Dazu wird die Drohne aufrecht mit Kamera Richtung Bildschirm des konfigurierenden Computers gestellt, um dann den *Reset Z axis* Button zu drücken.
2. Im *Calibration-Tab* (Abbildung 2.14) werden der Beschleunigungsmesser und der Kompass kalibriert. Dazu muss die Drohne jeweils in unterschiedliche Posen gebracht werden.

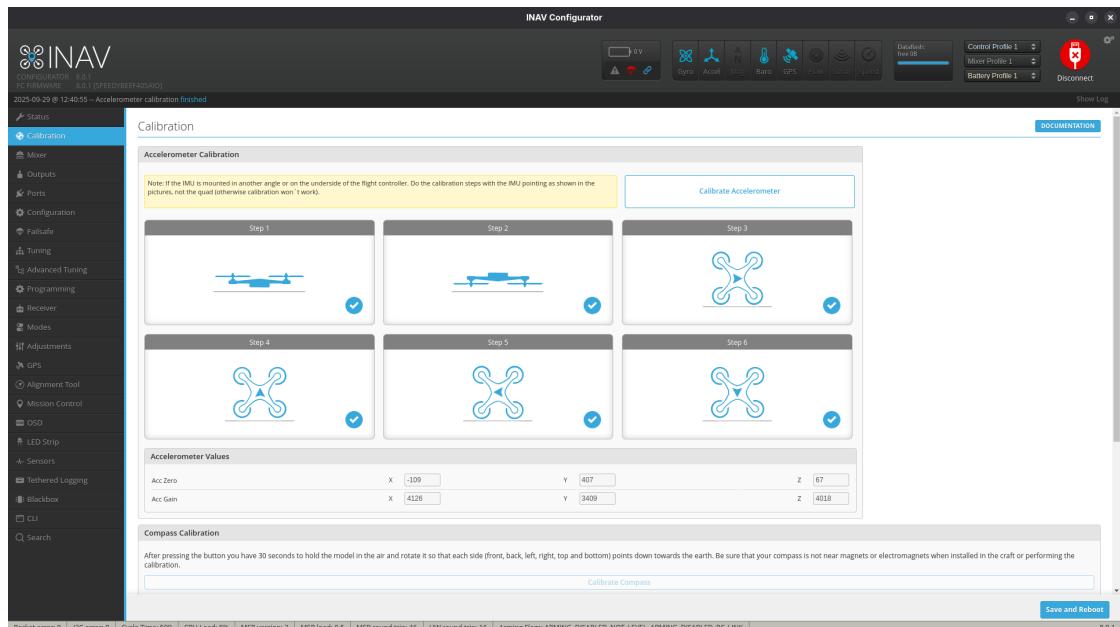


Figure 2.14: INAV Calibration Tab for Board Orientation, Compass and Flow Sensor

3. The *Mixer tab*, together with the *Outputs tab*, configures the drone's motors. It is crucial that the correct *Platform type* and *Mixer preset (Multirotor and QUAD X for a quadcopter)* are configured according to the type of drone used. If the motors do not rotate in the correct direction, this can be adjusted via the *Motor direction* and the assignment via the *Motor Mixer Wizard*.
4. In the *Outputs tab*, the motors are activated with the *Enable motor and servo output* option. You should also ensure that *DSHOT300* is used as the *ESC protocol*. In addition, the *Motors IDLE power* can be set to 5% if a multirotor drone is used.
5. In the *Ports tab*, the peripheral devices are configured, unless this was done in the pop-up menu at the beginning. This looks very similar to the *Ports tab* of the Betaflight Configurator, with the difference that *USB VCP* is hidden instead of partially grayed out (Figure 2.3). How these are configured depends on the connected devices and the flight controller chip. In most cases, the configuration options for Betaflight (usually found in the respective device manuals) are transferable to INAV.
6. The sensors can be activated in the *Configuration tab* if this has not been done automatically after configuring the ports. If possible, the *I2C Speed* should be set to 800KHZ here, if possible.
7. The *Failsafe tab* (Figure 2.15) is very important, as it defines the behavior should the remote control signal be lost. Here, you should ensure that either *Drop*, *Land*, or *Return-to-Home (RTH)* are configured so that the drone does not continue to fly uncontrollably.
3. Der *Mixer-Tab* konfiguriert zusammen mit dem *Outputs-Tab* die Motoren der Drohne. Hier ist entscheidend, dass der richtige *Platform type* und das richtige *Mixer preset (Multirotor und QUAD X für einen Quadcopter)* entsprechend des verwendeten Drohnen-Typs konfiguriert sind. Sollten die Motoren nicht in die richtige Richtung drehen, kann die diese über die *Motor direction* angepasst werden und die Zuordnung über den *Motor Mixer Wizard*.
4. Im *Outputs-Tab* werden die Motoren aktiviert mit der Option *Enable motor and servo output*. Außerdem sollte sichergestellt werden, dass *DSHOT300* als *ESC protocol* verwendet wird. Außerdem kann die *Motors IDLE power* auf 5% gesetzt werden, wenn eine Multirotor-Drohne verwendet wird.
5. Im *Ports-Tab* werden die Peripheriegeräte konfiguriert, insofern dies nicht im Pop-Up-Menü am Anfang gemacht wurde. Dieser sieht dem *Ports-Tab* des Betaflight-Configurators sehr ähnlich mit dem Unterschied, dass *USB VCP* ausgeblendet statt teilweise ausgegraut ist (Abbildung 2.3). Wie diese konfiguriert werden, hängt von den angeschlossenen Geräten und vom Flugcontrollerchip ab. Meist kann die Konfiguration für Betaflight aus den jeweiligen Handbüchern entnommen und übertragen werden.
6. Im *Configuration-Tab* können die Sensoren aktiviert werden, insofern dies nicht nach Konfiguration der Ports automatisch geschehen ist. Wenn möglich, sollte hier der *I2C Speed* auf 800KHZ gestellt werden.
7. Der *Failsafe-Tab* (Abbildung 2.15) ist sehr wichtig, da in diesem das Verhalten definiert ist, sollte das Fernsteuerungssignal abreißen. Hier sollte sichergestellt werden, dass entweder *textslDrop*, *Land* oder *Return-to-Home (RTH)* konfiguriert sind, damit die Drohne nicht unkontrolliert weiterfliegt.

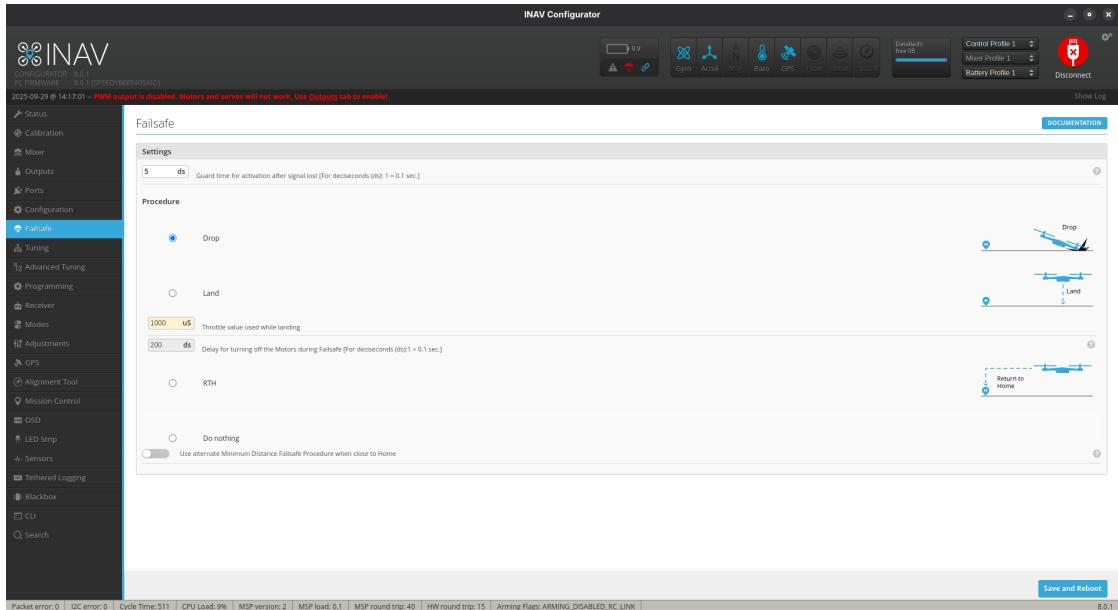


Figure 2.15: INAV Failsafe Tab

8. In the *Receiver tab*, the connection to the remote control from the side of the flight controller is configured. If an ExpressLRS remote control is used, **SERIAL** must be configured as the *Receiver type* and **CRSF** as the *Serial Receiver Provider*. In addition, you can check whether the channel mappings are correct. This tab is very similar to the Receiver tab in the Betaflight Configurator (Figure 2.6).
9. In the *GPS tab*, the *GPS for navigation and telemetry* option must be activated in order to use the GPS. The *Protocol* option must be set according to the specifications of the model used.
10. In the *Modes tab*, which is also very similar to the Betaflight version (Figure 2.7), only **ARM** needs to be configured (CH5 recommended). In addition, it is also worth configuring **ANGLE**, especially for beginner pilots, as it limits the maximum amount of pitch and roll, allowing for a smoother flight experience. **FAILSAFE** should also be configured, so it can be activated in case the drone behaves unexpectedly. Modes
8. Im *Receiver-Tab* wird Flugcontrollerseitig die Verbindung zur Fernbedienung konfiguriert. Wird eine ExpressLRS-Fernbedienung verwendet, muss **SERIAL** als *Receiver type* und **CRSF** als *Serial Receiver Provider* konfiguriert werden. Darüber hinaus kann kontrolliert werden, ob die Channel-Mappings korrekt sind. Dieser Tab ist sehr ähnlich zum Receiver-Tab im Betaflight Configurator (Abbildung 2.6).
9. Im *GPS-Tab* muss die Option *GPS for navigation and telemetry* aktiviert werden, um das GPS nutzen zu können. Die Option *Protocol* ist entsprechend der Spezifikation des verwendeten Modells zu setzen.
10. Im *Modes-Tab*, der der Betaflight-Version sehr ähnlich ist (siehe Abbildung 2.7), muss grundsätzlich nur **ARM** konfiguriert werden. Dafür wird Kanal 5 empfohlen. Es lohnt sich außerdem, **ANGLE** einzustellen. Das ist besonders für Fluganfänger wichtig, weil dadurch die Neigung in Pitch und Roll begrenzt wird. Das macht das Fliegen einfacher. Auch **FAILSAFE** sollte aktiviert werden. So kann man reagieren, falls

for autopilot functions can be configured at a later stage.

11. The *on-screen display (OSD)* can be configured according to the pilot's preferences. Useful elements that are not displayed by default include *Remaining Flight Time* and *Battery Remaining Percentage*. Depending on the VTX model, the *Video Format* must also be configured in this tab. The relevant info can usually be found in the manual of the VTX.

sich die Drohne unerwartet verhält. Modi für Autopilotfunktionalitäten können zu einem späteren Zeitpunkt konfiguriert werden.

