

Bachelorarbeit

Im Studiengang

Informatik

Thema

**Untersuchung und Bewertung existierender Lösungen und Ansätze
für Drop-Mechanismen für Drohnen**

Vorgelegt von

Alexej Enns

Matrikelnummer: 1398290

Frankfurt University of Applied Sciences

Fachbereich 2 – Studiengang Informatik

Erstprüfer: Prof. Dr. Christian Baun

Zweitprüfer: Prof. Dr. Matthias Deegener

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe, dass ich sie zuvor an keiner anderen Hochschule und in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung eingereicht habe und dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderweitigen fremden Äußerungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Kronberg, 17.12.2025

Ort, Datum

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Eduard". It is positioned above a horizontal line.

Unterschrift

Danksagung

Hiermit bedanke ich mich bei allen, die mich tatkräftig in meinem Studium unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich während meines gesamten Studiums bedingungslos unterstützt und mir diesen Weg überhaupt erst ermöglicht haben.

Darüber hinaus danke ich Prof. Dr. Baun für die reibungslose Kommunikation, sowie die Unterstützung bei der Themenfindung und Betreuung der Bachelorarbeit. Vielen Dank an Prof. Dr. Deegener für die Verfügbarkeit als Korreferent.

Zusammenfassung

Die folgende Arbeit untersucht Drop-Mechanismen für FPV-Drohnen mit der Zielsetzung, kostengünstige und zuverlässige Lösungen für den Abwurf von Lasten zu ermitteln und umzusetzen. Betrachtet werden sowohl kommerzielle Lösungen als auch DIY-Konzepte, welche auf technische, materialbezogene und sicherheitsrelevante Aspekte analysiert werden. Auf Basis dieser Analysen werden mehrere Drop-Mechanismen gefertigt und in einen in ein FPV-System integrierbaren Zustand versetzt. Ein Schwerpunkt liegt auf der elektrischen Konfiguration eines Flight Controllers zur Servo Steuerung. Die Ergebnisse zeigen, dass DIY-Lösungen eine taugliche Alternative zu kommerziellen Systemen darstellen und durch ihre Anpassungsmöglichkeiten diese in manchen Aspekten sogar übertreffen. Die Arbeit liefert somit eine Grundlage für weiterführende Anwendungen im Hobby- und Forschungsbereich.

Abstract

The following work examines drop-mechanisms for FPV drones with the objective of identifying and implementing cost-effective and reliable solutions for the dropping of loads. Both commercial solutions and DIY concepts are considered, which are analyzed for technical, material-related, and safety-relevant aspects. Based on these analyses, several drop-mechanisms are manufactured and put into a state that can be integrated into an FPV system. A focus lies on the electrical configuration of a flight controller for servo control. The results show that DIY solutions represent a viable alternative to commercial systems and, through their customization options, even exceed these in some aspects. The work thus provides a basis for further applications in the hobby and research sector.

Abkürzungsverzeichnis, Fachbegriffe und Einheiten

<u>Abkürzung</u>	<u>Bedeutung</u>
BEC	Battery Eliminator Circuit
CNC	Computerized Numerical Control
DIY	Do it yourself
ESC	Electronic Speed Controller
FDM	Fused Deposition Modeling
GND	Ground (in einem Schaltkreis)
LiPo	Lithium-Polymer-Akkumulator
PWM	Pulse Width Modulation
SLA	Stereo-Lithografie
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
<u>Begriff</u>	<u>Erklärung</u>
Controller	Fernsteuerung zur Eingabe von Steuersignalen für ein UAV
DShot	Digitales Kommunikationsprotokoll zur Ansteuerung von elektronischen Drehzahlreglern (ESC)
(Löt-)Pad	Lötfläche zur mechanischen und elektrischen Verbindung elektronischer Bauteile
Masseführung	Anordnung und Führung von Masseleitungen in einer elektrischen Schaltung
Servo	Elektromotor mit integrierter Steuerungselektronik zur positionsgenauen Bewegung
<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
V	Volt
mA	Milliampere
ms	Millisekunde
g	Gramm
kg	Kilogramm

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	2
Danksagung.....	3
Zusammenfassung	4
Abstract	4
Abkürzungsverzeichnis, Fachbegriffe und Einheiten	5
1 Einleitung	9
1.1 Motivation	9
1.2 Zielsetzung	10
2 Aufbau und Funktion von FPV-Drohnen	11
2.1 Zentrale Komponenten einer FPV-Drohne	11
2.2 Signalübertragung	12
2.2.1 PWM-Signale	12
2.2.2 DShot / Digitale Signale	12
2.2.3 Mögliche Probleme bei der Steuerung von Servos in FPV-Drohnen	12
2.3 Belastung und Aerodynamische Grundlagen	12
2.3.1 Verlagerung des Schwerpunktes.....	12
2.3.2 Dynamischer Lastabwurf	12
2.4 Materialanalyse	13
2.4.1 PLA (Polylactide).....	13
2.4.2 PETG (Polyethylenterephthalat).....	13
2.4.3 Nylon.....	13
2.4.4 Fertigung aus Metall	13
2.5 Anfertigung und Technik	14
2.5.1 3D-Druck (FDM).....	14
2.5.2 SLA-Druck (Stereo-Lithography).....	14
2.5.3 CNC-Manufaktur.....	14
2.6 Grundlagen zur Sicherheit.....	14
2.6.1 Failsafe	14
2.6.2 Vermeidung von Zuverlässigkeitsproblemen bei Servos	15
2.6.3 Zuverlässigkeit von 3D-Druck Teilen	15

3 Marktanalyse und bestehende Lösungsansätze.....	15
3.1 Beispiele für kommerzielle Drop-Mechanismen	16
3.1.1 Foxtech	16
3.1.2 Skydroid.....	16
3.1.3 DJI	17
3.1.4 Amazon & Aliexpress	17
3.1.5 Markttrends	18
3.2 DIY-Drop-Mechanismen	18
3.2.1 Servo gesteuerte Mechanismen	18
3.2.2 Magnetische Abwurfmechanismen	19
3.3 Vergleich kommerziell & DIY	19
3.3.1 Materialvergleich	19
3.3.2 Anfertigungstechniken.....	19
4 Methodik	20
4.1 Auswahl und Analyse bestehender Drop-Mechanismen	20
4.2 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eigener Mechanismen.....	20
4.3 Experimentelle Untersuchungsmethodik.....	21
5 Entscheidungskriterien und Basisaufbau (Flight Controller)	21
5.1 Anforderungen	21
5.2 Konzeptentwicklung	22
5.3 Untersuchung nach fertigungsgerechter Gestaltung	22
5.4 Materialauswahl	22
5.5 Elektrische Konstruktion (Flight Controller)	23
5.6 Betaflight Einstellungen.....	25
5.6.1 Betaflight UI und Empfänger.....	25
5.6.2 Betaflight Servo-Einstellung.....	25
5.6.3 Servo Steuerung	26
5.7 3D-Druck	26
6 Konstruktion von Drop-Mechanismen.....	27
6.1 DJI Phantom Drop Maze (nosbigxam, 2016).....	27
6.2 Einfacher RC Servo Release Drop-Mechanismus (Thingyverser, 2015)	28
6.3 Multi Servo Drop (alperssl, 2017)	30

6.4 Servo Fracht Dropper (chefotm, 2023)	31
6.5 Elektromagnet	31
7 Experimentelle Analyse der Drop-Mechanismen	33
7.1 Übersicht	33
7.2 Gewicht und Bauraum	35
7.3 Energieabhängigkeit	35
7.4 Statische Haltekraft	36
7.5 Auslösezuverlässigkeit	37
7.6 Vibrationstest	37
7.7 Mechanische Komplexität und Montagefreundlichkeit	38
7.8 Abwurf und Präzision	39
8 Diskussion und Vergleich zu kommerziellen Abwurfsystemen	40
8.1 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse	40
8.2 Bewertung der DIY-Abwurfsysteme	41
8.3 Vergleich mit kommerziellen Abwurfsystemen	41
8.4 Wirtschaftliche und praktische Betrachtung	42
8.5 Gesamteinordnung	42
9 Fazit und Ausblick	43
9.1 Fazit	43
9.2 Ausblick	44
Abbildungsverzeichnis	45
Tabellenverzeichnis	45
Literaturverzeichnis	46
Bücher	46
Wissenschaftliche Artikel	46
Richtlinien und technische Literatur	46
Hersteller- und Produktdokumentation	47
Software	47
Videoquellen	47
Druckquellen	48
Verwendete Komponenten	48

1 Einleitung

Die zunehmende Verbreitung und Entwicklung von unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) eröffnet neue Anwendungen und Entwicklungsfelder. Insbesondere in Bereichen wie Logistik, Landwirtschaft, Rettungseinsätzen und Forschung nehmen FPV-Drohnen (First Person View) immer mehr zu. Sie etablieren sich durch ihre Flexibilität und Manövrierbarkeit als nützliches Mittel, Aufgaben zu bewerkstelligen und Betreiber bei spezialisierten Anwendungen zu unterstützen.

Eine zentrale Herausforderung bei der Erweiterung der Funktionalität von Drohnen stellt der sichere und zuverlässige Transport von Lasten dar. Drop-Mechanismen spielen hierbei eine entscheidende Rolle, da sie den kontrollierten Abwurf von Objekten ermöglichen und somit den Einsatzbereich von Drohnen erheblich erweitern.

Die Entwicklung solcher Mechanismen erfordert die Berücksichtigung mehrerer technischer Aspekte, darunter Gewicht, Aerodynamik, Energieversorgung, Materialwahl und Zuverlässigkeit. Kommerzielle Lösungen sind zwar verfügbar, jedoch häufig kostenintensiv oder auf spezifische Dronentypen optimiert. Gleichzeitig existieren zahlreiche DIY-Ansätze, die eine kostengünstige und flexible Anpassung ermöglichen, jedoch hinsichtlich Sicherheit, Belastbarkeit und Reproduzierbarkeit nicht immer den Anforderungen professioneller Anwendungen genügen. Vor diesem Hintergrund sind eine systematische Untersuchung und Bewertung bestehender Lösungen sowie die Entwicklung eigener funktionsfähiger Prototypen von besonderem Interesse.

1.1 Motivation

Die wachsende technologische Vielfalte in der Moderne, sei es Künstliche Intelligenz oder die progressive Robotik, ist faszinierend und forschungswürdig. Die Motivation dieser Arbeit ist ein Zuwachs in der Relevanz von UAV-Systemen, sei es durch die Verwendung dieser in Krisengebieten, oder für effiziente Lieferungen von Alltagsgegenständen, wie es in manchen Ländern der Welt bereits üblich ist. Wir gehen auf eine Zukunft zu, in der Luftransport nicht nur unvermeidbar, sondern auch faszinierend ist.

Industrielle Drohnen verfügen bereits über integrierte Payload-Release-Systeme, aber im Bereich der FPV-Drohnen gibt es wenige standardisierte, zuverlässige und kosteneffiziente Lösungen. Dies stellt insbesondere Forschungseinrichtungen und Hobbyanwender vor technische und wirtschaftliche Herausforderungen.

Ein Drop-Mechanismus muss nicht nur ein geringes Gewicht und eine robuste Konstruktion aufweisen, sondern auch eine zuverlässige und reproduzierbare Auslösung gewährleisten, ohne die Flugstabilität der Drohne wesentlich zu beeinträchtigen. Die Entwicklung eines solchen Systems bietet die Möglichkeit, theoretische Kenntnisse aus den Bereichen Mechanik und Elektronik praktisch anzuwenden und kritisch zu evaluieren.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die systematische Untersuchung und Bewertung bestehender Drop-Mechanismen für FPV-Drohnen sowie die Entwicklung eigener funktionsfähiger Prototypen. Dabei werden sowohl kommerzielle als auch DIY-Ansätze hinsichtlich technischer Eigenschaften, Materialwahl, Fertigungstechniken, Kosten und Zuverlässigkeit analysiert.

Auf Grundlage dieser Analyse wird ein Drop-Mechanismus konzipiert, der folgende Anforderungen erfüllen soll:

- Sichere Halterung und kontrollierter Abwurf der Last bei möglichst geringer Beeinträchtigung der Flugstabilität.
- Geringes Gewicht und kompakte Bauform zur effizienten Nutzung der verfügbaren Nutzlast.
- Kompatibilität mit gängigen FPV-Flight-Controllern sowie ferngesteuerte Auslösung.
- Kosteneffiziente Herstellung unter Verwendung additiver Fertigungsverfahren.

Die entwickelten Mechanismen werden anschließend experimentell untersucht, um Aussagen über Belastbarkeit, Auslösezuverlässigkeit und Energieabhängigkeit zu ermöglichen. Die gewonnenen Ergebnisse werden abschließend mit bestehenden kommerziellen und DIY-Lösungen verglichen, um das Potenzial dieser Drop-Mechanismen zu bewerten.

2 Aufbau und Funktion von FPV-Drohnen

FPV-Drohnen (First Person View) gehören zur Gruppe der Multirotor-UAVs, in der Regel Quadrokopter. Im Unterschied zu GPS- bzw. Vollautomatisierten Drohnen, werden FPV-Drohnen direkt durch den Piloten gesteuert und sind auf hohe Agilität, direkte Steuerbarkeit und dynamische Flugmanöver ausgelegt, wodurch sie sich besonders für sportliche, experimentelle und spezialisierte Anwendungen eignen (Austin, 2010).

