

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Fakultät für Mathematik und Informatik



Informationstechnik für Luft- und Raumfahrt

Lehrstuhl für Informatik 8

Prof. Dr. Sergio Montenegro



Bachelorarbeit

Implementierung und Evaluierung einer Höhenregelung für einen Quadrocopter

Vorgelegt von

Julian Rothe

Matr.-Nr.: 1710128

Prüfer: Prof. Dr. Sergio Montenegro

Betreuende wissenschaftliche Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Nils Gageik

Würzburg, 24. 07. 2012

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit einschließlich aller beigefügter 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, 24. 07. 2012

Julian Rothe

Aufgabenstellung

Die Fortschritte im Bereich Sensorik und Mikrotechnik ermöglichen heutzutage den kostengünstigen Bau kleiner unbemannter Luftfahrzeuge (UAV, unmanned aerial vehicle, Drohne) wie Quadrocopter. Die Forschung und Entwicklung dieser Systeme wurde in den letzten Jahren aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten stark vorangetrieben. Wenngleich im Bereich UAV viel geforscht wurde, ist das Thema Autonomes Flugobjekt längst noch nicht vollständig behandelt. Insbesondere der Indoorbetrieb ist aufgrund fehlender absoluter Positionsstützung durch GPS problematisch. Der Aufbau eines eigenen autonomen Systems wird daher am Lehrstuhl Aerospace Information Technology der Uni Würzburg erforscht und erprobt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist ein System zur Höhenregelung zu entwickeln.

Hauptaugenmerk dieser Arbeit ist die Fusion von Ultraschall-, Infrarot und Luftdrucksensoren zur Bestimmung der relativen Flughöhe über Boden mit dem Ziel eine vorgegebene Höhe zu halten sowie automatisch zu starten und zu landen. Teil der Arbeit ist die treibermäßige Anbindung der Sensoren sowie die Datenfusion. Darüber hinaus ist eine Regelung zu implementieren und parametrisieren. Schließlich sind das Gesamtsystem sowie die einzelnen Sensoren umfangreich zu evaluieren. Zur Aufgabe gehört eine ausführliche Dokumentation der Software.

Aufgabenstellung (Stichpunktartig):

- Treiber Luftdruck, Infrarot
- Datenfusion Ultraschall, Luftdruck, Infrarot
- Höhenregelung: PID Parametrisierung
- Landeregelung
- Dokumentation

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Implementierung einer Start-, Lande- und Höhenregelung für einen Quadrocopter betrachtet. Die Konzentration lag besonders darauf, dass das System stabil und fehlerfrei funktioniert.

Da der Copter seine Sensoren on Board mit sich führt und keine Werte von außen erhält, werden die Sensorarten **Infrarot**, **Ultraschall**, **Luftdruck** und **Beschleunigung** verwendet, um eine fusionierte Höhe zu erlangen. Die implementierte Sensorfusion besteht aus drei Phasen. Zuerst werden die Fehler der Sensordaten durch verschiedene Filter kompensiert, um diese verwendbar zu machen. Anschließend werden die 2 Infrarot-Sensoren in Abhängigkeit von ihren Bereichen fusioniert. Zum Schluss folgt die eigentliche Sensorfusion, in der ein "*weighting filter*" verwendet wird, um die Sensordaten zu fusionieren. Bei der Gewichtung nutzt die Fusion hierfür außer den aktuellen Werten die Historie der Sensorabweichungen.

Die fusionierte Höhe wird in der entwickelten Höhenregelung verwendet, um die Höhe zu halten, da dieses später völlig autonom funktionieren soll. Somit wird ein PID-Regler verwendet, dessen Parameter sorgfältig gewählt wurden. Im Rahmen der Höhenregelung wird zusätzlich eine Lande- und Startregelung implementiert, welche beide den existierenden Höhenregler verwenden.

In der abschließenden Evaluierung ist es ein wesentlicher Aspekt festzustellen, welche Vor- und Nachteile die Sensorarten Infrarot und Ultraschall jeweils haben. Hierfür werden mehrere Messungen bei verschiedenen Umweltbedingungen vorgenommen und ausgewertet. Außerdem wurde die vorher konzipierte Anordnung der Infrarot-Sensoren genau betrachtet. Zuletzt werden die Regelungen und das vollständig System evaluiert. Hierbei zeigen die Diagramme, dass ein Ergebnis erreicht wurde, welches den Anforderungen entspricht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	7
2.1	Prinzip einer Höhenregelung.....	7
2.2	PID-Regler.....	8
2.3	Sensorik.....	9
2.3.1	Infrarot.....	9
2.3.2	Ultraschall	11
2.3.3	Drucksensoren.....	12
2.3.4	Alternative Sensoren.....	13
3	Konzept.....	15
3.1	Überblick.....	15
3.2	Gesamtkonzept.....	15
3.3	Einbau der Sensorik.....	17
3.4	Sensorfusion.....	19
3.5	Regelung.....	21
3.5.1	Höhenregelung.....	21
3.5.2	Start- und Landeregelung.....	22
4	Implementierung.....	25
4.1	Sensorik.....	25
4.1.1	Infrarot.....	25
4.1.2	Luftdruck.....	27
4.2	Sensorfusion.....	29
4.3	Regelung.....	32
4.3.1	Höhenregelung.....	32
4.3.2	Landeregelung.....	33
4.3.3	Festlegung der Remotefunktionen.....	34
5	Evaluierung.....	36
5.1	Anordnung der Sensoren.....	36
5.2	Einfluss der Umwelt auf Ultraschall und Infrarot.....	36
5.2.1	Rauch.....	37
5.2.2	Mensch.....	38
5.2.3	Schaumstoff.....	39
5.2.4	Sonneneinstrahlung.....	40
5.2.5	Wasser.....	40
5.3	Sensorfusion.....	41
5.4	Höhenregler.....	43
5.5	Landeregelung.....	45
5.6	Treppenflug.....	48
6	Diskussion und Ausblick.....	49
7	Literaturverzeichnis.....	51
8	Abbildungsverzeichnis.....	52
9	Anhang.....	54
9.1	Funktionsweise Quadrocopter.....	54
9.2	Anordnung der Sensoren.....	55
9.2.1	Versuchsaufbau.....	55
9.2.2	Ungestörter Fall.....	55
9.2.3	Nebeneinander.....	56
9.2.4	Gekreuzt.....	57
9.2.5	Übereinander.....	58

1 Einleitung

Heutzutage werden immer mehr Prozesse in unserer Umwelt durch Roboter gesteuert, da diese viele Vorteile gegenüber dem menschlichen Vorgehen besitzen. Hierbei ist vor allem zu erwähnen, dass Roboter in Gefahrensituationen problemlos eingesetzt werden können. Dabei ist die Autonomie bei der Steuerung von Robotern in den letzten Jahren in den Mittelpunkt der Forschung gerückt. Hierbei geht es hauptsächlich darum, dass sich der Roboter ohne äußere Einwirkung durch einen Raum bewegen und diesen beispielsweise nach bestimmten Objekten absuchen kann.

Im speziellen Fall der Flugdrohne, auch UAV (unmanned aerial vehical) genannt, können hierbei alle 3 Raumrichtungen benutzt werden, um zur gewünschten Fluglage zu gelangen. Dies ermöglicht sehr weit gefächerte Einsatzmöglichkeiten. An der Julius-Maximilians Universität Würzburg am Lehrstuhl Informatik VIII wird an dem Projekt mit dem Namen *AqopterI8* geforscht. Hierbei soll ein Indoorquadrocopter entwickelt werden, der völlig autonom in Gebäuden fliegen und diese erkunden kann. *"Der AQopter soll in die Lage versetzt werden, einen Raum autonom, trotz Rauch, Dunkelheit und Hindernissen, zu kartografieren und Lagepläne „on the fly“ zu erstellen."* [AQI8]

Eine grundlegende Eigenschaft für einen autonomen Flug ist somit, dass die Drohne eine gewünschte Höhe hält, jederzeit landen und auch wieder starten kann. In dieser Arbeit wird eine Höhen-, Start und Landeregelung für ein bereits vorhandenes System eines Indoorquadrocopters entwickelt. Hierbei soll besonders auf die Sicherheit und Stabilität der Regelungen Wert gelegt werden, da das Einsatzgebiet der Quadrocopter später im autonomen Gebäudeflug liegt. Das Thema der Höhenregelung bei Quadrocoptern wurde zwar schon öfters in wissenschaftlichen Arbeiten behandelt, jedoch werden hierbei meist Hilfsmittel wie z.B. Kameras (siehe auch [MeJ]) verwendet. Dies ist für das entwickelte System nicht möglich, deswegen wurde die gesamte Sensorik on Board verbaut wurde.

Aufgrund der verschiedenen Einsatzgebiete des Quadrocopters, reicht es allerdings nicht aus, sich auf eine Sensorart zu beschränken, da jede Sensorart Vor- und Nachteile hat. Nur durch die Fusion von mehreren Sensorwerten kann gewährleistet werden, dass jede Oberfläche erkannt wird. Deswegen wurden in dieser Arbeit besonders auf die Art der Sensoren geachtet, die verwendet werden und anschließend betrachtet, wie eine intelligente Sensorfusion in jeder Situation gute Werte liefert.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Prinzip einer Höhenregelung

Das System auf dem später die Regelungen implementiert werden sollen, ist darauf ausgelegt, einen autonomen Flug in Gebäuden durchzuführen, die vorher nicht erkundet werden können. Deshalb wurde eine gut eingestellte Höhenregelung für einen Quadrocopter entwickelt, da die Höhe nicht von außen (beispielsweise durch eine Fernbedienung) kontrolliert werden kann. Das Hauptaugenmerk liegt aufgrund der vorgegebenen Umwelt des Gebäudeflugs nicht auf der Schnelligkeit, sondern auf der Sicherheit und Stabilität des Reglers.

Die größte Schwierigkeit bei speziell dieser Regelung ist, dass nur nach oben mit einer einstellbaren Kraft gearbeitet werden kann. Die Sinkgeschwindigkeit kann nur über Reduzierung der noch oben wirkenden Kraft eingestellt werden.

Die Rotoren wirken der natürlichen Schwerkraft entgegen, indem die Drehzahlen des Quadrocopters geregelt werden. Hierbei gilt folgendes physikalisches System.

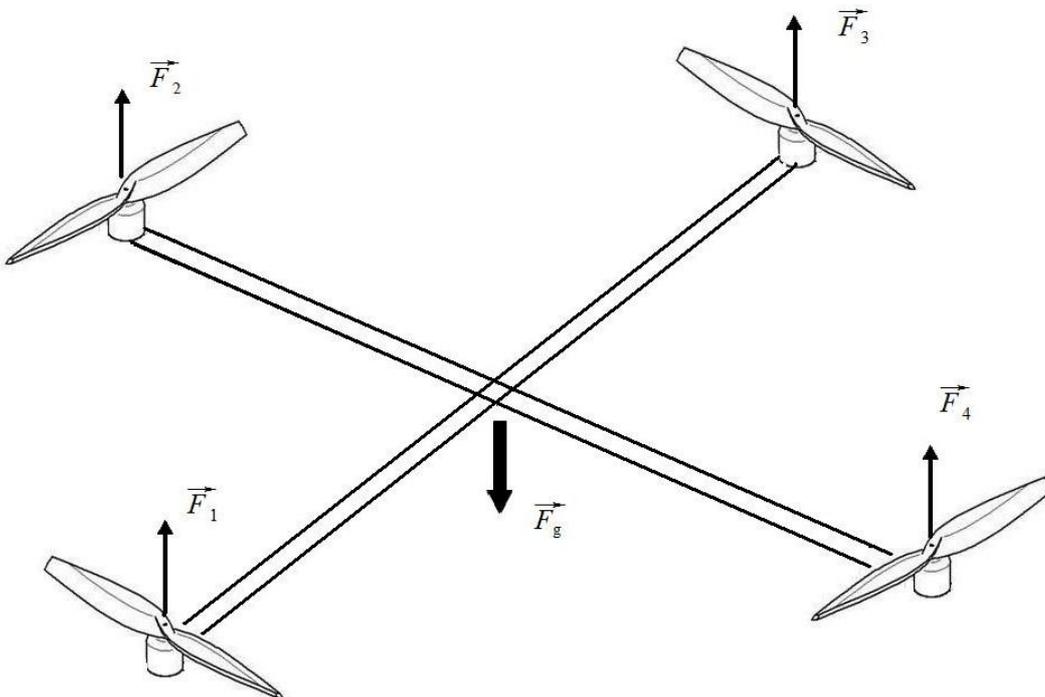


Abbildung 1: Physikalisches Kräftesystem

Weiterhin gilt für die Gewichtskraft, welche den Copter zum Boden zieht $\vec{F}_g = m \cdot g$

Somit muss im idealen Gleichgewichtsfall jeder der Motoren eine Kraft $\vec{F}_n = \frac{1}{4} \cdot \vec{F}_g$

aufbringen.

An den Formeln ist bereits zu erkennen, dass der Integrale Anteil direkt proportional zum Gewicht des Quadrocopters ist, falls für die Regelung ein PID-Regler eingesetzt wird.

Im realen Fall müssen allerdings noch zusätzliche Störfaktoren beachtet werden, wie z.B. die von den Rotoren selbst erzeugten Luftverwirbelungen. Außerdem muss bedacht werden, dass die Lageregelung den Quadrocopter kurzzeitig schräg stellen könnte. Dies hätte zur Folge, dass die Schubvektoren der Rotoren nicht mehr parallel zur Gewichtskraft verlaufen würden, sondern an Wirkung verlieren.

2.2 PID-Regler

Weiterhin muss zum Verständnis der Regelungen im System gesondert auf den PID-Regler eingegangen werden. [GDR01]

- Der proportionale Anteil dient dabei als reiner Verstärker des Eingangswertes und liefert eine kontinuierliche Stellgröße. Bei zu geringen P-Anteil reagiert das System somit zu langsam, bei zu hohem Anteil überschwingt das System.
- Der integrale Anteil liefert einen additiven Beitrag, der eine dauerhafte Regelabweichung (Offset) korrigiert. Wenn die Regelung ein Offset besitzt, so ist der I-Anteil zu klein gewählt, allerdings regt der integrale Anteil das System zum Schwingen an, weswegen er nicht zu groß gewählt werden darf.
- Der differentiale Anteil reagiert lediglich auf die Veränderung des Eingangssignal. Somit gilt er auch als dämpfender Anteil, der die Regelung langsamer und stabiler macht. Bei zu großem D-Anteil fängt das System an zu schwingen.

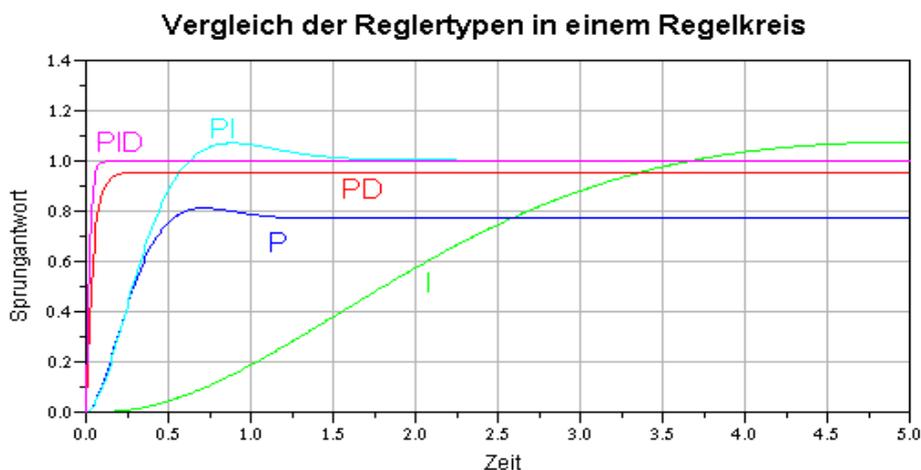


Abbildung 2: PID-Regler - Vergleich

2.3 Sensorik

Um den Höhen- bzw. Landeregler zu benutzen, muss zu jedem Zeitpunkt bekannt sein, auf welcher Höhe sich der Quadrocopter befindet. Diese Distanz lässt sich über verschiedene Sensorarten auslesen. Hierbei stehen besonders Infrarot-, Ultraschall-, und Luftdrucksensoren im Vordergrund. Allerdings gibt es noch weitere Sensoren. [AutS00]

Es reicht jedoch nicht, nur eine Sensorart zu verwenden, da die verschiedenen Sensorarten auch verschiedene Nachteile mit sich bringen, weswegen später eine Fusion aus den verschiedenen Arten erstellt wird. [MRO02]

2.3.1 Infrarot

Infrarotsensoren sind den optischen Sensoren zuzuordnen. Dies bedeutet, dass der Sensor die Daten über ein Verfahren gewinnt, bei dem Licht eines bestimmten Spektralbereiches ausgesendet wird. Im Fall des infraroten Lichts liegt die Wellenlänge im Bereich von 780 nm – 1 mm. Somit liegt das ausgestrahlte Licht außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens, weswegen es für den Menschen im Allgemeinen ungefährlich ist.

Bei der Distanzmessung benutzt der Sensor eine LED um einen gedrehten Infraroten Lichtstrahl auszusenden. Je nachdem, wo sich das zu messende Objekt befindet, wird das Licht in einem anderen Winkel zurückgestrahlt, welcher detektiert wird. Mittels eines sogenannten Position Sensitive Device (PSD) im Empfänger kann nun ein analoger Stromwert ermittelt werden.

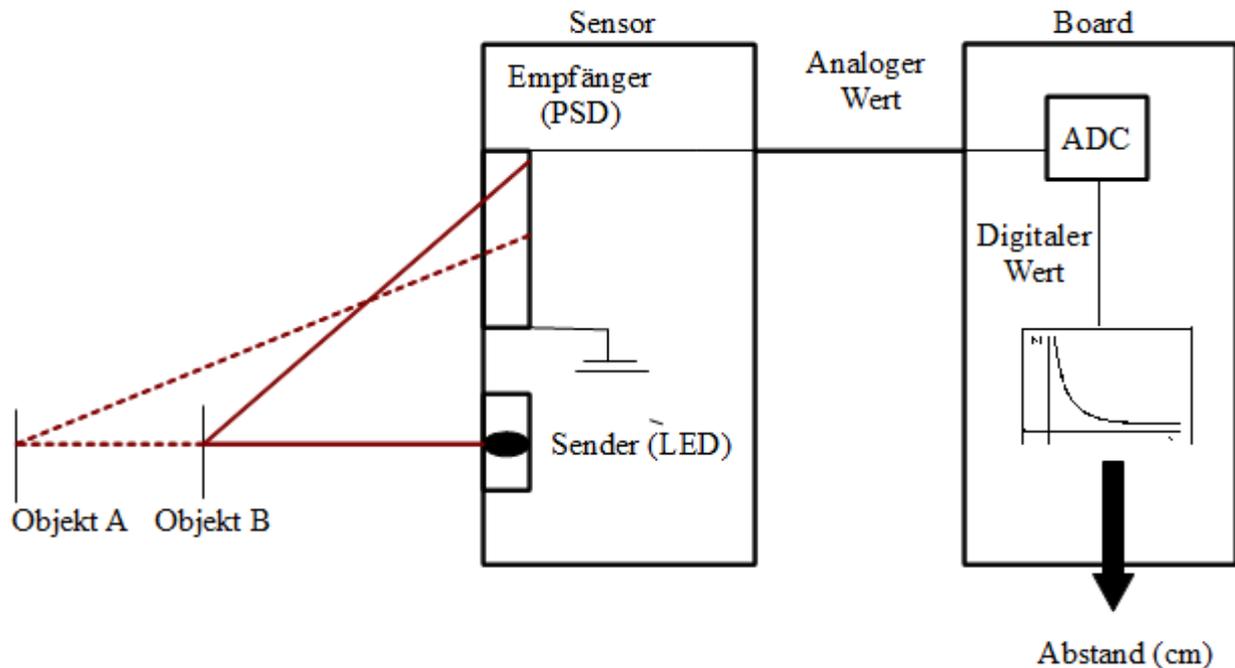


Abbildung 3: Infrarot-Sensor: Funktionsweise

Anhand des analogen Wertes kann nach Umwandlung in einem ADC zu einem Digitalen Wert der Abstand ermittelt werden. Hierfür verwendet man eine Funktion, dessen Parameter anhand der vorher ermittelnden Messergebnisse gefunden wurde.

