

Informationstechnik für Luft- und Raumfahrt

Lehrstuhl für Informatik 8

Prof. Dr. Sergio Montenegro



Bachelorarbeit

Optimierung einer magnetischen
Orientierungskompensation
durch Magnetfeldfehlererkennung

Vorgelegt von
Matthias Bethge
Matr.-Nr.: 1797691

Prüfer:

Prof. Dr. Sergio Montenegro

Betreuer wissenschaftlicher Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Nils Gageik

Würzburg, 13. 01. 2014

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, 13. 01. 2014

Matthias Bethge

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 Indoor-Betrieb 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.

Das aktuelle System verwendet Accelerometer und Gyroskop und kann damit stabil fliegen und seine Orientierung halten. Jedoch kann die Gierachse (Rotationen um die z-Achse) nicht durch den Accelerometer stabilisiert werden. Dadurch führen Fehler zu einem Drift des Systems um die z-Achse. Um dies zu kompensieren soll ein Magnetsensor verwendet werden. Magnetsensoren sind jedoch sehr fehleranfällig.

Das zu betrachtende Hauptproblem ist die Tatsache, dass das Erdmagnetfeld in Gebäuden aufgrund ferromagnetischer Materialien nicht homogen ist. Diese passiven, ortsabhängigen Änderungen des Magnetfelds sollen primär adressiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Verfahren zur Fehlerkompensation von Magnetsensoren zur verbesserten Orientierungsbestimmung implementiert und an dem realen System evaluiert werden. Dabei soll auf bestehende Lösungen wie die Gierkompensation durch einen Magnetsensor ohne Magnetfeld-Fehlerkompensation aufgebaut werden. Schwerpunkt der Arbeit wäre demnach die Fehlererkennung von Magnetsensorwerten durch Zuhilfenahme der Orientierung und Messungen aus Gyrometer und Accelerometer, des Betrages des Magnetfeldvektors oder basierend auf anderen Verfahren (Literatur).

Zunächst sind durch eine umfangreiche Literaturrecherche Lösungsansätze zur Fehlerkompensation bei Magnetsensoren zusammenzutragen. Im nächsten Schritt ist ein Verfahren zur Fehlerkompensation zu entwickeln und zu optimieren. Zur Aufgabe gehört eine ausführliche Evaluation unter realistischen Bedingungen. Dazu ist der Code in die bestehende Quadrocopter-Software zu integrieren und im Flug zu erproben. Die Arbeit ist zu dokumentieren.

Aufgabenstellung (Stichpunktartig):

- Überblick Stand der Technik: Orientierungsbestimmung mit Magnetsensoren (9 DOF)
Stichwörter: AHRS, INS (9 DOF IMU)
- Implementierung Fehlerkompensation
- Integration in bestehendes System
- Evaluierung am fliegenden System
- DokumentationZusammenfassung

Zusammenfassung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Entwicklung eines erdmagnetfeldbasierten Orientierungsverfahrens, für ein Quadrocopter-System, dass im Rahmen des *AQopterI8*-Projektes, an der Julius-Maximilians-Universität in Würzburg entwickelt wird. Das Verfahren soll dabei die Nachteile der alleinigen Orientierungsbestimmung durch ein Gyroskop, bei Rotationen um die sog. Gier-Achse, ausgleichen. Dazu wird der Erdmagnetfeld-Vektor, unter Verwendung eines Magnetsensors gemessen, um daraus die Orientierung des Quadrocopters, relativ zum Erdmagnetfeld berechnen zu können. Kern des Verfahrens bildet dabei ein Filter zur Fusionierung von Gyroskop und Magnetsensor, bei gleichzeitiger Erkennung und Kompensation magnetische Störfelder. Der Filter wird auf einem Mikrocontroller ausgeführt. Da es verschiedene Arten von magnetischen Störungen gibt, welche sich außerdem unterschiedlich auswirken, sind multiple Kriterien zur Magnetfeld-Fehlererkennung implementiert. Weiterhin wurden ausführliche Versuche unter verschiedenen Bedingungen, für den entwickelten Filter durchgeführt und evaluiert.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Grundlagen und Stand der Wissenschaft	2
2.1.	Orientierung im Raum	2
2.1.1.	Inertiale Navigation	2
2.1.2.	Bestimmung der Orientierung	3
2.1.3.	Eulerwinkel	4
2.1.4.	Quaternionen	6
2.2.	Magnetfelder	8
2.2.1.	Allgemein	8
2.2.2.	Das Erdmagnetfeld	8
2.2.3.	Magnetische Materialien	10
2.3.	Magnetsensor	11
2.3.1.	Allgemein	11
2.3.2.	Hallsensor	12
2.3.3.	Magneto-Resistiver Sensor	13
2.3.4.	Fluxgate-Sensor	14
2.4.	Gyroskop	15
2.4.1.	Allgemein	15
2.4.2.	Drift des Gyroskops	16
2.5.	Kalibrierung der Sensoren	17
2.5.1.	Kalibrieren des Magnetometers	17
2.5.2.	Kalibrieren des Gyroskops	18
2.6.	Neigungs-Kompensation des Magnetometers	18
2.7.	Magnetische Störfaktoren	19
2.7.1.	Hard-Iron Effekte	20

2.7.2.	Soft-Iron Effekte	20
2.7.3.	Einfluss von Wechselstrom-Magnetfeldern	21
2.8.	Bisherige Ansätze	23
2.8.1.	Sensorfusion mit DCM-Algorithmus	23
2.8.2.	Sensorfusion mit Quaternion basiertem Algorithmus	25
3.	Konzept	28
3.1.	Überblick	28
3.2.	Konzept I: Magnetfeldvektor als Referenz	29
3.3.	Konzept II: Driftkompensation des Gyroskops	30
3.4.	Diskussion und Auswahl des Konzeptes	32
4.	Implementierung	34
4.1.	Aufbau der Software	34
4.2.	Die wichtigsten Funktionen	35
4.2.1.	calculate_mag_angle	35
4.2.2.	correct_yaw	37
4.3.	Aufbau der Testhardware	41
5.	Evaluierung	43
5.1.	Überblick	43
5.2.	Tests ohne Quadrocopter	43
5.2.1.	Rauschverhalten des Magnetsensors	43
5.2.2.	Statisches System ohne magnetische Störungen	44
5.2.3.	Statisches System unter magnetischen Störungen	45
5.2.4.	Dynamisches System ohne magnetische Störungen	46
5.2.5.	Dynamisches System unter magnetischen Störungen	47
5.2.6.	Zusammenfassung	47
5.3.	Tests im eingeschränkten Quadrocopterbetrieb	48
5.3.1.	Statisches System ohne Filterung	49

5.3.2. Statisches System ohne magnetische Störungen	50
5.3.3. Statisches System unter magnetischen Störungen	51
5.3.4. Dynamisches System ohne magnetische Störungen	51
5.3.5. Vergleich Kalibrierung.....	52
5.3.6. Zusammenfassung	53
5.4. Tests im Flugbetrieb	54
5.4.1. Statisches System, ohne Motoren.....	55
5.4.2. Dynamisches System, freier Flug.....	55
5.4.3. Zusammenfassung	57
6. Diskussion und Ausblick.....	58
6.1. Ergebnisse.....	58
6.2. Ausblick.....	58
6.3. Fazit	59
Abbildungsverzeichnis	A
Formelverzeichnis	C
Tabellenverzeichnis.....	C
Literaturverzeichnis.....	D

1. Einleitung

In der heutigen Zeit, spielt die Automatisierung verschiedener Aufgaben, eine immer größere Rolle. Dabei werden neben traditionellen Maschinen, auch vermehrt mobile Roboter eingesetzt, wie beispielsweise autonome Flugdrohnen (UAV). Vorteile bieten diese Flugobjekte, vor allem in Bereichen, in denen an Orte gelangt werden muss, welche entweder schwierig erreichbar sind oder es äußere Umstände gibt, die für einen Menschen eine Gefahr darstellen.

Um dieses Potential zu untersuchen, wird an der Universität Würzburg, im Rahmen des Projekts „Lebensretter mit Propellern“, ein System auf Basis kostengünstiger Quadrocopter entwickelt, dass die autonome Erkundung von Gebäuden ermöglichen soll. Ein möglicher Anwendungsfall wäre dabei beispielsweise, dass anstelle eines Feuerwehrmannes, ein Quadrocopter in ein brennendes Gebäude fliegt, um dann selbstständig nach Überlebenden zu suchen und deren Standort an die Einsatzkräfte zu senden.

Für ein solches Anwendungsszenario, ist vor allem eine exakte Bestimmung der Orientierung des Quadrocopters unerlässlich. Um dies zu erreichen, werden in dem Projekt preiswerte Gyroskope eingesetzt. Diese Sensoren messen die Winkelgeschwindigkeit, mit der ein Körper um eine Dreh-Achse rotiert. Aus der Winkelgeschwindigkeit kann dann der Winkel, um den gedreht wurde, berechnet werden. Diese Methode ist allerdings nur für ein begrenztes, zeitliches Intervall einsetzbar, da aufgrund von Messfehlern ein sog. Sensordrift entsteht, der zu einer fehlerhaften Orientierungsbestimmung führt. Um diesen Drift zu reduzieren, werden deshalb zusätzliche Sensoren verwendet und mit dem Gyroskop kombiniert. Mit dem bisherigen System, ist eine Drift-Reduktion, nur bei Rotationen um die X- oder Y-Achse möglich. Im Rahmen dieser Arbeit, soll deshalb ein Filterverfahren entwickelt werden, das auch eine Reduzierung des Drifts, bei Drehungen um die Z-Achse ermöglicht. Dazu soll ein Magnetsensor eingesetzt werden, mit welchem sich die Orientierung des Quadrocopters, relativ zum Erdmagnetfeld-Vektor, bestimmen lässt. Die eigentliche Drift-Reduktion, erfolgt durch Fusionierung der Sensordaten von Magnetsensor und Gyroskop. Allerdings stellt sich dabei das Problem, dass ein Magnetsensor nur den resultierenden Magnetfeldvektor in der Umgebung des Sensors misst. Dieser ergibt sich aus der Überlagerung aller wirkenden Magnetfelder, zu denen neben dem Erdmagnetfeld, aber auch lokale Magnetfelder gehören. Um die Vorteile des Magnetsensors trotzdem nutzen zu können, muss der Einfluss lokaler Störfelder egalisiert werden. Die Detektierung der auftretenden magnetischen Störfelder, sowie deren Kompensation, stellt dabei den wesentlichen Kern dieser Arbeit dar.

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft

2.1. Orientierung im Raum

2.1.1. Inertiale Navigation

Die Inertial-Navigation, auch als Trägheitsnavigation bezeichnet, ist ein Verfahren zur Positions- und Orientierungsbestimmung eines Körpers im Raum. Dazu werden mit Hilfe verschiedener Sensoren, die Bewegungen des Körpers gemessen und ausgewertet (Wikipedia). Die Bewegungen werden in 3 translatorische und 3 rotatorische Bewegungsarten unterteilt, welche zusammen die 6 möglichen Freiheitsgrade bilden, die in dem System vorkommen. Werden in einem zeitlichen Intervall $[t_0, t]$, alle Bewegungen des Körpers erfasst, so lässt sich dessen Position und Orientierung zum Zeitpunkt t , relativ zum Zeitpunkt t_0 bestimmen. Die verwendeten Sensoren, messen dabei verschiedene Eigenschaften der Bewegung. So misst der Accelerometer die Beschleunigung einer translativen Bewegung und das Gyroskop die Geschwindigkeit einer rotatorischen Bewegung. Durch ein doppeltes zeitliches Integrieren der Beschleunigung, lässt sich dann der zurückgelegte Weg bestimmen, sowie durch ein einfaches Integrieren der Drehgeschwindigkeit, der gedrehte Winkel. Wenn dabei eine oder mehrere Messungen fehlerbehaftet sind, so ist auch die ermittelte Position bzw. Orientierung nicht mehr korrekt. Da jeder Sensor Messfehler aufweist, wird bei jedem Integrationsschritt, ein Fehler mit auf-integriert. Dadurch können, je nach Genauigkeit des Sensors, die Ergebnisse nach kürzester Zeit stark verfälscht sein. Man spricht dann von einem Sensordrift. Durch die doppelte Integration im Falle der Beschleunigung, wird dieser Drift noch verstärkt und macht damit eine genaue Positionsbestimmung, auf alleiniger Basis eines Beschleunigungssensors, unmöglich. Um den Drift zu minimieren oder auch ganz zu vermeiden, können Sensoren eingesetzt werden, die eine absolute Referenz messen können, welche unabhängig von der Bewegung des Körpers ist. Dazu zählt beispielsweise ein GPS-Sensor, mit welchem sich die Position im erdfesten Koordinatensystem bestimmen lässt.

Für die Optimierung der Orientierungsbestimmung, bietet sich u.a. ein Magnetsensor an, mit welchem sich der Vektor des Erdmagnetfeldes messen lässt. Denn dreht man den Magnetsensor, so dreht sich aus Sicht des Sensors im körperfesten Koordinatensystem, jedoch

nur der gemessene Magnetfeld-Vektor. Aus den beiden gemessenen Vektoren, kann nun berechnet werden, um welchen Winkel sich der Vektor angeblich gedreht hat. Da in Wirklichkeit aber nur eine Drehung des Sensors und nicht des Vektor stattgefunden hat, entspricht der berechnete Winkel, der eigentlichen Drehung des Sensors.

