

# FPV Drohnen

## Herausforderungen für Hard- und Software

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Vorgelegt durch</b>      | Henrik Sopart                           |
| <b>Matrikelnummer</b>       | 836188                                  |
| <b>Studiengang</b>          | Elektro- und Informationstechnik - Dual |
| <b>Wohnort</b>              | Schwerte                                |
| <b>Art der Arbeit</b>       | L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X-Projekt |
| <b>Abgabedatum</b>          | 15.02.2023                              |
| <b>Bearbeitungszeitraum</b> | 06.12.2022 - 15.02.2023                 |
| <b>Prüfer</b>               | Prof. Dr. Michael Protogerakis          |

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                     |           |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>FPV-Drohnen</b>                  | <b>2</b>  |
| 2.1      | Besonderheiten . . . . .            | 2         |
| 2.2      | Steuerung . . . . .                 | 3         |
| 2.3      | Komplexität . . . . .               | 4         |
| <b>3</b> | <b>Bauteile</b>                     | <b>5</b>  |
| 3.1      | Flight Controller . . . . .         | 5         |
| 3.1.1    | PID-Loop . . . . .                  | 6         |
| 3.1.2    | Filter . . . . .                    | 7         |
| 3.2      | Rahmen . . . . .                    | 9         |
| 3.3      | Propeller . . . . .                 | 9         |
| <b>4</b> | <b>Bildstabilisierung</b>           | <b>11</b> |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassung und Ergebnis</b> | <b>13</b> |
| <b>6</b> | <b>Literatur</b>                    | <b>14</b> |

# 1 Einleitung

Drohnen, auch bekannt als unbemannte Luftfahrzeuge oder UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), haben in den letzten Jahren enorm an Popularität gewonnen und erlauben Aufnahmen und Perspektiven, welche vorher unmöglich schienen. Sie werden in der Landwirtschaft eingesetzt, um gezielt Düngemittel zu verteilen oder Schädlinge zu bekämpfen. Auch in der Vermessungstechnik haben sich Drohnen bewährt, um große Flächen schnell und präzise zu vermessen [10]. In der Unterhaltungsindustrie werden sie oft für spektakuläre Aufnahmen von Veranstaltungen oder Landschaften genutzt. Doch auch in anderen Bereichen wie dem Katastrophenmanagement oder der Such- und Rettungsarbeit haben sich Drohnen als nützliche Werkzeuge erwiesen. Jedoch sind Drohnen mittlerweile längst nicht mehr nur der Industrie und Fachleuten vorbehalten, sondern können von jedem erworben werden.

Eine besondere Art von Drohnen sind FPV-Drohnen (FPV - First Person View). Der Pilot steuert herkömmliche Drohnen meist aus der Ferne und bekommt das Bild aus einer mechanisch stabilisierten Kamera, welche sich am Rumpf der Drohne befindet, auf einen Bildschirm übertragen. Im Gegensatz dazu bieten FPV-Drohnen die Möglichkeit, das Flugerlebnis hautnah mitzuerleben. Der Pilot steuert die Drohne aus der Perspektive des Fluggeräts und bekommt so ein realistisches Fluggefühl vermittelt. Diese Art von Drohnen bieten eine immersive Flugerfahrung und ein hohes Maß an manueller Kontrolle, erfordern jedoch viel Übung.

Nicht nur der Flug, sondern auch der Bau einer FPV-Drohne stellt Piloten vor eine Reihe an Herausforderungen. Die Hardware muss robust und leistungsfähig genug sein, um den Flug zu ermöglichen, jedoch gleichzeitig klein und leicht genug, um die Agilität und Manövrierfähigkeit der Drohne nicht einzuschränken.

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema "FPV-Drohnen - Herausforderungen an Hard- und Software". Mit einer wissenschaftlichen Herangehensweise wird das immer weiter verbreitete Hobby und professionell eingesetzte Tool der FPV-Drohne analysiert. Speziell wird die Leitfrage aufgegriffen, inwieweit die einzelnen Komponenten der Drohne Einfluss auf die Videoqualität und das Flugverhalten nehmen und wie beides durch geschickte Wahl der Komponenten verbessert werden kann.

Ziel der Arbeit ist es, einen umfassenden Überblick über die Herausforderungen an Hard- und Software bei der Nutzung von FPV-Drohnen zu geben. Die Funktion der wichtigsten Bauteile zu erläutern und darzustellen, wie durch die richtige Auswahl und Kombination von Komponenten die Leistung und Qualität der Drohne verbessert werden kann. Darüber hinaus wird aufgezeigt, welche Lösungen zur Bildstabilisierung im Bereich der Drohnen am verbreitetsten sind, welche Stabilisierung bei FPV-Drohnen zum Einsatz kommt und wie diese sinnvoll eingesetzt werden kann, um die Videoqualität zu verbessern.

## 2 FPV-Drohnen

### 2.1 Besonderheiten

FPV-Drohnen, auch bekannt als Racing- oder Freestyle-Drohnen besitzen erhebliche Unterschiede im Vergleich zu handelsüblichen Drohnen wie beispielsweise der „DJI Mavic 3“. In der folgenden Tabelle werden die Unterschiede der beiden Typen gegenübergestellt. Im Anschluss wird genauer auf die Unterschiede in der Steuerung und der Komplexität eingegangen.