2.1 Zentrale Komponenten einer FPV-Drohne

Die Rahmen moderner FPV-Drohnen bestehen überwiegend aus Carbonfaser-Verbundwerkstoffen, da diese eine hohe Steifigkeit bei geringem Gewicht bieten. Die Konstruktion muss zudem mechanische Belastungen, beispielsweise bei Landungen oder Abstürzen, aufnehmen können. Vibrationen werden dabei vor allem durch die Rahmengeometrie, elastische Lagerungen der Elektronik sowie geeignete Materialstärken reduziert. Übliche Rahmengrößen werden anhand des maximalen Propellerdurchmessers klassifiziert und liegen typischerweise bei 3, 5 oder 7 Zoll (7,62 cm, 12,7 cm bzw. 17,78 cm) (Beard & McLain, 2012).

Für den Antrieb werden bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC) eingesetzt, die durch elektronische Kommutierung betrieben werden. Die Ansteuerung erfolgt über einen Electronic Speed Controller (ESC), welcher die Motorphasen mittels pulsweitenmodulierter Signale oder digitaler Protokolle ansteuert. Die Drehzahlregelung erfolgt dabei lastabhängig und hochdynamisch (Beard & McLain, 2012).

Ein ESC ist ein Mikrocontroller gesteuerter Regler, welcher die Motorphasenströme reguliert. Er wird benötigt, um einen FC in Betrieb zu nehmen.

Der Flight Controller (FC) bildet das zentrale Steuerelement der Drohne. Er kombiniert Sensorsdaten mehrerer Inertial Sensoren, insbesondere Gyroskop und Beschleunigungssensor, und verarbeitet diese in einem Regelkreis zur Stabilisierung der Fluglage. Die Regelung erfolgt typischerweise über PID-Algorithmen mit Regelraten im Bereich mehrerer hundert Hertz. Zusätzlich stellt der FC Schnittstellen zur Ansteuerung externer Komponenten wie Servos oder Drop-Mechanismen über AUX-Ausgänge bereit (Beard & McLain, 2012).

2.2 Signalübertragung

Für Drop-Mechanismen gibt es verschiedene Möglichkeiten für eine Signalübertragung. Diese Signale müssen über große Distanzen sowie bei eingeschränktem Sichtkontakt zuverlässig aufrechterhalten werden.

2.2.1 PWM-Signale

Diese Signale werden für die Steuerung von Servos eingesetzt. Standard-Servos verwenden eine 50Hz Wiederholungsrate mit einer Pulsweite von 1,0 – 2,0ms. Der Drehwinkel ist proportional zur Pulsweite (Bolton, 2003; Franklin et al., 2019).

2.2.2 DShot / Digitale Signale

DShot ist ein digitales Protokoll zur Motoransteuerung, das im Gegensatz zu PWM eine störungsresistente, serielle Datenübertragung ermöglicht. Da Servos üblicherweise analoge PWM-Signale benötigen, sind separate PWM-Ausgänge oder BEC-geregelte Spannungsversorgungen erforderlich (Quan, 2017).

2.2.3 Mögliche Probleme bei der Steuerung von Servos in FPV-Drohnen

Bei der Steuerung von Servos können verschiedene Probleme und Fehlstände auftreten. Durch irreguläre Spannungszufuhr kann der Drop-Mechanismus ungewollt frühzeitig ausgelöst werden. Das gleiche Problem kann durch Rauschen auf ESC-Leitungen auftreten. Durch Masseführung, sogenannte Ground-Loops, können Störungen auftreten. Zu hohe Stromzufuhr kann den BEC überlasten und den Servo unbrauchbar machen (O'Connor, 2019).

2.3 Belastung und Aerodynamische Grundlagen

Drop-Mechanismen beeinflussen das Flugverhalten einer Drohne nicht nur durch zusätzliches Gewicht, sondern auch durch veränderte aerodynamische Eigenschaften und Massenträgheit (Austin, 2010).

2.3.1 Verlagerung des Schwerpunktes

Für eine optimale Flugsteuerung muss der Schwerpunkt innerhalb des geometrischen Zentrums des Gestells liegen. Wird dies nicht eingehalten, kann dies den Motor asymmetrisch beladen und diesen bei anhaltender Belastung beschädigen. Auch führt dies zu erhöhtem Energieverbrauch, sowie einem instabilen Yaw-Verhalten (Austin, 2010; Beard & McLain, 2012).

2.3.2 Dynamischer Lastabwurf

Das Abwerfen von Masse hat verschiedene, kurzfristige Effekte zufolge. Unter anderem sind das die plötzliche Änderung der Trägheit, Yaw / Euler-Destabilisierung und ein kurzzeitiges

Überschwingen der PID-Regler. Studien des UAV-Transports demonstrieren, dass selbst geringe Änderung der Masse einen spürbaren Effekt verursachen kann (Qiao et al., 2018).

2.4 Materialanalyse

Drop-Mechanismen bestehen meist aus 3D-Gedruckten oder mit CNC geschnittenen Teilen. Viele Materialien können auch selbst geschnitten und gebastelt werden, was die Materialauswahl erschwert.

2.4.1 PLA (Polylactide)

PLA ist das derzeit am weitesten verbreitete Material für das 3D drucken. Ausschlaggebend hierfür sind die geringen Produktionskosten sowie die hohe Wiederverwendbarkeit des Materials. Es zeichnet sich aus durch seine hohe Steifigkeit, geringe Temperaturbeständigkeit (Verformung bereits bei ~55 °C) und einen geringen Schmelzpunkt (145 – 160°C) (Tymrak et al., 2014).

2.4.2 PETG (Polyethylenterephthalat)

PETG ist Thermoplastischer Kunststoff, welcher unter anderem für die Herstellung von Textilfaser verwendet wird. Er hat eine höhere Zähigkeit als PLA, eine gute Schichthaftung und moderate Temperaturbeständigkeit (80 – 90 °C) (Gibson et al., 2021).

2.4.3 Nylon

Nylon hat eine hohe Zähig- und Abriebfestigkeit und zeichnet sich durch die höchste Funktionssicherheit aller genannten Materialien aus. Es ist ideal für Haken und Bolzen, welche in einem Drop-Mechanismus benötigt werden (Gibson et al., 2021).

2.4.4 Fertigung aus Metall

Eine Fertigung aus Metall bringt ein stabiles Konstrukt im Gegenzug für ein erhöhtes Gewicht und größeren Preis. Aluminium eignet sich gut, da es einfach mithilfe einer CNC-Maschine in eine benötigte Form gefräst werden kann. Auch ist Aluminium einfacher als andere Metalle, wenn auch weniger beständig. Edelstahl bietet eine höhere Festigkeit, aber hat ein erhöhtes Gewicht, was es für die Verwendung mit Drohnen weniger brauchbar macht. Titan bietet ein sehr gutes Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht, ist jedoch aufgrund hoher Material- und Bearbeitungskosten nur eingeschränkt für kostensensitive Anwendungen geeignet (Schrader & Elshennawy, 2000).

2.5 Anfertigung und Technik

2.5.1 3D-Druck (FDM)

3D drucken ist zentral für das Entwickeln von höchst anpassbaren und individualisierbaren Systemen. Das Entwerfen von digitalen 3D Modellen ermöglicht es, Baufehler mit geringem Aufwand auszugleichen und Produkte zu reproduzieren.

Tabelle 1 Wichtige Parameter des 3D-Drucks

Parameter	Einfluss
Layerhöhe	Oberflächenqualität
Infill	Statische Festigkeit
Druckrichtung	Layerhaftung, Bruchstelle
Düsentemperatur	Schichthaftung
Support	Stütze zur Druckstabilisierung

(Gibson et al., 2021; Tymrak et al., 2014)

2.5.2 SLA-Druck (Stereo-Lithography)

SLA-Druck ist ein Verfahren, bei welchem schichtweise flüssiges Photopolymerharz aufgetragen und mit einem ultravioletten Laser verhärtet wird. Dies ermöglicht das Erstellen von dreidimensionalen Objekten jeder Form, aber funktioniert nur mit vergleichsweise bruchempfindlichem Material. Dies macht es unbrauchbar für starke mechanische Kräfte (Berman, 2012).

2.5.3 CNC-Manufaktur

CNC-Manufaktur ist die maßgeschneiderte Anfertigung von Metallkonstruktionen. Hier wird mit hoher Präzision vollautomatisiert Metall zurechtgeschnitten, gedrückt und mit Lasern bearbeitet. Der Aufwand und die Kosten sind enorm, insbesondere im Vergleich zum 3D-Druck (Schrader & Elshennawy, 2000).

2.6 Grundlagen zur Sicherheit

Drop-Mechanismen, die im öffentlichen oder kommerziellen Umfeld eingesetzt werden, müssen erhöhte Zuverlässigkeit- und Sicherheitsanforderungen erfüllen.

2.6.1 Failsafe

Der Transport von Objekten mit Drohnen kann Mitmenschen gefährden. Es können verschiedene Vorkehrungen für den reibungslosen Transport getroffen werden.

Beispielsweise können mechanische Haken zur zusätzlichen Absicherung der Ladung befestigt werden. Dies verhindert, dass die Ladung unabsichtlich abgeworfen wird. Weiterhin sollten

die Transportkonstruktion, sowie die Drohne selbst mit Sicherheitsbolzen versehen werden. Während des Fluges sollte bei Sichtverlust mit der Drohne konstant elektrische Überwachung gewährleistet sein. Selbstverständlich hilft es auch, keine scharfen Mechanismen oder Ladungen zu verwenden (FAA, 2021).

2.6.2 Vermeidung von Zuverlässigkeitsproblemen bei Servos

Servos sollten regelmäßig Sicherheitschecks durchlaufen. Typische Probleme sind blockierte Mechanismen durch Schmutz oder Verschleiß, Unterspannung oder auch Überhitzung. Servos sollten auch nicht überlastet werden, da dies zu einem Ausfall der Funktion führen kann (O'Connor, 2019).

2.6.3 Zuverlässigkeit von 3D-Druck Teilen

Die Haftung zwischen verschiedenen Schichten ist ausschlaggebend für die Qualität und Langlebigkeit der produzierten Teile. Sollten während des Druckvorgangs Schwierigkeiten auftreten, oder ist das entwickelte Modell nicht in sich schlüssig, so stellt dies einen Risikofaktor dar. Weiterhin müssen individuelle Bauteile zyklisch getestet werden, um den Ausfall von einzelnen Elementen zu verhindern (Tymrak et al., 2014; Gibson et al., 2021).

3 Marktanalyse und bestehende Lösungsansätze

Dieses Kapitel analysiert bestehende Drop-Mechanismen auf dem aktuellen Markt und berücksichtigt sowohl kommerzielle als auch DIY-Konstruktionen. Neben einer qualitativen Einordnung werden, soweit verfügbar, technische Komplexität, Preisstruktur, Zuverlässigkeit, verwendete Materialien, Fertigungstechniken sowie funktionale Eigenschaften der jeweiligen Lösungen betrachtet. Ziel ist es, einen strukturierten Überblick über den Stand der Technik zu geben und bestehende Lösungsansätze kritisch einzuordnen. Links zu allen im Folgenden analysierten Produkten befinden sich bei der Hersteller- und Produktdokumentation am Ende der Arbeit.

3.1 Beispiele für kommerzielle Drop-Mechanismen

3.1.1 Foxtech

Tabelle 2 Doxtech RDD-M / RDD-Series Payload Dropper Daten

Material	Gewicht	Nutzlast	Stromvers.	Steuerung	Preis
Aluminium / Leichte Me- talle	300 - 500 g	2 - 10kg	24V	PWM	600 - 1200 €

Die Foxtech RDD-Serie beinhaltet mehrere Nutzlast-Dropper, die auf industriellen und professionellen UAV-Plattformen eingesetzt werden können. Die Systeme bieten robuste mechanische Haken oder Mechanismen, welche für große Nutzlasten geeignet sind. Ein Beispiel hierfür ist das Foxtech RDD-M Payload Release and Drop Device, welches Lasten bis zu 10kg transportieren kann. Laut Produktseite besteht dieses aus Kohlefaser und Luftfahrtaluminium, wodurch das geringe Gewicht und die hohe Festigkeit erreicht werden. Die Steuerung kann sowohl unabhängig als auch über ein PWM-Signal des Flugcontrollers erfolgen.

Mögliche Anwendungsgebiete für solche Systeme sind Notfallversorgung, logistische Lieferungen oder wissenschaftliche Nutzlastfreigabe.

3.1.2 Skydroid

Tabelle 3 Skydroid Drop-Mechanismus Daten

Material	Gewicht	Nutzlast	Stromvers.	Steuerung	Preis
Metall / Kunststoff	40g	2kg pro Kanal	4,5-5,5V	PWM	59,90€

Der Skydroid Drop-Mechanismus ist ein universell nutzbares System, welches für Hobbydrohnen und Multikopter konzipiert wurde. Es ist robust gebaut und verfügt über zwei Haken, welche individuell Lasten abwerfen können. Dies erhöht die Flexibilität bei verschiedenen Einsatzszenarien.

Mit einem Gewicht von 40g wird die Flugperformance nicht signifikant beeinflusst und bei einer Tragkraft von 2kg lässt sich das System nicht nur im Hobbybereich, sondern auch professionell nutzen. Die Steuerung erfolgt über standardisierte PMW-Signale, wodurch keine spezielle Elektronik oder Software auf der Drohne selbst erforderlich ist.

3.1.3 DJI

Diese Systeme sind nicht primär für FPV-Drohnen vorgesehen, werden jedoch im professionellen UAV-Sektor als Referenz für Zuverlässigkeit und Sicherheitskonzepte betrachtet.