Meist sind die Sensoren, welche absolute Referenzen messen können, nur für den statischen Fall geeignet, da diese entweder zu träge im Messverhalten sind oder in bestimmten Situationen, eine Bewegung nicht messen können. Im Falle des Magnetsensors, stellt sich eine solche Situation dar, wenn die Drehachse des Sensors, parallel zum Vektor des gemessenen Magnetfeldes verläuft, da dann keine Veränderung gemessen werden kann. Von diesem Fall einmal abgesehen, ist es vor allem die physikalisch bedingte Trägheit im dynamisch rotierenden System, die eine alleinige Benutzung eines Magnetsensors zur Orientierungsbestimmung verhindert. Da dies wiederrum die Stärke des Gyroskops darstellt, ist die Fusionierung beider Sensorarten, die beste Möglichkeit die Nachteile beider Systeme auszugleichen. Dabei wird mit dem Magnetsensor, in regelmäßigen Abständen die momentane Orientierung bestimmt und mit dem Gyroskop, die Bereiche dazwischen abgedeckt.

Die Bestimmung der Orientierung eines Objektes, unter zu Hilfenahme der Inertial-Navigation, wird vor allem bei Anwendung genutzt, welche um eine stabile Lage halten zu können, eine schnelle und sensible, sowie automatisierte Regelung benötigen. Zu diesen Anwendungen ist u.a. ein Quadrocopter zu zählen.

2.1.2. Bestimmung der Orientierung

Es gibt 3 Achsen, um die sich ein Körper im drei-dimensionalen Raum drehen kann. Die 3 orthogonal zueinander stehenden Achsen, meist als X-, Y- und Z-Achse bezeichnet, beschreiben ein kartesisches Koordinatensystem (Wendel, 2007). Um die Inertialnavigation nutzen zu können, muss man sich überlegen, wie man das Koordinatensystem anlegt. Prinzipiell ist es möglich, dieses überall anzulegen, üblich ist es jedoch, dass man es bei bewegten Körpern in den Schwerpunkt des Körpers legt und die Achsen an den, für den Körper üblichen, Bewegungsrichtungen orientiert.

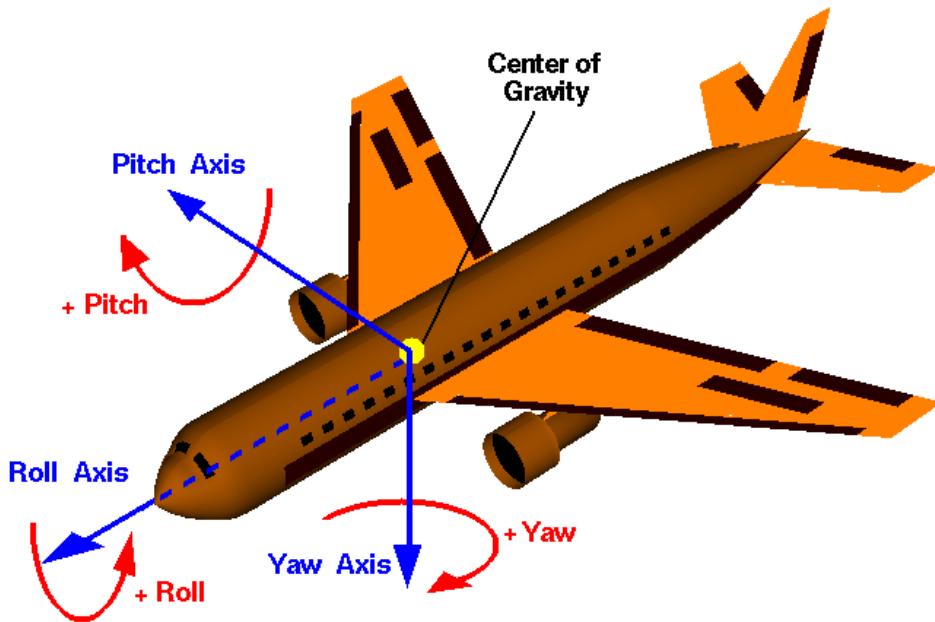


Abb.: 1 Schematische Darstellung Achsen eines Flugzeuges (Wikipedia)

Für die meisten Flugobjekte wie Flugzeuge, Hubschrauber oder Quadrocopter, legt man die Achsen, wie in Abb.: 1 an. Die Winkel, die bei Drehungen um die einzelnen Achsen erreicht werden, werden dabei als Roll- (eng. roll) für die X-Achse, Nick- (eng. pitch) für die Y-Achse und Gier- (eng. yaw) Winkel für Z-Achse bezeichnet.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um Drehungen mathematisch interpretieren und auswerten zu können. Die 2 häufigsten Methoden sind dabei die Berechnung über Eulerwinkel und die Berechnung mit Hilfe von Quaternionen.

2.1.3. Eulerwinkel

Um beliebige Drehungen mathematisch anschaulich zu beschreiben, werden meist Eulerwinkel benutzt (Wendel, 2007). Dazu werden Rotationsmatrizen erstellt, mit deren sich die Drehungen einfach berechnen lassen. Auch lassen sich damit Umrechnungen von einem Koordinatensystem, in ein anderes bewerkstelligen. Dies ist gerade bei der Verwendung von Sensoren, die eine vektorielle absolut Referenz liefern, wie das bei Magnetsensoren der Fall ist, sehr hilfreich, da man die Messung erst in das eigene Bezugssystem übertragen muss, um verwertbare Informationen zu erhalten.

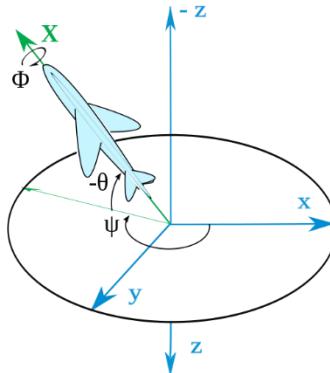


Abb.: 2 Zusammenhang zw. körperfestem und erdfesten Koordinatensystem
(Wikipedia)

Sollen nun Rotationen um den Roll-Winkel Φ , den Nick-Winkel Θ oder den Gier-Winkel Ψ berechnet werden, so ergeben sich für die X-, Y-, und Z-Komponente vom Richtungsvektor des Körpers, durch trigonometrische Berechnungen folgende Rotationsmatrizen M_i (Wikipedia).

$$M_R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi \end{pmatrix} \quad \text{Glg.: 1 Rotationsmatrix für Roll-Winkel}$$

$$M_N = \begin{pmatrix} \cos\Theta & 0 & -\sin\Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Theta & 0 & \cos\Theta \end{pmatrix} \quad \text{Glg.: 2 Rotationsmatrix für Nick-Winkel}$$

$$M_G = \begin{pmatrix} \cos\Psi & \sin\Psi & 0 \\ -\sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Glg.: 3 Rotationsmatrix für Gier-Winkel}$$

Den gedrehten Vektor \vec{W} erhält man dann durch Multiplikation der Rotationsmatrix M mit dem Ausgangsvektor \vec{V} .

$$\vec{W} = M * \vec{V}, \text{ mit } \vec{W} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \text{ und } \vec{V} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad \text{Glg.: 4 Drehung mit Drehmatrix}$$

Will man um mehrere Achsen drehen, so setzt man in Glg.: 4 für M , beliebig viele Rotationsmatrizen ein. Allerdings ist dabei die Reihenfolge der Matrizen zu beachten, da die Matrizenmultiplikation keine kommutative mathematische Operation ist.

In der Luftfahrt richtet man sich üblicherweise nach der DIN 9300 (Wikipedia), die besagt, dass man sich zuerst um die Z- (Gier-), dann um die Y- (Nick-) und schließlich um die X- (Roll-) Achse drehen soll, um beispielsweise einen Vektor vom erdfesten System in das körperfeste System zu drehen.

Zwar sind Eulerwinkel sehr anschaulich, doch sind für die Berechnung der Rotationen, viele Rechenschritte nötig. Weiterhin ist es möglich, dass bei der Berechnung der Orientierung über

Eulerwinkel, Singularitäten auftreten. Dieses Phänomen ist auch als „*Gimbal-Lock*“ bekannt und führt dazu, dass durch aufeinanderliegen der Drehachsen, Freiheitsgrade verloren gehen (Wendel, 2007). Wegen den genannten Gründen, insbesondere dem letzteren, ist von der alleinigen Benutzung von Eulerwinkeln im hier betrachteten Anwendungsfall abzuraten, da die Vorteile der Anschaulichkeit und der einfachen Implementierung, die Nachteile nicht aufwiegen.

2.1.4. Quaternionen

Die von W. Hamilton 1843 erfundenen Quaternionen, bilden ein eigenes Zahlensystem. Sie spannen einen 4-dimensionalen Vektorraum auf, mit dem sich Drehungen von Körpern sehr gut beschreiben lassen (Wikipedia). Ein Quaternion q , gegeben durch $q = [x_0, x_1, x_2, x_3]^T$, besteht, anlehnd an die Komplexen Zahlen, aus einem Realteil (x_0) und 3 Imaginärteilen (x_1, x_2, x_3), welche sich als Vektor \underline{x} , gegeben durch $\underline{x} = [x_1, x_2, x_3]$, auffassen lassen. Quaternionen beschreiben dabei eindeutig, die Orientierung eines Körpers im 3-dimensionalen Raum. Weiterhin lassen sich beliebige Drehungen, mit Hilfe der Quaternionen-Multiplikation berechnen. Auch hier ist zu beachten, dass es sich dabei um keine kommutative mathematische Operation handelt. Sind die Quaternionen q und p , mit $q = [x_0, x_1, x_2, x_3]^T$ und $p = [y_0, y_1, y_2, y_3]^T$ gegeben, ergibt die Quaternionen-Multiplikation von q und p nach Glg.: 5, das Quaternion w , mit $w = [w_0, w_1, w_2, w_3]^T$.

$$w = q \odot p = \begin{pmatrix} x_0 & -x_1 & -x_2 & -x_3 \\ x_1 & x_0 & -x_3 & x_2 \\ x_2 & x_3 & x_0 & -x_1 \\ x_3 & -x_2 & x_1 & x_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \quad \text{Glg.: 5 Quaternionen-Multiplikation}$$

Gegeben ist nun der Vektor V_1 , der um den Winkel Φ in den Vektor V_2 rotiert werden soll (vgl. Abb.: 3).

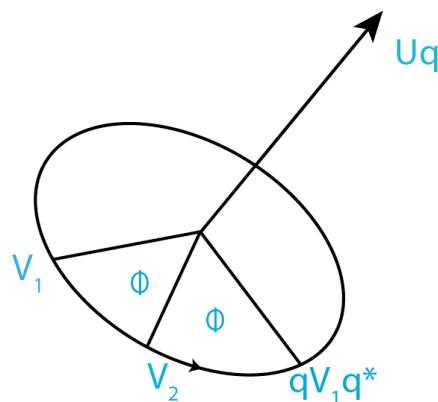


Abb.: 3 Schematische Darstellung - Drehen eines Vektors mit Quaternionen (Gageik, 2013)

Zunächst, wird dazu die normierte Drehachse \underline{U}_q bestimmt und daran anschließend das Rotations-Quaternion q .

$$\underline{U}_q = \frac{\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2}{|\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2|} \quad \text{Glg.: 6 Drehachse der Rotation}$$

$$q = \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right) + \underline{U}_q * \sin\left(\frac{\Phi}{2}\right) \quad \text{Glg.: 7 Rotations- Quaternion}$$

Der Vektor \mathbf{V}_2 lässt sich nun wie folgt berechnen.

$$\mathbf{V}_2 = q \odot \mathbf{V}_1 \odot q^* \text{ mit } q^* = [x_0, -x_1, -x_2, -x_3]^T \quad \text{Glg.: 8 Drehachse der Rotation}$$

Auch lässt sich aus den Eulerwinkeln Φ (Roll), Θ (Nick) und Ψ (Gier), unkompliziert ein Quaternion q erstellen.

$$q = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\Psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\Phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\Psi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\Phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\Psi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\Psi}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\Psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\Phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\Psi}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\Psi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\Phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\Psi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad \text{Glg.: 9 Eulerwinkel in Quaternion}$$

Im Gegensatz zu der Berechnung mit Eulerwinkeln, tritt bei der Verwendung von Quaternionen ein sog. „Gimbal-Lock“ nicht auf. Des Weiteren sind die Berechnungen weniger aufwendig und bieten daher einen Performance-Vorteil. Ein Nachteil ist allerdings, die fehlende Anschaulichkeit im Vergleich zu den Eulerwinkeln.

(Wendel, 2007)

¹ q^* entspricht dem komplex konjugierten von q

2.2. Magnetfelder

2.2.1. Allgemein

Man kann Magnetfelder in zwei Kategorien einordnen. Zum einen, in die durch sog. Dauermagneten und zum anderen, in die, durch elektrische Ströme hervorgerufenen, Magnetfelder.

Dauermagneten behalten ihre magnetischen Eigenschaften über größere Zeitspanne. Sie bestehen aus ferromagnetischen Metallen oder aus entsprechenden Legierungen, die zu einem gewissen Teil aus ferromagnetischen Metallen gefertigt sind (Halliday, 2007). Die durch elektrische Ströme, hervorgerufenen Magnetfelder, bleiben nur solange existent, wie auch ein elektrischer Strom vorhanden ist. Im Zusammenhang mit Elektromagnetismus unterscheidet man außerdem, zwischen Gleichstrom- und Wechselstrom-Magnetfelder, wobei der Unterschied darin besteht, dass letztere ihre Polarität permanent ändern.

