



Bachelorarbeit

Softwaredesign und Regelung eines autonomen Prallluftschiffes

Vorgelegt von

Felix Schwieger

Matr.--Nr.: 1791021

Prüfer: Prof. Dr. Sergio Montenegro

Betreuender wissenschaftlicher Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Nils Gageik

Würzburg, 5. 3. 2014

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit einschließlich aller beigelegter Materialien selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Werken entnommen sind, sind in jedem Einzelfall unter Angabe der Quelle deutlich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.

Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandlungen gegen diese Erklärung und bewusste Täuschungen die Benotung der Arbeit mit der Note 5.0 zur Folge haben kann.

Würzburg, 5. 3. 2014

Felix Schwieger

Aufgabenstellung

Die Fortschritte im Bereich Sensorik und Mikrotechnik ermöglichen heutzutage den kostengünstigen Bau kleiner unbemannter Luftfahrzeuge (UAV, unmanned aerial vehicle, Drohne) wie Quadrocopter und Modellbau-Zeppeline. Solche Zeppeline sind als Spielzeug oder Werbeträger käuflich erhältlich und werden häufig per Funk gesteuert.

Ein Vorteil von Zeppelinen ist die vergleichsweise lange Betriebsdauer im Vergleich zu anderen Flugobjekten wie Quadrocoptern, da die Motoren nicht ständig in Betrieb sein müssen, um das Gerät in der Luft zu halten. Dementsprechend kann ein Zeppelin ohne erheblichen Stromverbrauch lange an einer Position verweilen und verschiedene Aufgaben aus den Bereichen Beobachtung, Kommunikation und Steuerung übernehmen.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein bestehendes Luftfahrzeug weiterentwickelt werden. Dabei ist die bestehende Software auf das Betriebssystem Rodos zu portieren, um das System einfacher in bestehende Forschungsarbeiten des Lehrstuhls integrieren zu können. Des Weiteren ist die Software zu erweitern und einzustellen, damit zumindest eine stabile Regelung der Gierachse sowie der Höhe möglich ist. Die Regler sind nach Möglichkeit für den Flugbetrieb einzustellen.

Die bereits integrierten Ultraschall-Abstandssensoren sollen ebenfalls in das System integriert werden und eine Hinderniserkennung ist zu implementieren. Die Entwicklung einer Kollisionsvermeidung ist wünschenswert.

Zur Aufgabe gehört eine ausführliche Dokumentation. Das System ist zu evaluieren.

Aufgabenstellung (Stichpunktartig):

- Portierung Rodos: Softwareredesign
- Höhenregelung, Gierregelung (Optimierung)
- Hinderniserkennung
- Kollisionsvermeidung (optional)
- Evaluierung des Systems
- Dokumentation

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Weiterentwicklung eines Prallluftschiffes beschrieben, welches im Rahmen des *AQopterI8*-Projektes der Julius-Maximilians-Universität in Würzburg entwickelt wurde. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Portierung der bestehenden Software in das Betriebssystem RODOS, der Optimierung der Gierregelung und der Implementierung einer Höhenregelung sowie einer Kollisionsvermeidung. Als Basis für die Portierung wurde ein Quadrocopter-Code gewählt um so die Kompatibilität zu weiteren Projekten zu gewährleisten.

Für die Höhenregelung wurde unterhalb der Gondel ein Ultraschall-Entfernungsmesser angebracht. Über einen PID-Regler werden dann zwei Brushless-Motoren angesteuert, um eine Höhenänderung zu erlangen. Da das Luftschiff für den Inneneinsatz konzipiert ist, ist eine Kollisionsvermeidung unabdingbar, da hier mit Hindernissen zu rechnen ist. Dazu wurden vier weitere Ultraschallsensoren angebracht, welche mögliche Hindernisse erkennen und ggf. Ausweichmanöver einleiten.

Die Lagebestimmung erfolgt durch eine Inertial Measurement Unit (IMU), welche Daten liefert für zwei PID-Regler. Diese stabilisieren das Luftschiff um die Yaw- und Roll-Achse.

Die Gierregelung und die Höhenregelung konnten erfolgreich getestet werden. Die Kollisionsvermeidung muss jedoch weiter getestet und optimiert werden.

Inhaltsverzeichnis

• 1. Einleitung.....	1
• 2. Grundlagen und Stand der Technik.....	2
2.1 Physikalisches Modell.....	2
2.1.1 Auftrieb.....	2
2.1.2 Luftwiderstand.....	3
2.1.3 Traggas.....	4
2.1.4 Antrieb und Steuerung.....	5
2.2 Bauarten.....	6
2.2.1 Starrluftschiff.....	6
2.2.2 Halbstarrluftschiff.....	7
2.2.3 Prallluftschiff.....	7
2.2.4 Hybridluftschiff.....	8
2.3 Sensorik.....	9
2.3.1 IMU.....	9
2.3.2 Ultraschallsensor.....	10
2.3.3 Radar.....	11
2.3.4 Infrarotsensor.....	12
2.3.5 Luftdrucksensoren.....	12
2.4 Regelungstechnik.....	13
2.4.1 Standardregelkreis.....	13
2.4.2 PID-Regler.....	13
2.5 Software.....	14
2.5.1 Echtzeit.....	14
2.5.2 Echtzeitbetriebssystem.....	15
2.5.3 Eingebettete Systeme.....	15
2.5.4 RODOS.....	16
2.6 Andere Arbeiten.....	17
2.6.1 Aufbau des Luftschiffes.....	17
2.6.2 Das Luftschiff „AIRFISH“.....	18
2.6.3 „Luftffisch N°. 1“.....	19
2.6.4 Solarluftschiff „LOTTE“.....	19

• 3. Konzept.....	21
3.1 Lageregelung.....	21
3.2 Höhenregelung.....	22
3.3 Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung.....	23
• 4. Implementierung.....	24
4.1 Lageregelung.....	24
4.2 Einbau der Ultraschallsensoren.....	25
4.3 Implementierung der Ultraschallsensoren.....	26
4.4 Höhenregelung.....	27
4.5 Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung.....	27
4.5 Software.....	29
4.6 Reglersynchronisation.....	30
• 5. Evaluierung.....	31
5.1 Yaw-Regler.....	31
5.2 Höhenregler.....	32
• 6. Diskussion und Ausblick.....	34
6.1 Diskussion.....	34
6.2 Ausblick.....	34
• Abbildungsverzeichnis.....	35
• Literaturverzeichnis.....	36

1. Einleitung

Das Aussterben der Luftschiffe Anfang des 20. Jahrhunderts lag zu einem an verheerenden Katastrophen wie der der Hindenburg, aber auch an der Konkurrenz mit anderen Luftfahrzeugen. Sie waren auf Grund der hohen Betriebskosten, teurem Traggas und der Menge an Personal für Wartung und Betrieb, den Flugzeugen und Helikoptern weit unterlegen, welche immer leistungstärker und effizienter wurden. In ihrer Blütezeit wurden Luftschiffe hauptsächlich in der Logistik und im Passagierverkehr eingesetzt. Auch Atlantiküberquerungen waren möglich. Ende der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts wollte die deutsche Cargolifter AG Transportluftschiffe auf den Markt bringen, die bis zu 160 Tonnen Last hätten aufnehmen sollen. 2002 musste das Unternehmen jedoch Insolvenz anmelden auf Grund mangelhafter Budgetplanung.

Weiterentwicklungen von Materialien und Aufkommen von moderner Steuerungstechnik machen Luftschiffe heute wieder attraktiv in der Luftfahrt. Daher feiern die Luftschiffe heutzutage ein kleines Comeback als Unmanned Aerial Vehicle (UAV) im Größenbereich von ca. 2 bis 100 Metern. Sie besitzen einige Vorteile gegenüber herkömmlichen Luftfahrzeugen in diesem Einsatzbereich. Auf Grund ihrer aerodynamischen Eigenschaften können sie sich sehr lange in der Luft halten ohne zusätzliche Energie zu investieren. Im Gegensatz zu Flugzeugen und Helikoptern ist das Traggas hauptsächlich für den Auftrieb zuständig und die Motoren werden für Flugmanöver benutzt. Dies dämmt die Geräuschemission massiv ein. Im Allgemeinen können sie sehr stabil fliegen auch bei geringen Geschwindigkeiten und geringen Höhen. Daher eignen sie sich vorzüglich für Langzeitüberwachungsmissionen im zivilen Bereich zur Kontrolle von Großereignissen, wie z.B. Fußballweltmeisterschaften, und für militärische Zwecke. Ferner sind Einsätze als Mutterschiff für Roboterschwärme am Boden und in der Luft denkbar. Durch den Überblick des Luftschiffes auf das Einsatzgebiet und der relativ stabilen Lage in der Luft eignen sich Luftschiffe ideal als Kontrolleinheit oder Mutterschiff dieser Schwärme.

Ziel der Arbeit ist die Weiterentwicklung und Optimierung eines bestehenden Regelungssystems eines Prallluftschiffes. Im Zuge dessen wird das System auf das Echtzeitbetriebssystem RODOS portiert, um es zukünftig in weitere Projekte des Lehrstuhls besser einbinden zu können. Zudem soll eine Höhenregelung sowie eine Hindniserkennung und Kollisionsvermeidung implementiert werden.

2. Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Physikalisches Modell

2.1.1 Auftrieb

Wird ein Körper, wie jener in Abb.1, in ein Fluid der Dichte ρ eingetaucht, wirken verschiedene Druckkräfte auf ihn, deren Beträge abhängig von der Tiefe sind mit $p = g \rho h$, wobei g die Erdbeschleunigung ist und h die erreichte Tiefe. Auf seine Grundfläche A wirkt die Kraft $F_2 = -g \rho h_2 A$ und auf die obere Fläche $F_1 = g \rho h_1 A$. Da der Druck mit zunehmender Tiefe ebenfalls zunimmt gilt, $F_2 > F_1$. Der Auftrieb ist also die Differenz der wirkenden Teildruckkräfte. Daher heben sich die horizontal wirkenden Kräfte gegenseitig auf. Die Differenz aus

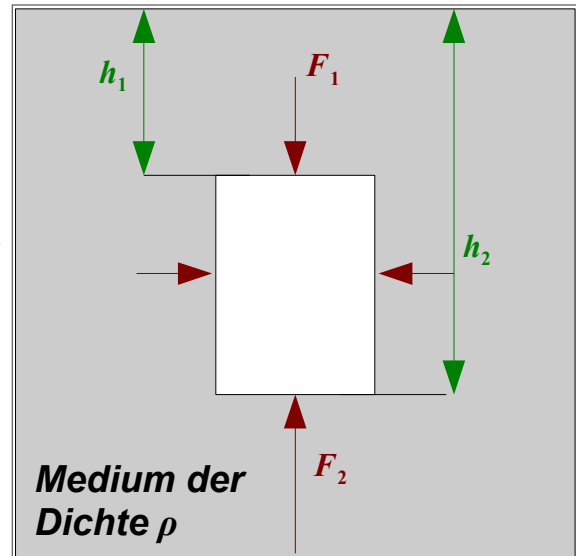


Abbildung 1: Kräfteverhältnis eines Quaders in einem Fluid

F_1 und F_2 ergibt somit F_{Auftrieb} .

$$F_{\text{Auftrieb}} = F_2 - F_1 = -g \rho (h_2 - h_1) A = -g \rho V \quad (1)$$

Nach dem archimedischen Prinzip entspricht der Auftrieb dem Gewicht des verdrängten Volumens V des Mediums. Für die Herleitung der Auftriebskraft eines beliebigen Körpers, z.B. für ein zigarrenförmiges Luftschiff, wird der Gaußsche Satz benötigt. Das Integral der Divergenz des Druckes über das Volumen des Körpers berechnet den Gesamtfluss durch den Körper. Dies entspricht der Auftriebskraft. [HALLIDAY]

$$F_{\text{Auftrieb}} = - \iiint_V \text{div}(p(h) \vec{e}_h) dV = -g \rho \iiint_V dV = -g \rho V \quad (2)$$

2.1.2 Luftwiderstand

Jede reale Bewegung eines Körpers durch ein Medium wie Wasser oder Luft ist mit Energieverlust verbunden. Dort wird die kinetische Energie des Körpers durch Reibungskräfte mit den Molekülen des Mediums, in Wärmeenergie umgewandelt. Dies ist bekannt als Widerstand. [GERTHSEN]

$$F_w = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2 \quad (3)$$

Die Widerstandskraft ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit des Körpers, mit dem es das Medium der Dichte ρ durchfährt. A ist der Querschnitt des Körpers in Bewegungsrichtung und c_w der Widerstandsbeiwert. Dieser ist in der Regel in einem Windkanal messbar und dimensionslos. Für stromlinienförmige Körper, wie einem Flugzeugflügel, gilt $c_w < 1$.

Für den Widerstandsbeiwert gilt, dass dieser von der Reynolds-Zahl abhängt. Diese ebenfalls dimensionslose Größe beschreibt das Strömungsverhalten von Körpern in Fluiden. Ähnliche Reynolds-Zahlen Re gelten für ähnliche Körper. Daher können Modelle im Windkanal auf ihr Turbulenzverhalten getestet werden.

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (4)$$

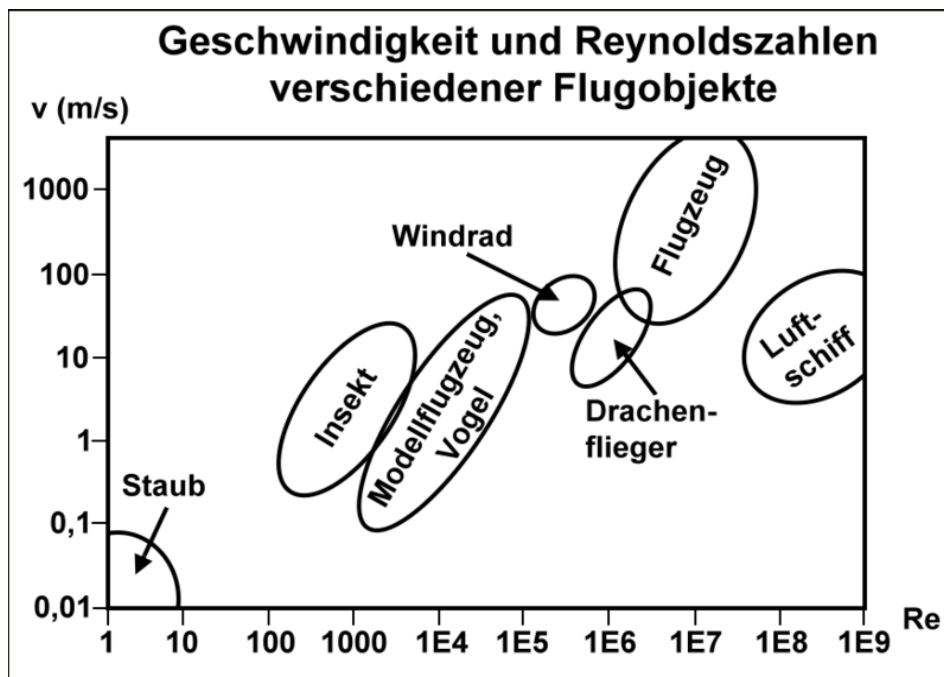


Abbildung 2: Geschwindigkeit und Reynolds-Zahlen verschiedener Flugobjekte
(Quelle: Wikipedia)

Die Geschwindigkeit v beschreibt die Strömungsgeschwindigkeit vom Fluid, d die Länge des Körper und η die dynamische Viskosität, welche die temperaturabhängige Zähflüssigkeit beschreibt. Für Luft beträgt sie bei Raumtemperatur $17.1 \mu Pa \cdot s$. Die Reynolds-Zahl ist somit sowohl von

der der Länge des Körpers, als auch von dessen Geschwindigkeit linear abhängig.