11. Das *on-screen display (OSD)* kann so konfiguriert werden, wie es vom Piloten bevorzugt wird. Nützliche Elemente, welche nicht standardmäßig eingeblendet werden sind zum Beispiel *Remaining Flight Time* und *Battery Remaining Percentage*. Je nach VTX-Modell muss in diesem Tab auch das *Video Format* konfiguriert werden. Relevante Informationen dazu können in der Regel im Handbuch des VTX gefunden werden.

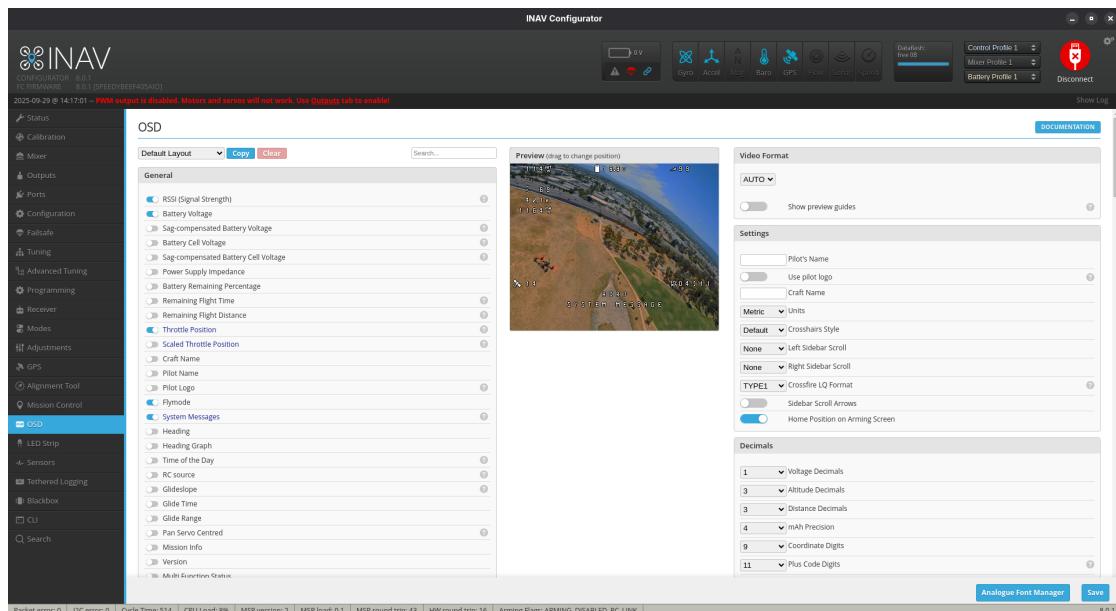


Figure 2.16: INAV OSD Tab

2.1.3

ArduPilot

As a flight controller firmware, ArduPilot focuses on fully autonomous flight and complex mission profiles. It enables mission planning with waypoints, automatic takeoff and landing, obstacle avoidance, follow-me functionality, and more. To achieve this, ArduPilot uses not only

ArduPilot

ArduPilot legt als Flugcontroller-Firmware den Schwerpunkt auf vollautonome Flüge und komplexe Missionsprofile. Es ermöglicht die Missionsplanung mit Wegpunkten, automatischen Starts und Landungen, Hindernisvermeidung, Follow-Me-Funktion und vieles mehr. Hierfür

standard sensors such as GPS, magnetic compass, and velocity sensors but can also integrate LiDAR sensors for distance measurement and cameras for visual processing.

Of the flight controller firmware options presented in this document, ArduPilot requires the most memory. Ideally, 2 MB of flash memory should be available for proper operation. This is provided only by flight controllers equipped with an H743 microcontroller. With 1 MB of flash memory (as found in F405 and F745 microcontrollers), operation is possible but with a reduced feature set. With only 512 kB (F411 and F722 microcontrollers), ArduPilot cannot be used at all.

Installation

TBD

Administration

TBD

2.2

Remote Control Firmware: EdgeTX

EdgeTX is an operating system for radio transmitters used in model aircraft and drones. It is open-source software and runs on transmitters from many well-known manufacturers. EdgeTX generates the control signals, which are then transmitted by the ExpressLRS firmware (see Section 2.3) running on the transmitter module.

Installation is performed via the web application buddy.edgetx.org. This section describes the installation process on a Radiomaster Boxer using a PC.

With the transmitter turned off, connect it to the PC using one of its two USB-C ports. In the web application, select the desired version and the correct device (see Figure 2.17). Clicking the *Flash via USB* button starts the next step.

In the second step, the correct device must be selected. It appears under the name STM32 BOOTLOADER (see Figures 2.18 and 2.19).

nutzt ArduPilot nicht nur die üblichen Sensoren wie GPS, magnetischen Kompass und Geschwindigkeitsmessung, sondern kann auch LiDAR-Sensoren zur Distanzmessung und Kameras zur visuellen Erfassung einbeziehen.

Von den in diesem Dokument vorgestellten Flugcontroller-Firmwares benötigt ArduPilot den meisten Speicher. Idealerweise stehen zum Betrieb von ArduPilot 2 MB Flash-Speicher zur Verfügung. Dies bieten nur Flugcontroller mit einem H743-Mikrocontroller. Mit 1 MB Flash-Speicher (F405- und F745-Mikrocontroller) ist der Betrieb mit reduziertem Funktionsumfang möglich. Mit lediglich 512 kB (F411- und F722-Mikrocontroller) kann ArduPilot nicht verwendet werden.

Installation

TBD

Administration

TBD

Fernbedienung Firmware: EdgeTX

EdgeTX ist ein Betriebssystem für Fernsteuerungen im Modellbau. Es handelt sich um freie Software, die auf Fernbedienungen vieler bekannter Hersteller läuft. EdgeTX erzeugt die Steuersignale, welche anschließend von der Firmware ExpressLRS (siehe Abschnitt 2.3) des Sendemoduls übertragen werden.

Die Installation erfolgt über die Webanwendung buddy.edgetx.org. Dieser Abschnitt beschreibt die Installation auf einer Radiomaster Boxer mithilfe eines PCs.

Die Fernbedienung wird im ausgeschalteten Zustand über eine der beiden USB-C-Schnittstellen mit dem PC verbunden. In der Webanwendung wird die gewünschte Version sowie das passende Gerät ausgewählt (siehe Abbildung 2.17). Die Schaltfläche *Flash via USB* führt zum nächsten Schritt.

Im zweiten Schritt wird das korrekte Gerät ausgewählt. Dieses erscheint unter dem Namen

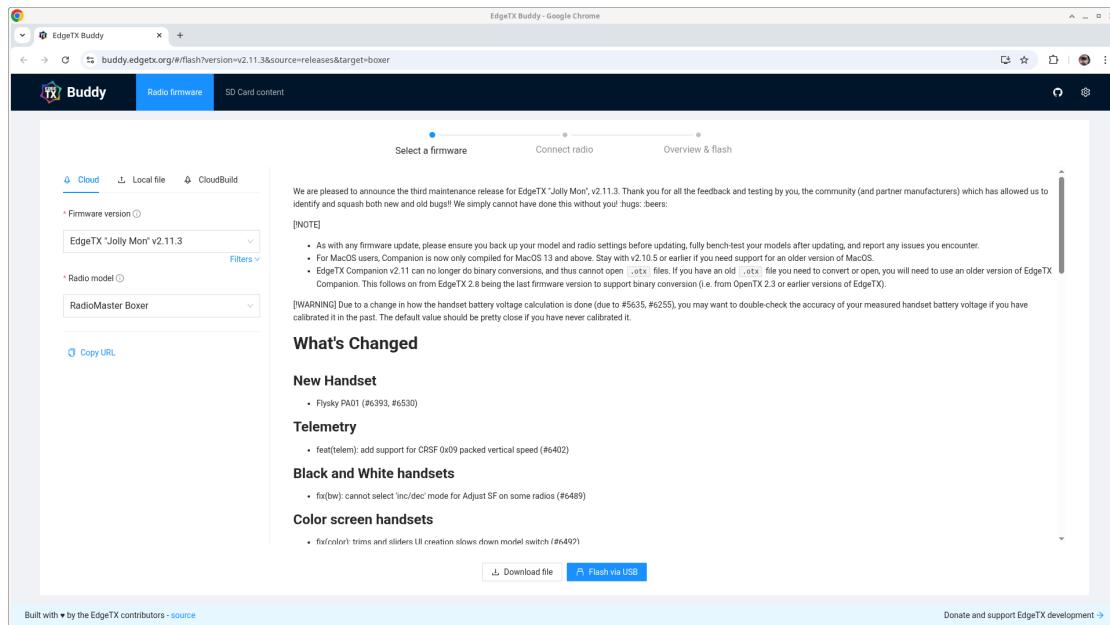


Figure 2.17: EdgeTX Installation Step 1

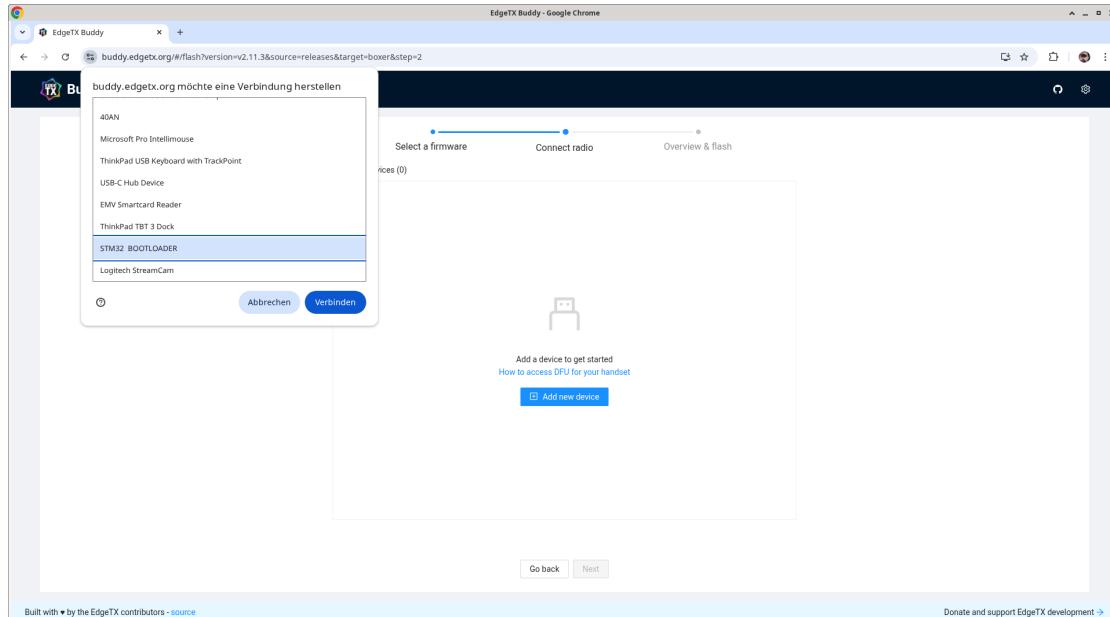


Figure 2.18: EdgeTX Installation Step 2

STM32 BOOTLOADER (siehe Abbildung 2.18 und Abbildung 2.19).