Das vektorielle Magnetfeld besitzt, im Gegensatz zu seinem elektrischen Pendant, der elektrischen Feldstärke, keine Quelle oder Senke. Dies wird in Schaubildern, durch geschlossene Feldlinien gekennzeichnet (vgl. Abb.: 4). Daraus resultierend, würde ein, in der Mitte durchbrochener Stabmagnet, nicht in einen Süd- und Nord-Teil zerfallen, sondern in 2 neue kleinere Stabmagneten.

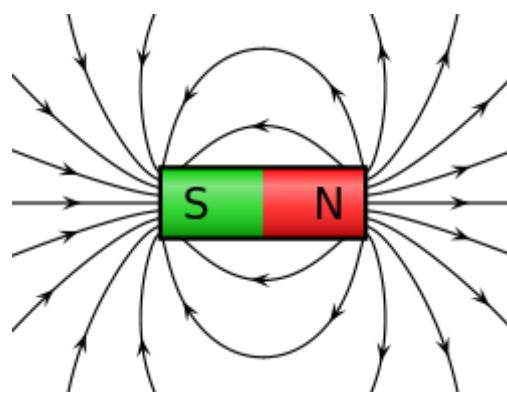


Abb.: 4 Magnetfeld eines idealen Stabmagneten (Wikipedia)

2.2.2. Das Erdmagnetfeld

Das Magnetfeld der Erde, wird auf die Bewegung des flüssigen Erdmantels um den festen Erdkern zurückgeführt (Demtröder, 2004). Durch Konvektionsströme, die vor allem durch unterschiedliche Temperaturen innerhalb des Mantels erzeugt werden, wird ein starkes

elektromagnetisches Feld hervorgerufen. Die Voraussetzung, dass die sich bewegende Flüssigkeit, stark elektrisch leitend sein muss, ist durch den hohen Eisenanteil im Erdmantel gegeben (Bundeshandelsakademie und Bundeshandelsschule Völkermarkt). Die allgemeine wissenschaftliche Ansicht ist mittlerweile, dass etwa 95 % des Erdmagnetfeldes durch diesen sog. Dynamoeffekt hervorgerufen wird (Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V., 2003).

Darüber hinaus gibt es unbestätigte Theorien, welche besagen, dass der Mond ebenfalls, ähnlich der Wirkung der Gezeitenkräfte, die Ebbe und Flut verursachen, die Stärke des Erdmagnetfeldes beeinflusst. Denn durch den wesentlich größeren Radius des Erdmantels, im Vergleich zum Erdkern, wirkt sich die Anziehungskraft des Mondes stärker auf diesen aus, was dazu führen soll, dass sich der Erdkern etwas schneller dreht. Durch diese unterschiedlichen Geschwindigkeiten, würde dann ein elektrischer Strom induziert, welcher ebenfalls ein elektromagnetisches Feld erzeugt (Bundeshandelsakademie und Bundeshandelsschule Völkermarkt).

Weiterhin ist das Erdmagnetfeld einer der Gründe, weshalb das Leben wie wir es kennen, überhaupt möglich ist. Das Weltall ist voller tödlicher Strahlung, die hauptsächlich von Sonneneruptionen verursacht werden. Diese Strahlung wird jedoch weitestgehend durch das Magnetfeld abgelenkt und gelangt deshalb nicht auf die Erde. Der Teil der auf die Erde gelangt, ist beispielsweise für die Entstehung von Polarlichtern in den Polarregionen verantwortlich. Zwar ist das Feld, aufgrund lokaler magnetischer Störfelder, nicht überall auf der Erde absolut homogen verteilt, allerdings kann man es annäherungsweise als gleichmäßiges Dipol-Feld betrachten (vgl. Abb.: 4). Die magnetischen Feldlinien treten dabei im 90° Winkel aus dem magnetischen Südpol aus und fallen im 90° Winkel wieder in den magnetischen Nordpol ein. Am Äquator beträgt daher die Inklinationswinkel 0° und in Deutschland etwa 60° . Der Betrag der Feldstärke des Magnetfeldes, variiert zwischen $60 \mu\text{T}$ an den Polen und $30 \mu\text{T}$ am Äquator.

Sowohl Stärke, als auch Richtung des Erdmagnetfelds verändern sich im Laufe der Zeit (Demtröder, 2004). Des Weiteren verläuft, die magnetische Nord-Süd Achse nicht exakt parallel zu der Erdachse, sondern ist um etwa 11° geneigt. Auch verbleiben die Pole nicht an diesem Ort, sondern wandern jährlich um etwa 50km. Es wird vermutet, dass sich die Polarität durchschnittlich aller etwa 250.000 Jahre ganz umgedreht (Demtröder, 2004). Dieser Prozess wird als Polsprung bezeichnet und soll das letzte Mal vor etwa 780.000 Jahren stattgefunden haben. Dabei wird vermutet, dass die Pole in einem Zeitraum von ca. 4000-10.000 Jahren, zur jeweilig anderen Seite wandern, wobei sich in dieser Zeit, die Stärke des Magnetfeldes auf einen Bruchteil der normalen Stärke verringert. Wissenschaftler vom „Deutschen GeoForschungsZentrum“ sind der Ansicht, bei Bohrungen im Schwarzen Meer, Hinweise auf

einen sehr kurzen Polsprung gefunden zu haben, der vor etwa 41.000 Jahren stattgefunden haben soll. Die Umpolung habe allerdings nur ca. 440 Jahre bestanden, bevor wieder ein Polsprung zur heutigen Orientierung der Pole stattfand. Auch der eigentliche Sprung, wäre mit etwa 250 Jahren im Vgl. sehr kurz (astronews.com, 2012). Sind die Vermutungen korrekt, würde das bedeuten, dass statistisch gesehen, ein weiterer großer Polsprung längst überfällig wäre. Dieser hätte katastrophale Auswirkungen auf das Leben der Menschen, da durch Sonnenstürme, hochaufgeladene, ionisierte Partikel aus der Sonne heraus geschleudert werden und diese dann durch das stark geschwächte Magnetfeld dringen würden. Neben den biologischen Folgen, wäre vor allem die weitergehende Zerstörung des Energienetzes der Erde, besonders prekär.

2.2.3. Magnetische Materialien

Die Elektronen eines jeden Atoms, besitzen jeweils ein magnetisches Bahnmoment und ein magnetisches Spinnmoment, welche sich vektoriell zu einer resultierenden Summe addieren. Die einzelne resultierende Summe eines Elektrons, addiert sich zu allen anderen resultierenden Summen der anderen Elektronen des Atoms zusammen und bildet, durch die resultierenden Summen der Atome, wiederum eine sog. Probe. Ergibt sich nun aus den, in der Probe zusammengefassten Atomen, ein Magnetfeld, so bezeichnet man dieses Material als magnetisch. Man unterteilt Magnetismus dabei, in die folgenden 3 unterschiedlichen Arten:

Diamagnetismus tritt prinzipiell in allen Stoffen auf. Allerdings äußert sich dieses magnetische Verhalten, nur sehr gering bis nicht nachweisbar, solange bei der Substanz nicht auch eine der anderen beiden Arten von Magnetismus auftritt. Wenn eine rein diamagnetische Substanz einem Magnetfeld ausgesetzt wird, so entsteht in dieser, ein sehr schwaches magnetisches Dipolmoment. Dieses verschwindet jedoch, sobald das externe Magnetfeld nicht mehr existiert. Üblicherweise wird die Eigenschaft daher nur mit Substanzen in Verbindung gebracht, die keine andere Art von Magnetismus zeigen.

Paramagnetismus tritt in Materialien auf, die ganz oder zum Teil aus Elementen der Gruppe der sog. Übergangsmetalle² bestehen. Im Gegensatz zu diamagnetischen Stoffen, besitzen paramagnetische Stoffe permanent-existierende atomare Dipolmomente. Da diese allerdings zufällig verteilt sind, entsteht durch die Summe aller Momente in der Substanz, kein resultierendes Dipolmoment und damit auch kein Magnetfeld. Tritt allerdings ein externes magnetisches Feld auf, richten sich die atomaren Dipolmomente nach diesem aus und erzeugen

² Im PSE mit den Ordnungszahlen 21-30, 39-48, 57-80, 89-112 (Wikipedia)

ein resultierendes magnetisches Dipolmoment, welches allerdings ebenfalls verschwindet, sobald das externe Magnetfeld nicht mehr existiert.

Ferromagnetismus tritt nur in Materialien auf, die Eisen, Nickel, Cobalt, Gadolinium oder Dysprosium enthalten. Wie auch paramagnetische Stoffe, besitzen ferromagnetische Substanzen permanent-existierende atomare Dipolmomente. Im nicht polarisierten Zustand, heben sich die Dipolmomente auf, sodass kein Magnetfeld resultiert. Im Gegensatz zu den anderen Arten von Magnetismus, verschwindet das resultierende Dipolmoment ferromagnetischer Stoffe nach Ausrichtung durch ein externes Magnetfeld nicht, sondern bleibt eine gewisse Zeitspanne, auch ohne dieses, weiter vorhanden. Dieses Verhalten begründet sich, in dem als „*Austauschkopplung*“ bezeichneten, quanten-physikalischen Effekt. Die Stärke des resultierenden Magnetfeldes, richtet sich neben der Masse der Probe auch danach, wieviel Prozent der atomaren Dipolmomente ausgerichtet wurden. Sobald das externe Magnetfeld verschwunden ist, richten sich die atomaren Dipolmomente langsam wieder in eine, der Ursprungsorientierung ähnlichen, Anordnung aus. Allerdings bleibt eine Restmagnetisierung, auch über längere Zeit vorhanden, man spricht dabei von einer Art „*Magnetischen-Erinnerung*“. Dieses Erinnerungsvermögen macht man sich z.B. für die Speicherung von Daten auf Festplatten zu nutze. Durch ein starkes externes Magnetfeld oder auch durch massive Erschütterungen, kann sich die Ausrichtung der atomaren Dipolmomente jedoch so stark verändern, dass ein Zugriff auf die so gespeicherten Daten nicht mehr möglich ist. Alle handelsüblichen Permanent- oder Dauermagneten, bestehen ebenfalls aus ferromagnetischen Stoffen bzw. werden aus diesen hergestellt. Werden ferromagnetische Stoffe über die sog. „*Curie-Temperatur*“ erhitzt, verliert meistens die „*Austauschkopplung*“ ihre Wirkung und der Stoff ist nur noch paramagnetisch. Bei Eisen liegt diese Temperatur, bei etwa 770°C.

(Halliday, 2007)

2.3. Magnetsensor

2.3.1. Allgemein

Das Anwendungsgebiet eines Magnetometers (auch Magnetsensor), geht über die bloße Bestimmung des Nordens weit hinaus. Mithilfe eines solchen Sensors, lässt sich die magnetische Flussdichte in der Umgebung des Sensors genau messen. Da mehrere Magnetfelder untereinander, nach dem Superpositionsprinzip (Halliday, 2007) interagieren,

lässt sich das umgebene Magnetfeld eines Körpers, als ein großes Magnetfeld betrachten und dessen Orientierung messen. Man unterscheidet dabei in Skalar- und Vektor-Magnetometer (Macintyre, 2000).

Skalar-Magnetometer messen einzig den Betrag des Vektors der Magnetischen-Flussdichte. Zusätzlich dazu, messen Vektor-Magnetometer auch die Orientierung des Vektors, relativ zur Orientierung des Sensors. Im Falle der Anwendung zur Lagebestimmung, fällt die Wahl des Sensors auf ein Vektor-Magnetometer, da es eben die Orientierung des Umgebenen Magnetfeldes ist, die benötigt wird. Im Folgenden, wird daher nur auf Vektor-Magnetometer eingegangen.

Es gibt verschiedene Messverfahren und daraus resultierend, auch mehrere Arten von Sensoren.

Tab.: 1 Auswahl an Magnetfeldsensoren mit Messprinzip und typischen Messbereich, (Macintyre, 2000)

Sensorbezeichnung	Physikalischer Effekt unter Magnetfeldeinfluss	Messbereich (mT)	Bandbreite (Hz)
Hallsensor	Hall-Effekt	0.3 bis $3 \cdot 10^4$	dc ³ bis 10^8
Magneto-Resistiver Sensor	u.a. Anisotroper-Magnetoresistiver-Effekt	10^{-3} bis 5	dc bis 10^7
Fluxgate Magnetometer	Änderung der induzierten Spannung	10^{-4} bis 0.5	dc bis $2 \cdot 10^3$
SQUID Magnetometer	Josephson-Effekt	10^{-9} bis 0.1	dc bis 5

2.3.2. Hallsensor

Auf dem sog. Hall-Effekt basierend, findet der Hallsensor vor allem Anwendung in Bereichen, in denen große Magnetfeldänderungen auftreten. Der Hall-Effekt wurde 1879 von dem amerikanischen Wissenschaftler Edwin Hall entdeckt (Grüninger).