| Merkmal                      | Handelsüblich  | FPV  |
|------------------------------|--|--|
| Steuerung                    | Unterstützungen durch Assistenzsysteme wie GPS oder Hinderniserkennung und vorprogrammierte Flugmodi [9]   | Im Normalfall keine Assistenzsysteme oder Flugmodi vorhanden   |
| Sichtverhältnisse            | Flug über Sichtlinie oder Bildschirm, welcher an der Fernsteuerung befestigt ist und das Videosignal empfängt  | Flug mit einer FPV-Brille, welche das Videosignal empfängt   |
| Verwendungszweck             | Fotografie, Videografie, Vermesungstechnik, Such- und Rettungsarbeiten, Landwirtschaft   | Rennen, Wettbewerbe, Freestyle-Flüge, sehr dynamische Videografie  |
| Kamera                       | Meist eine mittels Gimbal stabilisierte Kamera, welche an der Unterseite der Drohne befestigt ist und sich nach oben und unten neigen lässt                          | Meist zwei in einem festen Winkel montierte Kameras. Eine vorne im Rahmen, die das Bild zur FPV-Brille überträgt. Eine, die auf dem Rahmen befestigt wird und das Video aufnimmt (Actioncam) |
| Akkulaufzeit                 | Meist deutlich höhere Akkulaufzeiten, beispielsweise bis zu 46 Minuten bei der Mavic 3 [9]   | Meist deutlich geringere Akkulaufzeit, beispielsweise 5"FPV-Drohne 4 bis 10 Minuten, abhängig von der Flugweise  |
| Geschwindigkeit und Agilität | Geringere Geschwindigkeit und Agilität, die Mavic 3 ist beispielsweise auf $75,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und einem Nickwinkel von maximal 35 Grad beschränkt [9] | Hohe Geschwindigkeiten von weit über $150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ möglich, kein begrenzter Nickwinkel  |

Tabelle 1: Unterschiede

## 2.2 Steuerung

Die Steuerung einer FPV-Drohne unterscheidet sich im Wesentlichen in zwei Punkten von der einer herkömmlichen. Zum einen bietet die FPV-Drohne im Normalfall keinerlei Assistenzsysteme, zum anderen ist die Reaktion der Drohne auf an der Fernsteuerung eingegebene Befehle eine andere. Sobald sich bei einer herkömmlichen Drohne beide Sticks der Fernsteuerung in der neutralen Position in der Mitte befinden, bleibt die Drohne in der Luft stehen. Wird nun der rechte Stick um das Maximale nach vorne bewegt, neigt sich die Drohne nach vorne und beschleunigt. Da die Neigung durch diverse Assistenzsysteme begrenzt ist, besteht kein Risiko, dass die Drohne „vorne überkippt“. Wird nun die Fernsteuerung losgelassen, bewegt sich der Stick wieder in die neutrale Position und die Drohne bleibt in der Luft stehen. Vereinfacht lässt sich sagen, dass die Bewegung am Stick in einen Neigungswinkel der Drohne resultiert. Die Leistung der Motoren wird automatisch angepasst, um (in diesem Beispiel) den Vorwärtsflug auf gleichbleibender Höhe zu ermöglichen. Die Höhe wird über den linken Stick kontrolliert. Allerdings geschieht dies relativ zur benötigten Drehzahl, um die Drohne in dieser Höhe zu halten. Befindet sich beispielsweise der linke Stick in der neutralen Position, drehen die Propeller so schnell, dass die Drohne weder sinkt noch steigt. Wird nun der Stick maximal nach vorne bzw. hinten betätigt, erhöht beziehungsweise verringert sich die Drehzahl der Motoren um einige Prozent, damit die Drohne langsam steigen beziehungsweise sinken kann. Bei einer herkömmlichen Drohne ist dementsprechend für keine Achse ein kontinuierliches Eingreifen durch den Piloten erforderlich.

Im Vergleich hierzu würde eine FPV-Drohne, bei der der rechte Stick maximal nach vorne gedrückt wird, unkontrolliert nach „vorne kippen“ und sich um diese Achse drehen, bis es zum Absturz kommt. Zusätzlich gibt es bei FPV-Drohnen keine neutrale Stickposition, bei welcher die Drohne an der Stelle stehen bleibt. Jeder Befehl der Fernsteuerung wird ausgeführt. Vereinfacht bedeutet dies, dass eine Bewegung am Stick nicht in einem Winkel, sondern in einer Drehgeschwindigkeit um die gesteuerte Achse resultiert. Auch die Höhensteuerung funktioniert anders als bei einer herkömmlichen Drohne. Am einfachsten lässt sich dies mit einem Potenziometer vergleichen. Befindet sich der linke Stick ganz hinten, drehen die Propeller nicht. Wird diese nun nach vorne bewegt, erhöht sich die Drehzahl bis auf den maximalen Wert. Wird die Fernsteuerung nun losgelassen, behält die Drohne diese Drehzahl bzw. Drehgeschwindigkeit bei. Da die Bewegung einer Achse nur durch direktes Eingreifen des Piloten zu stoppen ist und diese Bewegung nicht wie bei einer herkömmlichen Drohne weitere Achsen ansteuert, um beispielsweise einen Vorwärtsflug mit gleichbleibender Höhe zu ermöglichen, ist ein kontinuierliches Eingreifen durch den Piloten zwingend erforderlich.

## 2.3 Komplexität

Da die meisten herkömmlichen Drohnen für eine große Zielgruppe entwickelt wurden, sind keine technischen Fähigkeiten oder Vorkenntnisse erforderlich, um mit einer solchen Drohne Luftaufnahmen zu erstellen [12]. Durch das Zusammenspiel unterschiedlichster Sensoren, wie beispielsweise eine Hinderniserkennung und GPS, wird das Risiko für die Drohne minimiert. Zusätzlich erleichtern es Technologien wie Geofencing dem Piloten, innerhalb der rechtlichen Grenzen zu fliegen.