Die Nachteile bei der Messung mit Infrarotsensoren sind, dass durch dieses Messverfahren optische Störquellen, wie die Sonne oder Rauch, einen großen Einfluss auf die gemessene Entfernung nehmen. Außerdem werden die Strahlen nicht durch optische durchlässige Materialien (wie z.B. Glas) abgelenkt, und liefern somit eine falsche Höhe.

Die Vorteile liegen zum einen darin, dass die Sensoren mit einer sehr hohen Samplerate angesprochen werden, wodurch man über einen gegebenen Zeitraum nach Mittelung sehr genaue Werte erhält. Weiterhin haben die Sensoren keine Probleme Entfernungen zu Stoffen zu messen, die akustische Signale absorbieren würden. Zum anderen haben die Sensoren einen geringen Kostenfaktor in der Anschaffung. Weitere Vor- und Nachteile werden auch in [SEN98] vorgestellt, genauere Informationen bietet [SENB07].

2.3.2 Ultraschall

Ultraschallsensoren gehören im Gegensatz zu den Infrarotsensoren zu den akustischen Sensoren, deren Messung durch Aussenden eines hochfrequenten akustischen Signals funktioniert. Die ausgesendete Frequenz liegt hierbei zwischen 16 kHz und 1 GHz und somit außerhalb des menschlichen Hörvermögens.

Die Messmethode beruht auf der Zeitverzögerung zwischen Aussenden und Empfangen des Signals (Laufzeitmessung). Bei dem verwendeten Ultraschall-Sensor (SRF02 von **Devantech**) wird aus der vergangenen Zeit bis zum Empfang des Echo-Impulses ermittelt, wie weit entfernt der nächste Gegenstand ist.

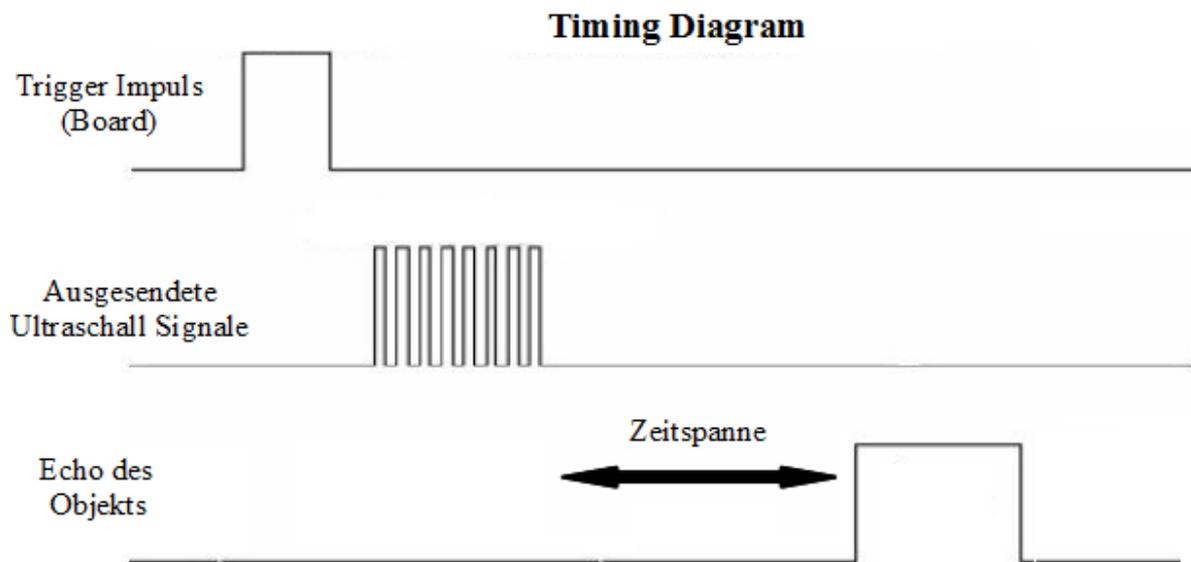


Abbildung 4: Ultraschall - Timing Diagramm

Im Gegensatz zu Infrarot, breiten sich die Wellen des Ultraschalls dabei kegelförmig aus, wodurch der Sensor auch keine Probleme hat, wenn er leicht gedreht ist, was für die Arbeit mit dem Quadrocopter ein großer Vorteil ist. Weiterhin ist der Sensor unempfindlich gegenüber optischen Störquellen wie Rauch oder Sonneneinstrahlung.

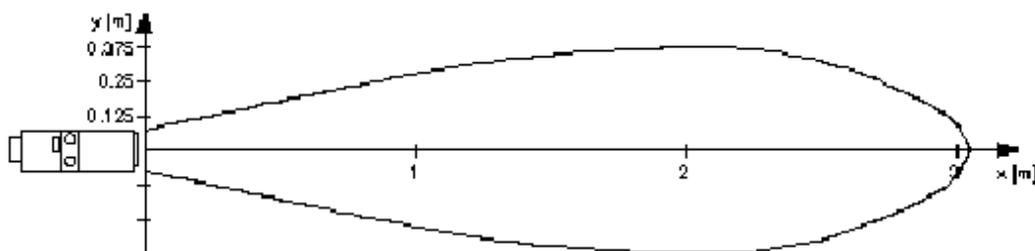


Abbildung 5: Ultraschall: Kegelförmige Wellenausbreitung

Die Nachteile dieses Messverfahrens liegen in der leichten Beeinflussbarkeit durch Töne und Luftströme, die es bei der Verwendung im Quadrocopter häufig auftreten. Zusätzlich haben die Sensoren große Probleme die Entfernung zu Stoffen zu messen, bei denen das Signal absorbiert wird (vgl. Tonstudio). Auch hier wird auf [SENB07] verwiesen werden.

2.3.3 Drucksensoren

Drucksensoren hingegen arbeiten nicht mittels Abstandsmessung wie die optischen und akustischen Sensoren, sondern berechnen den absoluten Druck, der aktuell vorliegt. Somit kann die absolute Höhe gegenüber dem Startpunkt berechnet werden. Vorwiegend werden bei der Messung zwei physikalische Effekte benutzt, welche in [AutS00] genauer beschrieben werden:

- piezoelektrischer Effekt: Durch Deformation eines Halbleiters verschieben sich die Ladungen in diesem. Dadurch ist eine sog. Oberflächenladung messbar.
- piezoresistiver Effekt: Durch Verformung eines elektrischen Widerstandes ändert sich sein Wert.

Da zwischen dem Luftdruck und der Höhe auf der Erde ein fester Zusammenhang besteht, bieten Luftdrucksensoren eine weitere Möglichkeit, um zu jeden Zeitpunkt die Höhe berechnen zu können. Dieser Zusammenhang wird auch im Datenblatt [AP00] mittels einer Graphik deutlich gemacht.

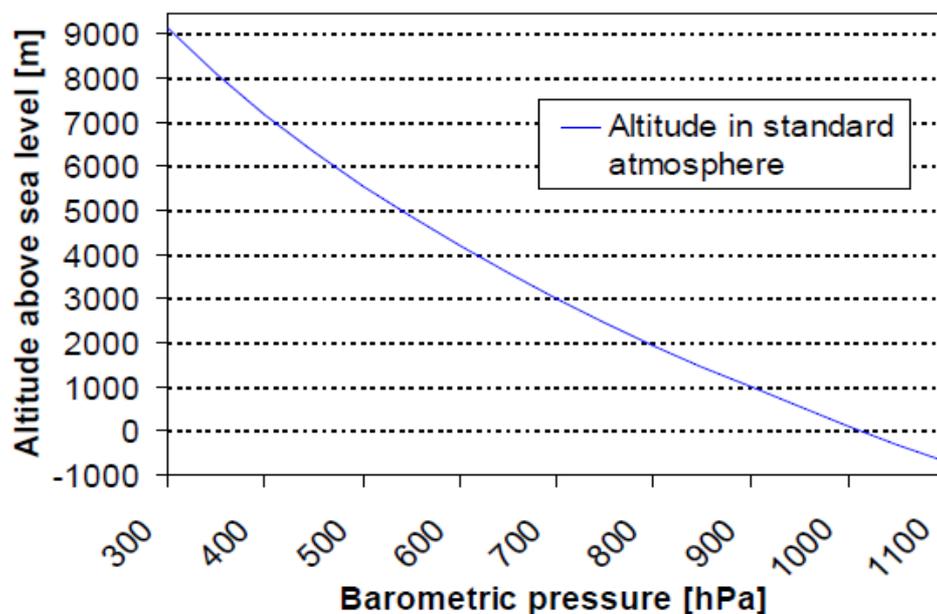


Abbildung 6: Zusammenhang Luftdruck - Höhe

Über die barometrische Höhenformel kann so aus dem Druck jederzeit die absolute Höhe berechnet werden.

$$p(h) = p(h_0) \cdot \left(1 - \frac{a \cdot \Delta h}{T_0}\right)^A \quad \text{mit } a: \text{Temperaturgradient}, A = \frac{M \cdot g}{R \cdot a}$$

Wie man an der Abbildung 6 aber bereits sieht, ist die Druckänderung in dem für diese Arbeit relevanten Teil sehr gering, sie liegt bei ca. 0,12 hPa/m. Aus diesem Grund muss die Messung des Drucks sehr genau sein, und sollte zusätzlich kein Rauschen enthalten. Weitere Nachteile liegen in der Wetter- und Windabhängigkeit des Messverfahrens, wobei hier vor allem letztere aufgrund der Luftverwirbelung der Rotoren zu beachten ist.

Der Drucksensor wird in der späteren Anwendung zur Angabe der Relativhöhe benutzt, um beispielsweise festzustellen, in welchem Stockwerk sich der Quadrocopter befindet.

2.3.4 Alternative Sensoren

Um die Höhe eines Objekts zu bestimmen, gibt es allerdings noch einige weitere Möglichkeiten, welche nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Diese werden im späteren System nicht verwendet, können allerdings in anderen Anwendungsgebieten benutzt werden.

1. Laser

Diese Sensoren senden Laserstrahlen, welche aus gebündelten Lichtstrahlen bestehen, auf das zu messende Objekt. Die Entfernung wird wie bei den Infrarotsensoren über den Auftretswinkel, die der Strahl im Empfänger hat, berechnet. Aus diesem Winkel kann direkt auf die Entfernung zum Objekt geschlossen werden. (siehe auch Lasertriangulation)

Der Vorteil dieser Sensoren liegt in der hohen Genauigkeit, welche im Bereich von wenigen Zentimetern bei Distanzen bis zu 30m liegt. Allerdings haben die Sensoren einen großen Energieverbrauch und ein großes Gewicht, welches ausschlaggebend für das Flugverhalten eines Quadrocopters ist.

2. GPS

GPS-Sensoren (Global positioning System) benutzen das globale Satelliten Netz, um ihre Position zu bestimmen. Hierbei wird die Laufzeit eines Signals zwischen dem Objekt und drei weiteren Satelliten verwendet, um die Position zu bestimmen. Ein weiterer vierter Satellit wird benötigt, um die genaue Uhrzeit zu liefern.

Somit liegen die Nachteile darin, dass zu jeder Zeit vier Satelliten empfangen werden müssen, was im Indoorbereich nicht immer gegeben ist. Zudem besitzen die Sensoren eine relativ geringe Genauigkeit von ungefähr 1m – 5 m.

Auf der anderen Seite verbrauchen die GPS-Empfänger wenig Energie und sind Licht-unabhängig.

3. Radar

Radarsensoren (Radio detection and ranging) senden gebündelte elektromagnetische Wellen aus, um die reflektierten Echsignale der Objekte zu untersuchen. Bei der Entfernungsmessung wird meistens das Impulsverfahren angewendet, bei dem Impulse ausgesendet werden und die Laufzeit des Echos gemessen wird.

Da die Signale hochfrequent sind, werden diese nicht durch äußere optische Einflüsse, wie beispielsweise die Sonne gestört. Zudem ist die Reichweite sehr groß.

Auf der anderen Seite kosten die Sensoren relativ viel und liefern nur eine sehr grobe Auflösung von ca. 1m.

3 Konzept

3.1 Überblick

Die Voraussetzung für einen autonomen Flug sind unter anderem, dass sich der Quadrocopter auf einer jederzeit änderbaren Höhe halten kann, wobei der Flug in die anderen beiden Raumrichtungen nicht beeinflusst wird. Somit war die Grundidee dieser Arbeit, eine Höhenregelung für einen Quadrocopter zu entwickeln, welche eine von außen einstellbare Höhe benutzt. Da im autonomen Flug auch jederzeit die Möglichkeit bestehen muss das System zu landen, wurde zusätzlich eine Landeregelung implementiert, die eine sichere Landung aus allen Höhen vollziehen soll.

Da diese Höhenregelung bei allen äußeren Einflüssen, wie z.B. unterschiedlichen Oberflächen oder Rauch, sicher funktionieren soll, wurden die Vorteile verschiedener Sensorarten ausgenutzt, um mit Hilfe einer intelligenten Sensorfusion die aktuelle Höhe zu erhalten.

3.2 Gesamtkonzept

Das Gesamtkonzept umfasst die Unterbereiche Sensorik, Sensorfusion und Regelung, welche alle ineinander übergehen.

Bei der **Sensorik** werden die Werte aus den Sensoren mit bestimmten Methoden gewonnen. Hierbei werden die beiden Infrarotsensoren, ein Ultraschallsensor, ein Beschleunigungssensor und ein Luftdrucksensor verwendet. Zusätzlich werden noch die Daten der Fernsteuerung ausgelesen, um dem Benutzer die Möglichkeit zu geben, zwischen den Regelungen zu wechseln.

Im Unterbereich **Sensorfusion** wird zuerst versucht über verschiedene Methoden die Sensordaten zu glätten und von Fehlern zu bereinigen. Mit den fehlerkompensierten Daten der einzelnen Sensoren findet anschließend die Sensorfusion statt. Aus dieser wird die absolute Höhe (Abstand zwischen Boden und Quadrocopter) und die relative Höhe (Abstand zwischen Anfangshöhe und aktueller Höhe) bestimmt.

Für den Prozess der **Regelung** werden die aktuelle Höhe und die Remotedaten verwendet. Hierbei wird über die Daten der Fernbedienung bestimmt, ob und welche Regelung aktiv ist und somit angesteuert werden muss. Die einzelnen Regelungen benutzen alle denselben Höhenregler, mit unterschiedlichen Parametern. So steuern sie das Höhengas, welches zusammen mit dem Gas der Lageregelung an die Motoren geschickt wird.

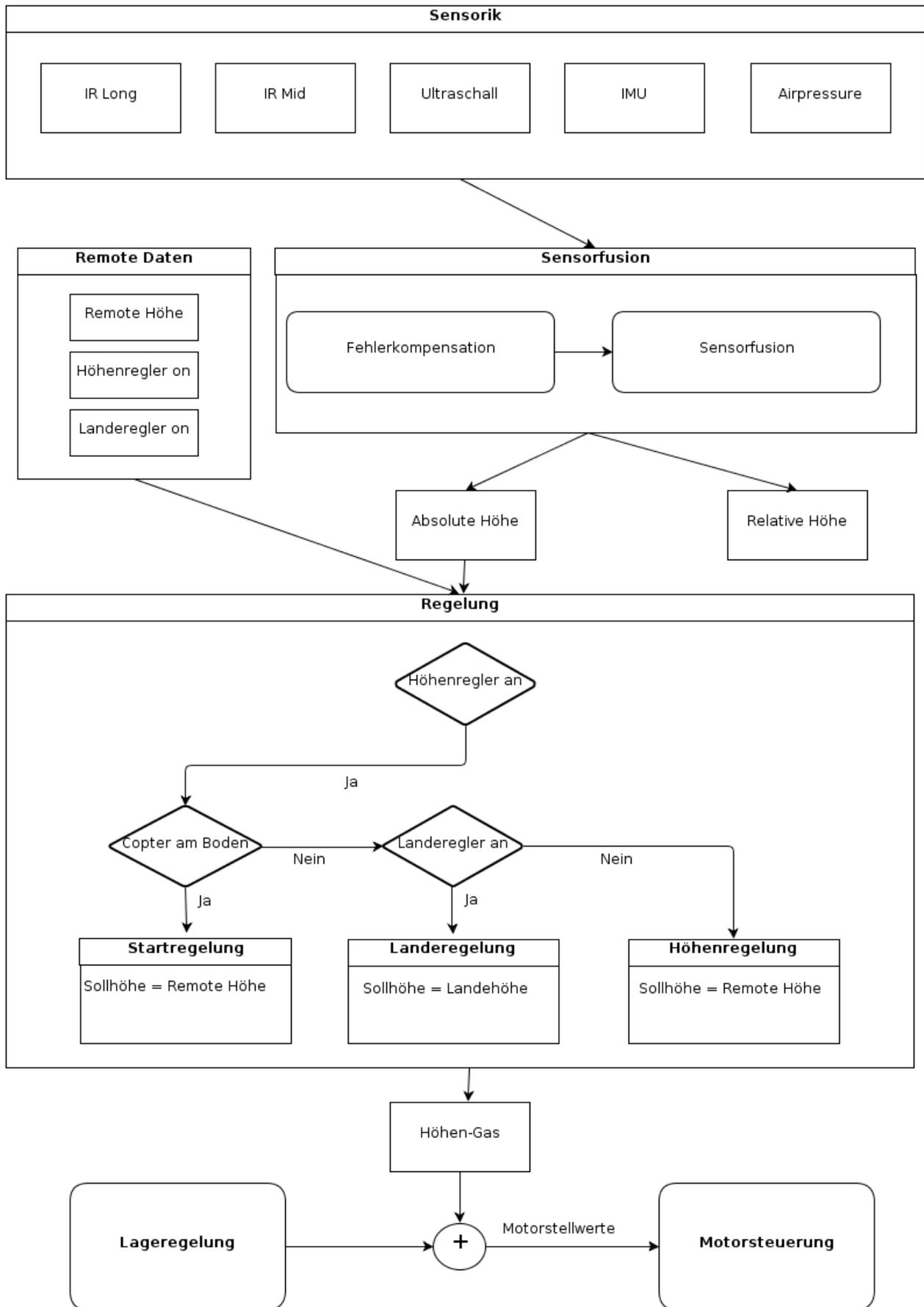


Abbildung 7: Gesamtkonzept

3.3 Einbau der Sensorik

Da man, wie in Kapitel 2.3 Sensorik beschrieben, viele verschiedene Abstandssensoren benutzen kann, ist es zuerst wichtig, sich auf bestimmte Arten festzulegen. In dieser Arbeit wurde der Schwerpunkt auf die Sensorarten Ultraschall, Infrarot und Luftdruck gelegt. Dies liegt zum einen daran, dass durch das spätere Umfeld das Augenmerk im Nahbereich liegt und somit beispielsweise GPS-Sensoren nicht verwendet werden können, da die gewünschte Genauigkeit mit diesen Sensoren nicht erreicht werden kann. Zum anderen wird durch die Mischung aus optischen und akustischen Sensoren ein sehr großes Spektrum an Untergründen abgedeckt, welche sicher erkannt werden können.

Als erstes muss betrachtet werden, wie die Sensorik eingebaut und angeordnet wird. Da insgesamt vier Sensoren eingebaut werden, die möglichst ungestört ihre Werte liefern, müssen einige Punkte beachtet werden.

1. Störfaktoren der Infrarotsensoren

Bei der Konzeptionierung der Anordnung muss vor allem darauf geachtet werden, dass sich die beiden angebrachten IR-Sensoren nicht gegenseitig behindern. Dies passiert sehr schnell, da die von der Wand reflektierten Strahlen nicht vollständig in die Richtung des eigene Empfängers zurück geworfen werden, sondern auch streuen. Diese gestreuten IR-Strahlen behindern den zweiten Empfänger, da die Strahlen von ihm nicht von seinen eigenen unterschieden werden können. Es reicht allerdings nicht, beispielsweise eine Art Wand zwischen den Sensoren aufzubauen, da die gestreuten Strahlen trotzdem stören würden. Somit ist darauf zu achten, dass die beiden Empfänger möglichst weit voneinander entfernt sind.

2. Störfaktoren der Ultraschallsensoren

Da es keinen zweiten Ultraschallsensor gibt, der störend wirkt, könnte der Sensor relativ beliebig befestigt werden. Die Probleme liegen hier in der Luftverwirbelung der Rotoren bzw. der Geräuschentwicklung der Motoren, durch die der Sensor falsche Daten annehmen würde.