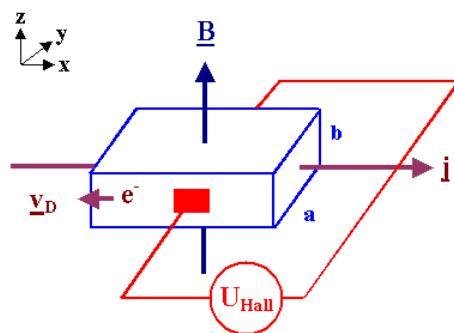


Abb.: 5 Schematische Darstellung Hallsensor (Föll)

³ dc (eng. direct current) steht in diesem Zusammenhang für Gleichstrom-Magnetfelder

Fließen Elektronen e^- mit einer Geschwindigkeit v_D in einem elektrischen Strom, in entgegengesetzter Richtung zur Stromdichte j (vgl. Abb.: 5) und steht senkrecht dazu der Vektor der Magnetischen Flussdichte B , so entsteht eine Spannung U_{Hall} , die man messen kann. U_{Hall} verhält sich dabei proportional zur Änderung der Magnetischen Flussdichte B .

$$U_{Hall} = b \cdot v_D \cdot B$$

Glg.: 10 Hallspannung

Da der Hallsensor im Aufbau recht einfach zu realisieren ist, ist dieser auch recht günstig in der Herstellung und ist daher besonders für Low-Budget Projekte interessant. Weiterhin ist der Sensor, durch seine hohe Bandbreite, auch für Anwendungen in einem Wechselstrom-Magnetfeld geeignet.

Wie bereits erwähnt, lassen sich mit diesem Sensor, besonders starke Magnetfelder gut detektieren, jedoch möchte man bei der Orientierungsbestimmung kleinste Magnetfeldänderung messen können. Damit fällt dieser einfache und vor allem kostengünstige Sensor, für die Verwendung auf einem Quadrocopter, leider aus.

2.3.3. Magneto-Resistiver Sensor

Ein Magneto-Resistiver Sensor, nutzt die physikalische Gesetzmäßigkeit, nach der, der Widerstand eines elektrischen Leiters, durch umgebende Magnetfelder beeinflusst werden kann. Es gibt mehrere Effekte, die auf diesem Prinzip beruhen. Dazu gehört neben dem Riesenmagnetowiderstands-Effekt (eng. GMR) und dem Kolossalen-Magnetoresistiven-Effekt (eng. CMR), auch der am längsten bekannte Anisotropie⁴-Magnetoresistive-Effekt (eng. AMR) (Macintyre, 2000). Der AMR-Effekt, welcher 1857 von dem britischen Physiker William Thomson entdeckt wurde, lässt sich am besten an einer dünnen Schicht aus Permalloy⁵ nachweisen, welche in ein homogenes Magnetfeld gebracht wird. Fließt nun ein elektrischer Strom durch die Schicht, lässt sich beobachten, dass der Widerstand abhängig von der Stellung des Vektors der elektrischen Flussdichte \vec{D} , zu dem Vektor der magnetischen Flussdichte \vec{B} ist. Dabei ist der Widerstand maximal, wenn beide Vektoren parallel zu einander verlaufen (R_{\parallel}) und minimal wenn diese senkrecht aufeinander stehen (R_{\perp}). Sind die Widerstände R_{\parallel} und R_{\perp} bekannt, lässt sich der resultierende Widerstand R_{res} wie folgt berechnen.

$$R_{res} = R_{\parallel} - (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cdot \sin^2(\alpha)$$

Glg.: 11 Widerstand durch AMR-Effekt

⁴ von der Raumrichtung abhängig

⁵ Legierung aus 81% Nickel, 19% Eisen (Wikipedia)

Der Winkel α bezeichnet dabei, den Winkel zwischen \vec{D} und \vec{B} . Durch Verwendung dreier solcher Sensoren, welche jeweils orthogonal zueinander stehen, kann man die Orientierung des 3-Dimensionalen Vektors der magnetischen Flussdichte bestimmen. Aufgrund der ähnlich hohen Bandbreite, im Vgl. zum Hallsensor, eignet sich auch der Magneto-Resistive Sensor, neben Anwendungen in Gleichstrom-Magnetfeldern, für Anwendungen in einem sich dynamisch verändernden Wechselstrom-Magnetfeld.

Verwendung finden diese Sensoren vor allem in Bereichen, in denen sehr kleine Sensoren nötig sind, wie beispielsweise in modernen Mobiltelefonen. Aufgrund der großen Margen, sind die Stückpreise vergleichsweise gering und die Verbreitung sehr groß (Extension Media, 2011).

2.3.4. Fluxgate-Sensor

Der Fluxgate-Sensor wurde in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts von dem russischen Wissenschaftler Victor Vacquier erfunden. Mit Hilfe dieses Sensors lassen sich auch sehr kleine Magnetfeldänderungen messen.

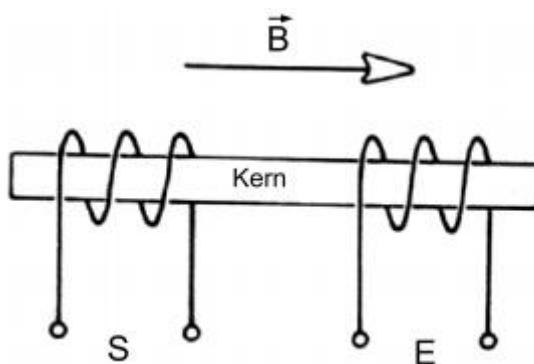


Abb.: 6 Schematische Darstellung Fluxgate-Sensor (Nelkenbrecher, 2008)

Ein einfacher Fluxgate-Sensor besteht im Wesentlichen aus einem ferromagnetischen Metallkern (z.B. Eisen) und 2 Spulen (siehe Abb.: 6). Die Spulen unterscheidet man dabei in die Sendespule S und die Empfängerspule E . An die Sendespule wird ein sinusförmiger Wechselstrom angelegt. Dabei entsteht ein Magnetfeld, welches dazu führt, dass der Kern magnetisiert wird. Dies geschieht solange, bis der Kern magnetisch gesättigt⁶ ist. Das Magnetfeld des Kerns induziert in der Empfängerspule eine Spannung.

⁶ Magnetisch gesättigt bedeutet, dass der Eisenkern sein größtmöglichstes Magnetfeld aufgebaut hat, da ein ferromagnetischer Stoff nur begrenzt magnetisch „aufladbar“ ist (Halliday, 2007).

Der Signalverlauf dieser Spannung, gleicht dabei dem Verlauf der Spannung an der Sendespule. Wirkt nun ein externes Magnetfeld in Kernrichtung, so verändert sich die Spannung an der Empfängerspule. Von dieser Änderung, kann dann auf die Orientierung des Magnetfeldes geschlossen werden (Nelkenbrecher, 2008). Der Sensor ist, im Vergleich zu den bisher vorgestellten Magnetsensoren, eher als träge zu betrachten und damit nur bedingt, für die Messung von Wechselstrom-Magnetfeldern, geeignet. Zwar sind Fluxgate-Sensoren nicht ganz so preiswert wie Hall-sensoren, jedoch arbeiten diese mit weit höherer Genauigkeit und Auflösung, in Bereichen niedrigerer Feldstärken.

2.4. Gyroskop

2.4.1. Allgemein

Mit einem Gyroskop (kurz Gyro) lassen sich Winkelgeschwindigkeiten eines Körpers messen. Auch hier gibt es verschiedene Arten von Sensoren.

Tab.: 2 Auswahl an Gyroskopen

Bezeichnung	Typischer Drift pro Stunde	Typischer Preis
MEMS ⁷ Gyroskop	>15°	10 \$
Ring-Laser Gyroskop	0.04° (Honeywell)	>5000 \$
Faser-Optisches Gyroskop	0.05° (KVH Industries)	>4000 \$

Wie aus Tab.: 2 ersichtlich, gibt es zwar sehr gute Sensoren um Drehraten zu messen, jedoch ist nur ein MEMS Gyroskop preislich erschwinglich genug, um auch in Projekten eingesetzt zu werden, in denen nur ein knappes Budget zur Verfügung steht. Vom Kosten-Faktor einmal abgesehen, sind sowohl Ring-Laser, als auch Faser-Optische Gyroskope empfindliche Geräte die neben anderen komplizierten Anforderungen, vor allem viel Energie im vgl. zu einem MEMS Gyroskop benötigen und zusätzlich auch ein höheres Gewicht, sowie größere Ausmaße aufweisen.

⁷ MEMS Mikro-Elektrisch-Mechanische-Systeme

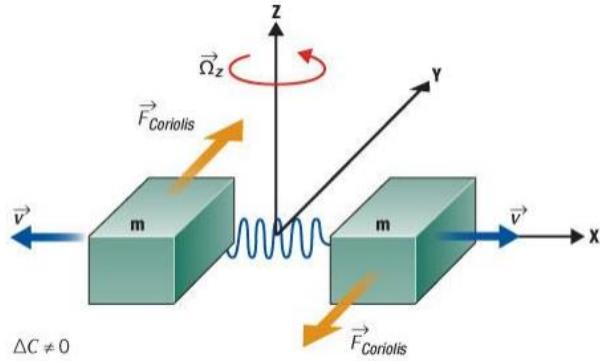


Abb.: 7 Schematische Darstellung Funktionsweise von MEMS-Gyroskop (findMEMS.com, 2010)

Beim Messprinzip eines MEMS Gyroskop, macht man sich den Umstand zu Nutze, dass auf den sich mit der Geschwindigkeit v bewegenden Körper der Masse m , bei gleichzeitiger Rotation mit Drehrate Ω^z , die, auch als Corioliskraft bekannte, Kraft F wirkt (Gageik, 2013).

$$F = -2 \cdot m \cdot \Omega^z \cdot v$$

Glg.: 12 Corioliskraft

Der Richtungsvektor der Corioliskraft steht dabei orthogonal auf der Drehachse und der Bewegungsrichtung des Körpers (siehe Abb.: 7). Um aus den Drehraten, die der Sensor liefert, den Winkel φ zu berechnen, um den sich der Körper gedreht hat, muss man die Winkelgeschwindigkeit ω über das zeitliche Intervall $[t_0, t]$ der Bewegung integrieren.

$$\varphi = \int_{t_0}^t \omega dt$$

Glg.: 13 Gyro Winkel

2.4.2. Drift des Gyroskops

Wie bei jedem Sensor, entstehen auch bei einem Gyroskop Messfehler, welche die Messdaten verfälschen. Da das Gyroskop allerdings keinen absoluten Orientierungswinkel messen kann, sondern nur Winkelgeschwindigkeiten misst, führen diese Fehler dazu, dass es bei der Integration nach Glg.: 13, zu einem sog. Sensordrift kommt, da auch alle Fehler mit in die Integration eingehen.

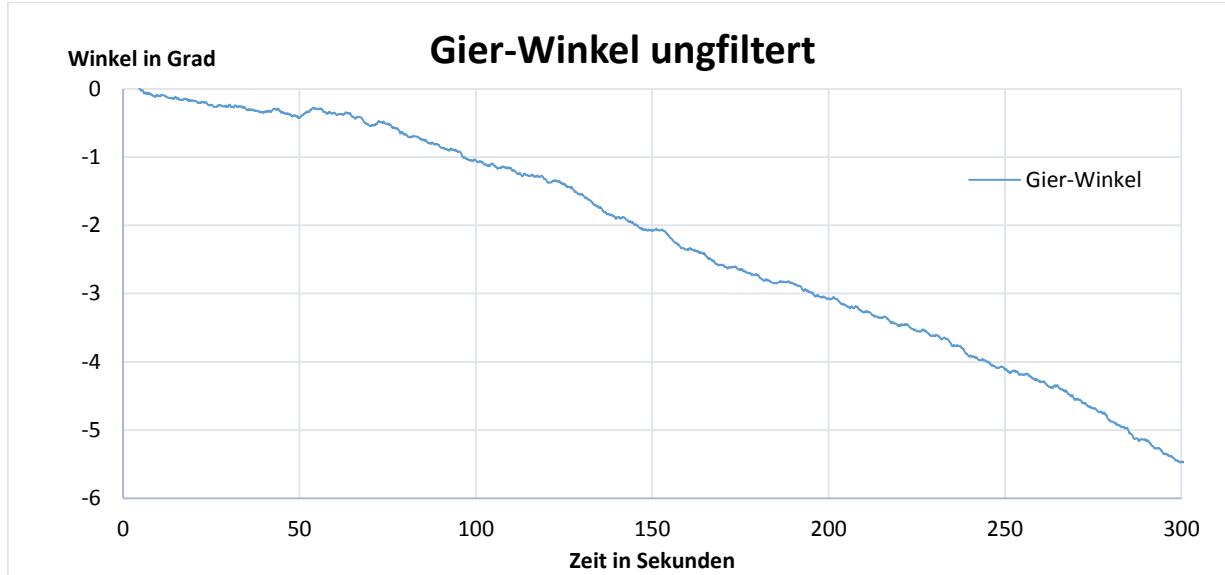


Abb.: 8 Gier-Winkel ungefiltert im ruhenden System auf Testhardware (siehe Kap.:4.3)

Wie aus Abb.: 8 ersichtlich, wurde aufgrund des Driftverhaltens des Gyroskops, bereits nach 300s eine Gier-Winkel Änderung von über 5° ermittelt, was einem durchschnittlichen Drift von etwa 1° pro Minute entspricht.