Da FPV-Drohnen immer populärer werden, haben sich in den letzten Jahren neue Möglichkeiten gefunden, in dieses Hobby einzusteigen. Seit 2021 bietet die Firma „DJI“ zwei FPV-Drohnen an. Diese müssen nicht selbst zusammengebaut werden und erfordern ähnlich wie herkömmliche Drohnen keinerlei technische Fähigkeiten oder Vorkenntnisse [1][5]. Da diese Drohnen jedoch proprietäre Komponenten verwenden, auf welche der Käufer keinen Einfluss hat, wird auf diese im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Bis vor einigen Jahren gab es nur die Möglichkeit, sämtliche Komponenten wie beispielsweise Motoren, Controller, Kamera oder den Rahmen einzeln zu kaufen und sich so seine eigene Drohne zu bauen. Dies erfordert ein hohes Maß an technischem Wissen und technischen Fähigkeiten, jedoch erhält man die Möglichkeit, die Drohne individuell auf die Bedürfnisse des Piloten anzupassen. Beispielsweise würde für eine Drohne, welche Aufnahmen in den Alpen anfertigen soll die Akkulaufzeit eine Priorität sein und aus diesem Grunde schwächere, aber effizientere Motoren zum Einsatz kommen. Hingegen würde eine Drohne, welche Autos auf einer Rennstrecke verfolgt, leistungsstarke Motoren erhalten.

In der folgenden Abbildungen werden die oben beschriebenen Unterschiede sichtbar. In Abbildung 1a ist eine handelsübliche Drohne zu sehen, in Abbildung 1b eine FPV-Drohne.



(a) Handelsübliche Drohne: DJI Mavic 3 [7]



(b) FPV-Drohne: HGLRC FPV Sector 5 V3 [8]

Abbildung 1: Beispielbilder

## 3 Bauteile

Sowohl FPV-Drohnen als auch herkömmliche Drohnen verwenden eine Vielzahl von Bauteilen, um Flüge zu ermöglichen und zu kontrollieren. Dazu gehören beispielsweise Propeller, Akkus, Steuerungen und Sensoren. All diese Bauteile haben, auch wenn sie in unterschiedlichen Drohnen zum Einsatz kommen, die gleichen grundlegenden Funktionen, wie zum Beispiel die Bereitstellung von Antrieb und Strom, die Kontrolle der Flugbewegungen und die Navigation in der Umgebung. Jedoch gibt es enorme Unterschiede, die den Preis, die Leistung, den Anwendungsfall und viele weitere Faktoren betreffen.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Funktionen der Bauteile einer FPV-Drohne dargestellt, welche den größten Einfluss auf das Flugverhalten und die Videoqualität haben. Neben diesen Komponenten hat selbstverständlich die Kamera selbst den größten Einfluss auf die Videoqualität. Da eine genaue Betrachtung sämtlicher Kameraeinstellungen und Variationen den Umfang dieser Arbeit sprengen würde, werden lediglich Komponenten betrachtet, die sowohl einen Einfluss auf das Flugverhalten, also auch die Videoqualität haben. Dazu gehören der Flight Controller (FC), der Rahmen und die Propeller.

### 3.1 Flight Controller

„Der Flight Controller ist das Herzstück eines Kopters und der Grund dafür, dass ein Kopter überhaupt fliegt.“ [4]

Er ist eine elektronische Einheit, die dazu dient, die Flugbewegungen der Drohne zu kontrollieren und zu stabilisieren. Der Flight Controller ist mit Sensoren wie zum Beispiel Gyroskopen und Beschleunigungsmessern ausgestattet, die ihm ermöglichen, die Position und Bewegung der Drohne zu messen und zu verarbeiten. Basierend auf diesen Messwerten und möglichen Befehlen des Piloten, welche über die Fernsteuerung übertragen werden, werden Steuersignale an die Motoren beziehungsweise an den electronic speed controller, kurz ESC der Drohne gesendet, um die Flugbewegungen auszuführen. Der FC kann mit zusätzlichen Komponenten wie beispielsweise einem GPS-Modul oder einem Kompass ausgestattet werden, um zusätzliche Funktionen wie Navigation oder „Return to Home“ zu ermöglichen. Dies wird jedoch meist nur bei größeren FPV-Drohnen, die für den „Long Range“ Flug gedacht sind gemacht, um einen zusätzlichen Schutz bei Signalabbruch gewährleisten zu können. Da diese aufgrund des größeren Akkus bereits ein höheres Gewicht haben, fällt ein Bauteil mehr nicht ins Gewicht.

FPV-Flight Controller sind speziell für den Einsatz in FPV-Drohnen ausgelegt und haben einige Eigenschaften, die dies zeigen. Eines dieser Merkmale ist eine hohe Leistung und Berechnungsgeschwindigkeit [13]. Dies führt zu einer geringen PID-Loop Dauer und nimmt so direkten Einfluss auf das Flugverhalten. Eine weitere Besonderheit sind die frei zugänglichen und anpassbaren PID-Parameter, um die Flugsteuerung an die spezifischen Anforderungen und Vorlieben des Nutzers anpassen zu können.

### 3.1.1 PID-Loop

Der PID-Loop (Proportional-Integral-Derivative Loop) wird in der Flugsteuerung von FPV-Drohnen verwendet, um die Flugbewegungen der Drohne zu stabilisieren und zu kontrollieren. Der PID-Loop besteht aus drei Anteilen:

1. Proportional: Der proportionale Anteil bezieht sich auf die aktuelle Abweichung des Systems von seinem Sollwert. Je größer die Abweichung ist, desto stärker fällt die Korrektur aus.
2. Integral: Die Integralsteuerung bezieht sich auf die Summe aller Abweichungen des Systems von seinem Sollwert über einen bestimmten Zeitraum. Sie hilft dabei, kleinere Abweichungen auszugleichen und das System in seinem Sollzustand zu halten.
3. Derivative: Die derivative Steuerung bezieht sich auf die Änderungsrate der Abweichung des Systems von seinem Sollwert. Sie hilft dabei, das System auf Änderungen in der Umgebung schneller reagieren zu lassen und das System dadurch stabil zu halten.

