

Preface

TBD

TBD

TBD

TBD

Vorwort

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

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

Maßgebliche Kriterien der Auswahl der in dieses Dokument vorgestellten Komponenten sind unter anderem:

- Anschaffungspreis
- Anpassbarkeit für verschiedenste Einsatzszenarien
- Robustheit
- Langfristige Marktverfügbarkeit
- Qualität der Dokumentation und Herstellersupport

Prof. Dr. Christian Baun

Contents

1 Hardware	1
1.1 Frames	1
1.2 Flight Controller and Electronic Speed Controller	2
1.2.1 Stack or AIO	3
1.3 Video Transmitter	5
1.4 Motors	6
1.5 Propeller	8
1.6 Batteries	8
1.6.1 Charge and Discharge Rate (C-Rate)	8
1.6.2 Number of Cells (S4/S6)	9
1.6.3 Plugs (XT30/XT60/XT90) for Discharge and Charge	10
1.7 GPS	11
1.8 Receiver	11
2 Software	13
2.1 Flight Controller Firmware	13

Inhaltsverzeichnis

1 Hardware	1
1.1 Rahmen	1
1.2 Flugcontroller und Motorsteuerung	2
1.2.1 Stack oder AIO	3
1.3 Videosender	5
1.4 Motoren	6
1.5 Propeller	8
1.6 Akkus	8
1.6.1 Lade- oder Entladerate (C-Wert)	8
1.6.2 Anzahl der Zellen (S4/S6)	9
1.6.3 Stecker (XT30/XT60/XT90) zum Entladen und Laden	10
1.7 GPS	11
1.8 Empfänger	11
2 Software	13
2.1 Flight Controller Firmware	13

1

Hardware

TBD

1.1

Frames

TBD

TBD

TBD

TBD

TBD

Hardware

TBD

Rahmen

Der Rahmen aus verbindet alle Komponenten der Drohne. Das verwendete Material ist üblicherweise Carbon. Dabei handelt es sich um einen leichtgewichtigen und dennoch hochfesten und verwindungssteifen Verbundwerkstoff aus Kohlenstofffasern. Seltener kommen auch Rahmen aus Kunststoff zum Einsatz. Der Rahmen definiert die Propellergröße (siehe Abschnitt 1.5).

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

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

Verfügt ein Rahmen nicht über passende Bohrlöcher für den ausgewählten Flugcontrollers und den Videosender, kann ein per 3D-Drucker gedruckte Adapter helfen, wenn der Platz im Rahmen dafür ausreicht.

1.2

Flight Controller and Electronic Speed Controller

TBD

TBD

TBD

Flugcontroller und Motorsteuerung

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

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

Gängige FC enthalten einen STM32-Mikrocontroller. Hier wird auch die Firmware gespeichert. Moderne MCUs sind F4, F7 und H7. Diese unterscheiden sich im Takt und Speicher (siehe Tabelle 1.2).

Table 1.1: 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 MB

TBD

TBD

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

Separate ESCs als einzelne Platinen sind heute unüblich. Bei modernen Drohnen sind die vier oder mehr ESCs auf einer einzelnen Platine, einem sogenannten 4-in-1-ESCs zur Motorsteuerung integriert. An dieser werden die Motoren und die Verbindung zum Akku (siehe Abschnitt 1.6) angelötet.

1.2.1

Stack or AIO

TBD

TBD

TBD

TBD

Stack oder AIO

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

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

Bei kleineren Drohnen (2 bis 4 Zoll) sind schon aus Platzgründen AIO FCs üblich. Bei größeren Drohnen kommen meist Stacks zum Einsatz. Ein Vorteil von ist, dass separate Motorsteuerungen mit höheren Dauerströmen am Markt verfügbar sind. Separate Motorsteuerungen gibt es mit 45 bis 70 A. Zudem bieten die FCs von Stacks tendenziell gegenüber AIO FCs mehr Platz für Lötpads, größere Lötpads, häufig zusätzlich Steckverbindungen und mehr nutzbare UART-Schnittstellen für Sensoren und Aktoren.

