

Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim

# **Modifizierung eines Quadrocopters zur Erfassung von meteorologischen Daten**

**Studienarbeit**

im Studiengang

Informationstechnik mit Schwerpunkt IT-Sicherheit

von

**Jonas Stalla + Simon Heid**

18.04.2023

<b>Bearbeitungszeitraum</b>	-
<b>Matrikelnummern, Kurs</b>	-
<b>Ausbildungsfirmen</b>	-
<b>Betreuer</b>	-

## **Kurzfassung:**

Durch die immer größer werdende Bedeutung des Klimawandels, sowohl für die Natur als auch für uns Menschen, wird es wichtiger sich immer mehr mit dem Klima und dem Wetter zu befassen. Hierzu gehört die Interpretation von Wetter und Klima durch entsprechende Technik. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Frage zu beantworten, ob ein Quadrocopter für die Erhebung von meteorologischen Daten in bodennahen Schichten verwendet werden kann und wie dieser modifiziert werden muss, dass er ausreichend und aussagekräftige Daten über die Meteorologie in bodennahen Schichten sammeln kann. Dazu wurden theoretische Grundlagen zu Multicoptern im Allgemeinen sowie physikalische als auch rechtliche Grundlagen des Fliegens, der Meteorologie und deren Elemente erläutert. Insbesondere die meteorologischen Elemente, wie Luftdruck, -temperatur und -feuchtigkeit, spielen eine herausgehobene Rolle, da sie sowohl bei der Fragestellung als auch bei der praktischen Umsetzung zur Lösung derselben von Bedeutung sind; zum Beispiel steht hierfür die Sensorauswahl. Weiterhin wurden Anwendungsgebiete, wie die Landwirtschaft, für solch einen modifizierten Quadrocopter benannt und mit anderen meteorologischen Messverfahren verglichen. Nach dieser theoretischen Grundlegung wurden Anforderungen sowohl an den Quadrocopter als auch an das Modul mit den meteorologischen Sensoren gestellt. Beispielhaft befassen sich diese mit dem Speichern und Übertragen von gesammelten meteorologischen Daten oder mit der Flugzeit, die für den Quadrocopter gelten soll. Diese Umsetzung impliziert eine Hardwareanalyse des Quadrocopters und die Auswahl von meteorologischen Sensoren und weiterer Hardware. Die Evaluation des Quadrocopters und des Moduls ergab ein positives Ergebnis in Bezug auf die zunächst aufgestellten Anforderungen. Im nächsten Schritt musste zur Verwaltung und Darstellung der Daten eine Software unter anderem für den Sender sowie eine Desktopapplikation entwickelt werden. Anschließend fand eine Zusammenführung des Quadrocopters und des Moduls statt. Durch einen Testflug konnten meteorologische Daten gesammelt und ausgewertet werden.

Schließlich konnte die Ausgangsfrage beantwortet werden, indem ein vollfunktionstüchtiger Quadrocopter mit einem für die Basisfunktionen tüchtigen Modul zur Erfassung, Speicherung und Übermittlung von meteorologischen Daten an eine Bodenstation entwickelt wurde. Obgleich der Prototyp Verbesserungspotential aufweist, kann dieses durch die in dieser Arbeit entwickelten konkreten Verbesserungsvorschläge zukünftig genutzt werden.

## **Abstract:**

Due to the constantly growing importance of climate change, both for nature and for us humans, it is becoming more and more important to deal with climate and weather. This includes the interpretation of weather and climate by appropriate technology. The aim of this thesis is to answer the question if a quadrocopter can be used to collect meteorological data in layers close to the ground and how it must be modified so that it is able to collect sufficient and meaningful data about meteorology in layers close to the ground. For this purpose, theoretical basics of multicopters in general as well as physical as well as legal basics of flying, meteorology and its elements were explained. In particular, the meteorological elements, such as air pressure, temperature and humidity, play a prominent role, as they are important both in the definition of the problem and the practical implementation to solve it; for example the sensor selection. Furthermore, areas of application, such as agriculture, for such a modified quadrocopter were named and compared with other meteorological measurement methods. After this theoretical foundation, requirements were set for both the quadrocopter and the module with the meteorological sensors. For example, these deal with the storage and transmission of collected meteorological data or with the flight time that should be applied to the quadrocopter. This implementation implies a hardware analysis of the quadrocopter and the selection of meteorological sensors and other hardware. The evaluation of the quadrocopter and the module showed a positive result with respect to the initially established requirements. In the next step, software for the transmitter and a desktop application had to be developed to manage and display the data. Subsequently, a consolidation of the quadrocopter and the module took place. Through a test flight, meteorological data could be collected and evaluated.

Finally, the initial question could be answered by developing a fully functional quadrocopter with a module capable of basic functions to collect, store and transmit meteorological data to a ground station. Although the prototype has potential for improvement, this can be exploited in the future through the specific suggestions for improvement developed in this thesis.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation und Hintergrund .....	1
1.2 Ziel dieser Arbeit .....	2
1.3 Vorgehensweise .....	3
2 Allgemeine Grundlagen Multicopter .....	4
2.1 Definition Multicopter .....	4
2.2 Bestandteile Multicopter .....	5
2.3 Arten von Multicoptern .....	12
3 Allgemeine Grundlagen des Fliegens .....	14
3.1 Physikalische Grundlagen – Aerodynamik .....	14
3.2 Rechtliche Grundlage .....	18
4 Steuerungsmöglichkeiten & Ortsmessung .....	21
4.1 Steuerungsmöglichkeiten .....	21
4.2 Ortsmessung & GPS .....	22
5 Meteorologischer Hintergrund .....	28
5.1 Einführung .....	28
5.2 Mikroklima .....	29
5.3 Meteorologische Elemente .....	31
6 Anwendungsmöglichkeiten des Quadrocopters mit meteorologischen Sensoren .....	40
7 Vergleich mit anderen meteorologischen Messverfahren .....	43
8 Anforderungen .....	46
8.1 Fliegender Quadrocopter .....	46
8.2 Meteorologische Sensoren .....	50
8.3 Übertragung der Daten an Bodenstation .....	50
8.4 Speicherung der Daten auf dem Quadrocopter .....	51
8.5 Datenhandling .....	51
8.6 Automatisierte Steuerung und Darstellung des Fluges auf einer Karte .....	51
8.7 Unabhängiges Modul mit meteorologischen Sensoren & Bodenstation zum Empfang der Daten .....	52

9	Hardwareanalyse eines Quadrocopters .....	53
10	Meteorologische Sensoren & notwendige Bauteile .....	55
10.1	Microchip MCP9808 Temperatursensor .....	55
10.2	HopeRF HP206C Barometer und Höhsensor .....	57
10.3	TH02 Temperatur- und Feuchtigkeitssensor .....	61
10.4	Adafruit TSL2591 Lichtsensor .....	63
10.5	UVM30A UV Sensor.....	64
10.6	Laser PM2.5 Feinstaubsensor .....	67
10.7	JOY-IT CCS811 Luftqualitätssensor.....	69
10.8	GlobalSat EM-406a GPS-Modul .....	71
10.9	Adafruit Feather 32u4 mit RFM95 LoRa Funkmodul.....	72
11	Praktische Umsetzung .....	73
11.1	Evaluation des Quadrocopters .....	73
11.2	Evaluation des Moduls.....	79
11.3	Softwareentwicklung .....	86
11.4	Zusammenführung .....	88
12	Auswertung von meteorologischen Daten .....	92
13	Ergebnisse & Diskussion .....	99
14	Ausblick .....	104
	Anhang .....	108
	Bilder .....	108
	Autorenverzeichnis .....	113
	Literatur .....	114

## Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Mode A (links), Mode B (rechts) .....	11
Abbildung 2: Die häufigsten Bauformen von Multicoptern.....	12
Abbildung 3: Quadrocopter in den Formen X, Plus und H. ....	13
Abbildung 4: Skizze des dynamischen Auftriebs $F_A$ und des Strömungswiderstands $F_W$ an einer angeströmten Tragfläche .....	15
Abbildung 5: Drehrichtung der Rotoren einer Drohne.....	18
Abbildung 6: Strahlungsintensität der Sonne auf der Erde im Vergleich zum schwarzen Körper .....	36
Abbildung 7: Spannungsverlauf verschiedener Akkus beim Drohnenflugtest ohne zusätzliches Gewicht .....	76
Abbildung 8: Spannungsverlauf verschiedener Akkus beim Drohnenflugtest mit zusätzlichem Gewicht.....	78
Abbildung 9: Spannungsverlauf des „3s 5000“-Akku mit und ohne zusätzlichem Gewicht .....	78
Abbildung 10: Platinen Layout des Moduls, welches die meteorologischen Sensoren beinhaltet .....	84
Abbildung 11: Spannungsverlauf des verwendeten Akkus beim Drohnenflugtest mit montiertem meteorologischem Modul.....	91
Abbildung 12: Verlauf der Lufttemperatur während des Testfluges.....	93
Abbildung 13: Verlauf der Feinstaubbelastung (Partikelgröße PM10) während des Testfluges .....	94
Abbildung 14: Verlauf der Feinstaubbelastung (Partikelgröße PM2,5) während des Testfluges .....	94
Abbildung 15: Grenzwerte für den Schadstoff Feinstaub; PM10 und PM2,5 .....	95
Abbildung 16: Verlauf des Luftdruckes während des Testfluges .....	96
Abbildung 17: Verlauf der berechneten Höhe auf Basis des Luftdrucks während des Testfluges .....	96
Abbildung 18: Vergleich von Luftdruck und berechneter Höhe über den Verlauf des Testfluges .....	97
Abbildung 19: Verlauf des UV-Indexes während des Testfluges .....	98
Abbildung 20: Quadrocopter im Flug während der Evaluation .....	108
Abbildung 21: Modifizierter Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren vor abschließendem Testflug .....	108
Abbildung 22: Bildschirmaufnahme der Desktop-App; Daten aus einem vorherigen Modultest ohne Quadrocopter .....	109
Abbildung 23: Auszug von meteorologischen Daten des Testfluges in Excel.....	110
Abbildung 24: Auszug von meteorologischen Daten des Testfluges im csv-Dateiformat .....	111
Abbildung 25: Verlauf der des eCO <sub>2</sub> -Wertes während des Testfluges.....	112
Abbildung 26: Verlauf der des TVOC-Wertes während des Testfluges .....	112

## **Tabellenverzeichnis:**

Tabelle 1: Verschiedene Flugmodi mit benötigten Komponenten.....	8
Tabelle 2: Klassifizierung UV-Index .....	38
Tabelle 3: Kriterien + Bewertung der Motorenvariante .....	48
Tabelle 4: Spannungen der einzelnen Zellen vor dem Flugtest; ohne zusätzliches Gewicht .....	75
Tabelle 5: Spannungen der einzelnen Zellen nach dem Flugtest, ohne zusätzliches Gewicht .....	75
Tabelle 6: Spannungen der einzelnen Zellen vor dem Flugtest; mit zusätzlichem Gewicht .....	77
Tabelle 7: Spannungen der einzelnen Zellen nach dem Flugtest; mit zusätzlichem Gewicht .....	77
Tabelle 8: Spannungen der einzelnen Zellen vor dem Flugtest; mit montiertem Modul ....	90
Tabelle 9: Spannungen der einzelnen Zellen nach dem Flugtest; mit montiertem Modul..	90
Tabelle 10: Gesetzte Anforderungen und Grad der Erfüllung .....	102

## **Abkürzungsverzeichnis:**

<b>BEMF</b>	Back Electromotive Force
<b>CFK</b>	kohlefaserverstärkter Kunststoff (dt.)
<b>DHBW</b>	Duale Hochschule Baden-Württemberg
<b>eCO<sub>2</sub></b>	Equivalent calculated carbon-dioxide
<b>ESC</b>	Electronic Speed Controller
<b>FET</b>	Feldeffekttransistor
<b>GPIO</b>	General Purpose Input Output
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>hPa</b>	Hektopascal
<b>I<sup>2</sup>C</b>	Inter-Integrated-Circuit
<b>IC</b>	Integrated Circuit
<b>ICNIRP</b>	Internationale Kommission zum Schutz vor Nicht-Ionisierender Strahlung (dt.)
<b>LoRa</b>	Long Range
<b>LuftVO</b>	Luftverkehr-Ordnung
<b>mAh</b>	Milli-Ampere-Stunden
<b>mbar</b>	Millibar
<b>μm</b>	Mikrometer
<b>nm</b>	Nanometer
<b>N.N.</b>	Normal Null = Höhe über Meeresspiegel
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>PM</b>	Particulate Matter
<b>PPS</b>	Precise Positioning Service



<b>PRN</b>	Pseudo Random Noise
<b>SMBus</b>	System-Management-Bus
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface
<b>SPS</b>	Standard Positioning Service
<b>TVOC</b>	Total Volatile Organic Compound
<b>UART</b>	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>UNEP</b>	Umweltprogramm der Vereinten Nationen (dt.)
<b>UTC</b>	Universal Time Coordinated
<b>UVI</b>	UV-Index
<b>WHO</b>	Weltgesundheitsorganisation (dt.)
<b>WMO</b>	Weltorganisation für Meteorologie (dt.)

# 1 Einleitung

Zivile unbemannte Flugobjekte können für eine Vielzahl an verschiedenen Aufgaben genutzt werden. Egal ob für die Vermessung von Landschaften, das Überwachen von bestimmten Gebieten oder das Aufnehmen von professionellen Videoaufnahmen für den nächsten Hollywood-Blockbuster. Eine weitere Möglichkeit ist die Überwachung von meteorologischen Daten in Städten oder auf dem Land. Mit diesen Daten können zum Beispiel hohe UV-Strahlungen, Lufttemperatur und -feuchtigkeit oder die Feinstaubbelastung schnell und leicht an verschiedenen Positionen und Höhen gemessen werden, wo andere herkömmliche Messverfahren an ihre Grenzen stoßen.

## 1.1 Motivation und Hintergrund

Durch die immer größer werdende Bedeutung des Klimawandels, sowohl für die Natur als auch für uns Menschen, wird es wichtiger sich immer mehr mit dem Klima und dem Wetter zu befassen. Das zeigt sich nicht nur in immer häufiger auftretenden Hitzewellen, Flächenbränden oder der wachsenden Zahl und Stärken von extremen Wetterereignissen, sondern auch durch die daraus entstehenden gesellschaftlichen Folgen, wie weltweiter Armut, Hunger und daraus entstehender Migration. Oft wird ein Wärme- und Hitzerekord nacheinander gebrochen, sodass die Einhaltung des 1,5 Grad-Ziels durch das Pariser Klimaabkommen im Jahre 2015 [1] immer mehr an Bedeutung gewinnt. [2] Durch mediale Aufbereitung dessen, entweder durch das Berichten von neuen Erkenntnissen und Studien oder dem Berichten über Wetterereignisse, die auf die Folgen des Klimawandels zurückzuführen sind, steigt das Verständnis für das Wetter und die Meteorologie auch in breiten Schichten der Gesellschaft. Dadurch bekommen meteorologische Kenngrößen wie die Lufttemperatur oder die Luftfeuchtigkeit eine höhere Bedeutung beispielsweise bei Waldbränden. Andere Kenngrößen, vor allem deren Überschreitung wie bei Feinstaub- und CO<sup>2</sup>-Werten, bekommen aufgrund von immer mehr befahrenen Straßen sowohl in Städten und Metropolregionen als auch auf dem Land mehr Relevanz. Festgelegte Grenzwerte werden häufiger überschritten, sodass sie gesundheitsgefährdend werden können. Um solche eine erhöhte Konzentration schnell festzustellen, einzugrenzen und Maßnahmen zu ergreifen, können Drohnen genutzt werden. Auch Werte der Lufttemperatur und Trockenheit erreichen immer häufiger neue Rekordwerte. Durch die Sammlung von Daten können vor allem schneller Rückschlüsse auf bevorstehende Wetterereignisse getroffen werden.

Drohnen können schnell und einfach verschiedene Orte erreichen und dort die Konzentrationen und meteorologischen Werte in der Luft messen. Somit stellt sich die Frage, ob es durch einen modifizierten Quadrocopter möglich ist und Vorteile generieren kann, meteorologische Daten zu sammeln und anhand derer das Wetter und Klima zu interpretieren.

Wo Wettersatelliten zu global Informationen über das Wetter und die Meteorologie sammeln können, Wetterballons zu regional und feste Wetterstation zu unflexibel sind, können Drohnen mit meteorologischen Sensoren vor allem bodennahe Schichten der Atmosphäre erkunden und hier Daten über das Wetter sammeln und interpretieren. Weshalb sich folgende Fragestellung ergibt, die es gilt zu beantworten.

**Problemstellung:** Kann ein Quadrocopter für die Erhebung von meteorologischen Daten in bodennahen Schichten verwendet werden und wie muss dieser modifiziert werden, dass er ausreichend und aussagekräftige Daten über die Meteorologie in bodennahen Schichten sammeln kann? Daran schließt sich die Frage an, in welchem Umfang und welcher Qualität meteorologische Daten erhoben werden können. Dies ist dafür relevant, Aussagen über das Wetter in geografischen Regionen und Höhen zu treffen, wo andere meteorologische Messverfahren an ihre Grenzen stoßen.

## **1.2 Ziel dieser Arbeit**

Ziel dieser Arbeit soll die Implementierung von diversen Sensoren, einer entsprechenden Datenübertragung und alternative Steuerungsmöglichkeiten, anhand eines Proof-of-Concept, an einem Quadrocopter sein. Das erfordert die Evaluierung und Auswahl eines geeigneten Quadrocopters sowie geeigneter Steuerungsmöglichkeiten und Sensoren, welche für das Proof-of-Concept verwendet werden sollen. So soll am Ende der Arbeit die beschriebene Problemstellung beantwortet werden.

### 1.3 Vorgehensweise

Um einen passenden Prototyp für das Proof-of-Concept zu implementieren, müssen erst die theoretischen Grundlagen der Funktionsweise eines Quadrocopters bearbeitet werden. Dazu gehören die notwendigen Bestandteile eines Quadrocopters sowie die Komponenten dessen Steuerung (siehe Kapitel 2.2). Des Weiteren soll ein kurzer Überblick über die allgemeinen Grundlagen des Fliegens eines Quadrocopters erfolgen (siehe Kapitel 3) gefolgt von der Beschreibung verschiedener Steuerungsmöglichkeiten (siehe Kapitel 4). Anschließend sollen die theoretischen Grundlagen des Wetters erarbeitet werden und Aussagen getroffen werden, wie diese interpretiert werden können (siehe Kapitel 5). Zudem werden mögliche Anwendungsgebiete und ein Vergleich mit anderen meteorologischen Messverfahren beschrieben (siehe Kapitel 6 und 7).

Im praktischen Teil der Arbeit sollen zuerst die Anforderungen an den Prototyp für das Proof-of-Concept erarbeitet werden (siehe Kapitel 8). In Anbetracht der Anforderungen soll eine konkrete Analyse und daraus folgende Auswahl eines Quadrocopters erfolgen (siehe Kapitel 9). Danach sollen die verschiedenen Sensoren für die Aufzeichnung der meteorologischen Daten ausgewählt werden (siehe Kapitel 10). Der praktische Teil endet mit der Fertigstellung des Proof-of-Concepts und den zugehörigen Tests der Funktionalität und Praktikabilität (siehe Kapitel 11). Anschließend werden die aufgezeichneten Daten der Tests ausgewertet und interpretiert (siehe Kapitel 12). Zum Schluss werden die Ergebnisse der Arbeit betrachtet, kritisch diskutiert (siehe Kapitel 13) und ein Ausblick für eine Fortsetzung des Projekts sowie für weiterführende Arbeiten gegeben (siehe Kapitel 14).

## 2 Allgemeine Grundlagen Multicopter

Dieses Kapitel basiert größtenteils auf dem Buch „Multicopter selber Bauen“ von Christian Rattat [3] und eigenem Wissen. Daher wird bis auf wenige Passagen nicht weiter auf das Buch referenziert.

### 2.1 Definition Multicopter

Multicopter ist eine Abkürzung für einen Multi-Rotor-Helikopter [3, S. 3f.]. Multi-Rotor bezieht sich auf die Anzahl der Motoren mit entsprechenden Propellern. Obwohl das Wort Rotor die richtige Bezeichnung ist, wird im Modellbaubereich von Propellern gesprochen. Helikopter gehören zu der Familie der Hubschrauber und bezeichnen sinngemäß Drehflügler, die per Definition senkrecht startende Fluggeräte sind. Diese besitzen einen oder mehrere Rotoren für die Erzeugung von Auftrieb. Im Falle eines Multicopter sind diese Fluggeräte mit mehreren Motoren mit Propellern versehen, welche für den Auftrieb zuständig sind. Durch die Anordnung der Motoren und der Propeller können Multicopter ohne eine Änderung der Anstellwinkel der Rotorblätter alle Bewegungen eines Helikopters durchführen.

Oft wird im deutschen Sprachgebrauch für das Wort Multicopter auch das Synonym Drohne verwendet. Dieses beschreibt jedoch nur ein unbenanntes Luftfahrzeug.

Aufgrund der Lage am Markt, der sich daraus ergebenden Einfachheit zur Beschaffung, der höheren Verfügbarkeit von Ersatzteilen und der dadurch stärker in der Gesellschaft vertretenen Anzahl als andere Multicopter, haben wir uns von Anfang an für einen Quadrocopter entschieden. Dazu liegen unsere Erfahrungen ausschließlich in der „Arbeit“ mit Quadrocoptern. Zudem sind die Komplexität und Beschaffungskosten bei einem Multicopter mit mehr als 4 Propellern deutlich höher als bei einem Quadrocopter, wobei eine gleichbleibende Funktionalität gewährleistet ist [3, S. 3f.]. Außerdem ist ein Quadrocopter meist kleiner als ein Multicopter mit weiteren Propellern, was aufgrund der Transportierbarkeit und den rechtlichen Regelungen einen Vorteil darstellt.

## **2.2 Bestandteile Multicopter**

### **2.2.1 Frame**

Die Grundlage jedes Multicopter bildet der Frame [3, S. 73f.]. Englisch für Rahmen oder Gestell dient der Frame als Verbindungsstück aller Komponenten. Es gibt viele verschiedene Varianten eines Frames, die sich durch ihr Material, ihren Aufbau und der benötigten Form unterscheiden. Der Frame wird nach dem Anwendungszweck der Drohne gewählt. Soll diese zum Beispiel für Rennen schnell und wendig sein, wird ein möglichst kleiner und leichter Frame ohne Erweiterungsmöglichkeiten genutzt. Generell lässt sich aber sagen, dass Drohnen immer möglichst leicht konstruiert werden, um ein geringes Gewicht und damit eine längere Flugzeit zu erreichen.

#### **Material**

Für den Frame können verschiedene Materialien verwendet werden. Allgemein wird darauf geachtet, dass es möglichst leicht und robust ist. Folgende Materialien können für den Bau einer Drohne genutzt werden:

- Kunststoff
- Holz
- Aluminium
- Glasfaser
- Kohlefaser

Auch eine Kombination der Materialien ist möglich. So können die Arme für die Befestigung der Motoren aus Aluminium bestehen und der Rest aus Holz. Jedoch hat sich inzwischen Kohlefaser und Kunststoff als Material für den Rahmen einer Drohne durchgesetzt. Diese Materialien lassen sich sowohl leicht und stabil herstellen als auch kombinieren. Beispiel hierfür ist kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK). CFK leitet keine Elektrizität, besitzt eine hohe Elastizität und durch die geringe Dichte ist es leichter als Aluminium. Diese Materialien lassen sich auch mit einem 3D-Drucker verarbeiten.

#### **Aufbau und Form**

Der Aufbau und die Form des Frames hängt vom jeweiligen Einsatzzweck ab. Soll ein Octocopter gebaut werden, so benötigt man einen größeren Frame mit 8 Armen, an den die Motoren befestigt werden.

### 2.2.2 Motoren

Im Modellbaubereich haben sich sowohl elektrische Motoren als auch Verbrennungsmotoren mit Benzin oder Kerosin durchgesetzt [3, S. 99f.]. Gerade für größere Modelle sind Verbrennungsmotoren wie zum Beispiel Turbinen vertreten. Für die Nutzung an einem Multikopter sind diese jedoch durch ihre Größe und die aufwendige Verteilung bzw. mehrere Motoren völlig ungeeignet. Daher haben sich Elektromotoren bei Multikoptern durchgesetzt. Ein Elektromotor besteht aus einem beweglichen Rotor, an dem der Propeller befestigt ist, und einem festen Stator, an dem der Motor mit dem Gestell verbunden wird. Es kann zwischen zwei verschiedenen Arten bzw. Bauweisen unterschieden werden, „brushed“ und „brushless“ Motoren, also mit oder ohne Bürsten.

In klassischen Elektromotoren besteht der Stator aus Permanentmagneten und der Rotor aus verschiedenen Spulen. Die Spulen werden mit Spannung über mehrere Bürsten versorgt. Da sich der Rotor dreht, können keine Kabel für die Übertragung der Spannung genutzt werden. Nachteil an dieser Bauweise ist, dass sich die Bürsten mit der Zeit abnutzen und getauscht werden müssen. Zudem sinkt die Leistung durch die Abnutzung bis wieder neue Bürsten installiert werden. Ohne Bürsten ist der Motor nicht mehr funktionsfähig.

Ein Motor ohne Bürsten dreht die Bauweise um. So besteht der Stator aus den verschiedenen Spulen und der Rotor enthält die Permanentmagnete. Die Spulen innerhalb des Stators können einfach über Kabel mit der Motorsteuerung verbunden werden. Durch diese Bauweise entfällt das Tauschen von Bürsten und die Wartungsnotwendigkeit. Ein Hauptgrund für die Verwendung ist der hohe Gleichlauf der Motoren. Diese Art wird auch zum Beispiel in Festplatten oder CD-Spielern verwendet. Die Drehzahl lässt sich genauer ansteuern. Auch kann ein Motor ohne Bürsten die Richtung mit der passenden Steuerung problemlos wechseln. Zusätzlich lässt sich ohne zusätzliche Sensoren mithilfe des Back Electromotive Force (BEMF)-Prinzips die Drehzahl ausreichend genau messen.

„Brushless“-Motoren gibt es in zwei verschiedenen Bauarten, Innen- und Außenläufer. Bei einem Innenläufer sitzt der Rotor innerhalb des feststehenden Gehäuses des Motors. Bei Außenläufern ist der Rotor das Gehäuse und dreht sich um den innenliegenden Stator. Im Modellbaubereich werden meist Außenläufer genutzt, da diese den Vorteil der einfachen Montage von Propellern zulassen und zusätzlich durch die Drehung der Motorglocke eine Art „integrierte Kühlung“ mitbringen.

### **2.2.3 Electronic Speed Controller (ESC)**

Die Motoren können nicht direkt an den Akku angeschlossen werden, diese würde immer mit voller Drehzahl drehen [3, S. 108f.]. Außerdem werden oft Motoren mit Drehstrom verwendet, sodass für den Betrieb sowieso eine Steuerung benötigt wird. Dafür gibt es im Modellbau sogenannte ESCs, kurz für Electronic Speed Controller. Diese Regeln den Strom und steuern dadurch Geschwindigkeit der Motoren. Es gibt ESCs sowohl für „brushed“ als auch „brushless“ Motoren und solche mit oder ohne zusätzlicher Spannungsversorgung.

ESCs bestehen aus einer Schaltung aus elektrischen Bauteilen, die es ermöglichen, den angeschlossenen Motor mit einer bestimmten Geschwindigkeit drehen zu lassen. Darin werden bei hochwertigen Geschwindigkeitsreglern meist N-Feldeffekttransistor (FET)-Schaltungen verwendet.

Die Ansteuerung von ESCs funktionieren über Pulsweitenmodulation (PWM) oder spezielle Protokolle wie zum Beispiel DSHOT [4]. Der Vorteil bei der Verwendung eines speziellen Protokolls wie DSHOT ist eine höhere Auflösung, keine Abweichung und notwenige Kalibrierung der ESCs und eine bidirektionale Kommunikation für Telemetriedaten wie der aktuelle Stromverbrauch, die Drehzahl oder die Temperatur des ESCs.

### **2.2.4 Flugcontroller**

Für die Übersetzung der Steuersignale, die Ansteuerung der Motoren und die Überwachung und Steuerung verschiedener Sensoren wird ein zentraler Flugcontroller genutzt [3, S. 162f.]. Dieser besteht meist aus einer Platine mit einem Haupt-Integrated Circuit (IC), in welchem alle Daten verarbeitet werden, weiteren Sensoren für die Lagebestimmung und Anschlussmöglichkeiten für alle externen Sensoren und Aktoren.

Für die Lagebestimmung und Flugstabilisierung werden meist Gyroskope verwendet. Daneben können zusätzlich Magnetometer, Beschleunigungsmesser und Barometer für eine möglichst genaue Positionsbestimmung genutzt werden. Für eine absolute Positionsbestimmung kann zusätzlich ein Global Positioning System (GPS) - Empfänger angeschlossen werden. Dieser wird meist oben auf den Multicopter befestigt und mit einem Kabel mit dem Flugcontroller verbunden.

Um den Flugcontroller und alle weiteren Geräte mit Strom zu versorgen, wird meistens ein zusätzliches Spannungsversorgungsmodul mitgeliefert. Dieses stellt eine feste Spannung aus



der schwankenden Akku-Spannung für den Betrieb bereit. Die meisten Module übermitteln zusätzlich den aktuellen Akku-Stand an den Flugcontroller, damit dieser bei schwachem Akku-Stand einen Alarm auslösen kann und notfalls von allein die Landung einleitet.

Die Konfiguration und Kalibrierung erfolgt normalerweise über eine PC-Software mithilfe eines USB-Verbindungskabels. Es gibt jedoch inzwischen auch Flugcontroller, die sich über Bluetooth oder WLAN konfigurieren lassen. In der PC-Software können dann die einzelnen Sensoren kalibriert und der Nullpunkt festgelegt werden. Auch Software-Updates sind über die Software möglich. Neben der Kalibrierung muss der angeschlossene Funk-Empfänger eingerichtet werden. Für diesen muss das passende Kommunikationsprotokoll ausgewählt und der richtige Anschluss-Port festgelegt werden. Zusätzlich müssen die entsprechenden Funk-Kanäle ihren Funktionalitäten zugeordnet werden. Die grundlegenden Steuerkanäle sind der Gas-Kanal, das Höhenruder, das Querruder und das Seitenruder. Ohne diese kann der Multicopter nicht komplett gesteuert werden. Daneben wird oft ein Kanal für die Auswahl des Flugmodus festgelegt. In Tabelle 1 werden verschiedene Flugmodi aufgelistet, welche von den meisten Flugcontrollern unterstützt werden.

Flugmodus	Fachbezeichnung	Gyroskop	Beschleunigungssensor	Magnetometer	Barometer	GPS
Manuell	PassThrough					
Lage halten	Acro	X	X			
Horizontal stabilisiert	Horizon	X	X			
Höhe stabilisiert	Altitude Hold	X	X		X	
Festes Koordinatensystem	HeadFree	X	X	X		
Lage, Höhe, Position stabilisiert	GPS Position Hold	X	X	X	X	X
Notfallmodus	Failsafe					

*Tabelle 1: Verschiedene Flugmodi mit benötigten Komponenten [3, S. 163]*

Der Notfallmodus wird anders als die anderen Modi automatisch aktiviert, sobald das Signal der Funkfernsteuerung verloren geht. Er soll eine vordefinierte Aktion durchführen, um den Multicopter möglichst sicher und unbeschädigt wieder auf den Boden zu bringen. Dies kann eine einfache Drosslung und damit ein langsames Absinken des Multicopter bedeuten, es kann aber auch eine return-to-home-Aktion durchgeführt werden, wenn der Flugcontroller dies unterstützt. Dann fliegt der Multicopter auf einer bestimmten Höhe an seine Startposition zurück und landet dort.

## 2.2.5 Akku

Für die Spannungsversorgung der Motoren, ESCs und Flugcontrollern sowie jeder zusätzlichen Geräte werden größtenteils Lithium-Polymer-Akkumulatoren, kurz LiPo-Akkus genutzt [3, S. 116f.]. LiPo-Akkus gehören zu den Lithium-Ionen-Akkumulatoren und besitzen im Vergleich zu anderen Akkus die höchsten Energiedichten. Nachteile dieser Akkus sind die begrenzten Ladezyklen und eine höhere Brandgefahr bei nicht ordnungsgemäßem Umgang. Deshalb müssen LiPo-Akkus mit speziellen Schutzvorrichtungen gelagert und geladen werden.

Ein LiPo-Akku besteht aus einer oder mehreren Akku-Zellen. Jede Akku-Zelle besitzt eine Nennspannung von 3,7 Volt. Die Ladeschlussspannung beträgt 4,2 Volt, die Zelle darf unter Last nicht unter 3,3 Volt entladen werden, sonst wird diese langfristig beschädigt. Die Akkus besitzen keine zusätzlichen elektronischen Maßnahmen, die für den Schutz des Akkus dienen. Zwar besitzen Akkus bei kommerziell verwendeten Multicopter ein Battery Management System (BMS). Solch ein BMS verhindert eine Unter- oder Überladung. Im Modellbau werden jedoch immer noch reine Akkus ohne zusätzliche Komponenten verwendet. Um hohe Ströme und damit dicke Kabel zu vermeiden, werden mehrere Akku-Zellen in Reihe geschaltet, womit die Spannung erhöht und der Strom verringert wird. Die Anzahl der zusammengeschalteten Zellen wird mit S angegeben. So hat ein 4S Akku 4 in Reihe geschaltete Zellen mit einer Spannung von 14,8V ( $3,7 \cdot 4$ ). Bei einem Akku mit mehr als einer Zelle haben alle Zellen dieselbe Kapazität. Diese wird meist in Milli-Ampere-Stunden (mAh) angegeben. LiPo-Akkus haben eine in C angegebene Lade- und Entladerate. Der Entladestrom lässt sich mit C-Rating \* Kapazität berechnen. Das bedeutet, wenn ein Akku 45C besitzt und eine Kapazität von 2000mAh hat, kann dieser dauerhaft mit  $45 \cdot 2000\text{mAh} = 90000\text{mA} = 90\text{A}$  belastet werden. Oftmals wird zusätzlich eine kurzzeitige Maximalbelastung angegeben.

LiPo-Akkus müssen mithilfe eines speziellen Ladegerätes geladen werden. Mit diesen Ladegeräten wird sichergestellt, dass jede Zelle gleichmäßig geladen wird. Dieser Ladevorgang wird balance-loading (engl.) genannt, was also das Ausgleichen der verschiedenen Akku-Zellen bezeichnet. Dafür besitzt jeder LiPo-Akku mit mehreren Zellen einen zusätzlichen Balancer-Anschluss, bei welchem jede Zelle einzeln ausgeführt ist. Dieser wird zusätzlich zum normalen Akku-Anschluss mit dem Ladegerät verbunden. Das Laden sollte nur unter Aufsicht durchgeführt werden und der Akku in einem feuerfesten Beutel geschützt sein.

## 2.2.6 Funkempfänger

Der Funkempfänger empfängt die Steuersignale der Funkfernsteuerung und gibt diese an den Flugcontroller weiter [3, S. 133f.]. Für die Versorgung mit Spannung wird der Empfänger normalerweise mit an den Spannungsregler des Flugcontrollers angeschlossen. Die verschiedenen Steuerkanäle können serielle oder parallele Protokolle übertragen. Man spricht dort von RX-Protokollen, die für die Kommunikation zwischen Funkempfänger und Flugcontroller zuständig sind (analog zu TX-Protokollen, die dies für die Kommunikation der Funksteuerung und des Funkempfängers übernehmen). Klassisch ist die parallele Übertragung, bei der jeder Kanal ein eigenes Kabel mit Spannungsversorgung und Signal mit Pulsweitenmodulation besitzt. Diese Übertragungsvariante kommt von der Flugzeug-Modellbauzeit, bei welcher die ESCs und Servomotoren für die Klappensteuerung direkt an den Funkempfänger angeschlossen wurden. Um Platz und Gewicht zu sparen, wurden serielle Protokolle entwickelt, welche die Steuerkanäle über ein einziges Kabel übertragen. Die meistverwendeten, über Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) kommunizierenden Protokolle sind Serial BUS (SBUS, Futaba und Frsky) und CRSF (Crossfire, TBS und ELRS). Es gibt auch serielle Protokolle, bei welchen der Flugcontroller den Empfänger direkt über ein Serial Peripheral Interface (SPI) anspricht. Diese werden jedoch normalerweise nur bei Flugcontrollern mit integrierten Empfängern eingesetzt und sind direkt auf der Platine verbunden.

Durch die UART-Schnittstelle kann auch eine Kommunikation des Flugcontrollers an den Funkempfänger erfolgen, damit Telemetriedaten weiter an die Funkfernsteuerung übermittelt werden können. Zu den Daten gehört beispielsweise die aktuelle Motordrehzahl in Umdrehungen pro Minute, GPS-Koordinaten, die aktuelle Fluggeschwindigkeit, die aktuelle Flughöhe, der aktuelle Stromverbrauch und die Spannung des Akkus. Dies muss der Empfänger jedoch unterstützen und je nach verwendetem Protokoll (zum Beispiel bei Frsky „Smart Port“) ein zusätzliches Kabel angebracht werden. Andere Protokolle vereinen die Steuersignale mit den Telemetrie-Signalen auf eine Leitung (zum Beispiel Frsky FPort).

## 2.2.7 Fernsteuerung

Die Fernsteuerung ist für die Aufnahme und Übermittlung der Steuerdaten zuständig [3, S. 133f.]. Für die Steuerung sind in jeder Fernbedienung 2 Steuerknüppel verbaut, mit welchen die drei Ruder und das Gas gesteuert werden können. Die Steuerknüppel werden mittels Federn immer automatisch in ihre Neutralposition bewegt. Nur das Gas bleibt auf der eingestellten Stellung stehen, sonst würde beim Loslassen automatisch 50% Gas gegeben werden. Der Aufbau der vier Steuerkanäle wird in 4 Modi angegeben, Mode A (Abbildung 1) und Mode B (Abbildung 1) sind dabei die meistverwendeten.

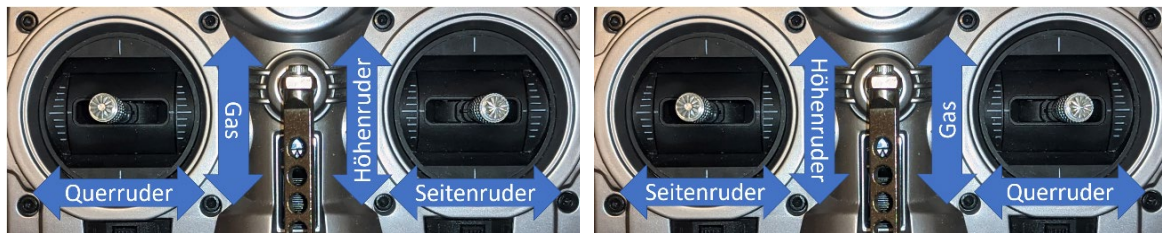


Abbildung 1: Mode A (links), Mode B (rechts)

Neben den Steuerknüppeln gibt es bei modernen Funksteuerungen oft noch zusätzliche Schalter, Taster und Drehregler, welche sich frei programmieren lassen. Zum Beispiel kann ein Schalter für die Auswahl eines Flugmodus konfiguriert werden oder ein Poti für die Empfindlichkeit der Steuerbefehle.

Die Steuerbefehle werden über ein Funksendemodul an den Funkempfänger versendet. Dieses ist entweder bereits in der Funksteuerung eingebaut oder kann über einen Modulschacht eingesteckt werden. Die Kommunikation läuft dann über ein TX-Protokoll wie zum Beispiel ACCST (Frsky), DSM (Spektrum), TBS Crossfire oder ExpressLRS. Der Empfänger muss mit dem Protokoll kompatibel sein, um die Signale zu empfangen. Als Trägerfrequenz kann eine Frequenz zwischen 2,4GHz, 900MHz oder 868MHz genutzt werden, wobei 900MHz in Deutschland nicht zulässig ist. Die verschiedenen Funkprotokolle besitzen für die Übertragung verschiedene Verfahren für Störungsvermeidung (zum Beispiel Frequenzsprünge), Bandbreite (Frequenz, Paketgröße), Reichweite (Sendeleistung) und Latenz (Paketgröße, Häufigkeit der Paketübermittlung).