Der PID-Loop berechnet die Steuersignale für das System basierend auf den Werten der drei Anteile, den Ist-Werten der Drohne und den Eingaben durch den Piloten, welche die Soll-Werte darstellen. Anschließend werden die berechneten Steuerwerte an den ESC weitergegeben, um die Flugbewegungen der Drohne zu kontrollieren und zu stabilisieren. Die eingegebenen PID-Werte richten sich stark nach Gewicht und dem gewünschten Flugverhalten. Zusätzlich müssen jedoch auch Störgrößen wie Änderungen in der Umgebung, Verzögerungen in der Signalverarbeitung oder Einflüsse durch Vibrationen, welche Messwerte verfälschen können, beachtet werden.

Werden die PID-Parameter falsch eingestellt, kann es im besten Fall zu einem instabilen oder trägen Flugverhalten der Drohne kommen. Im schlimmsten Fall besteht jedoch die Gefahr, dass die Drohne unkontrolliert in eine unerwartete Richtung fliegt und damit Personen oder Objekte in der Umgebung gefährdet. Dieses Phänomen nennt sich „Fly away“. Aus diesem Grund sind bei herkömmlichen Drohnen die PID-Werte für den Käufer nicht sichtbar und lassen sich auch nicht ändern. Bei FPV-Drohnen muss der Benutzer sich die PID-Werte jedoch selbst einstellen, da ein FC sowohl in einer schweren, langsamen als auch in einer leichten und sehr agilen Drohne verbaut werden kann und so je nach Anwendungsfall unterschiedlich parametrisiert werden muss.



### 3.1.2 Filter

Filter sind Hardware- und/oder Softwarekomponenten, welche sich auf dem FC befinden und ungewollte Vibrationen beziehungsweise Frequenzen, welche durch Sensoren aufgenommen werden, minimieren. Diese Vibrationen entstehen durch aerodynamische Effekte und die Drehbewegung der Motoren und Propeller. Sie können die Werte des Gyroskops verfälschen und so zu einem unkontrollierbaren und unerwarteten Flugverhalten führen. Durch Filter kann dem entgegengewirkt werden, indem Frequenzen, welche nicht das Resultat einer Bewegung sind, sondern durch Vibrationen entstanden, herausfiltert werden. Der Nachteil von Filtern liegt in der Verzögerung, die sie dem Signal hinzufügen.

Dies sorgt dafür, dass eine Bewegung der Drohne den PID-Loop erst verzögert erreicht. Aus diesem Grund ist eine möglichst geringe, aber dennoch ausreichende Filterung erstrebenswert. Ein einfacher, jedoch sehr effektiver Weg eine Filterung zu erreichen, ist das sogenannte „soft mounting“ des FCs. Hierbei wird der FC nicht direkt mit dem Rahmen verschraubt, sondern ist durch Gummis vom Rahmen entkoppelt.

Um die Wichtigkeit und den Einfluss von Filtern zu verdeutlichen, wurde ein Experiment durchgeführt. In diesem Experiment wurden sämtliche Daten des Gyroskops und des Flight Controllers während des Fluges aufgezeichnet und anschließend mit einer speziellen Software (Betaflight - Blackbox Explorer) veranschaulicht. Um die Reproduzierbarkeit und Transparenz zu ermöglichen, werden die verwendeten Bauteile der Drohne im Folgenden dargestellt.

Propeller: AZURE 5145 Vanover 5,1"3-Blatt

Motoren: T Motor Pacer V2 2306 (1950 $kv$ )

Rahmen: Lumenier QAV-S JohnnyFPV 5"

Flight Controller: MAMBA F722 MK3 F7

Gewicht: 650g

In Abbildung 2 sind die ausgewerteten Daten des Flugschreibers dargestellt. Beide Diagramme beziehen sich auf die gleiche Bewegungsachse (Querachse) und beschreiben den gleichen Flug.

Für die folgende Betrachtung der Diagramme werden keine Werte benötigt. Das Experiment soll nur einen Überblick über die Möglichkeiten einer korrekten Filterung darlegen und grafisch zeigen, wie sich dies im Signal bemerkbar macht. Auf der horizontalen Achse der Abbildung 2a und 2b ist jeweils die Frequenz der Vibration bzw. Bewegung dargestellt. Die vertikale Achse beschreibt die Amplitude und somit die Intensität.