Überschreitet die Reynolds-Zahl einen kritischen Wert, schlägt die bis dahin laminare Strömung um den Körper in eine turbulente um. Dadurch entstehen hinter dem Körper Verwirbelungen, die den Luftwiderstand zusätzlich erhöhen. Wie aus der Abbildung 2 zu entnehmen ist, haben Luftschiffe deutliche höhere Reynolds-Zahlen. Sie fliegen zwar weitaus langsamer als Flugzeuge, sind dafür aber erheblich größer. Sie haben somit ein schlechteres Strömungsverhalten als Flugzeuge.

2.1.3 Traggas

Luftschiffe erzielen ihren Auftrieb durch Verwendung eines Traggases, welches eine geringere Dichte als Luft besitzt. Durch diese Dichtedifferenz des Traggases im Auftriebskörper und der Umgebungsluft erwirkt das Luftschiff einen statischen Auftrieb.

Dazu kann man verschiedene Gase benutzen. Heißluftballone benutzen für ihren Auftrieb erhitzte Luft. Da diese auch im erhitzten Zustand noch eine relativ hohe Dichte besitzt und mit der Zeit durch das Abkühlen der Luft an Auftrieb verliert, sind sie nicht für längere Einsätze geeignet. Daher wurde zu Beginn der Luftschiffahrt Wasserstoff verwendet. Das leichteste Element besitzt als Molekül H_2 eine Dichte von 0.09 kg/m^3 . Luft hat eine Dichte von 1.21 kg/m^3 bei einer Temperatur von 20°C . Somit ergibt sich eine Differenz von 1.12 kg/m^3 . Wasserstoff hat also eine Tragkraft von 1.12 kg für 1 m^3 . Dieses Gas ist günstig und einfach herzustellen und war daher bis in 40er Jahre das vorherrschende Traggas. Allerdings ist Wasserstoff sehr reaktionsfreudig und in Verbindung mit Sauerstoff aus der Luft sogar explosiv. Die Hindenburg-Katastrophe ist hier wohl das berühmteste negativ Beispiel für die Verwendung von Wasserstoff in der bemannten Luftschiffahrt.

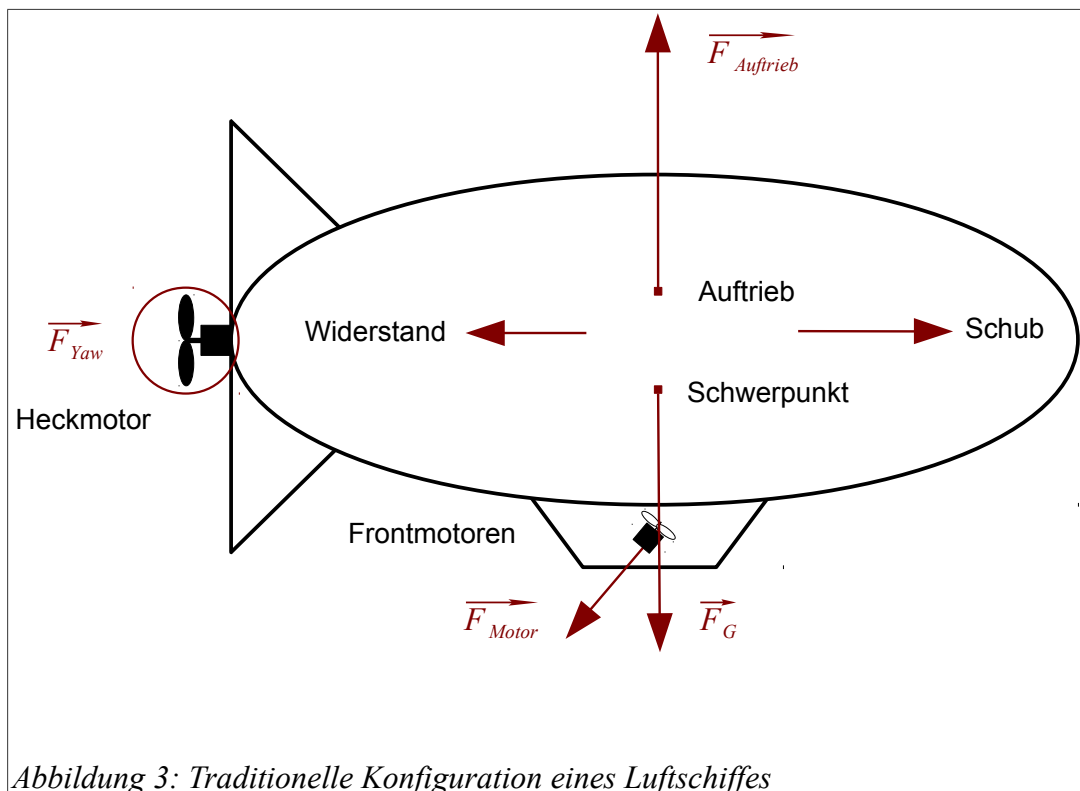
Auf Grund dieses Problems wurde Wasserstoff allmählich von dem reaktionsträgen Edelgas Helium abgelöst. Die Produktion von Helium ist aufwendig und teuer. Daher waren vor dem Zweiten Weltkrieg nur die USA hierzu in der Lage. Helium ist das zweitleichteste Element. Es besitzt zwar die vierfache Masse von Wasserstoff, kommt aber als Edelgas nur als Atom vor. Die Dichte von Helium beträgt 0.18 kg/m^3 und ist damit doppelt so groß wie die von Wasserstoff. Bei der Auftriebsgewinnung zählt nach dem archimedischen Prinzip nur die Dichtedifferenz des verdrängten und des verdrängendem Gases. Diese beträgt bei Helium 1.03 kg/m^3 . Helium erzeugt damit nur ca. 8% weniger Auftrieb als Wasserstoff. Die nur 8% Auftriebsverlust durch Helium sind auf Grund der höheren Sicherheit zu verkraften.

2.1.4 Antrieb und Steuerung

Ein Luftschiff erzeugt seine Schubkraft durch Propeller oder Impeller, die durch Elektro- oder Verbrennungsmotoren betrieben werden. Verbrennungsmotoren finden öfter Einsatz bei größeren, bemannten Luftschiffen, wohingegen Elektromotoren eher im Modellbau Anwendung finden. Elektromotoren haben den Vorteil, dass sie leiser sind und weniger Vibrationen auf das Luftfahrzeug übertragen. Dennoch ist ihr Wirkungsgrad gegenüber den Verbrennungsmotoren geringer, da sie Akkumulatoren benötigen, deren Energiedichte geringer ist als dieselbe Menge an Kraftstoff der Verbrennungsmotoren.

Im Horizontalflug sind der Luftwiderstand und die Schubkraft im Gleichgewicht. Da aber jedoch die Querschnittfläche des Luftschiffes erheblich größer ist als die Fläche der Rotoren, muss die Geschwindigkeit der beschleunigten Luft durch die Motoren weitaus größer sein als die Fahrtgeschwindigkeit des Luftschiffes. Falls eine größere Reisegeschwindigkeit benötigt wird, müssen weitere Motoren angebracht werden. Dies bedeutet aber wiederum mehr Ballast.

Luftschiffe verfügen am Heck über Leitwerke, die aus aerodynamischen Stabilitätsgründen dort angebracht sind. Die traditionelle Konfiguration besteht aus zwei Höhen- und zwei Seitenleitwerken. Bei größeren Luftschiffen können diese Leitwerke, ähnlich wie bei einem konventionellen Flugzeug, über bewegliche Anstellflächen zur Steuerung in Pitch- und Yaw-Richtung beitragen. Die bereits erwähnten vektorisierbaren Motoren an der Gondel können je nach Anstellwinkel, den Pitch-Winkel ebenfalls beeinflussen. Eine sehr effiziente Weise das Luftschiff zu neigen sind Ballonets. Dies sind luftgefüllte Ballons am Bug und am Heck innerhalb des Auftriebskörpers. Durch Aufblasen dieser Ballons wird das Traggas aus dem Bug bzw. Heck verdrängt, der Auftrieb sinkt in dieser Region und das Luftschiff wird bug- bzw. hecklastig. Häufig steht ein weiterer Motor am Heck für die Yaw-Steuerung zur Verfügung. Das Luftschiff erfährt dadurch ein größeres Drehmoment. Die Roll-Richtung stabilisiert sich weitestgehend alleine durch den tiefen Schwerpunkt, den die Gondel erzeugt. Bei vektorisierbaren Motoren können diese gegebenenfalls Manöver einleiten, welche das Luftschiff wieder auf Normalstellung bringen.



Die oben beschriebene Steuerkonfiguration (*Abbildung 3*) ist am häufigsten und wurde seit Beginn der Luftschiffahrt genutzt. Jedoch wird an weiteren Antriebsmöglichkeiten geforscht. So wurde ein Luftschiff an der Technischen Universität Berlin entwickelt, das am Heck über eine Schubvektorsteuerung verfügt und am Bug über horizontal und vertikale Strahlruder. Wie in *Abbildung 3* erkennbar wirken nun verschiedene Kräfte auf das Luftschiff. Dem Auftrieb des Traggases wirkt die Gravitation entgegen. Dieser Kraft können die Motoren bei Bedarf ebenfalls entgegenwirken. Sie sind zudem für den Vortrieb zuständig. Aus dem Strömungsverhalten der Luft, das aus der Schubkraft der Motoren hervorgeht, entsteht ein Luftwiderstand, der das Luftschiff abbremst.

2.2 Bauarten

Wie etwa bei Flugzeugen gibt es bei Luftschiffen ebenfalls verschiedene Bauarten. Diese sind hauptsächlich die Starr-, Halbstarr-, und Prallluftschiffe. Zudem gibt es noch eine hybride Bauweise. Im Folgenden wir auf diese Bauarten eingegangen. [GADIR]

2.2.1 Starrluftschiff

Starrluftschiffe besitzen ein inneres Skelett aus Trägern und Streben, mit dem Gondel, Motoren und Hülle verbunden sind. Zusätzlich wird das Gerippe mit Stahlseilen verspannt, was Formstabilität bei gleichzeitig großer Elastizität beisteuert. Das Skelett teilt das Traggas in einzelne Kammern auf, sodass bei einer Beschädigung der Außenhaut nur eine Kammer leer läuft. Im Gegensatz zu den

anderen Bauarten trägt das Traggas nicht zur Formgebung bei, dies macht Ballonets nicht erforderlich. Hierfür ist hauptsächlich das Skelett verantwortlich. Zur Trimmung des Luftschiffes werden die Nutzlast, Ballasttanks und Kraftstoff schwerpunktoptimal gelagert. Starrluftschiffe sind daher gut gegen stärkere Wettereinflüsse gerüstet und können die Steuerbarkeit auch bei Traggasverlust aufrechterhalten.

Auf Grund zu hoher Herstellungs-, Reparatur- und Wartungskosten ist diese Bauart heutzutage ausgestorben. Zudem konnten Starrluftschiffe nicht durch Entleeren der Gaskammern verkleinert werden. Große Wartungshallen waren daher notwendig. Bei heutigen Luftschiffen handelt es sich entweder um halbstarre Luftschiffe oder Prallluftschiffe. Das wohl berühmteste Luftschiff dieser Art ist die 1937 verunglückte Hindenburg. Ferdinand Graf von Zeppelin war einer der erfolgreichsten Hersteller solcher Luftschiffe. Die Bezeichnung Zeppelin ist daher zu einem Synonym für alle Luftschiffe geworden.

2.2.2 Halbstarluftschiff

Halbstarluftschiffe besitzen nur ein Teilskelett, an dem alle Strukturen wie Motoren und Gondel angebracht sind. Teilweise sind dort auch die Leitwerke am Heck angebracht. Das Skelett trägt hier gar nicht oder nur teilweise zur Form bei. Es besteht oft aus einem Kiel entlang der Längsachse. Halbstarluftschiffe werden daher auch Kielluftschiffe genannt. Formgebend ist hier zu großen Teilen das Traggas, das durch einen Überdruck die Außenhülle auf Spannung hält. Zur Steuerung und zum Druckausgleich werden oftmals Ballonets verwendet.

Das größte Luftschiff dieser Bauart ist der Zeppelin NT der Firma Zeppelin Luftschifftechnik aus Friedrichshafen.

2.2.3 Prallluftschiff

Prallluftschiffe (engl. Blimp) sind Luftschiffe ohne jegliches Gerüst. Die tragende Struktur besteht nur aus der Hülle. An ihr sind die Gondel und Leitwerke angebracht. Motoren jedoch meist direkt an der Gondel. Daher wird die Form und Spannung der Hülle auch durch Ballonets ausgeglichen. Durch das fehlende Skelett sind sie in ihrer Größe beschränkt. Bei längeren Luftschiffen neigen Prallluftschiffe dazu, in der Mitte einzuknicken. Eine günstige Variante sind Heißluftschiffe. Sie erhalten ihren Auftrieb wie Heißluftballone durch die erwärmte Luft im Auftriebskörper, sind jedoch dadurch in ihrer Größe und Einsatzzeit beschränkter.