Die empfangenen Telemetriedaten können über das Display dargestellt werden. Zusätzlich können diese für eine spätere Auswertung gespeichert werden. Auch das Einstellen eines Alarmes ist möglich, zum Beispiel wenn die Akkuspannung unter einen bestimmten Wert fällt.

Durch zusätzliche Funktionen wie beispielsweise ein Flight-Timer kann der Pilot die Funksteuerung genauer an seine Bedürfnisse anpassen.

## 2.3 Arten von Multicoptern

Für Multicopter gibt es verschiedene Ausführungen und Bauformen, welche auch ihre eigene Bezeichnung mitbringen [3, S. 16f.]. Dazu gehören Multicopter mit einer unterschiedlichen Anzahl von Motoren und Propellern. Die gängigsten Ausführungen sind:

- Tricopter mit drei Rotoren
- Quadrocopter mit vier Rotoren
- Hexacopter mit sechs Rotoren
- Octocopter mit acht Rotoren

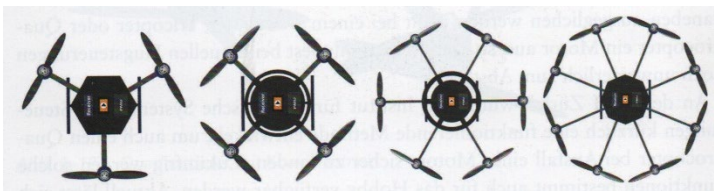


Abbildung 2: Die häufigsten Bauformen von Multicoptern, [3, S. 17]

Ein Vorteil eines Multicopter mit mehr als vier Rotoren ist, dass Motorausfälle durch die restlichen Motoren abgefangen werden können. Außerdem kann die Leistung besser auf die Motoren verteilt werden. Nachteilig ist der zusätzliche Materialaufwand und die erhöhte Komplexität des Multicopters.

Neben den Ausführungen gibt es verschiedene Bauformen, welche die Anordnung der Rotoren bestimmen. Dazu gehören die X-Form, Plus-Form und H-Form.

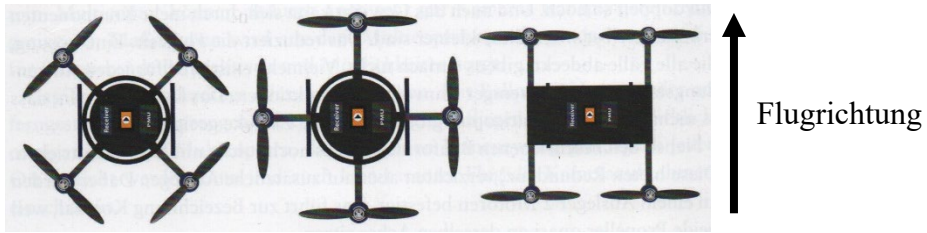


Abbildung 3: Quadrocopter in den Formen X, Plus und H. [3, S. 17]

Die Plus-Form und X-Form unterscheiden sich nur in der Ausrichtung der Flugrichtung. Die H-Form hingegen hält mehr Platz für zusätzliche Ausstattung oder Nutzlast vor.

### **3 Allgemeine Grundlagen des Fliegens**

Auch das Fliegen basiert wie alles im Leben auf physikalischen Grundsätzen. Die Physik, die beim Fliegen zum Tragen kommt, kann dabei als Flugphysik, besser Aerodynamik, bezeichnet werden. Sie ist Teil der Strömungslehre basierend auf der Strömungsmechanik. Hierbei wird das Verhalten von Körpern in der Luft und die physikalischen Kräfte, die beispielsweise auf Luftfahrzeuge und Vögel wirken und ermöglichen, dass sie fliegen können, untersucht und beschrieben. Das physikalische Grundprinzip des teilweise als Phänomen bezeichneten Fliegens ist der dynamische Auftrieb. Dieser Auftrieb bildet nicht nur die Grundlage für das natürliche Fliegen, sondern auch für die Funktion von Tragflächen, Propellern und Rotoren an Luftfahrzeugen, wie Flugzeugen und Hubschraubern aber auch an unbemannten Flugobjekten, den Drohnen.

#### **3.1 Physikalische Grundlagen – Aerodynamik**

Der dynamische Auftrieb ist Teil der Strömungslehre im Bereich der Strömungsmechanik. Er ist der Anteil der auf einen umströmten Körper wirkenden Kraft, der senkrecht zur Anströmrichtung steht. Dieser Auftrieb entsteht bei der Umströmung entsprechend geformten Tragflächen, indem die Luft nach unten beschleunigt wird. Die dadurch entstehende und abwärts gerichtete Kraft auf die Luft gilt als Gegenkraft zur aufwärtsgerichteten Kraft, die auf die Tragfläche wirkt und als Auftrieb bezeichnet wird. Wenn Auftriebskräfte Richtung Erdboden wirken, werden sie als Abtrieb bezeichnet. Die Umströmung bei einer Drohne wird durch den Anstellwinkel und durch die Rotation der Rotoren erzeugt. Dadurch herrscht zudem ein Unterdruck auf der Oberseite einer Tragfläche, der das Luftfahrzeug nach oben „zieht“. Gleichzeitig herrscht ein Überdruck an der Unterseite der Tragflächen, der diese nach oben „drückt“. Sobald sich ein Körper einer bestimmten Form und Position relativ zu einem Gas oder einer Flüssigkeit bewegt, wirken auf den Körper Kräfte, die durch die Umströmung hervorgerufen werden (vergleiche Bernoulli-Effekt). Die Richtung des dynamischen Auftriebes wird durch die Richtung der Anströmung definiert, die sich durch Anstellwinkel der Rotoren und Rotation ergibt. Es resultiert eine Strömungskraft, die sich in zwei weitere Kräfte aufteilen lässt. Einmal in den Widerstand, der in Anströmrichtung wirkt, und den Auftrieb senkrecht zur Anströmungsrichtung. Weiter greift die Strömungskraft am Druckpunkt, in Richtung der Winkelhalbierenden zwischen den anderen beiden Kräften, an [5].

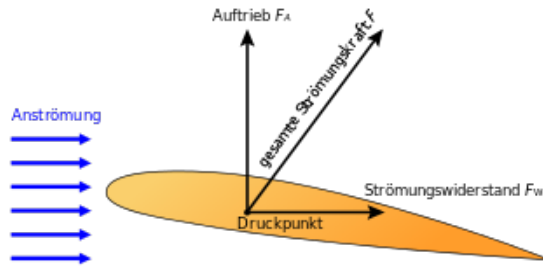


Abbildung 4: Skizze des dynamischen Auftriebs  $F_A$  und des Strömungswiderstands  $F_W$  an einer angeströmten Tragfläche [5]

Generell lassen sich Luftfahrzeuge danach kategorisieren, nach welchem Prinzip sie ihren Auftrieb erzeugen. Zum einen gibt es Luftfahrzeuge, die „leichter als Luft“ sind. Dazu gehören beispielsweise Luftschiffe. Sie erzeugen ihren Auftrieb, indem ein Auftriebskörper mit einem Traggas gefüllt ist. Solch ein Luftfahrzeug steigt dann auf, wenn die Dichte der abgeschlossenen Hülle kleiner ist als die der umgebenden Luft [6]. Folglich gibt es auch Luftfahrzeuge, die schwerer als Luft sind. Diese lassen sich einmal als Starrflügler und als Drehflügler kategorisieren. Zu den Starrflüglern gehören die klassischen Flugzeuge mit Tragflächen. Die Drehflügler beinhalten beispielsweise Hubschrauber und Multirotordrohnen. Diese beiden Varianten erzeugen unterschiedlich den Auftrieb: Die Starrflügler durch den Schub der Triebwerke, wodurch ein dynamischer Auftrieb an den Tragflächen erzeugt wird. Während bei den Drehflüglern der Auftrieb durch die Rotoren und deren Anstellwinkel und Rotation erzeugt wird. Hierdurch ergibt sich auch der größte Vorteil der Drehflügler, denn durch ihre Variante der Auftriebserzeugung ist ein vertikales Steigen und Sinken möglich. Deswegen lässt sich das Luftfahrzeug auch im Schwebeflug halten. Zu den Nachteilen bei Drehflüglern zählt, die im Vergleich zu Starrflüglern, ineffiziente Erzeugung des Auftriebes. Der Betrieb ist somit sehr energieintensiv, weshalb bei der Neuentwicklung von Drohnen die Optimierung des Energieverbrauchs eine zentrale Rolle spielt. Einer der größten Nachteile bei Drehflüglern ist, dass die Tragfläche der Rotor ist, der gleichzeitig durch die Rotation den Auftrieb erzeugt/erzeugen muss. Somit ist eine dauerhafte Energiezufuhr von Nöten. Bei einem Ausfall dieser Energie würde der Drehflügler zu Boden fallen. Bei einem Starrflügler ist die Auftriebserzeugung an die Tragflächen gekoppelt, weshalb bei einem Triebwerksausfall durch die Eigenbewegung des freien Falls und der richtigen Positionierung der Tragflächen ein natürlicher Auftrieb an diesen erzeugt werden kann. Deshalb kann ein Starrflügler im Gegensatz zum Drehflügler durch den potenziellen Gleitflug sicher landen.



Damit der dynamische Auftrieb bei Drehflüglern erzeugt werden kann, ist ein sehr großer Luftmassendurchsatz notwendig. Dieser Luftmassendurchsatz wird in der Form einer von oben nach unten gerichteten Luftströmungssäule mit dem Durchmesser des Rotors abgebildet, die er durch die Rotation der Rotoren selbst erzeugt. Da der Rotor eines Drehflüglers gleichzeitig die Tragfläche bildet und Starrflügler eine vergleichsweise große Tragfläche, auch in Bezug zu deren Rumpf, haben, ist der zu erzeugende Luftmassendurchsatz bei Drehflüglern zur Erzeugung des Auftriebes deutlich größer als der bei der Erzeugung des Vortriebes von Starrflüglern. Die Luftströmungssäule ist der Abwind, der unterhalb des schnell rotierenden Rotors einer Multirotordrohne entsteht. Die Strömungsgeschwindigkeit dieses Abwindes entsteht in Abhängigkeit von Radius und Drehzahl des Rotors, wobei die Luft langsamer strömt, je näher sie sich an der Nabe des Rotors befindet, da die Luft, die weiter von der Nabe entfernt ist, mehr Strecke in der gleichen Zeit zurücklegen muss. Aufgrund dieser unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten entlang des Rotorblatts, muss dessen Tragflächenprofil so beschaffen sein, dass es die Luftströmung an allen Radiussegmenten optimal für den Auftrieb ausnutzen kann. Das erreicht man zum Beispiel dadurch, dass die meisten Luftschrauben umso dicker und stärker angewinkelt sind, umso näher ihre Blattsegmente an der Nabe liegen.

Eine wichtige Flugeigenschaft ist der vertikale Sinkflug. Dieser kommt zustande, wenn die Rotoren ihre Drehzahl verringern. Aufgrund dieser Verringerung der Drehzahl, verringert sich auch der Auftrieb. Da die Rotoren auch gleichzeitig die Tragfläche bilden, führt eine zu geringe Drehzahl zu einem instabilen Flugverhalten, was gleichzeitig auch durch die von den Rotoren selbst erzeugten Luftverwirbelungen begünstigt wird.

So wie durch den Sinkflug kann durch den sogenannten Bodeneffekt Probleme entstehen. Durch den verdrängten Luftmassenstrom nach unten entsteht dieser Bodeneffekt. Er kommt dann zum Tragen, wenn ein luftumströmtes Fluggerät in Bodennähe einen zusätzlichen dynamischen Auf- oder auch Abtrieb erfährt. Der Luftmassenstrom kann beim Bodeneffekt nicht mehr so leicht nach unten entweichen, da er vom Boden „aufgehalten“ wird. Aufgrund dessen wird er zu den Seiten abgelenkt oder staut sich. In der Folge bildet sich eine linsenförmige Luftblase, auf der der Drehflügler schwebt und oft Instabilität erfährt, da durch die mangelnde Ablenkung der Luft nach unten größere Verwirbelungen entstehen als beim einem Flug in größerer Höhe. Die Intensität, in der der Bodeneffekt auftritt, ist sehr abhängig vom Typ und von der Größe des Drehflüglers [7, S. 99ff.].

Bei den Drehflüglern muss man unterscheiden, wie der Auftrieb zustande kommt. Bei Hubschraubern entsteht der Auftrieb am Hauptrotor, indem die Rotorblätter geneigt werden, so der Anstellwinkel verändert wird und ein stärkerer Auftrieb entstehen kann. Der Auftrieb ist damit unabhängig von der Drehzahl, die über den ganzen Flug hinweg konstant bleibt. Durch das Neigen der Rotorblätter kann der Hubschrauber nicht nur die Höhe ändern, sondern auch vor-, rück- und seitwärts fliegen. Durch den Antrieb des Hauptrotors entsteht ein gegen die Drehrichtung des Hauptrotors wirkendes Drehmoment auf den Rumpf des Hubschraubers. Um dieser Drehung um die Vertikalachse entgegenzuwirken, ist am Hubschrauber ein Heckrotor angebracht, der einen horizontalen Schub erzeugt. Die Einstellung des Heckrotors muss bei jeglicher Flugzustandsänderung angepasst werden, da sich das Drehmoment, beispielsweise durch Änderung des Neigungswinkels der Hauptrotorblätter, ändert. Der Heckrotor dient nicht nur dem Ausgleich des Drehmomentes, sondern auch zur Drehung um die Vertikalachse (links/rechts-Drehung). Dies geschieht durch Ändern des Einstellwinkels der Heckrotorblätter. Im Prinzip wird hier, wie beim Hauptrotor auch, ein Auftrieb erzeugt, lediglich in horizontaler Richtung und kein vertikaler Auftrieb.

Der Unterschied zu den Rotoren von Drohnen besteht darin, dass diese starren Rotoren haben und deren Neigungswinkel nicht anpassen können. Deshalb regeln sie den Auftrieb über ein Verändern der Drehzahl. Während beim Steig-/Sinkflug die Drehzahl aller Rotoren erhöht/verringert wird, wird beim Rückwärts-/Vorwärtsfliegen respektive dem Neigen um die Horizontalachse, die Drehzahl der vorderen beziehungsweise hinteren Rotoren erhöht. Das Gleiche gilt auch für das Seitwärtsfliegen/Neigen um die Längsachse nach links und rechts. Hier wird der Schub der jeweils linken/rechten Motoren erhöht. Allgemein ist zu sagen, dass bei allen Kippbewegungen die entgegengesetzten Rotoren zur gewünschten Flugrichtung ihre Drehzahl erhöhen und wenn die Drohne sich in dem Neigungswinkel befindet, der durch den Joystick vorgegeben wurde und somit eine Lageänderung erzielt wurde, drehen alle Rotoren wieder mit der gleichen Drehzahl. Diese ist aber größer als davor, damit die Höhe gehalten werden kann, da durch die Neigung nicht nur ein Richtungsschub erzeugt wird, sondern auch ein gewisser Abtrieb. Der bei den Hubschraubern beschriebene Drehmoment wird nicht durch ein Heckrotor ausgeglichen, sondern dadurch, dass die jeweils nebeneinander liegenden Rotoren in die jeweils entgegengesetzte Richtung drehen.

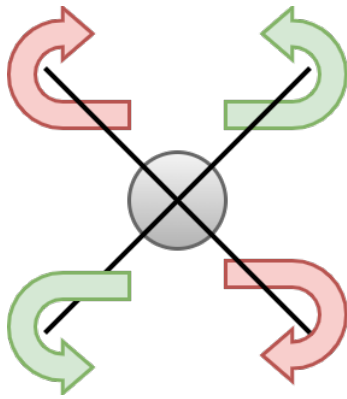


Abbildung 5: Drehrichtung der Rotoren einer Drohne

Somit drehen die diagonal gegenüberliegenden Rotoren in die gleiche Richtung. Durch zwei Rotoren pro Drehrichtung ist das Drehmoment ausgeglichen. Dadurch ist auch das Drehen um die Vertikalachse möglich, indem zwei Rotoren mit der gleichen Drehrichtung mit einer niedrigeren Drehzahl drehen und die entsprechend anderen mit einer höheren. Deshalb kann sich die Drohne drehen, da das Drehmoment stärker ist und sich so der Rumpf von der Drehrichtung mit der größeren Drehzahl „wegdreht“. Durch das Herunterfahren der einen Drehzahl und das Hochfahren der anderen Drehzahl pro Drehrichtung wird der gleiche Auftrieb wie vor der Aktion erzeugt und somit die Höhe gehalten. Weiterhin haben die Rotorblätter der jeweils anderen Drehrichtung den inversen Einstellwinkel, damit Auftrieb durch das Drehen in die andere Richtung entstehen kann.

### 3.2 Rechtliche Grundlage

Der Luftraum in Deutschland ist Hoheitsgebiet der Bundesrepublik Deutschland. In diesem finden durch die unterschiedlichsten Verkehrsmittel viele verschiedene Luftraumbewegungen statt. Ähnlich wie auf den Straßen gibt es analog zur Straßenverkehrsordnung Verordnungen zur Regelung der Verkehrsteilnehmer im Luftraum. Zu diesen Verkehrsteilnehmern gehören auch Drohnen, die bereits beschrieben worden sind. Aufgrund des höheren Gefahrenrisikos, das durch den Luftraum und dessen Teilnehmer entsteht, aber auch aufgrund der höheren Komplexität, zum Beispiel durch die Darstellung in 3-Achsen (Höhe-Breite-Länge) oder der fehlenden und gleichzeitig einschränkenden Bebauungen, sind hierfür deutlich mehr Regelungen notwendig als etwa auf der Straße. Somit haben Drohnen ihre eigene Verordnung innerhalb des Luftverkehrsgesetzes.

Die aktuell geltenden Regelungen für Drohnen (unbemannte Fluggeräte) sind in der Anpassung des Luftverkehrsgesetzes durch das „Gesetz zur Anpassung nationaler Regelungen an die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb der unbemannten Luftfahrt“ [8]<sup>1</sup> beschrieben. Wie sich erkennen lässt, existiert nun durch eine Entscheidung der Europäischen Kommission am 24.05.2019 eine EU-weite Regelung für die unbemannte Luftfahrt. Diese wurde durch oben genanntes Gesetz zum 15.06.2021 in Deutschland umgesetzt, indem mehrere Gesetze und Verordnung in der Luftfahrt geändert und ergänzt wurden. Davor mussten für jedes Land Informationen eingeholt werden, um zu erfahren, unter welchen Bedingungen Drohnen geflogen werden dürfen. Durch diese einheitliche Regelung ist es für EU-Bürger einfacher, den Überblick zu behalten. Gleichzeitig müssen Piloten<sup>2</sup> einige neue „Aufgaben“ erfüllen, um weiterhin eine Drohne im Luftraum der EU fliegen zu dürfen und den Regelungen zu entsprechen. Diese „Aufgaben“ und Regelungen werden nun im Folgenden vorgestellt:

Als Erste wird der Betrieb von Drohnen in drei Betriebskategorien eingeteilt. Es existiert die Kategorie „offen“, „speziell“ und „zulassungspflichtig“. In letztere Kategorie wird der Betrieb von großen und schweren Drohnen, die beispielsweise zur Beförderung von Personen oder gefährlichen Gütern konstruiert sind, eingeordnet. Die „spezielle“ Kategorie regelt den Betrieb von Drohnen, die nicht mehr in die „offene“ Kategorie fallen, da sie außerhalb der Sichtweite betrieben werden und/oder schwerer als 25kg sind. In die „offene“ Kategorie fällt die Drohne des Projektes und wahrscheinlich sonst das Gros der Drohnen, die von Privatpersonen in Deutschland benutzt werden, weshalb folgend nur die Bestimmungen dieser Kategorie betrachtet werden. Als generelle Regelungen dieser Kategorie ist beschrieben, dass nur Drohnen unter 25kg Startgewicht betrieben werden dürfen, die nur in Sichtweite des Piloten, bis maximal 120m Höhe geflogen werden, und keine gefährlichen Güter transportieren und Gegenstände abwerfen können. Zudem gibt es noch CE-Klassifizierungen für Drohnen „C0, C1, C2, C3, C4“. Weiterhin ist die Kategorie „offen“ in drei Unterkategorien „A1, A2, A3“ eingeteilt. In der Kategorie „A1“ dürfen Drohnen unter 250g Startgewicht oder in C0/C1 klassifiziert sind, betrieben werden. Gleichzeitig dürfen keine Menschenansammlungen überflogen werden. In „A2“ dürfen nur

---

<sup>1</sup> Dieser Gesetzestext ist unter folgender Quelle [9] anschaulich zusammengefasst, weshalb sich folgend auf diese Quelle, die den Gesetzestext zu Grunde liegen hat, berufen wird.

<sup>2</sup> In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich davon umfasst.

C2- klassifizierte Drohnen unter 4kg Startgewicht und mit einem horizontalen Mindestabstand von 30m zu Unbeteiligten genutzt werden. Drohnen unter 25kg Startgewicht oder C3/C4-Klassifizierung und mit einem horizontalen Mindestabstand von 150m zu Wohn-, Gewerbe-, Industrie- und Erholungsgebieten, gehören der Unterkategorie „A3“ an [9].

Diese Unterkategorien bestimmen den Betrieb der Drohnen und gleichzeitig die Bestimmungen für einen „*EU-Kompetenznachweis für Fernpiloten*“. Ab einem Startgewicht von 250g, wenn man in den Unterkategorien „A1“ und „A3“ fliegen möchte, ist solch ein Nachweis erforderlich. Möchte man in der Unterkategorie „A2“ eine Drohne betreiben, so ist ein „*EU-Fernpiloten-Zeugnis*“ erforderlich [10].

Zudem müssen sowohl Eigentümer aber auch „*[d]ie Betreiber von Drohnen der „offenen“ Kategorie ab 250 Gramm, von Drohnen der „offenen“ Kategorie unter 250 Gramm, wenn sie mit einer Kamera oder mit einem anderen Sensor, der personenbezogene Daten erfassen kann, ausgestattet sind, sofern es sich NICHT um ein Spielzeug gemäß Spielzeugrichtlinie handelt, und von Drohnen der „speziellen“ Kategorie müssen sich selbst registrieren.*“ [9]

Die durch Registration erhaltene Registrationsnummer muss an jeder Drohne des Betreibers befestigt sein. Generell sind Drohnen in der „offenen“ Kategorie erlaubnisfrei zu betreiben, wenn sie die oben genannten Kriterien der „offenen“ Kategorie erfüllen. Trotzdem dürfen Drohnen immer noch nicht überall betrieben werden, auch wenn sie den oben genannten Forderungen genügen, sondern es gibt noch zahlreiche Regelungen aus Gründen der Sicherheit und Gefahrenabwehr, des Schutzes der Privatsphäre und der Umwelt, die dabei Beachtung finden müssen Diese sind in Deutschland in § 21h Abs. 3 LuftVO beschrieben. Hierzu gehören zum Beispiel Abstände zu Flughäfen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen, Krankenhäusern, Einsatzstellen von Polizei und Rettungskräften und zu Naturschutzgebieten [11].

## 4 Steuerungsmöglichkeiten & Ortsmessung

### 4.1 Steuerungsmöglichkeiten

Es gibt mehrere Möglichkeiten einen Quadrocopter zu steuern. Hierzu zählt klassisch die Fernsteuerung, die unter Kapitel 2.2.7 bereits beschrieben wurde. Bei der Fernsteuerung können alle möglichen Richtungen einfach und intuitiv durch zwei Steuersticks geflogen werden. Zudem können weitere Einstellungs- und Funktionsknöpfe, aufgrund der kompakten Bauweise, sicher betätigt werden. Durch die Handlichkeit, Transportierbarkeit und der Möglichkeit sie jederzeit (ohne Hilfsmittel) zu verwenden, ist die Fernsteuerung weit verbreitet. Nachteile hierbei können die Größe der Steuersticks und des meistens mitintegrierten Displays sein, da diese eher kompakt bemessen ist.

Ein Quadrocopter kann aber auch durch andere Hard- und Software gesteuert werden. Ein Beispiel hierfür wäre ein Joystick wie er für Flugsimulationen verwendet wird. Mit großer Wahrscheinlichkeit müssten hier zwei Joysticks verwendet werden, um die Funktionalitäten der beiden Steuersticks einer Fernsteuerung zu übernehmen. Durch Kombination mit einem Display oder Computer könnte so eine Fernsteuerung in einem anderen Format imitiert werden. Dabei wäre der größte Vorteil der Joysticks gegenüber einer Fernsteuerung, deren Größe und ein besseres Gefühl, indem man die beiden Joysticks einzeln in der Hand hält und bedient auch der größte Nachteil. Dieses Setting wäre aufgrund der Größe unhandlich zu transportieren, da diese immer eine Ablage wie einen Tisch benötigen würden. Solche Joystick-Settings im Set sind nicht aktiv zu erwerben (zeigt eine Suche am 23.02.2023 auf [google.com](https://www.google.com) mit Suchbegriffen wie „multicopter joystick steuerung“ oder „multicopter mittels joystick steuern“) und somit nur eine Möglichkeit für „Bastler“ (siehe <https://www.rc-drohnen-forum.de/thread/8600-drohne-mit-pc-joystick-fliegen/>).

Eine weitere Steuerungsmöglichkeit ist das autonome und automatisierte Fliegen einer Drohne. Diese Steuerungsmöglichkeiten sind bei sehr vielen Drohnen verfügbar, so beispielsweise bei der *DJI Mavic/Air/Mini-Serie* [12], belegt durch *DJI* als größten Hersteller ziviler Drohnen (siehe Kapitel 8.1), oder bei der *Parrot Anafi* und *Bepop 2* [13]. Hier gibt es zum einen die *Follow-Me*-Funktion, bei der die Drohne durch Kamera- und GPS-Technik einem Objekt folgen kann. Durch die Bilderkennung ist die Kamera immer auf das markierte Objekt gerichtet und durch Verbindung zur Fernsteuerung, welche mit einem mobilen Endgerät, das GPS-fähig ist, verbunden ist, kann die Drohne dem Objekt

durch den Vergleich der eigenen GPS-Position und der des mobilen Endgerätes „hinterherfliegen“. Zum anderen ist es möglich auf einer Karte GPS-Koordinaten/Punkte zu setzen, welche dann die Drohne automatisiert abfliegen kann. Diese beiden Modi dienen lediglich als Ergänzung zur manuellen Steuerung durch die Fernbedienung.

Durch eine Bilderkennungssoftware in der Drohne ist bei vielen Drohnen, wie der *DJI Mavic Air*<sup>3</sup>, eine Gestensteuerung möglich. Hierbei kann eine natürliche Person durch Bewegung ihrer Arme und Hände die Drohne steuern. Beispiel hierfür ist, dass wenn der Arm nach oben zeigt, die Drohne steigt. Beim Bewegen des Armes nach unten sinkt die Drohne.

Somit fiel die Entscheidung aufgrund der Einfachheit aber auch vom funktionalen Nutzen her auf die klassische Fernsteuerung. Diese soll die Steuerungsmöglichkeit sein, um die Drohne steuern zu können.

## 4.2 Ortsmessung & GPS

GPS ist nicht nur für die autonome und automatisierte Steuerung notwendig, sondern auch für klassische Monitoring-Funktionen. Sowohl während des Fluges als auch nach dem Flug, um die Position oder die Geschwindigkeit des Quadrocopters bestimmen zu können. Die GPS-Technologie, eigentlich NAVSTAR-GPS, ist ein satellitengestütztes Ortungssystem, welches vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium entwickelt wurde. Heute ist GPS auch für zivile Zwecke nutzbar und da es so gut wie alle Navigationsprobleme lösen kann, wird es in der Luft-, Land- und Seefahrtnavigation aber auch im Vermessungswesen verwendet.

---

<sup>3</sup> Belegbar aus eigener Erfahrung

### 4.2.1 Positionsbestimmung

Genauso wie bei allen Systemen satellitengestützter Ortung beruht die Positionsbestimmung des GPS-Systems auf der Messung der Signallaufzeit des von den Satelliten ausgesendeten Signals. Die aktiven Satelliten übertragen dazu permanent Signale auf zwei verschiedenen Frequenzen:

- Signal L<sub>1</sub>: Frequenz  $f_1 = 1575,42$  MHz
- Signal L<sub>2</sub>: Frequenz  $f_2 = 1227,60$  MHz

Auf die Auswahl der Signale wird hier nicht weiter eingegangen. Da die Signale sowohl für die zivile Nutzung gedacht und somit frei zu empfangen sind, aber auch militärisch genutzt werden, ist bei einer Aussendung des Signals als einfache harmonische Schwingung das Risiko einer unerwünschten Fremdnutzung zu hoch. Zudem wäre das Ergebnis im Bereich der Wellenlänge mehrdeutig bei der Messung der Phasenlage und die aktuelle Position des Satelliten könnte nicht über das Signal an den Empfänger übertragen werden. Diese Probleme werden durch Phasenmodulationen der Signale umgangen. Durch die Phasenmodulation der Trägerfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  mit pseudozufälligen Sequenzen (PRN (Pseudo Random Noise) - Codes) wird Folgendes erreicht:

- Die Signale erhalten Strukturen, mit deren Hilfe sie eindeutig dem Satelliten, von dem sie ausgesendet wurden, zugeordnet werden können.
- Die Signale werden Träger einer Navigationsnachricht, die die Bahndaten der Satelliten, Zeitangaben und Zusatzinformationen enthält.
- Durch Geheimhaltung mancher bei der Modulation verwendeten Codes kann die freie Nutzung der Signale eingeschränkt werden [14, S. 24f.].

Diese modulierten Signale werden zur Positionsbestimmung genutzt. Hierfür ist ein GPS-Empfangsgerät notwendig, durch welches die Signale empfangen und ausgewertet werden können. Befindet sich nun ein GPS-Empfangsgerät in Reichweite eines Satelliten, kann er dieses Signal empfangen und bestimmt dessen Laufzeit  $\Delta t$ . Multipliziert man diese mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  kann die Pseudoentfernung  $\rho$  des Empfangsgerätes vom Satelliten

$$\rho = c * \Delta t \quad (7.1)$$

berechnet werden.



Abseits der Positionsbestimmung kann durch das GPS-System auch die Geschwindigkeit des Benutzers bestimmt werden. Das ist für viele Anwendungen, wie dem Ermitteln der Geschwindigkeit einer Drohne, heutzutage zwingend notwendig. Hierbei muss beachtet werden, dass es sich bei der Geschwindigkeit des Benutzers um eine vektorielle Größe handelt. Somit wird oft vom Empfangsgerät nur der Betrag der Geschwindigkeit ohne die Richtung ausgegeben. Je nach Art des Geräts wird die Geschwindigkeit mit einem der folgenden Verfahren bestimmt:

- Numerisches Differenzieren der Empfängerposition
- Trägerphasenauswertung

Diese beiden Verfahren werden hier nicht weiter ausgeführt, aber unter [14, S. 26f.] ausführlich dargestellt.

Das Prinzip der Positionsbestimmung mit GPS beruht auf Laufzeitmessungen. Die Synchronisation der unterschiedlichen Uhren ist dabei sehr wichtig. Aufgrund dieser Aspekte wird deutlich, dass die Zeit eine der wesentlichen Größen im System darstellt. Das GPS-System besitzt dabei sein eigenes Zeitsystem, die GPS-Systemzeit, die nicht mit der Weltzeit Universal Time Coordinated (UTC) übereinstimmt [14, S. 27].

„Um die genaue Position und eventuell die Geschwindigkeit eines sich bewegenden Benutzers bestimmen zu können, müssen im GPS-Empfangsgerät die Signale mehrerer Satelliten empfangen und ausgewertet werden. Zentral ist dabei die Bestimmung der Laufzeit des Signals, bei dem es sich um eine modulierte elektromagnetische Welle handelt. Die Trägerfrequenz der Welle ist für alle Satelliten gleich, durch die Modulation erhält das Signal eine für den jeweiligen Satelliten spezifische Kennzeichnung. Dabei spielt die Synchronisation der Satelliten- und Empfängeruhren mit der GPS-Systemzeit eine wichtige Rolle für eine genaue Laufzeitmessung. Die Synchronisation der Satellitenuhren erfolgt dabei über ein Bodenkontrollsystem, der Empfängeruhrfehler kann berechnet werden, wenn Laufzeitmessungen zu mindestens vier Satelliten gleichzeitig durchgeführt werden.“ [14, S. 29]

### 4.2.2 Aufbau GPS-System

Für die Funktionsweise des GPS und den Aufbau des GPS-Systems sind drei Systemkomponenten unabdinglich.

- Das Weltraumsegment (aktive Satelliten): Die Satelliten senden Signale aus, über die die Benutzer ihre Position bestimmen können.
- Das Kontrollsegment (zur Überwachung des Systems dienende Bodenstationen): Zur Überwachung der Satelliten und um beispielsweise Fehler korrigieren zu können.
- Das Benutzersegment (zivile und militärische Anwender des Systems): Bestehend aus diversen GPS-Empfangsgeräten in ziviler und militärischer Nutzung, die ein unterschiedliches Genauigkeitspotential besitzen.

#### **Weltraumsegment:**

Damit eine ununterbrochene Positionsbestimmung garantiert werden kann, müssen von jedem Punkt auf der Erde jederzeit vier Satelliten erreichbar sein. Durch verschiedene Gesichtspunkte, wie Gleichverteilung der Satelliten oder große Bahnhöhen, ergibt sich ein aus mindestens 24 Satelliten bestehendes Weltraumsegment, die sich auf sechs verschiedenen Bahnebenen befinden. Für die Positionsbestimmung mit GPS muss die Position jedes Satelliten immer genau bekannt sein, weshalb eine mathematische Berechnung der Umlaufbahn benötigt wird. Der Umlauf der Satelliten um die Erde kann mit dem Umlauf der Erde um die Sonne verglichen werden, weswegen die Beschreibung der Satellitenbahn über die *Keplerschen Gesetze* hergeleitet wird. Diese Gesetze und die Gravitationskraft sind die Grundlage für einen Algorithmus, mit dem die Position eines Satelliten zu einem beliebigen Zeitpunkt bestimmt werden kann. Solch ein Satellit besitzt Solarpaneele zur Energieversorgung. Weiter besitzt ein Satellit zwei Antennen. Eine für den Empfang, eine zum Senden von Signalen. Über die L-Band-Antenne werden im Frequenzbereich von 1-2,6GHz die Satellitensignale ausgestrahlt. Die S-Band-Antenne kommuniziert im Frequenzbereich von 2,6-3,95GHz mit dem Kontrollzentrum. Jeder Satellit beinhaltet drei Atomuhren zur genauen Zeitbestimmung. Diese bestehen je nach Bauart aus unterschiedlich vielen Cäsium- und Rubidiumuhren. Zudem beinhaltet jeder Satellit einen Mikroprozessor und einen internen Speicherplatz. Hier werden vor allem Navigationsdaten, die im Voraus vom Kontrollzentrum berechnet wurden, gespeichert. Abhängig von der Kapazität des Speichers können die Satelliten unterschiedlich lange ohne

Kontakt zum Kontrollzentrum bleiben. Wobei im Normalfall alle acht Stunden ein Datenaustausch mit dem Kontrollzentrum stattfindet.

### **Kontrollsegment:**

Für die Positionsbestimmung in Echtzeit müssen verschiedene Navigationsdaten erzeugt und berechnet werden. Dies wird vom Kontrollzentrum des GPS-Systems übernommen, welches im Verantwortungsbereich der US-Armee liegt. Dabei werden vor allem folgende Aufgabe erfüllt:

- Beobachtung der Satellitenbewegungen und Berechnung der Bahndaten der Satelliten.
- Überwachung der Satellitenuhren und Synchronisation untereinander.
- Übermittlung der genauen Bahndaten und Vorhersagen über das Uhrenverhalten per Funkkontakt an die Satelliten zur Weitergabe an den Benutzer.

Für die Bewältigung dieser vielfältigen Aufgaben, besteht das Kontrollsegment aus unterschiedlichen Bodenstationen:

Monitorstationen (*monitor stations*) sind im Wesentlichen stationäre GPS-Empfangsgeräte, die zusätzlich eine Cäsium-Uhr und Sensoren zum Sammeln meteorologischer Daten besitzen. Diese Art von Stationen empfangen die Signale der sichtbaren Satelliten und berechnen die Pseudo-Entfernung zum Satelliten. Durch das Bekanntsein der genauen Position der Station und die Atomuhr, die die genaue Systemzeit liefert, kann das Signal um einige fehlerhafte Größen wie beispielsweise atomosphärische Verzögerungen korrigiert werden. Die korrigierten Daten werden dann zur Weiterverarbeitung an die Hauptkontrollstation weitergeleitet.

Die Hauptkontrollstation (*Master Control Station MCS*) befindet sich auf der *Schriever Space Force Base* in Colorado Springs, CO in den Vereinigten Staaten von Amerika. Sie ruft die von den Monitorstationen gesammelten Daten ab und berechnet aus ihnen die Ephemeriden und Vorhersagen der Satellitenbahn. Die errechneten Daten werden dann zu einer Navigationsnachricht zusammengefasst und zu dem jeweiligen Satelliten übertragen.

Die Daten werden über Bodenantennen (*ground antennas*) mittels Signale im S-Band übermittelt. Durch eine weltweite Verteilung der Antennen wird gewährleistet, dass sich jeder Satellit immer in Reichweite von mindestens zwei Stationen befindet.

### **Benutzersegment:**

Das Benutzersegment besteht aus den vielfältigen Empfangsgeräten, die sowohl im militärischen als auch im zivilen Bereich genutzt werden. Die Navigationsgenauigkeit der Geräte ist dabei unterschiedlich, da das Genauigkeitspotential des GPS in zwei Kategorien, dem Standard Positioning Service (SPS) und dem Precise Positioning Service (PPS), bereitgestellt wird. Während der PPS nur von speziell autorisierten Benutzern, zumeist militärischen Dienststellen, genutzt werden kann, steht der SPS weltweit jedem Nutzer uneingeschränkt zur Verfügung. Der PPS schöpft jedoch die volle Genauigkeit des GPS aus. Der SPS hat dagegen lediglich eine Navigationsgenauigkeit von 5-10m. Weiter handelt es sich bei den zivilen Empfangsgeräten um Ein-Frequenzempfänger. Diese können nur das von den Satelliten ausgestrahlte  $L_1$ -Signal empfangen. Die meisten militärischen Empfangsgeräte können jedoch beide Frequenzen empfangen. Zwei-Frequenzempfänger bieten den Vorteil, dass einige Verzögerungen des ankommenden Signals direkt vom Gerät ausgeglichen werden können. Über die Antenne, die jedes Empfangsgerät besitzt, werden die L-Band-Signale der Satelliten empfangen. Der Empfänger dient der Signalerfassung und -verarbeitung. Dabei müssen gleichzeitig die Signale von mindestens vier Satelliten verarbeitet werden. Hierfür stehen meistens mehrere Empfangskanäle (pro Satelliten ein Kanal) zur Verfügung. Die Daten, die aus dem Signal erfasst werden, wie die Pseudoentfernung und die decodierte Navigationsnachricht, werden für weitere Berechnungen an die Prozessoren weitergeleitet. Es werden verschiedene Prozessoren für die Messgrößenverarbeitung benötigt, die die Gleichungen zur Positionsbestimmung lösen und diverse Korrekturmodelle miteinbeziehen. Die Ausgabe besteht dann aus Position, Geschwindigkeit sowie der genauen Zeitangabe [14, S. 29ff.].