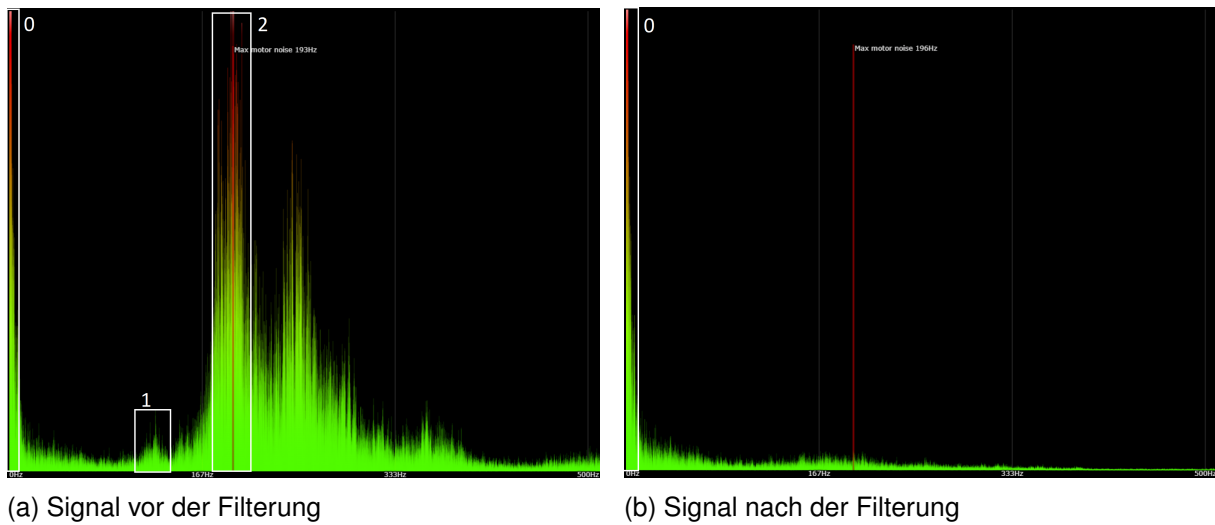


Abbildung 2: Auswirkungen einer korrekten Filterung

Abbildung 2a zeigt das ungefilterte Signal des Gyroskops, welches ein hohes Maß an Rauschen aufweist. Neben einem hohen Grundrauschen lassen sich zwei Effekte besonders gut erkennen. Zum einen das sogenannte „prop wash“, welches in Abbildung a durch die Zahl 1 gekennzeichnet ist, zum anderen die Resonanzfrequenz des Systems, welche sich bei ungefähr 200 Hz mit einer hohen Amplitude zeigt und mit der Nummer 2 gekennzeichnet ist.

In Abbildung 2b lässt sich das identische, jedoch gefilterte Signal des Gyroskops erkennen. Dieses Signal wird im weiteren Verlauf dem PID-Loop als „Ist-Wert“ zur Verfügung gestellt. In Abbildung 2b lässt sich eindeutig erkennen, dass ein Großteil der Frequenzen herausgefiltert wurde. Jedoch noch immer ein geringfügiges Rauschen im Bereich von 200 Hz vorhanden ist. Da die Amplitude dieser Störungen jedoch im Vergleich zu den eigentlichen Bewegungen der Drohne minimal ist, kann diese vernachlässigt werden.

Frequenzen unterhalb von 100 Hz werden im Normalfall nicht gefiltert bzw. gedämpft, da diese Frequenzen das Resultat einer tatsächlichen Bewegung der Drohne darstellen. Dies kann sowohl in Abbildung 2a als auch in Abbildung 2b beobachtet werden. Die betroffenen Bereiche sind mit der Zahl 0 in beiden Abbildungen markiert.

### 3.2 Rahmen

Der Rahmen, oft auch als „Frame“ bezeichnet, bildet das Grundgerüst einer jeden FPV-Drohne. Er besteht aus einem leichten, aber robusten Material wie Kohlefaser und nimmt erheblichen Einfluss auf das Flugverhalten der Drohne. Die Größe des Rahmens beeinflusst nicht nur das Erscheinungsbild, sondern die gesamte Konstruktion der FPV-Drohne. Aus diesem Grund ist es unerlässlich, dass die Größe des Rahmens sorgfältig geplant und ausgewählt wird. Die Wahl des Rahmens bestimmt im weiteren Verlauf die Auswahl und Anordnung der weiteren Komponenten wie Motoren, Propeller und Akku, welche auf den Rahmen abgestimmt werden müssen, um ein optimales Flugverhalten zu gewährleisten.

Die Größe eines FPV-Drohnenrahmens wird in der Regel in Zoll (inch) angegeben und bezieht sich auf den Durchmesser der Propeller, welche an diesem Rahmen maximal verwendet werden können. Eine weitere wichtige Kenngröße ist die Dicke des Rahmens. Ein dicker Rahmen sorgt für eine höhere Steifigkeit, was zu einem präziseren und stabileren Flug führt. Allerdings erhöht dieser auch das Gewicht und könnte so das Flugverhalten und die Manövrierfähigkeit beeinträchtigen. Ein dünner Rahmen ist leichter, bietet dadurch eine längere Akkulaufzeit und höhere Manövrierfähigkeit, kann allerdings auch anfälliger für Beschädigungen und durch die geringere Steifigkeit weniger stabil im Flug sein.

Zusätzlich haben die Dicke und Größe des Rahmens Einfluss auf die Weiterleitung von Vibrationen, welche durch die Motoren entstehen und sich in den Rahmen fortbewegen. Starke Vibrationen können zu Fehlern im PID-Loop führen, da Messwerte des Gyroskops und anderer Sensoren beeinträchtigt und verfälscht werden. Neben den Flugeigenschaften leidet auch die Videoqualität unter Vibrationen, welche die Kamera erreichen. Diese Vibrationen können durch einen dickeren Rahmen minimiert werden. Auch die Größe des Rahmens hat Einfluss auf die Vibrationen, so erfährt beispielsweise ein 7"Rahmen deutlich mehr Vibrationen bei gleicher Dicke als ein 5"Rahmen, da die Arme des 7"Rahmens länger sind, was zu einer reduzierten Steifigkeit und somit mehr Vibrationen führt. Diesem Effekt kann durch eine passende Filterung entgegengewirkt werden.

### 3.3 Propeller

Die Propeller haben direkten Einfluss auf das Flugverhalten und so indirekt auch Einfluss auf die Videoqualität. Sie werden durch die Motoren auf enorme Geschwindigkeiten beschleunigt und erzeugen so den Auftrieb für den Flug. Propeller zeichnen sich durch drei wichtige Kenndaten aus. Den Durchmesser und die Steigung, welche meist in Zoll angegeben werden und die Anzahl der Propellerflügel. All diese Kenndaten haben einen enormen Einfluss auf sämtliche Aspekte der FPV-Drohne, wie beispielsweise das Flugverhalten oder die Akkulaufzeit.

Der Durchmesser gibt an, wie groß der Propeller ist und beeinflusst direkt die Menge an Luft, die er in einer bestimmten Zeit bewegen kann. Die Steigung kann symbolisch mit der Steigung eines Gewindes veranschaulicht werden. Je höher die Steigung ist, desto tiefer dringt die Schraube pro Umdrehung in das Material vor.