The final step is to start the installation by clicking the *Start flashing* button (see Figure 2.20).

Der letzte Schritt ist der Start der Installation über die Schaltfläche *Start flashing* (siehe Abbildung 2.20).

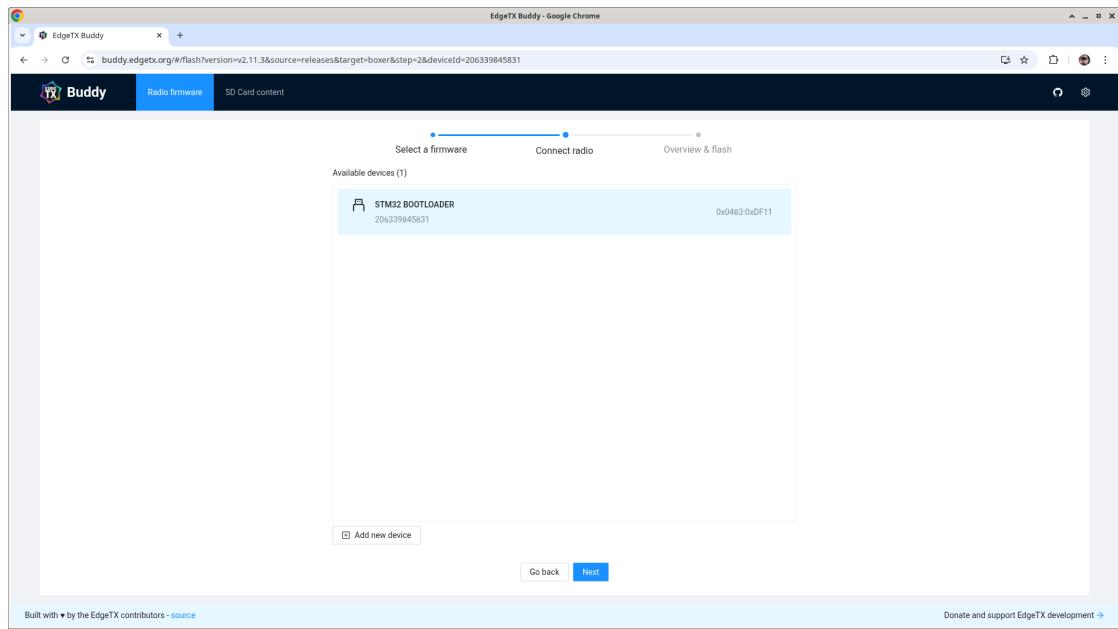


Figure 2.19: EdgeTX Installation Step 3

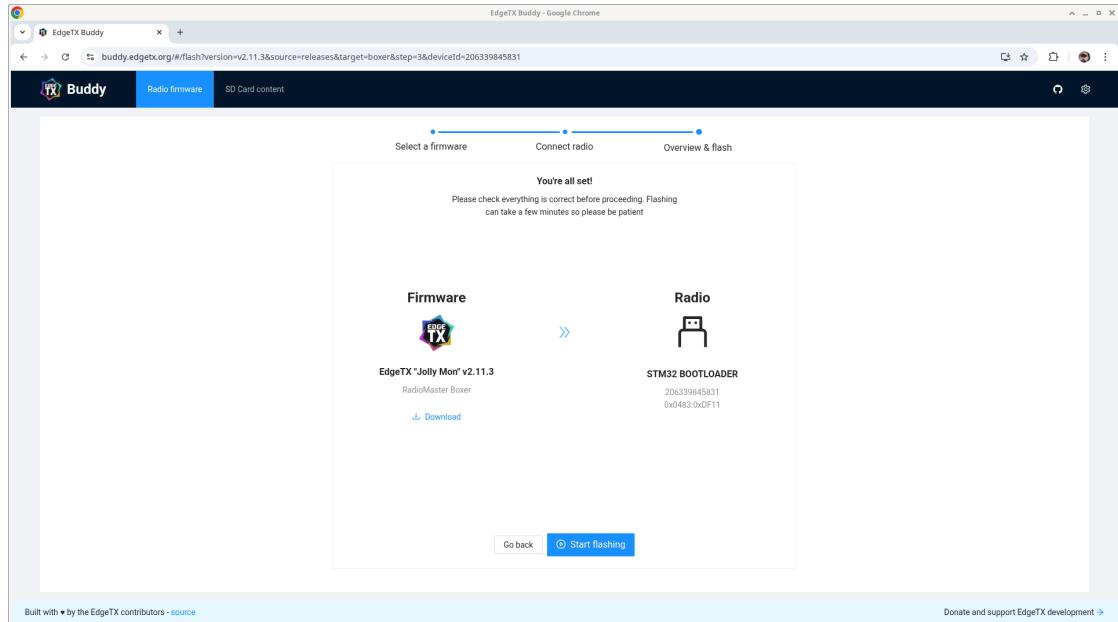


Figure 2.20: EdgeTX Installation Step 4

2.3

Transmitter and Receiver Firmware: ExpressLRS

Sendemodul- und Empfänger-Firmware: ExpressLRS

The firmware of the transmitter module in the remote control and the receiver in the drone must both use compatible firmware versions. Ideally, the firmware versions of the transmitter and receiver are identical. This section focuses exclusively on the ExpressLRS firmware, including its installation and configuration.

Installation is performed using the locally installed application ExpressLRS Configurator. Installation packages and the source code can be found here:

<https://github.com/ExpressLRS/ExpressLRS-Configurator/releases>

In the ExpressLRS Configurator, the desired version, device type, connection method (EdgeTX Passthrough, UART, or Wi-Fi), frequency band usage permissions (Listen Before Talk), and the binding phrase are defined. The binding phrase must match the one later used on the receiver (see Figure 2.21).

Die Firmware des Sendemoduls in der Fernbedienung und des Empfängers in der Drohne müssen beide mit kompatibler Firmware ausgestattet sein. Idealerweise sind bei Sender und Empfänger die Versionen identisch. Dieser Abschnitt befasst sich ausschließlich mit der Firmware ExpressLRS sowie deren Installation und Konfiguration.

Die Installation erfolgt über die lokal installierte Anwendung ExpressLRS Configurator. Installationspakete und der Quellcode befinden sich hier:

Im ExpressLRS Configurator werden die gewünschte Version, das Gerät, die Zugriffsart (EdgeTX Passthrough, UART oder Wi-Fi), die erlaubte Nutzung des Frequenzbands (Listen Before Talk) sowie die Binding Phrase festgelegt. Diese muss mit der später beim Empfänger verwendeten Binding Phrase übereinstimmen (siehe Abbildung 2.21).

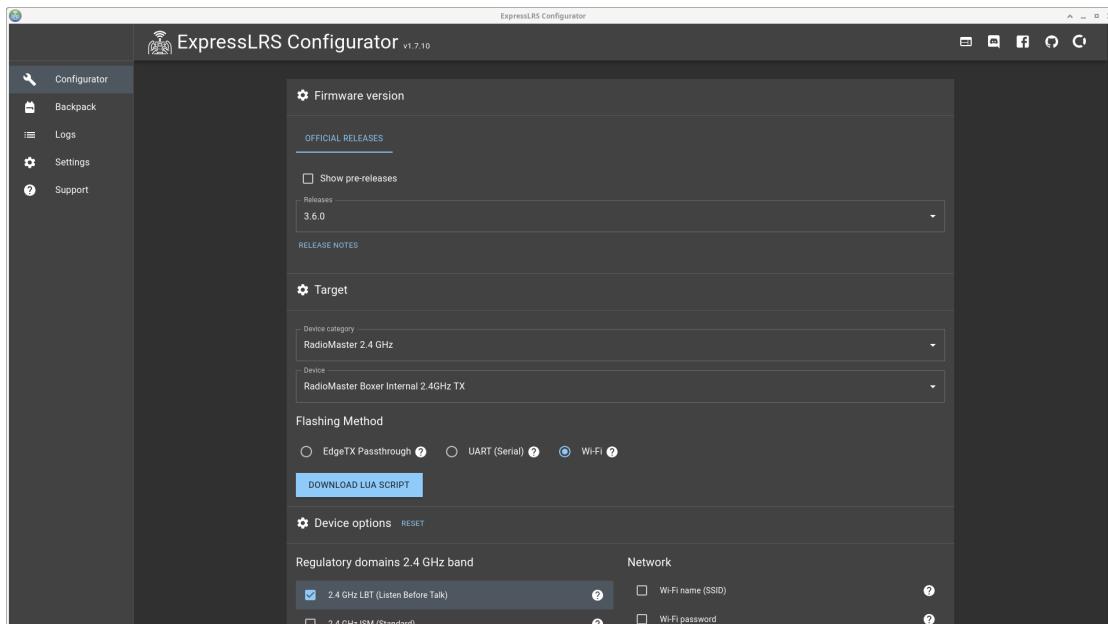


Figure 2.21: ExpressLRS Installation on Sender: Step 1

The default Wi-Fi parameters can also be adjusted here, although this option will not be discussed further in this section. The firmware file is created by clicking the *BUILD* button (see Figure 2.22).

Auch die standardmäßig verwendeten WLAN-Parameter können hier angepasst werden, auf diese Option wird an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen. Die Erstellung der Firmware-Datei erfolgt über die Schaltfläche *BUILD* (siehe Abbildung 2.22).