Folglich dürfen die Sensoren nicht direkt an den Auslegern befestigt werden, sondern sollten genauso wie die IR-Sensoren unterhalb des Copters angebracht werden.

3. Störungsfaktoren der Luftdruck-Sensoren

Die Luftdruck-Sensoren müssen während des Fluges besonders geschützt werden, da sie durch den Wind, der zum einen durch die Rotoren und zum anderen durch den Flug entsteht einen falschen Druck messen würden. Zusätzlich darf kein Sonnenlicht auf die empfindliche Sensorfläche fallen, da dies den Sensor beschädigen könnte. Außerdem würde dies eine falsche Temperatur ergeben, welche in die Berechnung des Drucks mit einfließt.

Um den Sensor gegen diese Störfaktoren zu schützen, wird er zum einen innerhalb des Copters befestigt und zum anderen zuerst mit Schaumstoff umhüllt und anschließend in einen Schrumpfschlauch verpackt.

In Abbildung 8 sieht man die fertig konzipierte Anordnung in der Ansicht von unten als auch seitlich. Die gestrichelten Linien beim Luftdrucksensor bedeuten hierbei, dass er sich auf der Oberseite der Platte befindet, die Abkürzungen E = Empfänger und S = Sender.

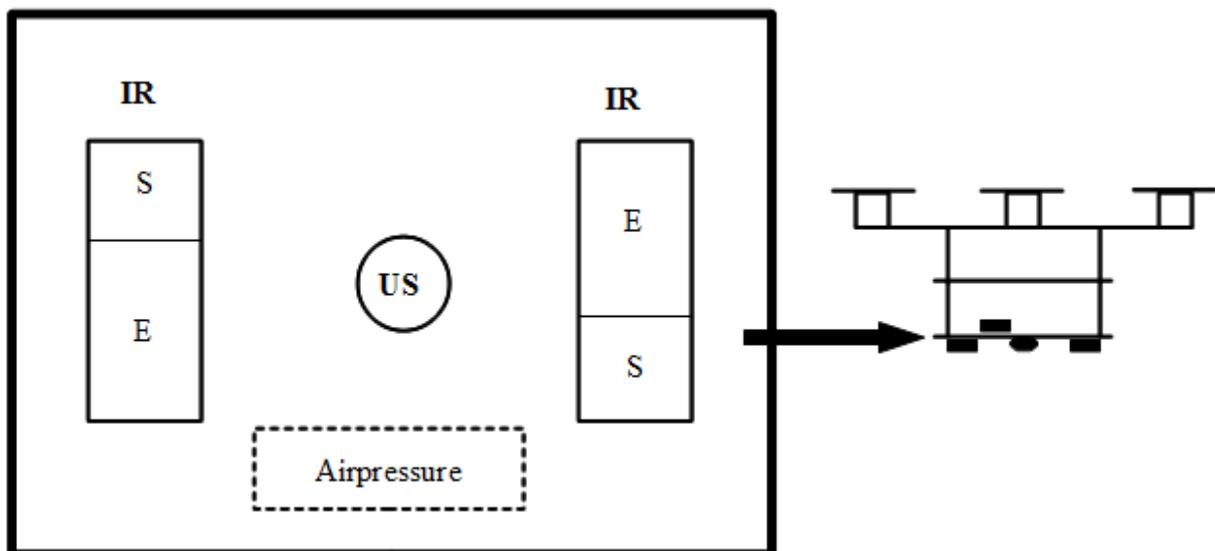


Abbildung 8: Anordnung der Sensorik

3.4 Sensorfusion

Um später eine stabile Höhenregelung zu gewährleisten, ist es unabdingbar, dass die Werte, die man zur Regelung benutzt, eine möglichst hohe Genauigkeit besitzen und gleichzeitig stabil sind. Dies soll bei dieser Arbeit über eine Sensorfusion aus 2 Infrarot- und einem Ultraschallsensor geschehen, bei der die Werte der Beschleunigungs- und Luftdrucksensoren für einen Plausibilitätsüberprüfung benutzt werden.

Weiterhin sollen die Luftdrucksensoren zusätzlich dazu benutzt werden, um festzustellen ob sich die Etage geändert hat, in der der Quadrocopter fliegt. Da dieser im späteren Gebäudeflug seinen Weg auch „mappen“ (aufzeichnen) soll, muss jederzeit bekannt sein in welchem Stockwerk sich dieser befindet.

Da jede Sensorart bei bestimmten Verhältnissen Probleme hat, die Fusion jedoch trotzdem jederzeit richtige Werte liefern soll, muss genau über die Vorgehensweise nachgedacht werden. Hierbei orientierte man sich an Literatur wie [MDF08], allerdings musste die Sensorfusion sehr genau an das System angepasst werden, weswegen letztendlich eigene Ansätze erforderlich wurden. Allgemein soll später wie Abbildung 9 zeigt vorgegangen werden.

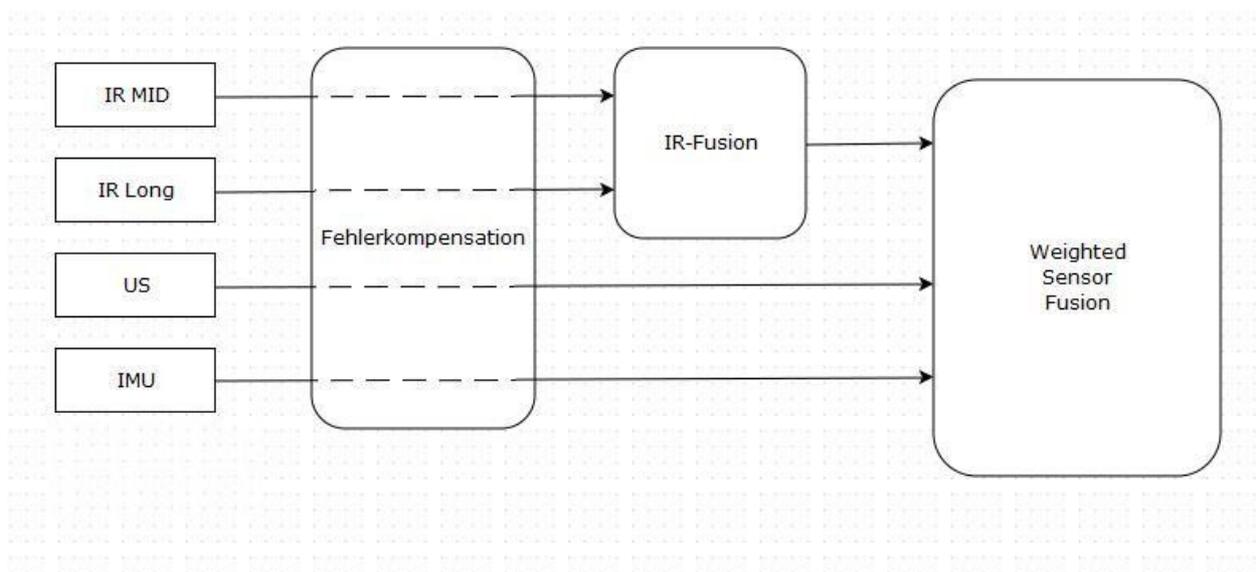


Abbildung 9: Flowchart - Sensorfusion

Bei der **Fehlerkompensation** spielt bereits die Art der Sensoren mit ein, da hier verschiedene Filter benutzt werden, um die Werte zu glätten. Diese Filter müssen so angepasst werden, dass sie jederzeit die gleiche "Glättung" von jeder Sensorart erreichen. So wird beispielsweise beim Mittelwertfilter die Anzahl der Werte bei den IR-Sensoren wesentlich größer gewählt.

Mit den gefilterten und fehlerbereinigten Werten wird anschließend die **IR-Fusion** durchgeführt.

Hierbei werden allerdings nur die beiden Infrarotsensoren benutzt. Diese haben unterschiedliche Bereiche, in denen sie zuverlässig arbeiten können. Befindet sich also ein Sensor außerhalb seines Bereichs, so springt der andere Sensor für ihn ein. Wenn sich beide Sensoren überschneiden, so muss eine gewichtete Mittelung der beiden Werte stattfinden. Diese gewichtet jenen Sensor mehr, der näher an seinem Geltungsbereich liegt.

Auf den letzten Schritt (**Weighted Filter Fusion**) muss gesondert eingegangen werden, da hier die eigentliche intelligente Sensorfusion stattfindet. An dieser Stelle sind dem Copter die drei Sensorwerte Infrarot, Ultraschall und IMU bekannt, welche bereits geglättet und fehlerbehebend sind. Zusätzlich fließt noch die Historie der Sensorfusion in den Prozess, welche die letzten Gewichtungen der einzelnen Sensorarten beinhaltet. Mit diesen Daten wird wie folgt vorgegangen:

Zuerst wird der Fehler der Sensorgrößen zueinander berechnet und falls nötig einer der Werte gestrichen. Anschließend werden aus den Fehlern der Sensorgrößen und den Ergebnissen aus vorherigen Durchläufen, ihre aktuellen Gewichtungen berechnet. Allerdings wird an dieser Stelle nur noch Infrarot und Ultraschall betrachtet, da die IMU nur als Vergleichswert dient. Aus den Gewichtungen wird nach abschließender Prüfung die Höhe berechnet.

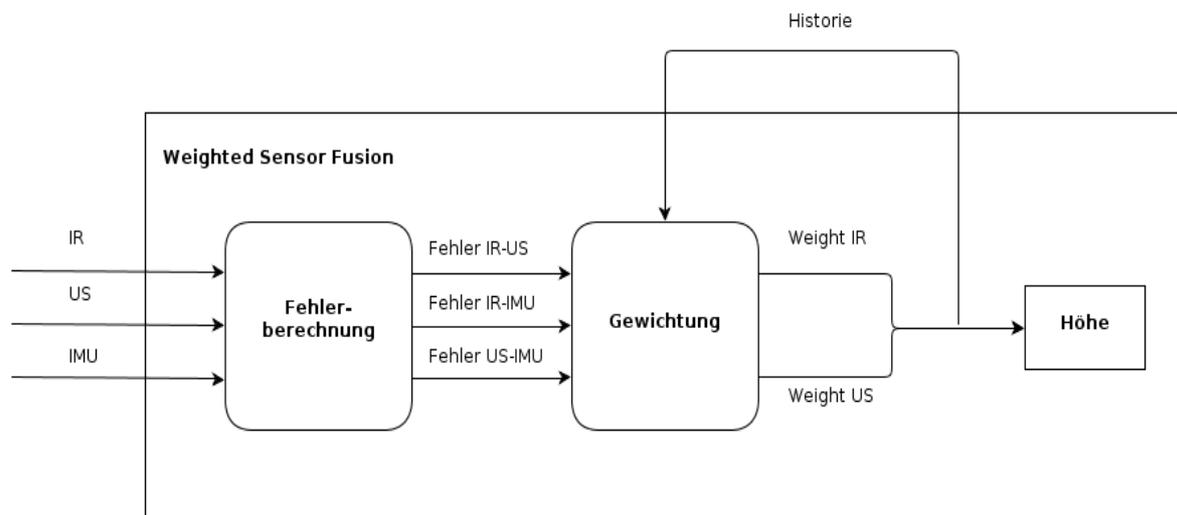


Abbildung 10: Weighted Sensor Fusion

3.5 Regelung

Da das Ziel dieser Arbeit eine Erweiterung eines bereits bestehenden Systems ist, welches sich mit dem autonomen Indoorflug beschäftigt, liegt das Hauptaugenmerk auf einer gut funktionierenden Höhenregelung.

3.5.1 Höhenregelung

Die Höhenregelung muss ein unsymmetrisches System regeln, d.h. im Flug nach oben kann steht eine größere Kraft für die Regelung zur Verfügung, als beim Fall nach unten. Das liegt daran, dass die (brushless) Motoren nur in eine Richtung drehen können und deswegen keinen Abtrieb erzeugen können. Nach unten ist die Beschleunigung also maximal die Erdbeschleunigung.

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Somit muss über die Art der Regelung und ihre Spezifikationen gesondert nachgedacht werden. Beispielsweise wäre es möglich einen PID-Regler zu verwenden, der sich in verschiedenen Zuständen (Steigend, Fallend) befinden kann und abhängig davon seine Parameter wählt. Dabei müssten die Parameter nach unten wesentlich aggressiver (höherer P-Anteil) eingestellt werden, um die fehlende Motorleistung auszugleichen.

Da es beim späteren Anwendungsgebiet allerdings nicht auf Schnelligkeit, sondern auf Stabilität ankommt, ist davon abzuraten einen Regler zu kompliziert zu gestalten, da mit zunehmender Komplexität auch die Fehleranfälligkeit steigt. Vor allem bei Erreichen bzw. Halten der Höhe würde der Flug wesentlich instabiler werden, da durchgehend zwischen 2 Reglern gewechselt werden würde. Dies könnte zwar dadurch verhindert werden, hier einen dritten Regler einzubauen, der die Phase stabil hält, allerdings ist es sehr schwierig eine Abgrenzung zu finden, ab wann dieser eingreifen soll.

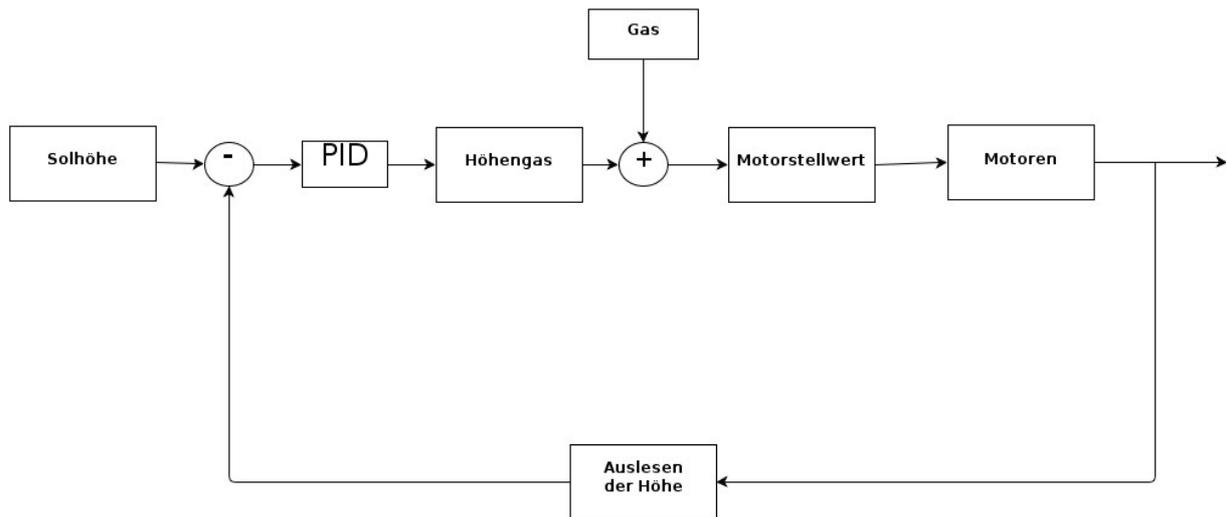


Abbildung 11: Höhenregelung - Regelkreis

Somit wird ein stabiler PID-Regelkreis für die Höhenregelung konzeptioniert, dessen Zustand bzw. Parameter unabhängig von der aktuellen Bewegungsrichtung sind.

3.5.2 Start- und Landeregelung

Der I-Anteil des Höhenreglers bestimmt, welches Gasoffset dem Quadrocopter hinzugefügt/abgezogen werden muss, damit dieser auf einer bestimmten Höhe schweben kann. Dieses Schwebegas ist stark von der Ladung des Akkus abhängig, weswegen der I-Anteil sich von Flug zu Flug ändert. Um somit ein Über- oder Unterschwingen beim ersten Start zu verhindern, soll die Startregelung beim ersten Start das Schwebegas bestimmen, bevor die eigentliche Höhenregelung eingeschaltet wird. Hierbei soll der I-Anteil solange integriert und aufaddiert werden, bis der Quadrocopter den Boden leicht verlässt, d.h. bis dieser das Schweben anfängt. Anschließend soll der Höhenregler die gewünschte Höhe einstellen.

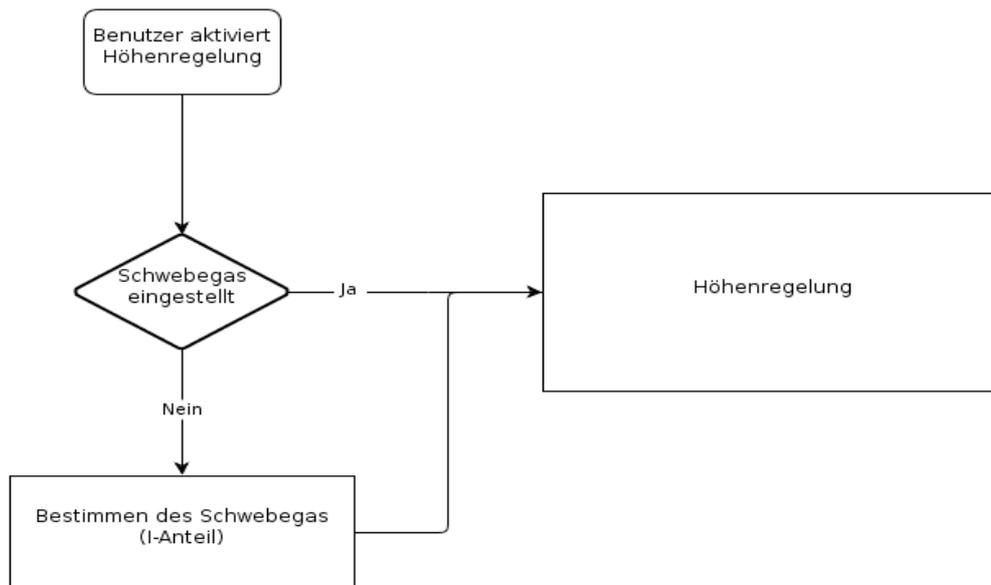


Abbildung 12: Flowchart: Startregelung

Das automatische Landen stellt im Gegensatz zum automatischen Start eine viel größere Schwierigkeit dar, weil es bei dieser Regelung nie passieren darf, dass der Copter überschwingt. Ein Überschwingen würde in diesem Fall das Aufschlagen auf dem Boden zur Folge haben, was aus größeren Höhen den Verlust des gesamten Systems bedeutet. Aus diesem Grund müsste eine stark gedämpfte Regelung gewählt werden, was aber gleichzeitig zur Folge hätte, dass diese zu langsam verläuft. Zu diesem Thema gibt es in der Wissenschaft nur nicht autonome Systeme, die beispielsweise Kamerasystem verwenden (vgl. [PET08]).

Um den richtigen Mittelweg zwischen Schnelligkeit und Sicherheit zu finden gibt es mehrere Überlegungen.

1. Der Höhenregler (PID-Regler) wird mit neu zu findenden "Landeparametern" weiterhin verwendet. Diese Parameter müssten dabei ein stark dämpfendes Glied besitzen, um ein Überschwingen auf jeden Fall ausschließen zu können. Der Nachteil dieser Möglichkeit ist es aber gute Parameter zu finden, ohne den Copter zu beschädigen.
2. Der Höhenregler wird weiterhin verwendet. Die Sollhöhe wird dabei immer halbiert, wenn die alte Sollhöhe erreicht wurde (exponentieller Abfall). Allerdings würde die Regelung nicht wie gewünscht sehr schnell funktionieren, da der Copter sich teils zu lange auf den einzelnen Stufen aufhalten würde
3. Die Fallgeschwindigkeit wird abhängig von der Höhe geregelt, so dass der Copter anfangs sehr schnell und am Ende sehr langsam fällt. Diese Regelung liefert das perfekte Ergebnis in Bezug auf Sicherheit und Schnelligkeit, ist auf der anderen Seite jedoch sehr komplex, da eine Beziehung zwischen Drehzahl ↔ Fallgeschwindigkeit ↔ Höhe entsteht, welche schwer zu regeln ist.