Um diesen Fehler zu korrigieren, werden für die Roll- und Nick-Winkel oftmals Kalman Filter eingesetzt. Dabei wird aus den Messungen eines Beschleunigungssensors, ebenfalls der Roll- und Nick-Winkel bestimmt und dann geschätzt, zu welchen Teilen Beschleunigungssensor und Gyroskop in die berechneten Winkel eingehen (Wendel, 2007). Bei der Bestimmung der beiden Winkel mit Hilfe des Beschleunigungsmessers, macht man sich den Beschleunigungsvektor der Gravitationskraft zu Nutze, der im Idealfall, unabhängig von der Ausrichtung des Sensors, nach unten zeigt. Das funktioniert allerdings nur, solange der Beschleunigungsvektor nicht parallel zu der X- oder Y-Achse verläuft, weil sich der Vektor bei einer Drehung um seine eigene Achse nicht verändert und damit auch keine Drehung berechnet werden kann. Dies ist auch der Grund, weshalb zur Driftkorrektur des Gier-Winkels, der Beschleunigungssensor nicht geeignet ist, da im horizontalen Fall, Z-Achse und Beschleunigungsvektor parallel verlaufen. Da der Magnetfeldvektor der Erde normalerweise nicht in Erdrichtung zeigt, bietet sich dieser zur Driftkompensation des Gier-Winkels besser an.

2.5. Kalibrierung der Sensoren

2.5.1. Kalibrieren des Magnetometers

Das Kalibrieren eines Magnetometers erhält, im Vergleich zum Kalibrieren von Beschleunigungssensor und Gyroskop, eine besondere Rolle, da durch lokal vorkommende

magnetische Störfelder, das Erdmagnetfeld überlagert wird. Der Einfluss dieser Störfelder, wird auch als Hard- bzw. Soft-Iron Effekt bezeichnet (siehe Kap.:2.7.1 f.). Um die Messungen des Magnetsensors sinnvoll interpretieren zu können, wird daher das Minimum *Min* und Maximum *Max* an magnetischer Flussdichte in Richtung jeder Achse bestimmt. Das Bias der jeweiligen Achse kann dann nach Glg.: 14 berechnet werden.

$$\text{Bias} = \frac{\text{Max} - \text{Min}}{2}$$

Glg.: 14 Bias für Magnetsensor

Dabei kann man verschiedene Ansätze verfolgen. Zum einen kann man den Sensor um jede Achse einmal drehen, dabei ist darauf zu achten, dass der Sensor sich nur um die Rotationsachsen dreht und sich sonst nicht bewegt. Dazu wird der Sensor so eine Anfangsposition gedreht, dass die jeweilige zu kalibrierende Achse parallel zum Gravitationsvektor der Erde steht. Daran anschließend, wird der Sensor um 180° gedreht und dabei aus den Messungen *Min* und *Max* bestimmt. Eine andere Möglichkeit ist, mit dem Sensor Kreisbewegungen ohne feste Reihenfolge oder Richtung zu vollführen.

Da bei der letzteren Methode, nur durch viele Messungen sichergestellt werden kann, dass für jede Achse, die richtigen *Min* und *Max*-Werte gefunden wurden, ist die 1. Methode der 2. vorzuziehen. Ist das Bias ermittelt, wird dieses abgespeichert und bei jeder Messung von dem Messwert abgezogen.

2.5.2. Kalibrieren des Gyroskops

Da auch das Gyroskop eine gewisse Abweichung von $0 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ im Ruhezustand aufweist, wird auch dieses kalibriert, um das spätere driften zu verringern. Bei der Kalibrierung des Gyroskops, wird allerdings nur eine bestimmte Anzahl an Messungen durchgeführt, um daraus einen Mittelwert bestimmen zu können. Der Mittelwert wird dann ebenfalls als Bias abgespeichert und bei jeder Messung von dem Messwert abgezogen.

2.6. Neigungs-Kompensation des Magnetometers

Befindet sich der Magnetsensor in der horizontalen X-Y Ebene, in der sowohl der Roll-Winkel Φ , als auch der Nick-Winkel Θ nicht von 0° verschieden sind, so kann der Gier-Winkel Ψ einfach bestimmt werden, mit Hilfe der X, Y Komponenten des Magnetfeldvektors. (Caruso).

$$\Psi = \text{arcTan} \left(\frac{Y}{X} \right)$$

Glg.: 15 Gier-Winkel durch Magnetfeldvektor

Ist der Sensor jedoch um die Roll- oder Nick-Achse geneigt, würde die Gleichung falsche Ergebnisse liefern, da sich der Magnetfeldvektor nicht mit dreht. Die Lösung findet sich, indem man den Vektor in die Ebene projiziert, die von Roll- und Nick-Achse aufgespannt wird und dann Glg.: 7 verwendet. Die Gleichungen leiteten sich dabei aus den Rotationsmatrizen aus Kap.: 2.1.3 her.

$$X = Mag_X \cdot \cos\Phi + Mag_Y \cdot \sin\Theta \cdot \sin\Phi \\ -Mag_Z \cdot \cos\Theta \cdot \sin\Phi$$

Glg.: 16 Transformation X-Komponente

$$Y = Mag_Y \cdot \cos\Theta + Mag_Z \cdot \sin\Theta$$

Glg.: 17 Transformation Y-Komponente

Bei der Verwendung von Quaternionen ist dieses Verfahren, in angepasster Form, ebenfalls problemlos möglich. Da dem, hier zugrunde liegenden Quadrocopter-System, bereits zuverlässige Informationen zu Roll- und Nick-Winkel entnommen werden können, lässt sich durch das präsentierte Verfahren, eine akzeptable Neigungskompensation erreichen.

2.7. Magnetische Störfaktoren

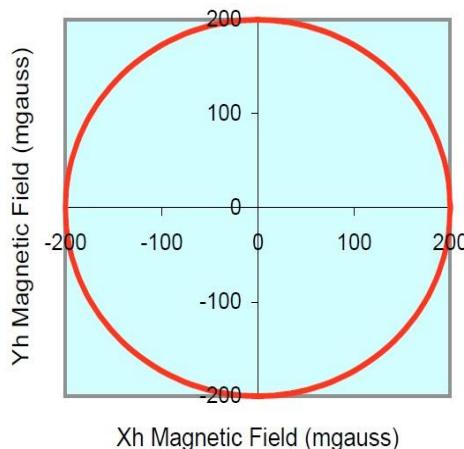


Abb.: 9 Messdaten von X- und Y-Komponente des Magnetsensors bei 360° Drehung um Z-Achse im idealen Magnetfeld (Caruso)

In Abb.: 9 wird gezeigt, welchen Kreis der gemessene Magnetfeldvektor beschreibt, wenn man den Sensor um 360° in einem homogenen Magnetfeld drehen würde. Jedoch gibt es Störfaktoren, welche beachtet werden müssen.

2.7.1. Hard-Iron Effekte

Als Hard-Iron Effekte werden magnetische Störfelder bezeichnet, die durch den Einfluss von Dauer- oder Elektromagneten, sowie polarisierten ferromagnetischen Körpern entstehen.

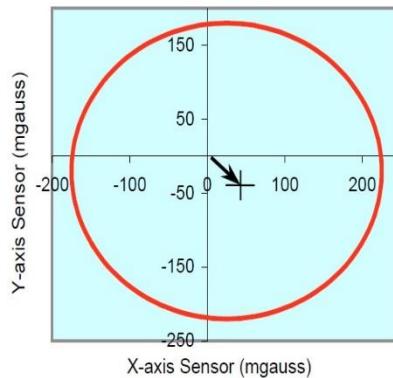


Abb.: 10 Messdaten von X- und Y-Komponente des Magnetsensors bei 360° Drehung um Z-Achse unter Hard-Iron-Effekten (Caruso)

Dabei verschiebt sich der Mittelpunkt des idealen Kreises (vgl. Abb.: 9). Dies lässt sich jedoch, durch das in Kap.: 2.5.1 beschriebene Kalibrierungsverfahren, relativ simpel korrigieren. Allerdings funktioniert das nur so lange, wie keine neuen Störfelder auftreten. In dem Fall müsste die Kalibrierung wiederholt werden.

2.7.2. Soft-Iron Effekte

Als Soft-Iron Effekte werden magnetische Störfelder bezeichnet, die durch den Einfluss von nicht-, oder nur sehr gering-polarisierten ferromagnetischen Körpern entstehen.

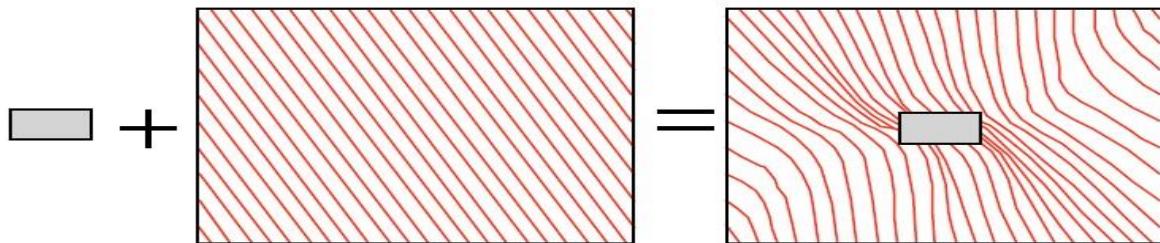


Abb.: 11 Verzerrung eines homogenen Magnetfeldes durch Einfluss von ferromagnetischem Körper (Caruso)

Der Betrag der magnetischen Flussdichte wird dabei nur gering oder gar nicht verändert. Jedoch verlaufen die Feldlinien nicht mehr homogen, sondern beugen und verzerrten sich in der Umgebung des Körpers. Diese Effekte könnten theoretisch ebenfalls durch eine Kalibrierung minimiert werden, in dem man beispielsweise im Anschluss an die Kalibrierung aus Kap.:2.5.1 den Sensor um exakt 360° grad dreht und dann die Messwerte zu einem Kreis extrapoliert. Da die Störung jedoch abhängig von der Ausrichtung und Entfernung des Sensors zu dem Körper

ist, ist eine solche Kalibrierung nur wenig sinnvoll, solange der Körper nicht fest mit dem Sensor verbunden ist und sich im Falle der Drehung mit dreht.

2.7.3. Einfluss von Wechselstrom-Magnetfeldern

Aufgrund der teils sehr hohen Bandbreite der Magnetsensoren (vgl. Tab.: 1), kommt der Einfluss, etwaig auftretender Wechselstrom-Magnetfelder, ebenfalls als mögliche Problemquelle in Betracht. Da es sich, bei dem in dieser Arbeit verwendeten Magnetometer vom Typ LSM303DLHC, um Magneto-Resistiven Sensor handelt, welcher auf Basis des AMR-Effekts funktioniert (STMicroelectronics, 2010) und außerdem auch Brushless-Motoren eingesetzt werden, ist mit Störungen diesbezüglich zu rechnen. Bei Brushless-Motoren handelt es sich um Elektromotoren, bei welchen die Umpolung des Magnetfeldes, welches den Rotor des Motors in Bewegung setzt, ohne Bürsten stattfindet. Um dies zu ermöglichen, befinden sich in den Motorgehäusen, radial um den Rotor angebrachte Spulen. Durch diese Spulen wird dann in abwechselnder Reihenfolge, ein starker- impulsartiger- elektrischer Strom geleitet, worauf in der Umgebung der Spulen, starke Magnetfelder entstehen. Durch ein präzises Timing der Impulse, wird der Rotor dann in Bewegung versetzt (Wikipedia). Diese Methode ist zwar aufwendiger im Aufbau, da spezielle Controller benötigt werden, allerdings wird der Energieverbrauch gesenkt und damit die Effizienz der Motoren stark gesteigert. Allerdings entstehen, durch das hochfrequente An und Ausschalten der Spulen, Wechselstrom-Magnetfelder, welche ihre Richtung permanent ändern. Diese entstehen dabei nicht nur um die Spulen, sondern auch radial um die elektrischen Leiter, die Controller und Brushless-Motor miteinander verbinden.

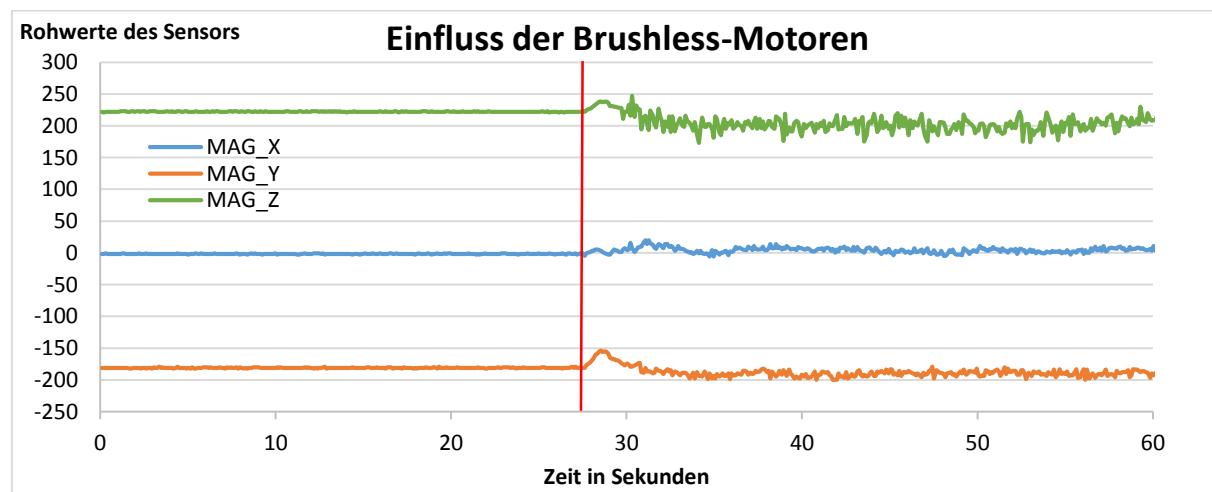


Abb.: 12 Einfluss von Brushless-Motoren auf Magnetsensor (ab roter Linie sind Motoren eingeschaltet)

In Abb.: 12 lässt sich erkennen, dass die Fluktuation der Messdaten deutlich ansteigt, sobald die Motoren angeschaltet werden.