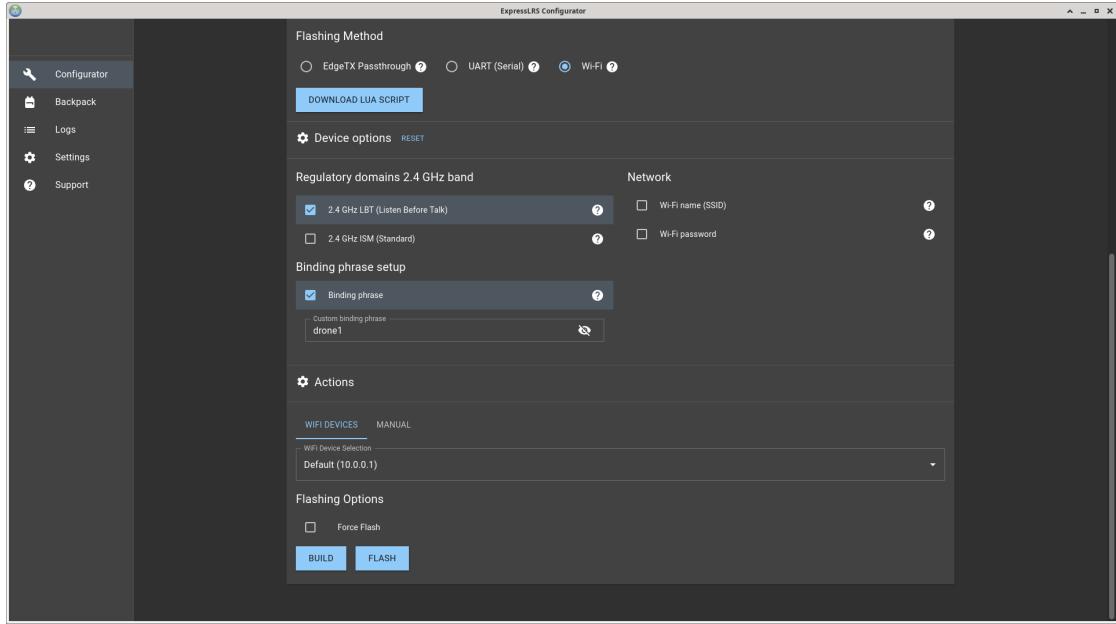


Figure 2.22: ExpressLRS Installation on Sender: Step 2

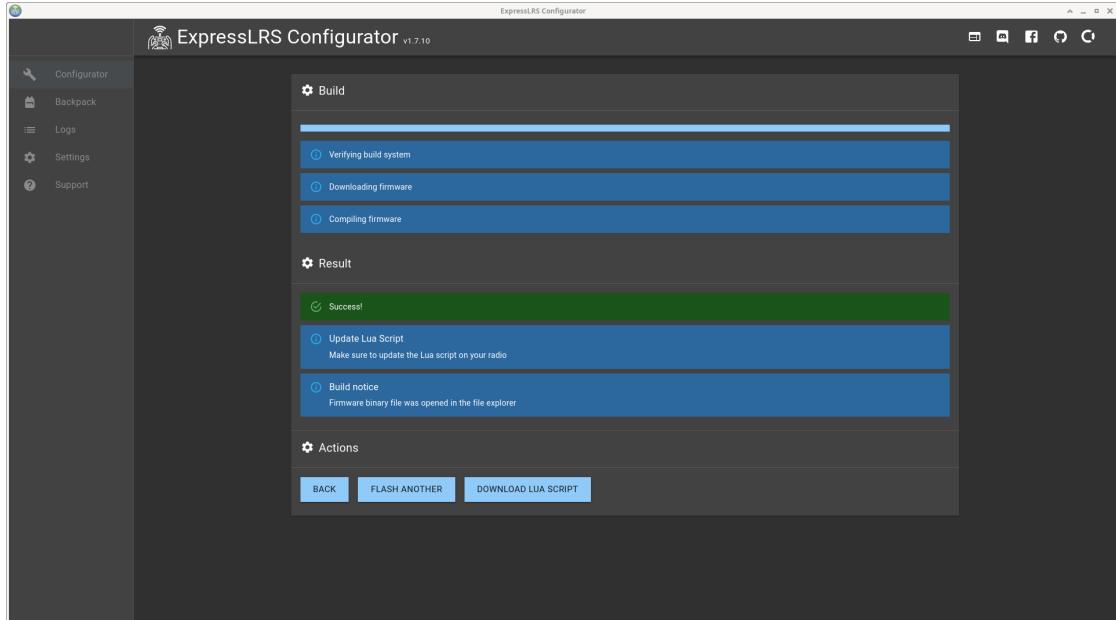


Figure 2.23: ExpressLRS Installation on Sender: Step 3

Figure 2.23 shows that the firmware file has been successfully created. Typically, a file manager window opens at this point, displaying the directory where the firmware file is located.

Abbildung 2.23 zeigt, dass die Firmware-Datei erstellt wurde. Üblicherweise öffnet sich an dieser Stelle ein Dateimanager-Fenster, das den Pfad anzeigt, in dem sich die Firmware-Datei befindet.

In the next step, the firmware file must be uploaded to the transmitter module of the remote control. One option is installation via the transmitter's Wi-Fi module. This is activated through SYS→Tools→ExpressLRS→Wi-Fi Connectivity→Enable Wi-Fi. Once the network **ExpressLRS TX** (password: **expresslrs**) becomes available, the PC must be connected to it. The transmitter module uses the IP address 10.0.0.1. When this address is opened in a web browser, a simple interface allows, among other things, firmware updates (see Figure 2.24).

Im nächsten Schritt muss die Firmware-Datei auf das Sendemodul der Fernbedienung aufgespielt werden. Eine Möglichkeit hierzu ist die Installation über das WLAN-Modul des Senders. Dieses wird über SYS→Tools→ExpressLRS→Wi-Fi Connectivity→Enable Wi-Fi aktiviert. Sobald das Funknetz **ExpressLRS TX** (Passwort: **expresslrs**) verfügbar ist, muss der PC damit verbunden werden. Das Sendemodul hat die IP-Adresse 10.0.0.1. Wird diese Adresse über einen Browser aufgerufen, kann über eine einfache Webseite unter anderem die Firmware aktualisiert werden (siehe Abbildung 2.24).

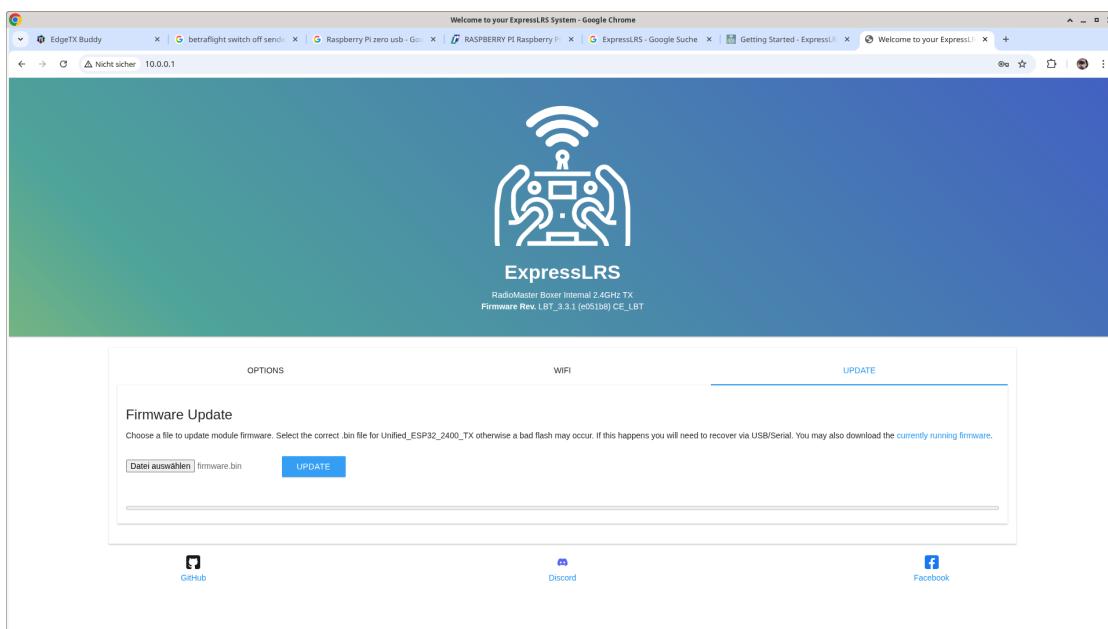


Figure 2.24: ExpressLRS Installation on Sender: Step 4

The installation of ExpressLRS on the receiver is almost identical. Here, too, a firmware file matching the receiver is created using the ExpressLRS Configurator (see Figures 2.25 and 2.26).

Receivers from Radiomaster provide a Wi-Fi network named **ExpressLRS RX** (password: **expresslrs**) after approximately 30 seconds without a connection to a transmitter. The PC must be connected to this network. The receiver module uses the IP address 10.0.0.1. When this address is opened in a web browser,

Die Installation von ExpressLRS auf dem Empfänger erfolgt nahezu identisch. Auch hier wird mit dem ExpressLRS Configurator eine zur Empfängerhardware passende Firmware-Datei erstellt (siehe Abbildung 2.25 und Abbildung 2.26).

Empfänger von Radiomaster stellen nach etwa 30 Sekunden ohne Verbindung zu einer Fernbedienung ein Funknetz mit dem Namen **ExpressLRS RX** (Passwort: **expresslrs**) bereit. Der PC muss mit diesem Netzwerk verbunden werden. Das Empfangsmodul hat die IP-Adresse 10.0.0.1. Wird diese Adresse über einen Browser aufgerufen, kann über eine einfache Webseite