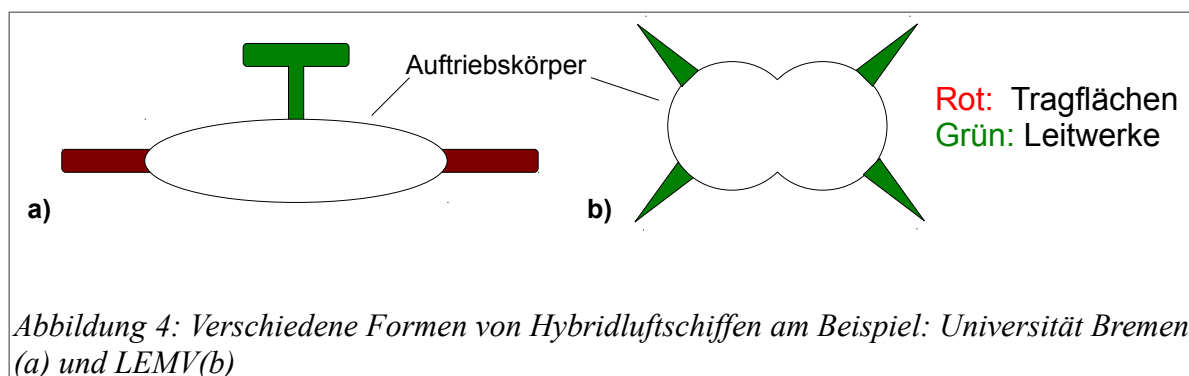
Prallluftschiffe können einfach hergestellt werden und leicht transportiert werden, wenn das

Traggas aus der Hülle abgepumpt wird. Diese Vorteile machen sie heutzutage zu am häufigsten gebauten Luftschiffen.

2.2.4 Hybridluftschiff

Dieses Konzept vereint die Auftriebsgewinnung durch statischen sowie aerodynamischen Auftrieb. Es besitzt eine mit Traggas gefüllte Hülle, welche jedoch so geformt ist, dass sie wie bei einem Flugzeugflügel Auftrieb erzeugen kann. Der Anteil des aerodynamischen Auftriebs kann größer hier größer werden als der statische, was weniger Traggas erforderlich macht. Ein Nachteil dadurch ist, dass das Luftschiff so nicht in der Luft stehen kann. Hybridluftschiffe können sich dennoch extrem langsam und dabei nahezu vibrationsfrei bewegen.

Ein Vertreter dieser Bauart ist das Long Endurance Multi-Intelligence Vehicle (LEMV) des amerikanischen Rüstungsunternehmens Northrop Grumman. Das Luftschiff verfügte über zwei zigarrenförmige Auftriebskörper, welche zusammen eine Tragfläche generieren, die zusätzlichen aerodynamischen Auftrieb erzeugt. Zudem wurden am Heck Leitflächen zur Steuerung angebracht. Der Antrieb erfolgte durch vektorisierbare Motoren. Die Entwicklung wurde jedoch aus Kostengründen 2012 eingestellt.

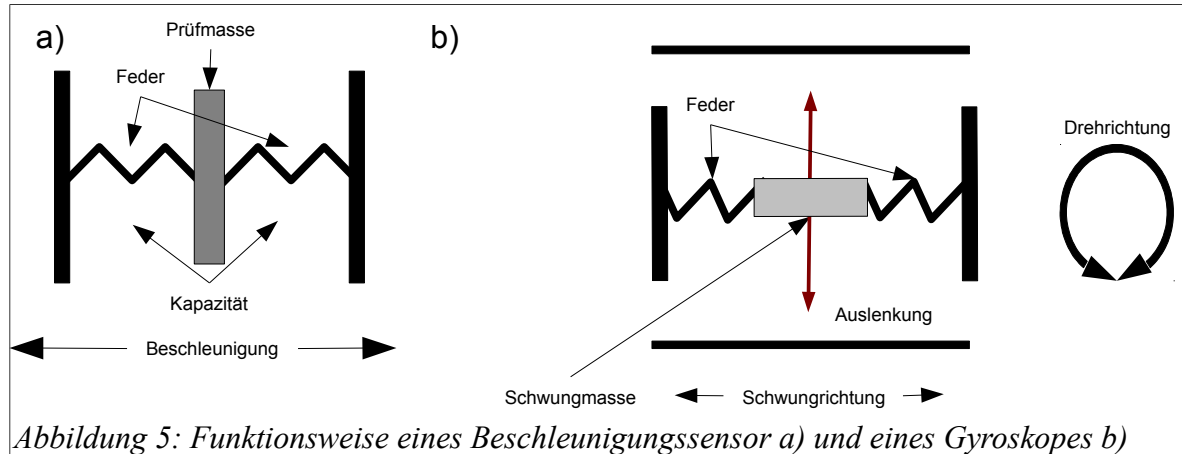


An der Universität Bremen wurde zudem auch ein Hybridluftschiff entworfen [HYBRID BREMEN]. Dieses bestand jedoch aus einem diskusförmigen Auftriebskörper, an dem seitlich Tragflächen angebracht sind. Am Heck wurde ein T-Leitwerk angebracht. Der Antrieb entsteht durch einen Impeller, der auf dem Luftschiff angebracht ist. Hybridluftschiffe können somit verschiedene Formen annehmen.

2.3 Sensorik

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Sensoren zur Lage- und Abstandsmessung vorgestellt.

2.3.1 IMU



Eine IMU (Inertial Measurement Unit) ist eine Kombination aus jeweils drei Drehratensensoren und drei Beschleunigungssensoren, die orthogonal zu einander ausgerichtet sind. Somit detektieren sie die Beschleunigung bzw. Winkelgeschwindigkeit entlang der x-, y-, und z-Achse.

Die Drehrate lässt sich auf mehreren Wegen ermitteln. Häufig wird die Corioliskraft dazu ausgenutzt. Dazu wird eine schwingfähige Masse entlang einer Achse aufgehängt. Wird das System nun gedreht, versucht die Masse ihre Bewegung beizubehalten und wird durch die wirkende Corioliskraft ausgelenkt. Diese Auslenkung lässt sich nun kapazitiv messen. Dieser Aufbau wird mikromechanisch (MEMS) realisiert, indem direkt in die Silizium-Schaltungen geätzt werden, sodass sie direkt mit dem Gehäuse und weiteren Datenverbindungen verknüpft sind.

Eine weitere Möglichkeit zur Drehratenmessung nutzt den Sagnac-Effekt. Dazu wird ein Lichtbündel durch einen halbdurchlässigen Spiegel geteilt und mittels weiterer Spiegel entgegengesetzt im Kreis geschickt, sodass sie durch den halbdurchlässigen Spiegel wieder zusammengeführt werden und auf einen Schirm geworfen werden. Befindet sich das System in Ruhe, es findet also keine Rotation statt, ist auf dem Schirm destruktive Interferenz zu beobachten. Rotiert das System jedoch, brauchen die beiden Lichtbündel verschieden lange Wege. Dadurch sind Interferenzmuster zu beobachten. Solche Messgeräte benötigen eine Mindestgröße, damit das Licht eine gewisse Strecke zurücklegen, kann um Interferenzmuster messbar zumachen. Das macht Geräte entsprechend teuer.

Eine mechanische Lösung zur Lagebestimmung ist ein kardanisch aufgehängter Kreisel, welcher eine sehr hohe Drehgeschwindigkeit besitzt. Auf Grund der Drehimpulserhaltung versucht dieser Kreisel seine Lage beizubehalten, auch wenn das gesamte System gedreht wird. Dies wird

ermöglicht durch die kardanische Aufhängung. An der Lage des Kreisels relativ zu seiner Aufhängung lässt sich nun die absolute Lage bestimmen. Ein Nachteil dieses Systems ist, dass der Kreisel relativ schwer sein muss, um seine Lage zu halten. Zudem blockiert das System, wenn mindestens zwei Achsen zusammenfallen, dadurch entfällt ein Freiheitsgrad. Diesen Zustand nennt man kardanische Blockade.

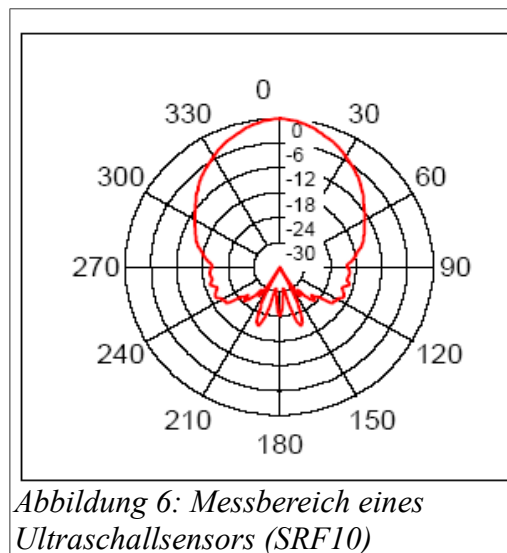
Auch Beschleunigungssensoren werden in MEMS-Technik produziert. Die Transformation der Beschleunigung in ein elektrisches Signal erfolgt über ein Feder-Masse-System, das mit den umgebenden Flächen ein elektrisches Feld aufbaut. Wenn sich diese Masse durch eine äußere Beschleunigung bewegt, verändert sich die Kapazität, welche nun gemessen werden kann. Mit diesen Beschleunigungssensoren lässt sich die Gravitation entlang der drei Achsen messen. Mit Hilfe dieser Messwerte kann der Drift des Gyroskopes herausgefiltert werden. Da der Vektor der Gravitationskraft stets nach unten zeigt, können die Daten des Beschleunigungssensors mit denen des Gyroskopes mit Hilfe eines Kalman-Filters fusioniert werden. Dies funktioniert nur für die x- und y-Achse, da bei einer Drehung um die z-Achse der Gravitationsvektor stets weiter parallel zu der z-Achse steht. Eine Korrektur des z-Winkels mit dem Beschleunigungssensor ist so nicht möglich. Daher muss ein anderes Verfahren für die z-Achse gewählt werden, wie z.B. mit Hilfe eines Magnetfeldsensors.

2.3.2 Ultraschallsensor

Akustische Wellen über dem menschlichen Hörspektrum von 15 bis 20kHz nennt man Ultraschall (bis 10GHz). Im oberen Frequenzbereich beträgt die Wellenlänge ungefähr dieselbe wie die von sichtbarem Licht. Beugungserscheinungen nach dem Huygens-Fresnelschen Prinzip verlieren so an Signifikanz. Ultraschall kann daher wie Licht gebündelt werden und für die Entfernungsmessung, wie z.B. in der Natur bei Fledermäusen, genutzt werden. Wie stark die Schallwellen sich noch beugen ist sensorabhängig.

Ein Ultraschallsensor besteht meist aus zwei Hauptbestandteilen: einem Sender und einem Empfänger. Eine Messung wird gestartet, indem der Sender ein Signalimpuls einer festen Frequenz aussendet. Trifft das Signal auf ein Hindernis, wird es zurückgeworfen und vom Empfänger aufgenommen. Da die Schallgeschwindigkeit c relativ konstant ist, liefert die Zeitdifferenz Δt zwischen Aussenden und Empfangen Rückschlüsse auf die Entfernung. Die Distanz d zum Hindernis lässt sich dann berechnen durch:

$$d = \frac{\Delta t}{2} \cdot c \quad (5)$$



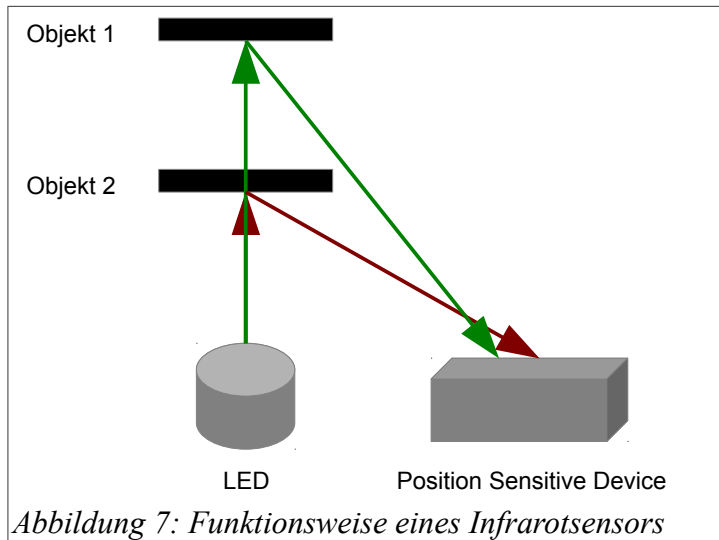
Jedoch gibt es einige Faktoren, die bei einer Messung zu beachten sind, um keine Fehler zu produzieren. Wenn das Signal orthogonal auf ein Hindernis auftrifft, wird das Signal gänzlich zurückgeworfen und es kann genau gemessen werden. Trifft das Signal jedoch in einem Winkel auf die Wand auf, der größer ist als die kegelförmige Ausfächerung, werden fehlerhafte Entfernungen gemessen. Weiterhin ist auch die Form des Objektes von Bedeutung. Für kleinere oder schmalere Objekte verringert sich die Reflexionsfläche. Auch das Material kann ein Problem darstellen. Bestimmte Stoffe können die Schallwellen schwächen oder sogar absorbieren. Wenn mehrere Sensoren der gleichen Frequenz genutzt werden, ist darauf zu achten, diese in verschiedenen Zeitabständen messen zu lassen oder sie so auszurichten, dass sie ihre Messbereiche nicht überlagern. Da die Signale akustisch sind, werden sie nicht von optischen Einflüssen gestört, können aber dadurch auch nicht in einem Vakuum genutzt werden.

2.3.3 Radar

Die Abstandsmessung beim Radar erfolgt ähnlich wie bei den oben beschriebenen Ultraschallsensoren. Anstelle der akustischen Signale werden hier elektromagnetische Wellen im Funkwellenbereich von einigen Kilohertz genutzt. Über die Zeitdifferenz zwischen Senden und Empfangen kann die Entfernung berechnet werden. Dies erfolgt ebenfalls nach Gleichung 5, wobei c nun die Lichtgeschwindigkeit ist. Daher eignet Radar sich eher für große Entfernungen.

Das oben beschriebene Konzept nennt man Impulsradar. Ein weiteres ist das Dauerstrichradar. Dies nutzt den Doppler-Effekt, um über die Geschwindigkeit eines Objektes Aussagen zu treffen.

2.3.4 Infrarotsensor



Ein Infrarotsensor ist ein optischer Sensor, der über gebündelte Lichtstrahlen Distanzen misst. Zur Messung wird von einer LED ein Lichtstrahl entsendet, der von dem Objekt reflektiert wird und dann auf das Position Sensitive Device (PSD) auftrifft. Abhängig davon wo der Lichtstrahl auftrifft, liefert das PSD-Element eine andere Spannung. Mittels eines Analog-Digital-Converters wird dadurch eine Entfernung berechnet.