„Für die Funktionsweise des GPS sind die drei Systemkomponenten unabdinglich. Die Satelliten als künstliche Erdtrabanten sorgen dafür, dass dem Benutzer unabhängig von Wetterbedingungen und Standort jederzeit ausreichend Signale zur Verfügung stehen, um seine Position dreidimensional bestimmen zu können. Zur Berechnung seiner Position benötigt der Benutzer neben der Signallaufzeit vor allem die Position des Satelliten zur Zeit der Signalausendung. Diese wird im Bodenkontrollsystem mit einem Algorithmus, der auf den Keplerschen Gesetzen aufbaut, berechnet und über das Satellitensignal zum Benutzer übertragen. Zudem sorgt das Kontrollsystem für eine Überwachung der Satelliten. Abhängig von dem Empfangsgerät hat der Benutzer unterschiedliche Möglichkeiten die empfangenen Signale auszuwerten.“ [14, S. 36f.]

## 5 Meteorologischer Hintergrund

### 5.1 Einführung

Die Meteorologie (grie.: „in der Luft schwebend“) ist die Wissenschaft des Wetters und ein Teil der Geophysik. Es ist die Lehre von physikalischen und chemischen Vorgängen in der Erdatmosphäre, vor allem im Bereich der Tropos- und Stratosphäre. In diesen Bereichen der Atmosphäre, die bis zu einer Höhe von circa 50km reichen, spielen sich die meisten Prozesse ab, die unser Wetter und Klima bestimmen.

Alle Naturwissenschaften, wie die Physik, Biologie, Geologie oder Chemie befassen sich mit Vorgängen in der Natur. Beim einen sind es beispielsweise Kräfte, die auf Objekte wirken oder wie Ökosysteme in der Natur zu verstehen sind, beim anderen kann es sich um Gesteine oder Stoffzusammensetzungen handeln. In keinem anderen Wissenschaftszweig aber stehen die Prozesse so sehr im Mittelpunkt, wie in der Meteorologie und Wetterkunde [15, S. 8f.]. Als Grund hierfür kann genannt werden, dass die Forschungsgegenstände meist keine natürlichen Objekten wie Gesteine oder Mineralien, sondern lediglich abstrakte Abbilder von in der Atmosphäre ablaufenden Vorgängen sind. So zum Beispiel ein Regenbogen, lediglich ein optisches Phänomen, welches so schnell spurlos verschwinden kann, wie es erschienen ist. Damit die Meteorologie ansatzweise solche Vorgänge erklären kann, wendet sie eine bewährte Arbeitsweise an:

- Analyse der Atmosphäre aus allen möglichen Blickwinkeln.
- Gedankliche Zerlegung in die einzelnen meteorologischen Elemente.
- Zusammenfügung dieser, durch Untermuerung von Daten und Fakten.

Ergebnis dieser Arbeitsweise ist dann ein Abbild des Gesamtzustandes in der unteren Lufthülle. Abhängig von der Zustandsdauer spricht man von Wetter, Witterung oder Klima.

Wetter bezeichnet den physikalischen Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort. Meist dauert dieser Zustand nur wenige Stunden bis maximal einem Tag an.

Die Witterung ist der durchschnittliche oder auch vorherrschende Wetterablauf innerhalb einiger Tage bis zu ganzen Jahreszeiten.

Das Klima beschreibt die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort der Erdoberfläche sowie den durchschnittlichen Ablauf der Witterungserscheinungen innerhalb eines Jahres charakterisieren. Dazu müssen die meteorologischen Elemente über einen ausreichend langen Zeitraum (meist mehrere Jahrzehnte) beobachtet werden [15, S. 8f.].

Klima gilt, wie bereits erwähnt, vereinbarungsgemäß nur an einem bestimmten Ort. Trotzdem besitzen Klimate benachbarter Orte häufig gemeinsame Charaktermerkmale, weshalb sie einem bestimmten Klimatypus zugeordnet werden können. Wenn solch ein Klimatypus in einem größeren Gebiet herrscht oder gürtelförmig um die Erde verläuft, spricht man von einer Klimazone.

Dass Klimazonen sich voneinander abgrenzen, indem die unterschiedlichen Klimate klassifiziert werden, ist laut *Göbel* einer der wichtigsten und ältesten Aufgaben der Klimatologie. Aufgrund der Relevanz von Klimaklassifikationen sind im Laufe der Zeit unterschiedliche Klassifikationsweisen entstanden. Zum einen die genetischen Klassifikationen, die auf der Entstehung des jeweiligen Klimatyps beruhen. Zum anderen die effektiven Klassifikationen, die nach den Auswirkungen der Klimate auf die Natur die Klimate klassifizieren. Gleichzeitig werden hierbei auch wirtschaftliche und gesundheitliche Effekte berücksichtigt. Die effektiven Klassifikationen haben sich gegenüber den genetischen Klassifikationen durchgesetzt, weshalb heutzutage die unterschiedlichen Klimate meist nach der effektiven Klassifikation eingeteilt werden [15, S. 9].

## 5.2 Mikroklima

Die Mikroklimatologie befasst sich mit dem Klima des bodennahen Raumes und den sich darin abspielenden, physikalischen Prozessen. Zudem kann das Klima in einem kleinen, genau definierten Bereich als Mikroklima beschrieben werden. Somit existieren zwei verschiedene Definitionen. Laut *Dr. Berényi* geht aus verschiedenen Beobachtungen, die hier nicht genauer erläutert werden, hervor, dass sich das Mikroklima in der Nähe des Bodens (bis zwei Meter) ausbildet, da dieser die Strahlung aufnimmt und abgibt. Er geht unter [16, S. 13] auf verschiedene Definitionen anderer Wissenschaftler ein, die über die beiden verschiedenen Definitionen von Mikroklima referieren, indem *Dr. Berényi* mehrere verschiedene Definitionen untersucht und miteinander vergleicht. Hierbei stellt er heraus, dass die anderen Wissenschaftler von beiden Definitionen sprechen. Vor allem mit der

Definition von Sutton [17]: „Der Begriff der Mikroklimatologie bedeutet ein eingehendes Studium jener physikalischen Phänomene, die in beschränkten Gebieten der Bodenoberfläche und in der Regel innerhalb der untersten Schichten der Atmosphäre auftreten.“ [16, S. 14] beschäftigt sich der Autor. Somit besagt die Suttonsche Definition, dass das Mikroklima in der Regel in Bodennähe entsteht und die Erscheinungen des Makroräumes sich unabhängig von den Prozessen im Mikroraum bilden. Bei seinem Vergleich ist ihm vor allem aufgefallen, dass die vorherigen Definitionen das Mikroklima in die Nähe der Bodenoberfläche verwiesen und nur nebenbei erwähnten, dass es auch in der Nähe von anderen Oberflächen auftreten kann. Aufgrund dessen wurde versucht dem Mikroklima eine allgemeine Definition zu geben. Mikroklima entsteht in einem Berührungsgebiet einer beliebigen Oberfläche und der Luft. Es ist also eine Übergangserscheinung, die überall dort auftritt, wo die Luft mit einem Medium in Verbindung tritt, dessen Aggregatzustand oder Dichte von ihr abweicht. Dieses Medium, welches sich in Dichte und eventuell im Aggregatzustand von Luft unterscheidet, übt an der Berührungsoberfläche eine unterschiedliche Wirkung auf die Bewegung der Moleküle beziehungsweise schwebende Partikel in der Luft aus. Deshalb werden alle Elemente der Luftschicht in der Nähe der Grenzfläche beeinflusst. Nach dieser Definition ist das Mikroklima nicht nur in Bodennähe, sondern beispielsweise auch an der Grenze zu Wolken und der sie umgebenden Luft anzutreffen. Dies kann auch der Fall sein, wenn eine Berührungsoberfläche zwischen Luftmassen mit verschiedener Dichte und unterschiedlichen Eigenschaften entsteht. Das bedeutet also, dass die Fronten und Frontenoberflächen, die Übergangszonen der freien Atmosphäre das aerologische Mikroklima darstellen. Nach dieser Definition kann eindeutig vom Mikroklima im Wohnzimmer, Garage oder sogar der Jackentasche gesprochen werden. In all diesen Fällen gelangt die Luft mit einem anderen Medium in Berührung. Es ist anzumerken, dass die Erscheinungen des Mikroklimas umso ausgeprägter sind, desto größer der physikalische Unterschied – hauptsächlich in Bezug auf Strahlung und Wärmeaustausch – zwischen der Luft und dem angrenzenden Medium ist. Deshalb existieren starke mikroklimatische Erscheinungen in der Nähe von Oberflächen, die Sonnenstrahlung aufnehmen [16, S. 14f.].

Nach dieser etwas komplizierteren Beschreibung des Mikroklimas, wird im Folgenden das Thema alltagsgebräuchlich beschrieben, um die Bedeutung für die meteorologische Erfassung der Daten durch den Multicopter besser darzustellen. Örtliche Gegebenheiten beeinflussen das Mikroklima stark. Dies geschieht durch die Art und Beschaffenheit des

Bodens, der Art und Dichte der dort wachsenden Pflanzen oder durch die vorherrschenden Lichtverhältnisse. Die Bodenreibung von Luftbewegungen hat auch eine entscheidende Auswirkung auf das Mikroklima. Allgemein sind solche Bewegungen im mikroklimatischen Bereich nur schwach ausgeprägt. Temperaturschwankungen sind in diesem Bereich hingegen in der Regel groß. Auch vom Menschen errichtete Bauwerke, vor allem in dicht besiedelten Gebieten, haben einen enormen Einfluss auf das Mikroklima. Durch Bauwerke werden die Wind- und Lichtverhältnisse verändert, weshalb es vorkommen kann, dass in einem Bereich völlige Windstille herrscht, einige Meter entfernt aber ein starker Wind bläst. Dies ist vor allem bei sehr großen Bauwerken wie zum Beispiel dem Speyerer Dom der Fall.

Weiter können Mikroklimata Gebiete von wenigen Meter bis hin zu einigen Kilometern umfassen. So zum Beispiel ein Raum, ein Feld, Park, ein Teil oder eine ganze Straße oder ein Platz zwischen zwei Gebäuden. Auch für die Land- und Forstwirtschaft spielen die mikroklimatischen Gegebenheiten eine besondere Rolle. Da die meisten Tiere und Pflanzen aber auch die Menschen ihren Lebensraum im mikroklimatischen Bereich haben, hat das Mikroklima eine hervorgehobene Bedeutung [18].

Nach diesen teilweise unterschiedlichen Beschreibungen und Definitionen des Begriffes Mikroklima lässt sich erkennen, dass die Interpretierung welche Bereiche das Mikroklima betrifft, vom Betrachtungswinkel und der Funktion des Mikroklimas in einem gegebenen Kontext abhängig ist. Somit wird für dieses Projekt der Begriff Mikroklima so interpretiert, dass er diese Bereiche umfasst, in der ein Multicopter sich bewegen kann. Diese Interpretation ist auch mit den oben beschriebenen Definitionen vereinbar. Zum einen mit der Definition, dass Mikroklimata das Klima in bodennahen Schichten beschreiben. Zum anderen, dass Mikroklimata kleine definierte Gebiete beschreiben, in denen Luft mit anderen beliebigen Oberflächen in Berührung kommt.

### **5.3 Meteorologische Elemente**

Sowie in anderen Naturwissenschaften Dinge in ihre Einzelheiten zerlegt werden, kann das Wetter als Teil der Meteorologie auch in dessen Bestandteile differenziert dargestellt werden. Das Wetter ist dann das Resultat des Zusammenspiels dieser Bestandteile, Faktoren und Kräfte. Was zum Beispiel als schönen Sommertag, blauer oder wolkgiger Himmel, Regentag oder verschneite Landschaft wahrgenommen wird, entsteht in der Realität aus der Wechselwirkung von verschiedenen Wetterelementen. Solche meteorologischen Elemente



sind Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Stärke und Richtung des Windes, Intensität der Strahlung oder Sonnenscheindauer. Durch diese resultieren dann Wolken, Niederschlag oder auch die Sichtweite. Somit kann man sie auch als „Bausteine des Wetters“ bezeichnen [19, S. 169]. Diese Elemente zeigen ihr Wirken in der Troposphäre (unterste Schicht der Atmosphäre).

Die Elemente können mit Zahlenwerten beschrieben werden. Um hierbei den Überblick zu bewahren, werden diese zahlreichen Daten gemittelt – in der Regel für einen bestimmten Zeitraum, etwa einen Tag, einen Monat oder ein Jahr, manchmal auch für ein größeres Gebiet [15, S. 26]. Die Lufttemperatur beispielsweise hat einen Jahresdurchschnitt, bezogen auf die gesamte Erdoberfläche, von 13,9°C (2003, mit steigender Tendenz). Diese Zahl kommt durch eine riesige Spannweite zustande. Der durchschnittlich heißeste Ort der Erde ist Dallol in Äthiopien mit 34,6°C Jahresdurchschnitt, während Wostok in der Antarktis der durchschnittlich kälteste Ort der Erde im Jahresmittel mit -55,1°C ist [15, S. 26f.]. Noch größer sind die Abweichungen vom Mittelwert, wenn man die absoluten Werte, also die jeweiligen gemessenen Minima und Maxima betrachtet (-89,2°C; +58°C).

Unter dem Hintergrund der meteorologischen Sensoren, die verwendet werden, wird im Folgenden auf die Wetterelemente der Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und (UV-)Strahlung eingegangen. Das Wetterelement des Windes wird in dieser Arbeit im Allgemeinen außen vorgelassen, da es nicht als Sensor im Modul enthalten sein wird. Das liegt daran, dass die Verwirbelungen der Rotoren die Messungen manipulieren könnte. Nichtsdestotrotz spielt der Wind eine sehr wichtige Rolle in der Meteorologie, da ohne diesen die anderen Wetterelemente so gar nicht zum „Wirken“ kommen würden.

### **5.3.1 Lufttemperatur**

Die Temperatur ist eine der wichtigsten wetter- und klimabestimmenden meteorologischen Größen. In ihr wird der Wärmezustand der Luft dargestellt und gibt Aufschluss über die Wärmeabgabe der Erdoberfläche. Die Wärme gehört auch zu den direkt spürbaren Sinneseindrücken der Menschen. Trotzdem liegt der Ursprung der Temperatur im Bereich der kleinsten Teilchen. Thermodynamisch betrachtet ist sie nur ein Energie- und Bewegungszustand von Molekülen. Somit bestimmt die Schnelligkeit der Moleküle, wenn sie sich bewegen und wie häufig sie zusammenstoßen, die Höhe der Temperatur. Je stärker die Molekülbewegungen, desto größer ist die Energieabgabe und desto höher die Temperatur [19, S. 170]. So können dementsprechend auch Winde entstehen.

Temperaturänderungen sind auch vom Auf- und Absteigen der Luft abhängig. Grund hierfür ist, dass jedes Gas, so auch das Gasgemisch Luft, sich abkühlt, wenn es durch Druck entlastet wird. Gleichzeitig erwärmt sich ein Gas, wenn der Druck steigt. Somit steigt, an der Erdoberfläche, erhitzte Luftmasse auf, gelangt in höhere Luftschichten, wo ein geringerer Luftdruck herrscht, und kühlt dort ab. Hier kann als Faustregel angenommen werden, dass pro 100m Höhe die Temperatur um 1°C fällt. Umgekehrt steigt die Temperatur beim Abstieg in tiefere Schichten, auf denen die Masse der Atmosphäre stärker lastet.

### 5.3.2 Luftdruck

Die Luftmasse in der Atmosphäre besitzt im Gegensatz zur Gesamtmasse nur einen sehr kleinen Anteil. Durch die Schwerkraft übt diese Luftmasse Druck auf die Erdoberfläche aus: der Luftdruck. So wie jeder Gasdruck wirkt dieser Druck überall senkrecht auf eine Fläche. Konkret lasten somit auf einen ausgewachsenen Menschen auf Meeresniveau circa 20 Tonnen Luft. Wir Menschen werden davon aber nicht zerdrückt und spüren nicht einmal diesen Druck. Dies lässt sich dadurch begründen, da ein Gleichgewicht zwischen dem Körperinneren und dem äußeren Druck herrscht. Da dieses Gleichgewicht nicht immer sofort hergestellt werden kann, ist es möglich, dass man einen unangenehmen Druck in den Ohren spürt. Dies geschieht bei schnellem Auf- und Absteigen, wie zum Beispiel im Flugzeug oder einer Bergbahn, denn der Luftdruck sinkt zur Höhe hin stark ab. So herrscht auf Meeresniveau im Mittel ein Druck von 1013,25 Hektopascal (hPa) und es wirkt eine Kraft von ungefähr 10 Tonnen Luft auf einen Quadratmeter. In 100 m Höhe herrscht nur noch ein Druck von rund 1000 hPa; in 5,5 km und 11km Höhe nur noch  $\frac{1}{2}$  und  $\frac{1}{4}$  des Meeresniveaudruckes.

Aufgrund dessen müssen Wetterstationen in verschiedenen Höhenlagen ihr Luftdruckwerte mittels einer mathematischen Formel reduzieren beziehungsweise so berechnen, dass sie den Luftdruck auf Meeresniveau angeben. Dies ist nötig, um ein zutreffendes Bild über die Luftdruckverteilung in den bodennahen Schichten zu erhalten [15, S. 36].

Somit ist es möglich anhand einer mathematischen Formel die Höhe zu berechnen. Darauf wird später bei den Sensoren noch genauer eingegangen.

Der Luftdruck spielt immer wieder eine Rolle im Wetterbericht, wenn über *Hochs* und *Tiefs* gesprochen wird. Ein *Hoch* ist ein Hochdruckgebiet. Das heißt ein Gebiet, was durch Isobaren (Linien, die Orte mit gleichem Luftdruck verbinden) umschlossen ist und einen relativ hohen Luftdruck aufweist. Gebiete, die von Isobaren umschlossen sind und einen

relativ niedrigen Druck haben, heißen Tiefdruckgebiete (*Tief*). Solche Druckgebilde entstehen meist durch zwei Varianten. Zum einen durch den Einfluss der Lufttemperatur: Warme Luft ist leichter als kalte und steigt nach oben. Bei intensiver Sonneneinstrahlung steigt warme Luft somit auf und hinterlässt am Boden eine Zone tiefen Drucks; ein thermisches Tief. Umgekehrt sinkt kalte schwere Luft ab und erzeugt am Boden ein thermisches Hoch. Zum anderen, und das geschieht häufiger, entstehen Hoch- und Tiefdruckgebiete durch gegeneinander beziehungsweise auseinander strömende unterschiedlich temperierte Luftmassen, die unter dem Einfluss der Corioliskraft stehen. Diese dynamischen Druckgebilde werden als Zyklonen (tiefer Druck) und Antizyklonen (hoher Druck) bezeichnet [15, S. 37].

### 5.3.3 Luftfeuchte

Wasser ist eines der wichtigsten Bestandteile der Erdatmosphäre, denn es ermöglicht die Bildung von Wolken und Niederschlägen. Die Luft enthält Wasser in seinen unterschiedlichen Aggregatzuständen. Meist als Wasserdampf, aber auch als Tröpfchen oder Eiskristalle, die als Nebel oder Wolken erscheinen. Der Wasserdampf gelangt durch Verdunstung des Bodenwassers in die Luft. Das Wasser der Erde ist in einem ständigen Kreislauf. Es spielen Verdunstung, Niederschlag und Abfluss eine wichtige Rolle. Verdunstung geschieht vor allem über den Meeresflächen, wenn Wasser zu Wasserdampf verdunstet. Die meisten der dort entstandenen Wolken regnen sich über den Meeresflächen wieder ab. Die übrigen Wolken werden zu den Kontinenten transportiert. Auch hier geben die Wolken ihre Feuchtigkeit als Niederschlag über den Landmassen ab. Über verschiedene ober- und unterirdische Abflüsse, wie beispielsweise Flüsse, gelangt das Wasser wieder in die Meere. Insgesamt beträgt der Wasseranteil in der Atmosphäre maximal vier Prozent des Gesamtvolumens [19, S. 174]. Hierbei kann Luft unterschiedlich viel Wasserdampf aufnehmen, warme Luft mehr als kalte. Luft bei Temperaturen um circa 0°C kann ungefähr 4g Wasserdampf pro 1kg Luft maximal aufnehmen. 30°C warme Luft ist bei circa 27g pro 1kg Luft vollständig gesättigt. Der Wasserdampfgehalt in der Luft erreicht aber oft nicht das Maximum, die sogenannte Sättigungsfeuchte. Abhängig von Jahreszeit und Klimazone entsteht eine kleinere oder größere Lücke, die als relative Feuchtigkeit bezeichnet wird und das gebräuchlichste Maß der Luftfeuchte ist [15, S. 42f.]. Die relative Luftfeuchte ist somit das Verhältnis zwischen der tatsächlich vorhandenen Wasserdampfmenge und der bei der Temperatur maximal möglichen. Somit hat 30°C warme Luft mit 18g Wasserdampf pro kg

zwei Drittel Sättigungsfeuchte, also eine relative Luftfeuchte von 66%. In Mitteleuropa beträgt die relative Luftfeuchte im Durchschnitt circa 80%. Wüsten und Steppen (im Inneren der Kontinente) mit weniger als 50% relativer Luftfeuchte sind wesentlich trockener. Im Bereich des Äquators mit einer hohen Lufttemperatur kann die Luft auch absolut die größten Wasserdampfmengen aufnehmen und besitzt im Mittel eine relative Feuchtigkeit um die 90% [15, S. 42f.]. Weiter wird die Temperatur, bei der 100% relative Feuchte erreicht wird, Tau- oder Kondensationspunkt genannt. Wenn sich nun warme ungesättigte Luft abkühlt, steigt die relative Feuchte. Ist dann der Kondensationspunkt erreicht und es kommt zu weiterer Abkühlung, muss der überschüssige Wasserdampf kondensieren und es bilden sich Wolken und Nebel. Umgekehrt nimmt bei Erwärmung die relative Luftfeuchte ab und die Luft kann dann wieder mehr Wasser aufnehmen. Somit lösen sich Wolken und Nebel auf. Dies ist auch die Erklärung dafür, warum Kondensationstreifen von Flugzeugen nicht immer zu sehen sind. Durch die Verbrennung von Kraftstoff in den Triebwerken entsteht Wasserdampf, der dann sofort gefriert, wenn die Luft gesättigt ist und den Wasserdampf nicht aufnehmen kann. Folge ist das Auftreten von Kondensationstreifen. Ist die Luft ungesättigt kann sie den Wasserdampf aufnehmen und der Wasserdampf gefriert nicht. Dann sind keine Kondensstreifen zu erkennen.

Die relative und absolute Luftfeuchte ist aber auch von der geographischen Breite abhängig. So nimmt in Richtung der Pole („hohe“ Breitengrade) die absolute Luftfeuchtigkeit kontinuierlich ab und die relative Feuchtigkeit erreicht ihr Minimum in den Regionen um den 30. Breitengrad.

#### **5.3.4 Strahlung**

Durch die Strahlung der Sonne gelangt ein Bündel von verschiedenen Strahlungsarten mit unterschiedlichen Wellenlängen auf die Erde. Die davon relevantesten Strahlungsarten sind die Infrarotstrahlung, die sichtbare Strahlung und die UV-Strahlung. Diese Strahlungsarten (optische Strahlung) sowie weitere kurzwellige Röntgenstrahlung (ionisierende Strahlung) und langwellige Radiowellen (Mikrowellen) werden von der Sonne ausgestrahlt.

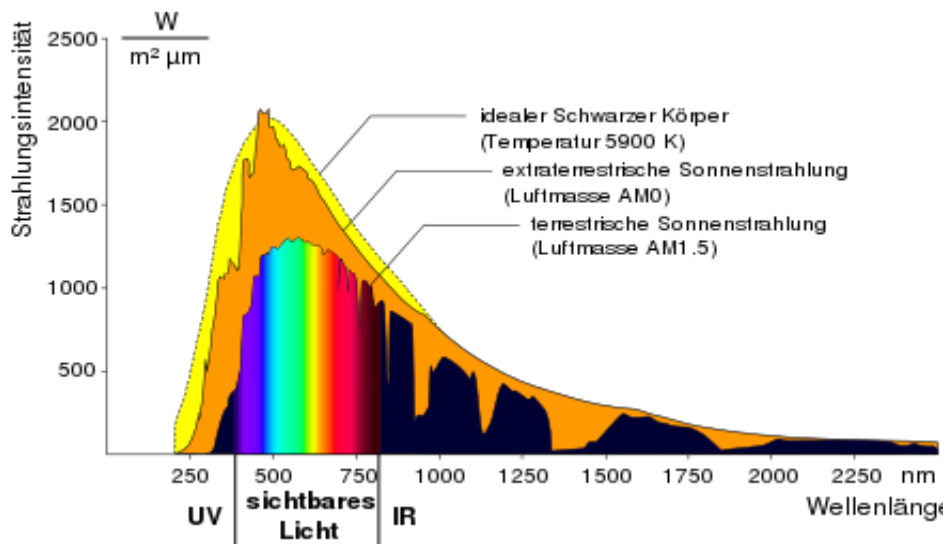


Abbildung 6: Strahlungsintensität der Sonne auf der Erde im Vergleich zum schwarzen Körper<sup>4</sup>

Die sichtbare Strahlung beträgt lediglich 10% der Gesamtstrahlung. Das sichtbare Licht hat Wellenlängen von 380nm (violett Licht) bis 780nm (rotes Licht). Die daran angrenzende Infrarotstrahlung wird umgangssprachlich auch als Wärmestrahlung bezeichnet, da sie von den Menschen als Wärmestrahlen wahrgenommen werden. Die UV-Strahlung wird später genauer betrachtet.

Wie in der Abbildung 6 zu erkennen, liefert das sichtbare Sonnenlicht mehr als die Hälfte der Energiemenge der Sonnenstrahlung. Somit hängt die Energiezufuhr auf der Erde maßgeblich von der Sonnenscheindauer ab. Bei uns in Mitteleuropa beträgt die Sonnenscheindauer zwischen 1500-2000 Stunden. In den sonnenreichsten Regionen, sowohl auf der Nord- als auch auf der Südhalbkugel der Erde scheint die Sonne oft doppelt so lange. Nicht nur die Sonnenscheindauer beeinflusst die Energiemenge auf der Erde, sondern auch die Sonnenhöhe (Stand der Sonne am Himmel). Zudem sind noch die Bewölkung und Trübung der Atmosphäre wichtige Faktoren. So ist zum Beispiel bei einem wolkenlosen Himmel und einer Sonnenhöhe von 50° die Energiezufuhr mehr als 12-mal so groß wie bei einer Sonnenhöhe von 5°. Eine geschlossene Wolkendecke kann die Energiezufuhr um weniger als ein Viertel verringern [15, S. 28].

<sup>4</sup> Bildquelle: <https://www.leifiphysik.de/astronomie/sonne/grundwissen/sonnenspektrum>

### 5.3.5 UV-Strahlung

Neben den sichtbaren meteorologischen Elementen existieren weitere Elemente, die weder sichtbar noch spürbar sind. Hierzu gehört die UV-Strahlung. Sie ist eine hochenergetische Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 100 und 400nm. Sie ist auch die energiereichste der optischen Strahlung. Da sie mit keinen Sinnesorganen wahrnehmbar ist und gesundheitsschädlich sein kann, ist sie ein wichtiger Umweltparameter.

Die UV-Strahlung kann man anhand ihrer Wellenlänge noch unterteilen in die UV-A-Strahlung (400-315nm), UV-B-Strahlung (315-280nm) und UV-C-Strahlung (280-100nm). Die UV-A-Strahlung grenzt direkt an das sichtbare Licht an, während die UV-C-Strahlung direkt an die ionisierende Strahlung angrenzt. Deshalb ist die UV-C-Strahlung am energiereichsten und somit am schädlichsten. Denn umso geringer die Wellenlänge, desto energiereicher und schädlicher die Strahlung. Die UV-Strahlung auf der Erde wird hauptsächlich von der Sonne erzeugt. Deshalb nennt man diese Strahlung „natürliche“ oder „solare“ Strahlung. Diese Strahlung wird teilweise von der Erdatmosphäre gefiltert und gelangt somit unterschiedlich stark zur Erdoberfläche. Die UV-C-Strahlung wird vollständig von der Atmosphäre gefiltert, sodass keine natürliche UV-C-Strahlung die Erdoberfläche erreicht. Abhängig vom Zustand der Ozonschicht, wird auch UV-B-Strahlung von der Atmosphäre gefiltert. Diese kann nicht vollständig gefiltert werden, sodass generell davon auszugehen ist, dass ungefähr bis zu 10% die Erdoberfläche erreichen. Bei Störungen der Ozonschicht, wie zum Beispiel einem Ozonloch – etwa über der Antarktis –, vergrößert sich der Anteil der ungefilterten UV-B-Strahlung. Die langwelligere UV-A-Strahlung erreicht weitgehend ungehindert/ungefiltert die Erdoberfläche. Weiter ist die Stärke der UV-Strahlung vom Breitengrad sowie von der Jahres- und Tageszeit abhängig. Das bedeutet, dass die Strahlung immer intensiver ist, umso näher man sich am Äquator befindet. Im Sommer stärker als im Winter und mittags intensiver als morgens oder abends. Auch die Bewölkung beeinflusst die Intensität der UV-Strahlung. Eine geschlossene, dicke Wolkenschicht kann die UV-Strahlung bis zu 90% davon „abhalten“ die Erdoberfläche zu erreichen. Leichte Bewölkung, bei der die Sonne aber noch zu sehen ist, und Nebel können dagegen die UV-Strahlung intensivieren. Zudem hat die Höhe über dem Meeresniveau eine Bedeutung für die Intensität von UV-Strahlung. Die UV-Strahlen sind pro 1000 Höhenmeter circa 10% stärker. Die Beschaffenheit der Erdoberfläche wie zum Beispiel durch Schnee, Wasser oder Sand kann ebenso die UV-Strahlung beeinflussen, denn solche Beschaffenheiten reflektieren die UV-Strahlung und verstärken diese. Schatten hingegen

kann die Stärke der UV-Strahlung reduziere, so ist sie beispielsweise unter einem Sonnenschirm circa 10-30% geringer. Unter einem Baum mit dichter, großflächiger Krone um ungefähr 20% [20].

Die Intensität der UV-Strahlung wird durch den UV-Index beschrieben. Genauer ist dieser ein Maß für die Intensität von sonnenbrandwirksamer natürlicher UV-Strahlung und wurde von der WHO, der WMO, dem UNEP und der ICNIRP eingeführt. Er beachtet die Strahlung mit den Wellenlängen von 280-400nm. Der UV-Index wird durch einen positiven Wert auf einer nach oben offenen Skala angegeben. In Deutschland wird meist ein Wert zwischen null und acht erreicht. In den höhergelegenen Alpen kann auch der Wert neun und zehn erreicht werden. In Klimazonen wie den Subtropen oder Tropen, die näher am Äquator liegen, können auch Werte von 14-16 erreicht werden und in solchen Klimazonen gelegenen Hochgebirgen wie den Anden auch Werte von deutlich über 17. Er gilt für alle Hauttypen gleichermaßen und besagt, je höher der Wert, desto eher wird die Haut beim ungeschützten Aufenthalt in der Sonne geschädigt. Ist der Wert niedrig, kann länger in der Sonne verweilt werden. Tabelle 2 zeigt den UV-Index, der nach seiner Gefährdung eingeteilt wurde.

<b>UV-Index</b>	<b>Gefährdung</b>	<b>Schutzmaßnahmen</b>
0-2	Keine bis gering	Nicht erforderlich
3-5	Mittel	Erforderlich
6-7	Hoch	Erforderlich
8-10	Sehr hoch	Unbedingt erforderlich
Ab 11	Extrem	Sind ein Muss

*Tabelle 2: Klassifizierung UV-Index [21]*

Der UV-Index (UVI) wird laut dem *Deutschen Wetterdienst* [22] wie folgt berechnet:

*„Er ist ein dimensionsloser Wert, definiert als das Integral der spektralen UV-Bestrahlungsstärke auf die horizontale Empfangsfläche zwischen 280 und 400nm Wellenlänge, Watt pro Quadratmeter, gefaltet mit dem Referenzwirkungsspektrum für Erythem (CIE 1987) und multipliziert mit der Konstanten 40 Quadratmeter pro Watt.“*

$$UVI = k \cdot \int_{280nm}^{400nm} E(\lambda) * s(\lambda) * d\lambda \quad (4.1)$$

$E(\lambda)$   $\triangleq$  Spektrale solare Bestrahlungsstärke an der Erdoberfläche  $E(\lambda)$  [Watt pro Quadratmeter und Nanometer]

$\lambda, d\lambda$   $\triangleq$  Wellenlänge und Wellenlängenintervall [Nanometer]  $k = 40$  [Quadratmeter pro Watt]

$s(\lambda)$   $\triangleq$  Erythem (CIE 1987) Referenzwirkungsspektrum

$$s(\lambda) = \begin{cases} 1 & \text{für } \lambda \leq 298nm \\ 10^{[0.094 * (298 - \lambda)]} & \text{für } 298nm \leq \lambda \leq 328nm \\ 10^{[0.015 * (139 - \lambda)]} & \text{für } 328nm \leq \lambda \leq 400nm \end{cases} \quad (4.2)$$

Aufgrund dieser energiereichen Strahlung besitzt die Intensität der Strahlung eine hohe Relevanz, da sie kurzfristige und langfristige Wirkungen beziehungsweise Gesundheitsschäden mit sich bringen kann. Kurzfristige Schäden sind unter anderem Sonnenbrand oder eine Bindehautentzündung am Auge. Langfristig kann dies zu Hautkrebs oder eine Linsentrübung am Auge (Grauer Star) führen. Deshalb spielt die Intensität eine Rolle, weshalb sie bestimmt werden muss, um sich dann angemessen dagegen schützen zu können [23].

Aufgrund der Relevanz dieser meteorologischen Elemente, sind Sensoren zur Erfassung von Lufttemperatur, -druck und -feuchtigkeit, aber auch die Installation eines Sensors zur Messung von UV-Strahlung am Modul mit meteorologischen Sensoren geplant. Weiter werden weitere Sensoren installiert, deren Messung mit der Meteorologie in keinem beziehungsweise nur in einem geringen Zusammenhang stehen, weshalb sie hier nicht unter einem meteorologischen Hintergrund behandelt wurden.



## **6 Anwendungsmöglichkeiten des Quadrocopters mit meteorologischen Sensoren**

Um zu verdeutlichen für welche Zwecke die Entwicklung eines Prototyps mit meteorologischen Sensoren verwendet werden kann, wird im Folgenden auf die Anwendungsgebiete eingegangen in denen ein solcher Quadrocopter wirken kann, etwa in verschiedenen Bereichen, wie insbesondere in der Wetterüberwachung und -vorhersage, der Landwirtschaft, dem Umweltschutz und der Katastrophenhilfe. [24]

Generell ist zu beachten, dass für viele der folgenden Anwendungsmöglichkeiten eine Sinnhaftigkeit darin besteht, den Quadrocopter mit weiterer Hard- und Software auszustatten. Hierzu kann eine Kamera mit einer Live-Bild-Übertragung sehr hilfreich sein oder auch eine Wärmebildkamera. Auch Systeme zur Kollisionsvermeidung oder „Abstandsregelung“ bringen ein großes Potential mit sich.

In der Wetterüberwachung und -vorhersage kann ein Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren zur Messung von Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -druck eingesetzt werden. Die meteorologischen Daten, die vom Quadrocopter gesammelt werden, können verwendet werden, um Wetterbedingungen in Echtzeit zu überwachen und Vorhersagen zu treffen. Dadurch können Wetterbedingungen besser verstanden und potenzielle Risiken, Unwetter und Gefahren, wie Unwetter oder Starkregen, frühzeitig erkannt werden.

In der Landwirtschaft kann ein Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren zur Überwachung von Wetterbedingungen eingesetzt werden, um das Wachstum und die Gesundheit von Pflanzen zu verbessern. Die meteorologischen Daten können verwendet werden, um den optimalen Zeitpunkt für die Aussaat, die Bewässerung und die Ernte zu bestimmen. Darüber hinaus kann der Quadrocopter auch zur Überwachung von Schädlingsbefall und zur Identifizierung von Pflanzenkrankheiten eingesetzt werden.

Im Bereich des Umweltschutzes kann ein Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren zur Überwachung von Luftverschmutzung eingesetzt werden. Die meteorologischen Daten können verwendet werden, um die Ausbreitung von Schadstoffen in der Luft zu verfolgen und die Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit zu bewerten. Darüber hinaus kann der Quadrocopter auch zur Überwachung von Wasserqualität und zur Identifizierung von Umweltproblemen wie Ölverschmutzungen eingesetzt werden.

Im Bereich der Katastrophenhilfe kann ein Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren zur Unterstützung von Rettungseinsätzen eingesetzt werden. Die meteorologischen Daten können verwendet werden, um die Auswirkungen von Naturkatastrophen wie Erdbeben, Überschwemmungen und Stürmen zu bewerten und die Rettungsmaßnahmen zu koordinieren. Darüber hinaus kann der Quadrocopter auch zur Identifizierung von Schäden an Infrastrukturen und Gebäuden eingesetzt werden.

Um die Anwendungsmöglichkeiten eines Quadrocopters mit meteorologischen Sensoren zu maximieren, müssen jedoch auch bestimmte Herausforderungen bewältigt werden. Dazu gehört die Entwicklung von zuverlässigen und präzisen Sensoren, die in der Lage sind, genaue meteorologische Daten zu sammeln. Darüber hinaus müssen die Daten sicher und effektiv übertragen und verarbeitet werden, um sie für die Anwender zugänglich und nützlich zu machen. Auch die Sicherheit des Betriebs muss berücksichtigt werden, um Unfälle und Kollisionen mit anderen Luftfahrzeugen zu vermeiden.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Quadrocoptern in verschiedenen Bereichen zu berücksichtigen. Es gibt bestimmte Vorschriften und Gesetze, die den Betrieb von Drohnen in der Nähe von Flughäfen, Städten und anderen Gebieten regeln. Die Einhaltung dieser Regeln ist entscheidend, um den sicheren Betrieb von Quadrocoptern zu gewährleisten und potenzielle Schäden zu vermeiden.

Insgesamt bietet ein Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Bereichen. Durch die Sammlung und Überwachung von meteorologischen Daten können bessere Entscheidungen getroffen und Risiken minimiert werden. Obwohl es bestimmte Herausforderungen gibt, die bewältigt werden müssen, um den sicheren und effektiven Betrieb von Quadrocoptern zu gewährleisten, wird der Einsatz von Quadrocoptern mit meteorologischen Sensoren in Zukunft voraussichtlich weiter zunehmen und zu neuen Anwendungsbereichen führen.

Ein wichtiger Faktor bei der Entwicklung und dem Einsatz von Quadrocoptern mit meteorologischen Sensoren ist auch die Berücksichtigung ethischer Aspekte. Es müssen Fragen zur Privatsphäre, zum Datenschutz und zur Verantwortlichkeit im Zusammenhang mit dem Sammeln, Verarbeiten und Speichern von Daten geklärt werden. Auch der mögliche Missbrauch von Technologie muss in Betracht gezogen werden, um die Entwicklung von

Quadrocoptern mit meteorologischen Sensoren in einer ethischen und verantwortungsbewussten Weise zu fördern.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren eine vielversprechende Technologie sind, die in verschiedenen Bereichen wie Wetterüberwachung und -vorhersage, Landwirtschaft, Umweltschutz und Katastrophenhilfe eingesetzt werden kann. Die Herausforderungen, die mit der Entwicklung und dem Betrieb von Quadrocoptern verbunden sind, müssen jedoch sorgfältig angegangen werden, um ihre Anwendungsmöglichkeiten zu maximieren und eine verantwortungsbewusste Nutzung zu gewährleisten. [25]

## 7 Vergleich mit anderen meteorologischen Messverfahren

Drohnen im Generellen haben in den letzten Jahren, vor allem im letzten Jahrzehnt, an großer Bedeutung sowohl im industriellen und militärischen Bereich als auch im zivilen Bereich gewonnen. Das ist zum Beispiel daran zu erkennen, dass es mittlerweile eine allgemeine EU-weite Regelung [9] für den Betrieb von Drohnen gibt oder auch daran, dass immer wieder aktuelle Berichte zu Ereignissen mit militärischen Drohnen erscheinen [26, 27]. Somit können Drohnen beziehungsweise Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren auch als neues Instrument in der Wetterüberwachung und -vorhersage im Vergleich zu anderen gängigen Messverfahren wie Wetterballons, Wettersatelliten oder festen Wetterstationen verwendet werden. Im folgenden Vergleich sollen die Vor- und Nachteile des Quadrocopters im Vergleich zu anderen Messverfahren hervorgehoben werden.