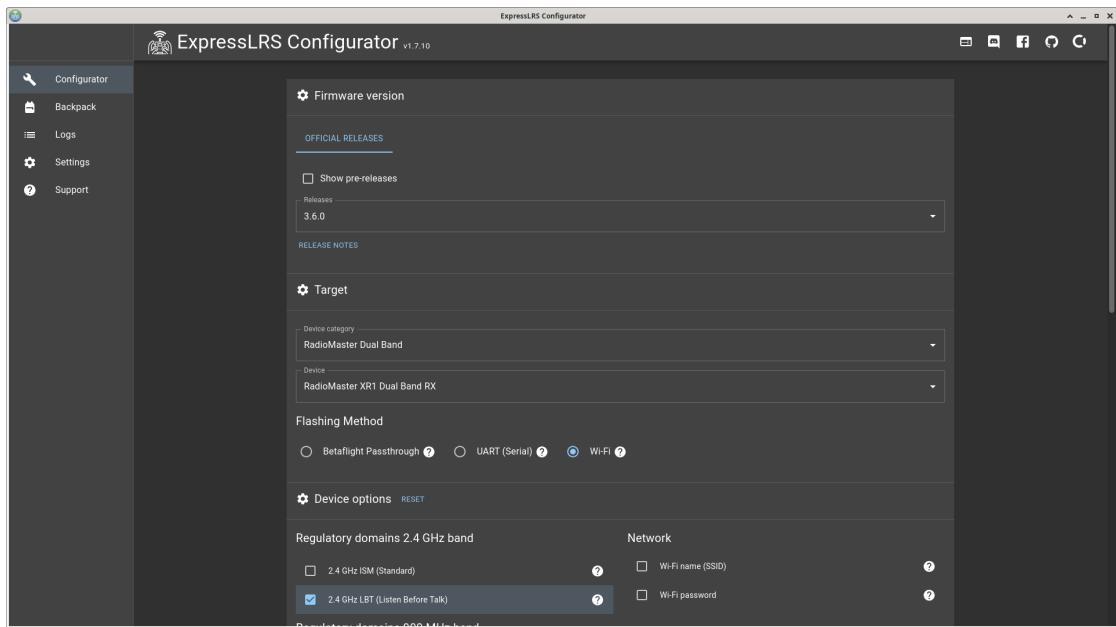


Figure 2.25: ExpressLRS Installation on Receiver: Step 1

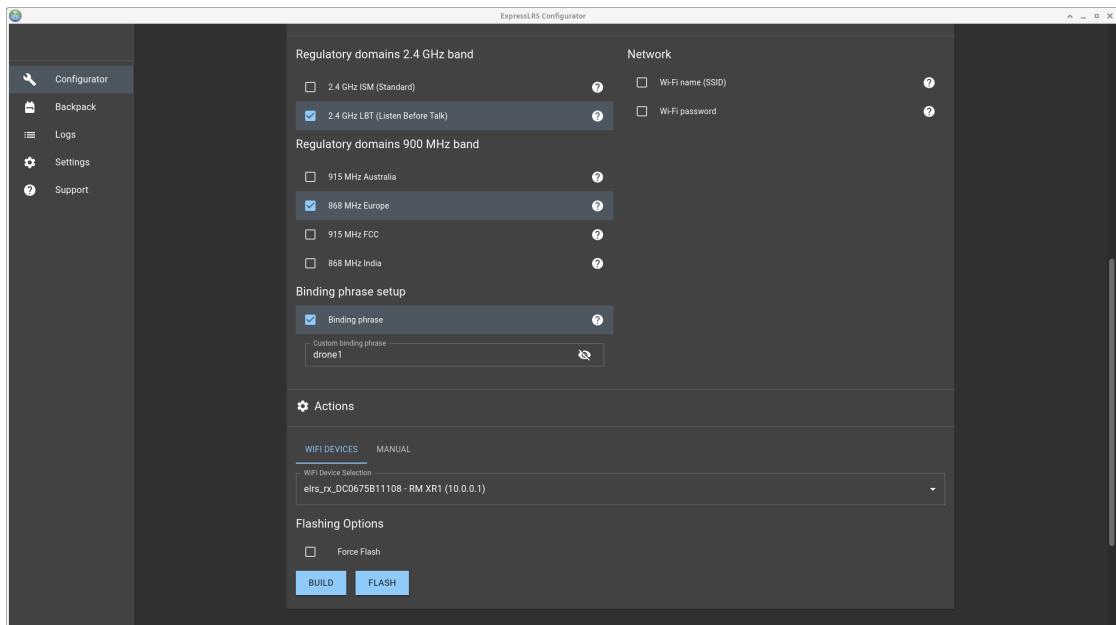


Figure 2.26: ExpressLRS Installation on Receiver: Step 2

a simple interface allows, among other things, unter anderem die Firmware aktualisiert werden firmware updates (see Figure 2.27). (siehe Abbildung 2.27).

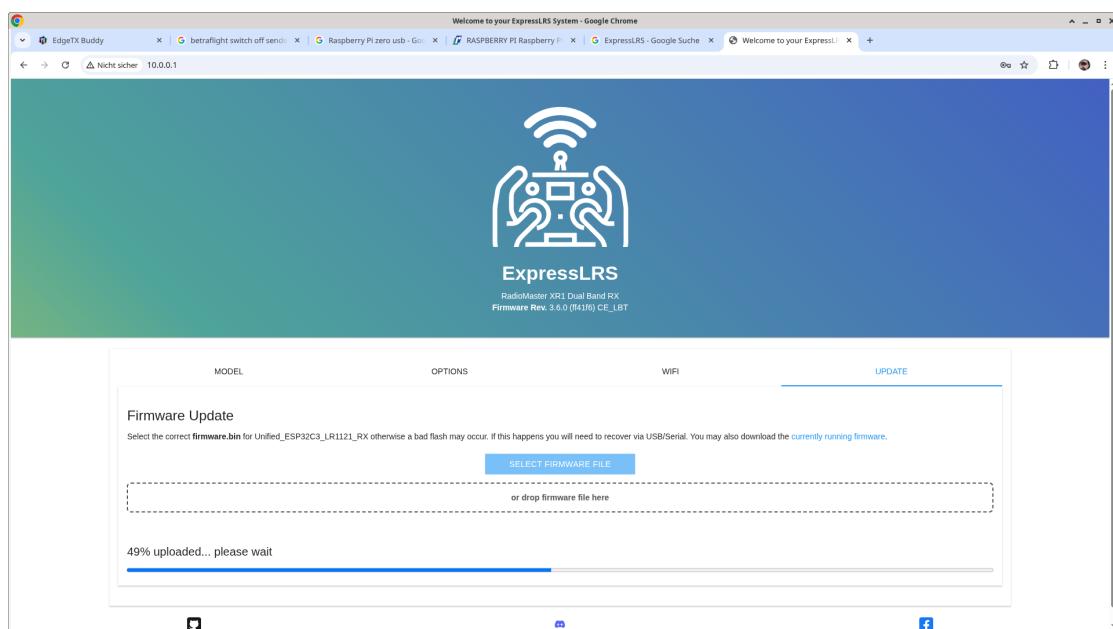


Figure 2.27: ExpressLRS Installation on Receiver: Step 3

3

Important Things before the first Flight Wichtige Punkte vor dem ersten Flug

This chapter provides useful advice for both the preparations before the first flight and the checks afterwards.

Dieses Kapitel enthält hilfreiche Hinweise für die Vorbereitung vor dem ersten Flug sowie für die Überprüfungen danach.

3.1

Security during Flight

Während des Fluges ist stets ein möglichst großer Abstand zu anderen Personen einzuhalten. Fremde Gebäude und private Grundstücke dürfen nicht ohne vorherige Zustimmung überflogen werden.

Sicherheit beim Flug

Always keep as much distance as possible from other people during flight. Do not fly over other people's buildings or private property without prior permission.

3.2

Security before Flight

Before each flight, the arming procedure takes place. This means activating the motors in preparation for flight. Although the motors run at a relatively low speed during this process, even at this speed injuries to arms or hands can easily occur. To prevent accidental arming, it is advisable to configure the flight controller so that two switches—ideally not positioned directly next to each other—must be activated simultaneously. A configuration in Betaflight that ensures exactly this is shown in Figure 2.7.

Sicherheit vor dem Flug

Vor dem Flug findet das Arming statt. Dabei handelt es sich um das Aktivieren der Motoren zur Flugvorbereitung. Die Motoren laufen dabei zwar nur mit relativ niedriger Geschwindigkeit, aber selbst bei dieser Drehzahl kann es leicht zu Verletzungen, beispielsweise an Armen und Händen, kommen. Um ein unbeabsichtigtes Arming zu vermeiden, ist es ratsam, den Flugcontroller so zu konfigurieren, dass zum Arming zwei Schalter betätigt werden müssen, die idealerweise nicht direkt nebeneinander liegen. Eine Konfiguration in Betaflight, die genau dies sicherstellt, zeigt Abbildung 2.7.

3.3

Secure use of LiPo Batteries

LiPo batteries should never be charged unattended, and they must not be charged while sleeping. Damaged batteries must no longer be used, especially if they have become swollen due to deep discharge, overcharging, or physical damage. Swollen LiPo batteries pose a significant fire hazard. A swollen battery cannot be repaired and must be properly disposed of. Disposal must not be done through household waste but through designated recycling or collection points provided by the local municipality.

Sichere Verwendung von LiPo-Akkus

LiPo-Akkus dürfen niemals unbeaufsichtigt geladen werden, insbesondere nicht während man schläft. Beschädigte Akkus dürfen nicht weiterverwendet werden, insbesondere wenn sie durch Tiefentladung, Überladung oder physische Einwirkungen aufgebläht sind. Aufgeblähte LiPo-Akkus stellen ein erhebliches Brandrisiko dar. Ein solcher Akku kann nicht repariert werden und muss ordnungsgemäß entsorgt werden. Die Entsorgung darf nicht über den Hausmüll erfolgen, sondern über die entsprechenden Sammelstellen der örtlichen Gemeinde.

3.4

Loading of Batteries

Batteries (LiPo or Li-Ion) with more than one cell must always be charged in balance mode using the voltage values read via the balancer connector (see Figure 3.1). This prevents individual cells from being overcharged during the charging process and helps to avoid deep discharge of individual cells during later use. The maximum recommended charge rate (see Section 1.5.1) is typically 1 C. If this limit is exceeded, the cells will age more quickly, and in the worst case, a fire may occur. For safety reasons, Li-Ion batteries should only be stored in specially designed fireproof containers.

Laden von Akkus

Akkus (LiPo oder Li-Ion) mit mehr als einer Zelle müssen immer unter Verwendung der über den Balancerstecker ausgelesenen Spannungswerte im Balancermodus geladen werden (siehe Abbildung 3.1). Dies verhindert eine Überladung einzelner Zellen während des Ladevorgangs und beugt einer Tiefentladung einzelner Zellen im späteren Betrieb vor. Die maximal empfohlene Laderate (siehe Abschnitt 1.5.1) beträgt üblicherweise 1 C. Wird diese Rate überschritten, altern die Zellen schneller, und es kann im schlimmsten Fall zu einem Brand kommen. Zur Sicherheit sollten Li-Ion-Akkus nur in dafür vorgesehenen, feuerfesten Behältnissen gelagert werden.

3.5

Secure Attachment of loose Cables and other Components

If cables or other drone components are not properly secured and can reach the propellers, they eventually will. This can damage either the loose components or the propellers, potentially leading to a crash or costly damage. A

Sichere Befestigung loser Kabel und sonstiger Komponenten

Wenn Kabel oder andere Bauteile der Drohne nicht zuverlässig befestigt sind und die Rotoren erreichen können, werden sie diese früher oder später tatsächlich erreichen. Dabei werden entweder die losen Komponenten oder die Rotoren



Figure 3.1: Balanced Loading of a Li-Ion Battery

common example of components that frequently and unintentionally come into contact with the propellers are the battery balancer connectors (see Figure 3.2) , which are not always easy to replace. Therefore, all components must be securely fastened, and cables must be fixed using screws, cable ties, Velcro straps, or at least electrical tape.

beschädigt, was zu einem Absturz oder zu teuren Beschädigungen führen kann. Ein typisches Beispiel für Bauteile, die häufig ungewollt mit den Rotoren in Kontakt kommen, sind die Balancerstecker (siehe Abbildung 3.2) der Akkus, deren Austausch nicht immer einfach ist. Daraus ist die Befestigung aller Bauteile und die Sicherung aller Kabel mit Schrauben, Kabelbindern, Klettbindern oder zumindest Isolierband zwingend erforderlich.

3.6

Use the Appropriate Flight Mode

There are three flight modes: Angle Mode (stabilized), Horizon Mode (semi-stabilized), and Acro Mode (manual).

Den geeigneten Flugmodus verwenden

Es gibt die Flugmodi Angle Mode (stabilisiert), Horizon Mode (halb-stabilisiert) und Acro Mode (manuell).



Figure 3.2: A Balancer Connector got destroyed because it touched a Propeller during Flight

In Angle Mode, the drone stabilizes itself and remains level without explicit control input from the pilot. This flight mode is the most beginner-friendly and ideal for indoor flights and smooth, slow cinematic shots. Because the maximum tilt angle is limited, spectacular flight maneuvers such as flips or rolls are not possible.