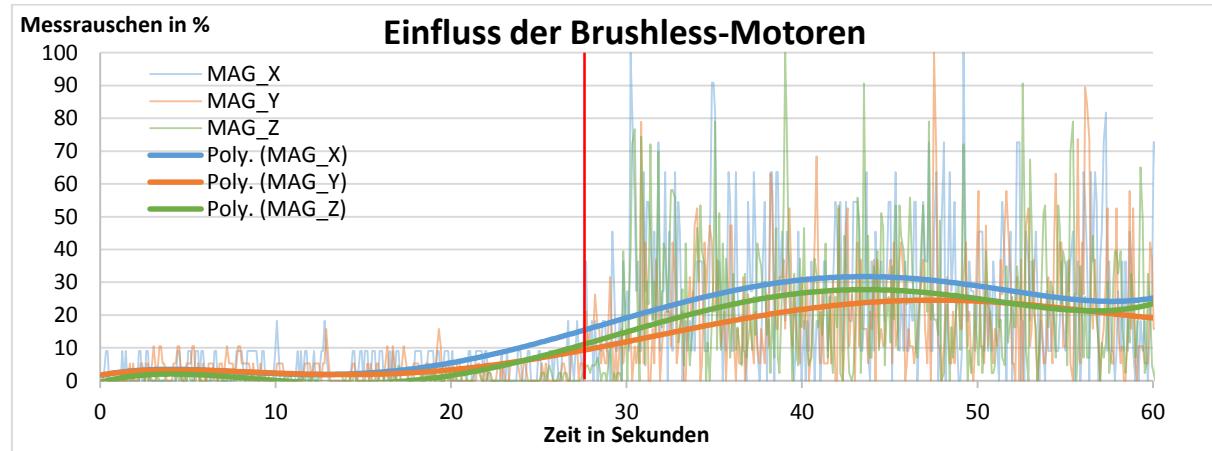


Abb.: 13 Prozentuale Veränderung des Messrauschen, durch Einfluss von Brushless-Motoren auf Magnetsensor, mit polynominalen Kennlinien. Bezieht sich auf Abb.: 12

Im Durchschnitt erhöht sich dadurch das Messrauschen um etwa 20-30%, verglichen mit dem auftretenden Messrauschen, wenn die Motoren nicht angeschaltet sind (vgl. Abb.: 13). Dies hat zur Folge, dass auch der aus diesen Messdaten gewonnene Gier-Winkel ein erhöhtes Rauschen aufweist. Im Jahr 2004, wurden am „National Institute of Standards and Technology“ in Boulder/USA Experimente durchgeführt, um Einflüsse dieser Art näher zu untersuchen (Stutzke, et al., 2004). Dabei wurden verschiedene Magneto-Resistive Sensoren, in einem Gleichstrom-Magnetfeld platziert, welches von einem Wechselstrom-Magnetfeld überlagert wurde. Es wurde untersucht, inwieweit ein Wechselstrom-Magnetfeld, abhängig von dessen Frequenz, eine Veränderung in der Messung hervorrufen kann. Bei den untersuchten Sensoren handelt es sich u.a. um den, auf dem AMR-Effekt basierenden, Magnetsensor HMC1001 der Firma Honeywell.

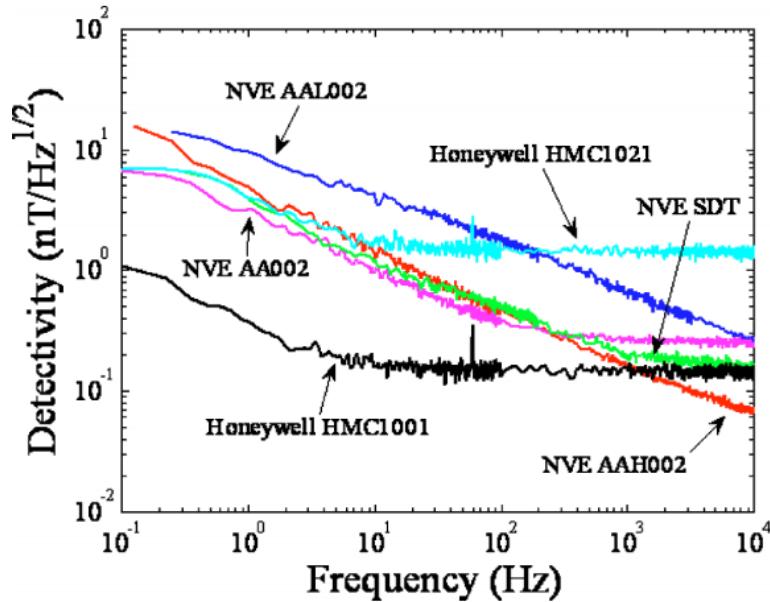


Abb.: 14 Sensitivitäten verschiedener Magneto-Resistiver Sensoren, auf Veränderungen im umgebenden Magnetfeld unter unterschiedlichen Frequenzen (Stutzke, et al., 2004)

Wie aus Abb.: 14 Sensitivitäten verschiedener Magneto-Resistiver Sensoren, auf Veränderungen im umgebenden Magnetfeld unter unterschiedlichen Frequenzen ersichtlich, beeinflusst das Wechselstrom-Magnetfeld, die Messungen des Sensors vom Typ HMC1001, ab einer Frequenz von etwa 10Hz. Da der, in dieser Arbeit verwendete Sensor, nach dem gleichen Messprinzip funktioniert, lässt sich vermuten, dass dieser, bei ähnlichen Frequenzen, auch ähnlichen Stör-Effekten ausgesetzt ist. Dies würde, die in Abb.: 13 Prozentuale Veränderung des Messrauschens, durch Einfluss von Brushless-Motoren gezeigten Einflüsse der Brushless-Motoren erklären.

2.8. Bisherige Ansätze

2.8.1. Sensorfusion mit DCM-Algorithmus

Ein möglicher Ansatz zur Sensorfusion von Gyroskop, Beschleunigungsmesser und Magnetsensor, wurde 2009 von den Autoren William Premerlani und Paul Bizard in einem wissenschaftlichen Artikel vorgestellt (Premerlani, et al., 2009). Die Sensorfusion wird dabei hauptsächlich mit Hilfe von Richtungskosinusmatrizen (eng. DCM) vollzogen, mit welcher neben der eigentlichen Fusionierung, auch Aussagen zu Messfehlern einzelner Sensoren gemacht werden können. Auf diese Weise ist es möglich, das Wegdriften des Nick- und Roll-Winkels, aber auch des Gier-Winkels zu verhindern oder zumindest stark zu verringern. Dabei

werden lineare Differentialgleichungen aufgestellt, welche die jeweiligen gemessenen physikalischen Effekte (z.B. Beschleunigungen, Drehraten) in einen logischen Zusammenhang stellen.

Der Hersteller Pololu hat als Anwendungsbeispiel für eine, von dieser Firma vermarkteten IMU⁸, einen Programmcode zur Verfügung gestellt, dessen Algorithmen im Wesentlichen auf dem vorgestellten Ansatz basieren. Die Software wurde für die Einsteiger-Mikrocontrollerplattform Arduino konzipiert und als OpenSource-Software bei dem Hosting Anbieter GitHub veröffentlicht (Pololu, 2013). Da dem Autor dieser Arbeit sowohl ein Arduinoboard, als auch die entsprechende IMU zur Verfügung steht, wurde zu Vergleichszwecken die Software aufgespielt und einem Test unterzogen.

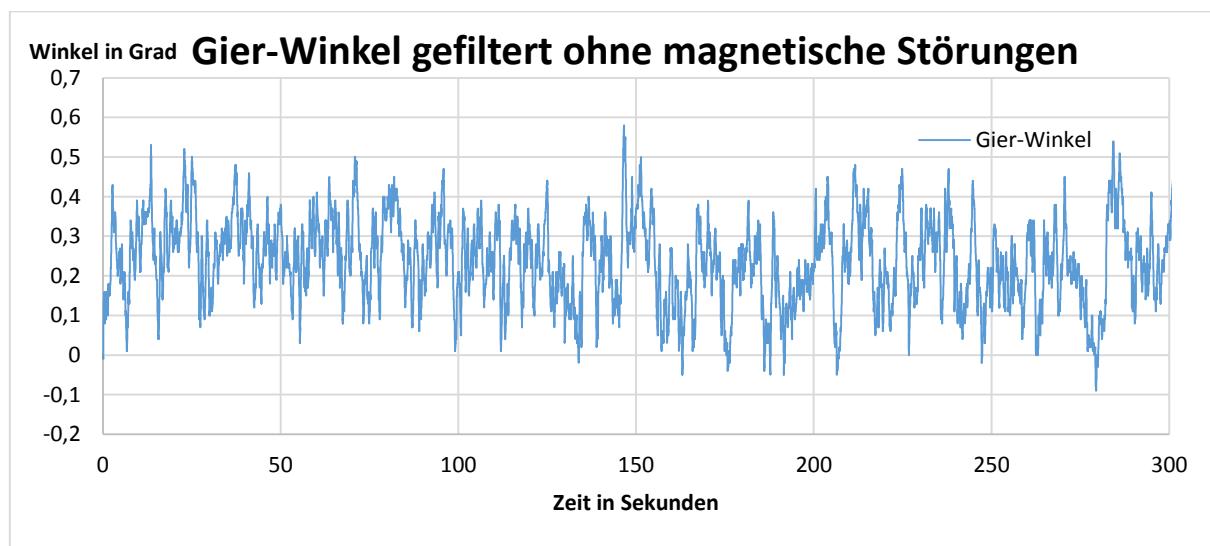


Abb.: 15 Gier-Winkel gefiltert im ruhenden System auf Arduinoboard, ohne magnetische Störungen

Wie aus Abb.: 15 ersichtlich, fluktuiert der Gier-Winkel zwar um etwa 0.5° , jedoch ist selbst nach 300s kein nennenswerter Drift vorhanden. Im Vergleich zur ungefilterten Variante, die in Abb.: 8 illustriert wird, ist dies eine erhebliche Verbesserung. Die Kalibrierung des Magnetsensors findet nach dem gleichen Prinzip, wie in Kap.:2.5.1 beschrieben, statt. Wie bereits erwähnt, behält die Kalibrierung nur so lange ihre Gültigkeit, wie keine neuen Hard- oder Soft-Iron Effekte auftreten.

⁸ IMU – Inertial Measurement Unit

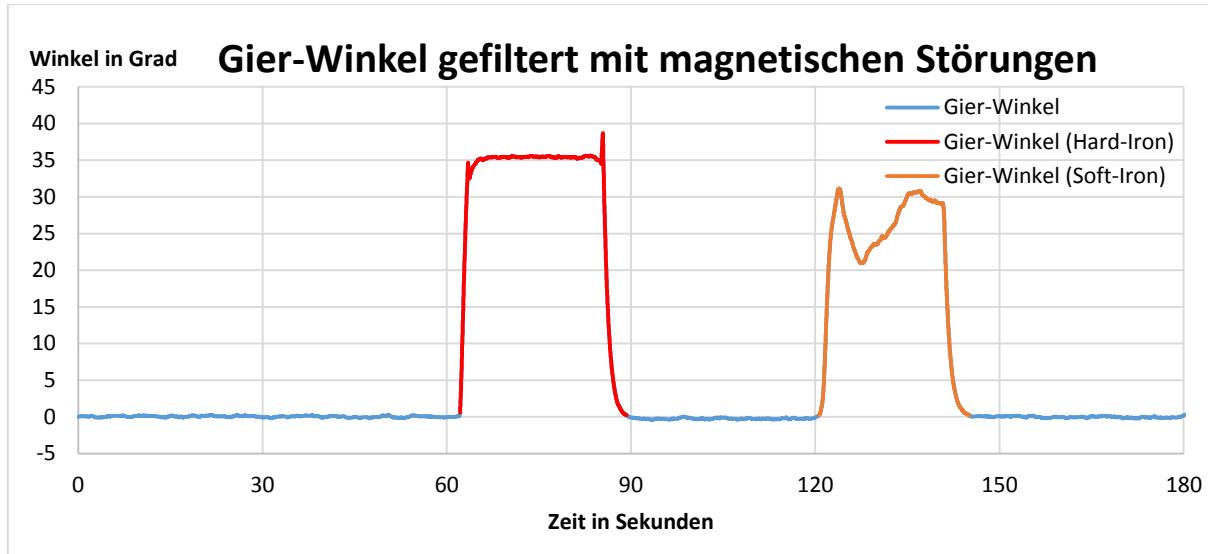


Abb.: 16 Gier-Winkel gefiltert im ruhenden System auf Arduinoboard, mit magnetischen Störungen

Im rot markierten Bereich in Abb.: 16, wurde im Abstand von ca. 10cm ein kleiner handelsüblicher Dauermagnet platziert, im orangenen Bereich ein ferromagnetischer Schraubenzieher aus Stahl.