Tabelle 4 DJI Mavic 4 (Sky Hook) Daten

Material	Gewicht	Nutzlast	Stromvers.	Steuerung	Preis
ABS / Kunststoff / leichte Metalle	50 - 150g	Empfohlen bis zu 800g	5V	DJI RC-Signale / mechanisch	250 - 350€

DJI-Payload-Release-Systeme sind in das DJI-Ökosystem integriert und werden softwareseitig oder sensorbasiert ausgelöst, ohne den Einsatz externer Servomotoren. Die Auslösung erfolgt häufig über Flugzustände oder Kamerafunktionen, was eine hohe Integrationsdichte, jedoch eine geringe Flexibilität außerhalb des DJI-Systems bedeutet. Der große Vorteil bei dem Kauf solcher professionellen Systeme, ist die Integration ohne Modifikation der Drohne. So lässt beispielsweise das Abwurfsystem „Sky Hook“ am Unterboden der Drohne ohne die Nutzung von Werkzeug befestigen.

Die tatsächliche Nutzlast hängt stark vom Dronentyp, Wind, Höhe und Flugzustand ab. Die Preise variieren stark nach Modell, Version und Händler.

3.1.4 Amazon & Aliexpress

Tabelle 5 Drop-Mechanismen Amazon und Aliexpress Daten

	Material	Gewicht	Nutzlast	Stromvers.	Steuerung	Preis
FPV Drone Airdrop (Aliexpress)	Kunststoff / Metall Servo	15 - 25g	200g	3 - 7,2V	PWM / RC	23,19€
VGEBY Drone Launcher (Amazon)	Kunststoff / Metallbauteile	80 - 120g	800g	5V	PWM / Radio	44,16€

Universelle Drop-Mechanismen über Plattformen wie Amazon oder Aliexpress sind in der Regel Servo basiert und lassen sich meistens über einen Flugcontroller oder eine Fernsteuerung auslösen. Diese Systeme bestehen meist aus Kunststoff oder Aluminium und eignen sich durch ihre einfache Integration ideal für Hobbyanwendern und FPV-Piloten.

Die Systeme zeigen eine geringe Nutzlasttragfähigkeit und Robustheit, zeichnen sich aber durch ein geringes Gewicht und einen vergleichsweise geringen Preis aus.

3.1.5 Markttrends

Studien zeigen, dass Drop-Systeme vor allem in den Bereichen Landwirtschaft, Rettungs- und Katastrophenschutz, Logistikprototypen sowie in der Forschung, beispielsweise für den Abwurf von Sensoren, eingesetzt werden (Austin, 2010)

3.2 DIY-Drop-Mechanismen

Im DIY-Bereich existiert eine Vielzahl frei verfügbarer Drop-Mechanismen, die von Online-Communities entwickelt und veröffentlicht werden. Plattformen wie Thingiverse, Printables oder MyMiniFactory stellen zahlreiche Konstruktionsdateien bereit, während auf GitHub ergänzend elektronische Steuerungslösungen dokumentiert sind.

Diese Ansätze zeichnen sich durch geringe Kosten und hohe Anpassungsfähigkeit aus, weisen jedoch häufig Defizite hinsichtlich mechanischer Belastbarkeit und Langzeitzuverlässigkeit auf.

3.2.1 Servo gesteuerte Mechanismen

Benötigte Bauteile:

- SG90 / MG90S-Servo
- 3D-Haken / Befestigung
- Befestigungsplatte
- Passende Schrauben

Servo gesteuerte Drop-Mechanismen stellen die am häufigsten verwendete DIY-Lösung dar. Sie lassen sich mit geringem Materialaufwand realisieren und bieten eine einfache Integration in bestehende FPV-Systeme. Bei fehlender Verfügbarkeit eines 3D-Druckers können einfache mechanische Komponenten auch aus Holz oder Kunststoff gefertigt werden, wobei jedoch erhöhte Sicherheitsanforderungen hinsichtlich Stabilität und Entflammbarkeit zu beachten sind (Tymrak et al., 2014).

3.2.2 Magnetische Abwurfmechanismen

Benötigte Bauteile:

- Magnet
- Stahlschlaufe
- Mini-Servo zur magnetischen Trennung

Magnetische Abwurfmechanismen nutzen Permanentmagnete zur Fixierung der Nutzlast. Die Auslösung erfolgt meist durch mechanische Trennung mittels Servo oder durch elektromagnetische Abschaltung. Diese Systeme sind jedoch empfindlich gegenüber Vibrationen und bieten nur eine begrenzte Haltekraft.

3.3 Vergleich kommerziell & DIY

3.3.1 Materialvergleich

Tabelle 6 verwendetes Material von kommerziellen und DIY Drop-Mechanismen

Kommerziell	DIY
- Aluminium - ABS / Polyamid - Edelstahlbolzen	- PLA - PETG - TPU - Nylon

Kommerzielle Drop-Mechanismen verwenden überwiegend Aluminium, ABS oder Polyamid, häufig ergänzt durch Edelstahlbolzen zur Erhöhung der mechanischen Belastbarkeit.

DIY-Systeme greifen hingegen primär auf thermoplastische Kunststoffe wie PLA, PETG, TPU oder Nylon zurück, die im 3D-Druck leicht verarbeitbar sind. Diese Materialien ermöglichen ein geringes Gewicht und niedrige Kosten, weisen jedoch eine reduzierte strukturelle Festigkeit auf (Gibson et al., 2021).

3.3.2 Anfertigungstechniken

Kommerzielle Systeme werden überwiegend mittels CNC-Fertigung oder Spritzguss hergestellt. Während CNC-Verfahren hohe Präzision und Festigkeit ermöglichen, sind sie mit erhöhtem Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Spritzguss erlaubt eine kostengünstige Serienfertigung bei hoher Reproduzierbarkeit.

DIY-Systeme werden meist mittels FDM- oder SLA-3D-Druck gefertigt. Diese Verfahren ermöglichen eine hohe Designfreiheit, sind jedoch hinsichtlich Materialeigenschaften und Langzeitzuverlässigkeit limitiert. Insbesondere minderwertige Materialien oder ungünstige Druckparameter können zu strukturellen Schwächen führen (Berman, 2012; Tymrak et al. 2014).

4 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt das methodische Vorgehen der vorliegenden Arbeit. Ziel ist es, die Auswahl bestehender Drop-Mechanismen sowie die Durchführung der experimentellen Untersuchungen transparent und nachvollziehbar darzustellen. Dabei werden sowohl die Kriterien zur Identifikation und Kategorisierung bestehender Lösungen als auch der Ansatz zur Entwicklung eigener Drop-Mechanismen erläutert.

Die Methodik basiert auf einer Kombination aus Literatur- und Marktanalyse, konstruktiver Entwicklung sowie experimenteller Evaluation. Dadurch wird ein sowohl theoretisch fundierter als auch praxisnaher Untersuchungsrahmen geschaffen.

4.1 Auswahl und Analyse bestehender Drop-Mechanismen

Die Auswahl der untersuchten Drop-Mechanismen erfolgte auf Grundlage einer systematischen Markt- und Literaturrecherche. Berücksichtigt wurden sowohl kommerzielle Produkte als auch frei verfügbare DIY-Konstruktionen. Maßgebliche Auswahlkriterien waren die Eignung für FPV-Drohnen, die technische Umsetzbarkeit, die Verfügbarkeit von technischen Spezifikationen sowie die Relevanz im Hobby- und Forschungsbereich.

Die identifizierten Mechanismen wurden hinsichtlich ihrer Konstruktionsprinzipien, verwendeten Materialien, Fertigungstechniken, Masse, maximalen Nutzlast sowie ihrer Auslösemechanismen kategorisiert. Diese Analyse bildet die Grundlage für den Vergleich kommerzieller und DIY-basierter Lösungsansätze in den nachfolgenden Kapiteln.

4.2 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung eigener Mechanismen

Die Entwicklung eigener Drop-Mechanismen erfolgte iterativ auf Basis der in Kapitel 3 identifizierten Lösungsansätze. Ziel war es, zentrale Konstruktionsprinzipien kommerzieller und DIY-Systeme aufzugreifen und unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen von FPV-Drohnen weiterzuentwickeln.

Die Konstruktion umfasste die Auswahl geeigneter Materialien, die Auslegung der mechanischen Komponenten sowie die Integration der elektrischen Ansteuerung. Die Fertigung der Prototypen erfolgte mittels additiver Fertigungsverfahren, wodurch eine schnelle Anpassung und Optimierung der Konstruktion ermöglicht wurde.

4.3 Experimentelle Untersuchungsmethodik

Die experimentelle Evaluation der entwickelten und ausgewählten Drop-Mechanismen erfolgte anhand definierter Testkriterien, die in Kapitel 7 detailliert beschrieben werden. Im Fokus standen dabei die Auslösezuverlässigkeit, die mechanische Belastbarkeit sowie der Einfluss der Mechanismen auf das Flugverhalten der Drohne.

Die Versuche wurden unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt, um eine vergleichbare Bewertung der verschiedenen Lösungsansätze zu ermöglichen. Die gewonnenen Messergebnisse dienen als Grundlage für die Ergebnisdarstellung in Kapitel 7 sowie für den abschließenden Vergleich zwischen DIY- und kommerziellen Systemen.

5 Entscheidungskriterien und Basisaufbau (Flight Controller)

In diesem Kapitel wird die vollständige Entwicklung und Konstruktion eines DIY-Drop-Mechanismus beschrieben. Dies beinhaltet die Recherche, Auswahl eines Mechanismus und Fertigung mittels 3D-Druck sowie der Anbindung zu einem Flight-Controller.

5.1 Anforderungen

Durch die Analyse aus Kapitel 2 ergeben sich folgende Anforderungen:

- Sichere Halterung der Last während aller Betriebszustände
- Kontrollierter und ferngesteuerter Abwurf: Die Auslösung erfolgt ferngesteuert über einen Flight Controller, welcher an einen Empfänger angeschlossen ist
- Redundanzarme Mechanik: Konstruktion mit möglichst wenig beweglichen Teilen zur Erhöhung der Ausfallsicherheit

Einige nicht funktionale Anforderungen, welche zu beachten sind:

- Geringes Gesamtgewicht zur Minimierung der Beeinflussung der Flugdynamik
- Fertigung mittels additiver Herstellungsverfahren ohne komplexe Stützstrukturen
- Geringe Material- und Fertigungskosten
- Mechanische und elektrische Kompatibilität mit gängigen FPV-Flight-Controllern

5.2 Konzeptentwicklung

Basierend auf den ermittelten Anforderungen, wurden Konzeptvarianten mit Servos als auch Magentischen Mechanismen in Betracht gezogen. Durch die Verfügbarkeit eines 3D-Druckers und der Möglichkeit, verschiedene Designs durch eine ähnliche Konstruktion miteinander zu vergleichen, sind die Servo-Mechanismen die praktikablere Lösung. Bei der Nutzung eines Magneten muss entweder die Last magnetisch sein, oder es müssen zusätzliche magnetische Komponenten beigelegt werden, welche das Gesamtgewicht erhöhen. Auch ist ein Servo-System weniger eingeschränkt, was die äußeren Umstände wie Hitze und seitliche Zugkraft angeht.

5.3 Untersuchung nach fertigungsgerechter Gestaltung

Die Auswahl der Servo-Mechanismen erfolgte nach Minimierung der Anzahl von Druckteilen zugunsten höherer Festigkeit und kompakter Bauform. Ziel war es, die mechanische Festigkeit als auch die Zuverlässigkeit der Konstruktion zu erhöhen.

Besonderes Augenmerk lag auf einer kompakten Bauform sowie der Möglichkeit den Mechanismus an einem FPV-Rahmen zu befestigen. Hierzu müssen eine stabile Lage des Servos als auch ein geeignet positionierter Auslösehebel gewährleistet sein.

5.4 Materialauswahl

Für die Fertigung der mechanischen Komponenten wurde PLA als primäres Material gewählt. Ausschlaggebend hierfür waren die gute Verfügbarkeit, die einfache Verarbeitbarkeit im FDM-Druckverfahren sowie die ausreichende Steifigkeit für die vorgesehenen Belastungen.

Obwohl Materialien wie ABS oder Nylon eine höhere Belastbarkeit aufweisen, wurden diese aufgrund höherer Druckanforderungen, erhöhter Kosten und eingeschränkter Druckerkompa-

tibilität nicht verwendet. Die Eignung von PLA für die entwickelten Prototypen wurde im Rahmen der experimentellen Untersuchungen in Kapitel 7 überprüft (Tymrak et al., 2014, Gibson et al., 2021).

5.5 Elektrische Konstruktion (Flight Controller)

Die Steuerung des Drop-Mechanismus muss vollständig distanzgesteuert erfolgen. Hierfür wurden eine ELRS-Fernsteuerung und einen 2.4GHz ELRS-Empfänger verwendet, sodass auch über hohe Distanz die Drohne beziehungsweise der Drop-Mechanismus gesteuert werden könnte.

Tabelle 7 Benötigte Teile für die Inbetriebnahme eines Flight Controllers

	Kosten	Funktion
SpeedyBee F7 V3 FPV Flight Controller	94,90€	Der Flight Controller ist die Logik-Komponente für alle Hauptfunktionen der Drohne. Wir nutzen ihn für das Auslösen des Servos und die Signalübertragung.
SpeedyBee F7 V3 BL32 50A 4-in-1 ESC	53,61€	Der ESC wird für unseren Zweck nur benötigt, um den Flight Controller mit Strom zu versorgen.
Zeee 3S LiPo Battery 5200 mAh 11.1 V 80C with XT60	35,99€	Versorgt den ESC und somit unseren Flight Controller mit Strom.
XT60 Adapter-Kabel	10,99€	Wird benötigt, um die LiPo Batterie und den ESC zu löten.
Radiomaster XR2 Nano 2.4GHz ELRS-Empfänger	12,99€	Empfängt das Signal des Controllers und leitet dieses an den FC weiter.
Radiomaster Pocket CRUSH ELRS FPV Fernsteuerung	81,90€	Steuert über den Empfänger den FC.
Lötkolben-Set	21,88€ (am 17.12.2025 nicht mehr verfügbar)	Wird benötigt, um Kabel zum FC oder ESC zu löten. Wurde auch verwendet, um Kabel miteinander zu verbinden.