In Horizon Mode, flips and rolls are possible, but the drone automatically stabilizes itself when no control input is applied.

In Acro Mode, which is actually the default mode, there is no automatic stabilization. The drone maintains its current rotational speed until the pilot counteracts it. This mode provides full control on all axes and allows spectacular flight maneuvers at any time. It is the least beginner-friendly mode but ideal for freestyle flying and racing.

Since a drone is set to Acro Mode by default, it is advisable to configure a three-position switch on the transmitter for selecting flight modes so that Angle Mode can be activated automatically when desired. A configuration in Betaflight that enables this is shown in Figure 2.7.

Im Angle Mode stabilisiert sich die Drohne selbst und hält sich ohne explizite Steueranweisungen des Piloten automatisch waagrecht. Dieser Flugmodus ist besonders anfängerfreundlich und ideal für Indoor-Flüge sowie für langsame, ruhige Filmaufnahmen. Da die maximale Neigung (Tilt) begrenzt ist, sind spektakuläre Flugmanöver wie Flips oder Rollen nicht möglich.

Im Horizon Mode sind Flips und Rollen möglich, jedoch stabilisiert sich die Drohne automatisch, sobald keine Steuerkommandos mehr gegeben werden.

Im Acro Mode, der eigentlich der Standardmodus ist, erfolgt keine automatische Stabilisierung. Die Drohne hält stets die aktuelle Drehgeschwindigkeit bei, bis der Pilot aktiv gegensteuert. In diesem Modus hat man die volle Kontrolle über alle Achsen, und spektakuläre Flugmanöver sind jederzeit möglich. Dieser Flugmodus ist am wenigsten anfängerfreundlich und ideal für Freestyle-Flüge und Rennen.

Da Drohnen standardmäßig im Acro Mode betrieben werden, ist es sinnvoll, einen Schalter des Senders mit drei möglichen Positionen zur Auswahl des Flugmodus so zu konfigurieren, dass bei Bedarf automatisch der Angle Mode aktiviert werden kann. Eine entsprechende Konfiguration in Betaflight, die dies ermöglicht, zeigt Abbildung 2.7.

3.7

Practice with a Simulator

Flying a drone is not easy, and crashes are almost inevitable at the beginning, even in Angle Mode. Therefore, it is highly advisable to practice with a simulator. Suitable simulators are available for all operating systems. Some well-known examples include Liftoff, VelociDrone, Uncrashed, FPV Freerider, Quadsim FPV, and Freerider Lite.

The transmitter has a USB interface and should be used as the input device for training. The USB mode must be set to *Joystick*. It is recommended to create a new model in OpenTX for this purpose, for example named *Simulator*. This model should have no active internal or external RF module, since the module consumes a significant amount of power and produces heat. This is unnecessary when using a simulator because no radio signals are transmitted.

Mit einem Simulator üben

Das Fliegen einer Drohne ist nicht einfach, und Abstürze sind insbesondere zu Beginn selbst im Angle Mode kaum zu vermeiden. Daher ist es sehr empfehlenswert, mit einem Simulator zu üben. Geeignete Simulatoren sind für alle Betriebssysteme verfügbar. Einige bekannte Produkte sind Liftoff, VelociDrone, Uncrashed, FPV Freerider, Quadsim FPV und Freerider Lite.

Der Sender verfügt über eine USB-Schnittstelle und sollte als Eingabegerät zum Üben verwendet werden. Als USB-Modus muss *Joystick* ausgewählt werden. Es ist sinnvoll, hierfür in OpenTX ein neues Modell anzulegen, beispielsweise mit dem Namen *Simulator*. Dieses Modell sollte über kein aktives internes oder externes Sendemodul verfügen, da das Sendemodul signifikant Strom verbraucht und Wärme erzeugt. Dies ist beim Einsatz mit einem Simulator unnötig, da keine Funksignale gesendet werden.

3.8

Automate the Pairing

Um die Kopplung zwischen Sender und Empfänger zu beschleunigen und ein versehentliches Koppeln mit anderen Geräten zu verhindern, kann in der ExpressLRS-Firmware eine Binding Phrase definiert werden (siehe Abschnitt 2.3). Diese muss bei beiden Kommunikationspartnern identisch sein und kann nur durch eine Neuinstallation (Flashen) der Firmware geändert werden.

Die Kopplung automatisieren

To speed up the pairing process between transmitter and receiver and to prevent accidental pairing with other devices, a binding phrase can be defined in the ExpressLRS firmware (see Section 2.3). This phrase must be identical on both communication partners and cannot be changed without reinstalling (flashing) the firmware.

4

Object Detection

Object detection is one of the most well-known applications of artificial intelligence. Among the best-known open-source solutions enabling object detection are the TensorFlow (Lite) machine learning framework combined with the OpenCV (*Open Computer Vision*) library for image processing and object recognition. An alternative approach is the object detection framework *You Only Look Once* (YOLO).

Object detection with FPV drones can be implemented in two basic ways. Both design concepts have advantages and disadvantages depending on factors such as available budget, hardware, the distance between drone and operator, the number of drones, and personal preferences.

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* (YOLO).

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

- **Edge Node Concept:** The AI functionality is performed by a computer that flies with the drone. This approach is described in Section 4.1. The additional hardware increases cost, weight, and power consumption, which reduces flight time. Using a higher-capacity battery to compensate further increases the total weight. However, this design offers excellent scalability because the sensor data is processed directly on the drone. Only the results (aggregated data) need to be transmitted during or after the flight, drastically reducing the data volume. This approach follows the edge computing paradigm, which is especially advantageous in multi-drone scenarios where simultaneous data collection would otherwise overload communication channels.
- **Realisierungskonzept Edge-Knoten:** Die KI-Funktionalität wird von einem Computer übernommen, der mit der Drohne mitfliegt. Diese Alternative beschreibt Abschnitt 4.1. Die Anschaffung zusätzlicher Hardware verursacht Kosten und erhöht das Gewicht der Drohne. Zudem benötigt die zusätzliche Hardware Strom, was die Flugzeit reduziert. Wird ein Akku mit höherer Kapazität eingesetzt, steigt das Gewicht weiter. Vorteile dieses Konzepts sind die sehr gute Skalierbarkeit, da die Verarbeitung der Sensordaten direkt auf der Drohne erfolgt. Nur die Ergebnisse (aggregierten Daten) müssen während des Flugs oder danach übertragen werden, wodurch die Datenmenge drastisch reduziert wird. Es handelt sich somit um eine Variante des Edge-Computing. Besonders wichtig ist diese Datenreduktion

in Szenarien mit mehreren Drohnen, die gleichzeitig fliegen und Daten erfassen.

- **Full Data Transmission Concept:** The AI processing is performed by a ground-based computer that receives the drone's live video feed. This approach is described in Section 4.2. A simple implementation uses FPV goggles with an AV output and a video capture device. Advantages include the low additional cost (a video grabber costs about 15–20 €) and the fact that the drone's weight remains unchanged. No extra data transmission capacity is required since the drone already transmits its live video feed. However, in multi-drone scenarios, the central AI processing can demand significant computational resources, potentially requiring additional ground-based AI hardware.

- **Realisierungskonzept Übertragung aller Live-Daten:** Die KI-Funktionalität wird von einem Computer am Boden übernommen, der Zugriff auf das Livebild der Drohne hat. Diese Alternative beschreibt Abschnitt 4.2. Eine einfache Implementierungsmöglichkeit bietet eine Videobrille mit AV-Ausgang und ein Videograbber. Vorteile dieses Konzepts sind die geringen zusätzlichen Anschaffungskosten (ein Videograbber kostet etwa 15–20 €) und das unveränderte Gewicht der Drohne. Zusätzliche Übertragungskapazitäten sind nicht erforderlich, da das Livebild ohnehin übertragen wird. In Szenarien mit mehreren Drohnen kann der zentrale Rechenaufwand der Objekterkennung jedoch stark ansteigen und zusätzliche KI-Hardware am Boden erforderlich machen.

4.1

Object Detection by addition Hardware on the Drone

It is possible to integrate the hardware and software required for object detection as additional components directly into the drone, allowing them to fly onboard. Ideally, these components consist of a compact and energy-efficient single-board computer. Table 4.1 shows the different sizes and power requirements of various generations of the Raspberry Pi single-board computer.

Compared to the approximately credit card-sized Raspberry Pi models, the Raspberry Pi Zero series is significantly smaller, lighter, and consumes less power. The processing performance of the Raspberry Pi 2 W is sufficient to run common AI frameworks alongside the operating system. Figure 4.1 shows a Raspberry Pi 2 WH.

Since it is not possible to forward the live FPV camera feed from the flight controller or

Objekterkennung mit zusätzlicher Hardware an der Drohne

Es ist möglich, die zur Objekterkennung nötige Hard- und Software als zusätzliche Komponenten in die Drohne zu integrieren und diese Komponenten mitfliegen zu lassen. Sinnvollerweise handelt es sich dabei um einen platz- und stromsparenden Einplatinencomputer. Tabelle 4.1 zeigt die unterschiedlichen Dimensionen und Strombedarfe verschiedener Generationen des Einplatinencomputers Raspberry Pi.

Im Vergleich zu den etwa scheckkarten-großen Modellreihen sind die Raspberry Pi Zero-Modelle deutlich kleiner, leichter und benötigen weniger Strom. Die Prozessorleistung des Raspberry Pi 2 W ist ausreichend, um gängige KI-Frameworks neben dem Betriebssystem zu betreiben. Abbildung 4.1 zeigt einen Raspberry Pi 2 WH.

Da es nicht möglich ist, über den Flugcontroller oder über den VTX das Livebild der

Table 4.1: 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

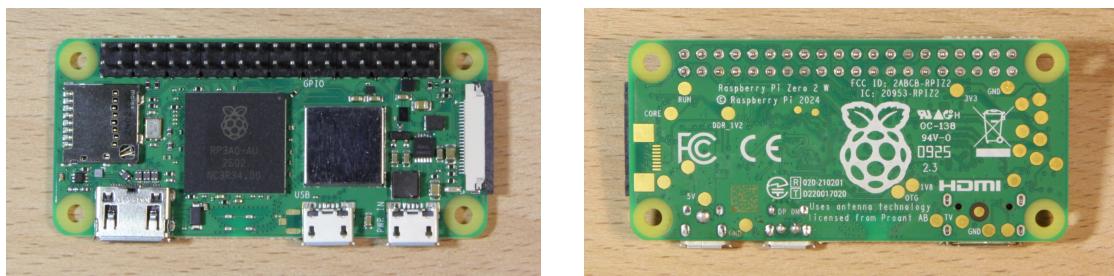


Figure 4.1: Raspberry Pi 2 WH (Front and Back)

VTX to the Raspberry Pi, the drone must carry an additional camera that is compatible with the single-board computer. A simple and cost-effective solution is to use the Raspberry Pi Camera Modules v1, v2, or v3, which primarily differ in resolution. All of them weigh only about 3-4 g and have similar dimensions (approximately 25×24×10 mm). Alternatively, the Raspberry Pi AI Camera (see Section 4.1.1) can be used.