Wetterballons werden seit vielen Jahrzehnten verwendet, um Wetterdaten in der Atmosphäre zu sammeln. Wetterballons werden in die Luft geschickt und senden meteorologische Daten wie Luftdruck, -temperatur und -feuchtigkeit zurück zur Erde. [28] Sie haben den Vorteil, dass sie große Höhen erreichen und Daten aus der oberen Atmosphäre sammeln können. Dies ist besonders wichtig für die Vorhersage von Stürmen und anderen Wetterereignissen, die in der Höhe stattfinden und sich auf das Wetter an der Erdoberfläche auswirken können. Der Nachteil von Wetterballons ist jedoch, dass sie sehr kostenintensiv und zeitaufwändig sind und nur begrenzte Informationen liefern können. [29]

Wettersatelliten sind ein weiteres gängiges Messverfahren zur Wetterüberwachung und -vorhersage. Sie umkreisen die Erde in einer Umlaufbahn und sammeln meteorologische Daten wie Luftdruck, -temperatur und -feuchtigkeit aus der Atmosphäre. Die Vorteile von Wettersatelliten sind, dass sie eine umfassende Abdeckung der Erdoberfläche ermöglichen. Der Nachteil von Wettersatelliten ist, dass sie ebenfalls kostenintensiv in der Herstellung und im Betrieb sind. Außerdem können sie keine Daten aus der unteren Atmosphäre sammeln, was für die Vorhersage von lokalen Wetterereignissen wie Gewittern und Stürmen von Nachteil sein kann. [30]

Feste Wetterstationen sind Stationen die Daten über verschiedene Wetterparameter sammeln. Dazu gehören Daten zu Luftdruck, -temperatur, -feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung und die Niederschlagsmenge. Genauso wie die anderen Möglichkeiten besitzen Wetterstationen auch ihre Vor- und Nachteile. Vorteile von

Wetterstationen sind ihre Genauigkeit, da diese sehr genau, kontinuierlich und automatisch Daten sammeln können. Aufgrund ihrer hohen Qualität können diese Daten für genaue Wettervorhersagen und Klimastudien verwendet werden. Weiter gewährleisten Wetterstationen eine gewisse Konstanz, da sie rund um die Uhr betrieben werden und somit kontinuierlich Daten liefern können. Zudem agieren Wetterstationen als Teil eines Netzwerkes, durch das es möglich ist, Wetterdaten aus verschiedenen Regionen zu sammeln und zu analysieren. Als Nachteil lässt sich die Standortabhängigkeit identifizieren, da sie auf einen bestimmten Standort beschränkt sind und somit nur einen gewissen Bereich abdecken können. Zudem können sie nur an bestimmten Orten installiert werden, da Bäume und Gebäude die Genauigkeit beeinträchtigen können. Außerdem kommen die Kosten als Nachteil hinzu, da feste Wetterstationen in der Regel teuer in der Anschaffung und Installation sowie für den Unterhalt sind. [31]

Im Vergleich dazu hat der Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren den Vorteil, dass er kosteneffektiver und flexibler ist als Wetterballons, Wettersatelliten und Wetterstationen. Quadrocopter können in Echtzeit Daten aus der unteren Atmosphäre sammeln, was für die Vorhersage von lokalen Wetterereignissen relevant ist. Darüber hinaus können Quadrocopter in Gebieten eingesetzt werden, in denen andere Messverfahren nicht zugänglich sind, wie beispielsweise in unzugänglichen Gebieten wie Bergen oder größeren Flächen. Der Nachteil von Quadrocoptern ist, dass sie eine begrenzte Flugzeit und Reichweite haben und aufgrund von Wetterbedingungen wie starkem Wind oder Regen eingeschränkt sein können.

Insgesamt lässt sich sagen, dass der Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren ein vielversprechendes Instrument für die Wetterüberwachung und -vorhersage ist, da er kosteneffektiv, flexibel und in der Lage ist, Daten in Echtzeit zu sammeln. Dennoch ist es wichtig zu beachten, dass der Quadrocopter nicht die einzige Methode zur Wetterüberwachung und -vorhersage ist und dass er seine eigenen Vor- und Nachteile hat. Eine Kombination verschiedener Messverfahren kann zu einem umfassenderen Verständnis des Wetters beitragen und somit zu genaueren Vorhersagen führen.

Zudem ist es wichtig zu erwähnen, dass der Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren für bestimmte Anwendungen besser geeignet ist als für andere. Beispielsweise kann er für die Überwachung von lokalen Wetterbedingungen in städtischen Gebieten, für die Suche nach Vermissten in unzugänglichen Gebieten oder für die Beobachtung von

Wetterbedingungen in der Nähe von Flughäfen, da hier ein schnelles Handeln erforderlich sein kann, verwendet werden. Für globale Wettervorhersagen oder für die Überwachung von Wetterbedingungen in der oberen Atmosphäre sind andere Messverfahren wie Wettersatelliten besser geeignet.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Zuverlässigkeit der Daten, die von Quadrocoptern gesammelt werden. Es ist wichtig sicherzustellen, dass die Daten, die von den Sensoren des Quadrocopters gesammelt werden, von hoher Qualität und Genauigkeit sind, um genaue Wettervorhersagen zu ermöglichen. Es muss auch sichergestellt werden, dass die Flugbedingungen und Umgebungsbedingungen des Quadrocopters berücksichtigt werden, um eine genaue Interpretation der Daten zu gewährleisten.

Zusammenfassend kann solch ein Quadrocopter ein vielversprechendes Instrument für die Wetterüberwachung und -vorhersage sein. Die Vorteile des Quadrocopters, wie Flexibilität, Kosteneffektivität und Echtzeit-Daten, machen ihn zu einer wertvollen Ergänzung zu anderen Messverfahren wie Wetterballons, Wettersatelliten und Wetterstationen. Wenn jedoch genaue und zuverlässige Wettervorhersagen erforderlich sind, ist es wichtig, eine Kombination verschiedener Messverfahren zu verwenden und sicherzustellen, dass die Datenqualität und -genauigkeit der gesammelten Daten gewährleistet sind.

## 8 Anforderungen

Um in die praktische Umsetzung des Projektes zu starten, müssen Anfangs Anforderungen definiert werden. Diese dienen vor allem zur Beschaffung und Verwendung der Hardware, worauf beim Quadrocopter (siehe Kapitel 9) noch genauer eingegangen wird. Die nachstehenden Anforderungen wurden vor dem Hintergrund der Problemstellung aus Kapitel 1.1 erstellt.

### 8.1 Fliegender Quadrocopter

Als Grundanforderung steht ein vollfunktionstüchtiger und fliegender Multicopter. Folgende Kriterien dienen zur Ermittlung welche Art von Multicopter verwendet werden soll:

- Marktverfügbarkeit
- Verfügbarkeit von Einzelteilen
- Vorerfahrungen
- Komplexität
- Größe
- Kosten

Eine hohe Marktverfügbarkeit und die damit einhergehende größere Verfügbarkeit von Einzelteilen sind wichtige Gründe für die Beschaffung, Dokumentation und anschließende Wartung eines Multicopters. Die Marktverfügbarkeit ist bei Quadrocoptern am größten und lässt sich beispielsweise daran belegen, dass die Firma *DJI* einen weltweiten Marktanteil von 76% bei zivilen Drohnen besitzt [32]. *DJI* bietet ausschließlich Quadrocopter an. Auch bei der Suche am 21.02.2023 „*multicopter bausatz*“ beim Onlineshop *amazon.de* werden bei den relevanten Ergebnissen auf der 1. Seite ausschließlich Multicopter mit 4 Propellern angezeigt. Diese Erkenntnisse werden weiter durch eine spezifische Verkaufsstatistik aus dem Jahr 2021 der Website *shop.drohnen.de* verifiziert. Hierbei wird lediglich ein Multicopter (Yuneec Typhoon) mit mehr als 4 Propellern, nämlich 8 Propellern, ein Octacopter, aufgeführt. Dieser besitzt einen Anteil von 0,5% am Markt [33]. Die Verwendung von Multicoptern (mit mehr als 4 Propellern) existiert eher in spezifischen Bereichen wie zum Beispiel beim Projekt [34] der *ADAC Luftrettung* und dem Unternehmen *Volocopter* zur besseren Notfallversorgung durch Multicopter, die als Notarztzubringer gedacht sind. Diese Gründe sprechen auch unter dem Hintergrund, dass ausschließlich Erfahrung in der „Arbeit“ mit Quadrocoptern vorliegt, für die Beschaffung eines solchen

Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Die Erfahrung begünstigt auch, dass mit der sowieso geringeren Komplexität bei einem Quadrocopter im Gegensatz zu einem Multicopter mit weiteren Propellern, besser umgegangen wird. Es werden weniger Motoren mit passenden ESCs benötigt, ein weniger komplexer Flugcontroller, eine geringere Spannungsversorgung und ein kleinerer Frame. Das spiegelt sich in der Komplexität und in den Kosten wider. Trotzdem bleibt dieselbe Funktionalität erhalten. Zwar kann ein Multicopter mit mehr als 4 Propellern eine höhere Last transportieren, aber das ist in diesem Fall nicht notwendig, da das Modul zur Erfassung meteorologischer Daten voraussichtlich kein zu hohes Gewicht aufweisen wird.

Somit fällt die Entscheidung aus folgenden Gründen für einen Quadrocopter anstatt für einen Multicopter mit mehr als 4 Propellern:

- Größere Marktverfügbarkeit
- Höhere Verfügbarkeit von Einzelteilen
- Ausschließlich Erfahrung in der „Arbeit“ mit Quadrocoptern
- Geringere Komplexität und Kosten bei gleichbleibender Funktionalität
- Geringere Größe, dadurch bessere Transportierbarkeit

Aufgrund der Eindeutigkeit der Kriterien und den daraus erkennbaren Vorteilen für einen Quadrocopter, wird hier das Erstellen einer Kriterienmatrix als obsolet angesehen.

### **8.1.1 Flugcontroller & Funkprotokoll**

Der Quadrocopter sollte einen modernen Flugcontroller besitzen, welchen man programmieren und mit Funkprotokollen im Stand der Technik „umgehen“ kann. Hierzu ist ein Flugcontroller sinnvoll, der auf Basis vom Softwareprogramm *ArduPilot* konfiguriert werden kann. Gleichzeitig soll der Flugcontroller GPS-Daten verarbeiten können, um beispielsweise die geflogenen Wegpunkte auf einer Karte anzeigen zu lassen.

Der aktuelle Standard bei Funkprotokollen basiert auf einem digitalen 2,4GHz-Band. Diese bieten im Vergleich zu früheren 35Mhz-Systemen mehrere Vorteile: Sie sind deutlich sicherer und weisen geringe bis keine Störungen auf, bieten Übertragung von Telemetriedaten an, können mit kurzen Antennen betrieben werden und haben eine höhere Reichweite [35]. Somit fällt die Entscheidung des Funkprotokolls auf ein solches mit der Basis eines 2,4GHz-Bandes. Aufgrund dessen könnten mehrere Funkprotokolle in Betracht gezogen werden. Auf dem Markt existieren viele verschiedene Funkprotokolle



unterschiedlicher „Hersteller“. Deswegen muss bei der Auswahl des Funkprotokoll vor allem auf die Kompatibilität mit der Fernsteuerung geachtet werden. Aufgrund der bereits vorhandenen Fernsteuerung und Empfängers war hier das Funkprotokoll *FrSky D16* vorgegeben, was aber in keiner Weise mit anderen Anforderungen im Konflikt steht [36]. Deshalb wird hier wiederum keine Kriterienmatrix entworfen.

### 8.1.2 Motoren

An die Motoren des Quadrocopters werden unter Berücksichtigung der zur Auswahl stehenden Motorenarten (siehe Kapitel 2.2.2), von „brushed“- und „brushless“-Motoren, Anforderungen gestellt. Als Kriterien lassen sich Leistung, Effizienz, Zuverlässigkeit, Präzision und die Kosten festlegen. Diese Kriterien werden mit einer Priorität von 1, 2 oder 3 (1=weniger relevant; 2=gleich relevant; 3=mehr relevant) bewertet. Anhand von grüner oder roter Schrift wird gekennzeichnet, welche Motorenvariante für das jeweilige Kriterium einen Vorteil aufweist. Dies bedeutet, dass die Motorenvariante, die für ein Kriterium vorteilhaft erscheint, sozusagen einen Punkt erhält, der mit der Priorität multipliziert wird und im Anschluss alle mit der Priorität multiplizierten Vorteile aufsummiert werden.

<u>Kriterium</u>	<u>Priorität</u>	<u>„brushless“-Motoren</u>	<u>„brushed“-Motoren</u>
<b>Leistung</b>	3	Stärker	Geringer
<b>Effizienz</b>	2	Höher	Niedriger
<b>Zuverlässigkeit</b>	3	Sicherer	Unsicherer
<b>Präzision</b>	2	Präziser	Ungenauer
<b>Kosten</b>	1	Teurer	Günstiger
<b>Punkte</b>	11	10	1

Tabelle 3: Kriterien + Bewertung der Motorenvariante

Die Motoren müssen leistungsstark genug sein, um den Quadrocopter inklusive dem Sensorkit in der Luft zu halten und eine ausreichende Flugzeit (siehe 8.1.3) zu ermöglichen. „brushless“-Motoren können aufgrund ihrer bereits beschriebenen Eigenschaften, wie dem Erzeugen eines Magnetfeldes mittels Drehstrom, in der Regel mehr Leistung liefern als „brushed“-Motoren, welche einfach über einen Transistor und PWM-Regler steuerbar sind, was sie für anspruchsvollere Anwendungen besser geeignet macht.

„brushless“-Motoren sind in der Regel effizienter als „brushed“-Motoren, da sie ohne Bürsten und Kommutatoren funktionieren. Zudem haben sie auch weniger Reibung und

erzeugen daher weniger Wärme. Diese höhere Effizienz bewirkt unter anderem eine längere Flugzeit und Lebensdauer der Batterie.

Im Vergleich zu „brushed“-Motoren sind „brushless“-Motoren in der Regel langlebiger, da sie keine Bürsten besitzen, welche sich abnutzen und deshalb ausfallen können. Außerdem erzeugen sie weniger Wärme, was die Lebensdauer verlängert. Die Zuverlässigkeit der Motoren ist vor allem für die Gewährleistung eines sicheren und stabilen Fluges relevant. Durch die Bauweise und den daraus resultierenden Eigenschaften bieten „brushless“-Motoren eine höhere Präzision und Kontrolle beim Flug des Quadrocopters, was für eine genaue Steuerung wichtig ist.

„brushed“-Motoren sind in der Regel kostengünstiger als „brushless“-Motoren, was sie für Anwendungen mit einem begrenzten Budget attraktiver macht. Der Kostenfaktor ist wichtig, um eine wirtschaftliche Lösung zu finden, die den Anforderungen entspricht. In diesem Fall sind die beschriebenen Vorteile deutlich überwiegender als die geringeren Kosten der „brushed“-Motoren.

Anhand des Ergebnisses der obigen Tabelle 3 und der Tatsache, dass „brushless“-Motoren der aktuelle Standard für größere Drohnen sind, ergibt sich die Anforderung, „brushless“-Motoren zu verwenden.

### **8.1.3 Spannungsversorgung**

Daran knüpft die Anforderung an die Spannungsversorgung an. Um auswertbare Ergebnisse zu erzielen, soll die Drohne 15-20 Minuten mit einem vollgeladenen Akku fliegen können. Diese Zeit beruht auf persönlichen Erfahrungen, aber auch auf dem aktuellen Stand, wie lange herkömmliche zivile Drohnen fliegen können. Zudem wird eine ausreichende Flugzeit benötigt, um genug Flugänderungen vornehmen zu können. Ein häufiges Wechseln des Akkus ist unvorteilhaft, da sonst eine Vergleichbarkeit einzelner Flüge komplex werden kann, wenn ein zuvor definiertes Gebiet nicht mit einer Akkuladung abgeflogen werden kann. Im Falle einer nicht ausreichenden Flugzeit für ein Gebiet, müsste die Drohne zurück zum Start manövriert werden, der Akku ausgetauscht werden und wieder zu dem Punkt geflogen werden, an dem der „Heimflug“ begonnen wurde. In Bezug auf die Meteorologie, deren Ergebnissen und der Problemstellung dieser Arbeit ist es relevant, dass ein Gebiet im Ganzen abgeflogen wird, um ein Mikroklima zu erfassen. Gleichzeitig dürfen die Punkte und Wege in diesem Gebiet nicht zu schnell abgeflogen werden, um den Sensoren

ausreichend Zeit zu geben, Daten zu erfassen. Wegen dieser Gründe und der herkömmlichen Flugzeit, wurde diese Zeitangabe definiert. Diese ist natürlich abhängig von der Last und dem Gewicht, was durch das Modul der meteorologischen Sensoren hinzukommt. Mit zusätzlichem Gewicht soll die Flugzeit 10-15 Minuten betragen. Welche Größe des Akkus benötigt wird, wird anhand von Tests noch ermittelt werden müssen. Generell muss die allgemeine Leistung und speziell die Leistung der Spannungsversorgung so hoch sein, um zusätzliches Gewicht eine bestimmte Zeit transportieren, hoch genug fliegen und alle Standard-Flugbewegungen durchführen zu können.

## **8.2 Meteorologische Sensoren**

Das Hauptaugenmerk dieser Studienarbeit liegt auf einem Modul, welches aus mehreren meteorologischen Sensoren besteht, die Daten sammeln sollen. Hierbei ist die Anforderung solche Sensoren auszuwählen, welche sinnvolle meteorologischen Daten liefern. Es muss beachtet werden, dass mehrere Sensoren ausgewählt werden müssen, um verschiedene Daten der Meteorologie zu erfassen. Anhand dessen soll das Wetter interpretiert werden. Deshalb besteht die Anforderung darin, mindestens 3 verschiedene Sensoren auszuwählen. Hierzu können Sensoren für klassische Daten wie Lufttemperatur,- druck und -feuchtigkeit zählen, aber auch Sensoren, die die Beleuchtungsstärke, die UV-Strahlung oder die Luftqualität messen. Die Mindestanzahl beruht auf der Anzahl der klassischen Sensoren beziehungsweise klassischen Elementen der Meteorologie: Lufttemperatur,- druck und -feuchtigkeit. Auf die Bedeutung dieser Elemente und den Elementen etwaiger anderer Sensoren für die Meteorologie wird für den jeweiligen Sensor in Kapitel 10 genauer eingegangen.

## **8.3 Übertragung der Daten an Bodenstation**

Das Modul mit den meteorologischen Sensoren sammelt die verschiedensten Daten. Diese sollen wie bereits beschrieben auf dem Quadrocopter gespeichert werden. Weiter sollen sie an eine „Bodenstation“ übertragen werden, um dort ausgewertet zu werden. Diese Übertragung soll „live“ stattfinden, damit es möglich ist die Daten zum einen auf ihre Plausibilität hin zu prüfen, zum anderen damit nach einer kurzen Auswertung der Daten auch direkt ein anderer Punkt angeflogen werden kann um die dortigen Gegebenheiten/Daten vergleichen zu können. Wenn die Daten nicht „live“ übertragen würden, man den Flug zu

Ende fliegt, die Daten auslesen und auswerten muss, kann sich die Witterung, aufgrund der weiterfortgeschrittenen Zeit, schon verändert haben, weswegen keine vergleichbaren Daten gesammelt werden können. Kleinere Verzögerungen werden aber akzeptiert. Somit muss hierfür ein Funkprotokoll ausgewählt werden, welches die Größe der Daten mit einer akzeptablen Latenz übertragen kann und eine ausreichende Reichweite besitzt.

## **8.4 Speicherung der Daten auf dem Quadrocopter**

Eine Anforderung an die Modifizierung des Quadrocopters durch das Modul zur Erfassung von meteorologischen Daten soll sein, dass diese erfassten Daten lokal „auf“ dem Modul gespeichert werden sollen. Am sinnvollsten wird hier das Verbauen eines microSD-Karten-Moduls sein, welches eine ausreichend große microSD-Karte beinhaltet. Dies soll vor allem aus Redundanzgründen geschehen, um ein Backup zu haben, falls bei der Übertragung an die Bodenstation Daten verloren gehen oder dass, wenn eine Verbindung zur Bodenstation nicht möglich ist, trotzdem die Daten lokal gespeichert werden.

## **8.5 Datenhandling**

Nachdem die Daten an die Bodenstation übertragen wurden, sollen diese in einer Datenbank aufgenommen und gespeichert werden. Durch eine konsistente Speicherung und Bereitstellung der Mess- und anderen geloggten Daten, können die Daten sicherer und einfacher ausgewertet und interpretiert werden. Korrelationen und Kausalitäten können so einfacher festgestellt werden.

## **8.6 Automatisierte Steuerung und Darstellung des Fluges auf einer Karte**

Durch ein GPS-Modul sollen in einem vordefinierten Intervall GPS-Koordinaten aufgenommen werden, die dann auf einer geografischen Karte dargestellt werden. Hierdurch soll erkennbar sein, welche Punkte der Quadrocopter zu welcher Zeit angefliegen hat, denn mit der Übertragung der GPS-Koordinaten wird auch ein Zeitstempel übertragen. In einer späteren Iteration des Projektes können dadurch dem Quadrocopter Wegpunkte mitgeteilt werden, die er dann aufgrund seines GPS-Moduls automatisiert anfliegen kann.

## **8.7 Unabhängiges Modul mit meteorologischen Sensoren & Bodenstation zum Empfang der Daten**

Am Ende des Projektes sollen ein vollfunktionstüchtiges Modul und ein Quadrocopter entstehen. Dabei soll das Modul möglichst modular aufgebaut sein, sodass es auf verschiedenen Vehikeln oder anderen Trägern befestigt und damit verwendet werden kann. Wichtige Schritte hierbei sind die Befestigung an dem jeweiligen Gegenstand. Es soll möglichst gut gegen externe Faktoren geschützt sein und sich unkompliziert montieren und demontieren lassen. Zudem soll das Modul eine eigene Spannungsversorgung besitzen, damit es unabhängig betrieben werden kann. Auch ein eigenes GPS-Modul wird von Nöten sein, damit die Daten in einen geografischen Kontext – auch unabhängig vom Gegenstand – gesetzt werden können. Die meteorologischen Sensoren aus Kapitel 8.2 sollen in dieses Modul integriert werden, um entsprechende Daten sammeln zu können. Diese meteorologischen Daten sollen an die Bodenstation übertragen werden. Diese soll an einen Computer angeschlossen werden, damit die Daten auf diesem dargestellt werden können.

## 9 Hardwareanalyse eines Quadrocopters

Nach dem nun Anforderungen definiert wurden, ist zu überprüfen, welche Quadrocopter diese Anforderungen erfüllen. Hier werden dieselben Kriterien, die unter Kapitel 8 – Fliegender Quadrocopter – beschrieben sind, beachtet. Hierzu haben sich schnell zwei Lösungen angeboten. Zum einen die Neubeschaffung eines Quadrocopter-Bausatzes oder zum anderen ein bereits bei der DHBW Mannheim vorhandenen Multicopter. Nach genauerer Inspizierung dieses vorhandenen Multicopters sind einige „Mängel“ zum Vorschein gekommen, die für eine Neubeschaffung sprechen. Auch vor dem Hintergrund, dass dieser für weitere Forschungszwecke verwendet werden kann. Die Mängel waren folgende:

- Keine vorhandene Fernsteuerung.
- Flugcontroller mit nicht mehr gebräuchlicher Funkfrequenz.
- Fehlende Dokumentation der Drohne im Allgemeinen und der Einzelteile.
- Funktionalität der Motoren unklar.
- Unvollständiger Quadrocopterframe; sowohl Abdeckung nicht vorhanden als auch keine Möglichkeit zur Befestigung des Moduls zur Erfassung von meteorologischen Daten.
- Passendes Zubehör nicht vorhanden (ohne Dokumentation schwer zu beschaffen).

Das offensichtlichste und mit am größten Problem bestand darin, dass keine Fernsteuerung vorhanden war. Auch die Überlegung, nur hierfür Ersatz zu beschaffen, konnte nicht realisiert werden, da beim genauen Betrachten des Flugcontrollers erkannt wurde, dass dieser eine nicht mehr gebräuchliche Funkfrequenz von 35,14MHz verwendet. Für diese Frequenz eine Fernsteuerung zu beschaffen, erwies sich als nicht praktikabel, da zu diesem Problem noch weitere hinzukamen, etwa das Fehlen einer Dokumentation für die vorhandenen Teile. Es sind keine Informationen, wie Modellbeschreibung oder eine Anleitung über den Flugcontroller sowie den Motorsteuerungen vorhanden. Ohne eine technische Dokumentation kann der Multicopter nicht auf ein neues Fernsteuerungsprotokoll umgestellt werden, um diesen mit einer neuen, aktuellen Funkfernsteuerung kompatibel zu machen. Auch eine Konfiguration des Flugcontrollers lässt sich ohne Dokumentation nicht durchführen. Die Motorsteuerungen sind fest mit dem Flugcontroller verbunden und lassen sich daher nicht ohne Weiteres mit einem neuen Controller wiederverwenden. Die Motoren können unter Umständen noch verwendet

werden, jedoch steht ihre Funktionsfähigkeit ohne entsprechende Tests in Frage und es lässt sich nicht sicher sagen, ob diese einwandfrei funktionieren und für unsere Anforderungen geeignet sind.

Der Quadrocopter-Frame ist unvollständig und es fehlen sowohl die Abdeckung für die Oberseite (für Flugcontroller und Motorsteuerungen) als auch ein geeigneter Platz für den Akku, zumal dieser auch nicht vorhanden ist. Weiterhin ist kein geeigneter Platz zu erkennen, an dem die Hardware für die Erfassung der meteorologischen Daten befestigt werden könnte. Auch passendes Zubehör wie Schrauben oder Klemmen sind nicht vorhanden. Ohne dieses Zubehör müssen passende Schrauben und auch eine Abdeckung gefunden bzw. hergestellt werden (zum Beispiel aus einem 3D-Drucker), was jedoch einen unangemessenen Aufwand erfordert.

Durch diese Probleme entstand die Frage, ob überhaupt die vorhandenen und neu zu beschaffenden Einzelteile miteinander kompatibel sind, was die gesamte Funktionalität unklar machte. Unter diesen Umständen wurde beschlossen, eine komplette Neuanschaffung in Form eines fertigen Kits durchzuführen und keine Teile des alten Modells zu nutzen. Durch die Beschaffung eines Bausatz-Kits sind die enthaltenen Teile bereits aufeinander abgestimmt und müssen so nicht auf Kompatibilität mit anderen Teilen geprüft und getestet werden.

Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Beschaffung dieses Bausatz-Kittes musste eine andere Lösung für die Drohne gefunden werden. Diese Lösung bestand darin, eine private Drohne zu verwenden, die das gleiche Modell widerspiegelt, wie die Drohne, die hätte beschafft werden müssen. Da die Drohne privates Material ist und nach diesem Projekt nicht in das Eigentum der DHBW Mannheim wechselt, wird auch das Modul zur Erfassung der meteorologischen Daten angepasst werden müssen. Dieses soll so modular sein, dass es einfach auf der Drohne montiert und demontiert werden und unkompliziert auch auf anderen Trägersystemen verwendet werden kann. Das soll bezwecken, dass das Modul mit den Sensoren und die Basisstation unabhängig von der Drohne verwendet werden können. Zwei der wichtigsten Schritte zur „Unabhängigkeit“ ist die eigene Spannungsversorgung und das eigene GPS-Modul.

## 10 Meteorologische Sensoren & notwendige Bauteile

Folgende Sensoren wurden für die Erfassung von meteorologischen Daten ausgewählt:

- Microchip MCP9808 Temperatursensor
- HopeRF HP206C Barometer und Höhsensor
- AMS TSL2591 Lichtsensor
- UVM30A UV Sensor
- Laser PM2.5 Feinstaubsensor
- JOT-IT CCS811 Luftqualitätsensor

Zusätzlich wurde ein GlobalSat EM-406a GPS-Modul für die genaue Standorterfassung ausgewählt. Die Sensoren wurden anhand ihres Preis-Leistungs-Verhältnisses ausgewählt. Diese werden im Folgenden genauer beschrieben.

Zudem werden zu den einzelnen meteorologischen Sensoren auf Grundlage des Kapitels 5 ihre Bedeutung für die Meteorologie erläutert. Für diese Erläuterungen wurden die Quellen [18], [37], [23], [20], [16], [21], [22], [19], [15], [17] aus Kapitel 5 verwendet. Die Erläuterung geht auch auf die Auswirkungen der meteorologischen Elemente ein, dessen Daten die jeweiligen Sensoren sammeln. Das soll auch als Weiterführung des Kapitels 8.2 dienen, um die Relevanz deutlich zu machen und wieso diese Sensoren ausgewählt wurden.

### 10.1 Microchip MCP9808 Temperatursensor

Der MCP9808 ist ein digitaler Temperatursensor mit einer Genauigkeit von typisch  $0.25^{\circ}\text{C}$  und maximal  $0.5^{\circ}\text{C}$  zwischen  $-20^{\circ}\text{C}$  und  $100^{\circ}\text{C}$  [38]. Es kann eine Messauflösung von  $0.5^{\circ}\text{C}$ ,  $0.25^{\circ}\text{C}$ ,  $0.125^{\circ}\text{C}$  und  $0.0625^{\circ}\text{C}$  genutzt werden. Je nach Messauflösung benötigt der Sensor zwischen 30ms und 250ms für die Temperaturmessung. Der Sensor kann zwischen 2.7V und 5.5V betrieben werden und benötigt bei normalem Betrieb typisch  $200\mu\text{A}$ .

#### 10.1.1 Kommunikation

Der Sensor verfügt über ein 2- Wire -Interface, welches mit Inter-Integrated-Circuit (I<sup>2</sup>C) oder System-Management-Bus (SMBus) kompatibel ist.



### 10.1.2 Verarbeitung der Sensordaten

Die Verarbeitung der Sensordaten findet direkt auf dem Sensor statt, so dass der Controller keine zusätzliche Berechnung durchführen muss. Die Daten können nach dem Abrufen direkt in wahlweise *Grad Celsius* oder *Grad Fahrenheit* gespeichert und/oder übertragen werden.

### 10.1.3 Relevanz für die Meteorologie

Die Temperatur besitzt eine entscheidende Rolle in der Meteorologie und beeinflusst eine Vielzahl von Prozessen in der Atmosphäre und in den Ozeanen, die letztendlich das Wetter und das Klima auf der Erde bestimmen. Eine genaue Kenntnis der Temperaturveränderungen und deren Auswirkungen ist daher von großer Bedeutung für die Vorhersage von Wetterereignissen und die Erforschung des Klimawandels.

Einige der wichtigsten Auswirkungen der Temperatur auf die Meteorologie sollen nachstehend detaillierter beschrieben werden:

**Wetterereignisse:** Die Temperatur beeinflusst die Entstehung und Intensität von Wetterereignissen. Zum Beispiel können hohe Temperaturen die Verdunstungsraten erhöhen und somit zur Entstehung von Gewittern, Stürmen und Dürren führen. Auf der anderen Seite kann eine Abkühlung der Luft zu einer erhöhten Feuchtigkeit führen und so eine Zunahme von Niederschlägen und Überschwemmungen verursachen.

**Luftzirkulation:** Die Temperaturunterschiede zwischen verschiedenen Orten auf der Erde beeinflussen die Luftzirkulation in der Atmosphäre. Diese Unterschiede können zu einer Bildung von Hoch- und Tiefdruckgebieten führen, die wiederum das Wetter, nicht nur auf regionaler Ebene, beeinflussen. Zum Beispiel führt eine Erwärmung der Luft über dem Äquator zu einer Ausdehnung der Luft und damit zu einem Tiefdruckgebiet. So ein Tiefdruckgebiet zieht Luft aus den höheren Breiten an, was wiederum zu einem Hochdruckgebiet führt.

**Meeresströmungen:** Die Temperatur des Wassers beeinflusst die Meeresströmungen, die das Klima und das Wetter beeinflussen können. Zum Beispiel führt das Abschmelzen von Eis in der Arktis und Antarktis zu einem Rückgang der Salinität und somit zu einer Veränderung der Golfstromzirkulation. Außerdem steigt durch das Abschmelzen auch der Meeresspiegel im Allgemeinen. Diese Veränderungen können das Klima in Europa beeinflussen.

Klimawandel: Die Temperatur spielt eine zentrale Rolle im Klimawandel, da die Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur zu einer Veränderung des Klimasystems der Erde führt. Dies kann zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Niederschlagsmengen, einem Anstieg des Meeresspiegels und einer Zunahme von extremen Wetterereignissen führen. Der Temperaturanstieg wird vor allem durch den Treibhauseffekt verursacht, der durch menschliche Aktivitäten wie den Ausstoß von Treibhausgasen verstärkt wird.

Zusammenfassend hat die Temperatur eine komplexe und weitreichende Auswirkung auf die Meteorologie und das Klima der Erde. Eine genaue Kenntnis der Temperaturveränderungen und deren Auswirkungen ist daher von großer Bedeutung für die Vorhersage von Wetterereignissen und die Erforschung des Klimawandels.

## **10.2 HopeRF HP206C Barometer und Höhsensor**

Der HopeRF HP206C ist ein Barometer, der aus diesen Druckdaten die Höhe berechnet und zusätzlich für die Berechnung der Höhe einen Temperatursensor eingebaut hat [39]. Der Barometer hat einer Genauigkeit von typisch 1.5 Millibar (mbar) und maximal 3mbar zwischen -20°C und 70°C. Die Genauigkeit für die Höhe liegt somit ungefähr zwischen 9-22m. Die Auflösung des Barometers beträgt 0.01mbar und die des Höhsensor 0.1m. Je nach Messgenauigkeit benötigt der Sensor zwischen 4.1ms und 131.1ms für die Auswertung der Temperatur und des Drucks inklusive Höhe. Der Sensor kann zwischen 1.8V und 3.6V betrieben werden und benötigt bei normalem Betrieb maximal 1.3mA.

### **10.2.1 Kommunikation**

Der Sensor verfügt über ein 2- Wire -Interface, welches mit I<sup>2</sup>C oder SMBus kompatibel ist.

### 10.2.2 Verarbeitung der Sensordaten

Die Verarbeitung der Sensordaten findet direkt auf dem Sensor statt, so dass der Controller keine zusätzliche Berechnung durchführen muss. Die Daten werden für den Druck in der Einheit *Pascal* und für die berechnete Höhe in der Einheit *Meter* übertragen. Der eingebaute Temperatursensor liefert Daten in der Einheit *Grad Celsius* und werden für die Berechnung der Höhe benötigt. Als Temperaturdaten werden diese hier nicht genutzt, da ein extra Temperatursensor verbaut wird (siehe Kapitel 10.1). Die Höhe wird durch einen internen, nicht öffentlichen Algorithmus berechnet und gibt die Höhe über Normal Null (N.N. = Höhe über Meeresspiegel) an. Die Daten können nach dem Abrufen direkt gespeichert und/oder übertragen werden.

### 10.2.3 Relevanz für die Meteorologie

Der Luftdruck spielt eine wichtige Rolle in der Meteorologie und prägt sowohl das Wetter als auch das Klima auf der Erde. Luftdruck wird gemessen in Hektopascal oder Millibar, wobei ein Standard-Luftdruck auf Meereshöhe bei etwa 1013hPa liegt.

Einige der relevantesten Auswirkungen des Luftdrucks auf die Meteorologie im Detail:

**Bildung von Hoch- und Tiefdruckgebieten:** Unterschiede im Luftdruck führen zur Bildung von Hoch- und Tiefdruckgebieten. Ein Hochdruckgebiet entsteht, wenn kalte Luft absinkt und den Druck auf der Erdoberfläche erhöht. In einem Tiefdruckgebiet steigt warme Luft auf, was den Luftdruck an der Erdoberfläche reduziert. Diese Druckunterschiede führen zu einem Luftstrom, der Wind genannt wird, und beeinflussen das Wetter, nicht nur auf regionaler Ebene.

**Wind:** Der Luftdruck beeinflusst den Wind und seine Richtung und Stärke. Die Luft bewegt sich immer vom Hochdruckgebiet zum Tiefdruckgebiet, wobei die Bewegung durch die Corioliskraft zusätzlich beeinflusst wird. Die Stärke des Windes hängt vom Druckunterschied zwischen den Hoch- und Tiefdruckgebieten ab.

**Luftfeuchtigkeit:** Der Luftdruck beeinflusst auch die Luftfeuchtigkeit. Warme Luft kann mehr Feuchtigkeit aufnehmen als kalte Luft. Wenn warme Luft auf ein Tiefdruckgebiet trifft und aufsteigt, kühlt sie ab und die Feuchtigkeit kondensiert zu Wolken, welche zu Niederschlag führen.

Luftmasse: Der Luftdruck wirkt auch auf die Eigenschaften der Luftmasse ein, die ein bestimmtes Gebiet beeinflusst. Luftmassen haben unterschiedliche Temperaturen, Feuchtigkeitsgehalte und Drucke. Eine kalte Luftmasse hat in der Regel einen höheren Druck als eine warme Luftmasse und „bewegt“ sich langsamer.

Sturmfluten: Der Luftdruck beeinflusst auch die Höhe von Sturmfluten, die bei schweren Stürmen oder Hurrikans auftreten können. Ein niedriger Luftdruck im Auge des Sturms führt dazu, dass sich das Wasser unter dem Auge hebt und zu Sturmfluten führt.

Zusammenfassend besitzt der Luftdruck eine große Relevanz in der Meteorologie und beeinflusst das Wetter und Klima auf der Erde. Unterschiede im Luftdruck führen zur Bildung von Hoch- und Tiefdruckgebieten, welche den Wind und das Wetter beeinflussen. Der Luftdruck wirkt sich auch die Luftfeuchtigkeit, die Eigenschaften der Luftmasse und die Stärke von Sturmfluten aus.

#### **10.2.4 Exkurs: Höhenberechnung**

Ein Barometer misst den Luftdruck durch die Veränderung der Luftdruckkräfte auf eine bestimmte Fläche. Es gibt verschiedene Arten von Barometern, wie zum Beispiel die klassische Quecksilbervariante. In diesem Projekt kommt ein digitaler Barometer zum Einsatz. Solch ein Barometer misst mit Hilfe eines Drucksensors, der in der Regel ein piezoresistiver oder ein kapazitiver Sensor ist. Der Sensor ist in der Lage, sehr kleine Druckschwankungen zu erfassen und in ein elektrisches Signal umzuwandeln, welches dann in unserem Fall von einem Mikrocontroller ausgewertet wird.

Die Funktionsweise eines piezoresistiven Sensors basiert auf dem Piezoeffekt, der besagt, dass bestimmte Materialien wie Silizium bei einer Verformung eine Änderung des elektrischen Widerstands erfahren. Bei einem piezoresistiven Drucksensor wird eine dünne Siliziummembran durch den umgebenden Luftdruck verformt. Auf der Membran befinden sich winzige Widerstände, die durch die Verformung eine Änderung ihres elektrischen Widerstands erfahren. Diese Änderung wird gemessen und als Druckwert ausgegeben.

Ein kapazitiver Drucksensor basiert auf der Veränderung der Kapazität zwischen zwei Elektroden, die sich durch eine flexible Membran getrennt sind. Wenn sich der Luftdruck auf die Membran auswirkt, wird die Kapazität zwischen den Elektroden verändert, was dann in ein elektrisches Signal umgewandelt und wiederum als Druckwert ausgegeben wird.