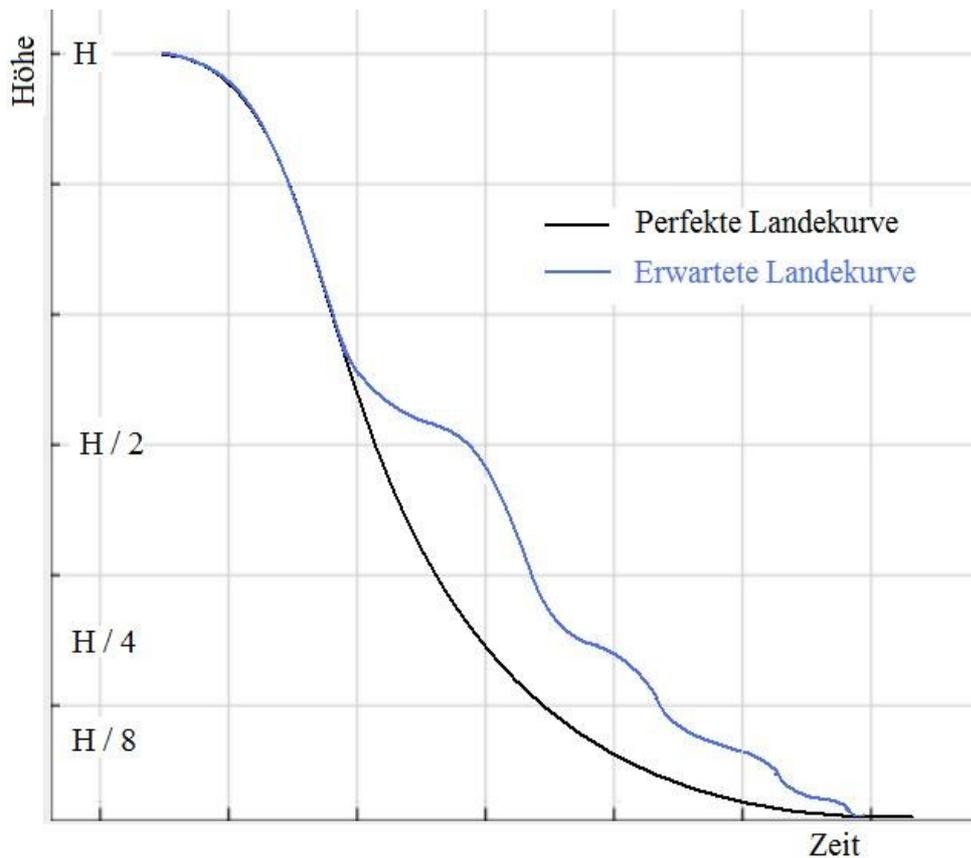


Abbildung 13: Automatisches Landen: Erwartete Kurve

Letztendlich wird eine Mischung aus 1 und 2 bevorzugt, da die 3. Möglichkeit eine zu komplexe Regelung liefern würde. Diese Mischung aus den beiden Überlegungen sieht vor, dass der vorhandene Höhenregler mit neuen Landeparametern eingesetzt wird. Die Sollhöhe wird allerdings nicht sofort auf 0 gesetzt, sondern über Halbierungen dem Boden "genähert". In Abbildung 13 sieht man die gewünschte Landeregelung und das erwartete Ergebnis.

Weiterhin soll die Landung jederzeit zu terminieren sein, falls z.B. Störfaktoren die Landung unmöglich machen. Aus diesem Grund soll auch die automatische Landung über einen Schalter der Fernbedienung eingeschaltet werden können. Vollständig funktioniert die Landeregelung wie folgt:

1. Benutzer aktiviert Landeregelung über einen Schalter an der Fernbedienung
2. Höhenregelung wird mit PID-Landeparametern und $Sollhöhe = Isthöhe/2$ aktiviert
3. Ist die Sollhöhe(\pm) 10% erreicht, so wird diese halbiert, um auf die nächste Stufe zu gelangen $Sollhöhe = Sollhöhe/2$
4. Wenn der Landebereich (0 – ca. 30 cm) erreicht ist, wird den Motoren nur noch das Schwebegas gegeben, damit die Motoren jederzeit bereit sind durchzustarten, falls die Landeregelung ausgeschaltet wird.

4 Implementierung

Die Implementierung wurde an einem fertigen System eines Quadrocopters durchgeführt, der bereits flugfähig war.

4.1 Sensorik

Da die Ultraschall-Sensoren bereits vorher implementiert wurden, werden diese in der Implementierung nicht weiter erwähnt. Es wurden die Treiber und Auswertung der beiden Sensorarten Infrarot und Luftdruck hinzugefügt.

Bei der Anordnung wurde genauso vorgegangen, wie es geplant war. So wurden die Infrarot-Sensoren übereinander angeordnet, wobei die beiden Empfänger dabei gekreuzt sind. Der Ultraschallsensor befindet sich zwischen den beiden IR-Sensoren. Der Luftdrucksensor wurde auf der Rückseite angebracht.

4.1.1 Infrarot

Die verwendeten Infrarot-Sensoren liefern ihre Daten, wie bereits erwähnt, als analoge Werte. Somit kann über einen Analog Digital Converter (ADC) direkt an die digitalen Werte gelangt werden. Dies hat zwar den Vorteil, dass keine Protokolle beachtet werden müssen, allerdings sind analoge Werte meist stärker fehlerbehaftet. Vor allem das Rauschen der Werte macht Probleme, wenn man Genauigkeiten von ca. $\sim 1\text{cm}$ erreichen will.

Zusätzlich müssen die empfangen Werte noch umgerechnet werden. Aus dem Datenblatt der jeweiligen Sensoren kann man hierzu eine Kurve entnehmen, die den Zusammenhang zwischen analogen Werten und Abstand herstellt. Wie man in Abbildung 14 sieht, ähnelt diese stark einer

Kurve die durch eine Funktion der Form $D = \frac{A}{(X - B)}$, welche um das Offset B verschoben und den Skalierungsfaktor A gestreckt ist.

In [RN00] wird dieses Vorgehen nochmals sehr genau beschrieben.

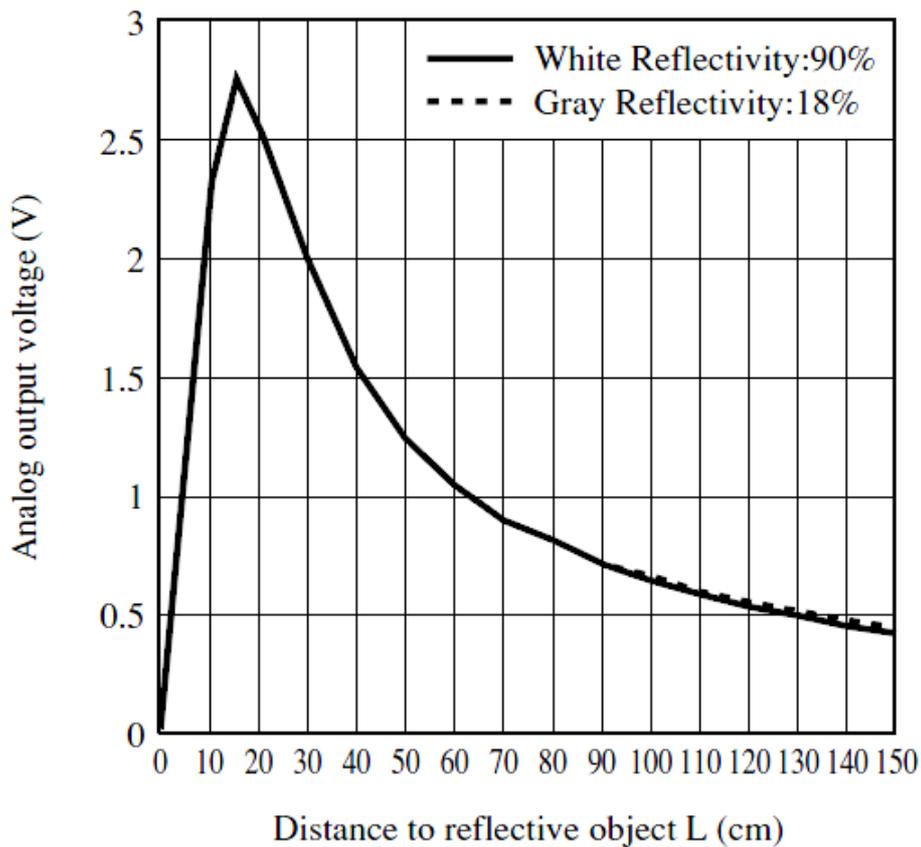


Abbildung 14: Infrarot: Verlaufskurve Sharp GP2Y0A02 [IRS00]

Es reicht also die Parameter der Funktion $f(x)$ zu finden, um jederzeit die Distanz aus den digitalen Werten zu berechnen. Bei der Parameterfindung gilt:

$$D = \frac{A}{(X - B)} \quad \text{mit Distanz } D, \text{ Skalierungsfaktor } A, \text{ Offset } B, \text{ digitaler Wert } X$$

Wird die Messung nun an 2 verschiedenen Punkten durchgeführt, so erhält man X_1 , X_2 und D_1 , D_2 und somit:

$$A = \frac{(X_1 - X_2) \cdot D_1 \cdot D_2}{(D_2 - D_1)} \quad \text{und} \quad B = \frac{D_1 \cdot X_1 - D_2 \cdot X_2}{(D_1 - D_2)}$$

Durch sehr viele Messungen und das Mitteln der Werte erhält man so sehr gute Werte für A und B , die im speziellen Fall der benutzten Sensoren wie folgt ausfallen. In Kapitel 5.3.Sensorik der Evaluierung sieht man, dass die Abweichungen zum wahren Abstand im Mittel im gewünschten Bereich liegen.

- Sensor Sharp GP2D120 (4-20 cm): $A = 3653.29, B = 1.54$
- Sensor Sharp GP2Y0A02 (20-150cm): $A = 15566.97, B = 11,36$
- Sensor Sharp GP2Y0A710K0F(120-450cm): $A = 44224.64, B = 298.42$

4.1.2 Luftdruck

Im Gegensatz zu den Infrarot-Sensoren gibt der benutzte Luftdruck-Sensor seine Daten über I2C aus. Über dieses Protokoll, welches aus dem Datenblatt des Sensors (Bosch BMP085) entnommen werden kann, kann mit dem Sensor kommuniziert werden und ihm mitgeteilt werden, welche Daten benötigt werden oder auch in welchen Abstand diese gemessen werden sollen.

Als Beispiel ist die Vorgehensweise angegeben, um einen Parameter auszulesen, der zur Berechnung des Drucks benötigt wird. Im Allgemeinen muss beim Schreiben und Lesen immer zuerst die Adresse des Moduls und anschließend die Adresse des Register geschickt werden, von der gelesen bzw. auf die geschrieben werden soll.

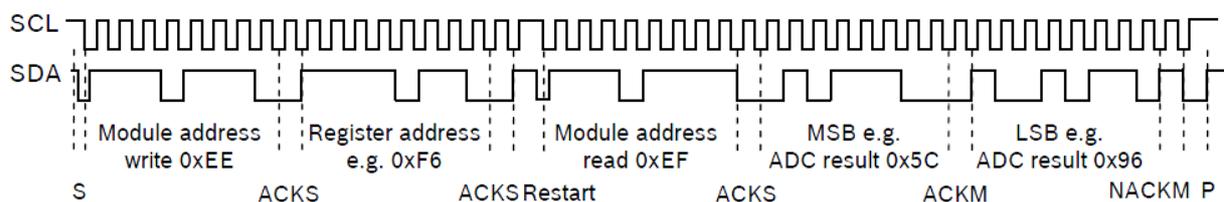


Abbildung 15: Luftdruck - Beispiel zur I2C Kommunikation [AP00]

- SDA: Daten, die auf den I2C Bus geschrieben werden.
- ACK/NACK: Acknowledge bzw. Non acknowledge byte.
- SCL: Clock, die vom Master vorgegeben wird.

Das Datenblatt des Sensors schreibt eine feste Prozedur vor, um den Druck zu berechnen.

1. Auslesen der Kalibrierungs-Parameter, welche zur späteren Berechnen benutzt werden
2. Unkompensierte Temperatur auslesen
3. Unkompensierten Druck auslesen
4. Berechnen der wahren Temperatur und des wahren Drucks über ein genau vorgeschriebenes Rechenverfahren
5. Prozedur ab Schritt 2 wiederholen

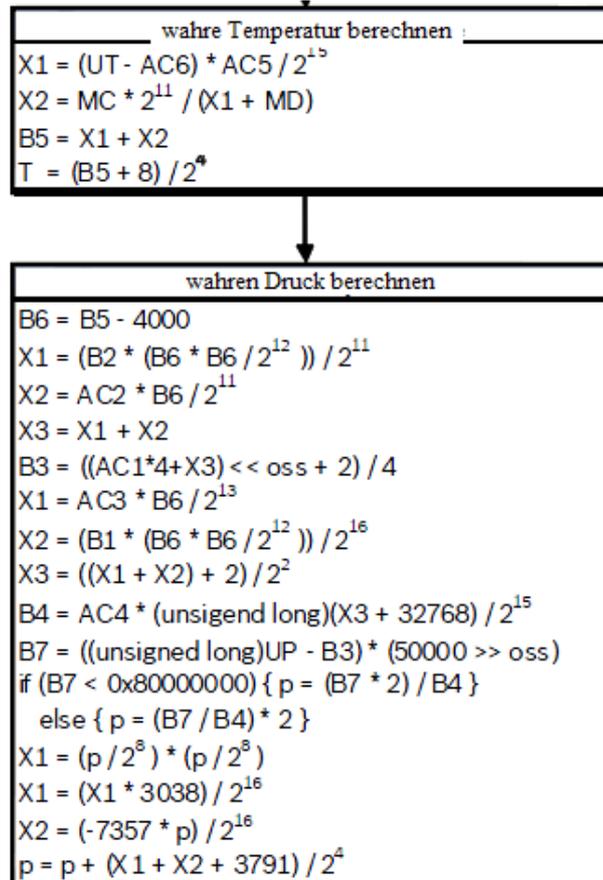


Abbildung 16: Luftdruck - Berechnung[AP00]

Aus dem berechneten Druck kann, wie in Kapitel 2.3.3. [Drucksensoren](#) bereits angedeutet, direkt die aktuelle Höhe über die Formel berechnet werden, die sich aus der barometrischen Höhenformel ableitet.

$$p(h) = p(h_0) \cdot \left(1 - \frac{a_\tau \cdot \Delta h}{T_0}\right)^A \quad \text{mit } a : \text{Temperaturgradient}, A = \frac{M \cdot g}{R \cdot a}$$

$$\Rightarrow h = 1 - \sqrt[A]{\frac{p(h)}{p(h_0)}} \cdot \frac{T_0}{a_\tau}$$

Für den Temperaturgradienten a gilt in normalen Verhältnissen $a_\tau = 0,65 \text{ K}/100 \text{ m}$ und somit für den Parameter $A = 5,255$.

Falls die absolute Höhe zu Normalnull bestimmt werden soll, so wird für den Druck $p(h_0)$ der Normaldruck eingesetzt. Soll auf der anderen Seite die Höhe gegenüber dem Startpunkt des Quadrocopters bestimmt werden, so wird vor Beginn des Fluges ein Druckbias (Startdruck)

ermittelt, welches anschließend für $p(h_0)$ eingesetzt wird.

Ein großes Problem bei der Benutzung des Sensors ist, dass die Genauigkeit nicht ausreicht (nur ca. $(\pm) 20$ cm), um eine Höhenregelung im Nahbereich einzustellen. Somit wird dieser Sensor letztendlich nur benutzt, um eine Absolute Höhe gegenüber dem Startpunkt zu bestimmen. Es kann also festgestellt werden, ob der Quadrocopter sich beispielsweise im ersten oder zweiten Stockwerk eines Gebäudes befindet.

4.2 Sensorfusion

Fehlerkompensation:

Zuerst wird die Fehlerbehebung/-kompensation betrachtet, welche dafür zuständig ist, dass keine Peaks mit in die Fusion aufgenommen werden. Hierbei werden Mittelwert und Glockenfilter zusammengeführt, um die Werte zu filtern.

Die Anzahl der Werte für die Mittelung ist hierbei davon abhängig, mit welcher Sample-rate die Sensoren neue Werte liefern.

	Infrarot Long	Infrarot Mid	Ultraschall	Luftdruck
Anzahl der Werte	20	20	5	10
Sampletime (ms)	10	10	100	25

Abbildung 17: Spezifikation Mittelwertfilter

Beim Glockenfilter dient die physikalisch maximal mögliche Positionsänderung als Limitierungsfaktor. Diese berechnet sich aus der Samplezeit und der (geschätzten) maximalen Geschwindigkeit des Copters.

$$g_{limit} = t_{sample} \cdot v_{max} = 10 \text{ ms} \cdot 3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 30 \text{ cm}$$

Die unterschiedlichen Sensorarten spielen bei dieser Phase nur eine Rolle bei der Wahl der Parameter – die Filterarten bleiben dieselben.

IR-Fusion:

Anschließend sollen die Infrarotsensoren zunächst einzeln zu einem gemeinsamen Infrarotwert fusioniert werden. Die Werte können nicht direkt in die Sensorfusion fließen, da aufgrund der eingeschränkten Messbereiche der beiden Sensoren ansonsten nicht verwendbare Daten benutzt werden.

Bei der Fusion werden zunächst beide Werte betrachtet und überprüft, ob sich die beiden Sensoren innerhalb ihrer Grenzen befinden. Falls einer der Sensoren aus seinem Bereich fällt wird der andere genommen und die IR-Fusion abgeschlossen. Dabei soll der kürzere Sensor bevorzugt behandelt werden, da eine zu gering gemessene Distanz seltener einen Absturz zur Folge hat, als eine zu groß gemessene.

Falls der Prozess an dieser Stelle noch nicht abgebrochen ist, sind beide Sensoren in ihrem Messbereich und können ohne Bedenken verwendet werden. Um eine größtmögliche Genauigkeit zu erreichen, werden nun noch beide Sensoren zusammengeführt. Dies geschieht prozentual abhängig von dem Mittelwert $value_{mid}$ der beiden Sensoren und dem Überschneidungsbereich $lower\ edge - upper\ edge$:

$$cut = \frac{value_{mid} - lower\ edge}{upper\ edge}$$

$$fusion = cut \cdot value_{big} + (1 - cut) \cdot value_{small}$$

Weighted Sensor Fusion:

Abschließend folgt der eigentliche Prozesse der Sensorfusion, bei dem die Werte von Infrarot, Ultraschall und IMU (inertial measurement unit – Beschleunigungssensor und Gyroskop) kombiniert betrachtet und zusammengeführt werden. Hierfür werden die Werte in Bezug zu einander betrachtet und gewichtet in den fusionierten Höhenwert übertragen.

Die Gewichtung betrachtet hierfür zuerst das Quadrat der Abstände (euklidischer Abstand) zwischen den jeweiligen Werten der Sensoren.

$$w_1 = (value_{ir} - value_{us})^2, \quad w_2 = (value_{ir} - value_{imu})^2, \quad w_3 = (value_{us} - value_{imu})^2$$

Der Wert der IMU kann allerdings nur als Vergleichswert dienen und nicht zur Fusion beitragen, da er zum einen zu ungenau ist, um im Nahbereich gute Daten mit einer Genauigkeit $< 1\text{cm}$ zu bieten. Diese Ungenauigkeit entsteht durch die ständige Vibration des Copters und Dritteffekte. Zum anderen gibt er nur Aufschluss über die absolute Höhe in Bezug auf die Starthöhe und nicht auf die aktuelle Höhe, die z.B. durch ein Hindernis unter dem Copter entsteht.

Deswegen wird im nächsten Schritt zunächst überprüft, ob sich die Werte w_1 , w_2 und w_3 zu

stark voneinander unterscheiden. Dies kann beispielsweise passieren, wenn ein plötzliches Hindernis auftritt, welches eine Oberfläche besitzt, dass die Ultraschall-Daten schluckt (wie in Abbildung 17 skizziert). Wenn dies passiert, wird sicherheitshalber auf den kleinsten Wert zurückgegriffen.