Das Experiment zeigt deutlich die Schwachstellen des Ansatzes, da sowohl Soft- als auch Hard-Iron Effekte, welche sich auf die Messungen des Magnetometers auswirken, nicht mit linearen Differentialgleichungen beschrieben und damit auch nicht kompensiert werden können. Die doch erhebliche Abweichung zeigt, unter Anerkennung der Resultate bei der Driftkompensation ohne magnetische Störfaktoren, weiterhin, dass das Problem nicht auf die begrenzten Hardware-Ressourcen⁹ des Arduinoboards zurück zu führen ist, sondern auf den konzeptionellen Ansatz. Allerdings muss hierbei fairerweise erwähnt werden, dass das Konzept vor allem für Anwendungen im Outdoorbereich (z.B. Modelflugzeug) entwickelt wurde und dort wahrscheinlich mit einem weit weniger großem Einfluss von Störfeldern gerechnet werden muss, welcher nicht zuvor durch die Kalibrierung kompensiert werden kann.

2.8.2. Sensorfusion mit Quaternion basiertem Algorithmus

Ein weiterer Ansatz zur Sensorfusion von Gyroskop, Beschleunigungsmesser und Magnetsensor, wurde 2012, im Rahmen einer Bachelor-Arbeit, von Stefan Otto vorgestellt (Otto, 2012). Kern der Sensorfusion ist ein auf Quaternionen basierter Algorithmus. Das vorgesehene Anwendungsgebiet war dabei, das Messsystem „CUELA“, mit welchem die Belastung körperlicher Arbeit gemessen wird.

⁹ CPU: ATMEL ATMEGA2560 8bit | Taktfrequenz: 16MHz | RAM: 8kB | FLASH: 256kB

Die Fusionierung wurde hauptsächlich, durch die Verwendung dynamisch-aufgebauter Komplementärfilter erreicht. Dieser Filter funktioniert nach dem Prinzip, des gewichteten Mittelwerts. Der entscheidende Gewichtungsfaktor wurde dabei vor allem in Abhängigkeit von der aktuell gemessenen Drehrate des Gyroskops ermittelt. Um auch den Drift des Gier-Winkels vermindern zu können, wurde ein Magnetsensor eingesetzt. Damit etwaige Störfelder die Berechnung des Gier-Winkels nicht negativ beeinflussen, wurde versucht diese rechtzeitig zu erkennen. Der entwickelte Algorithmus sieht vor, dass bei einer erfolgreichen Erkennung eines magnetischen Störfeldes, der Magnetsensor solange nicht berücksichtigt wird, bis das Störfeld die Messung nicht mehr beeinflusst.

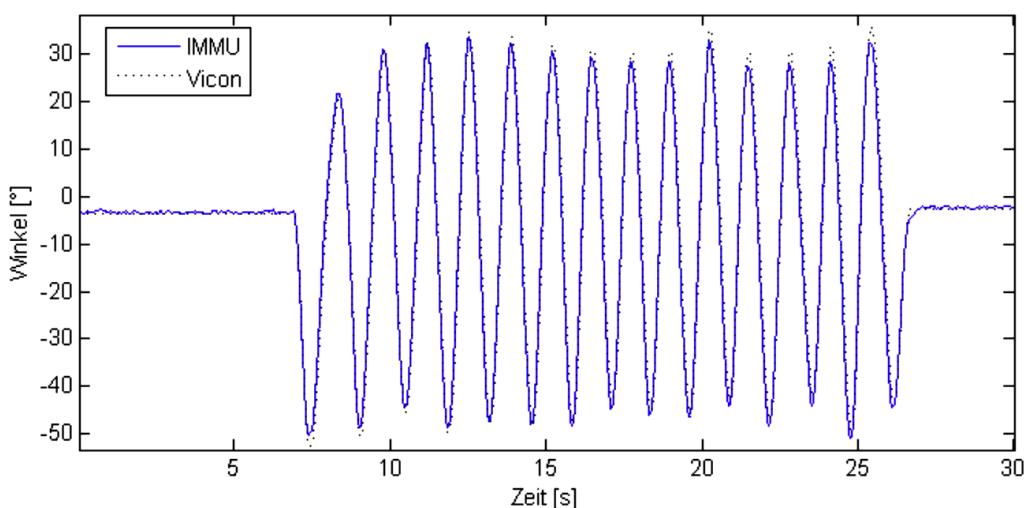


Abb.: 17 Gier-Winkel gefiltert im rotierenden System um Z-Achse, ohne magnetische Störungen

Aus Abb.: 17 ist ersichtlich, dass der entwickelte Algorithmus ein Driftverhalten des Gier-Winkels, im dynamischen Fall und ohne magnetische Störfelder, vermindert. Der Autor gibt an, dass im Verlauf der Messung, die maximale Abweichung 0.31° betrug.

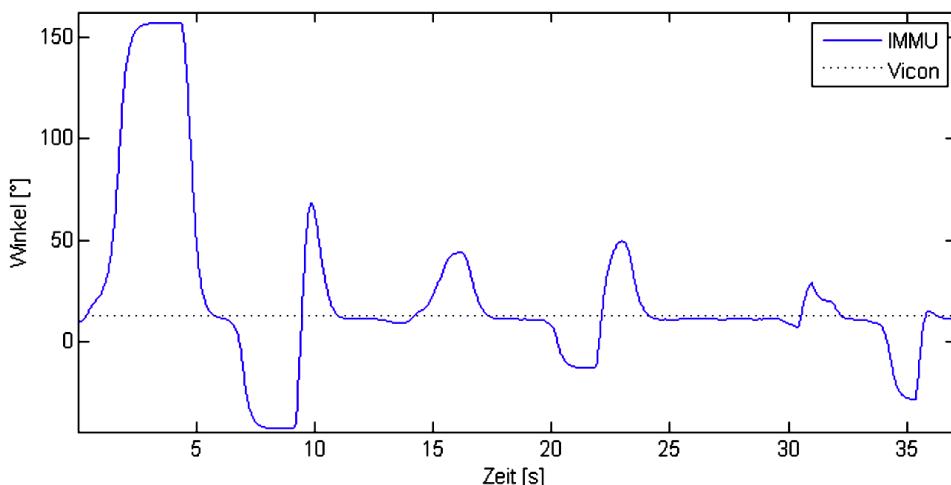


Abb.: 18 Gier-Winkel gefiltert im ruhenden System, mit magnetischen Störungen

Im statischen Fall und unter Einfluss magnetischer Störungen, versagt der Algorithmus allerdings, was zu Abweichungen von über 150° führt (siehe Abb.: 18).

Damit stellt auch dieser Ansatz, nur eine unzureichende Möglichkeit dar, auch unter magnetischen Störeffekten, eine funktionierende Bestimmung der Orientierung zu gewährleisten.

3. Konzept

3.1. Überblick

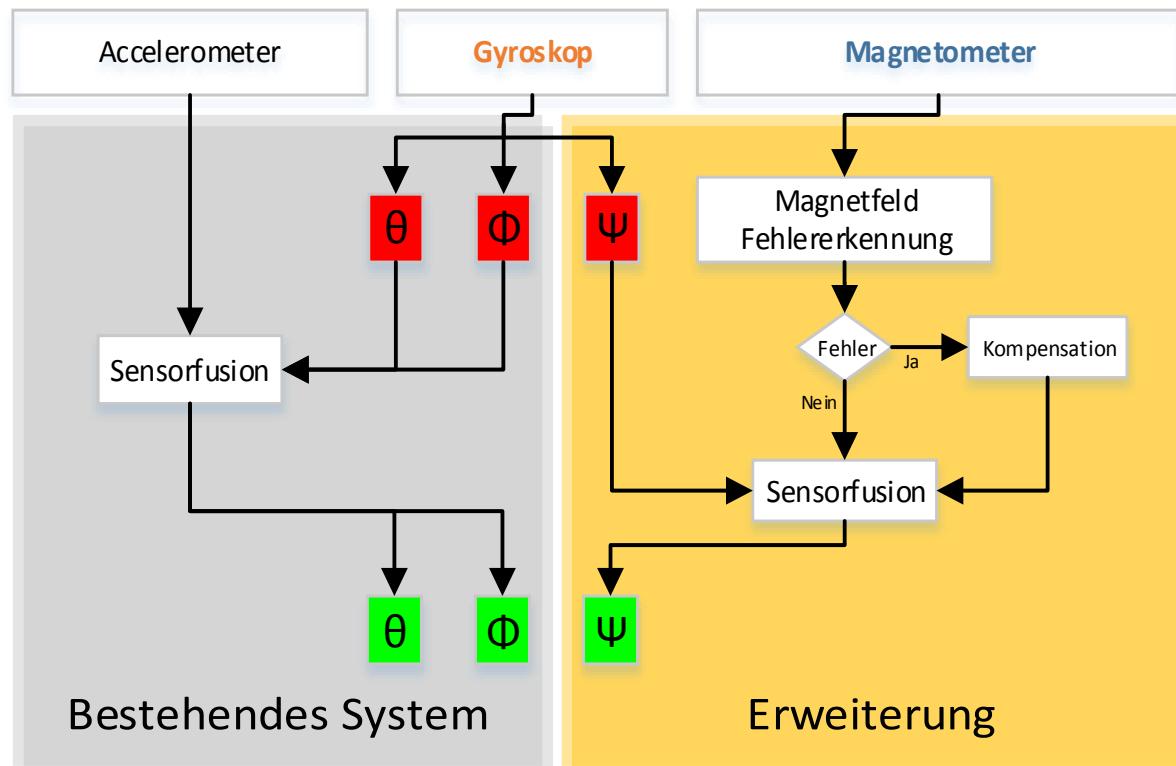


Abb.: 19 Schematische Darstellung - Allgemeines Konzept

Das Ziel dieser Arbeit ist, mit Hilfe eines Magnetsensors, eine relevante Verbesserung zu erzielen, bei der Ermittlung von Drehungen um die Gier-Achse eines Quadrocopters. Um dies zu erreichen muss ein Konzept entwickelt werden, welches erlaubt, die Sensordaten des Gyroskops und des Magnetsensors zu fusionieren. Da das vom Magnetsensor gemessene Erdmagnetfeld, durch lokale Magnetfelder überlagert wird, muss eine Möglichkeit gefunden werden, diese Störeffekte zu erkennen.

Das in dieser Arbeit entwickelte Konzept, sieht daher vor, dass dies im Rahmen einer Magnetfeld-Fehlererkennung erfolgen soll (vgl. Abb.: 19). Ein weiterer wichtiger Aspekt des Konzeptes ist, dass im Falle der erfolgreichen Detektierung einer Störung, im Gegensatz zum Ansatz aus Kap.:2.8.2, diese auch kompensiert werden soll. Sind alle Störfelder kompensiert, erfolgt eine Sensorfusion von Gyroskop und Magnetsensor. Nachfolgend werden 2 Möglichkeiten vorgestellt, wie dieser konzeptionelle Ansatz realisiert werden könnte.

3.2. Konzept I: Magnetfeldvektor als Referenz

Wie eingangs erwähnt, liegt das Hauptproblem dabei, eine Möglichkeit zu finden, die eine Verwendung des Magnetsensors ermöglicht, unabhängig von Störfeldern die zum Zeitpunkt der Kalibrierung noch nicht im Messbereich waren. Konzept I sieht dabei vor, den vom Magnetsensor gemessenen Vektor, als absolute Referenz zu betrachten, aus der dann der Gier-Winkel bestimmt werden kann. Denn im idealen System, würde bei einer Drehung des Körpers um einen Winkel Ψ , sich der Magnetfeldvektor ebenfalls um diesen Winkel ändern. Bevor jedoch nach einer Drehung, der neue Gier-Winkel ermittelt werden kann, muss sichergestellt werden, dass der vom Magnetsensor bestimmte Winkel, wirklich nur aufgrund einer realen Drehung und nicht aufgrund von neuen magnetischen Störfeldern entstanden ist. Um dies zu erreichen, sieht Konzept I vor, sich die Fähigkeit des Gyroskops zu Nutze machen, schnelle Drehungen genau bestimmen zu können. Die Idee dabei ist, dem Gier-Winkel vom Magnetsensor nur soweit zu vertrauen, solange dieser sich im Rahmen der Winkeländerung bewegt, die vom Gyroskop ermittelt wurde.