Der HopeRF HP206C-Sensor verwendet zur Messung des Luftdruckes eine piezoresistive Zelle, die Änderungen des elektrischen Widerstands aufgrund von Druckänderungen in der Umgebung misst.

Wie bereits in Kapitel 5.3.2 beschrieben, wird die Luft durch die Atmosphäre sozusagen „über“ der Erdoberfläche gehalten, sodass sie nicht in den Weltraum entweichen kann. Dadurch ist die Erde von einer mehreren Kilometern dicken Luftschicht umgeben. Das Gewicht dieser Luftschicht drückt auf die Erdoberfläche und somit wird dieser Druck Luft- oder Atmosphärendruck genannt. Dieser beträgt auf Meereshöhe ca. 1013hPa und ist abhängig von Faktoren wie Luftfeuchte und -temperatur. Auf jeden Quadratmeter wirkt dabei eine Masse von ca. 10.000kg. Weiter nimmt der Luftdruck mit einer wachsenden Höhe ab. Dies ist darin begründet, dass man sich dadurch näher an der Atmosphäregrenze befindet und sich deshalb eine kleinere Luftsäule über einer jeweiligen Fläche befindet [40].

Der gemessene Luftdruck kann dann zur Höhenberechnung [41] verwendet werden. Der verwendete Sensor benutzt hierzu einen internen, nicht öffentlichen Algorithmus. Es existiert aber auch eine bewiesene physikalische Formel

$$h = \frac{288,15K}{0,0065 \frac{K}{m}} \cdot \left(1 - \left(\frac{p}{1013,25hPa}\right)^{\frac{1}{5,255}}\right) \quad (8.1)$$

$h$  = Höhe in m über dem Meeresspiegel

$p$  = aktueller Luftdruck

zur Berechnung der Höhe unter Verwendung des Luftdruckes. Für die Berechnung wird als Referenzhöhe die Meereshöhe und der mittlere Zustand (Temperatur 15°C = 288,15K; Luftdruck 1013,25hPa; Temperaturgradient 0,65K pro 100m – hieraus wird unter Beachtung des Molekulargewichts der Luft (0,02896 kg/mol), der Erdbeschleunigung (9,807 m/s<sup>2</sup>) und der Gaskonstante der Luft (8,314 J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>) der Exponent berechnet) der dortigen Atmosphäre verwendet [42]. Die Formel (8.1) beruht auf der *Internationalen Höhenformel* und wurde nach der Höhe  $h$  aufgelöst. Die *Internationale Höhenformel* ist gültig bis zu einer Höhe von 11km über N.N. [40]. Diese Formel beruht auf der Tatsache, dass der Luftdruck mit der Höhe exponentiell abnimmt.

## 10.3 TH02 Temperatur- und Feuchtigkeitssensor

Der TH02 ist ein digitaler Temperatur- und Feuchtigkeitssensor mit einer Genauigkeit von 4,5% im Bereich von 20% bis 80% relative Luftfeuchtigkeit [43]. Für die Temperaturmessung wird dieser Sensor nicht genutzt. Dies übernimmt der bereits oben aufgeführte MPC9808, da dieser eine bessere Auflösung und Genauigkeit besitzt. Der Sensor kann zwischen 3.3V und 5V betrieben werden und benötigt bei normalem Betrieb maximal 350 $\mu$ A.

### 10.3.1 Kommunikation

Der Sensor verfügt über ein 2-Wire-Interface, welches mit I<sup>2</sup>C oder SMBus kompatibel ist.

### 10.3.2 Verarbeitung der Sensordaten

Die Verarbeitung der Sensordaten findet direkt auf dem Sensor statt, so dass der Controller keine zusätzliche Berechnung durchführen muss. Die Daten können nach dem Abrufen direkt in der Einheit % *relative Luftfeuchtigkeit* gespeichert und/oder übertragen werden.

### 10.3.3 Relevanz für die Meteorologie

Die Luftfeuchtigkeit spielt eine äußerst wichtige Rolle in der Meteorologie und hat zahlreiche Auswirkungen auf das Wetter und das Klima. Es gibt viele Aspekte, die von der Luftfeuchtigkeit beeinflusst werden, darunter Wolkenbildung, Niederschlagsbildung, Luftqualität, -temperatur, -druck, Stürme und der Klimawandel.

Eine der offensichtlichsten Auswirkungen der Luftfeuchtigkeit auf die Meteorologie ist die Bildung von Wolken. Wenn die Luft feucht genug ist, kann sie bei Abkühlung kondensieren, was zu Wolkenbildung führt. Diese Wolken können unterschiedliche Formen annehmen, abhängig von den Bedingungen in der Atmosphäre, wie Konvektion, Hebung aufgrund von Fronten oder Advektion von feuchter Luft in eine Region mit kühlerer Luft. Wenn die relative Luftfeuchtigkeit 100% erreicht, bildet sich Tau, Nebel oder Frost. Dann kann nämlich die Luft kein weiteres Wasser/Feuchtigkeit mehr aufnehmen.

Feuchte Luft ist auch ein wichtiger Faktor bei der Niederschlagsbildung. Wenn die relative Luftfeuchtigkeit 100% erreicht und es ausreichend Kondensationskerne gibt, können

Wolken zu Regen, Schnee oder Hagel führen. Die Art des Niederschlags hängt von der Temperatur der Luft und der Höhe der Wolken ab.

Die Luftfeuchtigkeit hat auch einen Einfluss auf die Luftqualität. Feuchte Luft kann die Ausbreitung von Schadstoffen verringern, was die Luftqualität verbessert. Auf der anderen Seite kann feuchte Luft auch dazu führen, dass sich mehr Schadstoffe in der Atmosphäre ablagern, insbesondere wenn sie mit Partikeln, Staub oder Smog belastet ist, da diese Partikel an den Wassermolekülen „hängen“ bleiben.

Die Luftfeuchtigkeit beeinflusst auch die Temperatur. Feuchte Luft fühlt sich oft wärmer an als trockene Luft bei gleicher Temperatur, da es dem Körper schwerer fällt, Wärme abzugeben, wenn die Luft gesättigt ist. Wenn die Luft trocken ist, kann die Temperatur jedoch schneller fallen, beispielsweise durch das Untergehen der Sonne oder das Einströmen von kalter Luft in die Region.

Eine weitere wichtige Auswirkung der Luftfeuchtigkeit auf die Meteorologie ist der Einfluss auf den Luftdruck. Wenn feuchte Luft aufsteigt und kondensiert, wird Energie freigesetzt und der Luftdruck nimmt ab. Dadurch können sich Tiefdruckgebiete bilden, die oft mit instabilem Wetter und Niederschlag verbunden sind. Auf der anderen Seite kann trockene Luft dazu führen, dass sich Hochdruckgebiete bilden, die oft mit sonnigem und stabilem Wetter verbunden sind.

Feuchte Luft kann auch zur Bildung von Stürmen beitragen. Wenn warme, feuchte Luft auf kalte, trockene Luft trifft, kann dies zu starken Konvektionsbewegungen führen, die Gewitter und Tornados auslösen können.

Schließlich hat die Luftfeuchtigkeit auch eine wichtige Rolle beim Klimawandel. Eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit kann dazu beitragen, dass sich mehr Wolken bilden und mehr Niederschlag fällt. Gleichzeitig kann eine Abnahme der Luftfeuchtigkeit dazu führen, dass die Luft trockener wird, was zu Dürren und Waldbränden führen kann. Die Luftfeuchtigkeit ist auch ein wichtiger Faktor bei der Absorption von Sonnenstrahlung und der Freisetzung von Wärme in die Atmosphäre, was wiederum Auswirkungen auf den Treibhauseffekt hat.

Insgesamt hat die Luftfeuchtigkeit eine komplexe und vielschichtige Auswirkung auf die Meteorologie. Es ist wichtig, die Luftfeuchtigkeit und ihre Auswirkungen zu verstehen, um Wettervorhersagen zu verbessern und den Klimawandel zu verstehen.

## 10.4 Adafruit TSL2591 Lichtsensor

Der AMS TSL2591 ist ein Lichtsensor mit einer Genauigkeit von typisch  $188\mu\text{Lux}$  und kann zwischen  $-30^{\circ}\text{C}$  und  $80^{\circ}\text{C}$  betrieben werden [44]. Der Messbereich liegt zwischen 0 und  $88.000\text{Lux}$ . Je nach Messgenauigkeit kann der Sensor zwischen 100ms und 600ms für die Auswertung der Lichtintensität eingestellt werden. Der Sensor kann zwischen 3.3V und 5V betrieben werden und benötigt bei normalem Betrieb maximal 0.4mA.

### 10.4.1 Kommunikation

Der Sensor verfügt über ein 2-Wire-Interface, welches mit I<sup>2</sup>C oder SMBus kompatibel ist.

### 10.4.2 Verarbeitung der Sensordaten

Die Verarbeitung der Sensordaten findet direkt auf dem Sensor statt, so dass der Controller keine zusätzliche Berechnung durchführen muss. Die Daten können nach dem Abrufen direkt in der Einheit *Lux* gespeichert und/oder übertragen werden.

### 10.4.3 Relevanz für die Meteorologie

Die Einheit *Lux* bezieht sich auf die Beleuchtungsstärke, die ein bestimmtes Objekt oder eine bestimmte Fläche empfängt. *Lux* ist definiert als die Beleuchtungsstärke, die durch eine Beleuchtungsstärke von einem Candela pro Quadratmeter ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) erzeugt wird. In der Meteorologie ist die Beleuchtungsstärke von Relevanz, da sie Auswirkungen auf verschiedene meteorologische Phänomene hat.

Eine der wichtigsten Auswirkungen der Beleuchtungsstärke auf die Meteorologie ist ihre Rolle bei der Bestimmung der Verdunstungsraten. Die Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche erhöht die Beleuchtungsstärke, was wiederum zu einer erhöhten Verdunstung führt. Die Verdunstungsraten beeinflussen die Feuchtigkeit der Luft, die für die Entstehung von Wolken und Niederschlag relevant ist. Durch eine höhere Beleuchtungsstärke wärmt sich die Oberfläche schneller auf, was die thermischen Eigenschaften der Atmosphäre beeinflusst.

Darüber hinaus spielt die Beleuchtungsstärke auch eine wichtige Rolle bei der Messung der Sonneneinstrahlung, welche für die Berechnung der Energiebilanz der Erdoberfläche und des Klimasystems von entscheidender Bedeutung ist. Die Sonnenstrahlung, die auf die



Erdoberfläche trifft, wird entweder reflektiert, absorbiert oder gestreut. Die Beleuchtungsstärke kann dazu beitragen, die Energiebilanz zwischen der Sonnenstrahlung, die von der Erde reflektiert wird, und der von der Erde emittierten langwelligen Strahlung zu quantifizieren. Die Sonneneinstrahlung beeinflusst auch die Temperatur der Erdoberfläche, die wiederum die Lufttemperatur und den Wind beeinflusst.

Die Beleuchtungsstärke kann auch zur Bestimmung der Schneeschmelzraten, der Bodentemperaturen und anderer wichtiger meteorologischer Parameter verwendet werden. Bei der Schneeschmelze führt eine höhere Beleuchtungsstärke zu einer schnelleren Schneeschmelze, was den Wasserhaushalt in Flüssen und Bächen beeinflussen kann. Die Bodentemperatur hängt ebenfalls von der Beleuchtungsstärke ab und beeinflusst die Wachstumsbedingungen von Pflanzen sowie die Aktivität von Bodenorganismen.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Beleuchtungsstärke in *Lux* eine wichtige Größe in der Meteorologie ist, da sie eine wichtige Rolle bei der Bestimmung verschiedener meteorologischer Phänomene und Prozesse spielt. Sie beeinflusst die Verdunstung, die Energiebilanz der Erdoberfläche, die Schneeschmelzraten und die Bodentemperaturen. Kenntnis von der Beleuchtungsstärke ist daher von entscheidender Bedeutung, um das Wetter und das Klima besser zu verstehen und Vorhersagen treffen zu können.

## **10.5 UVM30A UV Sensor**

Der UVM30A ist ein UV-Lichtsensor mit einer Genauigkeit von einem UV-Index und einem Betriebsbereich zwischen -20°C und 85°C [45]. Die Messwellenlänge liegt zwischen 200nm und 370nm. Durch die analoge Ausgabe wird die Auflösung des UV-Lichtsensors durch den Analog-Digital-Converter des Controllers bestimmt. Der analoge Spannungsbereich der Ausgabe liegt zwischen 0V und 1V. Der Sensor kann zwischen 3V und 5V betrieben werden und benötigt bei normalem Betrieb maximal 0.1mA.

### **10.5.1 Kommunikation**

Der Sensor verfügt über eine analoge Spannungsausgabe zwischen 0V und 1V.

### **10.5.2 Verarbeitung der Sensordaten**

Durch die analoge Messausgabe muss diese auf dem Controller digitalisiert und verarbeitet werden. Dafür wird der Digital-Analog-Converter des Controllers benötigt. Nach der Umwandlung kann die Intensität anhand passender Schwellwerte im UV-Index ausgewertet werden (siehe Kapitel 5.3.5).

### **10.5.3 Relevanz für die Meteorologie**

UV-Strahlung hat als hochenergetische Strahlung verschiedene Auswirkungen auf die Meteorologie, von der Bildung von Wolken bis hin zur Gesundheit des Menschen. Folgend sind einige Auswirkungen beschrieben:

**Einfluss auf das Wetter:** UV-Strahlung kann das Wetter auf verschiedene Weise beeinflussen. Durch die Erwärmung der Erdoberfläche kann sie zur Bildung von Konvektion und Wolkenbildung beitragen. Die Erwärmung der Luft kann auch dazu führen, dass sie sich ausdehnt und somit ansteigt, was zu vertikaler Luftbewegung und der Bildung von Gewittern führen kann. Auch die Verdunstung von Wasser wird durch UV-Strahlung beschleunigt, was die Bildung von Wolken und Niederschlag begünstigen kann.

**Ozonbildung:** UV-Strahlung ist für die Bildung von Ozon in der Stratosphäre verantwortlich. Ozon ist zugleich eine Schutzschicht, die die Erde vor schädlicher UV-Strahlung abschirmt. Ohne die Ozonschicht würde die UV-Strahlung die Erdoberfläche direkt treffen und zu Schäden an Pflanzen, Tieren und Menschen führen. Menschliche Aktivitäten, wie der Ausstoß von Treibhausgasen, führt jedoch zur Zerstörung der Ozonschicht, was sich in Gesundheitsproblemen bei Menschen und Tieren zeigen kann. [46]

**Gesundheit des Menschen:** UV-Strahlung hat direkte Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen. Übermäßige Exposition gegenüber UV-Strahlung kann zu Sonnenbrand, Hautkrebs und anderen Hautproblematiken führen. Auch Augenprobleme wie Netzhautschäden können durch das Aussetzen von übermäßiger UV-Strahlung verursacht werden.

**Einfluss auf die Atmosphäre:** UV-Strahlung kann auch die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre verändern. Es kann beispielsweise Stickoxide in Ozon umwandeln, was zu einer Erhöhung des Ozons in der Troposphäre führt. Ozon in der Troposphäre ist ein Schadstoff

und kann negative Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt haben. Eine weitere Auswirkung ist die Produktion von Aerosolen, die Wolkenbildung beeinflussen können.

Klimawandel: Erhöhte UV-Strahlung kann Auswirkungen auf den Klimawandel haben. Zum Beispiel ist eine Beeinflussung der Vegetationsbedeckung durch erhöhte UV-Strahlung möglich, was sich wiederum auf die Kohlenstoffaufnahme auswirken kann. Eine andere Auswirkung ist die Veränderung der Energiebilanz der Erde, die zu einer Erwärmung der Atmosphäre führen kann.

Insgesamt hat UV-Strahlung eine Vielzahl von Auswirkungen auf die Meteorologie, Gesundheit und Umwelt. Es ist daher wichtig, die Auswirkungen der UV-Strahlung auf die verschiedenen Bereiche zu verstehen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um unerwünschte Auswirkungen zu minimieren. Beispielsweise können geeignete Schutzmaßnahmen ergriffen werden, um die Menschen vor den Auswirkungen der UV-Strahlung zu schützen. Um zu erkennen, wie stark die UV-Strahlung tatsächlich ist, wurde der UV-Index entwickelt, der bereits in Kapitel 5.3.5 beschrieben wurde und nun in Zusammenhang mit der Meteorologie gesetzt wird.

Der UV-Index ist ein Maß für die Stärke der UV-Strahlung auf der Erdoberfläche. Es ist ein nützliches Instrument, um Menschen vor den schädlichen Auswirkungen von UV-Strahlung zu warnen und geeignete Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Der UV-Index hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum Beispiel ist er abhängig der Höhe der Sonne über dem Horizont, der Menge an Ozon in der Atmosphäre und der Menge an Aerosolen in der Luft.

Ein hoher UV-Index bedeutet, dass die UV-Strahlung auf der Erdoberfläche sehr stark ist und dass die Menschen besondere Vorsichtsmaßnahmen ergreifen sollten, um sich vor den schädlichen Auswirkungen der UV-Strahlung zu schützen. Dies kann das Tragen von geeigneter Kleidung, Sonnencreme und einer Sonnenbrille sowie das Vermeiden von direkter Sonneneinstrahlung beinhalten.

Der UV-Index hat auch Auswirkungen auf die Meteorologie, da er die Wolkenbildung und die Temperatur beeinflussen kann. Wenn die UV-Strahlung auf die Erdoberfläche trifft, erwärmt sie die Luft und führt zur Bildung von Konvektion, die wiederum zur Bildung von Wolken und Niederschlag führen kann. Ein hoher UV-Index kann auch zur Bildung von Ozon in der Troposphäre beitragen, was negative Auswirkungen auf die Gesundheit und Umwelt haben kann.

Somit ist der UV-Index eine wichtige Einheit, die die Stärke der UV-Strahlung definiert. Durch die Überwachung des UV-Index und die Ergreifung geeigneter Schutzmaßnahmen, können die Menschen vor den schädlichen Auswirkungen der UV-Strahlung geschützt werden.

## 10.6 Laser PM2.5 Feinstaubsensor

Der Laser PM2.5 ist ein Feinstaubsensor, der durch das Prinzip der Laserstreuung eine Partikelkonzentration zwischen 0,3µm und 10µm in der Luft messen kann [47]. Der Sensor besitzt eine Auflösung von 0,3µm und kann zwischen einer Temperatur von -10°C und 50°C betrieben werden. Der Messbereich liegt zwischen 0,0 und 999,9µg/m³. Der Sensor misst die Partikelkonzentration mit einer Frequenz von einem Hertz und wird mit einer Spannung von 4,7V bis 5,3V betrieben. Er benötigt während des Messvorgangs maximal 80mA.

### 10.6.1 Kommunikation

Der Sensor verfügt über eine digitale serielle Schnittstelle, die mit 3,3V Signalpegel und 9600 Bits pro Sekunde kommuniziert. Der Sensor gibt automatisch einen Messwert pro Sekunde aus.

### 10.6.2 Verarbeitung der Sensordaten

Die Verarbeitung der Sensordaten findet direkt auf dem Sensor statt, jedoch müssen die einzelnen Datenbytes zusammengesetzt und mit einer Prüfsumme validiert werden. Die Daten werden in einem Particulate Matter (PM)2,5- und PM10-Wert ausgegeben, jeweils durch ein *low byte* und ein *high byte* mit folgender Berechnung

$$PM2.5 \text{ value: } PM2.5 (\mu g / m^3) = ((PM2.5 \text{ High byte} * 256) + PM2.5 \text{ low byte}) / 10 \quad (8.2)$$

$$PM10 \text{ value: } PM10 (\mu g / m^3) = ((PM10 \text{ high byte} * 256) + PM10 \text{ low byte}) / 10 \quad (8.3)$$

werden ein PM2,5- und PM10-Wert ausgegeben [47].

Diese berechneten Werte geben die Feinstaubbelastung in µg/m³ aus.

### 10.6.3 Relevanz für die Meteorologie

Feinstaub ist ein komplexes und vielschichtiges Thema in Bezug auf seine Auswirkungen auf die Meteorologie und das Klima. Feinstaubpartikel können in die Atmosphäre gelangen und dort für längere Zeit existieren. Sie werden oft von menschlichen Aktivitäten wie Verbrennungsprozessen in der Industrie oder durch den Verkehr freigesetzt. Wenn sie beim Einatmen in die Lungen von Lebewesen gelangen, können sie auch deren Gesundheit beeinträchtigen.

In der Atmosphäre beeinflussen Feinstaubpartikel die Wolkenbildung, die Niederschlagsbildung, den Luftdruck und die -qualität. Sie können die Sonnenstrahlung absorbieren oder reflektieren und somit die Menge an Strahlungsenergie, die die Erde erreicht, reduzieren oder erhöhen. Die Partikel sind auch in der Lage, Ozon und andere schädliche Chemikalien zu transportieren und dadurch die Luftqualität zu verschlechtern.

Die Auswirkungen von Feinstaub auf die Meteorologie und das Klima sind jedoch komplex und hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab, einschließlich der Größe und Zusammensetzung der Partikel, der lokalen Wetterbedingungen und den geografischen Merkmalen. Die Absorption von Strahlungsenergie durch Feinstaubpartikel führt dazu, dass sich die Atmosphäre erwärmt und es zu einem Anstieg der bodennahen Lufttemperatur kommen kann. Dies kann sich wiederum auf die Luftzirkulation auswirken und zu Veränderungen des Windes und des Luftdrucks führen. Infolgedessen können sich Wetterbedingungen ändern und beispielsweise für eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit für Stürme oder Regen sorgen.

Feinstaubpartikel können auch Auswirkungen auf die Niederschlagsbildung haben, indem sie als Kondensationskerne für Wasserdampf wirken. Die feinen Partikel können Feuchtigkeit anziehen und sich um sie herum zu Wolken formen. Infolgedessen können sie die Anzahl und Größe der Wolken erhöhen und die Wahrscheinlichkeit für Niederschlag erhöhen.

Die Auswirkungen von Feinstaub auf die Luftqualität sind ebenfalls signifikant. Hohe Konzentrationen von Feinstaubpartikeln können dazu führen, dass die Luftverschmutzung zunimmt und sich Schadstoffe in der Atmosphäre ansammeln. Dies macht sich in einer Reduzierung der Sichtweite und einer Erhöhung der Atemwegserkrankungen bemerkbar.

Feinstaubpartikel können auch Auswirkungen auf den Klimawandel haben, indem sie die Menge an Strahlungsenergie, die die Erde erreicht, beeinflussen. Dennoch sind die Auswirkungen von Feinstaub auf die Meteorologie und das Klima noch Gegenstand aktueller Forschung, die sich an der Klärung offener Fragen und Unklarheiten versucht. Einige Studien haben gezeigt, dass Feinstaubpartikel das Klima durch direkte und indirekte Effekte beeinflussen können, indem sie die Menge an Sonnenstrahlung, die die Erdoberfläche erreicht, reduzieren und die Wolkenbildung und den Niederschlag erhöhen.

Ein weiterer Faktor, der die Auswirkungen von Feinstaub auf die Meteorologie und das Klima beeinflusst, ist die geografische Lage und das Klima einer Region. In Gebieten mit einer hohen Luftfeuchtigkeit und niedrigen Temperaturen können Feinstaubpartikel leichter zu Wolkenbildung führen und somit die Niederschlagsbildung erhöhen. In trockenen und heißen Gebieten kann hingegen die Absorption von Sonnenstrahlung durch Feinstaubpartikel dazu führen, dass sich die Lufttemperatur erhöht und das Risiko von Dürren und Hitzewellen steigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Feinstaubpartikel erhebliche Auswirkungen auf die Meteorologie und das Klima haben können, indem sie die Wolkenbildung, die Niederschlagsbildung, den Luftdruck, die Luftqualität und die Menge an Sonnenstrahlung, die die Erde erreicht, beeinflussen. Weitere Forschung ist jedoch notwendig, um die genauen Auswirkungen von Feinstaubpartikeln auf die Atmosphäre und das Klima besser zu verstehen.

## **10.7 JOY-IT CCS811 Luftqualitätssensor**

Der CCS811 ist ein digitaler Gassensor zur Überwachung der Luftqualität [48]. Dieser misst die „Total Volatile Organic Compounds (TVOCs)“ mit einem Messbereich von 0 – 1187 Partikel/Milliarde und den Kohlendioxidäquivalent ( $eCO_2$ ) mit einem Messbereich von 400 – 8192 Teile/Millionen. Je nach Messungsmodus kann der Sensor bis zu alle 250ms die Luftqualität messen. Der Sensor kann zwischen 3V und 5V betrieben.

### **10.7.1 Kommunikation**

Der Sensor verfügt über ein 2- Wire -Interface, welches mit I<sup>2</sup>C oder SMBus kompatibel ist.

### 10.7.2 Verarbeitung der Sensordaten

Die Verarbeitung der Sensordaten findet direkt auf dem Sensor statt, so dass der Controller keine zusätzliche Berechnung durchführen muss. Die Daten werden in einer *eCO<sub>2</sub> Partikel/Millionen* und *TVOC Partikel/Milliarden* ausgegeben.

### 10.7.3 Relevanz für die Meteorologie

Die Luftqualität ist ein wichtiger Aspekt der Umwelt und bezieht sich auf die Menge und Art der in der Luft vorhandenen Schadstoffe und Partikel. Die Luftqualität kann sowohl von natürlichen als auch von menschlichen Faktoren beeinflusst werden, wie zum Beispiel durch den Verkehr, industrielle Aktivitäten, Verbrennung von fossilen Brennstoffen und landwirtschaftliche Praktiken.

Die Luftqualität wird oft anhand der Konzentration von Schadstoffen wie Stickoxiden, Ozon, Schwefeldioxid, Feinstaub und Kohlenmonoxid gemessen. Diese Schadstoffe können schwerwiegende Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben, indem sie Atemwegserkrankungen wie Asthma, Lungenkrebs und Herz-Kreislauf-Erkrankungen verursachen. Sie können auch die Umwelt schädigen, indem sie zum Beispiel das Ozonloch vergrößern oder den pH-Wert von Wasserquellen und Böden verändern.

In Bezug auf die Meteorologie kann die Luftqualität auch Auswirkungen auf das Wetter und das Klima haben. Eine erhöhte Konzentration von Schadstoffen wie Feinstaub kann beispielsweise die Sichtbarkeit reduzieren und somit zu Nebel oder Smog führen. Dies kann wiederum Auswirkungen auf den Luftdruck und die Windgeschwindigkeit haben und somit das Wetter beeinflussen.

Eine schlechte Luftqualität kann auch die Entstehung von Wolken beeinflussen. Feinstaubpartikel können als Kondensationskerne für die Bildung von Wolken verantwortlich sein, indem sie die Kondensation von Wasserdampf fördern. Wenn jedoch zu viele Feinstaubpartikel vorhanden sind, können sie die Wolkenbildung behindern, indem sie die Kondensation von Wasserdampf blockieren und somit zu einer Reduktion des Niederschlags führen.

Darüber hinaus können Schadstoffe wie Stickoxide und Schwefeldioxid durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre Ozon und sauren Regen erzeugen, die ebenfalls Auswirkungen auf das Klima und die Meteorologie haben können. Ozon kann

beispielsweise die Absorption von Sonnenstrahlung erhöhen und die Lufttemperatur erhöhen, während saurer Regen den pH-Wert von Wasserquellen und Böden verändern kann und somit Ökosysteme schädigt.

Zusammenfassend ist die Luftqualität ein wichtiger Faktor, der sowohl die menschliche Gesundheit als auch die Umwelt beeinflusst und Auswirkungen auf die Meteorologie und das Klima haben kann. Eine schlechte Luftqualität kann zu einer Vielzahl von Problemen führen, wie zum Beispiel Nebel, Smog, verringerte Sichtbarkeit, reduzierter Niederschlag und Änderungen des Luftdrucks und der Temperatur.

## **10.8 GlobalSat EM-406a GPS-Modul**

Das GlobalSat EM-406a GPS-Modul ist ein GPS-Empfänger für die Positionsbestimmung [49]. Die Genauigkeit hängt von der Anzahl und Empfangsstärke der GPS-Satelliten ab. Diese kann bis zu 5 Meter betragen. Das Modul benötigt für einen Kaltstart durchschnittlich 42 Sekunden bis zur Betriebsfähigkeit. Neben der Position kann das GPS-Modul auch die aktuelle Geschwindigkeit sowie das aktuelle Datum mit Uhrzeit aus den GPS-Daten auswerten. Das Modul wird mit einer Spannung von 5V betrieben und verbraucht im Betrieb bis zu 44mA.

### **10.8.1 Kommunikation**

Das GPS-Modul verfügt über eine digitale serielle Schnittstelle, die mit 2,85V Signalpegel und 4800 Bits pro Sekunde kommuniziert. Der Sensor gibt automatisch die ermittelten Positionsdaten sowie die Uhrzeit und Geschwindigkeit in einem bestimmten Intervall aus.



## 10.9 Adafruit Feather 32u4 mit RFM95 LoRa Funkmodul

Das Adafruit Feather 32u4 Board mit RFM95 Long Range (LoRa) Funkmodul vereint einen ATmega32u4 Microcontroller, ein HopeRF RFM95 LoRa Funkmodul und zusätzliche zum Betrieb notwendige elektronischen Komponenten auf einem Entwicklungsboard [50]. Der ATmega32u4 Microcontroller ist das Herzstück des Entwicklungsboards. Dieser arbeitet mit einer 3,3V Betriebsspannung und taktet mit 8MHz. Das Board besitzt 20 General Purpose Input Output (GPIO) Pins, darin enthalten sind 7 Pins mit PWM und 10 Pins analoge Eingänge. Das RFM95 LoRa Funkmodul ist durch die SPI-Schnittstelle mit dem ATmega32u4 verbunden und sendet auf einer Frequenz von 868 oder 915MHz. Dieses kann mit einer Leistung von bis zu 100mW bei einem Stromverbrauch von 120mA senden.

## 11 Praktische Umsetzung

Zur Umsetzung wird wie bereits beschrieben ein vollfunktionsfähiger Quadrocopter benötigt. Der Quadrocopter wird privat zur Verfügung gestellt. Im Folgenden wird somit die Evaluation des Quadrocopters betrachtet. Weiter auch die Evaluation und das Entwickeln des Moduls mit den meteorologischen Sensoren und schließlich die Zusammenführung dieser beiden Einheiten.

### 11.1 Evaluation des Quadrocopters

Das Modell des Quadrocopters ist ein *DJI F450* mit einer *DJI NAZA-M-LITE* Flugsteuerung. Weiter besitzt der Quadrocopter folgende technische Details:

- Gewicht ohne Akku: 840 Gramm
- FrSky X8R Empfänger mit Telemetrie
- Selbstentwickelter Telemetrie-Controller für GPS-Daten und Akkuspannung

Durch diese Details sind alle an den Quadrocopter gestellten Anforderungen erfüllt. Die Anforderung an die ausreichende Spannungsversorgung für die vorausgesetzte Flugzeit wird im Folgenden durch eine ausreichende Evaluation überprüft. Hierzu wurden 4 verschiedene Akkus in 2 „Testsettings“ getestet. Testsetting 1 betrachtet die Flugzeit des reinen Quadrocopters ohne zusätzliches Gewicht. Testsetting 2 betrachtet die Flugzeit des Quadrocopters, welcher mit einem zusätzlichen Gewicht von ungefähr 200 Gramm belastet ist und somit das Gewicht des Moduls der meteorologischen Sensoren simulieren soll. Getestet wurde lediglich einmal pro Testsetting. Diese Entscheidung ist darin begründet, dass ein häufigeres Testen aller Wahrscheinlichkeit nach der Kosten-Nutzen-Rechnung, in Bezug auf solch eine Studienarbeit, nicht erfüllen wird. Der Aufwand für das mehrfache Testen (ca. 2h pro Test; exklusive der zwischenzeitlichen Ladezeiten) wäre unverhältnismäßig hoch im Blick auf die Ergebnisse, die durch das Testen zu erwarten wären. Aufgrund persönlicher Erfahrungen ändert sich die Flugzeit bei gleichen Testbedingungen (Windstärke, nur Hover-Flug) nicht merkbar und nicht so, dass die Anforderungen an die Flugzeit des Quadrocopters nicht mehr erfüllt sein würden. Wenn ein vollständiges Testen angestrebt ist, da die Flugzeit deutlich genauer „erforscht“ werden sollte, sind weitere Tests unabdingbar. Um so einen Mittelwert zu generieren, wären pro Testsetting mindestens drei Testflüge durchzuführen. Weiter könnten auch andere

Testsettings durchgeführt werden. Ein Testsetting könnte sein, jeweils mit und ohne simulierendes Gewicht, dass die Drohne durch zusätzliche Flugbewegungen, also nicht nur im Hover-Flug, eine bestimmte Strecke abfliegt und hierbei die Flugzeit gemessen wird. Auch hier wären bei einem ausführlichen Testen mindestens drei Testflüge notwendig. Schwierigkeit hierbei wird sein eine Vergleichbarkeit zwischen den Flügen herzustellen. Da der ausgewählte Quadrocopter keine Möglichkeit besitzt autonom vordefinierte Routen abzufliegen, müsste die Drohne manuell von einem Piloten gesteuert werden. Hierbei sind Ungenauigkeiten nicht auszuschließen. Aufgrund dieser schweren Vergleichbarkeit und dem zusätzlichen Aufwand hat man sich dazu entschieden solche Tests nicht durchzuführen. Erwartet werden würden hier geringere Flugzeiten, das Verhältnis zwischen Quadrocopter mit und ohne Gewicht würde höchstwahrscheinlich gleichbleiben.

Für beide Settings werden dieselben Akkus verwendet:

**Akku1:**

3s 2400mAh, 191g

**Akku2:**

3s 4500mAh, 319g

**Akku3:**

4s 5000mAh, 525g

**Akku4:**

3s 5000mAh, 352g

Die Bezeichnung „3s“ steht für die Anzahl der Zellen des Akkus. Analog dazu besitzt *Akku3* 4 Zellen. Außerdem sollte bei jedem Akku das Alter und die Häufigkeit der Nutzung beachtet werden. Leider ist dies hier aufgrund fehlender Dokumentation leider nicht möglich.

Bei beiden Testsettings sollen möglichst die gleichen Bedingungen gelten, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu erzielen. Hierzu gehört, dass der Quadrocopter die gesamte Zeit über im Gleitflug in einer Höhe von ungefähr 1,50m schwebt. Hinzu kommen bei jedem Flug leichte Ausgleichssteuerungen.

### Testsetting 1:

Donnerstag, 02.03.2023 14:45Uhr – 16:45Uhr:

Als äußerer Faktor, der den Flug beeinträchtigen könnte, ist hier der Wind aus N/NO mit einer Geschwindigkeit von 10km/h über den gesamten Testzeitraum zu nennen.<sup>5</sup>

### Spannungstest:

Die Spannungen der Zellen und die Gesamtspannung wurden vor und nach dem Testflug mit einem externen Spannungsmesser gemessen.

<u>Akkutyp</u>	<u>Zelle 1</u>	<u>Zelle 2</u>	<u>Zelle 3</u>	<u>Zelle 4</u>	<u>Gesamtspannung</u>
<u>3s 2400</u>	4,13V	4,16V	4,18V		12,47V
<u>3s 4500</u>	4,19V	4,14V	4,16V		12,49V
<u>4s 5000</u>	4,19V	4,14V	4,2V	4,2V	16,73V
<u>3s 5000</u>	4,19V	4,14V	4,2V		12,53V

*Tabelle 4: Spannungen der einzelnen Zellen vor dem Flugtest; ohne zusätzliches Gewicht*

<u>Akkutyp</u>	<u>Zelle 1</u>	<u>Zelle 2</u>	<u>Zelle 3</u>	<u>Zelle 4</u>	<u>Gesamtspannung</u>
<u>3s 2400</u>	3,77V	3,72V	3,72V		11,21V
<u>3s 4500</u>	3,23V	3,60V	3,53V		10,36V
<u>4s 5000</u>	3,23V	3,00V	2,95V	3,31V	12,49V
<u>3s 5000</u>	3,42V	3,41V	3,41V		10,24V

*Tabelle 5: Spannungen der einzelnen Zellen nach dem Flugtest, ohne zusätzliches Gewicht*

Abbildung 7 zeigt gemessene Spannungsdaten eines Messgerätes, welches in der Drohne, einem selbstgebauten Controller, integriert ist.

---

<sup>5</sup> Quelle: wetteronline, Android-App

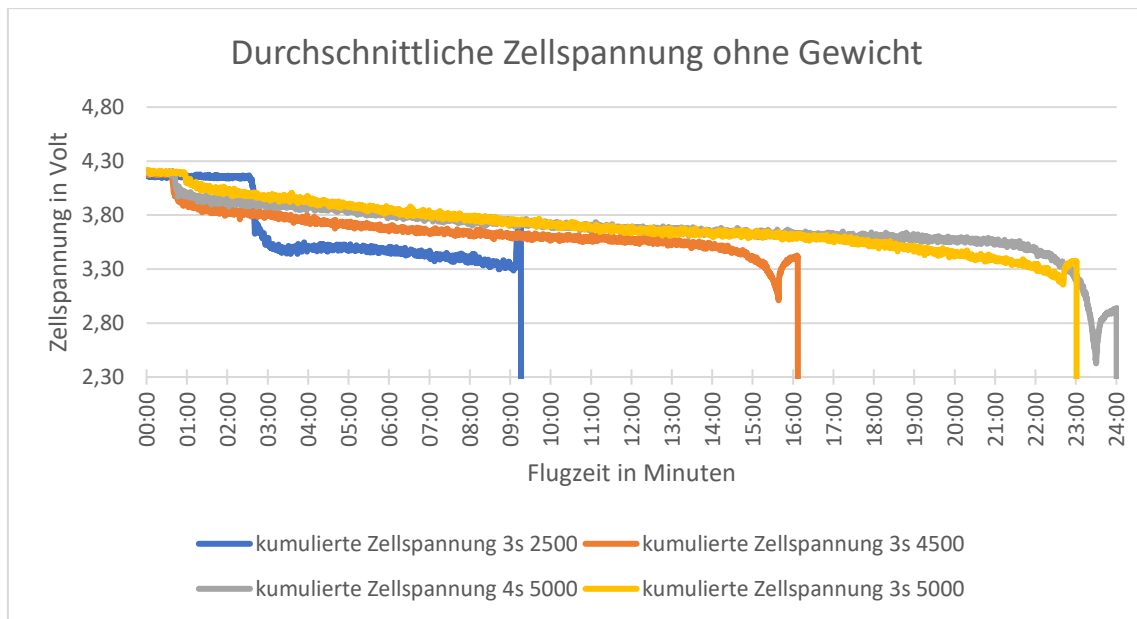


Abbildung 7: Spannungsverlauf verschiedener Akkus beim Drohnenflugtest ohne zusätzliches Gewicht

Man kann eine leicht umgekehrt logarithmisch abfallende Spannungskurve erkennen. Der darauffolgende exponentiell ansteigende Spannungsverlauf ist auf die „Erholung“ des Akkus zurückzuführen.

In Abbildung 20 ist der Quadrocopter während des Testfluges zu sehen.

## Testsetting 2:

Sonntag, 05.03.2023 13:30Uhr – 15:30Uhr:

Als äußerer Faktor, der den Flug beeinträchtigen könnte, ist hier der Wind aus N/NW mit einer Geschwindigkeit von 5-10km/h über den gesamten Testzeitraum zu nennen.<sup>6</sup>

### Spannungstest:

Die Spannungen der Zellen und die Gesamtspannung wurden vor und nach dem Testflug mit einem externen Spannungsmesser gemessen. Sie sind in den Tabellen Tabelle 6 und Tabelle 7 dokumentiert.