Infrarotsensoren eignen sich eher für kleinere Distanzen, wobei eine Mindestdistanz von einigen cm eingehalten werden muss. Auf größere Distanzen ist der Sensor durch die Abnahme der reflektierten Intensität des Lichtstrahls beschränkt. Zudem sind sie gegenüber optischen Einflüssen wie Rauch oder der Sonne anfällig. Ähnlich wie Ultraschall liefern sie für einige Materialien ungenaue Messungen oder versagen vollkommen, wie z.B. bei Glas.

2.3.5 Luftdrucksensoren

Ein gängiges Verfahren zur Höhenmessung in der Luftfahrt basiert auf der Messung des Luftdrucks, da der Luftdruck mit zunehmender Höhe abnimmt. Dadurch kann anhand der Druckdifferenz zum Startpunkt relativ die Höhe mittels der barometrischen Höhenformel berechnet werden:

$$p(h) = p_0 e^{-\rho_0 \frac{gh}{p_0}} \quad (6)$$

Zur Messung wird der piezoelektrische Effekt genutzt. Durch das Verformen eines Halbleiters, meistens wird ein Quarzkristall genutzt, verlagern sich die Ladungsschwerpunkte innerhalb des Materials. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld und eine Spannung wird messbar. Da aber die Druckänderung in der Nähe des Meeresspiegels sehr gering ist, muss die Messung sehr genau sein. Weiterhin ist diese Form der Höhenmessung auch wetterabhängig, da der Luftdruck auch von der

Temperatur abhängt. Gegen Windeinflüsse kann der Sensor geschützt werden.

2.4 Regelungstechnik

2.4.1 Standardregelkreis



In einer Regelungsaufgabe gilt es, die Regelgröße $y(t)$ der Führungsgröße $w(t)$ anzugleichen. Dazu steht eine bestimmte Regelstrecke zur Verfügung, dies kann z.B. ein Motor oder ein Ventil sein. Um auf die Regelstrecke Einfluss zu nehmen, wird ein Regler benötigt, der die Stellgröße $u(t)$ berechnet, welche wiederum aus der Regelabweichung $e(t)$ berechnet wird. Diese wiederum ergibt sich aus der Differenz des Ist- und Sollwertes, also $e(t) = w(t) - y(t)$. Etwaige Störgrößen $d(t)$, die auf die Regelstrecke wirken, können so kompensiert werden. Die Regelung arbeitet also in drei Schritten:

1. **Messen:** Die Regelgröße wird entweder direkt gemessen, z.B. mit den oben beschriebenen Sensoren, oder aus anderen Größen berechnet.
2. **Vergleichen:** Der Fehler des Systems, die Regelabweichung, wird aus der Differenz der Führungsgröße und der Regelgröße berechnet.
3. **Stellen:** Unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Regelstrecke wird die Stellgröße bestimmt.

Der letzte Schritt wird oftmals unter der Verwendung eines PID-Reglers betrieben, dennoch gibt es verschiedene Regler, auf die aber nicht weiter eingegangen wird.

2.4.2 PID-Regler

Der PID-Regler [LUNZE] besteht aus drei Anteilen, die addiert werden, um die Stellgröße zu erlangen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, diese einzeln zu kombinieren (z.B. als PD- oder PI-Regler). Dies ist abhängig vom Einzelfall.

- **Proportionalregler(P-Anteil)**

Dieser Anteil arbeitet nach dem Prinzip „Je größer die Regelabweichung ist, umso größer muss die Stellgröße sein“. Das heißt er ist proportional zur Regelabweichung, aber nicht zurzeit. Damit reagiert der Regler unmittelbar, jedoch muss in Bezug auf die Regelstrecke

Rücksicht genommen werden, da die Reaktionszeit und das Verhalten einen Einfluss auf die Verstärkung des P-Anteils hat. Bei zu geringer Verstärkung bleibt die Regelabweichung zu groß und bei zu hoher verliert das System an Stabilität. Zudem bleibt im Allgemeinfall eine geringe Abweichung.

- **Integralregler(I-Anteil)**

Da der Proportionalregler eine zwar kleine, jedoch stetige Regelabweichung produziert, kann ein Integralregler zur Hilfe genommen werden. Er arbeitet nach dem Prinzip *„Solange eine Regelabweichung auftritt, muss die Stellgröße verändert werden“*. Die zeitliche Integration der Regelabweichung liefert solange einen Beitrag, bis sie verschwunden ist. Dadurch ist der Regler sehr genau, allerdings auch sehr langsam. Ähnlich wie der P-Regler kann dieser bei einer zu hohen Verstärkung das System zur Instabilität führen.

- **Differentialregler(D-Anteil)**

Dieser Anteil reagiert nur auf Veränderungen der Regelabweichung und wird nur zusammen mit P- und I-Anteil genutzt. *„Je stärker sich die Regelabweichung verändert, umso stärker muss die Regelung eingreifen“*. Der D-Anteil reagiert bereits dann, wenn die Regelabweichung noch keine großen Werte angenommen hat, jedoch die Änderungsgeschwindigkeit rasant zugenommen hat. Dadurch kann dieser Anteil die Reaktionsgeschwindigkeit des gesamten Reglers erhöhen und das Oszillieren um den Sollwert eindämmen.

2.5 Software

2.5.1 Echtzeit

Rechnet ein System in Echtzeit, so wird der Datenverarbeitung ein Zeitintervall zugewiesen, sodass die Ergebnisse innerhalb dieses Intervalls verfügbar sind. Die zu verarbeitenden Daten können innerhalb des Zeitintervalls verteilt auftreten oder zu konkreten Zeitpunkten. In der Luft- und Raumfahrt betragen solche Zeitfenster nur einige Millisekunden. Je nach Anwendung wird zwischen harter und weicher Echtzeit unterschieden. In der harten Echtzeit besitzt das Zeitintervall einen konkreten Anfangs- und Endpunkt, welche nicht verpasst werden dürfen. Abweichungen von diesen Punkten können zu einem Totalausfall des ganzen Systems führen. Die weiche Echtzeit hingegen verzeiht geringe Abweichungen vom diesen Zeitfenster.

2.5.2 Echtzeitbetriebssystem

Ein Echtzeitbetriebssystem verwaltet wie jedes anderes Betriebssystem die Hardware-Ressourcen, wie z.B. Speichernutzung und Prozessorauslastung. Jedoch können diese Systeme Anwendungen ausführen, die sehr präzise Zeitfenster zur Ausführung erfordern und ein hohes Maß an Zuverlässigkeit benötigen. Solche kritischen Operationen, wie z.B. das Interrupt-Handling, können bei Verspätung Fehler oder gar komplette Systemausfälle produzieren. Dies wird verhindert durch prioritätsbasiertes Prozessscheduling. Sicherheitskritische Prozesse können so vorrangig verarbeitet werden. Standardbetriebssysteme, wie Linux oder Windows, sind weniger stark an Prioritäten gebunden. Sie sind darauf ausgelegt, möglichst viele Anwendungen und Prozesse gleichzeitig auszuführen. Auch Prozesse mit geringerer Priorität erhalten hier Verarbeitungszeit.

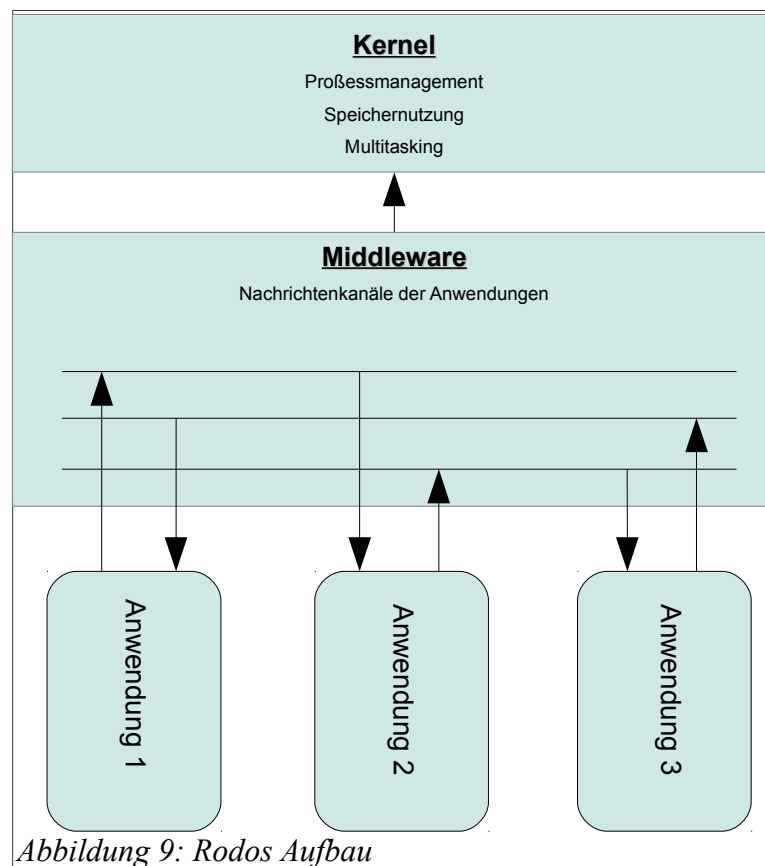
Grundlegend werden Echtzeitbetriebssysteme für zwei Typen von Einsatzmöglichkeiten verwendet: Systeme, die auf Ereignisse reagieren und Systeme, die in Echtzeit Regelungsaufgaben durchführen. Bei Systemen, die auf Ereignisse konfiguriert sind, ist es wichtig, dass eine Antwort deterministisch erfolgt. Für ein Airbag-System in einem Automobil ist es wichtig, dass eine Reaktion nach einer Kollision zum richtigen Zeitpunkt erfolgt. Zu früh oder zu spät hätte Verletzungen für die Insassen zur Folge. In einem Regelungssystem ist die Verarbeitungszeit von Führungs- und Regelgröße relevant. Die Stellgröße kann somit ebenfalls deterministisch ausgegeben werden. Zudem kann in harter Echtzeit sichergestellt werden, dass die Messung zu fixen Zeitpunkten erfolgt.

Echtzeitbetriebssysteme scheinen somit bessere Leistung zu liefern, was jedoch falsch ist. Sie liefern nur eine deterministische Prozesssteuerung, wohingegen Standardbetriebssysteme auf Multitasking und Nutzerflexibilität optimiert sind. Die Leistung beider hängt zum Teil von der Hardware-Charakteristik ab.

2.5.3 Eingebettete Systeme

Eingebettete Systeme sind in eine technische Umgebung eingebaute Rechensysteme, welche die Komponenten jener Umgebung steuern und überwachen. Diese Systeme werden speziell für ihre Aufgabe angepasst und können, falls Echtzeitanforderungen gestellt werden, mit Echtzeitbetriebssystemen gesteuert werden. Ihre Anwendungsmöglichkeiten sind schier endlos. So werden sie von Kraftfahrzeugen bis hin zu Waschmaschinen eingesetzt.

2.5.4 RODOS



RODOS(Realtime Onboard Dependable Operating System) ist ein Echtzeitbetriebssystem für eingebettete Systeme, das in Zusammenarbeit des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V (DLR) und des Lehrstuhls für Informationstechnik für Luft- und Raumfahrt der Universität Würzburg entwickelt wurde und weiterentwickelt wird [MONTENEGRO]. Dieses System wurde gewählt, da es zum einen in anderen Projekten des Lehrstuhls genutzt wird und so die spätere Anbindung erleichtert und zum anderen da RODOS ein flexibles und einfaches Framework mitliefert. Es ist vorwiegend für Satellitenanwendungen konzipiert.

Die unterste Schicht besteht aus einem Echtzeitkern, der für das Prozessmanagement sowie die Speichernutzung zuständig ist. Auch Zeitmanagement und Robustheit sind hier wichtige Aspekte. Es liefert alle elementaren Funktionen, die zum Betrieb eines Echtzeitbetriebssystem nötig sind, wie z.B. Ressourcenverwaltung, I/O- und Interruptverwaltung sowie Threadkommunikation und -synchronisation. Letzteres wird über einen preemptiven Scheduler erreicht, der mit prioritätsbasierendem Scheduling aber auch mit Round-Robin arbeitet, falls die Threads die selbe Priorität besitzen.

Die darauf liegende Schicht ist die Middleware. Ihre Aufgabe ist die Sicherstellung der Kommunikation der ihr angeschlossenen Komponenten und Applikationen, die durch ein

asynchrones Subscriber/Publisher-Protokoll erreicht wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob die angeschlossenen Komponenten zur Hardware oder Software zählen. Dies gewährleistet eine hohe Flexibilität, da weitere Anwendungen ohne Umstände angeschlossen werden können. Über gesonderte Nachrichtenkanäle, sogenannte Topics, können die Applikationen direkt miteinander kommunizieren, ohne dass sie von weiteren beeinflusst werden.

Wie viele andere Echtzeitbetriebssysteme kann RODOS Semaphoren einsetzen, um den Zugriff auf Ressourcen zu beschränken. Ohne den Einsatz von Semaphoren können Fehler auftreten, falls mehrere Prozesse auf dieselbe Ressource Zugriff haben. Durch das Blockieren einer Ressource für einen Prozess kann verhindert werden, dass während der Verarbeitung ein weiterer Prozess ungewollte Veränderungen vornimmt. Dennoch können durch Semaphoren Deadlocks auftreten. Dies ist ein Zustand, in dem eine Menge an Prozessen auf die Freigabe einer Ressource warten, aber nur ein Prozess aus derselben diese Freigabe betätigen kann.

2.6 Andere Arbeiten

2.6.1 Aufbau des Luftschiffes

Diese Arbeit basiert auf dem Luftschiff entwickelt von Johannes Wischert [WISCHERT] und ist nach *Abbildung 3* aufgebaut. Es beruht auf dem Modellbausatz FS30 der Firma Displaymax, welcher mit weiteren elektronischen Komponenten ergänzt wurde um die Fähigkeit zu erlangen autonom zu fliegen. Das Luftschiff ist 3m lang und hat ein Gesamtvolumen von 3m³. Das Luftschiff verfügt über zwei Brushlessmotoren als Frontmotoren und einem Servomotor zur Schubvektorsteuerung dieser beiden Motoren. Mit dem Servomotor sind die Frontmotoren bis zu 360° drehbar, was die Möglichkeit eröffnet mit diesen Motoren die Roll-, Pitch- und Höhenregelung zu realisieren. Diese Motoren sind an der Gondel angebracht, welche wiederum mittels Klettverbindung unterhalb des Auftriebskörpers hängt. Ein Gleichstrommotor ist am Heck befestigt, um die Yaw-Richtung zu beeinflussen. An Sensorik verfügt das Luftschiff über eine IMU zur Lagebestimmung, sowie vier Ultraschallsensoren für die Hinderniserkennung und einen für die Höhenmessung.