Dies benötigt jedoch mehr Kraft beziehungsweise Energie. Gleiches gilt für die Steigung eines Propellers. Dieser kann durch eine höhere Steigung bei gleichbleibender Anzahl der Umdrehung mehr Luft befördern, benötigt jedoch ein höheres Drehmoment bzw. mehr Energie durch den Motor. Die Anzahl der Flügel nimmt besonders Einfluss auf die übertragbare Leistung und die Effizienz. Da durch jeden Flügel eines Propellers die von Luft durchströmte Fläche erhöht wird, kann ein Propeller mit mehr Flügeln bei gleichbleibendem Durchmesser mehr Luft befördern als einer mit weniger Flügeln. Da diese sich jedoch gegenseitig negativ beeinflussen und Turbulenzen erzeugen, sinkt die Effizienz, was in einem höheren Energieverbrauch resultiert.

Ein weiterer Aspekt, welcher beachtet werden muss, ist die mechanische Integrität. Falls ein Propeller beispielsweise durch einen Absturz beschädigt oder verbogen worden ist, sollte dieser vor dem nächsten Flug entfernt und durch einen neuen ersetzt werden. Andernfalls kann es aufgrund der enormen Rotationsgeschwindigkeiten des Propellers, welcher möglicherweise durch den Defekt nicht mehr exakt ausgewuchtet ist, zu Vibrationen kommen. Aufgrund der Intensität diese kann der FC sie unter Umständen nicht korrekt filtern, was in unkontrollierten Bewegungen der Drohne resultieren würde.

Die Geschwindigkeit des Propellers wird durch zwei Faktoren beeinflusst. Zum einen durch die Spannung, welche am Motor anliegt und zum anderen durch den  $kv$ -Wert (Umdrehungen pro Minute pro Volt,  $\frac{1}{\text{min} \cdot \text{V}}$ ), den dieser Motor besitzt. In der folgenden Rechnung wird beispielhaft und vereinfacht die Umdrehungszahl eines Motors und die Geschwindigkeit des Propellers für eine  $6s$  System mit einem Motor mit  $1950kv$  und einem 5"Propeller berechnet.  $6s$  gibt hierbei die Anzahl an Zellen und somit die Höhe der Spannung an. Es wird zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass die Spannung einer Zelle auch unter Last konstant bei  $3,7\text{V}$  liegt.

$$n = \frac{s \cdot 3,7\text{V} \cdot kv}{60} \quad (1)$$

Werden für  $s$  und  $kv$  die Werte aus dem Beispiel eingesetzt, erhält man  $n = 721,5 \frac{1}{s} = 43\,290 \frac{1}{\text{min}}$ . Um nun die Geschwindigkeit an der Spitze eines Propellerflügels zu berechnen, kann folgende Formel verwendet werden.

$$v = D \cdot \pi \cdot n \quad (2)$$

Nach Einsetzen des Durchmessers und der berechneten Umdrehungszahl ergibt sich eine Geschwindigkeit von  $v \approx 287,87 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 1036 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  an der Spitze des Propellerflügels. Diese enormen Geschwindigkeiten werden in der Realität aufgrund von Luftwiderstand, Verlustleistungen und dem begrenzten Strom des Akkus nicht erreicht. Sie zeigt jedoch den Bereich, in dem sich die Geschwindigkeit des Propellers bewegt und lässt erahnen, welche Folgen eine Unwucht hätte.

## 4 Bildstabilisierung

Es gibt verschiedene Arten der Bildstabilisierung. Im Zusammenhang mit Drohnen sind zwei Stabilisierungsarten am weitesten verbreitet. Die mechanische Bildstabilisierung und die digitale Bildstabilisierung.

Mechanische Bildstabilisierung bezieht sich auf die Verwendung von mechanischen Elementen, um die Bewegungen einer Kamera auszugleichen. Im Bereich der Drohnen wird dies durch die Verwendung eines Gimbals erreicht. Ein Gimbal ist ein dreiachsiges System, welches die Kamera stabil hält, indem es die Bewegungen auf jeder Achse bis zu einem gewissen Grad ausgleicht. Diese Art der Stabilisierung findet sich meist in herkömmlichen Drohnen.

Die digitale Bildstabilisierung kommt aufgrund des geringeren Gewichts meist in FPV-Drohnen zum Einsatz. Jedoch gibt es unterschiedliche Methoden, um ein Video digital zu stabilisieren. Häufig werden Algorithmen zur Bewegungserkennung verwendet, welche die Bewegungen der Kamera verfolgen und die Bilder entsprechend korrigieren. Dies geschieht in Echtzeit und erfordert wenig technisches Vorwissen in der Benutzung. Eine weitere Methode nutzen die Daten aus Bewegungssensoren, wie zum Beispiel Gyroskopen, um die Bewegungen der Kamera zusätzliche zum eigentlichen Bild zu erfassen. Anschließend werden diese Daten miteinander verglichen und das Bild entsprechend der aufgezeichneten Bewegungen angepasst. Diese Arbeit wird jedoch nicht in Echtzeit, sondern meist in einer speziellen Software durchgeführt und erfordert technisches Wissen, führt im Regelfall aber zu besseren Ergebnissen.

Obwohl die digitale Bildstabilisierung viele Vorteile bietet, besteht ein großer Nachteil im Vergleich zur mechanischen Stabilisierung. Der Qualitätsverlust. Da eine mechanische Stabilisierung die Kamera physikalisch bewegt und so beispielsweise immer horizontal halten kann, ist kein digitales Zoomen notwendig. Bei einer digitalen Stabilisierung muss zwangsläufig gezoomt werden, da der Rand des Videos durch die Stabilisierung beschnitten wird und sich so das Seitenverhältnis des Videos ändert. Um dem entgegenzuwirken, wird digital in das Bild gezoomt, bis das gewünschte Seitenverhältnis erreicht und das Bild ausgefüllt ist. Bei diesem Vorgang geht jedoch ein Teil der Auflösung verloren. Dies ist in der folgenden Grafik vereinfacht an einem Beispiel dargestellt.