Abbildung 1.1) zeigt einen einen AIO Flight-Controller. Die Abbildungen 1.2 und 1.3) zeigen die Vorder- und Rückseite eines Stack bestehen aus Flight-Controller und separater ESC-Platine.



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

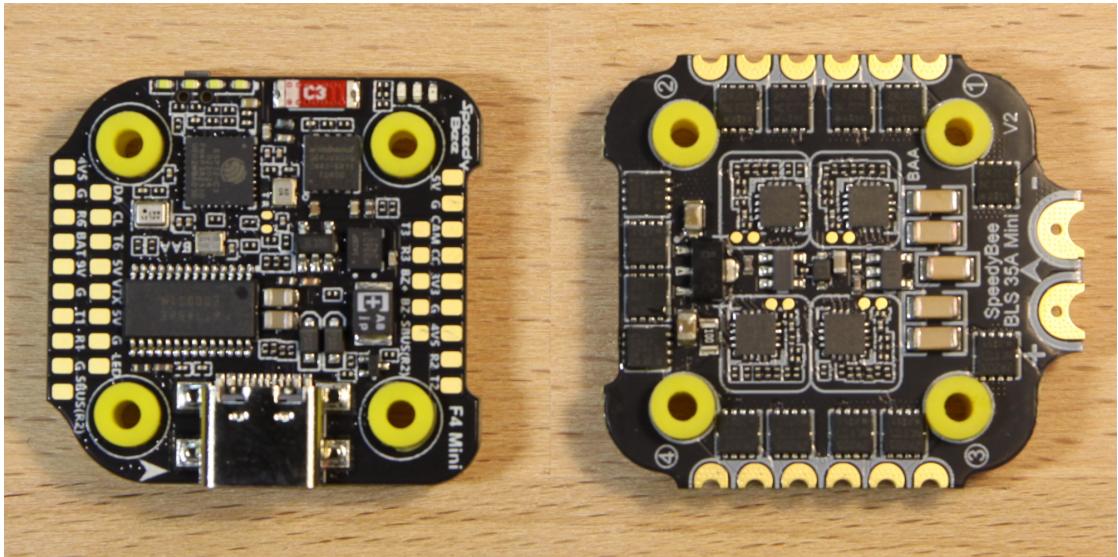


Figure 1.2: Flight Controller SpeedyBee F405 Mini 35A 20x20 Stack (Front)

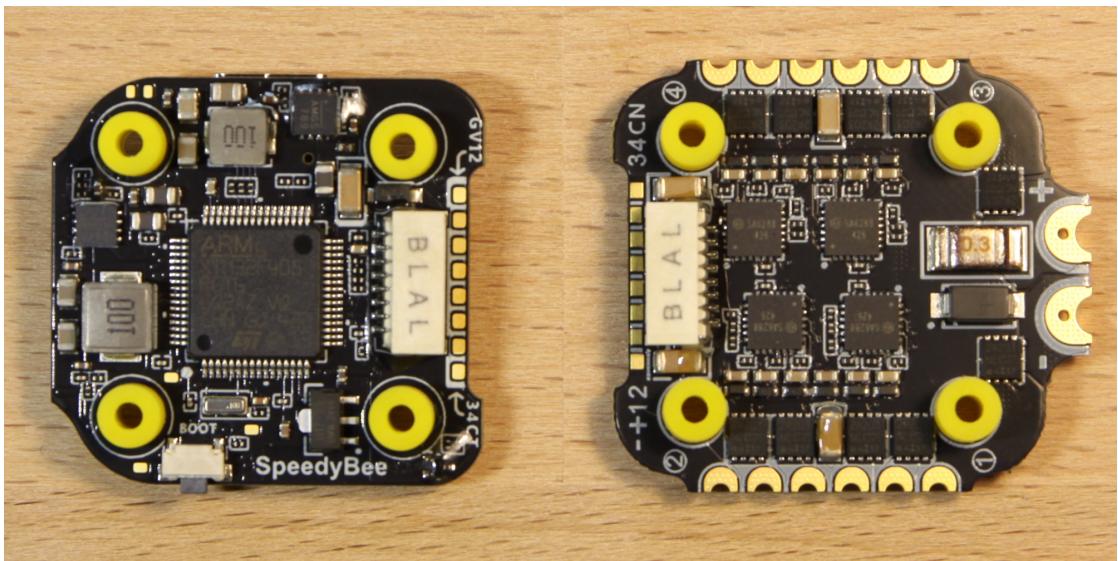


Figure 1.3: Flight Controller SpeedyBee F405 Mini 35A 20x20 Stack (Back)