Es ist möglich für die Konstruktion von Drop-Mechanismen auf den ESC zu verzichten. Jedoch erschwert dies die regulierte Stromzufuhr, da man eine Batterie direkt an ein 5V-Pad anschließen müsste und dann auch nur alle 5V-Pads verwendbar wären. Es ist nicht möglich die Drop-Mechanismen über eine USB zu USB-C Verbindung laufen zu lassen, da diese Zufuhr keinen Strom an die Pads weitergibt. Der USB-C Anschluss ist für die Softwareeinstellungen (Betaflight Configurator) gedacht.

Für die benötigte Stromzufuhr wird ein XT60 Adapter-Kabel an den SpeedyBee ESC gelötet. Sollte man die gesamte Drohne bauen wollen, so ist es empfehlenswert, einen 35V Kondensator zur Spannungsglättung mit anzubringen. Der ESC wird über die beigefügten Kabel an den Flight-Controller angeschlossen.

Der ELRS-Empfänger wird über die vier mitgelieferten Kabel mit dem Flight-Controller verbunden und gelötet. Ein beliebiges 5V-Pad des Flight-Controllers kann verwendet werden. Zu beachten ist, dass der Receiver Anschluss des Empfängers mit dem Transmitter Anschluss des Flight-Controllers verbunden wird und umgekehrt. Sonst kann kein Signal Empfangen werden.

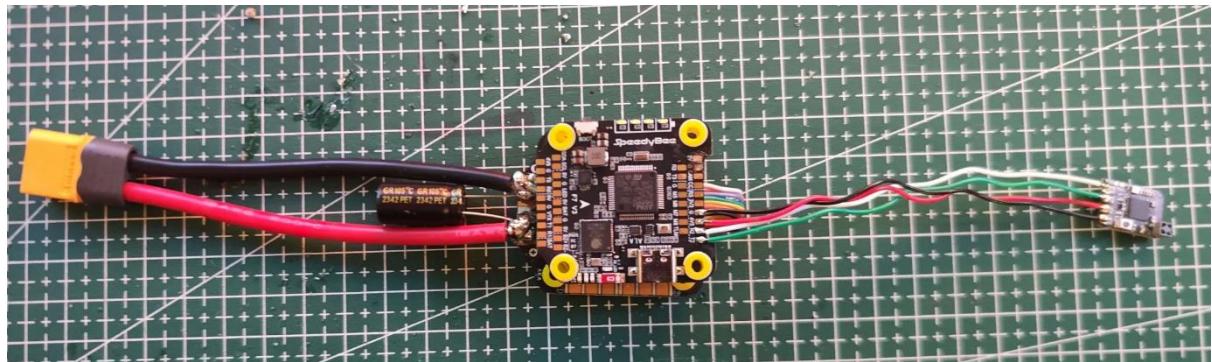


Abbildung 1 Gelöteter ESC, Flight Controller und Empfänger

Wenn der Controller und Empfänger richtig eingestellt sind, dann kann über SYS -> Express-LRS eine Verbindung hergestellt werden. Sollte innerhalb von einer Minute keine Verbindung hergestellt werden, so geht der Empfänger in einen W-LAN Modus, in welchem man die Software anpassen kann. Dementsprechend sollte der Controller bereits laufen, bevor man den Flight-Controller mit Strom versorgt, um sich rechtzeitig verbinden zu können. Sollte dennoch keine Verbindung hergestellt werden können, muss möglicherweise der Empfänger-Modus angepasst werden (siehe Kapitel 5.6.1).

Abschließend wird eine Lipo-Batterie an das XT60 Adapter-Kabel angeschlossen und der Flight-Controller kann per USB-C Kabel mithilfe von der Betaflight-Software konfiguriert werden.

5.6 Betaflight Einstellungen

Nicht jeder Flight Controller verfügt über dedizierte Servo-Ausgänge, und auch nicht jede Firmware-Version unterstützt die direkte Konfiguration von Servos. Im vorliegenden Aufbau bietet der verwendete SpeedyBee F7 V3 entsprechende Funktionalitäten.

Die auf dem Flight Controller vorinstallierte Betaflight-Version 3.4 enthält jedoch keine integrierten Servo-Einstellungen. Eine Aktualisierung auf eine neuere Firmware-Version wurde bewusst vermieden, da dies zu Inkompatibilitäten oder Hardwareproblemen führen kann. Aus diesem Grund wurde die bestehende Softwareumgebung beibehalten und entsprechend konfiguriert.

5.6.1 Betaflight UI und Empfänger

Nach dem Verbinden des Flight Controllers mit einem PC werden in der Betaflight-Benutzeroberfläche detaillierte Systeminformationen angezeigt. Hierzu zählen unter anderem die aktuelle Akkusspannung, die geschätzte Kapazität sowie der Stromverbrauch der angeschlossenen Komponenten.

Im Reiter „Empfänger“ wird der Empfängermodus auf „Seriell (via UART)“ eingestellt und das Protokoll „CRSF“ für serielle Empfänger ausgewählt. Alle weiteren Parameter verbleiben in der Standardkonfiguration. Zusätzlich muss im Reiter „Anschlüsse / Serielle Schnittstellen“ der entsprechende UART-Port als serieller Empfänger definiert werden.

Wird der Empfänger beispielsweise an die Pads R1 und T1 des Flight Controllers angeschlossen, ist UART1 zu verwenden; bei R2 und T2 entsprechend UART2. Nach erfolgreicher Konfiguration lassen sich im Reiter „Empfänger“ die Eingaben der Fernsteuerung in Echtzeit auslesen (Betaflight, 2025).

5.6.2 Betaflight Servo-Einstellung

Für den Betrieb eines Servos werden eine 5V-Versorgung, eine Masseverbindung sowie ein Signalausgang benötigt. In FPV-Systemen wird hierfür häufig das LED-Pad verwendet, da es

ein geeignetes Steuersignal bereitstellt. Alternativ können ungenutzte Motor-Pads (M4–M8) als Servo-Ausgänge umkonfiguriert werden.

Im vorliegenden Aufbau wurde das Motor-Pad M5 verwendet. Die Umkonfiguration erfolgt über die Kommandozeile der Betaflight-Software. Zunächst wird die bestehende Ressourcenzuweisung des Motor-Pads entfernt. Anschließend wird das entsprechende Pad als Servo-Ausgang deklariert.

Nach dem Speichern der Konfiguration und einem erneuten Verbindungsaufbau kann die erfolgreiche Umstellung durch Abfrage der Ressourcen überprüft werden. Das zuvor genutzte Motor-Pad erscheint nun als Servo-Ausgang.

5.6.3 Servo Steuerung

Nach erfolgreicher Konfiguration der Servo-Ausgänge kann die Steuerung über die Fernbedienung erfolgen. Der verwendete Radiomaster Pocket ermöglicht es, im Menü „MDL → Mixes“ einzelnen Tasten spezifische Ausgangssignale zuzuweisen.

Die Zuordnung der Steuerkanäle lässt sich in der Betaflight-Software im Reiter „Empfänger“ überprüfen. Eine Bewegung der entsprechenden Anzeige bestätigt, dass ein Eingangssignal empfangen wird.

Soll beispielsweise der Eingang „AUX 1“ zur Steuerung des Servos verwendet werden, wird im Reiter „Servos“ für den konfigurierten Servo-Ausgang die entsprechende Option aktiviert. Anschließend reagiert der Servo auf die definierte Taste der Fernsteuerung. In diesem Menü können zudem minimale, maximale und neutrale Stellwerte festgelegt werden, wodurch sich unterschiedliche Startpositionen und Bewegungsradien realisieren lassen.

5.7 3D-Druck

Die mechanischen Komponenten der Drop-Mechanismen wurden mittels additiver Fertigung hergestellt. Als Material wurde PLA gewählt, da es eine gute Verarbeitbarkeit, geringe Kosten und eine ausreichende mechanische Festigkeit für die vorgesehenen Belastungen bietet. Materialien wie ABS weisen zwar eine höhere Temperaturbeständigkeit auf, erfordern jedoch höhere Drucktemperaturen und sind nicht mit allen 3D-Druckern kompatibel.

Für den Druck wurde der 3D-Drucker Anycubic Kobra S1 in Kombination mit der Software Anycubic Slicer Next verwendet. Der Druck erfolgte nach dem FDM-Verfahren (Fused Depo-

sition Modeling). Dabei werden die digitalen 3D-Modelle mithilfe der Slicer-Software in maschinenlesbare Druckdateien umgewandelt, welche die Druckpfade, Schichtabfolge sowie die Druckdauer definieren.

Um die Druckzeit zu reduzieren, wurden einzelne Bauteile in der Slicer-Software so positioniert, dass sie parallel gefertigt werden konnten, ohne sich zu berühren. Dies ist möglich, da der schichtweise Aufbau von unten nach oben erfolgt und vom Slicer entsprechend berücksichtigt wird.

Die gewählte Schichthöhe betrug 0,08 mm, wobei für die erste Schicht eine erhöhte Schichthöhe von 0,2 mm verwendet wurde, um die Haftung auf dem Druckbett zu verbessern. Die Linienbreite lag bei 0,42 mm und wurde für die erste Schicht auf 0,5 mm erhöht.

Bei Bedarf wurde die automatische Generierung von Stützstrukturen eingesetzt. Die verwendete Software bietet sowohl eine automatische Erkennung kritischer Überhänge als auch die Möglichkeit, Stützbereiche manuell zu definieren. Diese Funktion wurde genutzt, da bei einzelnen Bauteilen konstruktionsbedingt minimale Überhänge vorhanden waren.

6 Konstruktion von Drop-Mechanismen

6.1 DJI Phantom Drop Maze (nosbigxam, 2016)

Um den Nutzen Servo gesteuerter Drop-Mechanismen besser analysieren und einordnen zu können, wurde zunächst ein besonders einfacher Mechanismus untersucht, der vollständig ohne Elektronik auskommt. Hierbei handelt es sich um eine labyrinthartige Konstruktion, die im 3D-Druck gefertigt wurde.

Der Mechanismus funktioniert durch das Anbringen einer Schlaufe oder eines Hakens an der Last, welcher durch gezielte Flugbewegungen der Drohne durch das Labyrinth geführt wird. Je nach Anwendungsfall kann dieser Mechanismus ausreichend sein, da während eines normalen Fluges die für eine Auslösung erforderlichen schwenkenden Bewegungen nicht unbeabsichtigt auftreten.

Nach dem Druck wird empfohlen, die Kanten des Labyrinths zu glätten, um ein gleichmäßiges Gleiten des Hakens entlang der vorgesehenen Bahn zu ermöglichen. Die Befestigung des Mechanismus an der Drohne kann mithilfe von Kabelbindern und Heißkleber erfolgen.

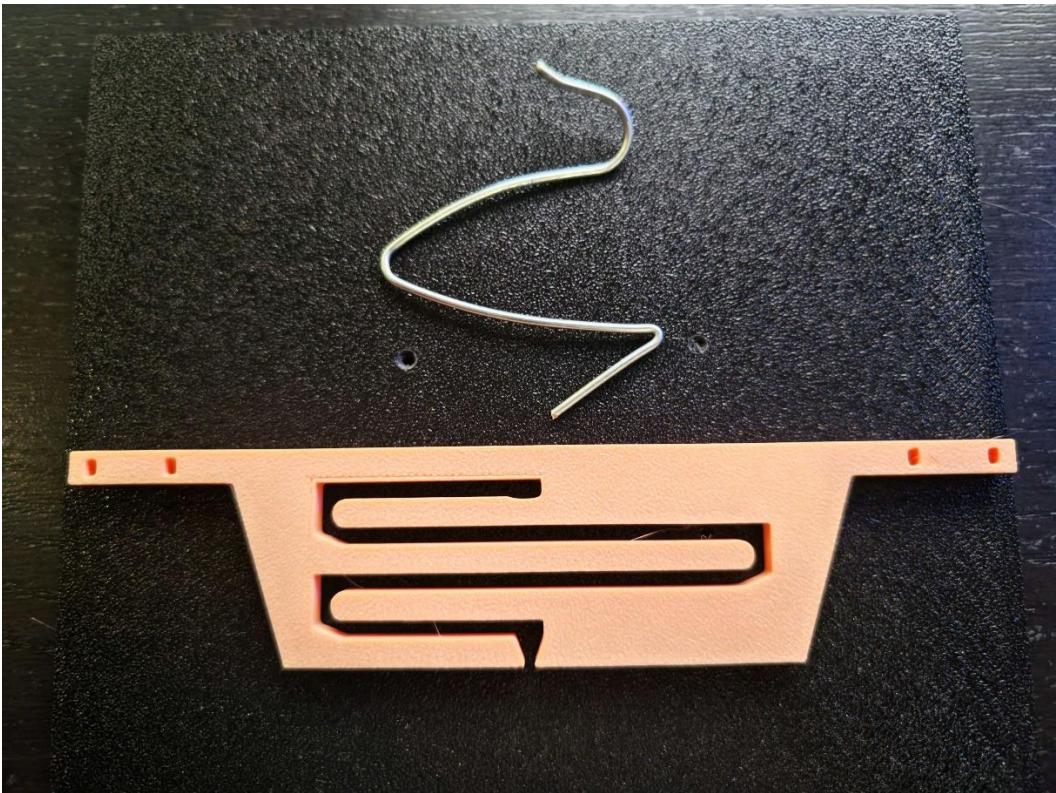


Abbildung 2 Phantom Maze Drop-Mechanismus mit Haken

6.2 Einfacher RC Servo Release Drop-Mechanismus (Thingyverser, 2015)

Dieser Drop-Mechanismus besteht aus einer einfachen Trägerplatte mit einer integrierten Halterung für einen Mikro-Servo. Der Servo betätigt ein Stück Draht, das als Auslösemechanismus fungiert. An diesem Draht können Haken, Seile oder flexible Behältnisse befestigt werden, welche durch das Zurückziehen des Drahtes freigegeben und abgeworfen werden.