Den Ausgangszustand und somit die Eingabe der Stabilisierung bildet ein um 90 Grad gedrehtes Bild einer nicht mechanisch stabilisierten Kamera, welches in Abbildung 1b in schwarz dargestellt ist. Das Bild hat aufgrund der 90 Grad Drehung das Format 9:16 und die Auflösung 1080x1920. Soll dieses Bild nun horizontal im 16:9-Format stabilisiert werden, kann eine hier in Blau dargestellte Maske im gewünschten Seitenverhältnis über die Eingabe gelegt werden. Da die neue Maske jedoch 1920 und nicht 1080 Pixel in der Horizontalen besitzt, haben 840 Pixel pro Reihe keinen Wert und bilden somit schwarze Balken an den Seiten. Um dem entgegenzuwirken, wird die Maske auf die Größe der Eingabe skaliert. Da das Seitenverhältnis beibehalten werden soll, muss dies sowohl für die Horizontale als auch für die Vertikale gelten. Dieser Schritt ist in Grün dargestellt.

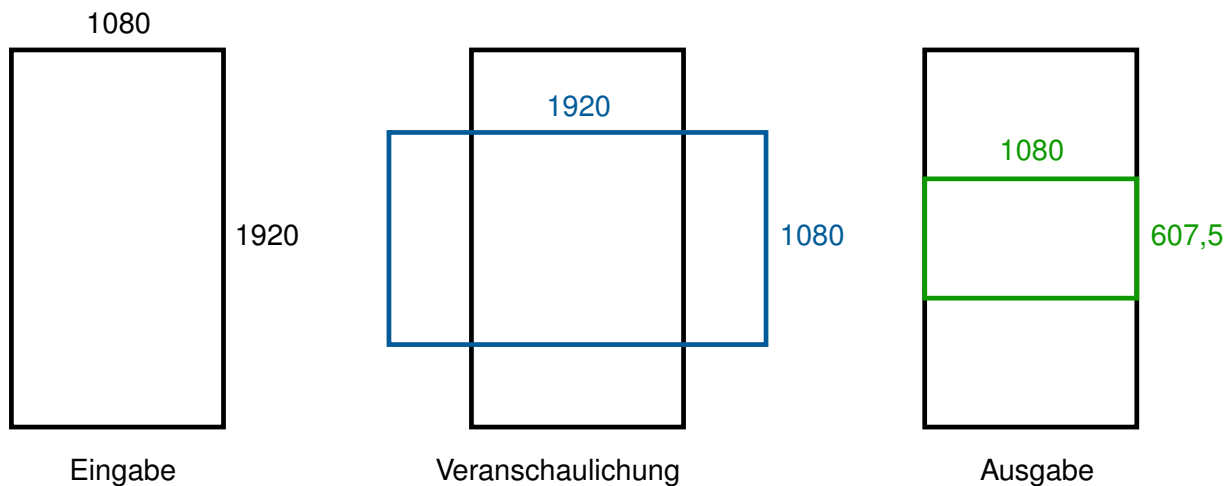


Abbildung 3: Stabilisierung

Es lässt sich eindeutig erkennen, dass ein großer Teil der Auflösung fehlt, das Endresultat jedoch ein Bild im 16:9-Format ist. Dieses Vorgehen lässt sich auf jedes Bild eines Videos anwenden, um ein horizontal stabilisiertes Video zu erhalten. Bei einer geringeren Drehung der Eingabe beispielsweise um 5 Grad, ist der Verlust aufgrund der Stabilisierung deutlich geringer. Mathematisch lässt sich der Unterschied zwischen Ein- und Ausgabe durch die folgende Formel beschreiben.

$$\frac{A_x \cdot A_y}{E_x \cdot E_y} \cdot 100\% \quad (3)$$

Hierbei stehen  $A_x$  und  $A_y$  für die Länge und Breite der Ausgabe in Pixeln,  $E_x$  und  $E_y$  analog für die Länge und Breite der Eingabe. Das Ergebnis gibt relativ zur Eingabe an, wie viel Prozent der ursprünglichen Pixel in der Ausgabe enthalten sind.

Obwohl diese Problematik auf den ersten Blick nach einem Ausschlusskriterium für die digitale Bildstabilisierung aussieht, spielt es in der Realität eine geringe Rolle. Moderne Kameras sind in der Lage, in unterschiedlichen Formaten und Auflösungen Aufnahmen anzufertigen. Wäre die Eingabe beispielsweise im 4:3-Format erfolgt, hätte die Ausgabe eine höhere Qualität, da weniger gezoomt werden müsste. Eine genauere Betrachtung des Einflusses und des Zusammenspiels aus Format und Auflösung in Verbindung mit digitaler Bildstabilisierung ist aufgrund des Umfangs dieser Arbeit nicht möglich. Ein weiterer Vorteil der digitalen Stabilisierung ist die Flexibilität. Da das Video digital bearbeitet wird, besteht die Möglichkeit, im Schnitt Einfluss auf die Stärke der Stabilisierung zu nehmen. So kann beispielsweise eine Szene, die ein Autorennen zeigt, weniger stabilisiert werden, um einen besseren Eindruck der Geschwindigkeit zu vermitteln.