1.3

Video Transmitter

TBD

TBD

Videosender

Der Videosender (VTX) überträgt das Livebild des der FPV-Camera über den eingestellten Kanal im festgelegten Band an die FPV Brille. Neben analogen Videosendern existieren auch verschiedene digitale Systeme, die zueinander inkompatibel sind.

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

Table 1.2: Overview about permitted VTX Channels in Germany

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

TBD

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

TBD

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

TBD

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

TBD

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

TBD

ringeren Anschaffungskosten für die benötigten Komponenten.

Einen wichtigen Einfluss auf die Bildqualität und Reichweite haben die verwendeten Antennen. Diese sollten auf Sender- und Empfängerseite zusammenpassen. Die verfügbaren Antennen für Videosender unterscheiden sich anhand ihrer Polarisation. Es existieren:

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

TBD

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

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

TBD

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

1.4

Motors

TBD

TBD

Motoren

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

- **Elektrische Spannung:** 4S-Motoren benötigen 4S-Akkus mit maximal 16,8 V und 6S-Motoren benötigen 6S-Akkus mit maximal 25,2 V. Komponenten für 4S sind meist günstiger und leichter, bieten dafür aber weniger Leistung. Komponenten für 6S bieten mehr Leistung oder mehr Flugzeit, haben dafür aber auch meist mehr Gewicht (insbesondere die Akkus). Für leichte kostengünstige Drohnen ist 4S die bessere Wahl. Es gibt auch Motoren, die 4S und 6S vertragen und durch eine hohe Flexibilität bieten.

TBD

- **Motoraufbau und -größe:** Die Motoren bestehen aus einem Stator und einem Rotor. Der Stator enthält die Wicklungen und das Kugellager. Der Rotor ist die Motorglocke mit den Magneten, die die eigentliche Drehbewegung ausführt. Jeder Motor ist mit einer Zahlenkombination ausgezeichnet, die den Durchmesser und die Höhe des Stators in Millimeter angibt. Bei einem Motor mit der Zahlenkombination 2306 beispielsweise hat der Stator einen Durchmesser von 23 mm und eine Höhe von 6 mm. Je größer das Statorvolumen, desto höher ist die Motorleistung im Bezug auf Drehmoment. Zudem ist die thermische Robustheit von großen Motoren besser. Motoren mit kleinem Statorvolumen sind hingegen leichter und sparsamer bei kleinen Lasten.

TBD

- **KV-Wert:** Dieser Wert beschreibt, wie schnell sich ein Motor pro Volt im Leerlauf dreht. Ein Motor mit beispielsweise 3000 KV dreht also ohne Propeller bei 1 V Versorgungsspannung 3000 U/min. An einem 4S-Akku (siehe Abschnitt 1.6) mit ≈ 16 V Spannung hat dieser Motor also eine Leerlaufdrehzahl von $3000 \times 16 \approx 48000$ U/min. Motoren mit hohen KV-Werten (2800-7000 Kv) haben ein geringeres Drehmoment pro Ampere und sind für kleinere Propeller und leichtere Drohnen gut geeignet. Motoren mit niedrigen KV-Werten (1500-2450 Kv) haben ein höheres Drehmoment pro Ampere und sind für größere Propeller und schwerere Drohnen gut geeignet. Ein hoher KV-Wert bedeutet nicht, dass ein Motor stärker ist als ein Motor mit einem niedrigeren KV-Wert. Der Motor dreht nur schneller, braucht aber auch mehr Strom für Schub.