Die Montage des Mechanismus erfolgt über vier Bohrungen in der Grundplatte. Das vorliegende Design wurde speziell für einen 450er Quadcopter ausgelegt, kann jedoch durch Anpassung der Bohrungsabstände problemlos auf andere Dronentypen übertragen werden.

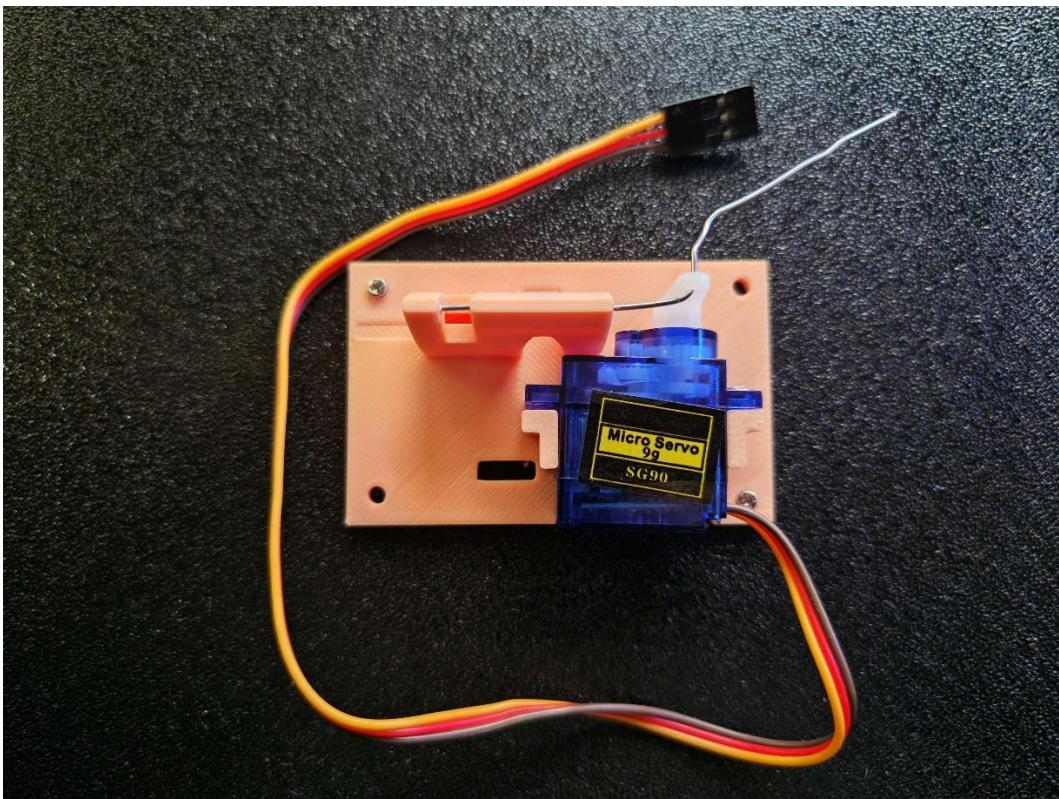


Abbildung 3 Einfacher Drop-Mechanismus mit Servo

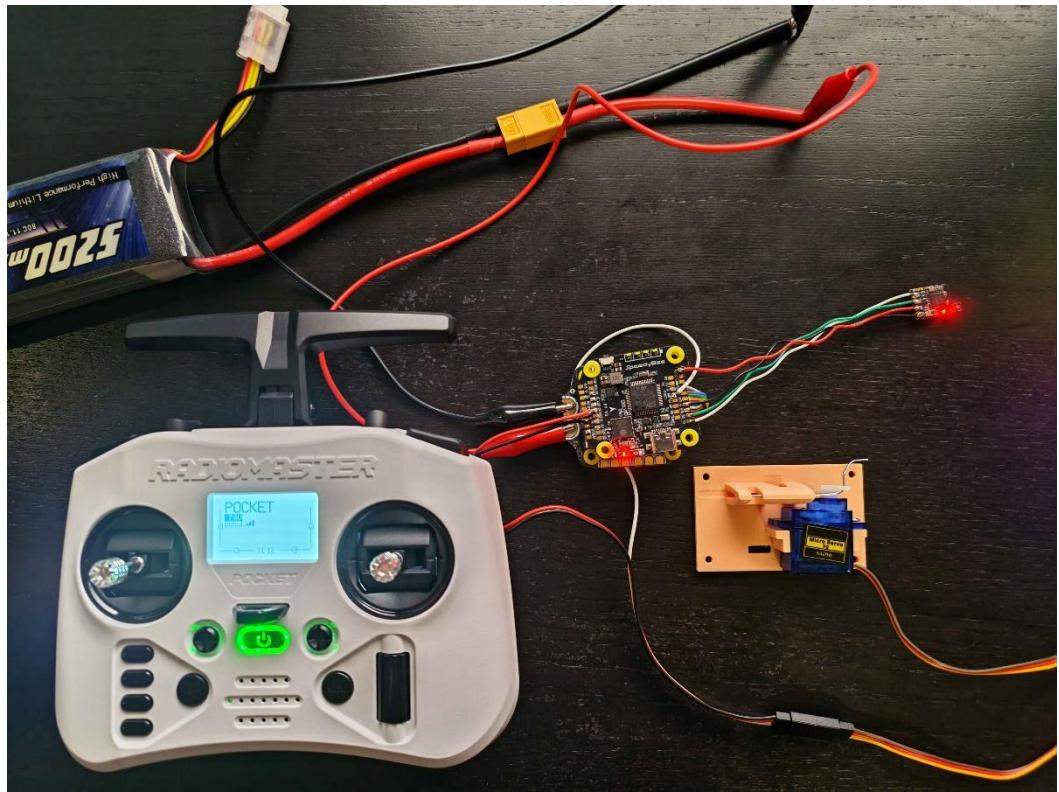


Abbildung 4 Beispiel für einen vollständigen Testaufbau

6.3 Multi Servo Drop (alperssl, 2017)

Der Multi-Servo-Drop-Mechanismus basiert auf einem ähnlichen Grundprinzip wie der einfache Servo-Release-Mechanismus, erweitert dieses jedoch um die Möglichkeit, mehrere Objekte selektiv abzuwerfen. Hierfür wurde eine spezielle Halterung für einen Servo entworfen, der einen Draht oder ein vergleichbares Element bewegt, an dem mehrere Haken befestigt sind.

Durch eine gezielte Steuerung des Servos kann bestimmt werden, wie viele der befestigten Objekte freigegeben werden. Insgesamt können bis zu vier Haken angebracht werden, was eine sequenzielle Abwurfstrategie ermöglicht.

Die Trägerplatte verfügt über zwei Bohrungen zur Befestigung des Mechanismus mittels Schrauben. Eine dieser Bohrungen befindet sich hinter der Servo-Halterung, weshalb der Servo erst nach der Montage des Grundkörpers an der Drohne eingesetzt werden muss. Die Abmessungen und Bohrungspositionen wurden passend für ein F450-Frame ausgelegt.

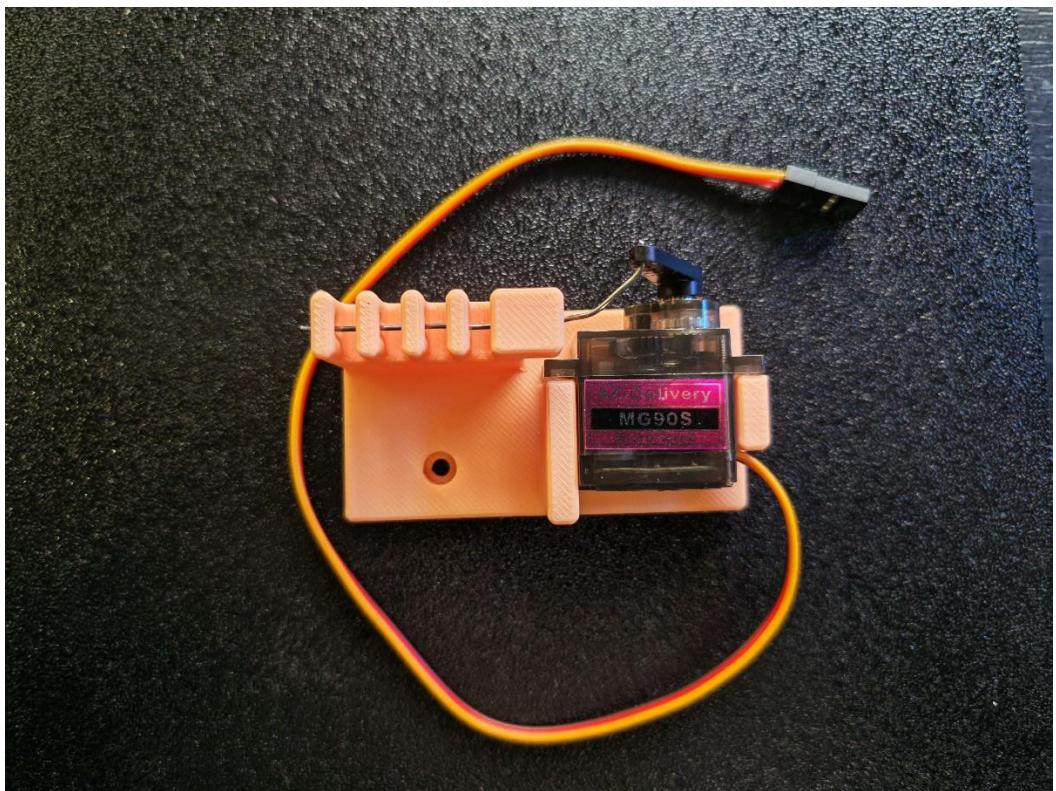


Abbildung 5 Multi Drop-Mechanismus mit Servo

6.4 Servo Fracht Dropper (chefotm, 2023)

Der Servo-Fracht-Dropper stellt einen geschlossenen Drop-Mechanismus dar, der den vollständigen Einschluss der transportierten Ladung ermöglicht. Die Konstruktion besteht aus einem kreisförmigen Behälter, in dessen Zentrum ein Mikro-Servo positioniert ist. Dieser hält eine dünne, rotierende Platte, welche die Öffnung des Behälters verschließt.

Mit Standard-Servo-Einstellungen ist die Drehung der Platte auf etwa die Hälfte des möglichen Bewegungsbereichs begrenzt, wodurch der gesamte Innenraum des Behälters nicht vollständig nutzbar ist. Der Mechanismus setzt sich insgesamt aus drei Bauteilen zusammen. Wird ausschließlich die Abwurffunktion benötigt, kann der äußere Ring entfallen.

Die drehbare Platte kann direkt mit einer Schraube am Servo befestigt werden. Eine zusätzliche Verlängerung mit einer zweiten Schraube erhöht jedoch die Stabilität des Systems. Der äußere Ring wird verklebt.

Vier Schrauböffnungen ermöglichen die Befestigung des Mechanismus an der Drohne. Optional kann ein zusätzlicher Ring gedruckt und montiert werden, der es erlaubt, die Konstruktion gleichzeitig als Landestütze zu verwenden.

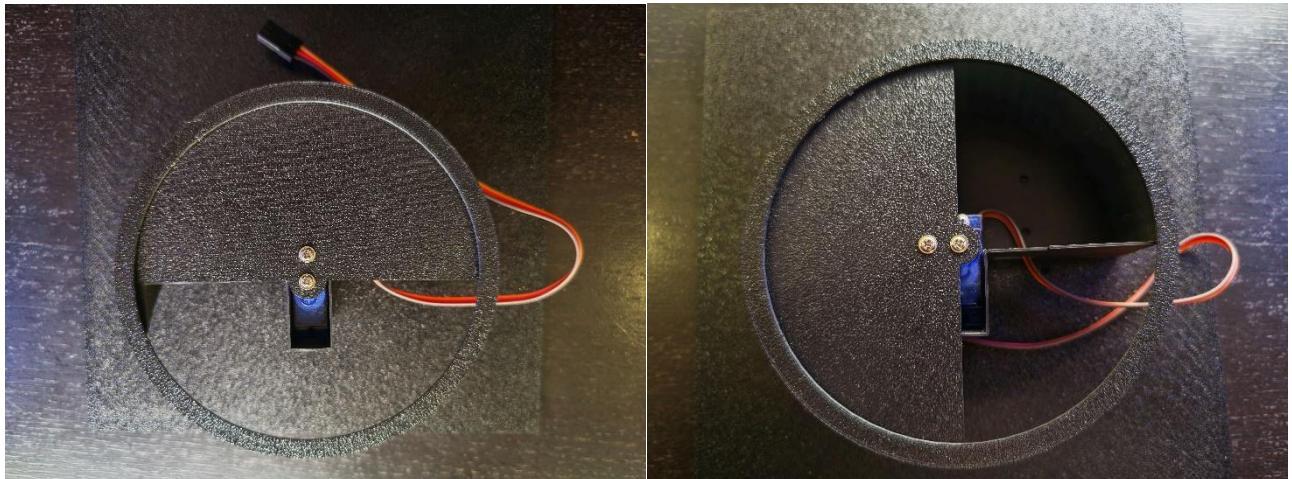


Abbildung 6 Mechanismus Behälter geschlossen (links) und geöffnet (rechts)

6.5 Elektromagnet

Um neben Servo gesteuerten Lösungen auch alternative Drop-Mechanismen vergleichen zu können, wurde zusätzlich ein System auf Basis eines Elektromagneten entwickelt. Hierfür wurde zunächst ein vereinfachter Schaltplan mit der Software Fritzing erstellt. Da die Software nicht alle benötigten Bauteile enthält, wurden in der Darstellung teilweise Platzhalter verwendet.