## 5 Zusammenfassung und Ergebnis

Das Ziel dieser Arbeit war es, darzulegen, inwieweit die einzelnen Komponenten einer FPV-Drohne Einfluss auf die Videoqualität und das Flugverhalten nehmen und wie beides durch geschickte Wahl der Komponenten verbessert werden kann. Durch einen experimentellen Aufbau wurde gezeigt, dass bereits einfache Maßnahmen wie das „soft mounting“ des FCs und das korrekte Einstellen von Filtern dazu beitragen, ungewollte Frequenzen, welche durch Vibrationen entstehen, zu minimieren, um so das Flugverhalten zu verbessern. Zusätzlich wurde dargelegt, dass die Größe und Dicke des Rahmens nicht nur auf das Flugverhalten, sondern auch auf die Videoqualität Einfluss nehmen und wie dieser durch die Auswahl korrekter Komponenten minimiert werden kann. Es wurde außerdem aufgezeigt, dass die Auswahl des Propellers einen entscheidenden Einfluss auf das Flugverhalten hat und durch Berechnungen dargelegt, welchen Geschwindigkeiten und dementsprechend welchen Kräften die Propeller ausgesetzt sind. Anschließend wurde anhand eines Beispiels gezeigt, dass die digitale Bildstabilisierung ein enormes Potenzial, jedoch auch einen entscheiden Nachteil gegenüber einer mechanischen Stabilisierung bietet. Neben dem Vorteil der Flexibilität im Schnitt bieten digitale Bildstabilisierungen im Vergleich zu mechanischen enorme Vorteile im Bereich der Komplexität und des Gewichts. Sie haben allerdings einen Nachteil gegenüber mechanisch stabilisierten Systemen, der sich durch eine geringere Qualität des stabilisierten Videos auszeichnet. Da dieser Qualitätsverlust jedoch durch korrekte Einstellung der Kamera minimiert oder eliminiert werden kann, bieten digitale Lösungen zur Stabilisierung ein enormes Potenzial im Bereich der FPV-Drohnen.

Durch diese Erkenntnis zeigt sich, dass Komponenten wie der FC, der Rahmen oder die Propeller zwar einen enormen Einfluss auf das Flugverhalten und teilweise auch auf die Videoqualität haben, sich jedoch nicht negativ gegenseitig beeinflussen. So werden beispielsweise durch einen dickeren Rahmen oder korrekt balancierte Propeller Vibrationen minimiert, was sich sowohl in einem besseren Flugverhalten als auch in einer besseren Videoqualität zeigt. Auf der anderen Seite kann es unter Umständen nötig sein, beispielsweise einen Rahmen mit geringer Dicke zu verwenden, um die maximale Akkulaufzeit zu erhalten. Dies würde sowohl die Videoqualität als auch das Flugverhalten negativ beeinflussen. Da moderne FCs jedoch in der Lage sind, einen großen Anteil dieser Störungen zu filtern und Algorithmen mithilfe von Gyroskopdaten die Möglichkeit bieten, ein Video digital zu stabilisieren, dass etwaige Vibrationen und Flugfehler im finalen Schnitt nicht sichtbar sind, kann auch mit einer mechanisch nicht optimalen FPV-Drohne ein gutes Ergebnis erzielt werden. Für das bestmögliche Ergebnis empfiehlt es sich jedoch, eine mechanisch solide Grundlage zu verwenden, welche im Bestfall nur minimal durch Filter oder Bildstabilisierung unterstützt werden muss.

Die, dieser Arbeit zugrundeliegenden theoretischen Konzepte und Schlussfolgerungen wurden bereits in der Praxis erfolgreich angewendet. In dem nachfolgenden Video kann dies beobachtet werden. Besonders hervorzuheben ist hierbei die Qualität der digitalen Bildstabilisierung.

<https://www.youtube.com/watch?v=yI7aHrwKL-8>

## Literatur

- [1] *Avata*. URL: <https://www.dji.com/avata> (besucht am 18.01.2023).
- [2] *Chris Rosser / YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/@ChrisRosser/featured> (besucht am 28.12.2022).
- [3] *Digital Video Stabilization and Rolling Shutter Correction using Gyroscopes*. URL: [https://graphics.stanford.edu/papers/stabilization/karpenko\\_gyro.pdf](https://graphics.stanford.edu/papers/stabilization/karpenko_gyro.pdf) (besucht am 04.01.2023).
- [4] *Flugsteuerung und Flight Controller | RCTech FPV Racing Equipment*. URL: <https://www.rctech.de/flugelektronik/fc-flugsteuerung.html> (besucht am 21.12.2022).
- [5] *FPV - Redefine Flying*. URL: <https://www.dji.com/dji-fpv?site=brandsite> (besucht am 18.01.2023).
- [6] Gene F. Franklin, David J. Powell und Abbas Emami-Naeini. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 4th. USA: Prentice Hall PTR, 2001. ISBN: 0130323934.
- [7] Foto-Erhardt GmbH. *DJI Mavic 3 Fly More Combo*. URL: <https://www.foto-erhardt.de/video/drohnen/dji-mavic-3-fly-more-combo.html> (besucht am 21.12.2022).
- [8] Meilon GmbH. *HGLRC FPV Sector 5 V3 Freestyle Racing Drone Crossfire Nano 6S*. URL: <https://www.fpv24.com/de/hglrc/hglrc-fpv-sector-5-v3-freestyle-racing-drone-crossfire-nano> (besucht am 28.12.2022).
- [9] *Mavic 3 - Specs - DJI*. URL: <https://www.dji.com/mavic-3/specs> (besucht am 01.02.2023).
- [10] Heinz-Jürgen Przybilla und Thomas Kersten. *UAV 2020 - The Sky is the Limit? Schriftenreihe des DVW, Band 97, Beiträge zum 185. DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2020 in Hattingen*. Feb. 2020. ISBN: 978-3-95786-240-2.
- [11] Quan Quan. *Introduction to Multicopter Design and Control*. Juni 2017. ISBN: 978-981-10-3381-0. DOI: [10.1007/978-981-10-3382-7](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3382-7).
- [12] Charlie Shon. *Ist es schwer, das Fliegen einer Drohne zu lernen?* 23. Jan. 2022. URL: <https://drones-camera.com/de/is-it-hard-to-learn-to-fly-a-drone/> (besucht am 17.01.2023).
- [13] *STM32F765xx Datenblatt*. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f765zi.pdf> (besucht am 13.01.2023).