Das Luftschiff wird über einen AVR32 UC3A Mikrocontroller gesteuert. An diesem hängt der I²C-Bus über dem mit der IMU kommuniziert wird. Über einen Pegelwandler muss das I²C-Signal von 3,3V, mit dem der Mikrocontroller und die IMU arbeiten, auf 5V gewandelt werden, da die Brushless-Controller diese benötigen. Der Heckmotor wird über ein PWM-Signal und zwei GPIO-Pins, die die Drehrichtung bestimmen, betrieben. Der Servomotor wird ebenfalls über ein PWM-Signal angesteuert. Die Betriebsspannung von 11,4V, die ein Akkumulator liefert, liegt direkt an

dem Motorcontroller für den Heckmotor sowie an den beiden Brushless-Controllern. Über einen Spannungsregler wird die Betriebsspannung auf 5V reduziert, um die Hauptplatine und den Servomotor zu versorgen.

Die Kommunikation findet zum Teil über einen DSMX-Fernsteuerempfänger statt, der über die Hauptplatine mit 3,3V versorgt. Dieser ist über UART mit dem Mikrocontroller verbunden und empfängt die Steuerbefehle einer DX-7 Fernbedienung. Über einen weiteren UART-Kanal wird mittels eines Bluetooth-Interface mit der Telemetrie-Software kommuniziert.

Auf dem Mikrocontroller läuft ein modifizierter Quadrocopter-Code in C, welcher an die Eigenschaften und Komponenten des Luftschiffes angepasst wurde.

2.6.2 Das Luftschiff „AIRFISH“

An der Technischen Universität Berlin wurde das Luftschiff „AIRFISH“ entwickelt, dass auf einem neuen, innovativen Antriebskonzept basiert [WÄHMER]. Im Gegensatz zu den klassischen Luftschiffen, die über Propeller ihren Schub generieren, basiert dieses Luftschiff auf dem Prinzip der biologischen Propulsion. Mit Hilfe sogenannter elektroaktiver Polymere (EAP) soll die Muskelkontraktion eines Fisches nachgeahmt werden. Somit soll sich das Luftschiff, ähnlich wie ein Fisch im Wasser, fortbewegen können. Diese künstlichen Muskeln wurden an der Seite des Luftschiffes und als Scharnier für die Heckflosse angebracht. Auch bei der Wahl der Struktur wurde auf die Ähnlichkeit zum Vorbild aus der Natur geachtet. Das Luftschiff gehört durch seinen Kiel zur halbstarren Bauart. An diesem Kiel sind senkrechte Streben angebracht, wodurch das Luftschiff im Querschnitt nicht rund ist, sondern höher als breiter. Dieses Verhältnis beträgt 1,3 : 1. Dadurch erhält das Luftschiff eine fischähnliche Form. Der erste Prototyp hatte eine Länge von 7,57m und eine Höhe von 2,31m.

2.6.3 „Luftffisch N°. 1“

Ein weiteres Projekt der Technischen Universität Berlin ist das Luftschiff „Luftffisch N°. 1“ [BÖHM]. Auch dieses Luftschiff bedient sich einem Vorbild aus der Natur. Pinguine haben einen geringen volumenbezogenen Strömungswiderstand. Ein Luftschiff in einer ähnlichen Form kann so den Luftwiderstand verringern und somit auch den Energiebedarf. Eine Kielkonstruktion, welche das Luftschiff auf der Gesamtlänge von 9,7m durchläuft, macht es zu einem halbstarren Luftschiff. Mit diesem Kiel sind alle weiteren Komponenten verbunden. Die Hülle, Bug- und Heckspitze, Heckflossen X-Ausrichtung und weitere Nutzlasten sind alle über Steck- oder Schraubverbindungen am Kiel befestigt.

Die Steuerung des Luftschiffes erfolgt über vier kreuzförmig angeordnete Propellermotoren am Heck. Diese Motoren können paarweise um 180° gedreht werden. Zur Erhöhung der Manövrierbarkeit befindet sich in der Bugspitze je ein Strahlruder in vertikaler und horizontaler Ausrichtung. Dies sind die einzigen Aktuatoren für die Steuerung, da die Heckflossen keine Ruderflächen besitzen.

An Sensorik besitzt das Luftschiff je drei Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren. Zusätzlich verfügt es noch über ein Magnetometer. Auf das Anbringen einer Gondel wurde verzichtet.

2.6.4 Solarluftschiff „LOTTE“

An der Universität Stuttgart entstand das Solarluftschiff „LOTTE“. Dieses Luftschiff sollte zeigen, dass die Energieversorgung über Photovoltaikanlagen lohnenswert ist, da die Oberfläche des Auftriebskörpers genug Fläche liefert, solche Anlagen betreiben zu können. Auf dem 16m langen Luftschiff mit einem Volumen von 109m³ wurde eine Fläche von 4,68m² mit Solarzellen bedeckt, welche eine maximale Leistung von 700W liefern. Da dieses Luftschiff für den Außenbetrieb konzipiert wurde, musste es ordnungsgemäß zugelassen werden. Es besitzt die Kennung *D-UISD*.

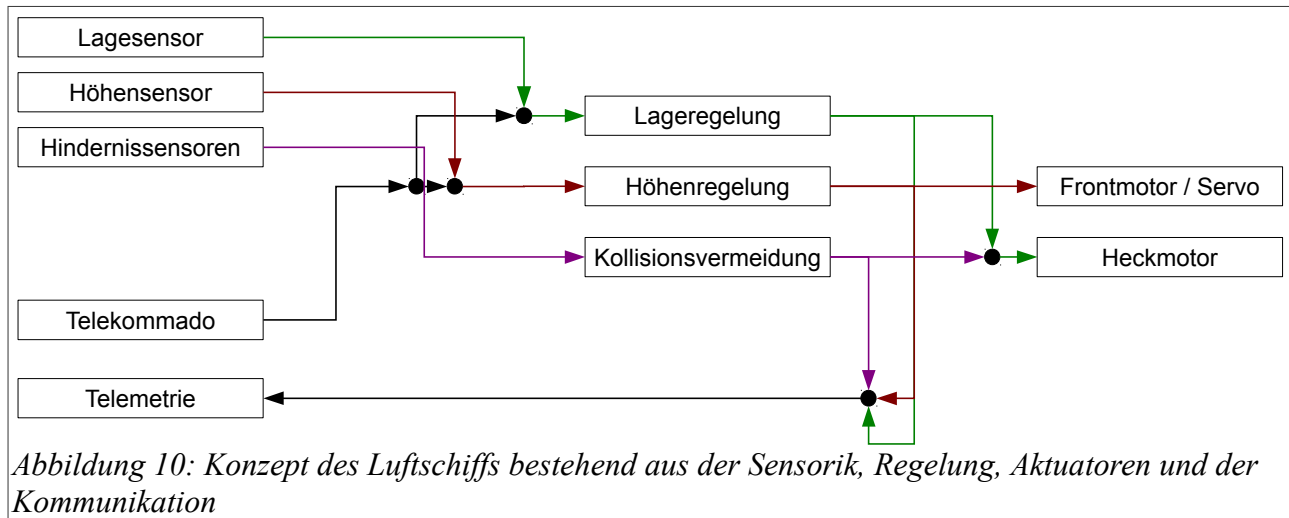
Auch dieses Luftschiff besitzt als halbstarres Luftschiff mehrere Kielstäbe, die den Rumpf durchlaufen. Auf Grund der Größe und der Gewichtsverteilung verfügt LOTTE über zwei Ballonets am Bug und am Heck, die den Innendruck aufrechterhalten.

Als Antrieb besitzt es einen Heckmotor, der über die Quer- und Hochachse neigbar ist. Diese Schubvektorsteuerung liefert in Zusammenarbeit mit den kreuzförmig angeordneten Ruderflächen auch bei geringen Geschwindigkeiten eine hohe Manövrierbarkeit. Durch die Wetterabhängigkeit und die ständig wechselnde Ausrichtung der Solarzellen, kann keine konstante Versorgung der Motoren, Bordelektronik und Nutzlast garantiert werden. Etwaige Leistungsschwankungen müssen

somit über Akkus kompensiert werden. Daher wurden sechs Akkus verbaut, die vor jedem Start vollgeladen werden.

Der Bordcomputer verfügt über einen Fail-Safe-Mode. Über- bzw- unterschreiten die gemessenen Werte bestimmte Toleranzbereiche, verfällt das Luftschiff in diesen Zustand. Gleichzeitig werden die gemessenen Daten an einer Bodenstation überprüft. Im Notfallbetrieb wird der Motor deaktiviert und alle weiteren Steuerelemente auf neutral gestellt. Das Öffnen eines Heliumventils sichert die sanfte Rückkehr zum Boden. [LOTTE]

3. Konzept



Ziel der Arbeit ist die Erweiterung und Optimierung eines bestehenden Luftschiffsystemes. Es wurde ein bestehender Quadcopter-Code, welcher das Betriebssystem RODOS nutzt, als Basis für die Portierung des Luftschiff-Codes in RODOS gewählt, da so die Erweiterung und Einbindung in weitere Projekte vereinfacht wird. Die Lageregelung gilt es zu optimieren. Das Luftschiff ist für den Inneneinsatz konzipiert. Daher benötigt es eine Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung, die jeweils mittels Ultraschallsensoren zu implementieren sind.

3.1 Lageregelung

Die drei Drehratensensoren der IMU liefern nur die Winkelgeschwindigkeit ω , mit der eine Achse gedreht wird. Zur absoluten Lagebestimmung werden aber absolute Winkel φ benötigt. Diese kann man durch zeitliche Integration der Winkelgeschwindigkeit erlangen.

$$\varphi = \int_{t_0}^t \omega \, dt \quad (7)$$

Dadurch werden aber auch etwaige Messfehler mit aufintegriert. Ein Sensordrift entsteht, der mit der Zeit wächst. Dieser kann durch die Datenfusion von Drehraten- und Beschleunigungssensor mittels eines Kalman-Filters kompensiert werden. Die fusionierten Daten fließen dann in die Lageregelung ein und werden dort mit den Soll-Werten verglichen. Regelabweichung können dann mit Motoren beseitigt werden.

In der Yaw-Richtung geschieht dies direkt durch den Heckmotor. Die Roll-Richtung ist auf Grund des tiefen Schwerpunktes, den die Gondel generiert, fast zu vernachlässigen. Zudem lässt sich diese Richtung nur beeinflussen, wenn die Servomotoren den Schubvektor nach unten bzw. nach oben

richten, sodass sich das Luftschiff bei unterschiedlichen Drehzahlen der Motoren um die Roll-Achse dreht. Ein Vorwärtsflug ist bei diesem Manöver nicht möglich. Die Pitch-Richtung kann ebenfalls über diese Motoren beeinflusst werden. Der effektivste Weg ist die Regelung im Vorwärtsflug mit Höhenrudern an den Heckflossen, da so das Drehmoment am größten ist. Solche Aktuatoren stehen jedoch nicht zu Verfügung. Im Vorwärtsflug kann jedoch über Verstellen des Schubvektors eine Veränderung des Pitch-Winkels erreicht werden. Allerdings ist dieses Manöver mit einem möglichen Höhenverlust sowie einer Geschwindigkeitsänderung verbunden. Dennoch lässt sich eine Pitch-Regelung während Roll-Regelung realisieren, indem der Servomotor den Schubvektor der Frontmotoren stets orthogonal zum Boden ausrichtet. Über einen PID-Regler werden Stellwerte für beide Frontmotoren berechnet. Dieser Regler würde einem Höhenregler jedoch stören.

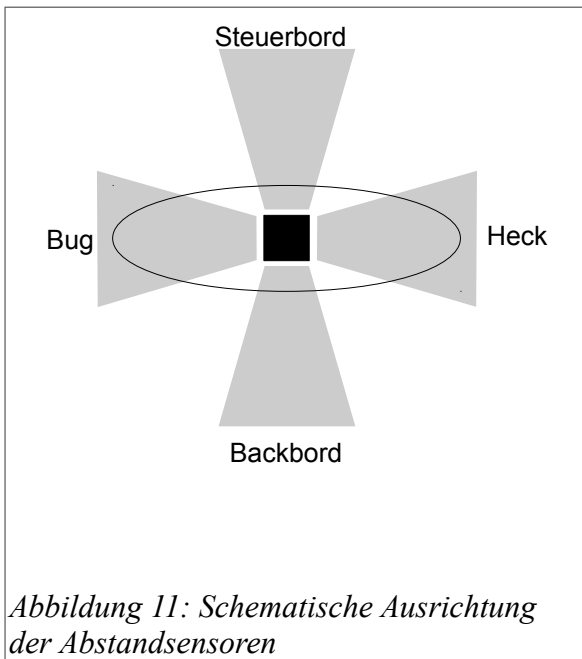
3.2 Höhenregelung

Zur Höhenmessung steht ein Ultraschallsensor zur Verfügung. Dieser eine Sensor ist der Einzige, der den Höhenregler mit Daten versorgt. Diese werden über einen Mittelwertfilter gefiltert, bevor sie in den Höhenregler einfließen.

Es wäre möglich zwei PID-Regler zu verwenden der jeweils das Steigen und das Sinken gesondert betrachtet. Im Steigflug würde, zuzüglich der Auftriebskraft des Traggases, die Schubkraft der Motoren der Erdgravitation entgegenwirken. Der Schubvektor könnte dann im Sinkflug gedreht werden, um so eine schnelleres Erreichen der erwünschten Höhe zu erlangen. Beim Halten der Höhe jedoch würde der Regler ständig zwischen Steig- und Sinkregler wechseln. Da ein Luftschiff ohnehin ein langsames und träges System ist, wird von diesem Konzept abgesehen.

Daher wird ein PID-Regler für den Steig- und Sinkflug verwendet. Dieser Regler berechnet dann einen Stellwert aus der Regelabweichung für die beiden Frontmotoren. Auch auf eine Veränderung des Schubvektors wird verzichtet, da dies beim Halten der Höhe zu Instabilität führen würde durch ständiges Drehen des Servomotors. Daher werden die Motoren zum Abtrieb ausgeschaltet bis die Erdgravitation das Luftschiff hat absinken lassen. Den Motoren ist es zwar möglich ihre Drehrichtung zu ändern, jedoch geschieht dies zu langsam um eine stabile Regelung zu gewährleisten.