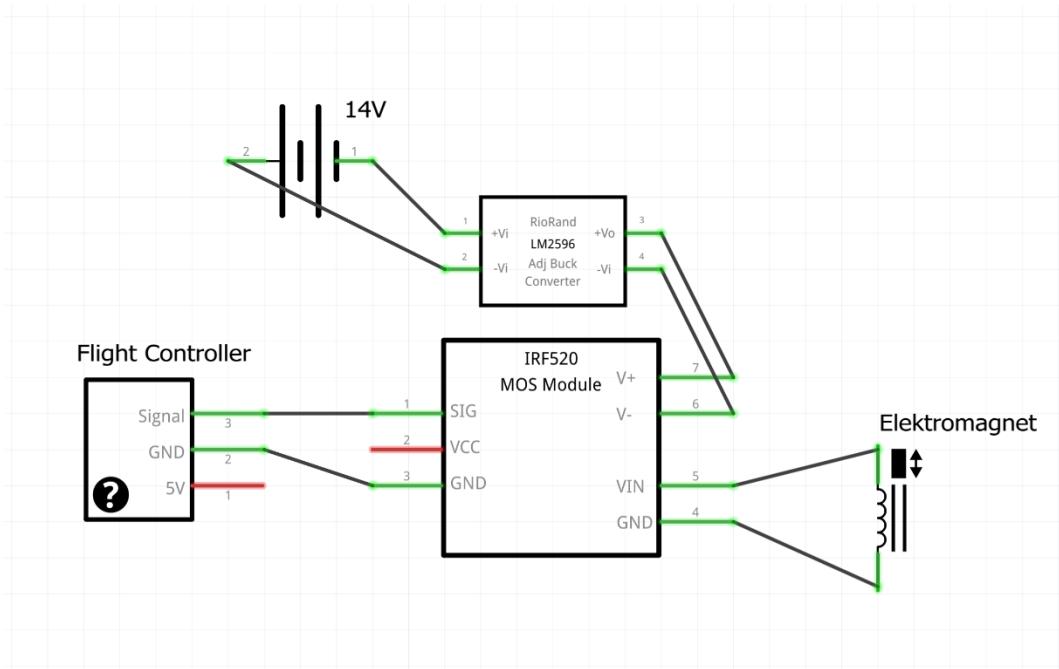


Abbildung 7 Grundidee für den Elektrischen Schaltkreis zum Betrieb eines Elektromagneten mit einem Flight Controller

Tabelle 8 Verwendete Teile für die Konstruktion des elektromagnetisch gesteuerten Drop-Mechanismus

Teile	Preis	Funktion
LiPo-Batterie	19,43€	Stromversorgung des Systems
DC-DC buck converter	7,29€ für 6 Stück	Spannungsreduktion
Dual Mosfet Trigger Switch	5,99€ für 8 Stück	Elektronische Schaltung
Heschen Electromagnet	7,99€	Halten der Ladung

Aus vorherigen Projekten stand eine LiPo-Batterie mit einer Nennspannung von 14 V zur Verfügung. Da der eingesetzte Elektromagnet für eine Betriebsspannung von 12 V ausgelegt ist, wurde ein Abwärtswandler (Buck Converter) eingesetzt, um eine spezifikationsgerechte Versorgungsspannung bereitzustellen. Die Einstellung der Ausgangsspannung erfolgte mithilfe eines Multimeters und eines Schraubenziehers.

Eine direkte Versorgung des Elektromagneten über den Flight Controller war nicht möglich, da dieser nur begrenzte Stromstärken bereitstellen kann und somit nicht für leistungsintensive Verbraucher wie Elektromagneten ausgelegt ist. Aus diesem Grund wurde eine separate Spannungsversorgung verwendet.

Zur Ansteuerung des Elektromagneten kam ein MOSFET-Modul zum Einsatz, das als elektronischer Schalter fungiert. Der MOSFET wird über ein Steuersignal des Flight Controllers aktiviert und ermöglicht eine gezielte Ein- und Ausschaltung des Stromflusses zum Elektromagneten, während der benötigte Laststrom aus der externen Spannungsquelle bezogen wird.

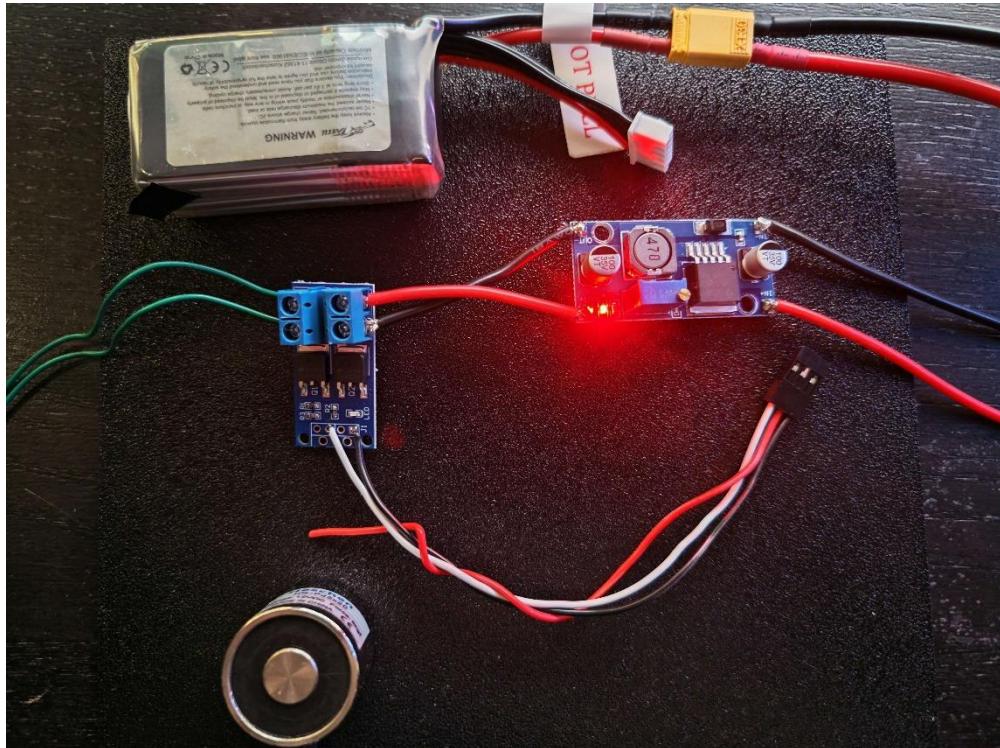


Abbildung 8 Elektromagnetischer Drop-Mechanismus mit LiPo, Buck Converter und Mosfet

7 Experimentelle Analyse der Drop-Mechanismen

7.1 Übersicht

Im Folgenden wird die Eignung der gebauten Drop-Mechanismen experimentell untersucht. Die gewählten Versuche dienen der Bewertung der Zuverlässigkeit sowie der mechanischen Belastbarkeit der Systeme. Alle Versuche wurden stationär durchgeführt, es gab keine Tests an realen Drohnen. Sämtliche Versuche wurden unter reproduzierbaren Laborbedingungen durchgeführt. Es wird im Folgenden näher auf die Mechanismen aus dem vorherigen Kapitel eingegangen.

Tabelle 9 Experimentelle Analyse der konstruierten Drop-Mechanismen

	Gewicht	Auslöse-zuverlässtigkeit	Halt bei Vibration	Maximale Gewichtbelastung	Span-nungsab-hängig-keit	Maße
5.1 Basic	12g	30/30	Ja	500g	Nein	17,3x3,9x0,5cm
5.2 Servo	20g	30/30	Ja	1,8kg	5V	8,3x4x2,3cm
5.3 Multi	21g	30/30	Ja	1-1,5kg	5V	6,3x3,3x2,3cm
5.4 Behälter	36g	30/30	Ja	>300g	5V	11,3x11,3x3,7cm Innenraum: 10,4x5,3x3,4cm
5.5 Elektromagnet	78g, 150g mit Batterie	5/30	Nein	20g	12V	Mindestens 10x5x2cm

Alle Mechanismen wurden vergleichbarer Belastung ausgesetzt.



Abbildung 9 Beispielladung für den Drop-Mechanismus mit Behälter

7.2 Gewicht und Bauraum

Das Gewicht wurde ohne die Halterungsschrauben, welche für die Montage zur Drohne benötigt werden, gemessen, da diese je nach Drohne variieren können. Auch der jeweilige Haken, welcher zum Anbringen der Ladung benötigt wird, wurde nicht mitberücksichtigt, da dieser technisch gesehen nicht Teil der Konstruktion ist und in der Regel mit fallengelassen wird.

Die Last wurde per Haken und einer Tüte befestigt, was ermöglicht, die Belastung individuell anzupassen. Somit ist auch der Bauraum für die meisten der Konstruktionen nicht eingeschränkt, wobei die Entfernung der Last zur Drohne die Manövrierbarkeit einschränken kann. Eine Ausnahme hierzu ist der Servo gesteuerte Mechanismus mit Innenraum, welcher eine limitierte Menge halten kann, dafür aber die Ladung sicher verschließt.

7.3 Energieabhängigkeit

Sämtliche Servos wurden durch denselben Anschluss betrieben und mit einer Versorgungsspannung von 5V versorgt. Eine Ausnahme hierzu war der elektromagnetische Mechanismus, welcher eine Spannung von 12V benötigte.

Ein Energieverlust wurde durch das Entfernen der jeweiligen Lipo-Batterie simuliert. Die Servo gesteuerten Mechanismen verbleiben bei Stromverlust in ihrer derzeitigen Position. Sollte der Flight-Controller ausfallen, blieb die Ladung am Mechanismus. War der Mechanismus geöffnet so blieb er dies auch. Sollte der Strom während des Abwurfs ausfallen, so kann dies bedeuten, dass zum Beispiel bei dem Multi-Dropper nicht die gesamte Ladung abgeworfen wird. Bei dem Behälter würde der Mechanismus nicht vollständig geöffnet hängen bleiben und könnte das Abwerfen der jeweiligen Ladung verhindern.

Verlor der Elektromagnet die benötigte Stromzufuhr, so verblieb noch ein Restmagnetismus, welcher die (minimale) Ladung weiterhin hielt. Durch die generell schwache Stärke des Magneten, war es schwer zu überprüfen, ob dieser Restmagnetismus ausreichend wäre, um die Drohne rechtzeitig zu landen, bevor die Last fällt. Das Verhalten bei Energieverlust ist insbesondere für sicherheitskritische Anwendungen relevant, da es Aufschluss über das Fail-Safe-Verhalten der jeweiligen Mechanismen gibt.

7.4 Statische Haltekraft

Zur Überprüfung der Haltekraft bzw. maximalen Gewichtbelastung, wurden die Mechanismen an ihren dafür vorgesehenen Haltepunkten angebracht und auf verschiedene Gewichtauslastungen getestet. Hierbei wurde geprüft, ab welchem Gewicht sich die Teile Verformen, was die Maximalbelastung ist, zu welcher der Mechanismus noch funktioniert, oder wie viel die Konstruktion halten bzw. aushalten kann.

Die Basis-Konstruktion ohne benötigte Stromzufuhr zeigte ab einer Belastung von etwa 100 g erste elastische Verformungen, da das mittlere Segment innerhalb der Konstruktion nur einen Haltepunkt hat und das Gewicht beim Abwurf halten muss. Auch wenn das Konstrukt ein Gewicht von über einem Kilogramm halten konnte, wird aus konstruktiver Sicht nicht empfohlen, dieses mit mehr zu beladen. Die beobachteten Verformungen sind vermutlich auf die einseitige Krafteinleitung und die geringe Materialstärke des mittleren Segments zurückzuführen. Der Haken, welcher entlang der vorgegebenen Route das „Labyrinth“ manövrieren muss, bewegt sich bei starker Belastung nur mit starker Neigung, was den Abwurf mit einer Drohne deutlich beeinträchtigt. Dies kann durch Glättung des Materials und Anpassung des Hakens verbessert werden, würde aber Einfluss auf Festigkeit nehmen. Auch darf sich der Haken nicht während des normalen Fluges bewegen, wofür eine leichtere Bewegung dessen ein Risiko darstellt.

Der einfache Servo Mechanismus hatte bei weiten die stabilste und stärkste Haltekraft. Ab 1kg entstand eine Verformung an der hinteren Platte, aber auch bei 1,9kg konnte die Last ohne Funktionsbeeinträchtigung gehalten werden. Nach Entfernung der Last war keine permanente Verformung erkennbar. Der Mechanismus sollte dennoch nicht mit mehr als 1,8kg belastet werden, da dies die Zugkraft des Servos übersteigt. Bei einem Test mit 1,9kg konnte der Servo den Draht in nur sehr begrenztem Umfang noch ziehen, auch wenn es noch funktioniert hat.

Der Multi Servo Mechanismus konnte, ähnlich zum einfachen Servo Mechanismus, ohne Funktionsbeeinträchtigung Lasten bis zu 1kg aushalten. Dieses sollte wenn möglich verteilt werden oder zumindest nicht am äußereren Ende angebracht werden. Die letzte Halterung ist ein Schwachpunkt und brach bei Ausübung von geringem Druck.