TBD

- **Propelleraufnahme:** Größere Motoren (z.B. 22xx, 23xx, 24xx) für Drohnen ab 5" haben meistens eine M5-Welle mit 5 mm Durchmesser. Die Propeller werden direkt auf die Motorwelle gesteckt und mit einer Mutter gesichert. Kleineren Motoren (z.B. 13xx, 14xx, 18xx) für Drohnen bis 3,5" haben meist eine viel kleinere Wellen

mit 1,5 mm Durchmesser. Hier werden die Propeller mit zwei Schrauben am Motor befestigt. Motoren (z.B. 20xx, 21xx) für mittelgroße Drohnen (3,5"- oder 4") gibt es für M5-Wellen und Wellen mit 1,5 mm Durchmesser.

TBD

- Rahmenbefestigung:

1.5

Propeller

TBD

Propeller

TBD

1.6

Batteries

TBD

Akkus

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

1.6.1

Charge and Discharge Rate (C-Rate)

TBD

Lade- oder Entladerate (C-Wert)

Die Akkus bestehen aus einer oder mehreren in Reihe geschalteten Zellen und bieten sehr hohe C-Werte von 75 bis 120 C. Der C-Wert (*Capacity Rate*) gibt an, wie schnell ein Akku entladen werden kann.

Bei einem 1500 mAh LiPo-Akku (siehe Abbildung 1.4) mit einem C-Wert 100 können somit $1,5A * 100 = 150$ Ampere dauerhaft abgegeben werden.

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

LiPo-Akkus haben mehrere Nachteile. Die werden sehr leicht tiefentladen, was sie dauerhaft beschäftigt oder zerstört. Abstürze führen

TBD

TBD

TBD



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

auch häufig zu Beschädigungen und bei unsachgemäßer Handhabung wie dem zu schnellen Laden oder dem Betrieb trotz Beschädigungen der Außenhülle, besteht das latente Risiko von Bränden. Eine deutlich robustere Alternative zu LiPo-Akkus sind Lithium-Ionen-Akkus. Diese bieten allerdings viel geringere C-Werte.

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

TBD

1.6.2

Number of Cells (S4/S6)

TBD

TBD

Anzahl der Zellen (S4/S6)

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

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

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

Battery Type	Cells	Nominal Voltage	Fully Charged	Discharged
S1	1	3.7 V	4.2 V	3.0 V
S2	2	7.4 V	8.4 V	6.0 V
S3	3	11.1 V	12.6 V	9.0 V
S4	4	14.8 V	16.8 V	12.0 V
S5	5	18.5 V	21.0 V	15.0 V
S6	6	22.2 V	25.2 V	18.0 V

TBD

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

TBD

Mit steigender Kapazität eines Akkus steigt nicht nur die Flugdauer, sondern auch das Gesamtgewicht. Sehr kleine S4-Akkus mit 450 mAh Kapazität wiegen ca. 60 g. Der in Abbildung 1.4 gezeigte Akku mit 1500 mAh Kapazität wiegt hingegen ca. 185 g. Ein höheres Gesamtgewicht beeinflusst auch das Flugverhalten.

1.6.3

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

TBD

TBD

TBD

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

Der Anschluss der Akkus an den Flugcontroller geschieht in der Regel über einen XT30- oder alternativ über eine XT60-Gleichstromstecker. Es gibt auch sehr große Akkus mit XT90-Stecker. Zwei Kabel mit einer Buchse sind an die Motorsteuerung (bei einem Stack) oder an den Flugcontroller bei einem AIO angelötet (siehe Abschnitt 1.2).

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

Neben den Gleichstromstecker verfügt jeder Akku mit zwei oder mehr Zellen über einen

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

1.7

GPS

TBD

GPS

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

TBD

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

TBD

Verfügt ein GPS-Modul nur für 4 Anschlüsse (Lötpads oder Kabel), enthält es keinen magnetischen Kompass. Ohne magnetischen Kompass weiß eine Drohne aber ohne Vorwärtsbewegung nicht, wie sie positioniert ist, also in welche Richtung sie schaut. Mehrere sinnvolle Funktionen wie GPS-Position-Hold bei ArduPilot sind dann nicht möglich.

1.8

Receiver

TBD

Empfänger

2

Software

TBD
TBD

2.1

Flight Controller Firmware

TBD
TBD

Software

TBD
TBD

Flight Controller Firmware

TBD
TBD