3.3 Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung



Dem Luftschiff ist es möglich, sich relativ frei entlang der Yaw-Richtung zu bewegen. Es besteht nur die Gefahr bei solch einem Manöver auf eine Kollision mit dem Bug oder Heck. Weiterhin kann es nur vorwärts bzw. rückwärts fliegen und nicht wie z.B. ein Helikopter nach links und rechts fliegen. Dies macht das Luftschiff unflexibel in der Kollisionsvermeidung. Zudem ist es auf Grund seiner Größe sehr träge. Daher muss ein Hindernis frühzeitig erkannt werden.

Zur Hinderniserkennung werden vier Ultraschallsensoren unterhalb der Gondel angebracht. Zwei Sensoren wurden in Richtung Bug

und Heck ausgerichtet und zwei Richtung Steuerbord und Backbord. Zusammen mit den bekannten Steuerdaten kann das Luftschiff so frühzeitig Hindernisse erkennen. Die Messwerte jeder einzelnen Richtung werden durch einen Mittelwertfilter gefiltert. Wird während des Vorwärtsfluges durch den Bugsensor ein Hindernis erkannt und unterschreitet das Luftschiff eine Mindestdistanz, so wird das Luftschiff über den Yaw-Regler den Kurs ändern. Falls dies nicht möglich ist auf Grund einer möglichen Kollision, da Steuerbord- oder Backbordsensoren ein Hindernis erkannt haben, wird das Luftschiff sich rückwärts bewegen.

4. Implementierung

4.1 Lageregelung

Die Lageregelung basiert auf der Regelung des RODOS-Quadrocoptercode. Dieser wurde dem Bedürfnissen des Luftschiffes angepasst. Die Regelung für die Pitch-Achse wurde aus bereits genannten Gründen entfernt (siehe 3.1 *Lageregelung*). Die Yaw-Regelung ist an den Heckmotor angelegt. Des Weiteren wirkt ein kleiner PID-Regler für die Roll-Achse.

Bei der Implementierung des Yaw-Reglers in das RODOS-System entstanden einige Probleme mit dem I²C-Bus. Falls der I²C-Bus beim Auslesen der IMU mit einem Fehler antwortet, wird der Bus zurückgesetzt und direkt ein zweites Mal gelesen. Der aufgetretene Fehler wird dann, als Debug-Nachricht über UART, der Bodenstation übermittelt. Der Regler kann so mit Daten versorgt werden. Wirkt der Regler nun auf den Heckmotor ein, so brach das gesamte System zusammen und Mikrocontroller musste neu gestartet werden. Die letzten Nachrichten die empfangen wurden waren stets Debug-Nachrichten des I²C-Bus, die auf Fehler beim Auslesen der IMU hinwiesen. Hardwarefehler konnten ausgeschlossen werden. Zudem entstand dieser Fehler nur unter der Verwendung von RODOS. Der Fehler konnte später in der Debug-Funktion des I²C-Busses gefunden werden. Der Motor lief ohne Einschränkung, nachdem diese Funktion deaktiviert wurde. Der P-Anteil wurde so hoch gewählt damit das träge Luftschiff genügend Kraft entwickelt um schnell die Regelabweichung zu überwinden. Dementsprechend benötigt der Regler einen D-Anteil, der das vom P-Anteil erzeugtem Überschwingen verringert. Zweckmäßig erwies sich hier ein D-Wert der ca. $\frac{2}{3}$ vom P-Wert betrug. Der geringe I-Anteil reicht aus um die stetige Regelabweichung verschwinden zu lassen. Beim Testen des Yaw-Reglers konnten folgende Parameter ermittelt werden:

$$P_{yaw} = 700 \quad I_{yaw} = 1,5 \quad D_{yaw} = 450$$

4.2 Einbau der Ultraschallsensoren

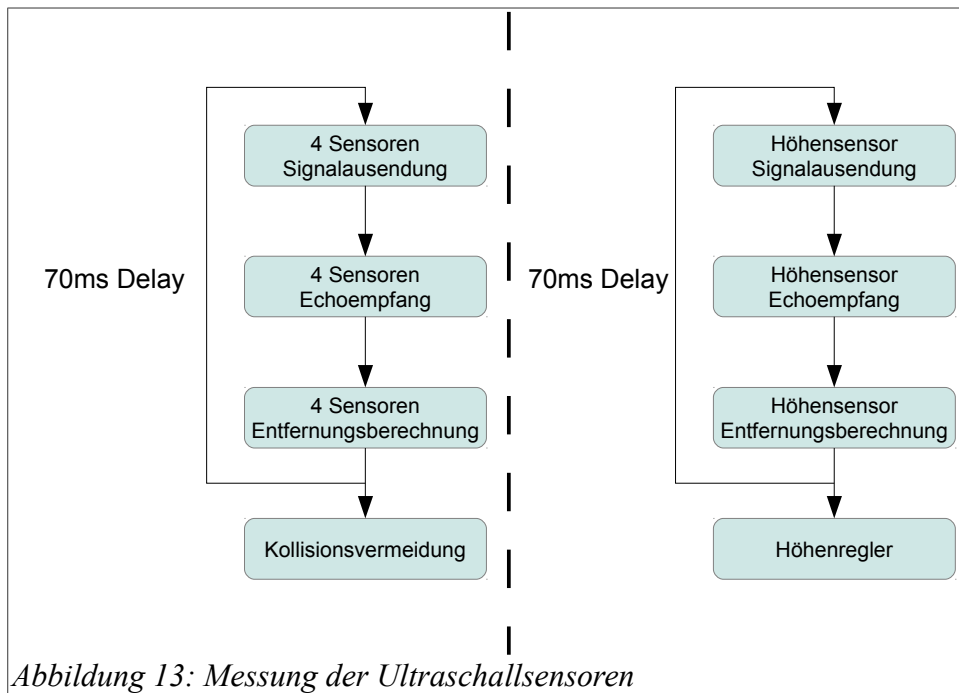


Abbildung 12: Anbringung der Ultraschallsensoren unterhalb der Gondel

Beim Einbau der SRF-10 Ultraschallsensoren wurde darauf geachtet, dass sich ihre Messbereiche nicht überschneiden, um sich nicht gegenseitig zu beeinflussen. Daher wurden die Sensoren für die Hinderniserkennung sowie der Sensor für die Höhenregler unterhalb der Gondel angebracht. (s. *Abbildung 12*) Dort hängen keine Bauteile des Luftschiffes in den Messbereichen der Sensoren. Bei der Hinderniserkennung gilt es zu beachten, dass die Sensoren sich nicht genau in der Mitte des Luftschiffes befinden. Sie sitzen ca. 50cm von der Mitte des Luftschiffes Richtung Bug. Da sich Schall dreidimensional ausbreiten, haben Ultraschallsensoren eine gewisse Keulenbreite (s. *Abbildung 6*). Damit kann es dazu führen, dass die Hindernissensoren bei geringer Höhe den Boden als Hindernis wahrnehmen könnten. Die Effizienz der Hinderniserkennung hängt somit ebenfalls mit der Höhe zusammen.

Da die Ultraschallsensoren mit 5V arbeiten, wurden sie an den I²C-Bus angeschlossen, an dem bereits die beiden Brushless-Controller hängen. Die Spannungsversorgung wird über einen Spannungsregler bereitgestellt, der ebenfalls die Hauptplatine und die Brushless-Controller versorgt.

4.3 Implementierung der Ultraschallsensoren



Bei der Implementierung der Ultraschallsensoren in die Software ist darauf zu achten, dass die Sensoren auf Grund der Echomessung des Signals eine gewisse Zeit für die Messung benötigen. Die Schallgeschwindigkeit ist abhängig vom Luftdruck, der wiederum abhängig von der Temperatur ist. Da das Luftschiff für Inneneinsätze konzipiert ist, wird von einer

Schallgeschwindigkeit von $343 \frac{m}{s}$ bei einer Temperatur von $20^{\circ}C$ ausgegangen. Die verwendeten SRF10 Ultraschallsensoren haben eine maximale Reichweite von 6m. Damit müssen die Schallwellen eine Gesamtstrecke von 12 m zurücklegen. Dies würde eine maximale Messdauer von ca. 35ms bedeuten. Intern wird jedoch die maximale Reichweite des Sensors über einen Timer geregelt. Dieser setzt die maximale Messzeit auf 65ms. Daher wurden den Ultraschallsensoren verschiedene Messbereiche, sodass sie sich nicht gegenseitig beeinflussen können. Die Ultraschallsensoren werden gruppenweise ausgelesen. Die Datenverarbeitung der Hinderniserkennung ist von der Höhenmessung getrennt. So wird die Messung der Hindernissensoren alle 70ms durchgeführt, indem diese gleichzeitig Signale aussenden. Der Höhensensor misst ebenfalls alle 70ms, die Messung ist jedoch um einige Millisekunden verschoben. Dies wird auf diese Weise ausgeführt, da der I²C-Bus, über dem die Sensoren ausgelesen werden, unter RODOS schnell überlastet ist. Somit kann sichergestellt werden, dass der Höhensensor verlässlich arbeiten kann.

4.4 Höhenregelung

Die Höhenregelung verwendet einen SRF10-Sensor und beeinflusst über einen PID-Regler die beiden Frontmotoren. Der Sensor wurde unterhalb der Gondel angebracht. Das garantiert, dass keine Bauteile des Luftschiffes den Sensor abdecken. Die Höhenregelung wurde wie in Abschnitt 3.2 *Höhenregelung* implementiert. Der Sensor wird über den I²C-Bus ausgelesen und über einen Mittelwertfilter gefiltert. Dieser Mittelwertfilter enthält stets die fünf jüngsten gemessenen Höhen. Der daraus gebildete Mittelwert wird der Höhenregelung als Ist-Wert übergeben, welcher mit dem Soll-Wert verglichen wird. Bevor ein PID-Regler einen Stellwert für beide Motoren berechnet, wird sicher gestellt, dass der Schubvektor der Motoren nach unten gerichtet ist. Der entsprechende Stellwinkel wird aus dem Pitch-Winkel den die IMU misst erstellt und dem Servomotor übergeben. Zusätzlich wurde den Motoren ein minimales Gas zugewiesen, sodass das Luftschiff in der Luft schweben kann und die Motoren nicht ausgehen.

Beim Testen des Höhenreglers konnten folgende Reglerparameter ermittelt werden:

$$P_{Höhe} = 15 \quad I_{Höhe} = 0,1 \quad D_{Höhe} = 100$$

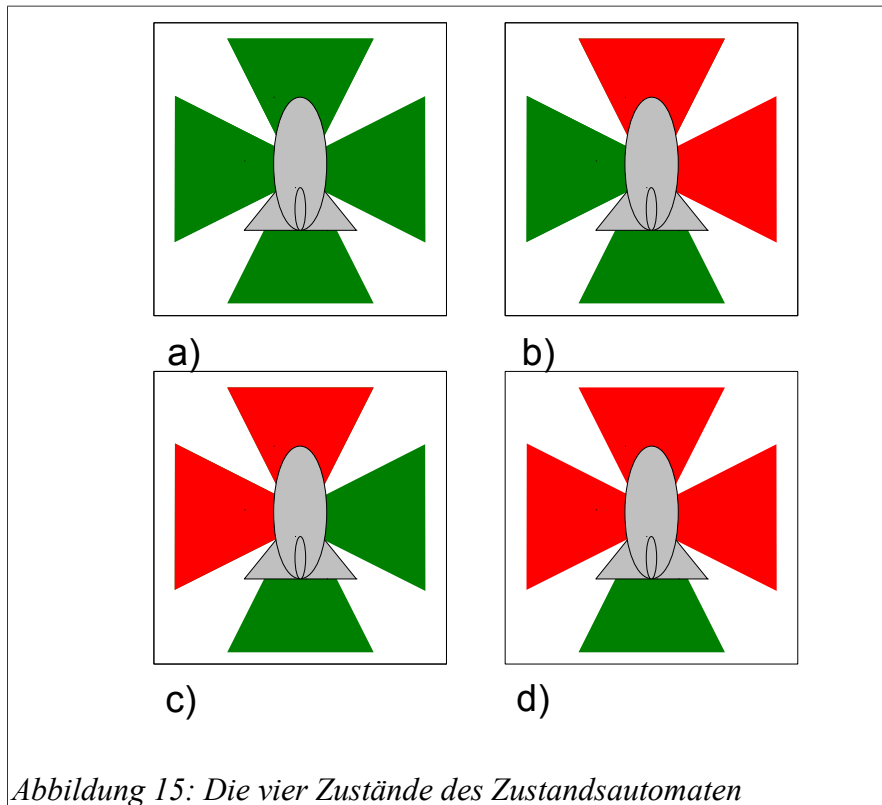
4.5 Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung

Die Sensoren werden ausgelesen und dann werden über einen Zustandsautomat die Daten ausgewertet. Dieser entscheidet, ob die Steuerbefehle ignoriert bzw. soweit verändert werden müssen, um eine Kollision zu vermeiden.

Sie wurde, wie in 3.3 *Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung* beschrieben, implementiert.