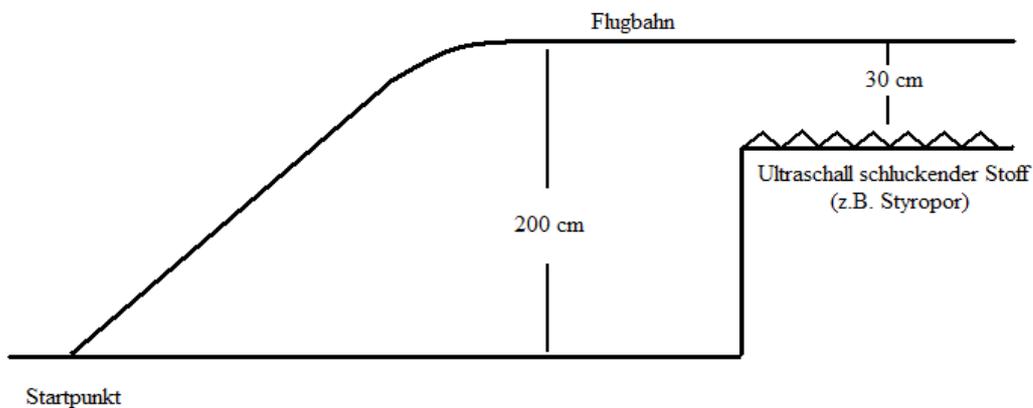


Abbildung 18: Sensorfusion - Problem mit Hindernis

Ansonsten wird im nächsten Schritt aus den Werten w_1 , w_2 und w_3 die Gewichtungen der Infrarot- und Ultraschallwerte berechnet. Hierbei werden zusätzlich die letzten Gewichtungen mit einem bestimmten Faktor $\alpha = 0.7$ betrachtet, um die Historie mitzubenutzen.

$$weight_{us} = (1 - \alpha) \cdot (w_1 + w_3) + \alpha \cdot hist_{us}$$

$$weight_{ir} = (1 - \alpha) \cdot (w_1 + w_2) + \alpha \cdot hist_{ir}$$

Anschließend wird überprüft, ob einer der beiden Werte eine zu große Abweichung vom jeweils anderen hat. Falls dies nicht der Fall ist wird letztendlich der fusionierte Höhenwert bestimmt

$$height = weight_{ir} \cdot value_{us} + weight_{us} \cdot value_{ir}$$

4.3 Regelung

Bei der Implementierung der Regelung, kommt es vor allem auf das Finden der richtigen PID-Parameter an. Zusätzlich muss noch festgelegt werden, wie der Benutzer die einzelnen Funktionen ansteuern kann, d.h. die Ansteuerung mittels Fernbedienung muss spezifiziert werden.

Außerdem muss gesagt werden, dass die geplante Startregelung nicht umgesetzt wurde, da diese den Umfang dieser Arbeit zu stark erweitert hätte.

4.3.1 Höhenregelung

Im gesamten Überblick erfolgt die Höhenregelung mit ihren zugehörigen Funktionen in folgenden Phasen/Unterschritten:

1. Berechnung des Höhengas (PID-Regelung)

Zuerst werden mittels des implementierten PID-Reglers die einzelnen Anteile P, I und D berechnet, welche addiert das Höhengas ergeben. Es handelt sich hierbei um einen normalen PID-Regler.

Die einzige Ausnahme bildet die Berechnung des I-Anteils. Bei diesem wurde eine Schranke eingebaut, die den aktuellen Δ Fehler auf einen Wert von 20 limitiert. Außerdem wird der I-Anteil nur dann aufintegriert, wenn sich die Positionsänderung zum letzten Durchgang unter dem Wert von 5 liegt. Diese beiden Ausnahmen wurden eingefügt, damit sich der I-Anteil nicht fälschlicher Weise beim Aufsteigen oder direkt nach Erhalten der neuen Sollhöhe ändert, da dieser eigentlich nur eine konstante Reglerabweichung korrigieren soll. Beide Werte wurden empirisch ermittelt.

2. Limitierung der Werte nach Oben und Unten

Im Folgenden Schritt werden die vorher berechneten Werte für die Motorstellwerte durch Funktionen limitiert.

Dies ist notwendig, damit immer eine ausreichende Kapazität an Motorkraft für die Lageregelung aufgespart werden kann, da diese ohne genügend Stärke nicht mehr stabil regeln kann. Auf der anderen Seite dürfen die Motorstellwerte nie unter einen bestimmten Wert fallen, da die Motoren sonst ausgehen.

3. Ansteuerung der Motoren

Nachdem der Regler die Stellwerte berechnet hat und diese limitiert wurden, müssen diese noch an die Motoren geschickt werden, damit das System auf die Regelung reagiert. Der interessante Aspekt hierbei ist, dass die Motoren öfter angesteuert werden, als die Regelung reagieren kann, weswegen eine Berechnung der PID-Anteile für mehrere Ansteuerung benutzt wird.

4. Auslesen der aktuellen Sensorwerte

Am Ende der Routine werden die aktuellen Sensorwerte ausgelesen, aus denen mit Hilfe der Sensorfusion die Isthöhe berechnet wird. Mit dieser beginnt der Prozess von Neuem. Zusätzlich wird an dieser Stelle die Sollhöhe abhängig von dem Steuerknüppel angepasst.

Nach der Implementierung dieser Routine mussten noch geeignete Parameter für den PID-Regler gefunden werden. Die Findung dieser Parameter stellt im Zusammenhang des Copters ein großes Problem dar, nachdem bei falschen Parametern das System schnell zu einem Absturz gebracht werden kann. Somit wurde sich sehr langsam an die Parameter herangetastet. Als die ersten Parameter gefunden waren, bestand ein weiteres Problem darin, dass die Regelung, je nach Ladung des Akkus, eine andere "Aggressivität" besitzt, da die Ladung direkten Einfluss auf die maximale Drehzahl der Rotoren nimmt. Der Copter konnte allerdings auch nicht über ein Stromkabel versorgt werden, da durch dieses eine sehr viel größere Trägheit entsteht.

Somit musste beim Einstellen der Parameter regelmäßig der Ladezustand des Akkus kontrolliert werden, damit die Parameter in jedem Zustand funktionieren. Die letztendlich so ermittelten Parameter waren:

$$P=3,0 \quad I=1,5 \quad D=25$$

4.3.2 Landeregelung

Nach der Implementierung der Landeregelung musste beim Testen schnell festgestellt werden, dass bei der konzipierten Version die Qualität der Landung von der Anfangshöhe des Quadrocopters abhängt. So landete der Copter beispielsweise aus einer Höhe von 1,50m sehr gut während er mit denselben Parametern aus 0,50m sehr viel länger brauchte. Somit wurde das Konzept nochmals überdacht, um eine einheitliche und sichere Landung zu garantieren.

Letztendlich wurde ein Landealgorithmus implementiert, der sich aus 3 Phasen zusammensetzt.

- Phase 1: Sicherheits-Annäherung

In der ersten Phase soll der Quadrocopter mittels des Höhenreglers auf eine Sicherheitshöhe von 60cm fliegen. Diese Phase dient zur Absicherung davor, dass der Copter aus einer zu großen Höhe direkt versucht die „Nullhöhe“ zu erreichen und die Dämpfung des Reglers diesen zu wenig bremst.

- Phase 2: Annäherung an die Lande-Phase

In der zweiten Phase soll sich der Copter an die eigentlich gewünschte Landehöhe von 0cm an regeln. Hierfür wird ihm eine neue Sollhöhe von 10 cm gegeben.

- Phase 3: Endanflug.

Die Phase des Endanfluges wird aktiv, sobald der Quadrocopter eine Höhe von 30cm erreicht hat. Sie ist dafür verantwortlich, dass der Regler nicht zu lange braucht auf die Höhe von 0cm zu regeln, zumal diese Höhe mit keinem der Sensoren messbar ist. In dieser letzten Phase wird das Schwebegas solange reduziert, bis der Copter gelandet ist. Die Reduzierung findet hierbei nicht linear sondern parabolisch statt.

$$Gas_{neu} = Gas_{alt} \cdot 0.95$$

Weiterhin werden für den Höhenregler eigene PID-Parameter verwendet, damit der Landeanflug perfekt eingestellt werden kann. Diese Landeparameter sind:

$$P=2,7 \quad I=1,5 \quad D=15$$

4.3.3 Festlegung der Remotefunktionen

Zusätzlich zu der Implementierung der Funktion und der Anbindung der Sensorik an den Copter müssen die Funktionen des Transmitters (Fernbedienung) festgelegt werden. Um die Festlegung genauer zu erläutern wird Abbildung 18 benutzt. Wie bereits im Konzept erwähnt, müssen für jegliche Benutzung des Höhenreglers die Motoren angeschaltet sein, wofür (bereits vor dieser Arbeit) Schalter 1 benutzt wurde.

Für die Höhen- und Startregelung wird jeweils *Schalter 2* benutzt. Es wird lediglich darauf geachtet, ob sich der Copter zu dem Zeitpunkt der Betätigung am Boden befindet oder nicht, um zu entscheiden, welche Regelung eingesetzt werden muss. Falls die Höhenregelung aktiv ist, so kann die Landeregelung über *Schalter 3* aktiviert werden. Diese kann jederzeit deaktiviert

werden, indem entweder *Schalter 2* oder *3* wieder umgelegt werden.

Zusätzlich kann über *Schalter 4* die Sollhöhe eingestellt werden, die für die Regelung verwendet wird. Diese Sollhöhe befindet sich hierbei im Bereich 50cm – 300cm. Da der Copter weiterhin steuerbar bleiben soll, kann über den *Steuerknüppel 5* die Lage in der Ebene verwendet werden, d.h es kann sich weiter gedreht und gekippt werden um die Position zu ändern.

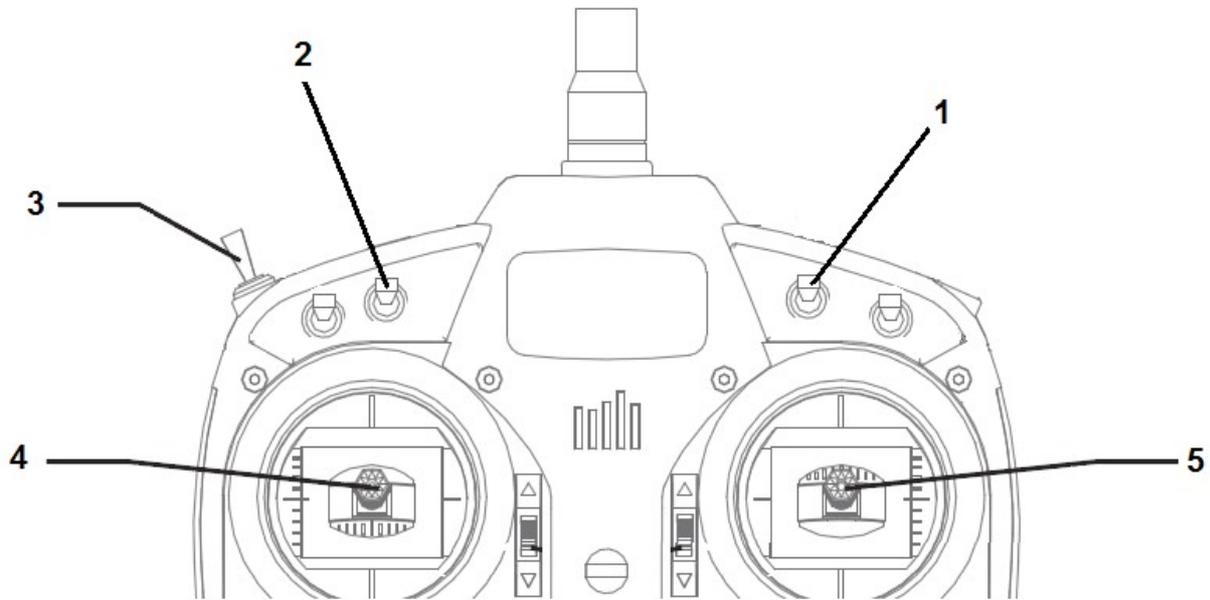


Abbildung 19: Remotefunktionen

5 Evaluierung

Ein großer Teil der Arbeit umfasst die Evaluierung der entwickelten Sensorfusion und Regelung. Zusätzlich wurden die Infrarot-Sensoren betrachtet, da diese einen Großteil der Sensorik umfassen.

5.1 Anordnung der Sensoren

Da die Werte der Sensoren möglichst genau sein sollen und vor allem keine großen Schwankungen enthalten dürfen, ist eine gute Anordnung der Sensoren unabdingbar.

Hierbei ist nur bei der Anordnung der beiden Infrarot-Sensoren darauf zu achten, dass sie sich nicht gegenseitig stören. Es wurden verschiedene Anordnungen getestet, um die letztendlich perfekte gegenseitige Anordnung zu finden.

An den Diagrammen und den Werten (siehe Anhang Kapitel [9.2 Anordnung der Sensoren](#)) erkennt man

- Die Empfänger sollten möglichst weit voneinander entfernt werden
- Eine Anordnung übereinander eignet sich besser als nebeneinander
- Eine diagonale Anordnung übereinander eignet sich am besten

5.2 Einfluss der Umwelt auf Ultraschall und Infrarot

Zur Höhenregelung wurden verschiedene Sensoren verwendet. Der Grund hierfür liegt in den unterschiedlichen Eigenschaften der Wertegewinnung der beiden Sensoren. Um dies nochmals besonders hervorzuheben, wurden Distanzmessungen auf verschiedene Untergründe und bei verschiedenen Störfaktoren mit Infrarot und Ultraschall durchgeführt.

5.2.1 Rauch

Bei diesem Versuch wurde in einem möglichst luftdichten Raum die Distanz zwischen Sensor und Wand bei 2 verschiedenen Zuständen gemessen. Der Zeitraum der Messung beträgt jeweils ca. 40 s.

- Ohne Rauch Es befindet sich kein Rauch im Messraum
- Viel Rauch Die Sichtweite beträgt unter 1 Meter

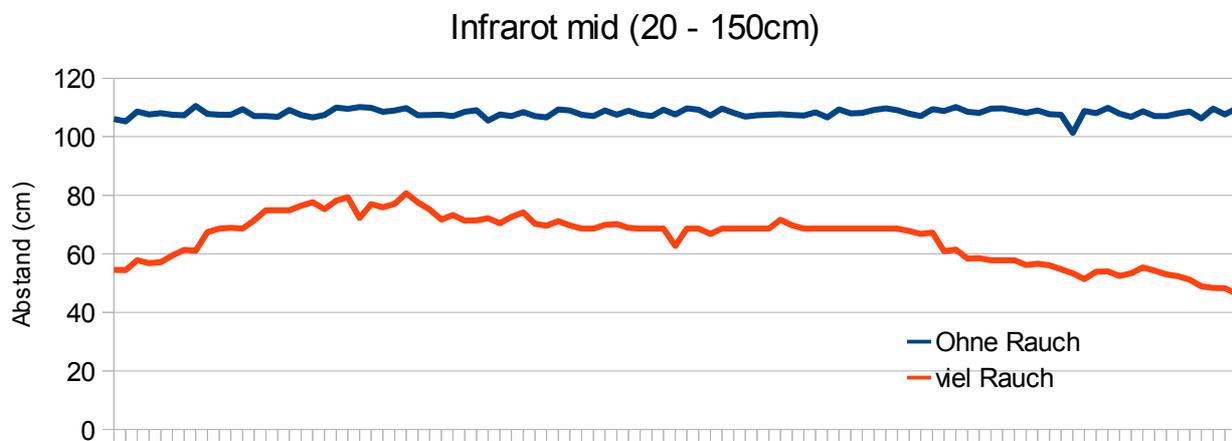


Abbildung 20: Störung durch Rauch - Infrarot Mid

Man erkennt, dass die Infrarot-Sensoren selbst bei geringen Rauch stark gestört werden. Dies liegt an der optischen Messweise der Sensoren. Die Strahlen werden durch die Rauchteilchen umgelenkt/aufgehalten, wodurch eine falsche Entfernungsmessung entsteht.

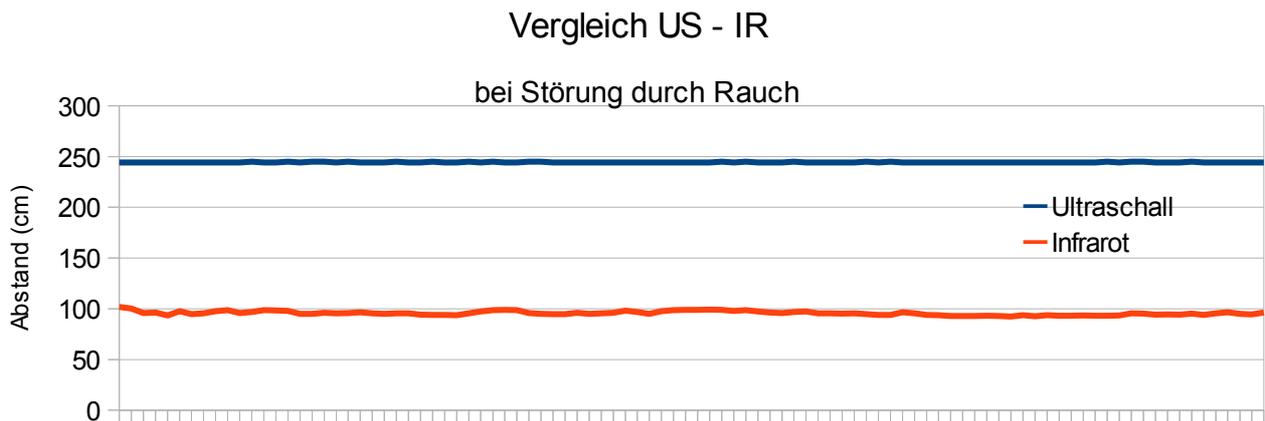


Abbildung 21: Störung durch Rauch - Vergleich US zu IR

Beim Vergleich der Beiden Sensorarten erkennt man sofort, dass nur die Infrarotsensoren durch den Rauch gestört werden, da die optischen Signale durch die Rauchteilchen stärker gestört werden, als die akustischen Signale des Ultraschallsensors, welche fast gar nicht gestört werden und somit die wahre Distanz repräsentieren.

5.2.2 Mensch

Bei diesem Versuch wurde der Abstand zu einem Menschen gemessen, der sich langsam vor und zurück bewegt hat.

Durch den Stoff (Kleidung) werden die Ultraschallwellen teils geschluckt, weswegen dieser vor Allem bei der Bewegung des Menschen große Probleme hat, den Abstand genau zu messen. Der Infrarotsensor hat im Gegensatz dazu fast keine Probleme.

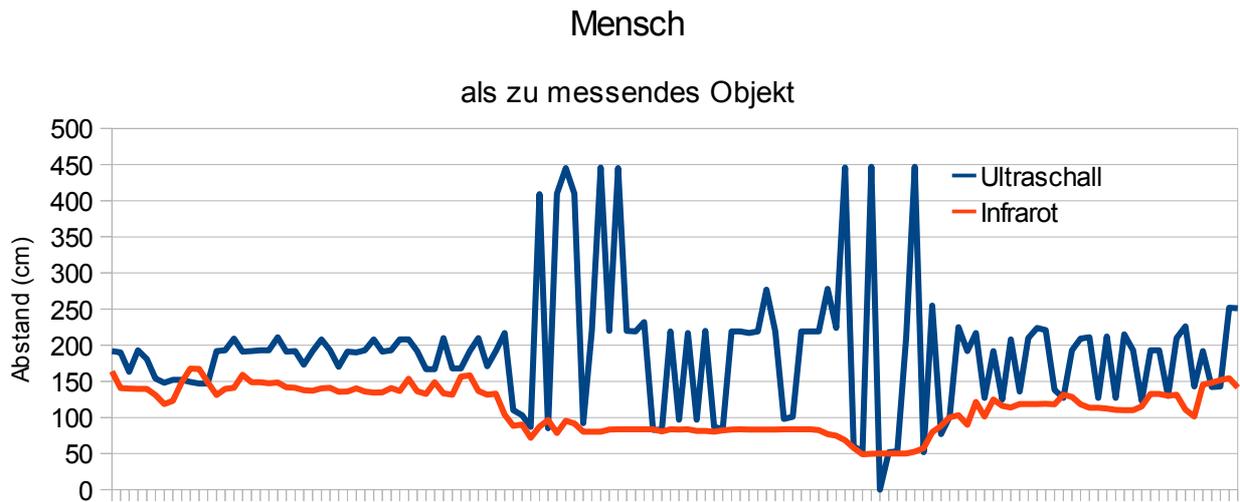


Abbildung 22: Distanzmessung zu Mensch

5.2.3 Schaumstoff

Bei der folgenden Messung wurde der Abstand zu einem welligen Schaumstoff gemessen, welcher auch in Tonstudios verbaut wird. Der wahre Abstand beträgt ca. 40 cm.