Durch den geringen Innenraum konnte die maximal mögliche Belastung des Mechanismus mit Behälter nicht präzise bestimmt werden. Für das Experiment wurden möglichst schwere Schrauben im Innenraum platziert, was sich aber bei vollem Raum nur auf knapp über 300g belief. Der Mechanismus wurde auch ohne den äußeren Ring getestet, wobei sich der Deckel bei einer Belastung von 150g begann zu verformen.

Der magnetische Mechanismus konnte in nur sehr begrenztem Umfang eine Last tragen. Getestet wurden kleine magnetische Objekte im Bereich 3 - 22g, unter anderem eine Mutter und Büroklammern. Der Magnet konnte diese Lasten heben, aber schon geringer Einfluss wie leichtes Schütteln reichte, um die Last ungewollt abzuwerfen. Dies macht den Mechanismus für Transport mit Drohnen unbrauchbar.

7.5 Auslösezuverlässigkeit

Getestet wurde die Funktionsweise der Mechanismen bei 30 Auslösungen mit einer leichten Belastung von 200g. Es wurden keine Missstände bei festgestellt und die Mechanismen zeigten über die 30 Auslösezyklen ein stabiles und reproduzierbares Auslöseverhalten. Eine Ausnahme hierzu bildet die magnetisch gesteuerte Vorrichtung, welche mit einem geringeren Gewicht getestet wurde. Auch wenn die Funktionsweise des Mechanismus eingeschränkt blieb, war diese über alle Auslösungen hinweg konstant. Verschleißerscheinungen oder Funktionsabweichungen konnten innerhalb dieses Versuchs nicht festgestellt werden.

7.6 Vibrationstest

Alle Mechanismen wurden zwei verschiedenen Vibrationstests ausgesetzt. Einerseits wurde durch einfaches Schütteln überprüft, ob sich bereits hierdurch Teile lösen oder der Mechanismus die Ladung fallen lässt. Um einen präziseren Vergleichswert zu erhalten, wurden die Mechanismen an einen Tisch gehalten und mit einem Akkuschrauber für knapp 40 Sekunden Vibrationen ausgelöst. Der Vibrationstest stellt eine vereinfachte Annäherung an im Flugbetrieb auftretende mechanische Anregungen dar und erlaubt keine quantitative Aussage über Frequenzbereiche

Leichtes Schütteln hatte keinen Einfluss auf die Integrität der Konstruktionen, jedoch löste sich bei dem Magneten hier schon die Ladung. Dies könnte mit einem stärkeren Magneten behoben werden, führte aber in diesem Experiment zum Ausschluss des Mechanismus. Schon konnten Ladungen von 10g bei geringer äußerer Einwirkung losgelöst werden.

Bei stärkeren Vibrationen konnte der Standardmechanismus nicht beeinflusst werden, solange eine Ladung an ihm befestigt war. Bei zu geringer Ladung konnte es passieren, dass der Haken abrutschte oder gar komplett aus der Vorrichtung viel.

Alle drei Servo-Mechanismen konnten dem Vibrationstest ohne Probleme widerstehen. Es konnte keine ungewollte Bewegung der Servos, Pins oder sonstiger Teile festgestellt werden. Auch der Elektromagnet mit der vorgesehenen Vorrichtung war unversehrt, jedoch konnte er währenddessen keine Ladung halten.

7.7 Mechanische Komplexität und Montagefreundlichkeit

Da keine Langzeitversuche durchgeführt wurden, basiert die Bewertung auf einer qualitativen Analyse der Konstruktion, der Anzahl beweglicher Teile sowie potenzieller Schwachstellen

Der Standard-Mechanismus besteht nur aus einem gedruckten Teil, hat aber mehrere anfällige Stellen. Einerseits sind die Halterungen, mit welchen der Mechanismus an der Drohne befestigt wird, sehr dünn und dementsprechend labil. Sollte Druck von oben oder unten mittig auf das „Labyrinth“ ausgeübt werden, so biegt sich die gesamte Konstruktion und könnte mittig brechen. Insbesondere die Seite, welche mit dem länglichen mittleren Balken verankert ist, ist strukturell schwächer ausgeführt und könnte bei zu hoher Belastung nachgeben.

Außerhalb des Druckens muss noch der Haken angebracht werden, welcher nicht zu steif sein darf, da dieser sonst nicht die Kanten entlanggleiten kann.

Der einfache Servo-Mechanismus, sowie der Multi-Drop-Mechanismus bestehen beide aus drei Teilen, vier, wenn man den Servohebel mitzählt.

Der einfache Servo-Mechanismus zeigt keine direkten Bruchstellen auf. Bei starker Belastung war das einzige Stück, welches sich verbogen hat, die hintere Plastikplatte, welche das gesamte Konstrukt hält.

Dieses Problem löst der Multi-Drop-Mechanismus durch eine breitere und somit stabilere Platte. Jedoch ist durch die Auslagerung der Stabilisatoren für den Draht die äußerste Stelle zum Anbringen von Gewichten stark gefährdet. Auch kann hier durch das Anbringen mehrerer Objekte der Draht leicht verbiegen, was zu Problemen beim Ein- und Ausfahren führen kann.

Aufgrund der erhöhten Anzahl an Teilen ist der Mechanismus mit Halterung deutlich Fehleranfälliger. Bei inkorrektem Anbringen der beweglichen Platte konnte beispielsweise diese hängen bleiben und blieb permanent geöffnet. Auch das Kleben des Rings, welcher hilft, zusätzliches Gewicht zu tragen, ist unzuverlässig und kann bei Ausfall zu einem ungewollten Verlust

der Ladung führen. Bei zu hoher Belastung reibt die bewegliche Platte gegen den Ring, was zu einer langsamen, aber stetigen Abnutzung führt.

Die mechanische Konstruktion des magnetgesteuerten Mechanismus ist bei weitem die komplizierteste und fehleranfälligste. Durch die vielen offen liegenden Teile und Kabel können Probleme entstehen und es wird viel Platz beim Anbringen an eine Drohne benötigt. Insbesondere extra benötigte Lipo-Batterie braucht extra Raum und ist schwer zu lagern. Am besten verpackt wäre das ganze System in einer 3D gedruckten Box, was aber das bereits vergleichsweise hohe Gewicht noch mehr erhöht. Auch muss die Batterie bei dauerhafter Nutzung ausgetauscht werden, was den Aufwand und die Kosten erhöht.

7.8 Abwurf und Präzision

Der Abwurf von Objekten konnte durch statische Versuche nur limitiert getestet werden. Es wurden Versuche für die Höhen 0,5m, 3m und 5m mit Gewichten von 200g durchgeführt, bis auf den elektromagnetisch gesteuerten Mechanismus, welcher nur eine Tragfähigkeit von 20g hatte. Die gemessenen Abweichungen waren gering und unterschieden sich nicht signifikant vom Vergleichswert. Mithilfe eines Fadens wurde der exakte Punkt ermittelt, an welchen das Objekt bei geradem Fall auftreffen sollte und von diesem Punkt aus wurde die Abweichung ermittelt. Als Vergleichswert wurde dabei der Abwurf aus freier Hand verwendet. Auf eine tabellarische Darstellung quantitativer Abweichungen wurde verzichtet, da die gemessenen Unterschiede innerhalb der Messunsicherheit lagen.

Auch wenn dieses Experiment nicht ausschlaggebend für den Abwurf aus einer realen Drohne ist, so konnten dennoch wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Der Abwurf für den Basis-Servo-, Multi- und elektromagnetisch gesteuerten Mechanismus ist sehr präzise, da diese Mechanismen die Ladung nicht für den Abwurf bewegen müssen. Der „Labyrinth“-Mechanismus hingegen muss die Ladung durch gezieltes Schwenken der Drohne abwerfen, wodurch die Abwurfpräzision mit zunehmender Fallhöhe variieren kann. Der Mechanismus mit Behälter kann je nach Position der Ladung im Behälter präzise sein. Da der Behälter aber durch Servo-Limitierung nur zur Hälfte geöffnet werden kann, kann es vorkommen, dass auch hier ein Schwenken der Vorrichtung nötig ist, um die Ladung abzuwerfen.

8 Diskussion und Vergleich zu kommerziellen Abwurfsystemen

8.1 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse

Die in Kapitel 7 durchgeführten Versuche zeigen deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Abwurfsystemen hinsichtlich Tragfähigkeit, Zuverlässigkeit, Energieabhängigkeit und mechanischer Komplexität. Alle getesteten Mechanismen erfüllten grundsätzlich ihre Funktion, wiesen jedoch teils erhebliche Einschränkungen in einzelnen Bewertungsdimensionen auf.

Die Servo gesteuerten Mechanismen zeigten insgesamt die stabilsten Ergebnisse. Sowohl der einfache Servo-Mechanismus als auch der Multi-Drop-Mechanismus überzeugten durch eine hohe statische Haltekraft, eine zuverlässige Auslösung über alle Testzyklen sowie eine hohe Resistenz gegenüber mechanischen Vibrationen. Einschränkungen ergaben sich primär durch konstruktive Schwachstellen einzelner Bauteile, etwa an äußeren Haltepunkten oder durch potentielle Drahtverformungen bei asymmetrischer Belastung.

Der mechanische Standard-Mechanismus ohne aktive Ansteuerung zeigte zwar eine hohe Energieunabhängigkeit, jedoch auch deutliche Nachteile in Bezug auf Belastbarkeit und reproduzierbare Auslösebedingungen. Die notwendige Bewegung der Last während des Abwurfs erschwert eine präzise und kontrollierte Anwendung, insbesondere bei variierender Belastung.

Der Mechanismus mit integriertem Behälter stellt einen Sonderfall dar, da er durch seinen geschlossenen Aufbau eine sichere Lastaufnahme ermöglicht, jedoch stark durch den verfügbaren Innenraum und die begrenzte Öffnungsmechanik eingeschränkt ist. Die maximale Tragfähigkeit konnte experimentell nur bedingt bestimmt werden, was seine Einsatzmöglichkeiten einschränkt.

Der elektromagnetisch gesteuerte Mechanismus erwies sich im Rahmen der Versuche als ungeeignet für den Transport von Lasten. Die geringe Haltekraft, die hohe Energieabhängigkeit sowie die Anfälligkeit gegenüber Vibrationen führten dazu, dass dieser Mechanismus selbst bei geringen Lasten keine zuverlässige Funktion gewährleisten konnte.

8.2 Bewertung der DIY-Abwurfsysteme

Die untersuchten DIY-Abwurfsysteme zeigen, dass mit vergleichsweise einfachen Mitteln funktionale Abwurfmechanismen realisiert werden können. Insbesondere Servo gesteuerte Lösungen bieten ein gutes Verhältnis zwischen konstruktivem Aufwand, Zuverlässigkeit und Tragfähigkeit. Die im Versuch erreichten Haltekräfte liegen teilweise deutlich über typischen Anwendungsgewichten kleiner Drohnen, was auf ein hohes konstruktives Potenzial hinweist.

Ein wesentlicher Vorteil der DIY-Lösungen liegt in ihrer Anpassungsfähigkeit. Bauraum, Tragfähigkeit und Auslösemechanismus können gezielt auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmt werden. Zudem ermöglichen additive Fertigungsverfahren eine schnelle Iteration und Optimierung einzelner Bauteile.

Demgegenüber stehen jedoch auch klare Nachteile. Die mechanische Belastbarkeit ist stark von Druckqualität, Materialwahl und konstruktiver Auslegung abhängig. Zudem fehlt bei DIY-Systemen in der Regel eine systematische Qualitätssicherung. Langzeitverhalten, Materialermüdung und Umwelteinflüsse konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden und stellen potenzielle Risiken dar.

Ein weiterer kritischer Punkt ist die funktionale Absicherung bei Fehlzuständen. Während einige Mechanismen ein stabiles Fail-Safe-Verhalten zeigten, ist dieses nicht durchgängig garantiert und stark abhängig von der jeweiligen Konstruktion.

8.3 Vergleich mit kommerziellen Abwurfsystemen

Kommerzielle Abwurfsysteme zeichnen sich typischerweise durch eine hohe Integrationsdichte, kompakte Bauformen und geprüfte Belastungsgrenzen aus. Sie sind häufig speziell auf bestimmte Drohnenmodelle abgestimmt und bieten eine definierte Schnittstelle zur Steuerung. Darüber hinaus werden sie in der Regel umfangreich getestet, was eine hohe Betriebssicherheit und Wiederholgenauigkeit gewährleistet.

Im direkten Vergleich erreichen die untersuchten DIY-Systeme in einzelnen Disziplinen, insbesondere bei Tragfähigkeit und Auslösezuverlässigkeit, vergleichbare Ergebnisse. Die Servo gesteuerten DIY-Mechanismen konnten Belastungen standhalten, die im Bereich oder sogar oberhalb vieler kommerzieller Systeme liegen.

Jedoch zeigen sich Unterschiede bei der Gesamtsystembetrachtung. Kommerzielle Lösungen bieten meist eine bessere mechanische Absicherung, kompaktere Bauweise und geringere Fehleranfälligkeit bei Montage und Betrieb. Insbesondere Aspekte wie Vibrationsentkopplung, Schutz vor unbeabsichtigtem Auslösen und definierte Sicherheitsmechanismen sind bei kommerziellen Produkten stärker ausgeprägt.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied liegt im Gewicht und Energieverbrauch. Während DIY-Systeme teilweise schwerer ausfallen oder zusätzliche Energiequellen benötigen, sind kommerzielle Systeme oft optimiert und effizienter ausgelegt.

8.4 Wirtschaftliche und praktische Betrachtung

Aus wirtschaftlicher Sicht stellen DIY-Abwurfsysteme eine kostengünstige Alternative zu kommerziellen Lösungen dar. Die Materialkosten sind gering, und bestehende Komponenten wie Standard-Servos können mehrfach verwendet werden. Dies macht DIY-Systeme besonders attraktiv für Forschungs-, Entwicklungs- oder Bildungszwecke.