<u>Akkutyp</u>	<u>Zelle 1</u>	<u>Zelle 2</u>	<u>Zelle 3</u>	<u>Zelle 4</u>	<u>Gesamtspannung</u>
<u>3s 2400</u>	4,14V	4,15V	4,17V		12,46V
<u>3s 4500</u>	4,17V	4,16V	4,20V		12,53V
<u>4s 5000</u>	4,18V	4,15V	4,20V	4,21V	16,74V
<u>3s 5000</u>	4,20V	4,15V	4,19V		12,54V

*Tabelle 6: Spannungen der einzelnen Zellen vor dem Flugtest; mit zusätzlichem Gewicht*

<u>Akkutyp</u>	<u>Zelle 1</u>	<u>Zelle 2</u>	<u>Zelle 3</u>	<u>Zelle 4</u>	<u>Gesamtspannung</u>
<u>3s 2400</u>	3,67V	3,7V	3,72V		11,09V
<u>3s 4500</u>	3,30V	3,55V	3,47V		10,32V
<u>4s 5000</u>	3,22V	3,04V	3,00V	3,28V	12,54V
<u>3s 5000</u>	3,39V	3,45V	3,37V		10,21V

*Tabelle 7: Spannungen der einzelnen Zellen nach dem Flugtest; mit zusätzlichem Gewicht*

Abbildung 8 zeigt gemessene Spannungsdaten eines Messgerätes, welches in der Drohne, einem selbstgebauten Controller, integriert ist.

---

<sup>6</sup> Quelle: wetteronline, Android-App

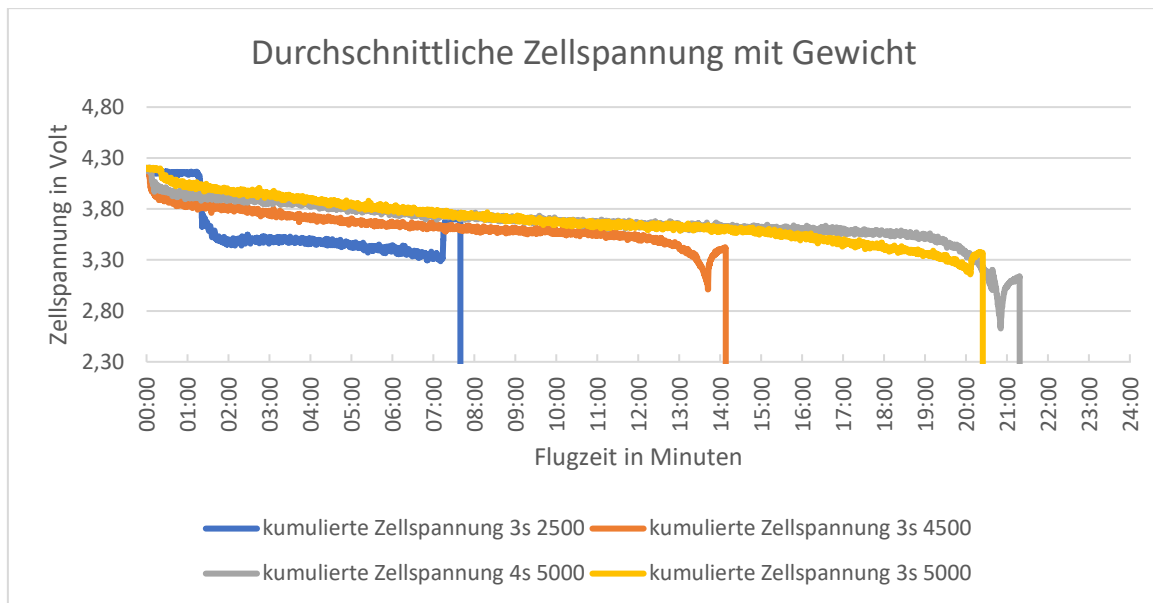


Abbildung 8: Spannungsverlauf verschiedener Akkus beim Drohnenflugtest mit zusätzlichem Gewicht

Es ist anhand der Flugzeiten zu erkennen, dass das zusätzliche Gewicht keine signifikante Auswirkung auf die Flugdauer der Drohne hat. Das zeigt sich auch im nächsten Diagramm. Dort wird Akku 4 „3s 5000“ beim Flugtest mit und ohne zusätzlichem Gewicht direkt verglichen.

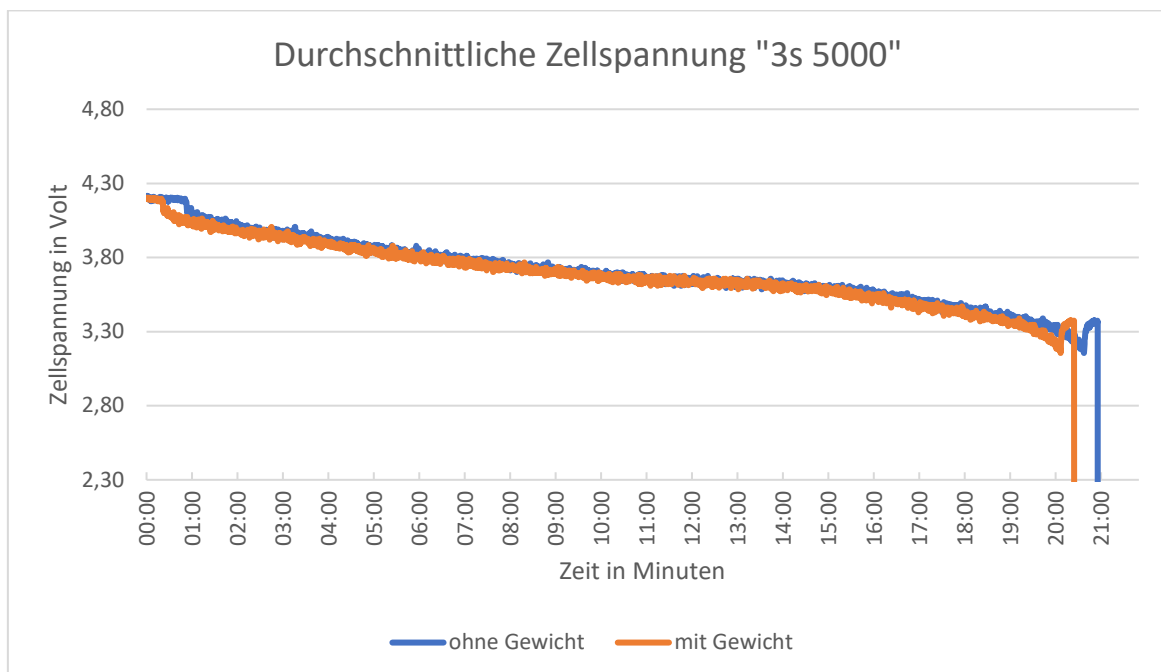


Abbildung 9: Spannungsverlauf des „3s 5000“-Akkus mit und ohne zusätzlichem Gewicht

Zur weiteren Verwendung bei Flügen mit dem Quadrocopter und dem Sensor-Kit wurde sich für Akku 4 „3s 5000“ entschieden. Akku 3 „4s 5000“ fliegt zwar ein wenig länger (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9), aber für unsere Anforderungen nicht wesentlich. Akku 4 bietet hingegen Vorteile darin, dass er aufgrund seines geringeren Gewichtes und der kleineren Maße besser am Quadrocopter zu befestigen ist. Dies ist insofern relevant, da der Akku höchstwahrscheinlich an der Unterseite des Quadrocopters befestigt werden muss, da auf die Oberseite, wo bis dato die Akkus befestigt waren, das Modul mit den meteorologischen Sensoren platziert wird/werden muss (weiteres in Kapitel 11.4). Deswegen spielt die Größe eine entscheidende Rolle (in Anbetracht dessen, dass die Flugzeit sich nicht signifikant verschlechtert), da der Platz am Quadrocopter begrenzt ist. Vor allem dadurch, dass das Modul mit seinen Sensoren hinzukommt.

## **11.2 Evaluation des Moduls**

Im Folgenden wird das bereits mehrfach erwähnte Modul (zum Beispiel in Kapitel 8.7) bestehend aus meteorologischen Sensoren und weiterer Hardware beschrieben, die Zusammensetzung dokumentiert und anschließend auf Basis der Funktionsfähigkeit und den Anforderungen evaluiert. Der größte Teil der Hardware, vor allem die Sensoren, wurden bereits in Kapitel 10 technisch erläutert. Die komplette Hardware muss nun so zusammengesetzt werden, dass ein vollfunktionsfähiges Modul, folgend auch „Sensorkit“ genannt, entsteht, welches auf den Anforderungen aus Kapitel 8 basiert. Hierzu sind einige Schritte notwendig.

Der erste Schritt besteht aus der Beschaffung. Hierzu muss unter Beachtung der Anforderungen und den dazu in Verbindung stehenden Möglichkeiten und Angeboten des Marktes die Hardware ausgesucht werden, um im Anschluss daran beschafft werden zu können. Danach müssen die Bauteile, noch vor ihren Zusammenbau, auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft werden. Hierzu wurde ein Protokoll entwickelt, welches das Vorgehen beschreibt.



### **Protokoll:**

1. Die Dokumentation, vor allem die Datenblätter, beschaffen und sich mit dieser vertraut machen.
2. Sichtprüfung der Hardware, um sicherzustellen, dass keine sichtbaren Beschädigungen vorliegen.
3. Anschließen eines Microcontrollers an den Computer.
4. Entwicklung eines Programms, welches die analogen und digitalen Signale/Daten der Sensoren einliest und interpretiert.
5. „Flashen“ des Microcontrollers.
  - a. Trennen des Microcontrollers vom Computer.
  - b. Korrekte Verbindung zwischen Sensor und Microcontroller herstellen (basierend auf der Dokumentation).
  - c. Erneute Verbindung zwischen Microcontroller und Computer herstellen.
6. Überprüfung der korrekten Verbindung und der Stromversorgung.
7. Überprüfung im seriellen Monitor, ob die Daten korrekt übertragen und angezeigt werden.

Die Sensoren wurden nicht zusätzlich kalibriert, sondern im Zustand der Lieferung verwendet. Unter anderem da keine Vergleichswerte vorhanden waren und eine umfassende Kalibrierung den Rahmen dieser Studienarbeit gesprengt hätte.

Nachdem nun die gesamte Hardware anhand dieses Protokolls getestet und als funktionsfähig eingestuft wurde, steht nun die Zusammensetzung des Moduls an. Beim GPS-Modul ist zu erwähnen, dass das Verbinden mit genügend Satelliten, um ein ausreichend starkes Signal zur Positionsbestimmung zu erlangen, auch als GPS-Fix bezeichnet, ungefähr 20 Minuten gedauert hat. Vermutung hierfür könnte das Alter sein. Das Bauteil stammt aus dem Jahre 2013. Als Basis der Sensoren muss eine Platine entwickelt werden, damit alle Sensoren mit dem Microcontroller verbunden sind.

Bevor das konkrete Platinendesign des Moduls erläutert wird, soll zunächst allgemein etwas über Platinen und deren Design erläutert werden.

### **Platinendesign:**

Leiterplatten, auch Printed Circuit Boards (PCB) oder Platinen genannt, sind das Fundament elektronischer Geräte. Sie bieten eine physische Grundlage für elektronische Schaltungen, auf der elektronische Komponenten installiert, verschaltet und mit Strom versorgt werden. Dabei werden die Komponenten entweder auf die Platinen gelötet, aufgesteckt oder verklebt. Leiterplatten bestehen aus einem nicht leitenden Basismaterial, normalerweise Epoxidharz, und leitfähigen Bahnen, die darauf verlegt werden. Diese Bahnen dienen der Verbindung der Komponenten auf der Leiterplatte. Zunächst werden diese als geschlossene Metallschicht auf das Trägermaterial aufgebracht. Im weiteren Verlauf werden die nichtleitenden Bereiche abgeätzt.

Einfache Leiterplatten besitzen eine oder zwei (Vorder-/Rückseite) leitenden Schichten. Es existieren aber auch mehrschichtige Leiterplatten (Multilayer), wobei die leitenden Bahnen in mehreren Schichten übereinander liegen und durch nichtleitende Schichten voneinander getrennt sind. Durch Bohrungen können Leiterbahnen in unterschiedlichen Schichten miteinander verbunden werden. Mehrschichtige Leiterplatten ermöglichen eine höhere Leiterdichte und komplexere Designs, sind jedoch aufgrund ihrer dreidimensionalen Struktur schwieriger herzustellen. Bei Servern gibt es heute bis zu 16 Leiterplatten-Schichten.

Für die Entwicklung von Leiterplatten gibt es spezielle Softwareprodukte, die einen Schaltplan und andere wichtige Informationen für die Produktion bereitstellen. Leiterplatten werden normalerweise durch fotochemische Verfahren hergestellt und die Bauteile werden in der Regel durch verlötete Drähte oder Klebstoff befestigt. Es gibt auch flexible und teilflexible Leiterplatten für Geräte mit wenig Platz, zum Beispiel in Kameras oder Smartphones verwendet. Grundmaterial ist hier Polyimid. [51]

Der folgende Absatz basiert auf den Quellen [52–60] und befasst sich mit dem Design von Leiterplatten. Das Design von Leiterplatten ist ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von elektronischen Geräten. Eine gut gestaltete Leiterplatte ermöglicht eine zuverlässige und effiziente Funktionsweise des Geräts. Beim Entwurf einer Leiterplatte sind mehrere Faktoren zu berücksichtigen. Einige Faktoren sind die Größe der Platine, die Anordnung der Komponenten, die Anzahl der erforderlichen Schichten, die Ausrichtung der Leiterbahnen oder auch die Platzierung von Bohrungen. Somit ist es relevant, die Größe der Platine so klein wie möglich zu halten, um Platz zu sparen und dadurch Gewicht des Moduls zu

minimieren. Deshalb sollte die Anordnung der Komponenten auf der Platine so optimiert werden, dass eine effiziente Signalübertragung und eine gute Wärmeableitung gewährleistet sind. Eine gute Anordnung reduziert auch die Länge der Leiterbahnen und damit die Wahrscheinlichkeit von Signalstörungen. Die Anzahl der Schichten in einer Leiterplatte hängt von der Komplexität des Designs ab. In der Regel werden mehrere Schichten benötigt, um eine ausreichende Anzahl von Komponenten unterzubringen und eine effektive Signalübertragung zu gewährleisten. Die Ausrichtung der Leiterbahnen ist ebenfalls wichtig, um Signalstörungen zu minimieren. Leiterbahnen sollten möglichst gerade verlaufen und in einem rechten Winkel zueinander angeordnet sein. Der Abstand zwischen den Leiterbahnen sollte auch ausreichend groß sein, um elektrische Störungen zu minimieren. Bohrungen in der Platine werden verwendet, um Komponenten zu befestigen und um Verbindungen zwischen den verschiedenen Schichten herzustellen. Die Platzierung der Bohrungen sollte sorgfältig geplant werden, um die Stabilität der Platine zu gewährleisten und die Verbindung zwischen den Schichten sicherzustellen.

Wenn nun eine Platine zu designen ist, gibt es unterschiedliche Pattern nach denen dies erfolgen kann. Einige dieser Design-Pattern werden oft zur Optimierung der Leiterplattenentwicklung verwendet. Zu den gängigsten gehören:

Single-Side-Design: Dieses Muster verwendet nur eine Seite der Platine, um Komponenten und Leiterbahnen zu platzieren. Somit ist es einfach zu implementieren, aber das Pattern hat den Nachteil, dass es Platzprobleme und Signalstörungen verursachen kann.

Double-Side-Design: Diese Methode verwendet beide Seiten der Platine, um Komponenten und Leiterbahnen zu platzieren. Es bietet mehr Platz und ermöglicht eine bessere Signalübertragung. Nachteil ist, dass die Implementierung komplexer ist.

Multi-Layer-Design: Diese Methode verwendet mehrere Schichten von Leiterbahnen, um mehr Platz zu Verfügung stehen zu haben und eine bessere Signalübertragung zu gewährleisten. Es ist die komplexeste Methode, aber auch die leistungsfähigste.

Ground-Plane-Design: Diese Methode verwendet eine Schicht der Platine als Massefläche, um elektrische Störungen und elektromagnetische Interferenzen zu minimieren. Die Massefläche dient als Referenzpotential für alle Signale auf der Platine, was dazu führt, dass Signalstörungen minimiert werden können und die Signalintegrität verbessert werden kann.

Power-Plane-Design: Diese Methode verwendet eine Schicht der Platine, um eine leistungsstarke Stromversorgung zu gewährleisten. Die Stromversorgungsschicht wird als Stromversorgungsnetzwerk verwendet, um eine gleichmäßige Spannungsverteilung auf der Platine zu gewährleisten und das Rauschen zu minimieren.

Bus-Design: Dieses Muster verwendet eine Bus-Leiterbahn, um Daten- und Steuerungssignale zwischen verschiedenen Komponenten auf der Platine zu übertragen. Die Bus-Leiterbahn ermöglicht eine effiziente Signalübertragung und reduziert die Wahrscheinlichkeit von Signalstörungen.

Star-Design: Dieses Muster verwendet einen zentralen Knotenpunkt, um Signale zwischen verschiedenen Komponenten auf der Platine zu verteilen. Der Sternpunkt wird als Referenzpotential für alle Signale auf der Platine verwendet und reduziert die Wahrscheinlichkeit von Signalstörungen.

Das Design von Leiterplatten ist ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von elektronischen Geräten. Es gibt viele Faktoren, die bei der Gestaltung von Platinen berücksichtigt werden müssen, einschließlich der Größe der Platine, der Anordnung der Komponenten, der Anzahl der erforderlichen Schichten, der Ausrichtung der Leiterbahnen und der Platzierung von Bohrungen. Es gibt auch verschiedene Design-Pattern, die verwendet werden können, um die Leiterplattenentwicklung zu optimieren und die Signalintegrität zu verbessern. Eine gut gestaltete Leiterplatte ermöglicht eine zuverlässige und effiziente Funktionsweise des Geräts.

### **Praktische Umsetzung:**

Zuerst musste entschieden werden, ob überhaupt eine Platine designt werden soll oder eine einfache Lochrasterplatine verwendet wird. Hierauf müssten die Bauteile gesteckt und korrekt mit einzelnen Kabeln verbunden werden. Lochrasterplatinen bieten vor allem am Anfang der Entwicklung Vorteile darin, dass die Bauteile flexibel miteinander verbunden werden können. Es kann beliebig oft ein Bauteil hinzugefügt oder wieder entfernt werden. Gerade zum Testen ist das sehr wichtig. Auch wenn neue Bauteile hinzukommen, können diese flexibel ergänzt werden. Diese Flexibilität ist ein sehr großer Vorteil von Lochrasterplatinen. Bei PCBs ist das ein großer Nachteil, denn wenn diese designt und produziert worden sind, können hier keine Bauteile mehr hinzugefügt werden. Durch das vorher definierte Design ist das letztendliche Zusammenbauen eines PCB einfacher. Im Gegensatz dazu ist bei der Entwicklung des PCBs eine genaue Planung der Anordnung der

Hardware notwendig. Die Leiterbahnen sind fest in der Platine verbaut, sodass an diese keine weitere Hardware abgeschlossen werden kann. Gleichzeitig ist dies auch ein Vorteil von PCBs, da anstatt von Kabeln bei Lochrasterplatten fest verbaute Leiterbahnen zum Einsatz kommen. Die Kabel können nämlich Schäden oder Störungen verursachen, da sie eine größere „Angriffsfläche“ bieten, da man „hängen“ bleiben kann oder ähnliches. Deshalb bieten PCBs einen großen Vorteil in Sachen Stabilität, was ausschlaggebend für deren Einsatz im vorliegenden Fall war. Weiter lässt sich solch eine Platine leichter am Quadrocopter befestigen, wobei wiederum die Stabilität eine wichtige Rolle spielt. Aufgrund der beschriebenen Vorteile wurde das *Double-Side-Design* gewählt. Nachfolgend wird das konkrete Platinendesign beschrieben.

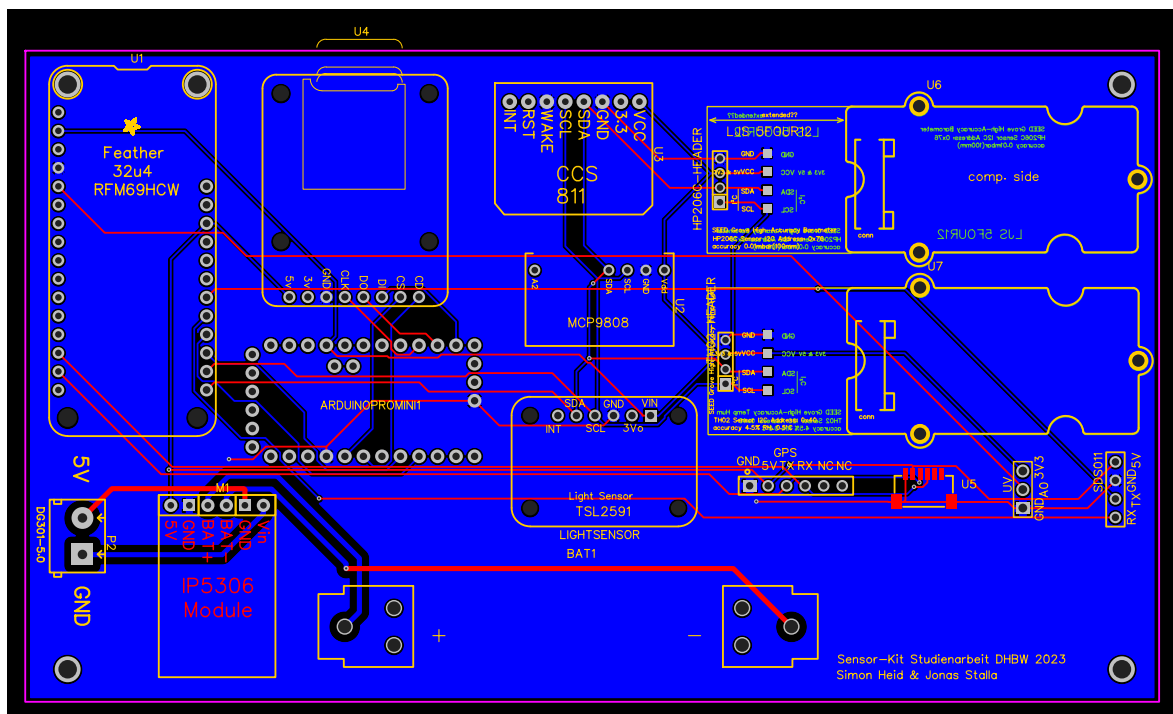


Abbildung 10: Platinen Layout des Moduls, welches die meteorologischen Sensoren beinhaltet

Zuerst galt es die gesamte Hardware zu verteilen. Dies sollte sowohl platzsparend als auch in einem logischen Aufbau sein. Der Hauptcontroller wurde zuerst oben rechts platziert (siehe Abbildung 10). Anschließend wurden die verschiedenen Sensoren nach Typ zusammengefasst und aneinander platziert. Neben den fest auf der Platine geplanten Sensoren wurden auch 2 zusätzliche Pin-Header für den Feinstaubsensor und den UV-Sensor eingeplant, die zu groß oder nicht passend auf die Platine zu befestigen sind. Für das GPS wurde ein freier Platz unten rechts eingeplant, da das GPS-Modul mit einem speziellen Kabel und Verbindungsstecker angeschlossen wird, welches sehr kurz ist. Nach der Platzierung der Sensoren wurde anschließend noch der Coprozessor und die

Spannungsversorgung geplant. Der Coprozessor wurde passend zwischen dem Hauptcontroller und dem microSD-Kartenslot platziert. Der untere Bereich wurde für das Batterie-Steuerungsmodul und die Batterie ausgelegt. Ein zusätzlicher, größerer Klemm-Verbinders wurde für die Aufladung der Batterie links am Rande der Platine platziert.

Weiter gibt es Sensoren, wie den Feinstaubsensor (siehe Kapitel 10.6) oder auch die Antenne des LoRa-Moduls (siehe Kapitel 10.9), die keinen Platz auf der Platine gefunden haben beziehungsweise die Platine wesentlich vergrößert hätten, sodass die spätere Befestigung der Platine auf dem Quadrocopter vermutlich nicht möglich wäre. Deshalb wurden diese Hardwarebauteile separat am Quadrocopter befestigt.

Die Bodenstation besteht aus einem Microcontroller mit integriertem LoRa-Modul (siehe Kapitel 10.9) und der dazugehörigen Antenne. Dieser Microcontroller empfängt die Daten, welche vom Modul, das auf dem Quadrocopter befestigt ist, gesendet werden. Über ein USB-Kabel an einen Computer angeschlossen übergibt es die Daten an die dortige Software. Deren Entwicklung wird in Kapitel 11.3 beschrieben. Dadurch können die Daten, welche vom Quadrocopter gesammelt werden, quasi in Echtzeit am Boden eingesehen werden. Anhand dessen können dann Entscheidungen über den weiteren Flugverlauf getroffen werden.

### **11.2.1 Technische Herausforderungen & Lösungen**

Dieses Kapitel befasst sich mit den technischen Herausforderungen bei der Entwicklung und Integration von meteorologischen Sensoren in einen Quadrocopter sowie den Lösungen, die verwendet wurden, um diese Herausforderungen zu bewältigen.

Die beiden Adafruit Feather 32u4 Controller mussten manuell mit einem Bootloader bespielt werden, da keine Verbindung nach dem Erhalt dieser möglich war. Eigentlich wird dies bereits während oder nach der Produktion der Module vor dem Verkauf durchgeführt, damit diese direkt vom Käufer an den PC verbunden und programmiert werden können. Da dies bei den 2 bestellten Controllern nicht der Fall war, musste erst mithilfe eines weiteren, funktionsfähigen Microcontroller mittels der SPI-Programmierschnittstelle ein passender Bootloader auf den 32u4 Controller gespielt werden. Mit diesem Bootloader war es anschließend möglich, den Controller direkt über die USB-Schnittstelle zu programmieren, wie es eigentlich von Werk aus vorgesehen ist.

Bei der Planung des Schaltplans und dem Testen der verschiedenen Sensoren und Komponenten ist aufgefallen, dass es eine Komplikation bei der Ansteuerung des in das Adafruit Feather integrierte Funkmodul und den zusätzlichen, externen microSD-Kartenslot gibt. Beide Module nutzen den SPI-Bus, der in dem ATmega32u4 Controller nur einmal verbaut ist. Zwar ist ein Umschalten zwischen Funkmodul und microSD-Kartenslot möglich, es kann jedoch zu Komplikationen kommen und erfordert einen höheren Programmieraufwand. Daher wurde ein zweiter Microcontroller als Coprozessor verbaut, der für die Protokollierung der Daten auf die microSD-Karte zuständig ist. Die Kommunikation zwischen Hauptcontroller und Coprozessor soll via UART realisiert werden. Mit dieser Lösung kann das Funkmodul direkt ohne Umschalten am Hauptcontroller benutzt werden und alle Daten über den seriellen Bus an den Coprozessor gesendet werden. Dieser kann anschließend die Daten unabhängig vom Hauptcontroller auf die microSD-Karte schreiben.

Nach dem Zusammenbauen des Moduls und dem anschließenden erstem Testen ist aufgefallen, dass der Feuchtigkeitssensor (siehe Kapitel 10.3) defekt sein muss, da die Library ausschließlich negative statische Daten für die Lufttemperatur (-50°C) und relative Luftfeuchtigkeit (-24%) sendet. Die Verwendung weiterer unterschiedlicher Librarys führte zu keiner Änderung der Daten, weshalb dieser Fehler einen Hardware-Defekt vermuten lässt. Dieser könnte beim Zusammenbauen entstanden sein.

## 11.3 Softwareentwicklung

Nachdem nun die Hardware getestet und „zusammengebaut“ wurde, muss nun die passende Software entwickelt werden. Diese Software wird auf den Microcontroller installiert, da dieser die zentrale Hardware darstellt. Deshalb verwaltet dieser die eingehenden Datenströme der Sensoren und generiert einen Output, der über das Lora-Funkmodul an die Bodenstation übertragen wird. An der Bodenstation wird der Datenstrom empfangen und wiederum durch einen baugleichen Microcontroller interpretiert. Daraufhin werden die Daten an einen Rechner übertragen, der die Daten in einer geeigneten Weise darstellt. Für alle diese Prozesse muss Software entwickelt werden. Der Code für die folgenden verschiedenen Controller und der PC-Software ist über das GitHub Repository <https://github.com/SHEXplorer/Studienarbeit> bereitgestellt.

### **Softwareentwicklung für den Hauptcontroller**

Die Software für den Hauptcontroller wurde in C++ mit der Entwicklungsumgebung Visual Studio Code [61] und PlatformIO [62] geschrieben. Da die einzelnen Sensoren bereits vorher mit dem entsprechenden Adafruit Feather 32u4 getestet wurden, konnten die entsprechenden Testprogramme in die Software eingearbeitet werden. Bei der Entwicklung der Software ergab sich jedoch das Problem des geringen Arbeits- und Flashspeichers des Controllers. Durch den geringen Speicherplatz wurden zu große Sensorwerte, gerade der lange Text des GPS-Moduls, nicht zwischengespeichert, da der benötigte Speicherplatz im Arbeitsspeicher nicht vorhanden war. Das Ergebnis war eine leere Variable, die an den Coprozessor und die Bodenstation weitergegeben wurde. Auch das Kompilieren war teilweise nicht möglich, da die benötigten Bibliotheken für die Sensoren für den Programmspeicher des Controllers zu groß waren. Durch das Entfernen von überflüssigen Befehlen und Debug-Fehlermeldungen sowie die Nutzung von kleineren und effizienter programmierter Sensorbibliotheken, konnte dieser Fehler behoben werden. Die Probleme des zu geringen Arbeitsspeichers konnten mithilfe einer Überarbeitung Funktionen von Call-by-Value-Übergabeparameter auf Call-by-Referenz-Übergabeparameter behoben werden.

### **Softwareentwicklung für den Coprozessor**

Die Software für den Coprozessor wurde mit derselben Entwicklungsumgebung wie der Hauptcontroller erstellt. Dieser wartet auf eine eingehende Nachricht vom Hauptcontroller über eine serielle Schnittstelle. Nach dem Empfang eines Sensorwerts wird versucht, diese auf die SD-Karte zu schreiben. Sollte es ein Problem mit dem Zugriff auf die SD-Karte geben, so wird dies über ein Signal dem Controller mitgeteilt. Dieser leitet den Status der SD-Karten anschließend an die Bodenstation weiter.

### **Softwareentwicklung für den Empfänger**

Die Software für den Empfänger wurde mit derselben Entwicklungsumgebung erstellt wie beim Hauptcontroller. Diese wartet auf eingehende Sensordaten über das LoRa-Funkmodul und gibt sie anschließend über eine serielle Schnittstelle an den angeschlossenen Computer weiter. Dort werden sie anschließend durch das PC-Programm verarbeitet und dargestellt.



## **Softwareentwicklung für den PC**

Die Software für den PC wurde mit Python und dem QT-Framework erstellt. Das Programm verbindet sich mit dem angeschlossenen Empfänger über die Serielle USB-Schnittstelle und stellt die einkommenden Daten über eine grafische Oberfläche dar. Gleichzeitig lassen sich die Daten in eine CSV-Datei für eine spätere Auswertung abspeichern.

## **11.4 Zusammenführung**

Der Quadrocopter wurde auf seine Funktionalität und den an ihn gestellten Anforderungen überprüft, ebenso wie die Funktionalität der Sensoren. Diese wurden anfangs einzeln und danach als gesamtes „Paket“ getestet. Hierzu musste eine Software entwickelt werden, die die Daten einliest, auswertet und an eine Bodenstation überträgt. Nun muss das Modul mit dem Quadrocopter zusammengeführt werden. Da das Modul vollständig autark betrieben werden kann, müssen, außer den Gedanken zur Befestigung am Quadrocopter, keine weiteren Vorkehrungen getroffen werden. Damit die Sensoren am besten Daten sammeln können, wurden diese nach oben ausgerichtet. Das ist vor allem für den Lichtintensitätssensor (siehe Kapitel 10.4) und den UV-Sensor (siehe Kapitel 10.5) relevant. Denn diese müssen direkt von der Sonnenstrahlung „getroffen“ werden, um aussagekräftige Daten sammeln zu können. Zum Zeitpunkt des Testens des Quadrocopters war auf der Oberseite der Drohne der Akku befestigt. Dieser wurde sodann an der Unterseite des Quadrocopters mittels einer Klettverschlusshaltung verbaut. Das Modul mit den meteorologischen Sensoren konnte so durch eine zusätzliche Kunststoffplatte an der Oberseite befestigt werden. Hierzu wurde die Kunststoffplatte mit der Platine verbunden und dann mit Hilfe von handelsüblichen Kabelbindern am Quadrocopterrahmen befestigt. Die Antenne für das LoRa-Funkprotokoll wurde mit Kabelbindern an einem Fuß des Quadrocopters befestigt. Zudem musste der Feinstaubsensor (siehe Kapitel 10.6) außerhalb der Platine am Quadrocopter befestigt werden.

Abschließend musste diese Konstruktion durch händische manuelle Tests und Flugtests auf ihre Stabilität überprüft werden. Nachdem dies erfolgreich stattgefunden hatte, war der modifizierte Quadrocopter bereit meteorologische Daten zu sammeln. Um nun die Funktionalität und Betriebsfähigkeit zu testen, wurden nachfolgend einige Tests innerhalb eines Flugtests durchgeführt:

## **Flugtest:**

Donnerstag, 06.04.2023 13:15Uhr – 14:45Uhr:

Als äußere Faktoren, die den Flug beeinträchtigen können, ist hier der Wind aus SW mit einer Geschwindigkeit von 10km/h über den gesamten Testzeitraum zu nennen.<sup>7</sup>

Vor dem Start wurde die Stabilität des gesamten Quadrocopters händisch und manuell überprüft. Es wurde überprüft, ob die Platine sicher und stabil befestigt wurde, genauso wie die Sensoren und Bauteile auf der Platine. Nachdem durch die Prüfung keine Unstimmigkeiten aufgefallen waren, konnte der Flugtest gestartet werden. Beim ersten Starten konnte die Stabilität weiterhin bestätigt werden, sodass ein umfassender Flug stattfinden konnte.

Vor dem Abflug wurde ein grober Flugplan erarbeitet. Dieser begann mit einer ungefähr einminütigen Hoverphase auf circa 30 Metern über dem Boden. Anschließend wurde der Quadrocopter auf zehn Meter Flughöhe gebracht und ungefähr 500 Meter von der Startposition entfernt gesteuert. Dort wurde dieser für einen kurzen Moment gehalten, um anschließend auf circa 20 Metern zurück zum Startpunkt gebracht zu werden. Danach wurde ein Reichweitentest durchgeführt, bei dem der Quadrocopter ungefähr 700 Meter von der Startposition in fünf bis 10 Metern Höhe geflogen wurde. Nach der Rückkehr zur Startposition wurde die Flughöhe auf ca. 80 Meter erhöht und im Kreis um die Startposition herumgeflogen. Nach ungefähr 16,5 Minuten Flugzeit wurde der Quadrocopter gelandet.

Leider musste festgestellt werden, dass das GPS-Modul bei diesem Test keine Verbindung zu Satelliten herstellen konnte, um ein ausreichendes GPS-Signal zu empfangen. Wie bereits weiter oben beschrieben, war anfangs klar, dass das GPS-Modul im Vergleich zu anderen GPS-Empfängern sehr lange brauchte, um ein GPS-Fix zu empfangen. Nach ungefähr 45 Minuten wurde sich, aufgrund der geringen Erfolgsaussichten für den Start des Flugtestes entschieden. Abgesehen vom defekten Feuchtigkeitssensor (beschrieben in Kapitel 11.2.1) konnte noch vor dem eigentlichen Flugstart die volle Funktionalität des Moduls und der Übertragung der Daten bestätigt werden. Die Funktionalität konnte über den gesamten Zeitraum des Fluges bestätigt werden, was auch die Daten in Kapitel 12 zeigen.

Während des Flugtests wurde die Akkuspannung und die damit verbundene Flugzeit gemessen und aufgezeichnet. Im Vergleich zu Kapitel 11.1 ist erkennbar, dass sich die

---

<sup>7</sup> Quelle: wetteronline, Android-App

Flugzeit um ungefähr fünf Minuten verringert hat. Das ist zum einen auf das zusätzliche Gewicht durch das Modul zurückzuführen. Zum anderen liegt die größere Kausalität für diese Verringerung der Flugzeit darin, dass bei diesem Test der Quadrocopter nicht nur im Hoverflug war, sondern einige Strecken in horizontaler und vertikaler Richtung geflogen ist. Dies ist am Vergleich in Abbildung 10 zu erkennen, da dort das zusätzliche Gewicht lediglich zu einer Verringerung von ungefähr einer Minute führte. Der „fertige“ Quadrocopter besitzt ein Gewicht von ungefähr 1090 Gramm (ohne Akku), was dem Gewicht des Quadrocopters ohne Akku (840 Gramm) addiert mit dem simulierten Gewicht (circa 200 Gramm) beim vorherigen Flugtest entspricht. Somit lässt sich sagen, dass die Art des Fluges und wie viele Flugänderungen vorgenommen worden, eine größere Auswirkung auf die Flugdauer hat als ein zusätzliches Gewicht, wie es das Modul besitzt. Weiterhin ist zu vermuten, dass die Flugzeit noch um ein bis zwei Minuten hätte verlängert werden können, da der Flug vor der kritischen Restspannung einer Zelle von 3,3 Volt (vergleiche Kapitel 2.2.5) beendet wurde. Diese Entscheidung wurde auf Grundlage dessen getroffen, den Akku nicht zu beschädigen und auch keine Notwendigkeit bestand, die „letzten Spannungen“ aus dem Akku zu holen, da in der Flugzeit davor ausreichend Daten gesammelt wurden.

Tabelle 7 und Tabelle 8 zeigen die einzelnen Zellspannungen für den Akku „3s 5000“ jeweils vor und nach dem Flug. Abbildung 12 stellt den Spannungsverlauf während des gesamten Fluges dar.

<u>Akkutyp</u>	<u>Zelle 1</u>	<u>Zelle 2</u>	<u>Zelle 3</u>	<u>Gesamtspannung</u>
<b>3s 5000</b>	4,2V	4,16V	4,15V	12,51V

*Tabelle 8: Spannungen der einzelnen Zellen vor dem Flugtest; mit montiertem Modul*

<u>Akkutyp</u>	<u>Zelle 1</u>	<u>Zelle 2</u>	<u>Zelle 3</u>	<u>Gesamtspannung</u>
<b>3s 5000</b>	3,39V	3,45V	3,37V	10,21V

*Tabelle 9: Spannungen der einzelnen Zellen nach dem Flugtest; mit montiertem Modul*

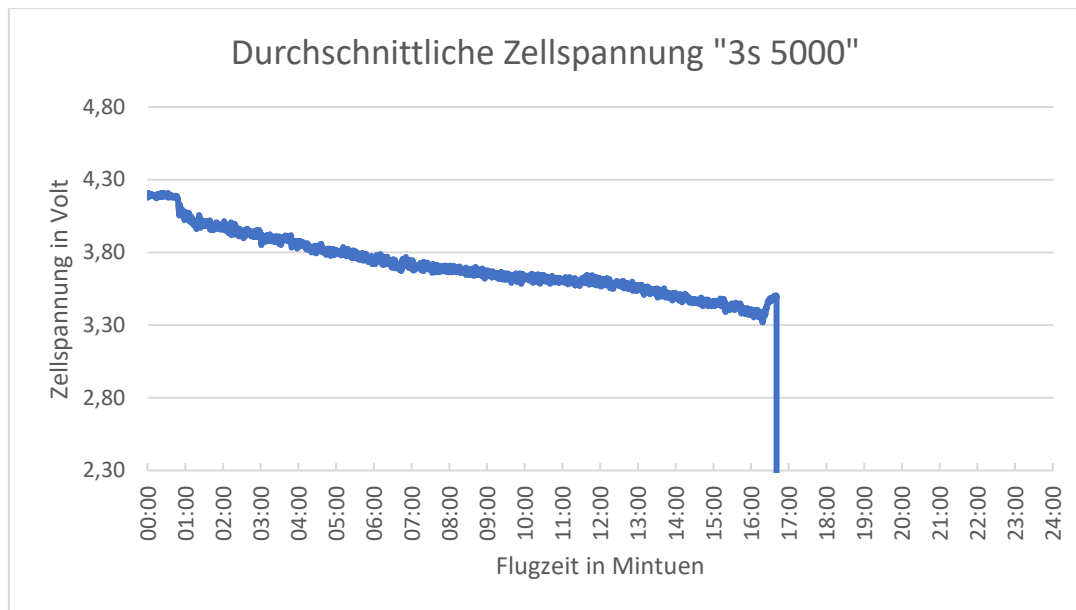


Abbildung 11: Spannungsverlauf des verwendeten Akkus beim Drohnenflugtest mit montiertem meteorologischem Modul

Im Nachhinein lässt sich erkennen, dass die Anforderung an die Spannungsversorgung und die daraus resultierende Flugzeit aus Kapitel 8.1.3 vollkommen erfüllt wurde.