Wie erwartet, hat der Ultraschall-Sensor einen großen konstanten Messfehler, da seine Wellen von dem Material geschluckt werden. Der Infrarot-Sensor ist hingegen auf der richtigen Distanz, da seine Wellen nur minimal beeinflusst werden.



Abbildung 23: Distanzmessung zu Schaumstoff

5.2.4 Sonneneinstrahlung

Um festzustellen, ob der Infrarot-Sensor von der Sonneneinstrahlung beeinflusst wird, wurde ein fester Abstand (ca. 210 cm) zu einer Wand bei starker Sonneneinstrahlung und anschließend in einem abgedunkelten Raum gemessen.

Man sieht, dass die Sonneneinstrahlung starken Einfluss auf das Rauschen und den Offset des Sensors hat. Dies ist darin zu begründen, dass das Sonnenlicht auch Infrarotstrahlen beinhaltet und somit beim Sensor Messfehler verursacht.

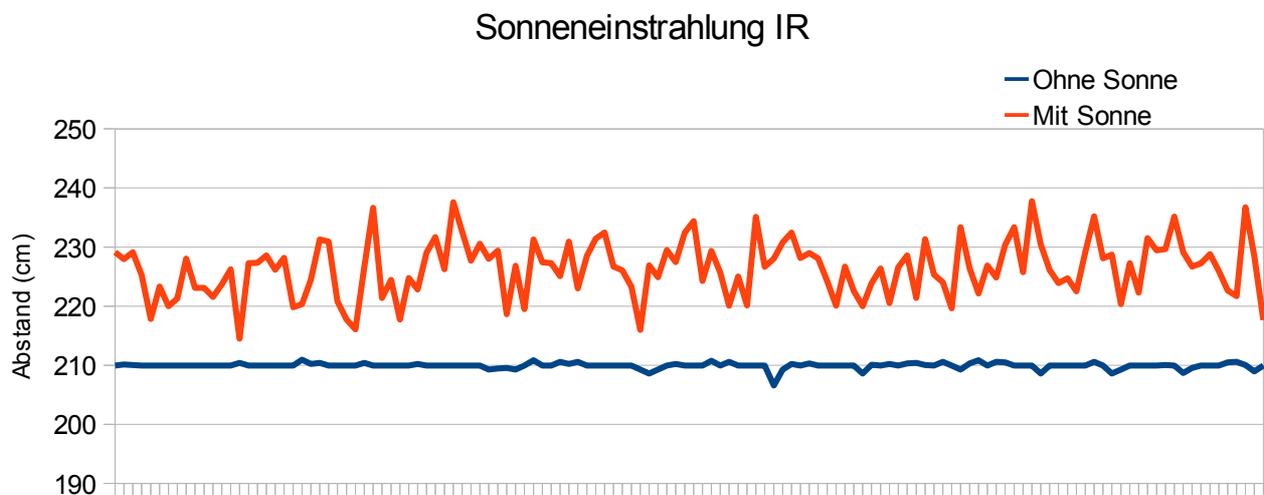


Abbildung 24: Störung durch Sonne

5.2.5 Wasser

Beim letzten Versuch wurde ein Becken mit Wasser befüllt und während der Messung zwischen Sensoren und Boden geschoben.

Aus diesem Versuch kann man sehen, dass zum einen der Ultraschall Sensor den Abstand zur Wasseroberfläche misst, während der Infrarot Sensor den Abstand zum Boden des Beckens misst. Zum Anderen ist deutlich zu erkennen, wie die Infrarot-Strahlen durch die Wellen des Beckens beeinflusst werden, die beim Hineinschieben des Beckens entstanden sind. Aufgrund der unterschiedlichen Brechindizes zwischen Wasser und Luft wird der Infrarotstrahl bei Wellengang gebrochen und verfälscht zurückgeworfen.

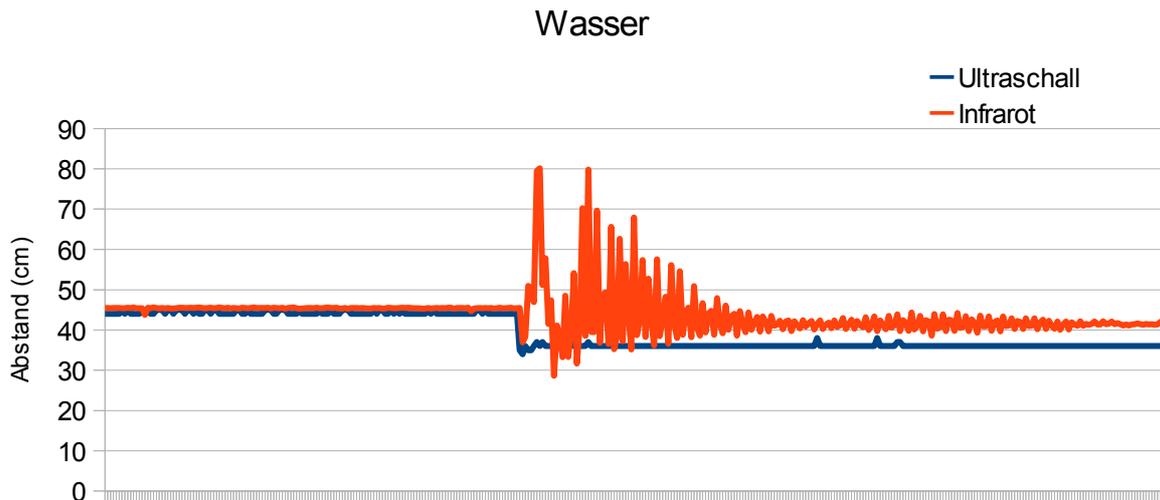


Abbildung 25: Distanzmessung zu Wasser

5.3 Sensorfusion

Die Evaluierung der Sensorfusion wurde während eines Indoorfluges mit ausgeschalteter Höhenregelung des Quadrocopters durchgeführt. Dabei muss die Sensorfusion einzeln angeschaut werden, da sie wie beschrieben aus zwei großen Teilen besteht. Es muss aber gesagt werden, dass die Daten aus beiden Grafiken aus derselben Messreihe stammen und es sich um Rohdaten (ungefiltert/gemittelt) handelt.

Zuerst werden die beiden Infrarotsensoren fusioniert. An dem Diagramm zu dieser Fusion sind folgende Punkte zu erkennen:

- Der Sensor zur Messung großer Abstände hat seine untere Grenze bei ca. 60 cm, der Sensor zur Messung kurzer Abstände seine obere Grenze bei 200 cm. Beide Grenzen liegen deutlich über den Angaben des Herstellers.
- Außerhalb der Geltungsbereiche spielen die Werte nicht in die Fusion ein
- Im Schnittbereich beider Sensoren werden sehr gute und nicht schwankende Werte erzielt

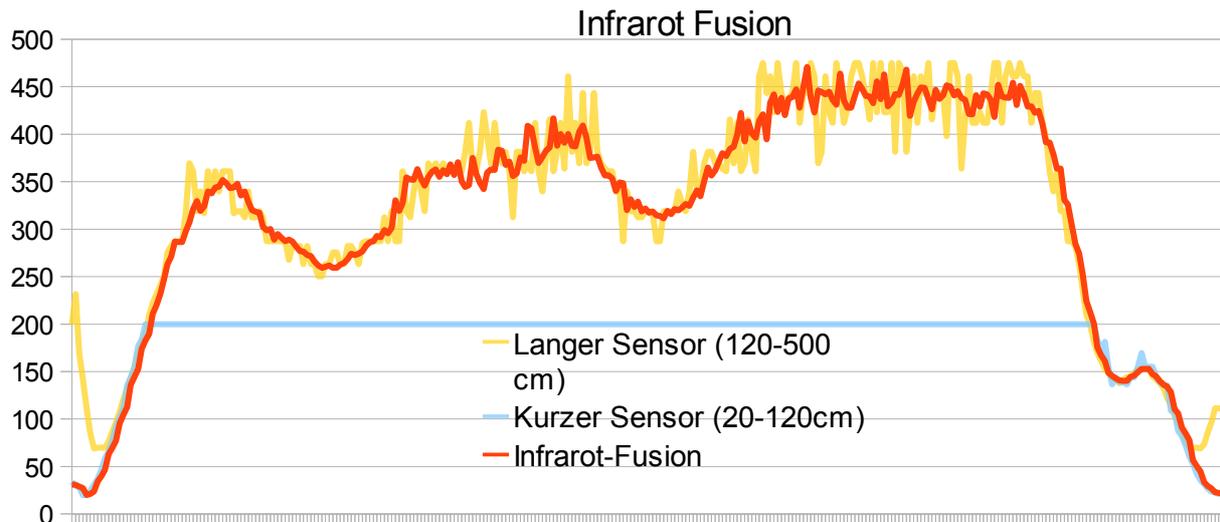


Abbildung 26: Sensorfusion - Infrarot

Anschließend wird der fusionierte Infrarotwert benutzt, um zusammen mit dem Ultraschallsensor fusioniert zu werden. Bei der Betrachtung der Daten kommt man zu folgenden Ergebnissen:

- Der Ultraschall-Sensor sendet ab einer Höhe von ca. 280cm keine nutzbaren Daten, folglich werden die Werte auch nicht von der Fusion benutzt
- Oberhalb dieser Höhe kann nur der Infrarot-Sensor verwendet werden, der teils sehr stark schwankende Daten liefert
- Im Bereich, in dem beide Sensoren funktionieren findet eine Sensorfusion statt, der fusionierte Wert liegt zwischen den beiden Werten



Abbildung 27: Sensorfusion

5.4 Höhenregler

Der Höhenregler wurde mit Hilfe eines optischen Trackingsystems evaluiert, welches mittels Infrarotkameras die exakten Positionsänderungen des Quadrocopters bestimmen kann.

Im ersten Versuch wurde der Copter direkt auf eine Höhe von ca. 160 cm geregelt, um einen Sprungstart zu simulieren. Es ist hierbei zu beobachten, dass die Einschwingphase (mit Sprungstart) ca. einen Zeitraum von 4 Sekunden braucht. Anschließend liegt der Quadrocopter relativ ruhig in der Luft. Der kurzzeitige Stabilitätsverlust im Zeitraum 67 – 71 s ist mit einer Schrägstellung des Copters zu erklären.

Mittlere Regelabweichung	3,39
Maximale Regelabweichung	11,69
Varianz	7,85

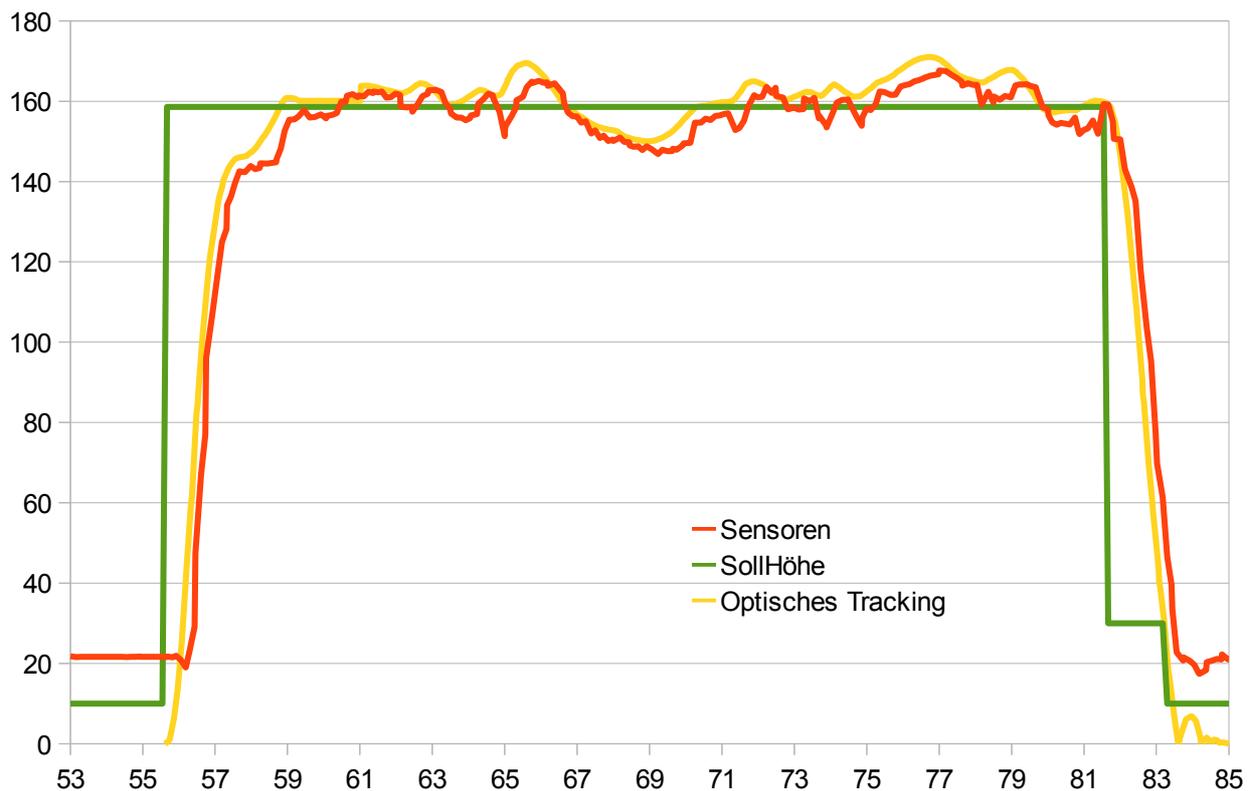


Abbildung 28: Höhenregelung - Sprungstart

Beim zweiten Versuch wurde zuerst ein Start auf 50 cm durchgeführt, um anschließend auf eine Höhe von ca. 130 cm weiterzusteigen. Hiermit sollte ein normaler Flug in einem Gebäude simuliert werden.

Beim Start auf die erste Höhe von 50 cm ist ein Überschwingen von ca. 5 cm (10% der Sollhöhe) zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die geplante Startregelung nicht implementiert wurde und sich der I-Anteil beim ersten Start erst einstellen muss. Nachdem dies geschehen ist, liegt der Quadcopter sehr ruhig in der Luft.

Nachdem die zweite Sollhöhe vorgegeben wird, dauert es wieder ca. 5 Sekunden bis sich der Copter auf die Höhe von 130 cm eingeschwungen hat. Im Vergleich zur ersten Sollhöhe liegt er hier sehr viel unruhiger in der Luft, was an den schlechteren Sensordaten liegt.

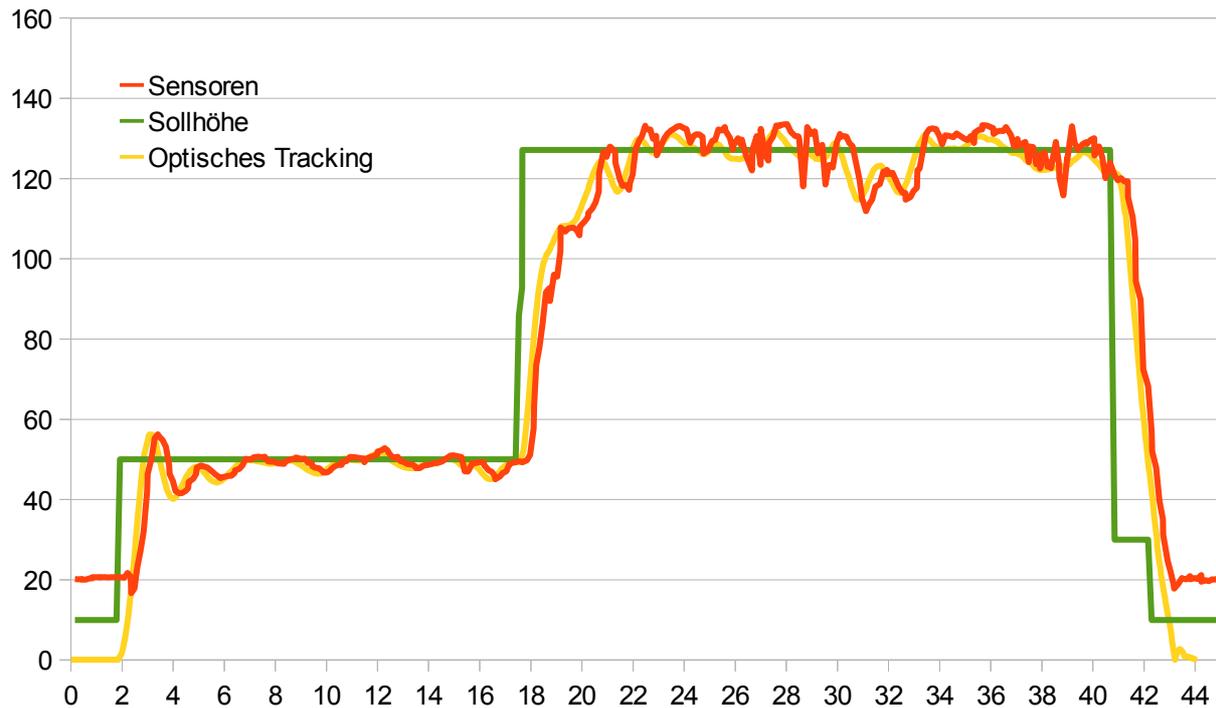


Abbildung 29: Höhenregelung - Evaluierung

5.5 Landeregelung

Auch der Landeregler wurde mit Hilfe des optischen Trackingsystems evaluiert. Allerdings gab es hier das Problem, dass dieses nur bis auf eine Höhe von 160 cm verlässliche Daten liefert. Somit musste die Landung aus der größtmöglichen Höhe von 300 cm vollständig mittels Sensordaten evaluiert werden.

An den Diagrammen ist zu erkennen, dass die Landung meist sehr sanft verläuft, wobei hier hinzugefügt werden muss, dass dies nur auf weichen Matten getestet wurde. Außerdem sieht man, dass die Dauer der Landung von der Anfangshöhe abhängt.

Höhe (cm)	50	120	200	300
Dauer der Landung (s)	2	2,5	3	3,5

Zusätzlich kann entnommen werden, dass die Sensordaten ab einer Höhe von ca. 20 cm keine verlässlichen Daten mehr senden, was an den unteren Messwertgrenzen der Sensoren liegt. Außerdem hängen die Werte allgemein hinterher, da sie durch einen Mittelwertfilter laufen.