Zustandsautomat der Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung		
Zustand	Hindernis erkannt:	Reaktion
a)	$\overline{\text{Bug}}$	Keine Reaktion
b)	$\text{Bug} \vee (\text{Bug} \wedge \text{Steuerbord})$	Yaw-Sollwert - 90°
c)	$\text{Bug} \wedge \text{Backbord}$	Yaw-Sollwert + 90°
d)	$\text{Bug} \wedge \text{Backbord} \wedge \text{Steuerbord} \wedge \overline{\text{Heck}}$	Yaw-Sollwert +180°

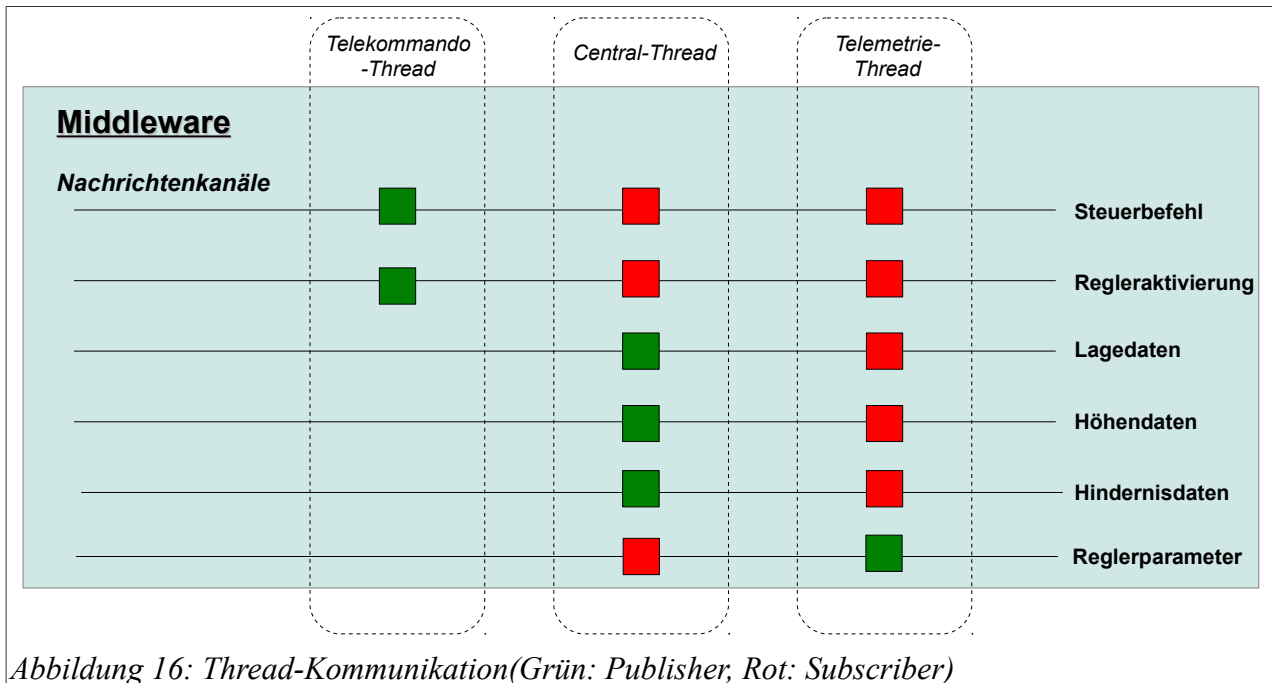
Abbildung 14: Zustandsautomat



Dieser Zustandsautomat betrachtet die Hinderniserkennung während des Vorwärtsflugs. So reagiert der Zustandsautomat erst, falls ein Hindernis in Bugrichtung erkannt wurde. Die Standardreaktion in diesem Fall ist eine Ausweichbewegung nach links um 90° (s. *Abbildung 15b*). Dieses Manöver wird ebenfalls für eine Blockierung der Bug und Steuerbordrichtung ausgeführt. Dazu wird der Yaw-Sollwert überschrieben. Ist diese Richtung ebenfalls blockiert, wird das selbe Manöver nach rechts ausgeführt (s. *Abbildung 15c*). Wurde das Luftschiff in eine Sackgasse navigiert, wird sich das Luftschiff um 180° drehen (s. *Abbildung 15d*).

Da das Luftschiff eine Gesamtlänge von 3m hat und somit bei einer Änderung der Yaw-Richtung eine Kreisbahn mit einem Radius von 1,5m beschreitet, wird ein Hindernis als erkannt angesehen, wenn es eine Mindestdistanz von 2,5m unterschreitet. Das Luftschiff hat damit 1m Raum um die benötigten Manöver durchzuführen.

4.5 Software



Die Kommunikation der Threads erfolgt wie in *Abbildung 16* über die Topics (Nachrichtenkanäle), die die Middleware zur Verfügung stellt. Ein Topic besitzt je einen Publisher („Veröffentlicher“) und kann mehrere Subscriber („Abonnenten“) haben. Dazu verfügt das System über drei Threads. Der Telekommando-Thread veröffentlicht so neue Steuerdaten über Topics, die er der Funkfernbedienung entnimmt. Der Central-Thread abonniert diesen Topic um die Steuerbefehle mittels der Lage- bzw. Höhenregelung umzusetzen. Ebenfalls aus Debug-Gründen abonniert der Telemetrie-Thread diesen Topic. Zur Übermittlung der Lage des Luftschiffes werden mehrere Topics verwendet. Die Daten der Ultraschallsensoren werden getrennt als Höhen- und Hindernisdaten mittels eigener Topics übermittelt. Der Datentransfer für Lage, Höhe und Hinderniserkennung findet nur zwischen dem Central-Thread und dem Telemetrie-Thread statt, mit dem Central-Thread als Publisher und dem Telemetrie-Thread als Subscriber.

Während der Entwicklung wurde ein weiterer Topic genutzt, um die PID-Parameter der Regler festzulegen. Dieser wurde nur zu Debug-Zwecken implementiert und hat einen Publisher im Telemetrie-Thread, da dieser die Verbindung zur Bodenstation darstellt.

4.6 Reglersynchronisation

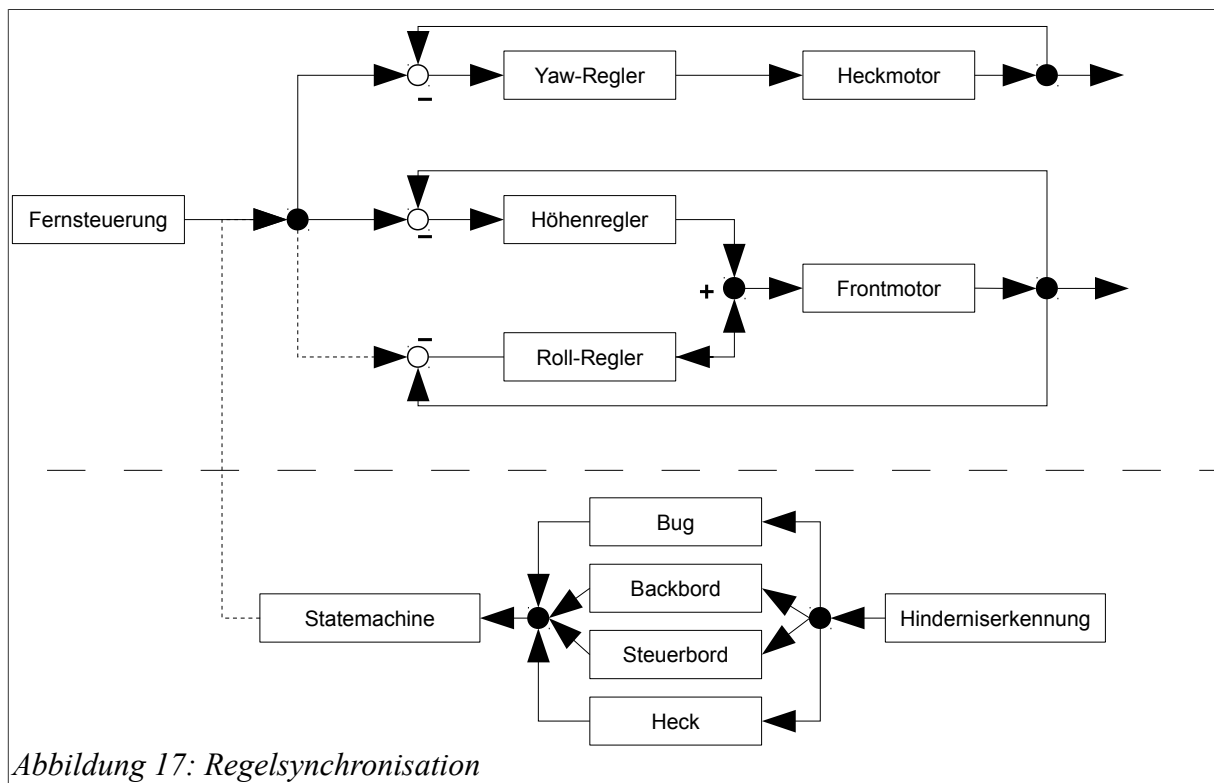


Abbildung 17: Reglersynchronisation

Damit das Luftschiff autonom fliegen kann, müssen verschiedene Regler zusammen arbeiten und dürfen sich dabei nicht behindern, um das Luftschiff stabil zu halten. Dies sollen drei Regler gewährleisten, welche simultan arbeiten und durch die Fernbedienung neue Führungsgrößen erhalten.

Der Yaw-Regler arbeitet weitestgehend selbständig, da dieser der einzige Regler ist, der den Heckmotor beeinflusst. Die beiden Frontmotoren hingegen sind gleichzeitig für das Halten der Höhe und für das Halten der Stabilität entlang der Roll-Achse zuständig. Daher beeinflussen zeitgleich zwei Regler diese Motoren, welche jeweils eigene Stellwerte berechnen. Die beiden Stellwerte werden dann addiert bzw. subtrahiert und den Motoren übergeben. Bei der Implementierung dieser Regler wurde darauf geachtet, dass sich diese Regler nicht gegenseitig behindern. Es ist nicht vorgesehen, dass der Roll-Regler Führungsgrößen während des Fluges von der Fernbedienung empfängt, da das Luftschiff entlang dieser Achse möglichst auf der Nulllage gehalten werden soll. Für ein Luftschiff gilt es diese weitestgehend starr einzuhalten. Jedoch wird dies zur Entwicklung des Reglers geduldet.

Ein Zustandsautomat wertet im Hintergrund die Daten der Hinderniserkennung aus. Falls ein Hindernis in einer der vier Richtungen erkannt wurde, überschreibt gegebenenfalls der Zustandsautomat die Steuerbefehle der Fernbedienung.

5. Evaluierung

5.1 Yaw-Regler

Zum Testen des Yaw-Reglers wurde das Luftschiff mit Luft gefüllt und an einem Seil an der Decke aufgehängt. Dabei wurde darauf geachtet, dass das Seil sich am Schwerpunkt des Luftschiffes befindet, um es auszubalancieren(s. *Abbildung 18*). Dadurch konnte es sich frei in der Yaw-Richtung bewegen. Nachdem das Luftschiff in Ruhestellung gebracht wurde, wurde ein Sollwert durch ein Telemetrieprogramm übermittelt und beobachtet, wie der Regler reagiert. In diesem Programm konnte das Reglerverhalten beobachtet und dokumentiert werden. Zur Kalibrierung der IMU wurde die Gondel auf einem Tisch gehalten um bereits hier mögliche Fehlerquellen zu eliminieren. Danach erst wurde die Gondel am Luftschiff angebracht. Zur Messung des Yaw-Winkels wurde die IMU des Luftschiffes genutzt, die auch für die Regelung die benötigten Daten liefert. Der Regler wurde nun getestet, indem man ihm 7s nach Beginn der Messung einen neuen Sollwinkel von 40° übermittelte. Die Aufgabe bestand darin, diesen Regler zu optimieren, was in Anbetracht der Daten gelang. In *Abbildung 19* ist zu sehen, dass der Regler kurz überschwingt, aber bereits beim Zurückschwingen den Sollwert halten kann.

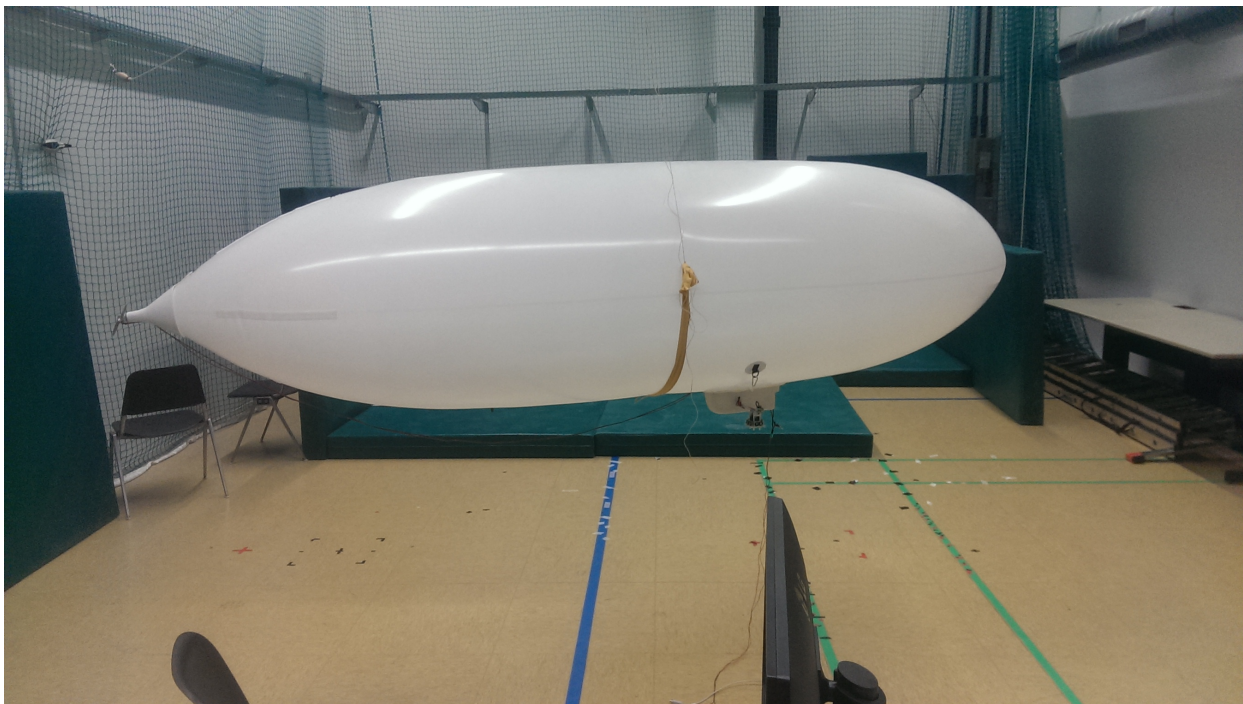
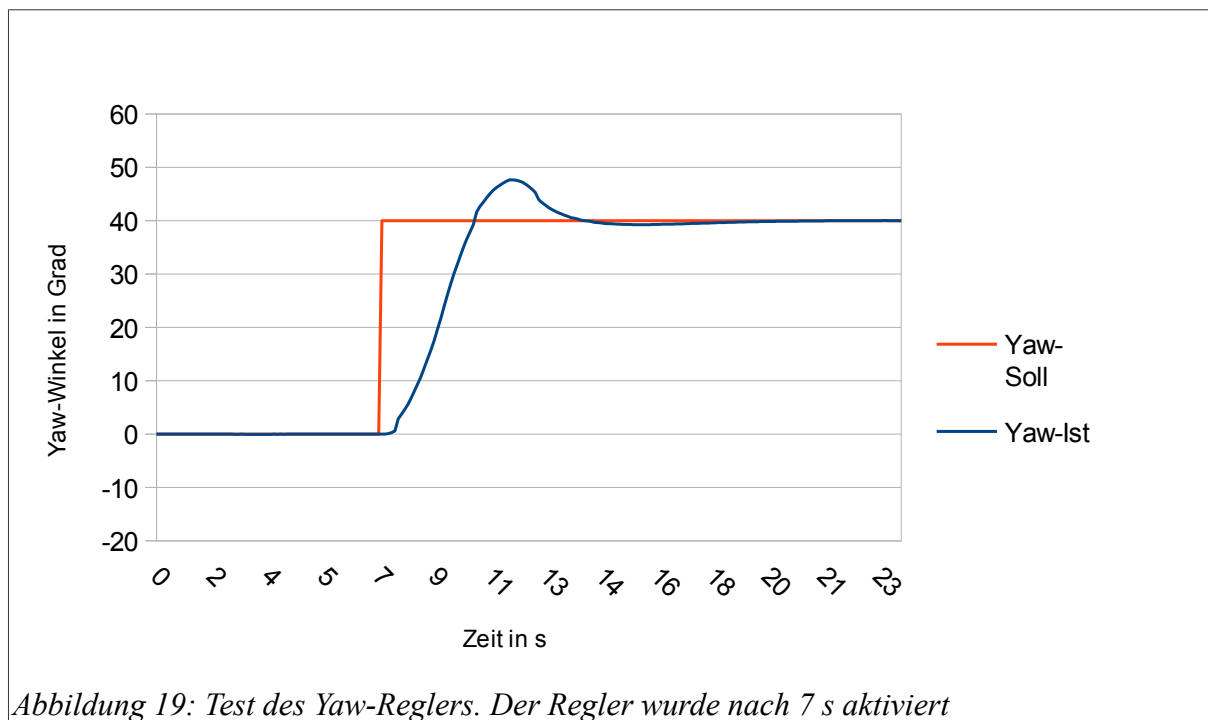


Abbildung 18: Testaufbau des Yaw-Reglers



5.2 Höhenregler

Für den Test des Höhenreglers wurde der Auftriebskörper mit so viel Helium gefüllt, dass das Luftschiff einige Centimeter vom Boden abhob. Das Luftschiff hielt sich so selbst in Waage und keine Auslenkungen in Pitch- oder Roll-Richtung konnten beobachtet werden.