Für professionelle Anwendungen oder sicherheitskritische Einsätze sind kommerzielle Systeme jedoch klar im Vorteil. Die höheren Anschaffungskosten werden durch geprüfte Zuverlässigkeit, Support und normgerechte Auslegung gerechtfertigt.

8.5 Gesamteinordnung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass DIY-Abwurfsysteme, insbesondere Servo gesteuerte Konstruktionen, unter kontrollierten Bedingungen eine leistungsfähige Alternative zu kommerziellen Lösungen darstellen können. Sie eignen sich insbesondere für experimentelle Anwendungen, Erstellung von Prototypen und spezialisierte Einsatzzwecke, bei denen Anpassbarkeit und Kostenreduktion im Vordergrund stehen.

Kommerzielle Abwurfsysteme bieten hingegen eine höhere Gesamtsicherheit, bessere Integration und geringeren Entwicklungsaufwand. Die Wahl zwischen DIY- und kommerziellen Lösungen hängt somit maßgeblich vom jeweiligen Anwendungsfall, den Sicherheitsanforderungen sowie den verfügbaren Ressourcen ab.

9 Fazit und Ausblick

9.1 Fazit

Ziel dieser Arbeit war die Konzeption, Realisierung und experimentelle Untersuchung verschiedener Abwurfsysteme für Drohnen, wobei der Fokus auf der Entwicklung und Bewertung eigenständig konstruierter (DIY-)Mechanismen lag. Die Systeme wurden bewusst unabhängig von einer vollständigen Drohnenplattform betrachtet, um eine isolierte Analyse der mechanischen und funktionalen Eigenschaften zu ermöglichen.

Die experimentellen Untersuchungen zeigten, dass einfache, Servo gesteuerte Abwurfmechanismen unter den gewählten Testbedingungen eine hohe Zuverlässigkeit und Tragfähigkeit aufweisen. Insbesondere der einfache Servo-Mechanismus sowie der Multi-Drop-Mechanismus überzeugten durch stabile Haltekraft, reproduzierbares Auslöseverhalten und eine hohe Resistenz gegenüber mechanischen Vibrationen. Damit konnten diese Konstruktionen ihre grundsätzliche Eignung für den Einsatz als modulare Abwurfsysteme bestätigen.

Mechanische Lösungen ohne aktive Ansteuerung zeichneten sich zwar durch Energieunabhängigkeit aus, wiesen jedoch deutliche Einschränkungen hinsichtlich Belastbarkeit, Auslösepräzision und konstruktiver Robustheit auf. Insbesondere die notwendige Bewegung der Last während des Abwurfs stellt eine potenzielle Schwachstelle dar, die den kontrollierten Einsatz erschwert.

Der Mechanismus mit integriertem Behälter ermöglichte eine sichere Aufnahme der Ladung, war jedoch stark durch den verfügbaren Bauraum und die begrenzte Öffnungsmechanik limitiert. Die praktische Tragfähigkeit blieb dadurch vergleichsweise gering. Der elektromagnetisch gesteuerte Mechanismus erwies sich im Rahmen dieser Arbeit als ungeeignet für den Lasttransport, da sowohl die Haltekraft als auch die Betriebssicherheit nicht den Anforderungen an einen zuverlässigen Abwurfmechanismus entsprachen.

Im Vergleich zu kommerziellen Abwurfsystemen konnten einzelne DIY-Lösungen in spezifischen Disziplinen, insbesondere hinsichtlich Tragfähigkeit und Auslösezuverlässigkeit, vergleichbare Ergebnisse erzielen. Gleichzeitig zeigte sich jedoch, dass kommerzielle Systeme in Bezug auf Integrationsgrad, mechanische Absicherung und geprüfte Zuverlässigkeit klare Vorteile besitzen. DIY-Abwurfsysteme stellen somit eine sinnvolle Alternative für experimentelle, kostensensitive oder anwendungsspezifische Szenarien dar, während kommerzielle Lösungen insbesondere für professionelle und sicherheitskritische Einsätze vorzuziehen sind.

9.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen mehrere Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen und Optimierungen. Ein zentraler Aspekt ist die konstruktive Weiterentwicklung der Servo gesteuerten Mechanismen, insbesondere hinsichtlich Materialwahl, Wandstärken und Kraftübertragung, um Verformungen bei hohen Lasten weiter zu reduzieren und die Lebensdauer zu erhöhen.

Darüber hinaus könnten Langzeit- und Verschleißtests durchgeführt werden, um Aussagen über die Dauerhaltbarkeit der Mechanismen und das Verhalten unter wiederholter Belastung zu ermöglichen. Dies wäre insbesondere für Anwendungen relevant, bei denen der Abwurfmechanismus regelmäßig eingesetzt wird.

Ein weiterer möglicher Entwicklungsschritt besteht in der Integration zusätzlicher Sicherheits- und Rückmeldefunktionen, beispielsweise durch Endlagenschalter oder Positionssensoren, um den Zustand des Mechanismus eindeutig erfassen zu können. Dies könnte die Betriebssicherheit erhöhen und ungewollte Abwürfe weiter reduzieren.

Auch eine optimierte Energieversorgung stellt einen sinnvollen Ansatz dar. Insbesondere bei elektromagnetischen oder Servo gesteuerten Systemen könnte eine effizientere Auslegung der Ansteuerung sowie die Nutzung gemeinsamer Stromversorgungen das Gesamtgewicht und den Energiebedarf reduzieren.

Abschließend bieten DIY-Lösungen großes Potenzial für zukünftige Arbeiten. Durch eine systematisches abarbeiten von Parametern und konstruktive Optimierung könnten DIY-Abwurfsysteme weiter an professionelle Lösungen angenähert werden und so neue Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Drohnentechnik eröffnen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Gelöteter ESC, Flight Controller und Empfänger	24
Abbildung 2 Phantom Maze Drop-Mechanismus mit Haken.....	28
Abbildung 3 Einfacher Drop-Mechanismus mit Servo	29
Abbildung 4 Beispiel für einen vollständigen Testaufbau.....	29
Abbildung 5 Multi Drop-Mechanismus mit Servo	30
Abbildung 6 Mechanismus Behälter geschlossen (links) und geöffnet (rechts).....	31
Abbildung 7 Grundidee für den Elektrischen Schaltkreis zum Betrieb eines Elektromagneten mit einem Flight Controller	32
Abbildung 8 Elektromagnetischer Drop-Mechanismus mit LiPo, Buck Converter und Mosfet	33
Abbildung 9 Beispieldladung für den Drop-Mechanismus mit Behälter	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Wichtige Parameter des 3D-Drucks.....	14
Tabelle 2 Doxtech RDD-M / RDD-Series Payload Dropper Daten	16
Tabelle 3 Skydroid Drop-Mechanismus Daten.....	16
Tabelle 4 DJI Mavic 4 (Sky Hook) Daten	17
Tabelle 5 Drop-Mechanismen Amazon und Aliexpress Daten	17
Tabelle 6 verwendetes Material von kommerziellen und DIY Drop-Mechanismen.....	19
Tabelle 7 Benötigte Teile für die Inbetriebnahme eines Flight Controllers	23
Tabelle 8 Verwendete Teile für die Konstruktion des elektromagnetisch gesteuerten Drop-Mechanismus	32
Tabelle 9 Experimentelle Analyse der konstruierten Drop-Mechanismen.....	34

Literaturverzeichnis

Bücher

Austin, R. (2010): *Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment*.

John Wiley & Sons.

Beard, R. W.; McLain, T. W. (2012): *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*.

Princeton University Press.

Berman, B. (2012): *3-D printing: The new industrial revolution*. Business Horizons, 55, 155–162.

Bolton, W. (2003): *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*. Pearson.

Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M. (2021): *Additive Manufacturing Technologies*. 3. Aufl., Springer.

Schrader, G. F.; Elshennawy, A. K. (2000): *Manufacturing Processes and Materials*. 4. Aufl., Society of Manufacturing Engineers.

Quan, Q. (2017): *Introduction to Multicopter Design and Control*. Springer.

Franklin G. F.; Powell J. D.; Emami-Naei A. (2019): *Feedback Control of Dynamic Systems*. Pearson.

Wissenschaftliche Artikel

Qiao, J.; Liu, Z. X.; Zhang, Y. M. (2018): Trajectory tracking and payload dropping of an unmanned quadrotor. *Aerospace Science and Technology*, 78, 123–134.

Tymrak, B. M.; Kreiger, M.; Pearce, J. M. (2014): Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers. *Materials & Design*, 58, 242–246.

Richtlinien und technische Literatur

Federal Aviation Administration (FAA) (2021): *Advisory Circular 107-2A: Small Unmanned Aircraft Systems (sUAS)*.

O'Connor, P. (2019): *Practical Reliability Engineering*. 5. Aufl., Wiley, Chichester.

Hersteller- und Produktdokumentation

FoxtechFPV: <https://store.foxtech.com/rdd-m-payload-release-and-drop-device>

<https://www.foxtchuav.com/de/expanding-drone-capabilities-the-rdd-series-payload-release-systems-for-dji-platforms.html>

Skydroid: <https://balticdrones.eu/products/air-dropping-payload-release-system-skydroid>

DJI: <https://www.droneskyhook.com/product-page/drone-sky-hook-release-drop-device-for-dji-mavic-4>

Aliexpress: <https://de.aliexpress.com/item/1005008251484001.html>

Amazon: <https://www.amazon.de/-/en/Launcher-Airdropper-Payload-Release-Transport/dp/B0CSG3BGN5>

Software

Betaflight (2024): *Betaflight Configurator*, Open-Source-Projekt.

Fritzing (2024): *Fritzing – Electronics Design Automation Tool*.

Videoquellen

Neben den regulären Quellen und Dokumentationen gab es viel Hilfestellung bei der Konstruktion durch Videos zu Flight Controllern und dem Löten von Teilen. Insbesondere, wenn man keine Vorerfahrung von solchen Vorgängen hat, können folgende Videoquellen hilfreich sein.

Betaflight servo setup (controlled by AUX channel):

<https://youtu.be/jiD6aC0l1VQ?si=W6tmmRieeGKPxDPh>

How to Make/Build Fpv Drone/Speedybee F7v3 Stack/T Motor F60 Pro 1950 KV:

https://youtu.be/VfNIDSZoTvc?si=Qsirm1_RyKNnpNGJ

BETAFLIGHT Tutorial for Everyone - Updated & Step by Step:

<https://youtu.be/W8PMKUQX4q0?si=u9CD5dYM7YiKKRXL>

How To Solder FPV Parts:

<https://youtu.be/2funvs3nU7U?si=LdSyrbtm4p6bWsV>

SpeedyBee F7 V3 Flight Stack - Everything But The Kitchen Sink:

<https://youtu.be/ghIrNTNTuck?si=54FgzPpfDNkwWOaV>

RC Electronics for Noobs:

<https://youtu.be/j61Q3e8AFR4?si=gyeDOY9Kk5t0ZPV->

Flight controller basics for beginners:

<https://youtu.be/xSOaeSd1AlM?si=u1MXDGkOmlhuRnW9>

Druckquellen

DJI Phantom Drop Maze von nosbigxam (2016): <https://www.thingiverse.com/thing:1661854>

RC Servo Release / Drop mechanism von Thingyverser (2015): <https://www.thingiverse.com/thing:920725>

Multiple Servo Drop von alperssl (2017): <https://www.thingiverse.com/thing:2435950>

Servo cargo drop attachment for fimi A3 (circular closable) von chefotm (2023):

<https://www.thingiverse.com/thing:5783032>

Verwendete Komponenten

Flight Controller: <https://www.fpv24.com/de/speedy-bee/speedybee-f7-v3-fpv-flight-controller>

ESC: <https://www.speedybee.com/speedybee-f7-v3-bl32-50a-4-in-1-esc/>

Empfänger: <https://www.fpv24.com/de/radiomaster/radiomaster-xr2-nano-24ghz-elrs-empfänger>

Controller: <https://www.fpv24.com/de/radiomaster/radiomaster-pocket-crush-ag01-elrs-fpvfernsteuerung-frost-white>

Controller Batterien: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B0DCK4PTXS>

LiPo-Batterie für den ESC: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B0928GTP85>

LiPo-Batterie für den Elektromagneten: https://www.amazon.de/-/en/dp/B085352B8H?ref_=ppx_hzod_title_dt_b_fed_asin_title_0_1

SG90 9g Micro Servo: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B07CYZK379>

MG90S Micro Servo: https://www.amazon.de/-/en/AZDelivery-Servo-MG90S-Compatible-Arduino/dp/B086V3VP72/ref=sr_1_11?sr=8-11

Heat Shrink zum Verbinden von Kabeln: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B08XXGNJHG>

Servo Verlängerungskabel: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B082Y4QK9J>

Heschen Elektromagnet: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B078KN9D8V>

XT30 Kabel: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B0CF8B8WWT>

Silicon Kabel (für die Stromzuführung zum Elektromagnet): <https://www.amazon.de/-/en/dp/B0CZRD9L5R>

MOSFET Trigger Switch: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B0DG8B58PM>

Buck Converter: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B0F5W7C4KX>

Blei zum Löten: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B0BW8Y66JJ>

XT60 Kabel: <https://www.amazon.de/-/en/dp/B0FMNKK2QX>

Lötkit: https://www.amazon.de/-/en/dp/B07WYLF6QV?ref_=pe_151259321_1319653071_t_fed_asin_title

Alle Online-Quellen wurden zuletzt am 17.12.2025 abgerufen und überprüft.