Abgesehen vom Testen der Flugzeit und dem Test einer reibungslosen Datenübertragung vom Modul an die Bodenstation, wurde ein Reichweitentest durchgeführt. Hierbei wurde sowohl die Reichweite der Fernsteuerung zu Steuerung des Quadrocopters getestet als auch die Reichweite des LoRa-Funkmoduls. Aufgrund der nicht vorhandenen GPS-Daten erwies sich dieser Test als schwierig, weshalb hier nur eine Schätzung möglich ist. Uneingeschränkt davon ist ein Test der Reichweite bis zur Unmanövrierbarkeit des Quadrocopters aus Sicherheits- und rechtlichen Gründen (siehe Kapitel 3.2) nicht möglich. Der Quadrocopter darf nämlich nicht aus Sichtweite des Piloten geflogen werden und ein Verbindungsverlust ist nicht akzeptabel, da die Steuerfähigkeit nicht dauerhaft gewährleistet ist, um auf etwaige Gefahren reagieren zu können. Bei diesem Testflug konnte der Quadrocopter bis zu einer Entfernung von ungefähr 700m in Sichtweite geflogen werden. Diese Entfernung konnte näherungsweise durch den Abstand zweier Mobiltelefone ermittelt werden. Bei dieser Entfernung war sowohl die Steuerung des Quadrocopters als auch der Empfang von meteorologischen Daten gewährleistet. Die Reichweite kann aber von Faktoren wie Position der Antennen, Gebäuden, Bäumen oder anderen Hindernissen beeinträchtigt werden.

## 12 Auswertung von meteorologischen Daten

Der Quadrocopter konnte erfolgreich mit dem Modul der meteorologischen Sensoren zusammengeführt werden (siehe Abbildung 21). Als die Funktionalität und Betriebsfähigkeit bestätigt worden war, können nun Daten gesammelt werden, die folgend in diesem Kapitel beispielhaft für eine Messung ausgewertet und interpretiert werden. Die Daten wurden sowohl auf der microSD-Karte des Moduls auf dem Quadrocopter gespeichert als auch auf dem PC der Bodenstation. Bei beiden Varianten werden die Daten im csv-Dateiformat gespeichert (siehe Abbildung 20). Solch ein Dateiformat kann ausgewertet in einer Tabelle dargestellt werden (siehe Abbildung 19).

Aufgrund des Defektes des Feuchtigkeitssensors (siehe Kapitel 11.2.1) kann keine Aussage über die relative Luftfeuchtigkeit während des Testfluges getroffen werden, obwohl die Luftfeuchtigkeit eine große Relevanz in der Meteorologie spielt (siehe Kapitel 10.3.3). Weniger relevant für die Meteorologie, jedoch für den geografischen Verlauf des Testes ist das GPS-Modul, welches leider keine Daten aufzeichnen konnte, da die initiale Positionsbestimmung nicht stattfinden konnte. Somit kann hierüber auch keine Aussage getroffen werden.

Folgend werden die gemessenen Daten von Lufttemperatur, Luftdruck, Höhe und Feinstaubbelastung des Testfluges (siehe Kapitel 11.4) grafisch dargestellt und interpretiert.

In Abbildung 12 wird die Lufttemperatur (vergleiche Kapitel 5.3.1 und Kapitel 10.1) während des gesamten Testfluges dargestellt. Am Anfang des Testfluges war die Temperatur noch deutlich höher als der weitere Durchschnitt. Dies kann daran liegen, dass der Sensor sich durch Sonneneinstrahlung „aufgeheizt“ hat, da sich der Quadrocopter vor dem Start eine gewisse Zeit lang im Freien zur potenziellen GPS-Positionsbestimmung befand. Nach dem Start war der Quadrocopter in Bewegung, sodass sich die Beeinträchtigung der Messergebnisse durch die Sonneneinstrahlung relativiert hat. Das ist daran zu erkennen, dass im weiteren Verlauf die Temperatur nur noch in einem Bereich von ungefähr 14°C und 18°C schwankte. Diese Messdaten ließen sich über externe Wetterdaten<sup>8</sup> verifizieren. Die App zeigte zum Testzeitpunkt einen Wert von 12°C an. Die leicht erhöhten Werte lassen sich wiederum auf die Sonneneinstrahlung zurückführen. Weiter ist zu erkennen, dass sich die Temperatur nicht signifikant in bodennahen Schichten verändert. Dies war auch nicht zu

---

<sup>8</sup> Quelle: wetteronline, Android-App

erwarten, da sich die Temperatur nur um 1°C pro 100m Höhenunterschied ändert [63]. Aufgrund von rechtlichen Vorgaben wurde die Drohne nicht höher als 100m relativer Höhe geflogen. Somit sind die Schwankungen von circa 4°C anderweitig begründet.

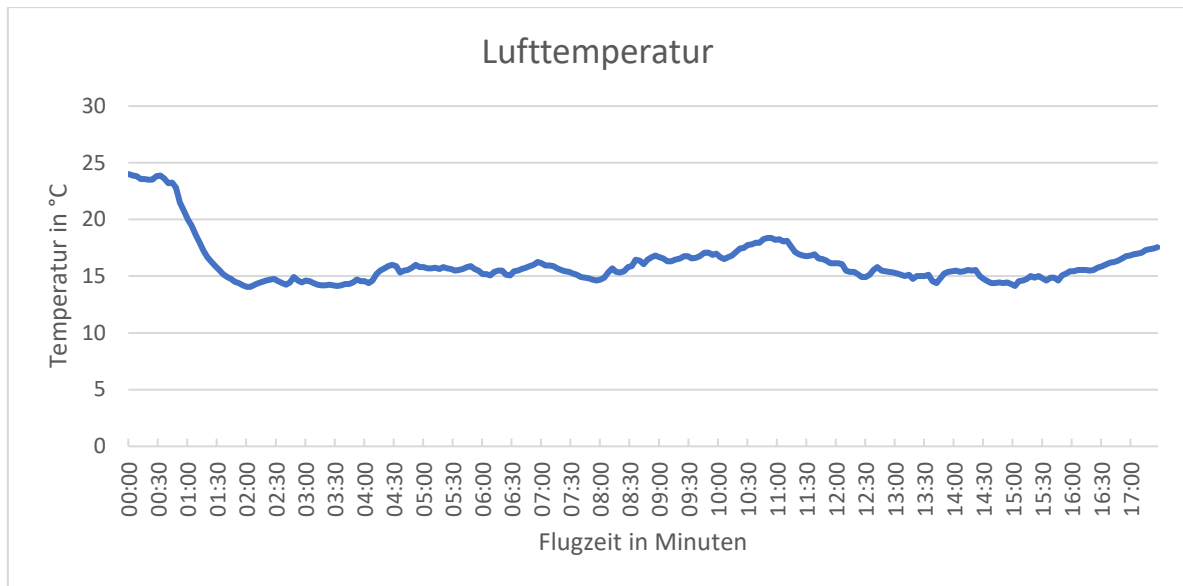


Abbildung 12: Verlauf der Lufttemperatur während des Testfluges

Die folgenden Abbildungen 14 und 13 zeigen die Feinstaubbelastung (vergleiche Kapitel 10.6) der Partikelgrößen PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>10</sub>. PM<sub>2,5</sub> beschreibt Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2,5 Mikrometer (µm). PM<sub>10</sub> stellen die Partikel dar, deren aerodynamischer Durchmesser weniger als 10 µm beträgt. Die Interpretierung der Daten basiert auf Angaben des Umweltbundesamt [64]. Dort wird beschrieben, dass großräumig aktuell PM<sub>10</sub>-Jahresmittelwerte unter 20 Mikrogramm pro Kubikmeter (µg/m<sup>3</sup>) auftreten. Im Vergleich zu den Messdaten, wird dieser Wert über den längsten Teil des Testfluges bei weitem überschritten. Lediglich in den letzten Minuten fällt der Wert unter 20 µg/m<sup>3</sup>. Abbildung 15 stellt die aktuell geltenden Grenzwerte für die Feinstaubbelastung in Deutschland dar. Hierbei ist es unabdingbar zu beachten, dass dies nur Momentaufnahmen der Feinstaubbelastung sind und die Feinstaubbelastung von vielen Faktoren, wie langanhaltender Trockenheit, verkehrsnahen Bereichen, Hitze oder Wind abhängig ist. Viel wichtiger ist noch, dass es aufgrund des Projektumfangs nicht möglich war, die Werte beziehungsweise die gemessenen Daten und die Genauigkeit des Sensors zu verifizieren. Somit sind Messfehler nicht ausgeschlossen.

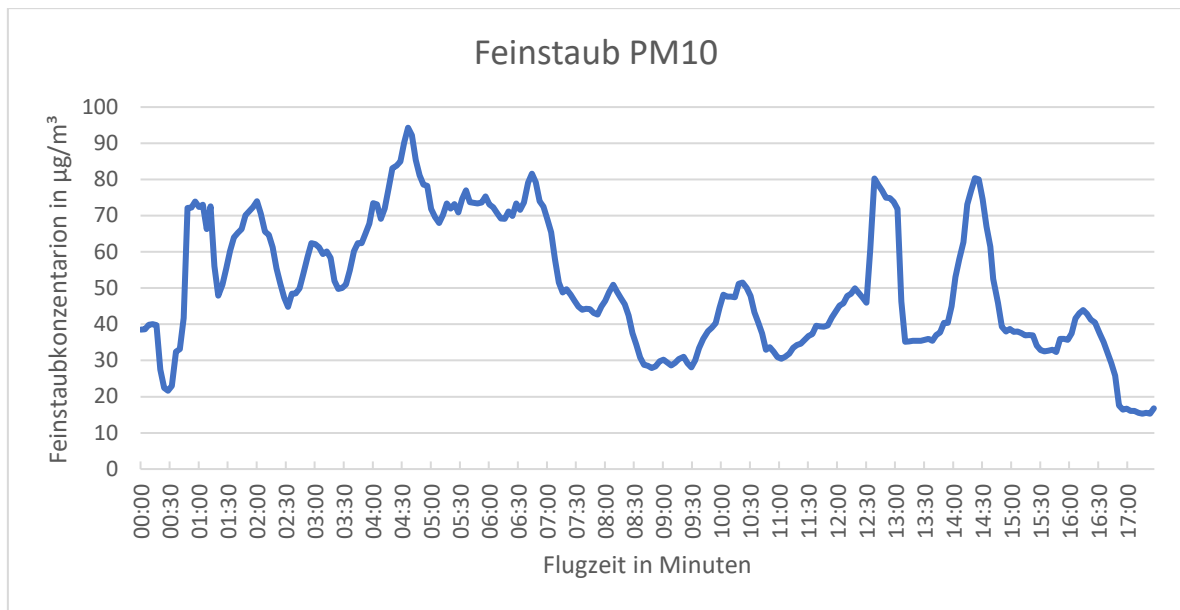


Abbildung 13: Verlauf der Feinstaubbelastung (Partikelgröße PM10) während des Testfluges

Die Werte der Abbildungen 13 und 14 lassen eine Korrelation zwischen den Werten der PM10 und PM2,5 Feinstaubbelastung erkennen. Tendenziell sind die Werte der PM2,5 Feinstaubbelastung niedriger, was sich auch mit den Beschreibungen aus [64] deckt.

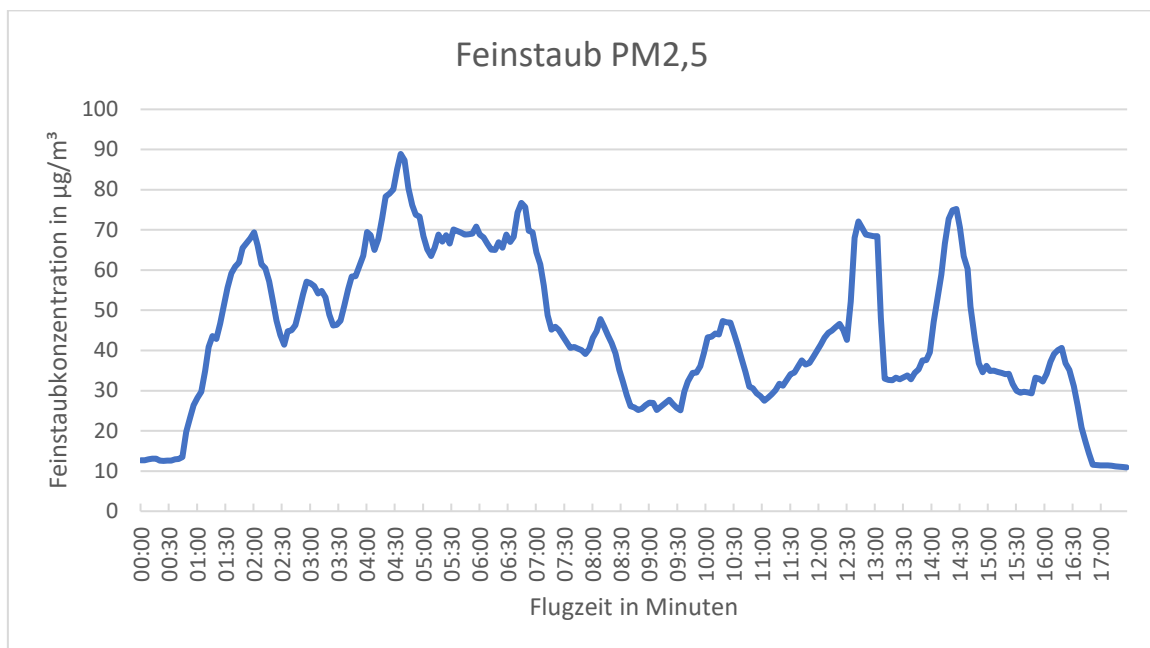


Abbildung 14: Verlauf der Feinstaubbelastung (Partikelgröße PM2,5) während des Testfluges

<b>Grenzwerte für den Schadstoff Feinstaub (PM10)</b>			
Bezeichnung	Mitteilungszeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, ab dem der Grenzwert einzuhalten ist
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	24 Stunden	50 µg/m³ PM10 dürfen nicht öfter als 35mal im Jahr überschritten werden	seit 1.1.2005 einzuhalten
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	Kalenderjahr	40 µg/m³ PM10	seit 1.1.2005 einzuhalten
<b>Grenzwerte für den Schadstoff Feinstaub (PM2,5)</b>			
Bezeichnung	Mitteilungszeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, ab dem der Grenzwert einzuhalten ist
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	Kalenderjahr	25 µg/m³ PM2,5	seit 1.1.2015 einzuhalten

Quelle: 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG): Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 02.08.2010 (BGBl. I S. 1065)

Abbildung 15: Grenzwerte für den Schadstoff Feinstaub; PM10 und PM2,5 [64]

Der Luftdruck (vergleiche Kapitel 5.3.2 und Kapitel 10.2), dargestellt in Abbildung 16, zeigt sprunghafte Werte auf. Hierfür ist eventuell die Latenz des Sensors entscheidend, der eine gewisse Zeit braucht, um sich an einer Position zu kalibrieren. Um solche Sprünge zu verhindern, müsste dementsprechend länger an einer Position „verharrt“ werden. Abgesehen vom Luftdruck ist für den Einsatzzweck unseres Quadrocopters die Höhe, die aus dem Luftdruck berechnet werden kann, von größerer Bedeutung, um andere Messergebnisse in Bezug auf die Höhe interpretieren zu können. Diese Werte werden in Abbildung 17 grafisch dargestellt. Bei genauerer Betrachtung sind teilweise Sprünge beim Luftdruck und der Höhe nicht plausibel, da der Quadrocopter sich auf einer Höhe von 50m über N.N. befunden haben soll. Das ist daher nicht möglich, da der Bereich des Testfluges sich eigenem Wissen nach auf einer Höhe von ungefähr 100m über N.N. befindet. Am Anfang des Testfluges sind die Werte plausibel, da sie sich abgesehen von Ausnahmen in einem Höhenbereich von 100m bis 200m über N.N. befinden. In diesem Höhenbereich wurde der Quadrocopter geflogen. Werte, die eine Höhe von über 200m über N.N. anzeigen sind nicht plausibel und stellen einen Messfehler dar. Aufgrund der beschriebenen Grundlagen des Luftdruckes (siehe Kapitel 5.3.2 und Kapitel 10.2) wird die interne Höhenberechnung des Sensors weitestgehend als gültig angesehen, da eine Kausalität zwischen niedrigem Luftdruck und hoher Höhe und zwischen höherem Luftdruck und geringerer Höhe zu erkennen ist. Diese Kausalität ist in Abbildung 18 durch ein Übereinanderlegen der Luftdruck- und Höhenwerte grafisch dargestellt.



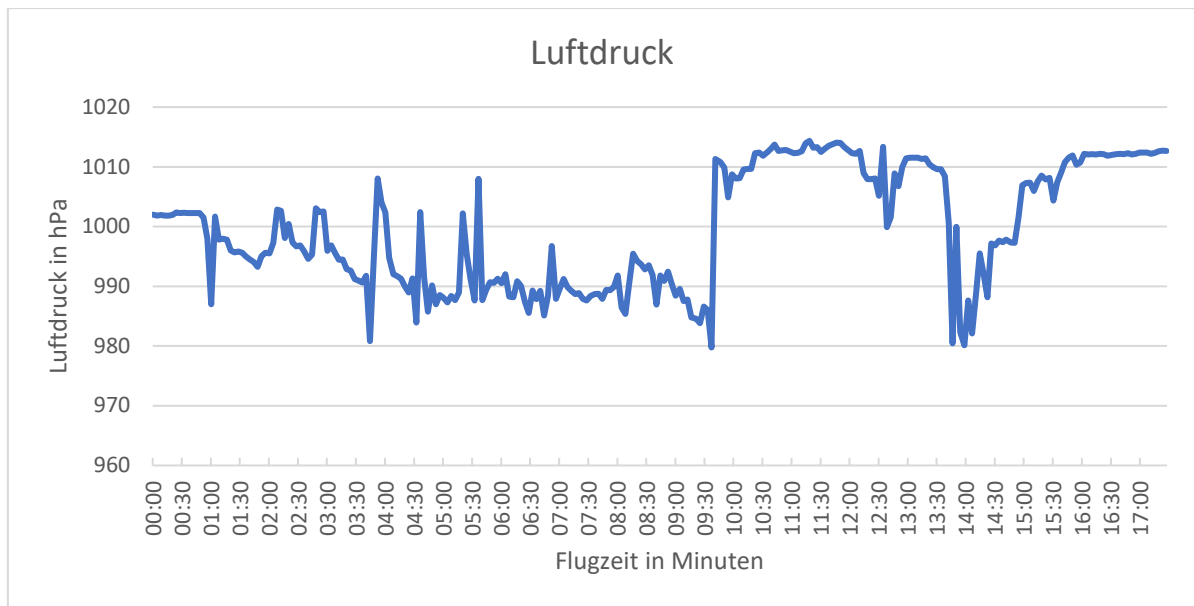


Abbildung 16: Verlauf des Luftdruckes während des Testfluges

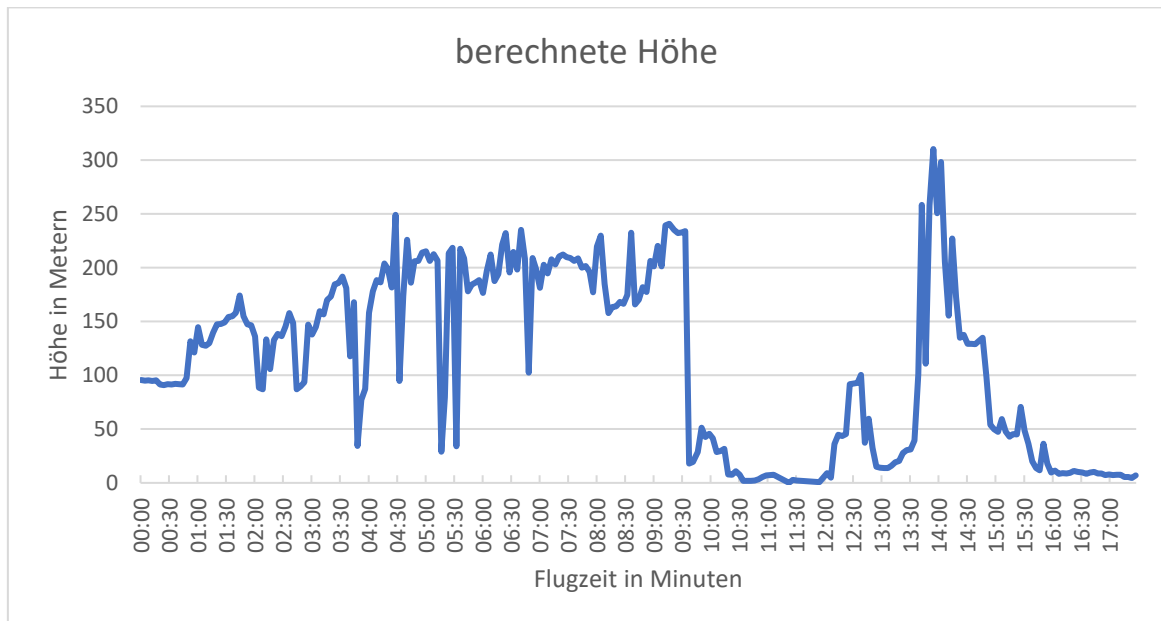


Abbildung 17: Verlauf der berechneten Höhe auf Basis des Luftdrucks während des Testfluges

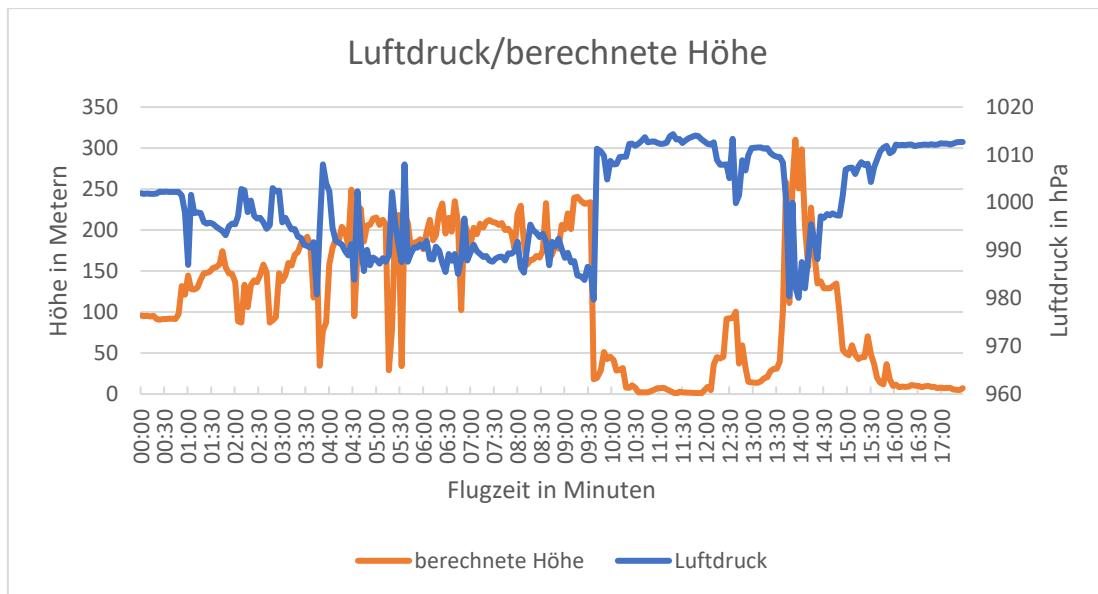


Abbildung 18: Vergleich von Luftdruck und berechneter Höhe über den Verlauf des Testfluges

Die theoretischen Grundlagen zur UV-Strahlung und zum UV-Index sowie die Relevanz für die Meteorologie wurden in den Kapiteln 5.3.5 und 10.5.3 erläutert. Der UV-Sensor (siehe Kapitel 10.5) konnte Daten sammeln, die in Abbildung 19 dargestellt werden. Dort ist zu erkennen, dass der UV-Index sich zwischen den Werten 3 und 7 befindet. Nach Tabelle 2 geht von diesem UV-Index eine mittlere bis teilweise hohe Gefahr aus, bei der Schutzmaßnahmen erforderlich sind. Die Schwankungen lassen sich erklären, indem man das Wetter und die Wolkenbildung betrachtet. Der Tag des Testfluges war sonnig mit einigen Wolken, die vorbeizogen. Da Wolken die Intensität der Sonnenstrahlung und somit der UV-Strahlung abschwächen, können solche Werte gemessen werden.

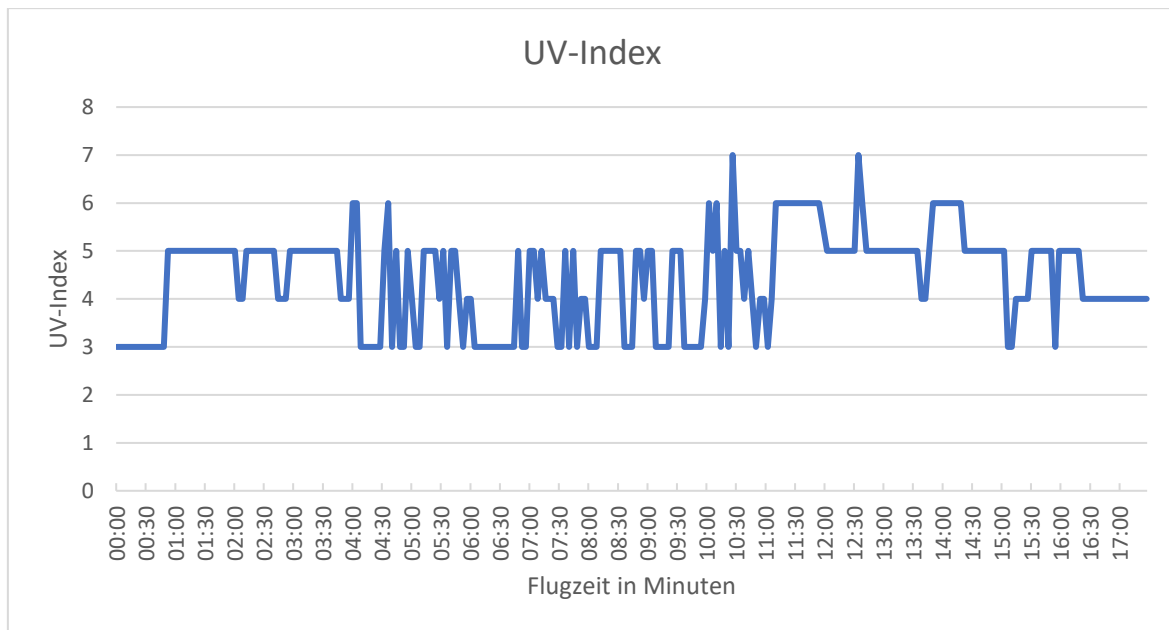


Abbildung 19: Verlauf des UV-Indexes während des Testfluges

Unter Betrachtung des Projektumfangs wird hier auf die Interpretation der Messdaten ( $eCO_2$  und  $TVOC$ ) des Luftqualitätssensors (vergleiche Kapitel 10.7) verzichtet. Die Messergebnisse werden im Anhang unter Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellt.

## 13 Ergebnisse & Diskussion

In vorliegender Arbeit wurde die Modifizierung eines Quadrocopter beschrieben, um meteorologische Daten in bodennahen Schichten zu sammeln, um die Frage zu klären, ob es möglich ist, einen Quadrocopter für die Erhebung von meteorologischen Daten in bodennahen Schichten zu verwenden und wie dieser modifiziert werden muss, damit er ausreichend und aussagekräftige Daten über die Meteorologie in bodennahen Schichten sammelt. Daran schloss sich die Frage an, in welchem Umfang und welcher Qualität meteorologische Daten erhoben werden können. Dies ist dafür relevant, Aussagen über das Wetter in geografischen Regionen und Höhen zu treffen, wo andere meteorologische Messverfahren an ihre Grenzen stoßen. Die Ergebnisse werden nun dargestellt und anschließend diskutiert.

Anfangs musste definiert werden, um was es sich bei einem Multicopter beziehungsweise einem Quadrocopter handelt. Anschließend wurde beleuchtet nach welchen physikalischen Grundsätzen Quadrocopter überhaupt fliegen können und welche rechtlichen Grundlagen gelten, damit eine Drohne in Deutschland geflogen werden darf. Folgend fanden verschiedene Steuerungsmöglichkeiten und das GPS-System Betrachtung, da vor allem letzteres in der modernen Drohnenfliegerei unabdingbar ist. Als nächstes großes Kapitel wurde die Meteorologie betrachtet, da der Hintergrund eine große Bedeutung bei der Modifizierung des Quadrocopters spielt. Es wurde das Wetter und das Mikroklima im Allgemeinen betrachtet, aber auch die verschiedenen meteorologischen Elemente. Danach wurden noch die Anwendungsgebiete eines Quadrocopters mit meteorologischen Sensoren betrachtet und solch ein modifizierter Quadrocopter mit anderen meteorologischen Messverfahren verglichen. Nachdem nun die theoretischen Grundlagen für den Quadrocopter und die Meteorologie, aber auch mögliche Anwendungsgebiete und der Vergleich zu anderen meteorologischen Messverfahren erläutert wurden, konnte mit der praktischen Umsetzung begonnen werden. Zunächst mussten Anforderungen definiert werden, anhand denen ein passender Multicopter ausgesucht und das Modul mit den meteorologischen Sensoren entwickelt werden kann. Für den Quadrocopter wurde eine konkrete Hardwareanalyse durchgeführt, um zu entscheiden, ob ein neuer Quadrocopter beschafft werden muss. Nach der Entscheidung für eine Neubeschaffung und dem anschließenden Wechsel, aus Praktikabilitätsgründen, zu einem Quadrocopter, der privat zur Verfügung gestellt wurde, wurden die einzelnen meteorologischen Sensoren und Bauteile für das Modul beschrieben. Für die Sensoren wurde die Relevanz für die Meteorologie

erläutert, um zu verdeutlichen, wieso die daraus gewonnenen Daten nützlich sind und weshalb sich letztendlich für diese Sensoren entschieden wurde. Weiter ging es dann an die konkrete Umsetzung des Projektes. Hierzu musste erst der Quadrocopter im Allgemeinen und auf die gestellten Anforderungen evaluiert werden. Anschließend geschah das Gleiche für das Modul. Hier mussten die Sensoren und die restliche Hardware einzeln getestet werden, die im Anschluss zusammengebaut und wiederum getestet wurden. Hierzu musste eine Platine entwickelt werden, die der Hardware Platz bietet und die technische Verbindung zum Microcontroller bereitstellt. Damit die meteorologischen Daten, die durch die Sensoren gesammelt werden, verarbeitet und korrekt dargestellt werden können, musste eine Software dazu entwickelt werden. Die Software verarbeitet die Daten und gibt sie so aus, dass sie zum einen an eine Bodenstation übertragen werden können und zum anderen auf einer Speicherkarte, die sich auf dem Quadrocopter befindet, gespeichert werden kann. Damit die an die Bodenstation übertragenen Daten auf einem Computer dargestellt werden können, musste hierfür eine Software mit grafischer Darstellung entwickelt werden. Das Kapitel der praktischen Umsetzung wird mit der Beschreibung der Zusammenführung des Quadrocopter und des Moduls und einem abschließenden Testflug abgeschlossen. Die gesammelten Daten wurden ausgewertet und interpretiert. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick auf eine mögliche Verwendung und Verbesserung des Projektes gegeben.

Anhand des theoretischen Hintergrundes konnten in der praktischen Umsetzung die folgenden Ergebnisse erzielt werden, um die Problemstellung zu bearbeiten. (1) Es konnte ein Quadrocopter so modifiziert werden, dass ein eigens entwickeltes Modul meteorologische Daten sammeln und speichern kann. Anfangs musste definiert werden, welche Art von Multicopter für den Einsatzzweck dieses Projektes geeignet war. Hier fiel die Entscheidung auf einen Quadrocopter (siehe Kapitel 8.1). An diesen wurden gewisse Anforderungen gestellt, die nun als vollständig erfüllt angesehen werden können.

(2) Nach der erfolgreichen Auswahl und Evaluation des Quadrocopters, musste die Entwicklung des Moduls mit den meteorologischen Sensoren praktisch umgesetzt werden. Hierzu wurde die Hardware erfolgreich getestet, sodass diese durch eine Platine zusammengebaut und miteinander verbunden werden konnten. Währenddessen kamen mehrere Probleme auf. Viele dieser Probleme konnten erfolgreich gelöst werden (siehe Kapitel 11.2.1). Als Ergebnis dieser Umsetzung kann festgehalten werden, dass die Sammlung von Daten mit Hilfe der funktionierenden Sensoren und deren Übertragung einwandfrei funktioniert. Sowohl das Speichern der Daten auf dem Modul als auch das Speichern der übertragenen Daten auf dem Computer funktioniert einwandfrei.

(3) Der Temperatur- und Feuchtigkeitssensor (siehe Kapitel 10.3) musste leider beim Testen nach dem Zusammenbau des Moduls als defekt klassifiziert werden, da keine plausiblen Daten mehr geliefert werden. Die Daten der Feuchtigkeit wären für die Interpretation des Wetters von großem Nutzen gewesen, denn die Luftfeuchtigkeit spielt eine große Rolle in der Meteorologie (siehe Kapitel 10.3.3). Die Temperaturwerte dieses Sensors können der Verifizierung der eigentlichen Temperaturdaten, die von einem speziellen Temperatursensor (siehe Kapitel 10.1) geliefert werden, dienen. Hier hätte der Sensor ausgetauscht werden müssen, was im Rahmen des vorgegebenen Bearbeitungszeitraumes nicht möglich war.

(4) Das GPS-Modul (siehe Kapitel 10.8) konnte beim Testen zwar nach längerer Zeit eine Positionsbestimmung durchführen. Leider war dies beim Testflug nicht möglich. Auch hier wäre der Austausch und vor allem ein Umstieg auf ein deutlich aktuelleres GPS-Modul sinnvoll gewesen. Hier sprach sowohl die zeitliche als auch die finanzielle Komponente dagegen. Der Austausch beider Sensoren genauso wie weitere Verbesserungen am Modul, welche im nachstehenden Kapitel betrachtet werden, sind Schritte, die in einer Weiterführung des Projektes und einer nächsten Iteration gegangen werden sollten. Dass aber trotz dieser Problematiken plausible und mutmaßlich korrekte Daten gesammelt werden können, ist ein Ergebnis dieser Arbeit.

(5) Trotzdem kann hier der qualitative Wert der Messdaten gesteigert werden. Zum Beispiel ist der Temperatursensor, wie alle anderen Sensoren auch, der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Das kann die Temperaturmessung insoweit verfälschen, dass nicht die eigentliche Lufttemperatur gemessen wird, sondern die Messergebnisse durch die Erhitzung der umgebenden Elemente beeinträchtigt wird. Eine Lösung hierfür würde das Design und die Entwicklung eines Gehäuses, zum Beispiel aus einem 3D-Druck darstellen, da dadurch

eine direkte Sonneneinstrahlung des Temperatursensors verhindert werden kann. Weiter könnte das Gehäuse dem Schutz der Luftverwirbelungen durch die Rotoren dienen. Ob der Quadrocopter und dessen Flug selbst die Messung beeinflussen konnte nicht überprüft werden, da Vergleichswerte mit einem Testflug inklusive Gehäuse fehlen.

(6) Nach der Betrachtung der, auf dem Luftdruck basierend, gemessenen Höhe, kann in Erwägung gezogen werden, die Höhe über andere Messverfahren, wie dem GPS, zu messen. Die gemessene Höhe auf Basis des Luftdrucks ist nicht allzu genau. Der Grund hierfür konnte nicht ermittelt werden. Die Messung über GPS würde Sinn ergeben, da so der Hözensensor „gespart“ oder deren Daten verifiziert werden könnten.

Somit kann das Modul mit den meteorologischen Sensoren Daten sammeln, speichern und auswerten. Die gestellten Anforderungen wurden bis auf die Anforderung aus Kapitel 8.6 erfüllt, da die automatische Steuerung und Darstellung der Daten auf einer geografischen Karte unter dem gegebenen Projektumfang nicht weiter betrachtet werden konnte. In Tabelle 10 werden die Anforderungen und deren Erfüllungsgrad dargestellt.

<u>Anforderung</u>	<u>Erfüllungsgrad</u>
Fliegender Quadrocopter	Erfüllt
Meteorologische Sensoren	Erfüllt
Übertragung der Daten an Bodenstation	Erfüllt
Speicherung der Daten auf dem Quadrocopter	Erfüllt
Datenhandling	Erfüllt
Automatisierte Steuerung und Darstellung des Fluges auf einer Karte	Nicht erfüllt
Unabhängiges Modul mit meteorologischen Sensoren & Bodenstation zum Empfang der Daten	Erfüllt

Tabelle 10: Gesetzte Anforderungen und Grad der Erfüllung

Abgesehen von den Verbesserungen und Defekten, hätte der Quadrocopter, das Modul und vor allem die Kombination der beiden ausführlicher getestet werden müssen. Aufgrund von praktischen Gegebenheiten war dies leider nicht möglich. Für die Fortführung des Projektes wäre es sehr empfehlenswert, den modifizierten Quadrocopter ausführlicher zu testen, um die Qualität der Daten stetig wachsen zu lassen. Als Nachteil, der sich über das ganze Projekt

herausgestellt hat, lässt sich im Nachhinein die Erfahrung mit Drohnen der Autoren identifizieren. Vieles wurde als „selbstverständlich“ angenommen, weshalb dies im Unterbewusstsein das kritische Hinterfragen von Entscheidungen gehemmt hat.

Schlussendlich kann als Ergebnis festgehalten werden, dass ein vollfunktionstüchtiger Quadrocopter mit einem für die Basisfunktionen tüchtigen Modul zur Erfassung, Speicherung und Übermittlung von meteorologischen Daten an eine Bodenstation entwickelt wurde. Deshalb kann die Problemstellung wie folgt beantwortet werden: Es ist möglich, dass ein Quadrocopter für die Erhebung von meteorologischen Daten in bodennahen Schichten modifiziert werden kann, ausreichend und aussagekräftige Daten über die Meteorologie zu sammeln. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Prototyp ist es möglich, geografische Regionen und Höhen abzufliegen. Andere meteorologische Messverfahren stoßen hierbei an ihre Grenzen, da beispielsweise meteorologische Bodenstationen aufgrund ihrer statischen Stationierung nicht flexibel genug sind, dort Daten zu sammeln, wo dies in dem Moment erfordert ist. Feste Stationen können dort Daten sammeln, wo sie installiert sind. Das ist auch in unterschiedlichen Höhen möglich, zum Beispiel wenn sie an einem Gebäude befestigt sind. Es ist aber nicht möglich kurzfristig an erforderlichen Stellen Daten zu sammeln, wenn dort keine Station installiert ist. Hier bietet ein modifizierter Quadrocopter einen Vorteil, dass er kurzfristig und flexibel an unterschiedlichen Orten und vor allem in bodennahen Schichten meteorologische Daten sammeln kann. Wetterballons und Wettersatelliten sind wie in Kapitel 7 beschrieben nicht für bodennahe Schichten und kleine definierte Bereiche (Mikroklimata) geeignet, sondern dienen eher der Wetterprognose in größeren Dimensionen. Deshalb lässt sich feststellen, dass ein modifizierter Quadrocopter Vorteile darin bietet und dafür geeignet ist die Problemstellung zu lösen. Das wurde in Ansätzen durch den in dieser Arbeit entwickelten Prototypen erfolgreich dargestellt.