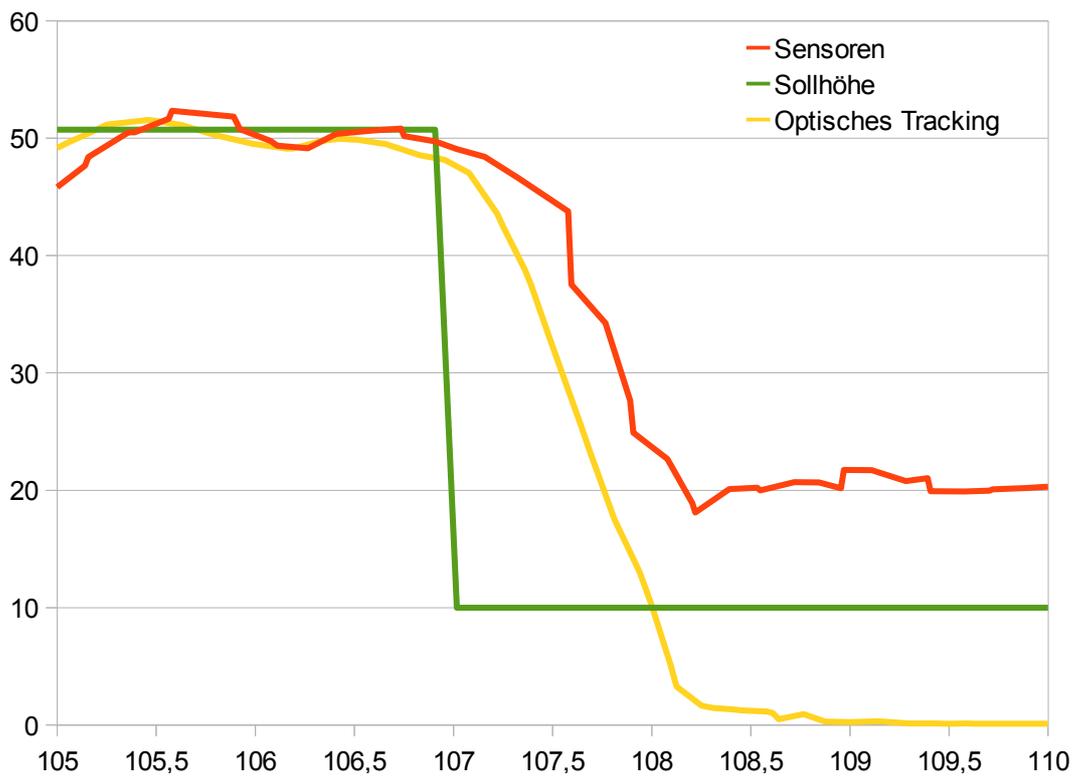


Abbildung 30: Landeregelung - Evaluierung (50cm)

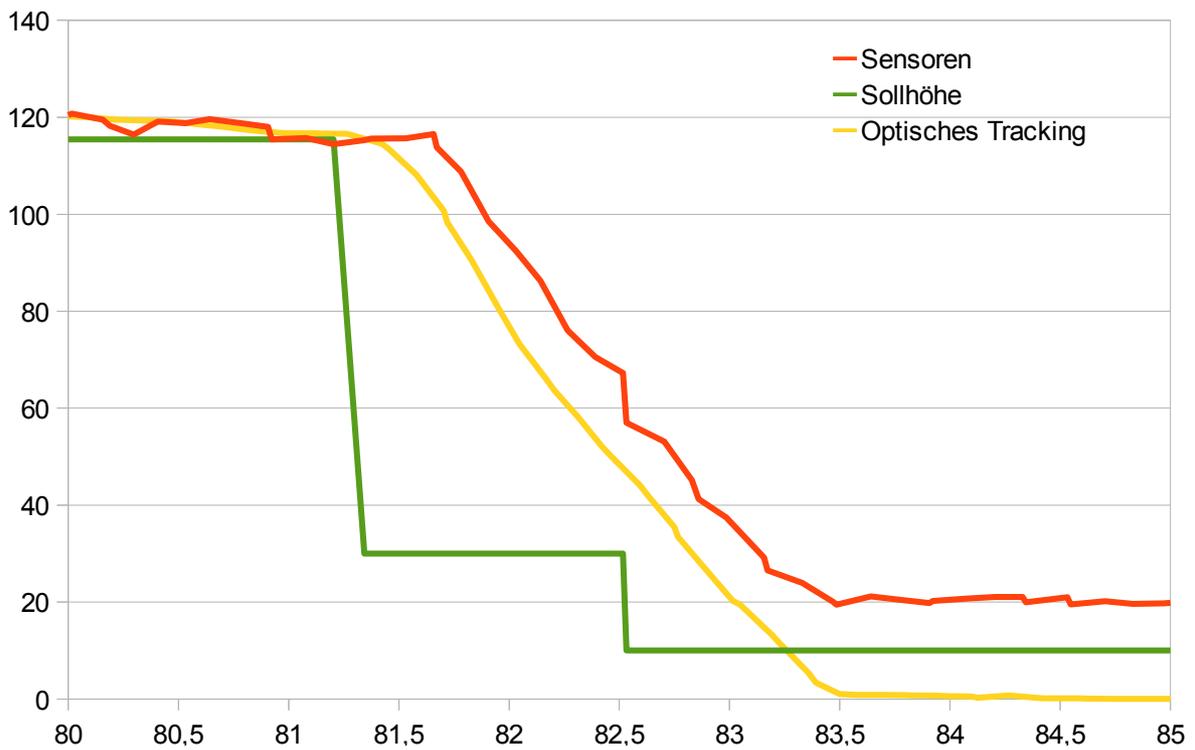


Abbildung 31: Landeregelung - Evaluierung (120cm)

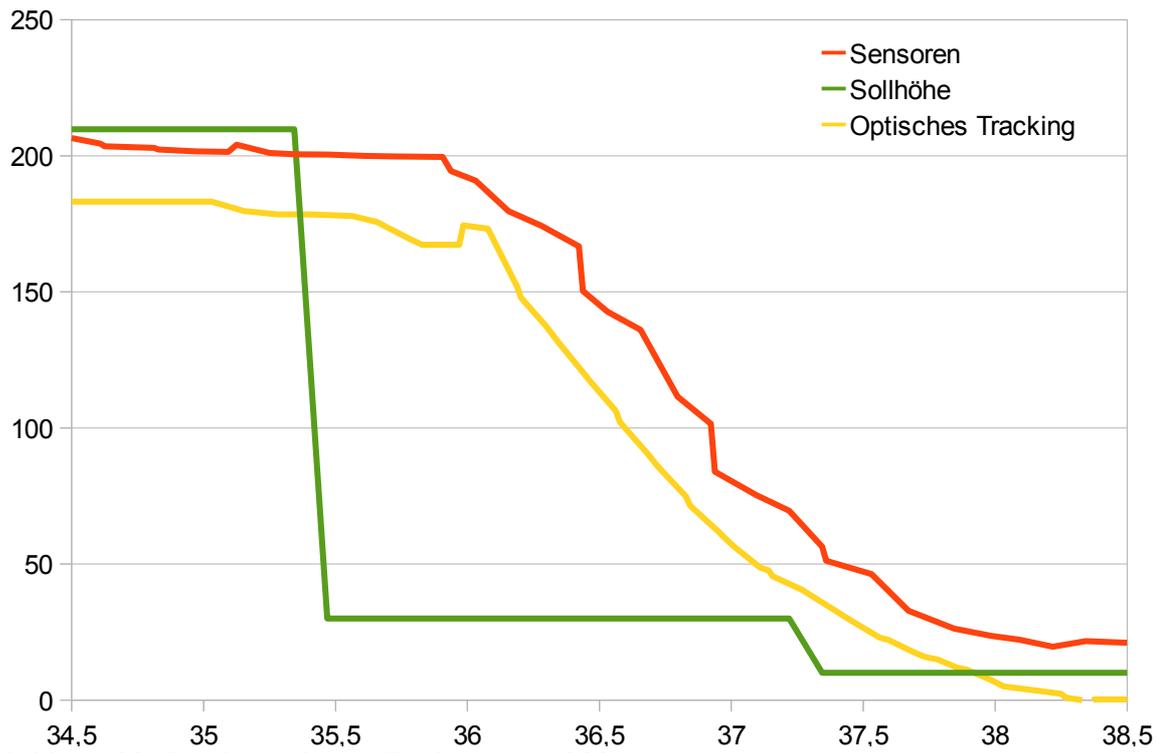


Abbildung 32: Landeregelung - Evaluierung (200cm)

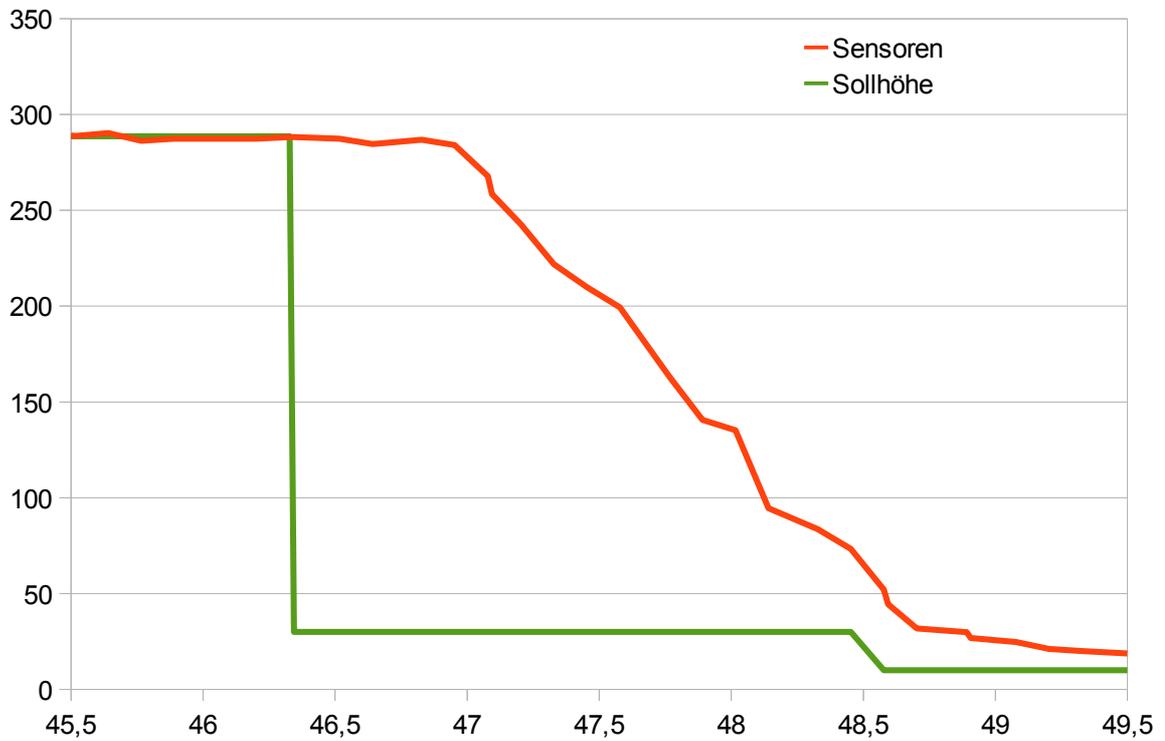


Abbildung 33: Landeregelung - Evaluierung (300cm)

5.6 Treppenflug

Um das gesamte System zu evaluieren wurde eine Treppe als Beispiel aus dem späteren Einsatzgebiet genutzt.

Zum einen ist hier ganz deutlich zu erkennen, wo der spätere Nutzen des Luftdruck-Sensors liegt, da dieser eine absolute Höhe zum Startpunkt misst. Somit könnte dieser eingesetzt werden, um festzustellen, dass sich das Stockwerke geändert hat. Dies ist wichtig, da sonst beim Mappen eines Gebäudes nur ein Stockwerk aufgezeichnet werden könnte.

Außerdem ist an der fusionierten Höhe zu erkennen dass der Quadrocopter zwischenzeitlich sehr nahe an den Boden kommt. Dies liegt daran, dass sich die Sensoren in der Mitte des Aufbaus befinden. Der Treppenflug darf also nicht zu schnell durchgeführt werden, da die Sensoren sonst nicht schnell genug die richtigen Daten liefern.

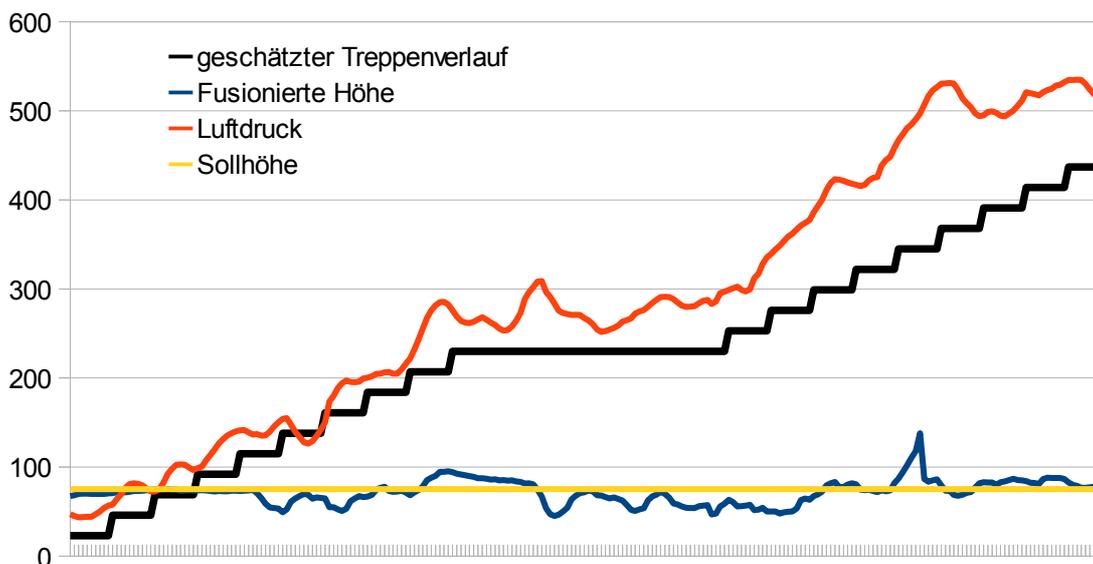


Abbildung 34: Evaluierung - Treppenflug

6 Diskussion und Ausblick

Aus der Evaluierung ist zu erkennen, dass mit den letztendlich gewählten Sensorarten ein gutes Ergebnis erreicht wird, wenn man bedenkt, dass der Quadrocopter seine Sensoren on Board mit sich führt. Es ist allerdings anzumerken, dass durch die Verwendung von zwei Infrarotsensoren eine große Problematik ausgelöst wird. Das zufriedenstellende Gesamtergebnis kann allerdings nur durch eine passende Anordnung, Filterung und komplexe Fusion der einzelnen Sensorwerte erzielt werden. Insgesamt hat es sich weiterhin als großes Problem dieser Arbeit dargestellt, dass die Sensoren jeweils eingeschränkte Bereiche haben, in denen sie arbeiten können. Diese Bereiche werden noch weiter eingeschränkt, wenn die äußeren Umstände ungünstig sind. Überdies muss darüber nachgedacht werden, ob es sinnvoll ist, sich darauf zu konzentrieren, jederzeit auf plötzlich auftauchende Oberflächen reagieren zu können, da dadurch gleichzeitig eine Instabilität im System entsteht.

Diese Sensorbereiche führen auch zu einer unruhigen Höhenregelung, sobald sich die Bereiche der Sensoren nicht mehr überschneiden. Im Allgemeinen wird die Höhenregelung immer unruhiger, je höher der Quadrocopter steigt. Dies wird besonders ab einer Höhe von ca. 250 cm sichtbar, da ab dieser Höhe nur noch auf die Werte des Infrarotsensors zurückgegriffen werden kann, der für die Messung größerer Weiten ausgelegt ist. In geringerer Höhe funktioniert die Höhenregelung allerdings sehr stabil. Bei der Landeregulierung erkennt man, dass diese den Quadrocopter aus den einstellbaren Höhen (50 cm bis zu 300cm) stabil und sicher auf den Boden bringt. Allerdings hängt die Qualität der Landung von der Anfangshöhe ab, da während des Endanfluges keine wirkliche Höhenregelung verwendet wird.

Bei der Erarbeitung des Konzepts und der Implementierung, sowie bei der Evaluierung haben sich einige Themenpunkte aufgetan, die zur Verbesserung des Systems beitragen könnten.

Da der Quadrocopter im späteren Einsatz vor allem indoor aktiv sein wird, muss daran gedacht werden, dass auch der Abstand zur Decke eine wichtige Rolle spielt. So könnte mit geringem Aufwand die Sensorik auch oberhalb angebracht werden, um jederzeit den Abstand zur Decke zu messen. Da dieser Abstand allerdings nicht zur Höhenregelung dienen soll, würde ein einziger Sensor (beispielsweise Infrarot) reichen, um bei zu geringem Abstand sofort eine Warnung zu geben. Weiterhin entstehen teils dadurch Probleme, dass die Sensorik nur in der Mitte des Copters angebracht wurde. So werden Objekte die (wie in 4.2.Sensorfusion, Abbildung 17 beschrieben) plötzlich auftreten zu spät erkannt. Mit kleinen Abstandssensoren an den Auslegern könnten diese Hindernisse schneller erkannt und eine Kollision so vermieden werden.

Außerdem könnte das Konzept der Luftdrucksensoren überarbeitet werden, da diese bei einer

höheren Genauigkeit auch im Indoorbereich zur Höhenregelung verwendet werden könnten. Hierzu müsste ein analoger Sensor verwendet werden, dessen Genauigkeit groß genug ist. Zusätzlich müsste der gewünschte Druckbereich mittels einer Schaltung mit Operationsverstärkern eingestellt werden, damit der ADC selbst geringe Druckunterschiede erkennen kann (vgl. [MC01]). Eine andere Möglichkeit wäre, einen besseren ADC zu verwenden, welcher eine größere Auflösung hat.

Bei den Infrarotsensoren kann bei Verwendung von mehreren Sensoren darüber nachgedacht werden, die Sensoren zu triggern (An und Ausschalten), dass diese sich nicht mehr gegenseitig stören. Weiterhin könnte der aktuelle Neigungswinkel in die Sensorfusion der Infrarot-Sensoren mitaufgenommen werden. So würde aus den Werten der Sensoren, trotz ihres geringen Sendekegels eine wahre Höhe berechnet werden.

Die Landeregulation könnte mit Hilfe von optischen Kamerasystemen insofern erweitert werden, dass der Quadrocopter auf einem bestimmten Punkt landet. Dieser könnte hierbei vorher festgelegt werden und beispielsweise ein rotes Kreuz auf dem Boden sein, welches dann zuerst gesucht und bei erfolgreicher Suche angefliegen wird. So wäre beispielsweise auch die Landung auf sich bewegenden Objekten, wie Fahrzeugen oder Ähnlichem möglich. In [GWR09] wird so ein System umgesetzt.

7 Literaturverzeichnis

- AQI8: Nils Gageik, Sergio Montenegro, AQopterI8, 2012, <http://www8.informatik.uni-wuerzburg.de/wissenschaftsforschung/aqopteri8>
- MeJ: Johannes Meyer, Indoornavigation eines Quadcopters, 2010, <http://bopus.haw-hamburg.de/volltexte/2010/1053/pdf/thesis.pdf>
- GDR01: Manfred Berger, Grundkurs der Regelungstechnik, 2001, Seiten 116 - 138
- AutS00: Hans-Jürgen Gevatter, Automatisierungstechnik 1: Meß- und Sensortechnik, 2000
- MRO02: Ulrich Nehmzow, Mobile Robotik: Eine praktische Einführung, 2002
- SEN98: Werner Eißler , Praktischer Einsatz von berührungslos arbeitenden Sensoren, 1998, Seiten 163-172
- SENB07: Jörg Barrho, Sensor- und bildverarbeitungsgestützte Erkennung von Gefahrensituationen , 2007, Seiten 15-25
- AP00: Datasheet - Bosch BMP085, Digital Pressure Sensor,
- MDF08: Martin E. Liggins, David L. Hall, James Llinas, Handbook of Multisensor Data Fusion: Theory and Practice, 2008
- PET08: Piotr Esden-Tempski, Positionsbestimmung und -regelung für das autonome Landen eines Quadropters auf einer Basisstation, 2008, <http://www.esden.net/content/quadrocopter/bat.pdf>
- RN00: Roboter Netz, Wissen, 2012, <http://www.rn-wissen.de>
- IRS00: Datasheet - Sharp Infrared, GP2Y0A02,
- MC01: Ingo Busker, Holger Buss, Mikrocopter Höhenregeler, 2012, <http://www.mikrocopter.de/ucwiki/Höhensensor>
- GWR09: Florian Adolf, Franz Andert, Sven Lorenz, Lukas Goormann, Jörg Dittrich, An Unmanned Helicopter for Autonomous Flights in Urban Terrain, 2009
- MCO00: Ingo Busker, Holger Buss, Mikrocopter.de, 2012, <http://www.mikrocopter.de>

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Physikalisches Kräftesystem.....	7
Abbildung 2: PID-Regler - Vergleich.....	8
Abbildung 3: Infrarot-Sensor: Funktionsweise.....	10
Abbildung 4: Ultraschall - Timing Diagram.....	11
Abbildung 5: Ultraschall: Kegelförmige Wellenausbreitung.....	11
Abbildung 6: Zusammenhang Luftdruck - Höhe.....	12
Abbildung 7: Gesamtkonzept.....	16
Abbildung 8: Anordnung der Sensorik.....	18
Abbildung 9: Flowchart - Sensorfusion.....	19
Abbildung 10: Weighted Sensor Fusion.....	20
Abbildung 11: Höhenregelung - Regelkreis.....	22
Abbildung 12: Flowchart: Startregelung.....	23
Abbildung 13: Automatisches Landen: Erwartete Kurve.....	24
Abbildung 14: Infrarot: Verlaufskurve Sharp GP2Y0A02 [IRS00].....	26
Abbildung 15: Luftdruck - Beispiel zur I2C Kommunikation [AP00].....	27
Abbildung 16: Luftdruck - Berechnung[AP00].....	28
Abbildung 17: Spezifikation Mittelwertfilter.....	29
Abbildung 18: Sensorfusion - Problem mit Hindernis.....	31
Abbildung 19: Remotefunktionen.....	35
Abbildung 20: Störung durch Rauch - Infrarot Mid.....	37
Abbildung 21: Störung durch Rauch - Vergleich US zu IR.....	38
Abbildung 22: Distanzmessung zu Mensch.....	38
Abbildung 23: Distanzmessung zu Schaumstoff.....	39
Abbildung 24: Störung durch Sonne.....	40
Abbildung 25: Distanzmessung zu Wasser.....	41
Abbildung 26: Sensorfusion - Infrarot.....	42
Abbildung 27: Sensorfusion.....	43
Abbildung 28: Höhenregelung - Sprungstart.....	44
Abbildung 29: Höhenregelung - Evaluierung.....	45
Abbildung 30: Landeregelung - Evaluierung (50cm).....	46
Abbildung 31: Landeregelung - Evaluierung (120cm).....	46
Abbildung 32: Landeregelung - Evaluierung (200cm).....	47
Abbildung 33: Landeregelung - Evaluierung (300cm).....	47

Abbildung 34: Evaluierung - Treppenflug.....	48
Abbildung 35: RPY-Modell eines Quadrocopters.....	54
Abbildung 36: Sensoranordnung - Ungestörter Empfang.....	56
Abbildung 37: Sensoranordnung - Nebeneinander ESSE.....	56
Abbildung 38: Sensoranordnung – Nebeneinander SEES.....	57
Abbildung 39: Sensoranordnung - Gekreuzt.....	57
Abbildung 40: Sensoranordnung – Übereinander Diagonal.....	58
Abbildung 41: Sensoranordnung – Übereinander Parallel.....	58

9 Anhang

9.1 Funktionsweise Quadrocopter

Wie beim Helikopter, entsteht beim Quadrocopter der Auftrieb durch 4 Rotoren. Im Gegensatz zum Helikopter, bei dem ein Rotor für den Schub und einer für den Ausgleich des Drehmoments dient, liegen alle 4 Rotoren in derselben Ebene. Folglich zeigen auch ihre Schubvektoren in dieselbe Richtung. Um kein Drehmoment zu erzeugen sind hierfür jeweils die 2 gegenüberliegenden Rotoren gleich drehend. In Abbildung 1 sind somit beispielsweise die Rotoren 1 und 3 rechtsdrehend und die Rotoren 2 und 4 linksdrehend.