Since a Raspberry Pi, regardless of model, does not have sufficient processing power to perform real-time object detection on video streams, additional hardware is required to accelerate AI applications. In the solution presented here, a Google Coral TPU Accelerator is used for this purpose. The following section describes this and alternative implementation concepts.

FPV-Kamera auch an den 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. 25×24×10 mm). Alternativ kann auch die Raspberry Pi AI Camera (siehe Abschnitt 4.1.1) verwendet werden.

Da ein Raspberry Pi Einplatinencomputer, egal welcher Baureihe, nicht über die Prozessorenleistung verfügt, um Objekterkennung in einem Videostream zu realisieren, ist zusätzliche Hardware zur Beschleunigung der KI-Anwendung nötig. Beim hier vorgestellten Lösungsweg kommt zur Beschleunigung ein Google Coral TPU Accelerator zum Einsatz. Der folgende Abschnitt beschreibt diesen und alternative Implementierungskonzepte.

4.1.1

Comparison of AI Accelerators

This section presents the advantages and disadvantages of several AI accelerators: the Google Coral TPU Accelerator, the Intel Neural Com-

Vergleich von KI-Beschleunigern

Dieser Abschnitt stellt die Vor- und Nachteile der KI-Beschleuniger Google Coral TPU Accelerator, Intel Neural Compute Stick 2, Raspberry

pute Stick 2, the Raspberry Pi AI Camera, and the Raspberry Pi AI Hat. Table 4.2 summarizes key specifications and performance characteristics.

Released in 2019, the Google Coral TPU Accelerator (see Figure 4.2) provides 4 trillion operations per second (Tera-operations per second – TOPS), consumes approximately 500-900 mA depending on performance mode, and measures only $65 \times 30 \times 8$ mm with a weight of around 20 g. An additional USB cable for connection adds 10-15 g. The retail price is about €80-90. A notable drawback is that Google has invested little effort in maintaining or updating drivers and libraries since 2022, making it increasingly difficult to operate the device on modern and future operating systems.

Pi AI Camera und Raspberry Pi AI Hat vor. Eine Übersicht relevanter Informationen dazu enthält Tabelle 4.2.

Der 2019 erschienene Google Coral TPU Accelerator (siehe Abbildung 4.2) bietet 4 Billionen Operationen pro Sekunde (Tera-operations per second – TOPS), verbraucht je nach Geschwindigkeitseinstellung ca. 500-900 mA und ist nur $65 \times 30 \times 8$ mm groß. Das Gewicht dieses KI-Beschleunigers beträgt ca. 20 g. Zusätzlich ist ein USB-Kabel zum Anschluss nötig, das weitere 10-15 g wiegt. Der Kaufpreis liegt bei etwa 80-90 €. Ein Nachteil des Google Coral TPU Accelerator ist, dass der Hersteller seit 2022 keine signifikanten Ressourcen in die Weiterentwicklung der Treiber und Bibliotheken investiert hat und die Entwicklung seitdem vollständig zum Stillstand gekommen ist, was den Betrieb auf aktuellen und zukünftigen Betriebssystemen erschwert.

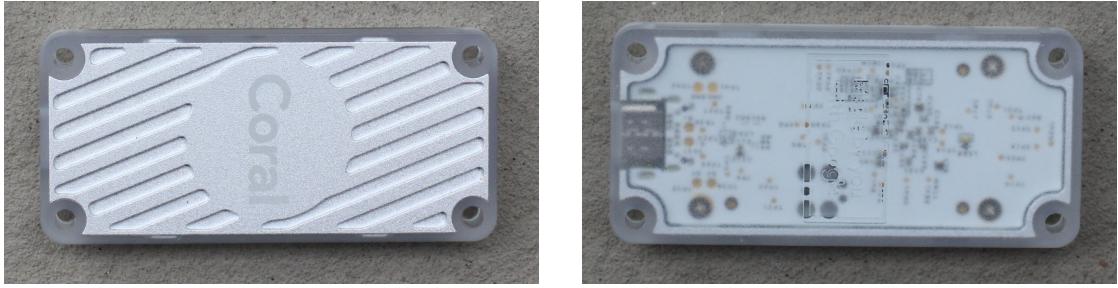


Figure 4.2: Google Coral TPU Accelerator (Front and Back)

An alternative AI accelerator that also connects via USB is the Intel Neural Compute Stick 2 (NCS2), released in 2019 (see Figure 4.3). It offers 4 TOPS, consumes approximately 200-500 mA depending on performance mode, and measures $73 \times 28 \times 14$ mm while weighing about 30 g (without an extension cable). The purchase price is around €100. The NCS2 requires the OpenVINO Toolkit framework, which is free software actively developed by Intel. It converts models from frameworks such as TensorFlow (Lite), PyTorch, ONNX, Keras, and Caffe into a format optimized for Intel hardware and manages execution on compatible devices. It also supports integration with various versions of YOLO. However, starting new projects with the NCS2 is not recommended, as Intel discontin-

Ein alternativer KI-Beschleuniger, der ebenfalls über die USB-Schnittstelle angeschlossen wird, ist der 2019 erschienene Intel Neural Compute Stick 2 – NCS2 (siehe Abbildung 4.3). Dieser bietet ebenfalls 4 TOPS, verbraucht je nach Geschwindigkeitseinstellung ca. 200-500 mA, ist $73 \times 28 \times 14$ mm groß und wiegt (ohne Verlängerungskabel) etwa 30 g. Der Kaufpreis liegt bei rund 100 €. Der NCS2 benötigt das Framework OpenVINO Toolkit, das freie Software ist und von Intel entwickelt wird. Es konvertiert Modelle aus Frameworks wie TensorFlow (Lite), PyTorch, ONNX, Keras und Caffe in ein für Intel-Hardware optimiertes Format und steuert die Ausführung auf kompatibler Hardware. Auch eine Zusammenarbeit mit verschiedenen Versionen von YOLO ist möglich. Neue Projekte

ued hardware support with OpenVINO 2022.3 and has not invested significant resources in maintaining the necessary software since 2022, making operation on current and future operating systems increasingly difficult.

mit dem NCS2 zu realisieren ist jedoch nicht empfehlenswert, da Intel die Unterstützung der Hardware mit OpenVINO 2022.3 eingestellt und seit 2022 keine signifikanten Ressourcen mehr in die Weiterentwicklung der zum Betrieb nötigen Software investiert hat, was den Betrieb auf aktuellen und zukünftigen Betriebssystemen erschwert.



Figure 4.3: Intel Neuronal Compute Stick 2 (Front and Back)

A more modern alternative to connecting an AI accelerator via the USB interface is the Raspberry Pi AI Camera, released in 2024. It already includes an integrated AI accelerator whose exact performance in TOPS is not publicly specified, but it is capable of processing up to 30 frames per second for object recognition. The power consumption is approximately 300-600 mA, depending on the operating mode. The purchase price of the Raspberry Pi AI Camera is around €80, which is higher than that of other camera modules. However, it can fully replace an external AI accelerator such as the Google Coral TPU Accelerator. With a weight of only about 6 g, this results in significant weight savings and lower overall system costs.

In addition to the Raspberry Pi AI Camera, which is ideal for use with the Raspberry Pi Zero 2 W single-board computer, the Raspberry Pi Foundation also offers the AI Kit and AI HAT+ in two different performance variants. All three options are HAT (Hardware Attached on Top) expansion boards for the Raspberry Pi 5. The AI Kit can host an M.2 AI accelerator module and comes with a Hailo-8L chip capable of 13 TOPS. The two AI HAT+ variants feature soldered Hailo accelerators with performance levels of 13 TOPS and 26 TOPS, respectively. These HATs cost around €80-120 and offer high AI

Eine modernere Alternative zum Anschluss eines KI-Beschleunigers über die USB-Schnittstelle ist die 2024 erschienene Raspberry Pi AI Camera. Diese enthält bereits einen integrierten KI-Beschleuniger, dessen Leistungsfähigkeit in TOPS nicht bekannt ist, der jedoch bis zu 30 Bilder pro Sekunde zur Objekterkennung verarbeiten kann. Der Stromverbrauch beträgt je nach Betriebsart etwa 300-600 mA. Der Kaufpreis der Raspberry Pi AI Camera liegt mit rund 80 € zwar höher als der anderer Kamera-Module, sie kann jedoch einen externen KI-Beschleuniger wie den Google Coral TPU Accelerator vollständig ersetzen. Bei einem Gewicht von nur etwa 6 g führt dies zu einer deutlichen Gewichtersparnis und geringeren Gesamtkosten.

Neben der Raspberry Pi AI Camera, die sich ideal für den Einsatz mit dem Raspberry Pi Zero 2 W Einplatinencomputer eignet, bietet die Raspberry Pi Foundation auch die KI-Erweiterungen AI Kit und AI HAT+ in zwei unterschiedlichen Geschwindigkeitsvarianten an. Alle drei Varianten sind Erweiterungsplatinen (sogenannte HATs) für den Raspberry Pi 5. Das AI Kit kann einen KI-Beschleuniger als M.2-Erweiterungsmodul aufnehmen und wird mit einem Hailo-8L-Beschleuniger ausgeliefert, der 13 TOPS erreicht. Die beiden Versionen des AI HAT+ enthalten fest verlötete Hailo-

performance. However, carrying and powering a Raspberry Pi 5 together with such a HAT is not practical in many drone scenarios.

Beschleuniger mit 13 TOPS bzw. 26 TOPS. Diese drei HATs kosten etwa 80-120 € und bieten eine starke KI-Leistung. Der Transport und die Stromversorgung eines Raspberry Pi 5 mit einem solchen HAT ist in vielen Anwendungsszenarien jedoch nicht praktikabel.

Table 4.2: Options for additional Hardware on the Drone that accelerates AI Operations (Edge Computing Scenario)

AI Hardware	Interface	TOPS	Weight	Size [mm]	Power Usage	Support
Google Coral TPU	USB 3.0	4	~ 20 g	65x30x8	500-900 mAh	Discontinued
Intel NCS 2	USB 3.0	4	~ 30 g	73x28x14	200-500 mAh	Discontinued
RPi AI Camera	CSI	?	~ 6 g	25x24x10	300-600 mAh	Active
RPi AI Kit/HAT+	HAT (PCIe)	13	~ 40 g	65x57x6	400-800 mAh	Active

For various reasons, such as short-term hardware availability, it has not yet been possible to integrate the Raspberry Pi AI Camera into a drone project. Therefore, the implementation approach presented in the next section uses the Google Coral TPU Accelerator.

Aus verschiedenen Gründen, wie der kurzfristigen Hardwareverfügbarkeit, war es bislang nicht möglich, die Raspberry Pi AI Camera in ein Drohnenprojekt zu integrieren. Aus diesem Grund verwendet der im nächsten Abschnitt vorgestellte Lösungsweg den Google Coral TPU Accelerator.