Während der Messung des Reglers war parallel der bereits entwickelte Yaw-Regler aktiviert um das Luftschiff entlang der Yaw-Achse stabil zu halten. Gemessen wurde der Höhenregler im Steig- und Sinkflug, da bei diesen beiden Manövern unterschiedliches Verhalten zu beobachten war. Die Messung wurde ähnlich wie bei der Yaw-Regelung durchgeführt. Nachdem das Luftschiff in eine stabile Ausgangslage gebracht wurde, wurde dem Höhenregler mittels der Telemetrie-Software ein neuer Soll-Wert übermittelt.

Im Sinkflug (s. *Abbildung 20*) konnte der erwünschte Soll-Wert nach ca. 10s erreicht werden. Das Luftschiff wurde während dieser Messung von einer Höhe von 1,1m auf 0,8m abgesenkt.

Im Steigflug (s. *Abbildung 21*) verhielt sich der Regler instabiler als im Sinkflug. Das Luftschiff erreichte den Soll-Wert erst nach ca. 15s und schwang währenddessen bis zu 0,15m über. Die stetige Regelabweichung von 2-3cm entsteht dadurch, dass nur ein Sensor benutzt wurde. Bei Höhenänderung begann das Luftschiff sich leicht um die Pitch-Achse zu neigen. Dadurch wurde ebenfalls der Ultraschallsensor schräg gestellt und die Höhenangaben begangen zu schwanken. Zudem ist eine erfolgreiche Höhenregelung vom Füllstand des Auftriebskörpers abhängig. Eine zu hoher bzw. zu geringer Innendruck behindern den Steig- oder Sinkflug.

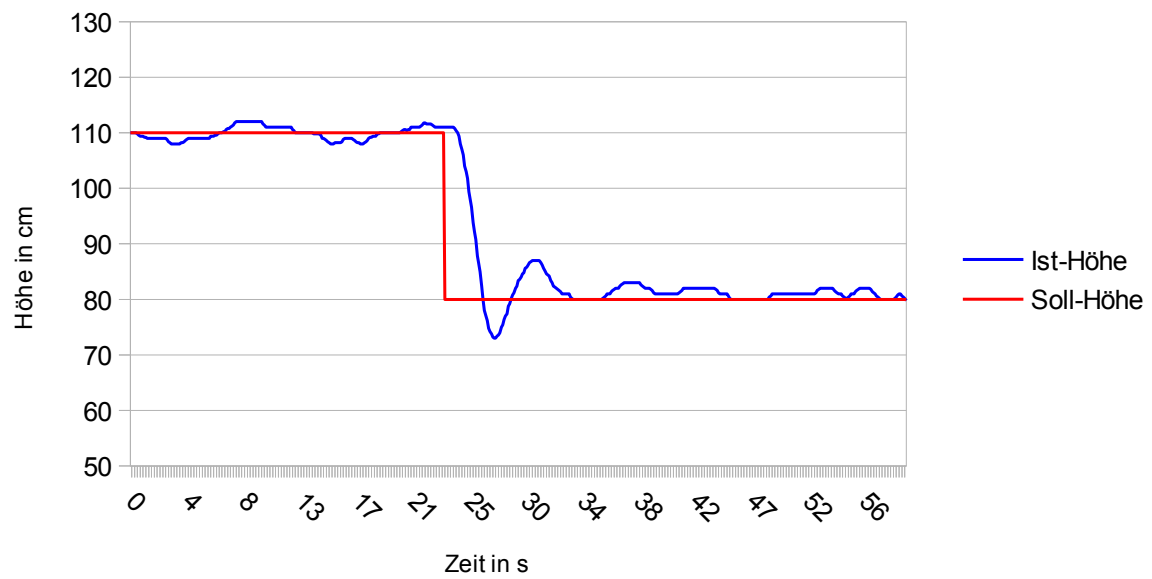


Abbildung 20: Höhenregelung im Sinkflug

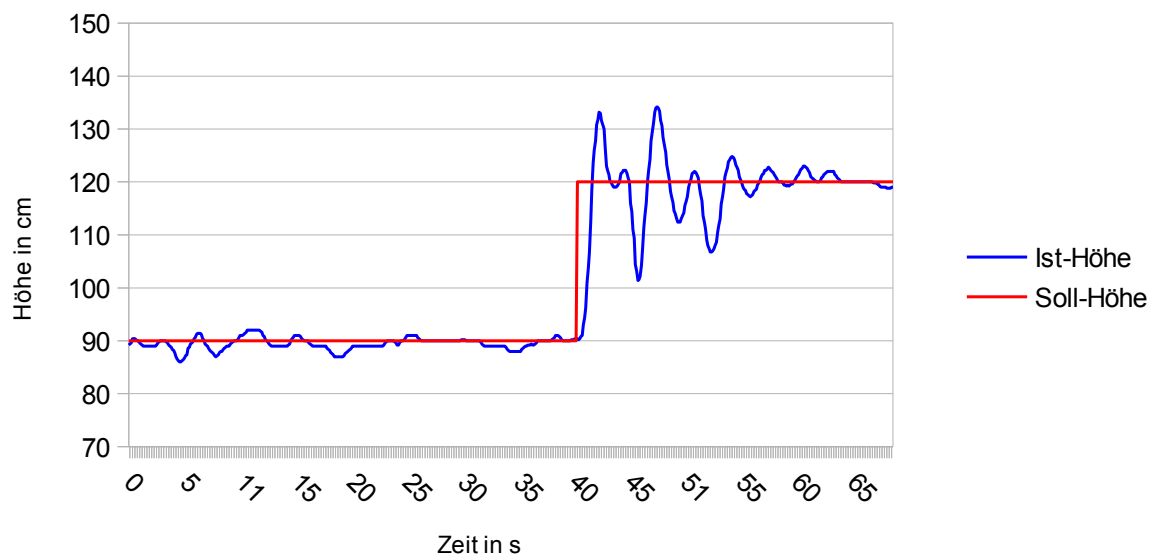


Abbildung 21: Höhenregler im Steigflug

6. Diskussion und Ausblick

6.1 Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit war die Weiterentwicklung eines autonomen Prallluftschiff. Dazu wurde das bestehende System in RODOS portiert. Dabei traten einige Probleme zwischen dem I²C-Bus und RODOS auf. So fiel das System aus als der Heckmotor über ein PWM-Signal angesteuert wurde, auf Grund eines I²C-Fehlers der IMU. Dieser Fehler konnte behoben werden durch Deaktivierung der Debug-Nachrichten des I²C-Buses. Jedoch verlief die Thread-Kommunikation tadellos, sodass die Verständigung mit der Bodenstation mittels der Telemetrie-Software aufrecht erhalten werden konnte.

Nichtdestotrotz konnte die Yaw-Regelung mittels des Heckmotors optimiert werden, jedoch war der auftretende Sensordrift nach einigen Minuten Flugzeit bereits sehr gut zu beobachten und das Luftschiff bewegte sich langsam aber stetig um die Yaw-Achse.

Die Höhenregelung konnte realisiert werden, jedoch bietet diese Optimierungspotenzial. Durch die große Trägheit des Luftschiffes erwiesen sich kleinere Höhenänderungen als geeigneter, da die Regelung bei großen Änderungen instabil um die Pitch-Achse wurde. Zudem schwankte der Höhenwert stets um einige Centimeter, wobei das Luftschiff jedoch stabil in der Luft schwebte. Die Kollisionsvermeidung konnte nicht mehr getestet werden.

6.2 Ausblick

Das Luftschiff bietet noch sehr viel Entwicklungspotenzial. Es benötigt eine Optimierung des Höhenreglers durch weitere Sensorik, wie z.B. Infrarotsensoren oder Luftdrucksensoren, da die Höhenangaben die der Höhenregelung übergeben wurden sehr geschwankt haben. Diese zusätzliche Sensorik könnte durch eine Sensorfusion, mit dem bestehenden Ultraschallsensor, mittels einem gewichteten Filter präzisere Werte liefern. Die Instabilität der Pitch-Achse, die die Höhenregelung erzeugt, könnte durch einen weiteren Motor am Heck, dessen Schubvektor senkrecht gerichtet ist, beseitigt werden. Zudem wäre eine Kompensation des Sensordriftes der Yaw-Achse durch einen Magnetfeldsensor denkbar.

Gleichwohl ist bei der Erweiterung des Luftschiffs mit zusätzlicher Hardware darauf zu achten, dass das Luftschiff ein Maximalgewicht nicht überschreitet. Daher ist auch die Entwicklung eines neuem größeren Luftschiff, das auch für den Außeneinsatz geeignet wäre, denkbar.

Interessant wäre die Implementierung eines Positionsreglers sowie einer Pfadverfolgung, um das Luftschiff als Bezugspunkt oder „Mutterschiff“ von Quadrocopterschwärmen zu nutzen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kräfteverhältnis eines Quaders in einem Fluid.....	2
Abbildung 2: Geschwindigkeit und Reynolds-Zahlen verschiedener Flugobjekte (Quelle: Wikipedia).....	3
Abbildung 3: Traditionelle Konfiguration eines Luftschiffes.....	5
Abbildung 4: Verschiedene Formen von Hybridluftschiffen am Beispiel: Universität Bremen (a) und LEMV(b).....	8
Abbildung 5: Funktionsweise eines Beschleunigungssensor a) und eines Gyroskopes b)	8
Abbildung 6: Messbereich eines Ultraschallsensors (SRF10).....	10
Abbildung 7: Funktionsweise eines Infrarotsensors.....	11
Abbildung 8: PID-Regler im Standardregelkreis.....	12
Abbildung 9: Rodos Aufbau.....	15
Abbildung 10: Konzept des Luftschiffs bestehend aus der Sensorik, Regelung, Aktuatoren und der Kommunikation.....	20
Abbildung 11: Schematische Ausrichtung der Abstandssensoren.....	22
Abbildung 12: Anbringung der Ultraschallsensoren unterhalb der Gondel.....	24
Abbildung 13: Messung der Ultraschallsensoren.....	25
Abbildung 14: Zustandsautomat.....	26
Abbildung 15: Die vier Zustände des Zustandsautomaten.....	27
Abbildung 16: Thread-Kommunikation(Grün: Publisher, Rot: Subscriber).....	28
Abbildung 17: Regelsynchronisation.....	29
Abbildung 18: Testaufbau des Yaw-Reglers.....	30
Abbildung 19: Test des Yaw-Reglers. Der Regler wurde nach 7 s aktiviert.....	31
Abbildung 20: Höhenregelung im Sinkflug.....	32
Abbildung 21: Höhenregler im Steigflug.....	32

Literaturverzeichnis

- HALLIDAY: Halliday, David; Halliday Physik Bachelor Edition; 2007; 978-3-527-40746-0
- GERTHSEN: Meschede, Dieter; Gerthsen Physik 21. Auflage; 2002; 3-540-42024-X
- GADIR: Gadir, Yousif Abdel; Ballone und Luftschiffe; 2001; Technischer Universität Berlin; http://www.isoluftschiff.de/deutsch/links/Ballone_und_Luftschiffe_Yousif.pdf
- HYBRID BREMEN: Universität Bremen; Lehrprojekt Hybridluftschiff; 2008; Universität Bremen; <http://www.luftschiff.uni-bremen.de/wordpress/> abgerufen am 23.2.2014
- LUNZE: Lunze, Jan; Regelungstechnik 1; 2010; 978-3-642-13807-2
- MONTENEGRO: Montenegro, Sergio; RODOS; 2008; DLR; <http://www.dlr.de/irs/Portaldata/46/Resources/dokumente/produkte/rodos.pdf>
- WISCHERT: Wischert, Johannes; Entwicklung eines autonomen Prallluftschiffes; 2013; Universität Würzburg
- WÄHMER: Wähmer, Martin; Entwurf und Auslegung von dynamisch mittels Biegedrehschlagflossen angetriebenen Luftschiffen; 2010; Technische Universität Berlin; <http://www.aerarium.de/diplom-MW.pdf>
- BÖHM: Böhm, Florian; Erfahrung mit einem schubvektorgesteuerten Luftschiff; 1999; Technischer Universität Berlin; http://www.aerarium.de/web_alt/Luftffisch-Web/Luftffisch-Webseiten/ns/luftffisch.pdf
- LOTTE: Kungl, Peter; Solarluftschiff LOTTE Technische Beschreibung; 2002; Universität Stuttgart; <http://web.archive.org/web/20070221145809/http://www.isd.uni-stuttgart.de/lotte/infodownload/daten.pdf>