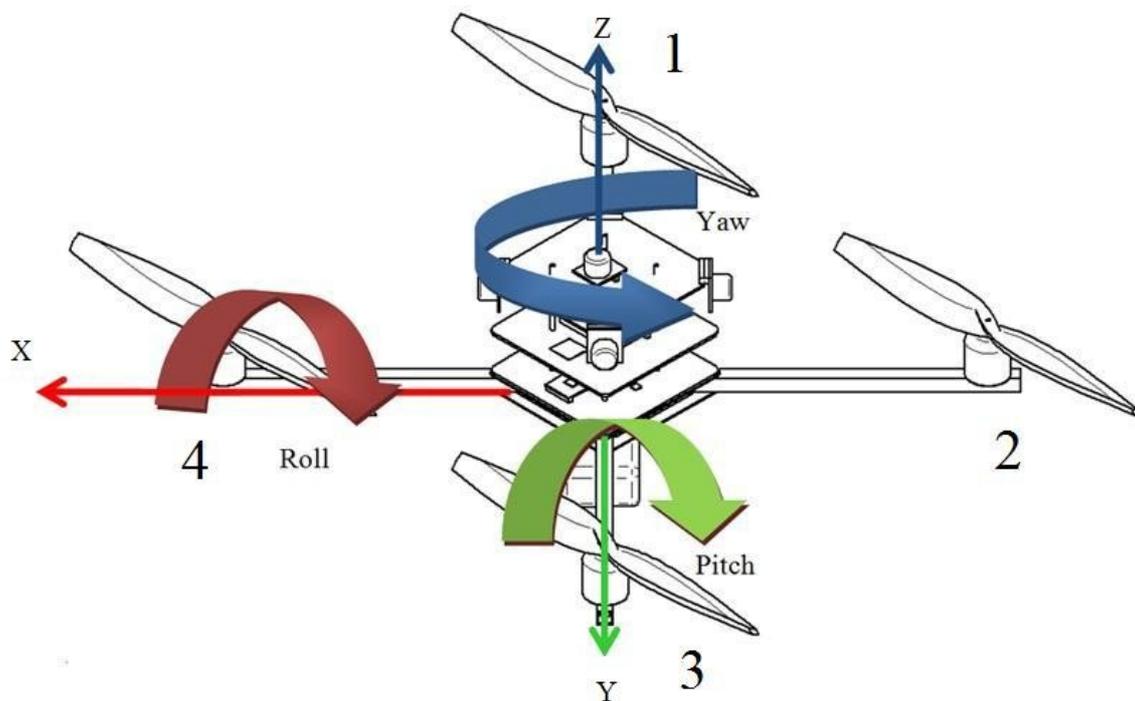


Abbildung 35: RPY-Modell eines Quadrocopters

Da das Flugsystem allgemein instabil ist, muss im Gegensatz zu anderen Systemen, die Lage im Raum kontinuierlich geregelt werden. Hierfür kann lediglich die Drehzahl der Rotoren verwendet werden. Ein Quadrocopter besitzt 3 Drehrichtungen, die folgend benannt sind:

- Pitch: In der Abbildung müsste hierfür Rotor 4 stärker/schwächer drehen als Rotor 2
- Roll: In der Abbildung müsste hierfür Rotor 3 stärker/schwächer drehen als Rotor 1
- Yaw: In der Abbildung müssten hierfür die Rotoren 1/3 zusammen stärker/schwächer drehen als die Rotoren 2/4

Somit können über die Rotoren lediglich die 3 Drehrichtungen und die Höhe (bzw. Z-Richtung)

geregelt werden. Die anderen beiden der 6 Freiheitsgrade des Copters müssen über Änderung. Um die Lage bezüglich der X- oder Y-Achse zu ändern müssen folglich die Anstellwinkel in die jeweilige Richtung geändert werden.

Um die Lage im Raum festzustellen, benutzen solche System meist Beschleunigungs- und Drehratensensoren, aus welchen die Lage in Quaternionen berechnet werden kann.

Weiterführende Informationen zu den Grundlagen des Quadrocopters findet man in [MCO00]

9.2 Anordnung der Sensoren

9.2.1 Versuchsaufbau

Der Abstand des Sensors zur Wand wurde konstant auf 60 cm belassen. Lediglich die Ausrichtung zu dem störenden Sensor wurde verändert. Nach jeder Änderung der Ausrichtung wurde der Abstand von Sensor zur Wand und zwischen den Sensoren gemessen.

Der Messzeitraum beträgt in allen Diagrammen 150 Messung, wobei alle 25 ms eine Messung durchgeführt wurde -> $150 \cdot 0.025 = 3.75s$

Legende:

S
E

 - Sender
- Empfänger

9.2.2 Ungestörter Fall

Um einen Vergleichswert zu haben, wurde zuerst der Sensor ohne störenden Sensor gemessen. Man sieht, dass trotzdem leichte Schwankungen auftreten. Diese sind auf die analoge Messmethode zurückzuführen sind, durch welche Rauschen entstehen kann.

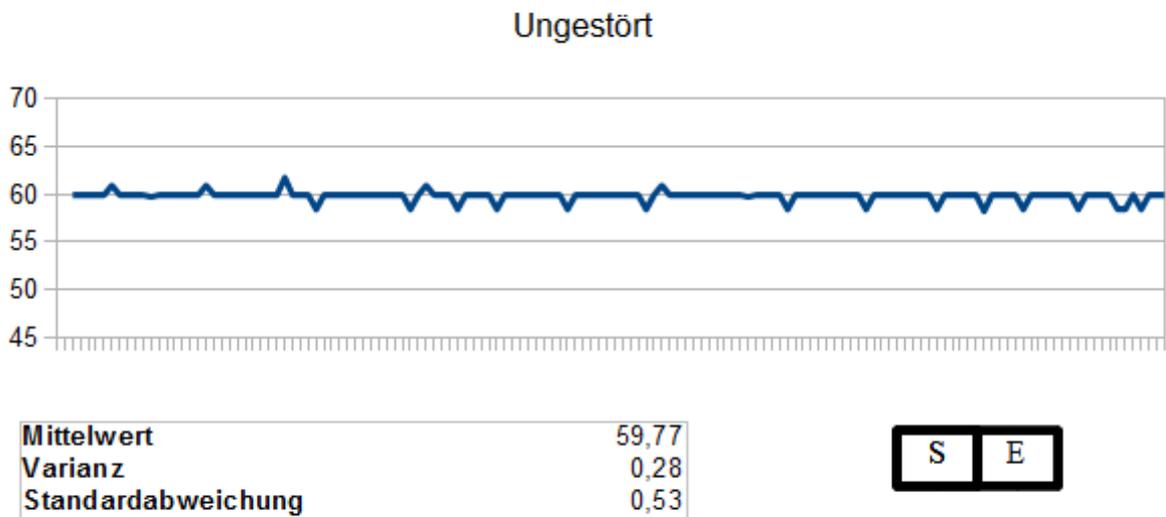


Abbildung 36: Sensoranordnung - Ungestörter Empfang

9.2.3 Nebeneinander

Anschließend wurde der störende Sensor neben den zu messenden Sensor angebracht. Man sieht, dass durch diese Anordnung starke Störungen ausgelöst wurden.

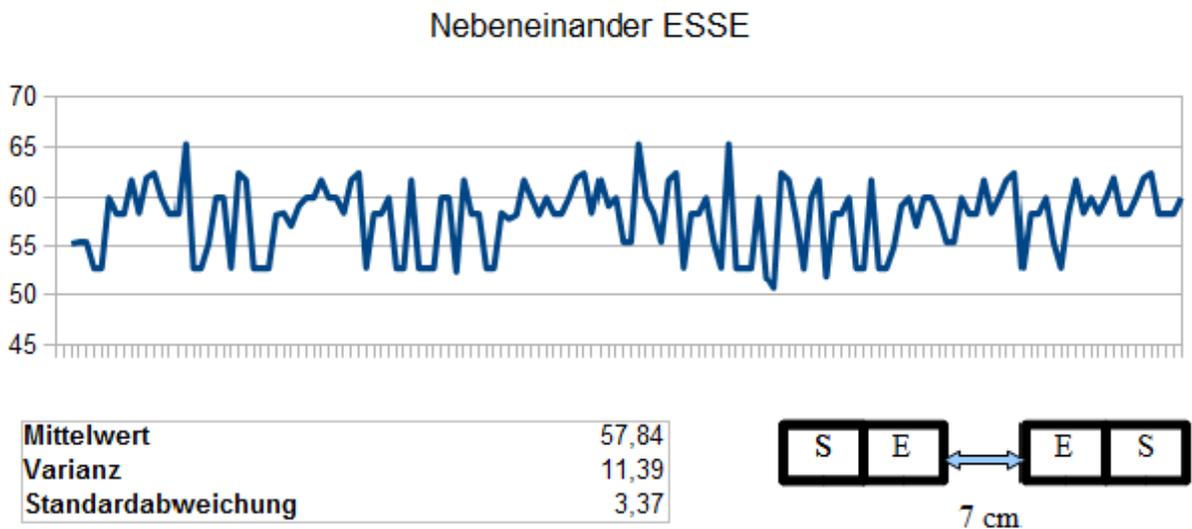


Abbildung 37: Sensoranordnung - Nebeneinander ESSE

Nebeneinander SEES

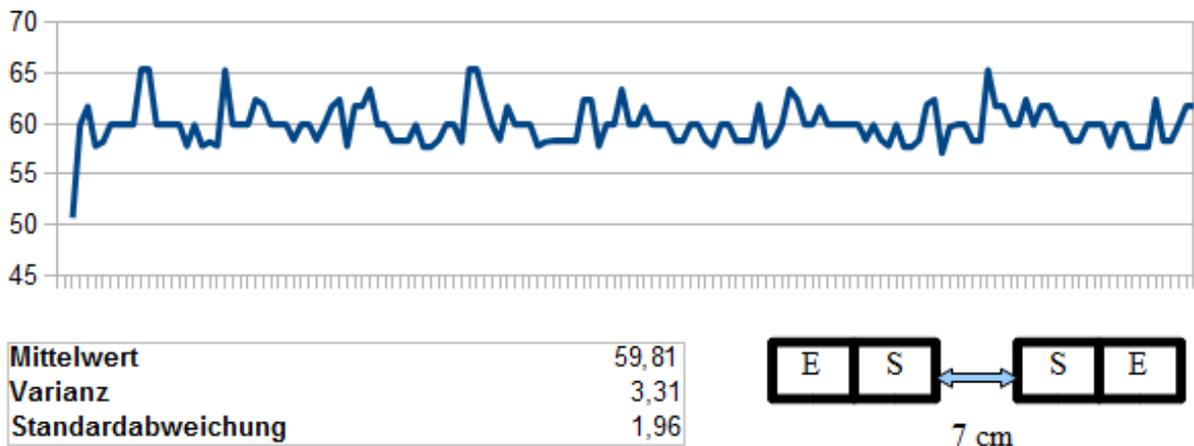


Abbildung 38: Sensoranordnung – Nebeneinander SEES

9.2.4 Gekreuzt

Die gekreuzte Anordnung zeigt die deutlichsten Abweichungen von der wahren Distanz, da hier die Strahlen des störenden Sensors offenbar genau auf den gemessenen Empfänger gelenkt werden.

Gekreuzt

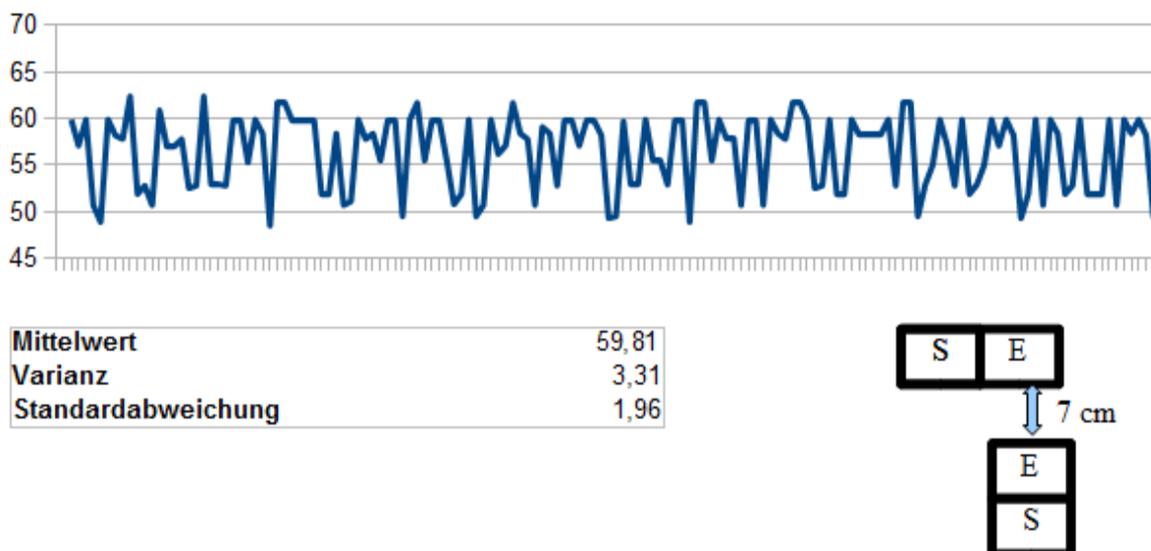


Abbildung 39: Sensoranordnung - Gekreuzt

9.2.5 Übereinander

Wie zu erwarten, liefert der Sensor bei Anordnung übereinander wesentlich bessere Daten, da bei dieser die Sende-Impulse nicht vom Empfänger des anderen Sensors empfangen werden. Durch Vergleich der Varianz und Standardabweichung der Werte erkennt man zusätzlich, dass sich die Anordnung diagonal zu einander am Besten eignet.

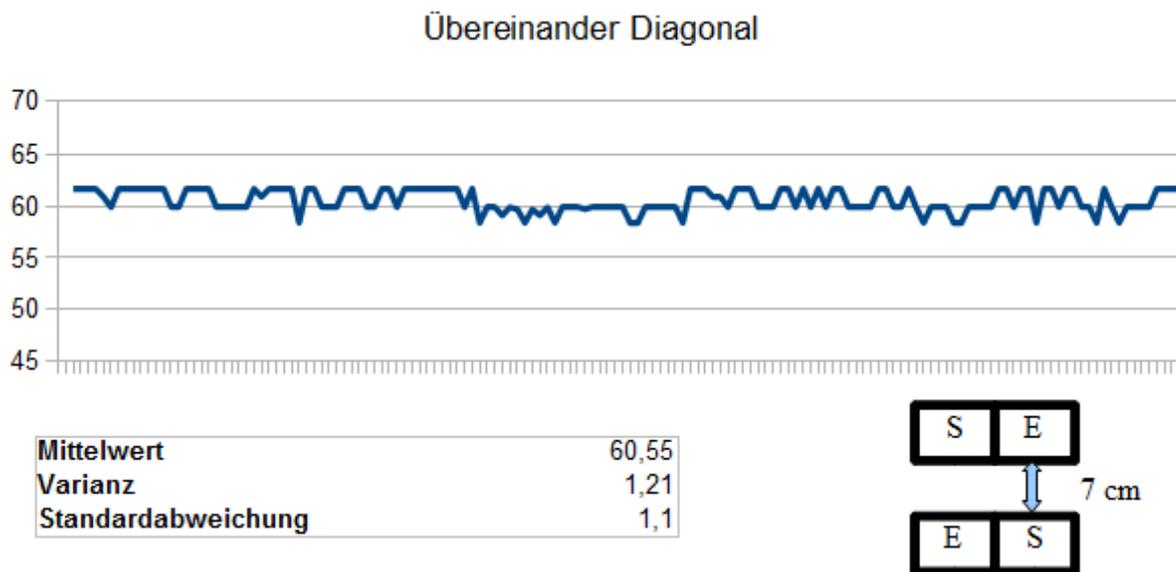


Abbildung 40: Sensoranordnung – Übereinander Diagonal

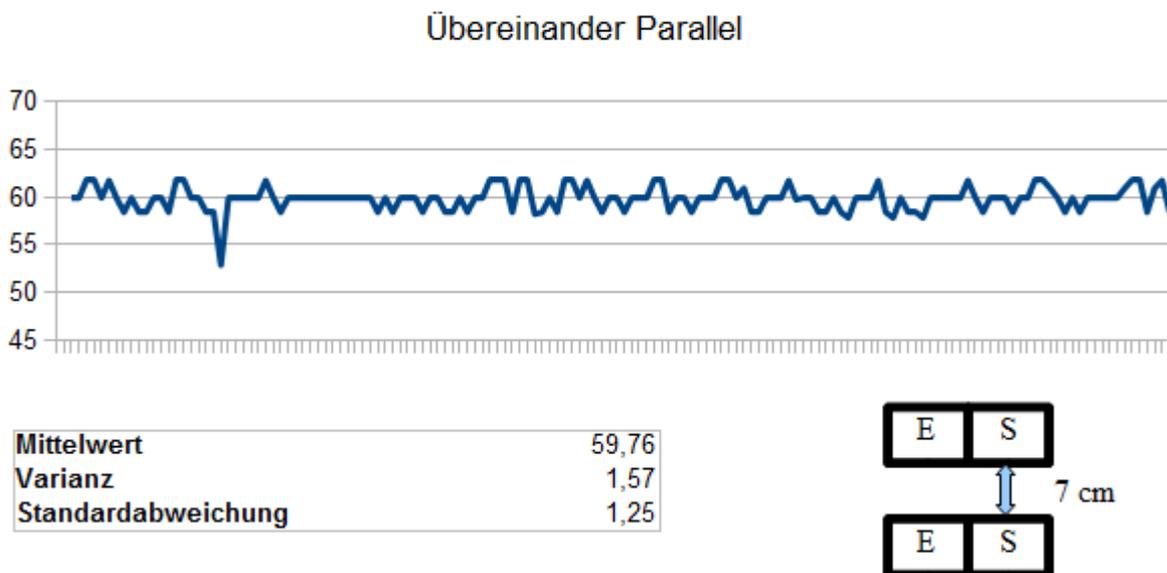


Abbildung 41: Sensoranordnung – Übereinander Parallel