4.1.2

Construction and Implementation

Figure 4.4 shows the components of the FPV drone from Figure 1.1, expanded by the components required for onboard image recognition: the Raspberry Pi single-board computer, a Raspberry Pi Camera Module v2, the Google Coral TPU Accelerator, and a BEC (Battery Eliminator Circuit) for converting the battery voltage to 5 V.

The SpeedyBee F405 AIO flight controller used here provides only six UART interfaces, leaving little flexibility, as shown in Figure 4.4. The video transmitter (UART3), GPS module (UART5), and receiver (UART6) each require one UART interface. In addition, one UART (UART1) is reserved for administration via Wi-Fi and USB. Of the remaining interfaces, UART2 supports only simplex mode (receive-only). This leaves a single fully functional (bidirectional) UART interface, which is used to connect the Raspberry Pi Zero 2 W. This connection allows command exchange between the flight controller and the single-board computer.

Aufbau und Implementierung

Abbildung 4.4 zeigt die Komponenten der FPV-Drohne aus Abbildung 1.1, erweitert um die für die lokale Bilderkennung erforderlichen Komponenten: den Raspberry Pi Einplatinencomputer, ein Raspberry Pi Camera Module v2, den Google Coral TPU Accelerator sowie einen BEC zur Umwandlung der elektrischen Spannung des Akkus in 5 V.

Der verwendete SpeedyBee F405 AIO Flugcontroller verfügt nur über sechs UART-Schnittstellen, was – wie in Abbildung 4.4 gezeigt – nur wenig Spielraum lässt. Videosender (UART3), GPS-Modul (UART5) und Empfänger (UART6) benötigen jeweils eine UART-Schnittstelle. Zusätzlich wird für die Administration über die WLAN- und USB-Schnittstellen (UART1) eine weitere Schnittstelle belegt. Von den verbleibenden Schnittstellen unterstützt UART2 nur den Simplex-Betrieb (nur Lesen). Damit verbleibt lediglich eine einzige vollwertige (bidirektionale) UART-Schnittstelle, über die der Raspberry Pi Zero 2 W angeschlossen wird. Darüber können Kommandos zwischen Flugcon-

One disadvantage of the Google Coral TPU Accelerator is that the manufacturer has not invested further resources in driver or library development. The required Python library PyCoral – an extension of TensorFlow Lite enabling integration with the Coral TPU – supports Python 3.9 at most. No further updates are expected. Installation on Raspberry Pi OS (32-bit) Bullseye (Debian 11) is recommended, as Coral packages and PyCoral work reliably there. Newer operating systems based on Debian 12 or 13 are difficult to use with this hardware.

troller und Einplatinencomputer ausgetauscht werden.

Ein Nachteil des Google Coral TPU Accelerator ist, dass der Hersteller keine weiteren Ressourcen in die Weiterentwicklung der Treiber und Bibliotheken investiert. Die benötigte Python-Bibliothek PyCoral, die TensorFlow Lite um die Unterstützung der Google Coral TPU erweitert, unterstützt maximal Python 3.9. Neue Versionen sind nicht mehr zu erwarten. Die Installation auf Raspberry Pi OS (32-bit) Bullseye (Debian 11) ist empfehlenswert, da dort die Coral-Pakete mit PyCoral zuverlässig funktionieren. Neuere Betriebssysteme auf Basis von Debian 12 oder 13 sind hingegen sehr schwierig zu verwenden.

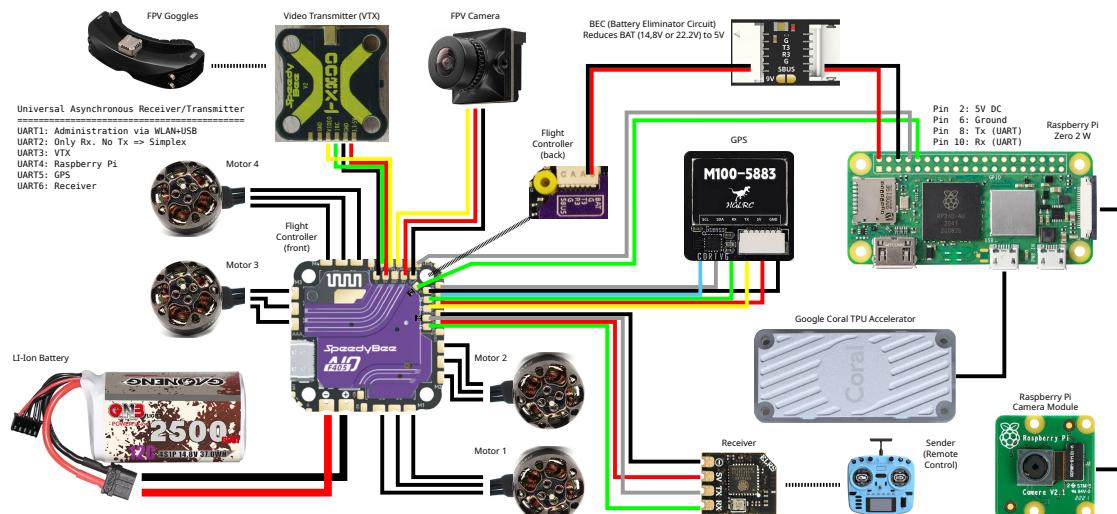


Figure 4.4: Components of a FPV Drone with additional Hardware Components for Object Detection by the Drone itself

4.1.3

Total Weight and Purchase Cost

For building the drone, a frame size between 3.5 and 5 inches is recommended. If the drone is also intended to be flown indoors, a 3.5-inch CineWhoop frame is advisable. The components used in a research project at Frankfurt University of Applied Sciences are listed in Table 4.3.

Gesamtgewicht und Anschaffungskosten

Zum Aufbau der Drohne empfiehlt sich ein Rahmen mit 3,5 bis 5 Zoll. Soll die Drohne auch innerhalb geschlossener Räume geflogen werden können, empfiehlt sich ein 3,5-Zoll-CineWhoop-Rahmen. Die im Rahmen eines Forschungsprojekts an der Frankfurt University of Applied Sciences verwendeten Komponenten sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Table 4.3: Components of a Drone for Object Detection with a Raspberry Pi Zero 2 W and a Google Coral TPU Accelerator

Product	Category	Weight [g]	Price [€]
SpeedyBee Bee35 PRO 3.5	Frame	130	55
SpeedyBee F405 AIO 40A 3-6S	Flight Controller	14	70
Radiomaster RP1 2,4GHz	Receiver	3	25
Flywoo NIN 1404 V2 3750KV	Motors	40	65
Gemfan D90-5 3.5 Inch Ducted 5-Blade	Propellers	4	3
SpeedyBee TX800 VTX + SMA Adapter	Video Transmitter	10	40
Foxeer Lollipop 4 RHCP SMA	FPV Antenna	5	20
HGLRC M100-5883	GPS and Compass	8	20
Caddx Ratel Pro	FPV Camera	10	55
Li-Ion 2500mAh 4S1P 14,8V 12C	Battery	200	25
Raspberry Pi Zero 2 WH	Single-Board-Computer	10	20
Raspberry Pi Zero case	Case	15	5
32GB microSD card	Storage	1	7
Raspberry Pi Camera Module 8MP v2	Camera	4	17
Adafruit Camera Module case	Case	8	5
Google Coral TPU	AI Hardware	20	85
USB-C cable for Coral TPU	Cable	10	5
Additional cables, straps and panels	Cables + fixing material	10	5
Sum		502	527

The components listed in Table 4.3 refer exclusively to the essential parts of the drone itself. Additional required equipment such as a remote controller (80-160 €), FPV goggles (120-250 €), and a charger (50-100 €) must already be available or purchased separately. The prices of the individual components depend on personal preferences and financial means.

Die in Tabelle 4.3 aufgeführten Komponenten betreffen ausschließlich die notwendigen Bestandteile der Drohne selbst. Weiteres erforderliches Zubehör wie Fernbedienung (80-160 €), FPV-Brille (120-250 €) und Ladegerät (50-100 €) muss bereits vorhanden sein oder zusätzlich beschafft werden. Die Preise der einzelnen Komponenten hängen auch von persönlichen Präferenzen und finanziellen Möglichkeiten ab.

4.2

Object Detection by using the Live Image on the Ground

An easy way to access the live video feed is by using the AV interface that some FPV goggles (see Table 1.7) provide. The video signal can be digitized with a video grabber and transmitted to a computer for further processing.

Objekterkennung durch Auswertung des Livebilds am Boden

Eine einfache Möglichkeit, auf das Livebild zugreifen, bietet die gegebenenfalls vorhandene AV-Schnittstelle der Videobrille (siehe Tabelle 1.7). Das Videosignal kann mithilfe eines Videograbbers digitalisiert und zur Verarbeitung an einen Computer weitergeleitet werden.

4.2.1

Total Weight and Purchase Cost

Gesamtgewicht und Anschaffungskosten

Table 4.4 lists the components of the drone from Table 4.3, excluding the hardware required for object detection. Specifically, this includes the Raspberry Pi Zero, the camera module, the Google Coral TPU, and the corresponding cables and enclosures. Additional accessories such as the remote control, FPV goggles, and charger must also be available or purchased separately. In addition, a video grabber (15–25 €) and a computer are required.

Tabelle 4.4 enthält die Komponenten der Drohne aus Tabelle 4.3, reduziert um die Hardware, die für die Objekterkennung erforderlich ist. Konkret sind das der Raspberry Pi Zero, das Kameramodul, die Google Coral TPU sowie die entsprechenden Kabel und Gehäuse. Weiteres notwendiges Zubehör wie Fernbedienung, FPV-Brille und Ladegerät muss selbstverständlich ebenfalls bereits vorhanden sein oder zusätzlich beschafft werden. Zusätzlich werden ein Video-grabber (15–25 €) und ein Computer benötigt.

Table 4.4: Components of a Drone for Object Detection by using the Live Image on the Ground

Product	Category	Weight [g]	Price [€]
SpeedyBee Bee35 PRO 3.5	Frame	130	55
SpeedyBee F405 AIO 40A 3-6S	Flight Controller	14	70
Radiomaster RP1 2,4GHz	Receiver	3	25
Flywoo NIN 1404 V2 3750KV	Motors	40	65
Gemfan D90-5 3.5 Inch Ducted 5-Blade	Propellers	4	3
SpeedyBee TX800 VTX + SMA Adapter	Video Transmitter	10	40
Foxeer Lollipop 4 RHCP SMA	FPV Antenna	5	20
HGLRC M100-5883	GPS and Compass	8	20
Caddx Ratel Pro	FPV Camera	10	55
Li-Ion 2500mAh 4S1P 14,8V 12C	Battery	200	25
Additional cables, straps and panels	Cables + fixing material	10	5
Sum		424	378

5

Auto Pilot

TBD

Autopilot

TBD

6

Follow Me Function Follow-Me-Funktion

TBD

TBD