## 14 Ausblick

Im vorherigen Kapitel wurden die Ergebnisse der Arbeit dargestellt und kritisch diskutiert. Hierbei wurden auch die Begrenzungen der Arbeit betrachtet, sodass nun ein Ausblick mit konkreten Verbesserungsvorschlägen gegeben werden kann, um das Projekt zu verbessern. Teile dieses Ausblicks konnten aufgrund von ressourcentechnischen Limitierungen in dieser Iteration des Projektes nicht nachgegangen werden.

Um die Messergebnisse qualitativ zu steigern, können die bereits in der Zusammenfassung aufgetretenen Probleme behandelt werden. Eine Möglichkeit wäre das Hinzufügen eines geeigneten Gehäuses, mit welchem die Sensoren vor äußeren Einwirkungen geschützt und somit nicht beeinflusst werden. Zum Beispiel würde in einem Gehäuse der Temperatursensor vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden und somit eindeutigere und gleichbleibende Ergebnisse liefern. Weiter ist es möglich beispielsweise die Antenne des LoRa-Moduls statisch daran zu befestigen. Dies würde die Sicherheit verbessern. Auch das Befestigen des Kits mithilfe einer festen Befestigungsmöglichkeit am Quadrocopter würde die Wartung und den Austausch eines defekten Kits vereinfachen und beschleunigen. Das Gehäuse könnte mithilfe von CAD-Programmen und einem 3D-Drucker einfach designet und gedruckt werden. Auch für den Empfänger, sprich die Bodenstation, kann ein Gehäuse designet und gedruckt werden, um das Empfangsmodul zu schützen, die Antenne fest zu positionieren und die Handhabung zu vereinfachen. Bei der Planung sollte jedoch darauf geachtet werden, dass durch mehrere Öffnungen Luft in das Gehäuse eintreten und zirkulieren kann. Ohne diese könnten Abweichungen bei den Messungen auftreten. Generell ist bei den hier beschriebenen Verbesserungsvorschlägen zu beachten, dass neue Probleme auftreten können, die ebenso wie die neuen Ergebnisse kritisch betrachtet werden müssen.

Ein weiterer Vorschlag zur Verbesserung der Qualität der Messergebnisse ist auch das Austauschen verschiedener Sensoren mit qualitativ hochwertigeren Komponenten. Dazu gehört im ersten Moment das GPS-Modul, was inzwischen stark veraltet und nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik entspricht. Durch den Tausch kann eine schnellere Betriebsbereitschaft sowie eine erhöhte Genauigkeit der Positionsdaten erreicht werden. Es gilt zu überprüfen, ob die Qualität der Sensoren auch durch Maßnahmen wie Kalibrierung, die in dieser Iteration nicht durchgeführt wurde (vergleiche Kapitel 11.2), und Fehlerbestimmung verbessert werden kann.

Um die Handhabung des Sensorkits zu verbessern, kann der Klemmanschluss für das Aufladen des Akkus durch einen handelsüblichen USB-Port ergänzt bzw. ausgetauscht werden. So kann der Akku mit normalen USB-Kabeln über einen Computer oder ein USB-Netzteil geladen werden und muss nicht über ein spezielles Ladegerät mit einzelnen Kabeln geladen werden. Dadurch wird die allgemeine Handhabung als auch der stationäre Betrieb erleichtert.

Eine Verbesserungsmöglichkeit der Platine des Sensorkits ist das Hinzufügen eines On/Off Switches. So muss nicht der Akku nach der Nutzung aus der Halterung genommen werden, um das Power-Modul und damit das Sensorkit abzuschalten. Dies kann ein einfacher Kippschalter sein, welcher mit in der Gehäusewand verbaut ist.

Auch eine Spannungsüberwachung des Akkus kann für längere Testphasen und Einsätze als Vorteil eingeplant werden. Dies wäre über eine Verbindung der Anode des Akkus an einen der analogen GPIO-Pins des Hauptcontrollers möglich. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die maximal Eingangsspannung von 3,3V nicht überschritten wird. Bei dem eingesetzten Li-Ion Akku kann diese bei voller Ladung 4,2V betragen, daher muss beispielsweise ein Spannungsteiler mit eingeplant werden.

Für die PC-Software könnten zusätzliche Verlaufsdiagramme hinzugefügt werden, um direkt während des Betriebes einen Verlauf der verschiedenen Sensordaten ablesen zu können. Auch eine Karte, welche die Flugroute anhand der vom GPS erfassten Positionsdaten darstellt, kann für einen besseren Überblick hinzugefügt werden.

Damit die Daten auch langfristig gespeichert werden und so Langzeitauswertungen erlauben, kann die Software unter Umständen mit einer SQL-Datenbank verknüpft werden. Des Weiteren können die in der Datenbank gespeicherten Daten mit Auswertungstools wie beispielsweise Grafana [65] ausgewertet und mit anderen Daten verglichen werden.

Die Studienarbeit kann auch als Basis für weitere, wissenschaftliche Arbeiten dienen. Eine Möglichkeit wäre zum Beispiel die Integration des Sensorkits mit in ein LoRaWAN Netzwerk. Die integrierten Funkmodule sind bereits LoRa-fähig. Es könnten Sensorkits an verschiedenen Orten platziert werden, die über LoRaWAN Netzwerk miteinander kommunizieren und Daten an einen zentralen Sammelpunkt senden. Dies kann zum Beispiel über das The Things Network [66] geschehen, welches ein öffentliches, globales LoRa-Netzwerk für Internet-of-Things-Devices bereitstellt. Eine andere Möglichkeit wäre die Integration über ein zusätzliches Mobilfunkmodem mit dem Mobilfunknetz.

Des Weiteren könnte das Sensorkit für eine gebäudeinterne Überwachung von Luftqualität und eCO<sup>2</sup> Wert genutzt werden, um automatisiert Fenster zu öffnen oder einen Alarm auszulösen, sollte die Luftqualität oder der eCO<sup>2</sup> Wert einen bestimmten Punkt unter- bzw. überschreiten. Dafür könnte die Übertragungsschnittstelle mit dem Hinzufügen oder Austauschen des Hauptcontrollers gegen ein WLAN-fähigen Modul gewechselt werden und somit über eine bereits existierende Infrastruktur innerhalb eines Gebäudes kommunizieren. Nachteil wäre jedoch, dass ein Akku-Betrieb durch den hohen Energieverbrauch von WLAN nicht mehr möglich wäre. Da innerhalb von Gebäuden jedoch meist überall Stromleitungen liegen, kann das Modul mit einem Netzteil direkt dort mit Energie versorgt werden.

Als konkreter Anwendungsfall kann hier die Anwendungsmöglichkeit aus der Landwirtschaft, wie in Kapitel 6, genannt werden. Verknüpft mit der Möglichkeit ein LoRa-Netzwerk aufzubauen, können mehrere dieser Module, auch in Kombination mit Quadrocoptern, Vorteile in der Landwirtschaft bieten. Ein Landwirt kann somit anhand von Echtzeitdaten Schlüsse daraus ziehen, ob das Wetter bestimmte landwirtschaftliche Aktionen, wie das Ernten oder das Bespritzen der Pflanzen mit Dünge- oder Pflanzenschutzmittel, zulässt. Gerade für Landwirte mit großen landwirtschaftlichen Flächen, die eventuell noch regional weit verteilt sind, bietet sich solch eine Lösung an, um einen Überblick über das Wetter bei all seinen zu bewirtschafteten Flächen zu haben.

In diesem Projekt wurde gezeigt, dass es möglich ist einen Prototyp eines mit meteorologischen Sensoren modifizierten Quadrocopters zu entwickeln. Damit bietet dieses Projekt eine Ergänzung zu anderen meteorologischen Messverfahren, wie Wetterballons, Wettersatelliten und festen Wetterstationen, da für kleine definierte Bereiche und in bodennahen Schichten flexibel Daten erhoben werden können. Weiterhin hat sich gezeigt, dass bei der Entwicklung des Prototyps Mängel aufgekommen sind, wodurch Verbesserungsgrundlagen zur Steigerung der Qualität und Nutzbarkeit eines solchen Quadrocopters erkennbar wurden. Prototypen haben unter anderem die Aufgabe etwaige Mängel aufzuweisen, um mit deren Hilfe erst das Projekt verbessert werden kann. Der gerade beschriebene Ausblick zeigt, dass dieses Projekt nicht abgeschlossen ist und weitere Verbesserungen vorgenommen werden sollten, um die Qualität zu steigern und den, sich eventuell auch änderbaren, Anforderungen immer mehr gerecht zu werden. Langfristig kann dieses Projekt dazu verwendet werden, in konkreten Anwendungsfällen eingesetzt zu werden, um durch die dadurch gesammelten Informationen weitere Vorteile in unterschiedlichen Einsatzfeldern zu erzielen. Neben den bereits oben dargestellten

Einsatzfeldern sind weitere denkbar, die mit fortschreitender Technik im Drohnenbereich wie auch der Sensorik, die Zukunft in diesem Bereich prägen können. Vorliegendes Proof-of-Concept zeigte, dass die Anwendbarkeit eines modifizierten Quadrocopters gegeben ist. Die Entwicklung des Prototyps zeigte in Ansätzen, dass damit erste Schritte für eine flexiblere Nutzung dieser Technik in verschiedenen Anwendungsbereichen gegangen worden ist.

## Anhang

### Bilder



*Abbildung 20: Quadrocopter im Flug während der Evaluation*



*Abbildung 21: Modifizierter Quadrocopter mit meteorologischen Sensoren vor abschließendem Testflug*

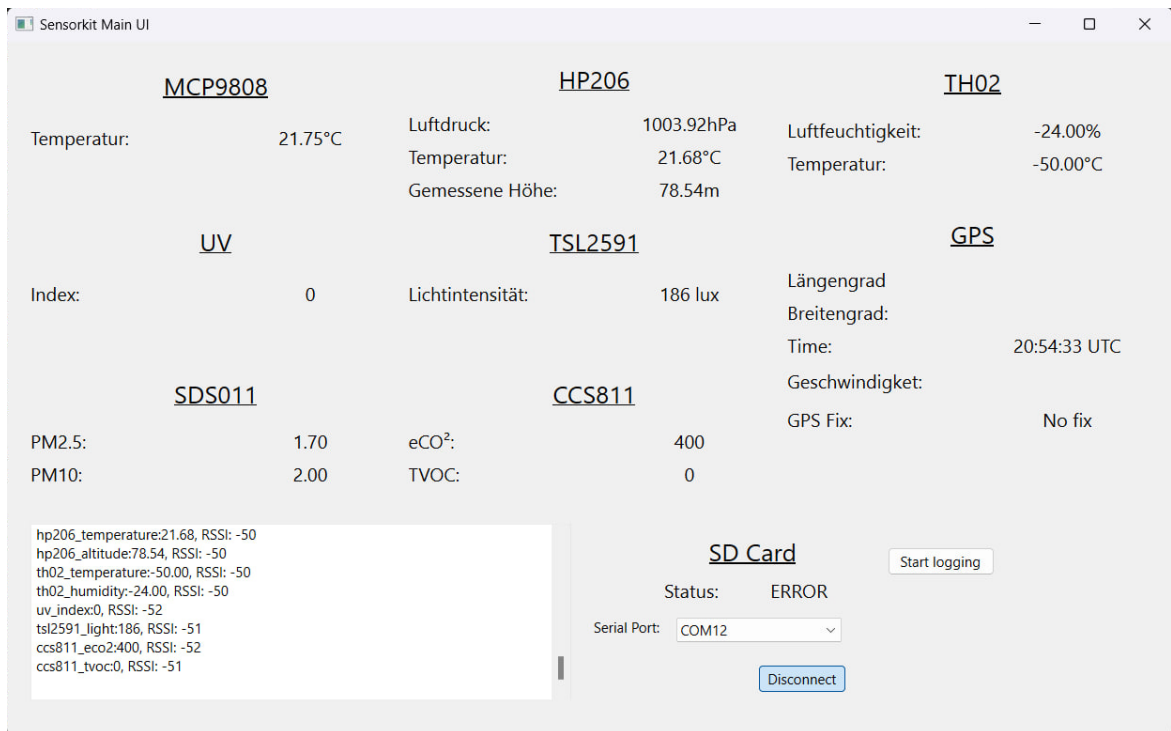


Abbildung 22: Bildschirmaufnahme der Desktop-App; Daten aus einem vorherigen Modultest ohne Quadrocopter

TIMESTAMP	mcp3000_temperature	hp2006_pressure	hp2006_temperature	hp2006_humidity	h102_temperature	h102_humidity	uv_index	kl2393_ljnh4	cs031_eco3	cs031_vox3	sd011_pm25	sd011_pm10	gps_data_gpr2	gps_data_gprmc	sd_status
1429212	24	1001,57	19,63	92,59	-50	-24	3	20122	561	22	12,7	38,5	SRGGA12293,865,,,0,00,,M,0,0,M,000*55	\$PRMC,12293,865,Y,000423,728,OK	OK
1429216	23,88	1001,55	19,48	92,35	-50	-24	3	19767	530	16	13,4	39,9	SRGGA12293,865,,,0,00,,M,0,0,M,000*53	\$PRMC,12293,865,Y,000423,728,OK	OK
1429220	23,56	1001,83	19,39	94,74	-50	-24	3	18827	530	19	13,1	39,0	SRGGA12293,865,,,0,00,,M,0,0,M,000*55	\$PRMC,12293,865,Y,000423,726,OK	OK
1429224	23,56	1001,83	19,39	95,25	-50	-24	3	18230	527	19	13,1	39,8	SRGGA12293,865,,,0,00,,M,0,0,M,000*52	\$PRMC,12293,865,Y,000423,725,OK	OK
1429232	23,5	1001,94	19,37	91,47	-50	-24	3	17777	527	19	12,6	27,5	SRGGA12293,865,,,0,00,,M,0,0,M,000*55	\$PRMC,12293,865,Y,000423,726,OK	OK
1429236	23,5	1002,35	19,4	90,88	-50	-24	3	17858	530	19	12,5	22,4	SRGGA12293,865,,,0,00,,M,0,0,M,000*55	\$PRMC,12293,865,Y,000423,726,OK	OK
1429240	23,81	1002,25	19,43	91,64	-50	-24	3	17917	527	20	12,6	21,6	SRGGA12293,865,,,0,00,,M,0,0,M,000*51	\$PRMC,12294,865,Y,000423,728,OK	OK

Abbildung 23: Auszug von meteorologischen Daten des Testfluges in Excel

```

TIMESTAMP,temperature,pressure,humidity,altitude,temperature,humidity,uv_index,ts12591_light,ecs811_eco2,ecs811_tvoc,ads011_pm25,ads011_pm10,gps_data,gpgga,gps_data,gprmc
2023-04-06 14:29:12,380528,24.00,1001.97,19.63,95.59,-50.00,-24.00,3.20,21.7,530.22,12.70,38.60,SGRGA,122909.866,,,,,0.00,,M,0.0,M,,0000+55,SGPRMC,122912.873,V,,,,,,060423,,*2B:OK
2023-04-06 14:29:16,407557,23.88,1001.85,19.58,94.91,-50.00,-24.00,3.20,12.2,561.24,12.70,38.60,SGRGA,122913.870,,,,,0.00,,M,0.0,M,,0000+53,SGPRMC,122916.865,V,,,,,,060423,,*2B:OK
2023-04-06 14:29:20,411472,23.81,1001.91,19.49,95.29,-50.00,-24.00,3.19,67.5,30.19,12.90,39.90,SGRGA,122917.865,,,,,0.00,,M,0.0,M,,0000+53,SGPRMC,122920.865,V,,,,,,060423,,*2B:OK
2023-04-06 14:29:24,413966,23.56,1001.83,19.39,94.74,-50.00,-24.00,3.18,82.5,30.19,13.10,40.00,SGRGA,122921.865,,,,,0.00,,M,0.0,M,,0000+56,SGPRMC,122924.865,V,,,,,,060423,,*2B:OK
2023-04-06 14:29:28,807342,23.56,1001.83,19.39,95.29,-50.00,-24.00,3.18,230.5,27.19,13.10,39.80,SGRGA,122925.865,,,,,0.00,,M,0.0,M,,0000+52,SGPRMC,122928.865,V,,,,,,060423,,*2B:OK
2023-04-06 14:29:32,464008,23.50,1001.94,19.37,91.47,-50.00,-24.00,3.17,77.5,27.19,12.60,27.50,SGRGA,122929.865,,,,,0.00,,M,0.0,M,,0000+55,SGPRMC,122932.865,V,,,,,,060423,,*2B:OK
2023-04-06 14:29:36,468008,23.50,1002.35,19.40,90.88,-50.00,-24.00,3.17,85.5,30.19,12.50,22.40,SGRGA,122933.865,,,,,0.00,,M,0.0,M,,0000+55,SGPRMC,122936.865,V,,,,,,060423,,*2B:OK

```

Abbildung 24: Auszug von meteorologischen Daten des Testfluges im csv-Dateiformat



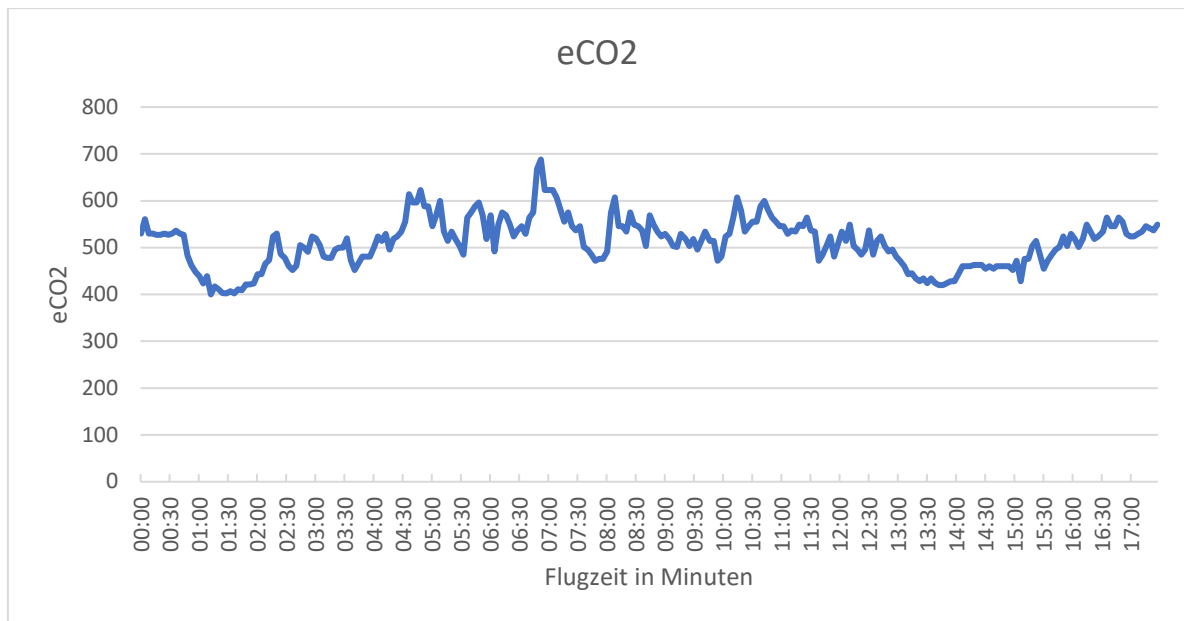


Abbildung 25: Verlauf der des eCO2-Wertes während des Testfluges

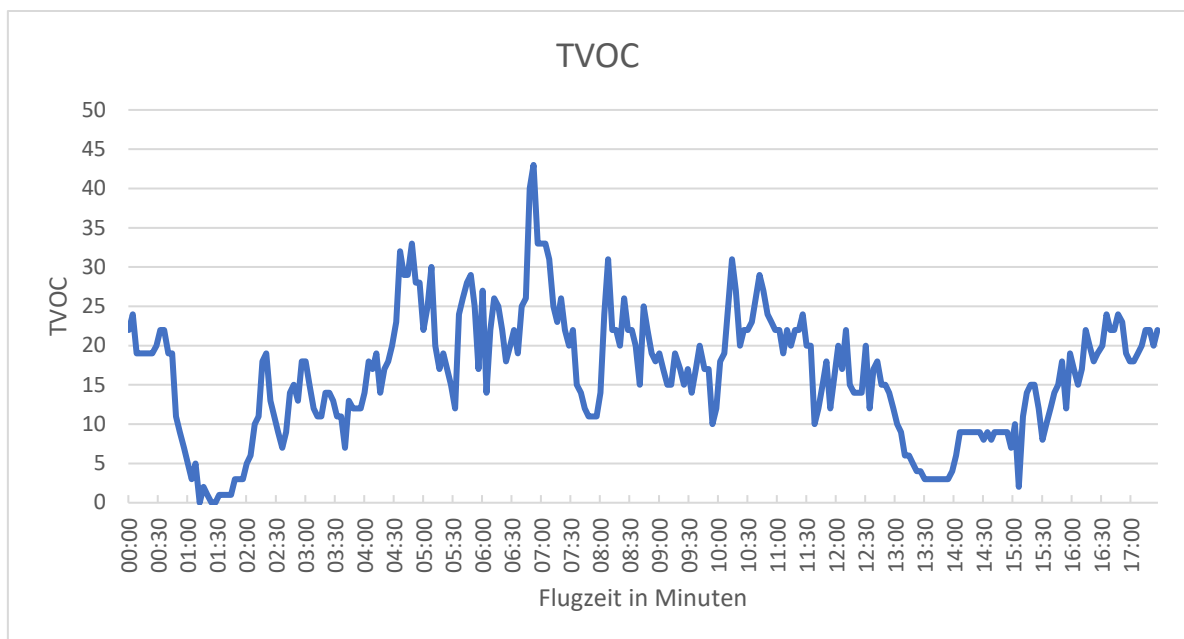


Abbildung 26: Verlauf der des TVOC-Wertes während des Testfluges

## Autorenverzeichnis

<u>Kapitel</u>	<u>Autor</u>
Kapitel 1: Einleitung	Simon Heid
Kapitel 2: Allgemeine Grundlagen Multicopter	Simon Heid
Kapitel 3: Allgemeine Grundlagen des Fliegens	Jonas Stalla
Kapitel 4: Steuerungsmöglichkeiten & Ortsmessung	Jonas Stalla
Kapitel 5: Meteorologischer Hintergrund	Jonas Stalla
Kapitel 6: Anwendungsmöglichkeiten des Quadrocopters mit meteorologischen Sensoren	Jonas Stalla
Kapitel 7: Vergleich mit anderen meteorologischen Messverfahren	Jonas Stalla
Kapitel 8: Anforderungen	Jonas Stalla
Kapitel 9: Hardwareanalyse eines Quadrocopters	Simon Heid + Jonas Stalla
Kapitel 10: Meteorologische Sensoren & notwendige Bauteile	Simon Heid (exkl. die Unterkapitel Relevanz für die Meteorologie: Jonas Stalla)
Kapitel 11: Praktische Umsetzung	
11.1	Simon Heid + Jonas Stalla
11.2	Simon Heid + Jonas Stalla
11.3	Simon Heid
11.4	Jonas Stalla
Kapitel 12: Auswertung von meteorologischen Daten	Jonas Stalla
Kapitel 13: Ergebnisse und Diskussion	Jonas Stalla
Kapitel 14: Ausblick	Simon Heid

# Literatur

- [1] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, *Klimaabkommen von Paris*. Zugriff am: 29. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602>
- [2] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, *Folgen des Klimawandels*. Zugriff am: 29. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmz.de/de/themen/klimawandel-und-entwicklung/folgen-des-klimawandels-124774>
- [3] C. Rattat, *Multicopter selber bauen: Grundlagen - Technik - eigene Modelle*, 1. Aufl. (edition Make). Heidelberg: dpunkt-Verl., 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.vlb.de/GetBlob.aspx?strDisposition=a&strIsbn=9783864902475>
- [4] Chris Landa, *DSHOT - the missing Handbook*. Zugriff am: 25. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://brushlesswhoop.com/dshot-and-bidirectional-dshot/>
- [5] B. Högel, *Dynamischer Auftrieb*. Jena. Zugriff am: 23. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.biancahoegel.de/flug/aerodynamik/auftrieb\\_dyn.html](https://www.biancahoegel.de/flug/aerodynamik/auftrieb_dyn.html)
- [6] K. Althoetmar und W. Ziegler, *Zeppeline: Leichter als Luft*. Zugriff am: 24. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.planet-wissen.de/technik/luftfahrt/zeppeline/index.html#:~:text=Leichter%20als%20Luft,-Anders%20als%20die&text=Als%20Füllung%20für%20den%20Auftriebskörper,mal%20leichter%20als%20Luft%20ist.>
- [7] B. G. van der Wall, *Grundlagen der Hubschrauber-Aerodynamik* (VDI-Buch). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020.
- [8] „Gesetz zur Anpassung nationaler Regelungen an die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge“, in *Bundesgesetzblatt*, Bd. 32, 1. Aufl. Bundesanzeiger Verlag, 2021, S. 1766–1779. Zugriff am: 3. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/bgbl-gesetz-betrieb-unbemannter-luftfahrzeuge.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/bgbl-gesetz-betrieb-unbemannter-luftfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile)
- [9] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, *EU-Regelungen für Drohnen*. Zugriff am: 3. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/drohnen.html>
- [10] Luftfahrt-Bundesamt, *Kompetenznachweise für Fernpiloten*. Zugriff am: 6. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.lba.de/DE/Drohnen/Fernpiloten/Anforderungen\\_Fernpiloten\\_node.html;jsessionid=4130B16407DF18E327E378D4DBC098E4.live11311](https://www.lba.de/DE/Drohnen/Fernpiloten/Anforderungen_Fernpiloten_node.html;jsessionid=4130B16407DF18E327E378D4DBC098E4.live11311)
- [11] Bundesamt für Justiz, *Luftverkehrs-Ordnung: § 21h Regelungen für den Betrieb von unbemannten Fluggeräten in geografischen Gebieten nach der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947*, 2, 2. Aufl. 2. Zugriff am: 6. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo\\_2015/\\_21h.html](https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo_2015/_21h.html)
- [12] DJI, *DJI*. Zugriff am: 26. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dji.com/>
- [13] Parrot, *Parrot*. Zugriff am: 26. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.parrot.com/>
- [14] Carina Homrighausen, „Das GPS-System: Eine theoretische Annäherung und Ansätze zur Anwendung im Physikunterricht“, Masterarbeit, Fakultät für Physik, Universität Bielefeld, Bielefeld, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.physik.uni-bielefeld.de/didaktik/Examensarbeiten/MasterarbeitHomrighausen.pdf>
- [15] P. Göbel, *Wetter und Klima* ([DuMont-Taschenbücher] 544 : DuMont-Schnellkurs). Köln: DuMont-Literatur-und-Kunst-Verl., 2004.
- [16] Dénes Dr. Berényi, *Mikroklimatologie: Mikroklima der bodennahen Atmosphäre*, 1. Aufl. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1967. Zugriff am: 30. Januar 2023.
- [17] Sir Oliver Graham Sutton, *Micrometeorology: A study of physical process in the lowest layers of the earth's atmosphere*. New York: Robert E. Krieger Publishing Co., Inc., 1953 // 1977. Zugriff am: 3. Februar 2023.
- [18] *Mikroklima*. Zugriff am: 3. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://klima.org/wissen/mikroklima/>

- [19] H. Frater, N. Podbregar und K. Schwanke, *Wetter, Klima, Klimawandel: Wissen für eine Welt im Umbruch*, 2. Aufl. (Phänomene der Erde). Berlin: Springer, 2008.
- [20] Bundesamt für Strahlenschutz, *Was ist UV-Strahlung?* Zugriff am: 26. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/einfuehrung/einfuehrung\\_node.html](https://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/einfuehrung/einfuehrung_node.html)
- [21] Deutscher Wetterdienst, *Informationen - Was ist der UV-Index*. Zugriff am: 26. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/gesundheit/uv/informationen.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/gesundheit/uv/informationen.html)
- [22] Deutscher Wetterdienst, *Definition des UV-Index*. Freiburg. Zugriff am: 26. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/gesundheit/uv/download/uv\\_def.pdf;jsessionid=095FB186F1876BC46BBA85334CCF7CC8.live21074?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/gesundheit/uv/download/uv_def.pdf;jsessionid=095FB186F1876BC46BBA85334CCF7CC8.live21074?__blob=publicationFile&v=7)
- [23] Bundesamt für Strahlenschutz, *UV-Strahlung*. Zugriff am: 26. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/uv\\_node.html](https://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/uv_node.html)
- [24] *Drohnen Einsatzgebiete: Moderne Nutzung fliegender Helfer*. Zugriff am: 16. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://droneparts.de/infos/drohnen-einsatzgebiete-moderne-nutzung-fliegender-helfer>
- [25] *Wetterdrohnen*. Zugriff am: 16. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.meteomatics.com/de/meteorodrones-wetterdrohnen/>
- [26] G. Kramper, *Bewaffnete Drohnen haben den Lufkrieg revolutioniert und das ist erst der Anfang*. Zugriff am: 14. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stern.de/digital/technik/kriegswaffen--drohnen-haben-den-luftkrieg-revolutioniert-und-das-ist-erst-der-anfang-30661292.html>
- [27] tagesschau, *NACHRICHTEN ZUM THEMA DROHNE*. Zugriff am: 14. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tagesschau.de/thema/drohne/>
- [28] L. Mattes, *Ausflug an den Rand des Weltalls: Vergleich und Auswertung zweier Wetterballon-Flüge*. Trier. Zugriff am: 16. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hans-riegel-fachpreise.com/fileadmin/hans-riegel-fachpreise/Module/ausgezeichnete-arbeiten/hans-riegel-fachpreise-seminararbeit-vwa-2020-mattes.pdf>
- [29] L. Nagel, N. Schmid, N. Schneider und T. Schüttler, *Leitfaden zum Aufstieg von Stratosphärenballons: Wie starte ich meine eigene Stratosphärenmission?* Zugriff am: 16. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.satttec.org/stratosphaerenmissionen/leitfaden\\_stratosphaerenballon/stratosat\\_leitfaden.pdf](https://www.satttec.org/stratosphaerenmissionen/leitfaden_stratosphaerenballon/stratosat_leitfaden.pdf)
- [30] B. Leitenberger, *Wettersatelliten*. Zugriff am: 16. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bernd-leitenberger.de/wettersatelliten.shtml>
- [31] Deutscher Wetterdienst, *Datengewinnung im Deutschen Wetterdienst*. Zugriff am: 16. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.dwd.de/DE/derdwd/messnetz/dg\\_im\\_dwd.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.dwd.de/DE/derdwd/messnetz/dg_im_dwd.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- [32] Sarah Keller, *Weltweiter Anteil ausgewählter Hersteller von zivilen Drohnen für kommerzielle Zwecke im März 2021, basierend auf dem Verkaufsvolumen*. Zugriff am: 21. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1313177/umfrage/fuehrende-zivile-drohnenhersteller-nach-anteil-am-verkaufsvolumen/>
- [33] Scope-Design, *Drohnen Statistiken*. Zugriff am: 21. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.drohnen.de/38904/drohnen-statistik/#year2021>
- [34] ADAC Luftrettung, *Multikopter im Rettungsdienst: Luftrettung mit bemannten Multikoptern ist möglich, sinnvoll & verbessert die Notfallversorgung*. Zugriff am: 21. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://luftrettung.adac.de/volocopter/>
- [35] Johannes, *Drohnen Reichweite erhöhen & testen: mit einer 2,4 GHz Fernsteuerung*. Zugriff am: 13. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://drohnen-lexikon.de/zubehoer/drohnen-reichweite-erhoehen/#:~:text=Vorteile%20von%202.4%20GHz%20Fernsteuerungen,-Die%202.4%20Ghz&text=2.4%20Ghz-Systeme%20sind%20einfach,mit%20kurzen%20Antennen%20betrieben%20werden.>
- [36] N. Waldmann, *Überblick: Fernsteuerungs-Protokolle für Drohnen und Modellbau*. Zugriff am: 13. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.drone-zone.de/ueberblick-fernsteuerungs-protokolle-fuer-drohnen-und-modellbau/>

- [37] U. Bergholter, Dehne Klaus und F. Kasten, *Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerung*. Offenbach am Main. Zugriff am: 21. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb\\_verlag\\_berichte/pdf\\_einzelbaende/175\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3#:~:text=Die%20Beleuchtung%2C%20die%20Bodenfläche,eine%20horizontale%20Ebene%20einfallenden%20Lichtströmen.](https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_berichte/pdf_einzelbaende/175_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3#:~:text=Die%20Beleuchtung%2C%20die%20Bodenfläche,eine%20horizontale%20Ebene%20einfallenden%20Lichtströmen.)
- [38] Microchip, *MPC9808 Datasheet*. Zugriff am: 4. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/MCP9808-0.5C-Maximum-Accuracy-Digital-Temperature-Sensor-Data-Sheet-DS20005095B.pdf>
- [39] HopeRF, *HPC206C Datasheet*. Zugriff am: 4. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190307/HP206C\\_DataSheet\\_EN\\_V2.0.pdf](https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190307/HP206C_DataSheet_EN_V2.0.pdf)
- [40] K. Schnalzger und S. Sebralla, *Wie lässt sich aus Luftdruck die Höhe berechnen und umgekehrt?* Zugriff am: 11. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/104619356-Wie-laesst-sich-aus-luftdruck-die-hoehe-berechnen-und-umgekehrt.html>
- [41] Deutscher Wetterdienst, *Barometrische Höhenformel*. Zugriff am: 10. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/B/Barometrische\\_Hoehenformel\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/B/Barometrische_Hoehenformel_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- [42] R. Kuner, *Beobachterhandbuch für Wettermeldestellen des synoptisch-klimatologischen Mess- und Beobachtungsnetzes*. Zugriff am: 11. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/29521456-Deutscher-wetterdienst.html>
- [43] Reichelt, *TH02 Datasheet*. Zugriff am: 28. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A300/101020074\\_01.pdf](https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A300/101020074_01.pdf)
- [44] AMS, *TSL2591 Datasheet*. Zugriff am: 4. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://ams.com/documents/20143/36005/TSL2591\\_DS000338\\_6-00.pdf/090eb50d-bb18-5b45-4938-9b3672f86b80](https://ams.com/documents/20143/36005/TSL2591_DS000338_6-00.pdf/090eb50d-bb18-5b45-4938-9b3672f86b80)
- [45] Reichelt, *UVM30A Datasheet*. Zugriff am: 4. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A300/ME076.pdf>
- [46] Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, *INFORMATIONEN ZU OZON*. Zugriff am: 22. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.stmuv.bayern.de/themen/luftreinhaltung/verunreinigungen/ozon/index.htm#:~:text=Was%20ist%20Ozon%3F,zwei%20Atomen%20\(O2\)%20besteht.](https://www.stmuv.bayern.de/themen/luftreinhaltung/verunreinigungen/ozon/index.htm#:~:text=Was%20ist%20Ozon%3F,zwei%20Atomen%20(O2)%20besteht.)
- [47] Shandong Nova, *SDS011 Datasheet*. Zugriff am: 4. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://en.novasensor.cn/static/upload/file/20230213/1676256288377335.pdf>
- [48] JOY-IT, *CCS811 Datasheet*. Zugriff am: 4. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://joy-it.net/files/files/Produkte/SEN-CCS811V1/SEN-CCS811V1-Datasheet-02.11.2020.pdf>
- [49] GlobalSat, *EM-406A Datasheet*. Zugriff am: 3. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.globalsat.ru/Sites/global/Uploads/EM-406A\\_User\\_Manual\\_Eng.41141233B4DB44EB85770BB40F15C35A.pdf](https://www.globalsat.ru/Sites/global/Uploads/EM-406A_User_Manual_Eng.41141233B4DB44EB85770BB40F15C35A.pdf)
- [50] Adafruit, *Adafruit Feather 32u4 RFM95 LoRa Radio- 868 or 915 MHz - RadioFruit*. Zugriff am: 28. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adafruit.com/product/3078>
- [51] U. Ostler und A. Rüdiger, *Was ist ein Printed Circuit Board (PCB)?* Zugriff am: 26. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.datacenter-insider.de/was-ist-ein-printed-circuit-board-pcb-a-1011652/>
- [52] D. Marrakchi, *Die 5 wichtigsten PCB-Designrichtlinien, die jeder PCB-Designer kennen sollte*. Zugriff am: 26. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://resources.altium.com/de/p/pcb-layout-guidelines>
- [53] N. Seidle, *Better PCBs in Eagle*. Zugriff am: 26. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sparkfun.com/tutorials/115>
- [54] W. Kester, *Ask the Applications Engineer—12: Grounding*. Zugriff am: 26. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/grounding-again.html#author>
- [55] E. Robleda, *Leiterplatten-Design: Die goldenen Regeln gelten unverändert*. Zugriff am: 26. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektroniknet.de/elektronikfertigung/leiterplatten/die-goldenen-regeln-gelten-unveraendert.104813.html>
- [56] Texas Instruments, *1 PCB Design Guidelines For Reduced EMI*. Zugriff am: 26. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ti.com/lit/ml/szza009/szza009.pdf?ts=1679828226709>

- [57] *Richtiges Designen von Platinenlayouts*. Zugriff am: 26. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.mikrocontroller.net/articles/Richtiges\\_Designen\\_von\\_Platinlayouts](https://www.mikrocontroller.net/articles/Richtiges_Designen_von_Platinlayouts)
- [58] Honolulu Development Center, *PCB CAD Design Guidelines*. Zugriff am: 26. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~ao/Electronic/Peter\\_dump/Electronics/System/Text/PCBCADGuidelines.pdf](http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~ao/Electronic/Peter_dump/Electronics/System/Text/PCBCADGuidelines.pdf)
- [59] Semtech, *RF Design Guidelines: PCB Layout and Circuit Optimization*. Zugriff am: 26. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.jps-pcb.com/upfile/2016/12/20161201145636\\_150.pdf](http://www.jps-pcb.com/upfile/2016/12/20161201145636_150.pdf)
- [60] K. Armstrong, *Advanced PCB design and layout for EMC*. Zugriff am: 26. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://cherryclough.com/media/file/EMC%20for%20PCB/Part%203.pdf>
- [61] Microsoft, *Microsoft Visual Studio Code*. Zugriff am: 12. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://code.visualstudio.com/>
- [62] PlatformIO, *PlatformIO for embedded development*. Zugriff am: 12. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://platformio.org/>
- [63] Süddeutsche Zeitung, *Beim Wandern Luft pro 100 Höhenmeter 1 Grad kühler*. Zugriff am: 14. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/leben/tourismus-beim-wandern-luft-pro-100-hoehenmeter-1-grad-kuehler-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-180801-99-382890>
- [64] Umweltbundesamt, *Feinstaub-Belastung*. Zugriff am: 14. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/feinstaub-belastung#feinstaubkonzentrationen-in-deutschland>
- [65] Grafana Labs, *Grafana*. Zugriff am: 12. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://grafana.com/>
- [66] The Things Network, *The Things Network*. Zugriff am: 11. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.thethingsnetwork.org/>

## **Erklärung**

Wir versichern hiermit unsere Studienarbeit T3\_3200 mit dem Thema:

*„Modifizierung eines Quadrocopters zur Erfassung von meteorologischen Daten“*

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt haben.

Wir versichern zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Mannheim, 18.04.23

-----

*Ort, Datum*

*Unterschrift*