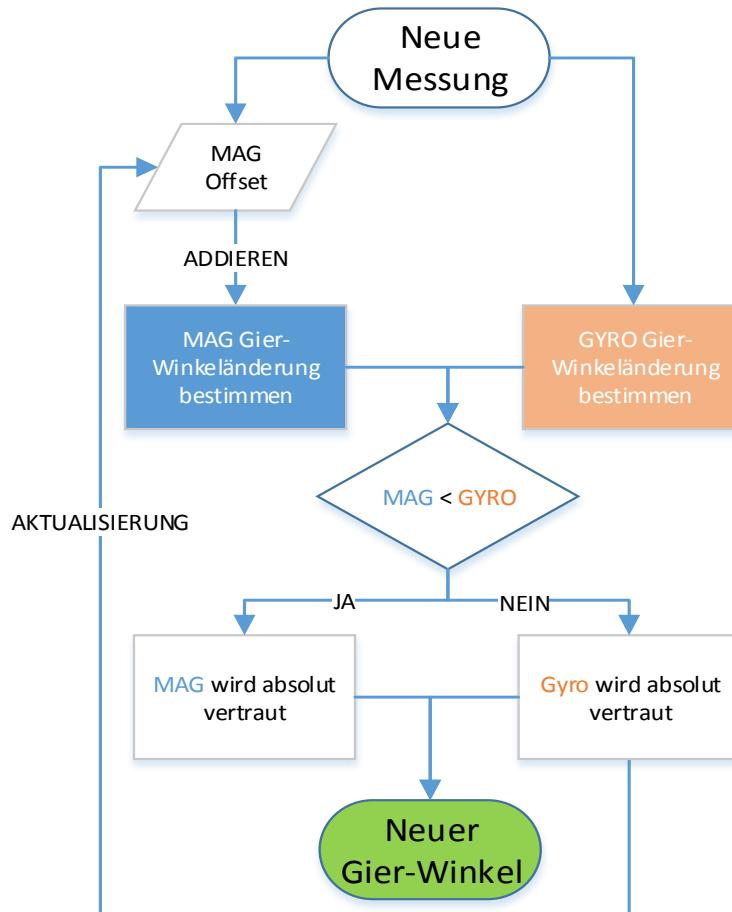


Abb.: 20 Schematische Darstellung Konzept I

Nachdem die jeweiligen Winkeländerungen des Gier-Winkels Ψ , von Magnetsensor($\Delta \Psi_{Mag}$) und Gyroskop ($\Delta \Psi_{Gyro}$) ermittelt wurden, wird überprüft, ob eventuell magnetische Störfelder, die Messung zu sehr verfälscht haben könnten(vgl. Abb.: 20). Dabei wird davon ausgegangen, dass die Winkeländerung $\Delta \Psi_{Gyro}$, aufgrund von Messfehlern, höchstens zu groß, aber nie zu klein sein kann. Von dieser Annahme ausgehend, stellt $\Delta \Psi_{Gyro}$ das Maximum dar, um welches sich der Winkel Ψ verändert haben könnte. Wird nun eine Winkeländerung $\Delta \Psi_{Mag}$ berechnet, welche größer als $\Delta \Psi_{Gyro}$ ist, so kann davon ausgegangen werden, dass eine Störung zum Zeitpunkt der Messung, die Berechnung von $\Delta \Psi_{Mag}$ negativ beeinflusst hat. Dieser Teil des Konzeptes, stellt den Part der Magnetfeld-Fehlererkennung dar(vgl. Abb.: 19). Wurde ein Fehler erkannt, geht nur die Änderung $\Delta \Psi_{Gyro}$ in die Berechnung von Ψ_{Neu} ein. Die Aufgabe der Kompensierung einer erkannten Störung, wird dabei mit Hilfe eines Offsets (Mag_{Offset}) realisiert. Das Offset wird bei jeder Messung des Magnetsensors, vom Winkel Ψ_{Mag} subtrahiert, noch bevor $\Delta \Psi_{Mag}$ berechnet wird. Eine Aktualisierung von Mag_{Offset} findet statt, sobald eine magnetische Störung erkannt wurde. In diesem Fall wird die Differenz zwischen dem, durch $\Delta \Psi_{Gyro}$ aktualisierten Winkel Ψ_{Neu} und dem Winkel Ψ_{Mag} bestimmt und Mag_{Offset} überschrieben. Wurde kein Fehler ermittelt, wird auf die Richtigkeit von Ψ_{Mag} vertraut und Ψ_{Neu} auf Ψ_{Mag} gesetzt.

Theoretisch ist es mit Konzept 1 möglich, den Gier-Winkel des Körpers stets genau zu halten, da auch der Einfluss von Störfeldern, die zum Zeitpunkt der Kalibrierung nicht vorhanden waren, kompensiert werden kann. Weiterhin wird damit auch das Problem, des übermäßigen Driftens umgangen, da nur bei erkannten Störfeldern, einzig auf das Gyroskop vertraut wird.

3.3. Konzept II: Driftkompensation des Gyroskops

Im Gegensatz zu Konzept I, in welchem das Gyroskop nur als Hilfsinstrument genutzt wird, wird in Konzept II, der Fokus auf die Driftkompensation des Gyroskops gelegt.

Mit einem Gyroskop lassen sich im dynamischen-rotierendem System, in begrenzten zeitlichen Intervallen, akzeptable Ausrichtungswinkel ermitteln. Im statischen Fall kommt es jedoch, wie bereits erwähnt, zur Fehldetektierung von Rotationen, welche dazu führen, dass bei der Integration der Messwerte, Winkel-Änderungen bestimmt werden, die nicht stattgefunden haben. Der Ansatz von Konzept II sieht nun vor, eine Filterung des Gier-Winkels durchzuführen, welche ermöglicht, die Sensorwerte beider Sensoren gewichtet zu verwenden. Der Grundgedanke von Konzept I, äußere Störfelder mit Hilfe eines Offsets auszugleichen,

bleibt dabei erhalten, nur soll die starre Entscheidungsfindung, aus der resultiert welchem Sensor vertraut werden soll, gelockert werden. Um dies zu erreichen, wird das Modell der Exponentiellen-Glättung verwendet.

Der Vorteil, des auch als Exponential-Filter bezeichnenden Verfahrens ist, dass es keines systematischen Musters bedarf, um das Model einsetzen zu können. Damit ist diese Art der Filterung wie geschaffen für das hier betrachtete Problem.

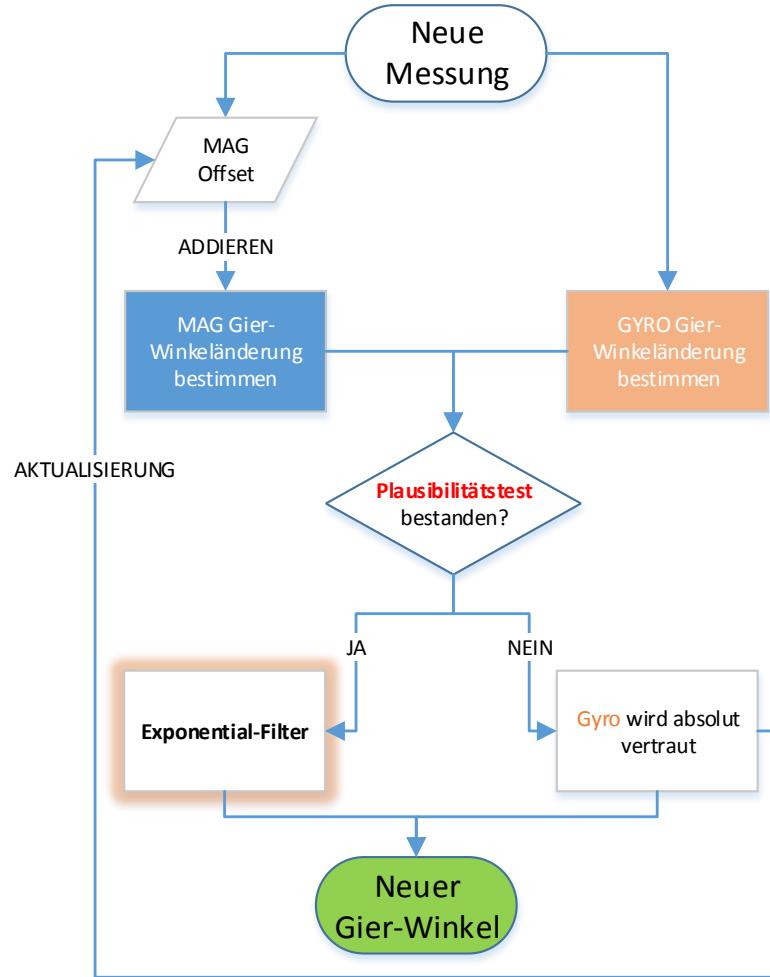


Abb.: 21 Schematische Darstellung Konzept II

Ob jedoch der Exponential-Filter auch eingesetzt wird, hängt davon ab, ob der Plausibilitätstest bestanden wird (vgl. Abb.: 21). Dieser Test, welcher die Magnetfeld-Fehlererkennung realisiert (vgl. Abb.: 19), stellt eine Erweiterung des in Konzept I entwickelten Testes dar. Auf die genauen Komponenten des Tests, wird in Kap.: 4.2.2 eingegangen. Wird der Test nicht bestanden, kommt der Filter nicht zum Einsatz und nur die Messung des Gyroskops, geht in den aktualisierten Winkel Ψ_{Neu} ein. Die Idee dabei ist, dass große Winkeländerungen, ohne Umwege, in die Berechnungen eingehen sollen, damit der Vorteil des Gyroskops schnelle

Drehungen mit hoher Genauigkeit messen zu können, nicht auf Kosten der Driftkompensation limitiert wird. Ein weiterer Grund für die Erweiterung des Testes, stellt der bereits diskutierte Umstand dar, dass sich magnetische Störfaktoren (siehe Kap.:2.7) unterschiedlich auswirken und daher mit Hilfe verschiedener Kriterien abdeckt werden müssen. Bei einem Nicht-Bestehen des Testes, wird analog zu Konzept I, eine Kompensation der Störeinflüsse, durch die Neuberechnung von Mag_{Offset} erreicht.

Wurde kein Fehler erkannt, wird der Exponential-Filter angewendet. Kern des Filters bildet dabei folgende, für die Problemstellung angepasste, Gleichung.

$$\Psi_{Neu} = \alpha * (\Psi_{Alt} + \Delta \Psi_{Gyro}) + (1 - \alpha) * (\Psi_{Mag} + Mag_{Offset}) \quad \text{Gl.: 18 Filtergleichung}$$

Mit Hilfe des Faktors α , kann eine Gewichtung der Messwerte von Gyroskop und Magnetsensor erreicht werden. Dieser wird dynamisch in Abhängigkeit davon berechnet, wie groß die Differenz der Winkeländerungen von Gyro und Magnetometer ist.

$$\alpha = \left| \frac{1}{\Delta \Psi_{Mag} - \Delta \Psi_{Gyro}} \right| \quad \text{Gl.: 19 Alpha für Filtergleichung}$$

Weiterhin muss α begrenzt werden, um eine Übergewichtung eines der Sensoren zu vermeiden. Aufgrund des rekursiven Charakters des Exponential-Filters, ist es möglich den Drift des Gyroskops aktiv zu minimieren.

Aufgrund dessen, dass mit einem Exponential-Filter normalerweise durch Betrachtung der zeitlichen Folge eines einzigen Signals eine Filterung durchgeführt wird, stellt der Filter in diesem Fall keinen reinen Filter dieser Art dar, sondern eher einen Komplementär-Exponential-Filter.

3.4. Diskussion und Auswahl des Konzeptes

Beide Konzepte haben ihre Vor- und Nachteile, wenn gleich sie im Kern ähnlich sind. Der Vorteil von Konzept I ist definitiv die Einfachheit des Algorithmus, im Hinblick auf die spätere Implementierung auf dem Quadrocopter. Auch sind keine aufwendigen Berechnungen nötig, so dass die Geschwindigkeit der Ausführung kein Problem darstellen sollte.

Zwar findet keine Sensorfusion im eigentlichen Sinne statt, jedoch werden die Stärken beider Sensoren genutzt, um die jeweiligen Schwächen effektiv auszugleichen, damit in Summe, ein besseres Ergebnis erreicht wird.

Der vermeintliche Vorteil der Einfachheit, in Bezug auf die Implementierung, birgt aber auch den größten Nachteil des Konzepts. Dadurch, dass nur eine Entscheidung den Ausschlag gibt,

welcher Sensorwert verworfen und welchem vertraut wird, fehlt es dem Konzept an Vielseitigkeit und damit an Leistungsfähigkeit. Dies wird durch den Umstand verstärkt, dass keinerlei Parameter zur Feinjustierung existieren.

Vom Prinzip, ist Konzept II eine Weiterentwicklung von Konzept I. Die Schwächen in der Vielseitigkeit werden behoben, da hier eine wirkliche Sensorfusion stattfindet, durch Verwendung des angepassten Komplementär-Exponential-Filters. Durch die vorherige Magnetfeld-Fehlererkennung mit Hilfe des Plausibilitätstests wird, neben anderen Aspekten, besonders der Fähigkeit des Algorithmus Sorge getragen, spontane größere Winkeländerungen ungedämpft weiterzugeben.

Diese Vorteile, gehen dabei allerdings auf Kosten der Einfachheit. Zwar halten sich der Mehraufwand in der Implementierung, sowie der Geschwindigkeitsverlust in Grenzen, jedoch müssen erst sinnvolle Schwellwerte für den Plausibilitätstests gefunden werden, damit der Algorithmus eine genaue Bestimmung des Gier-Winkels ermöglichen kann.

Da die Vorteile von Konzept II, dessen Nachteile bei weitem überwiegen, fällt die Auswahl auf Konzept II.

4. Implementierung

4.1. Aufbau der Software

Der in dieser Arbeit entwickelte Software-Part, stellt eine Erweiterung der bereits seit etwa 2.5 Jahren bestehenden Software für ein Quadrocopter-Projekt dar. Die bestehende Software lässt sich dabei in 2 Bereiche unterteilen.

Der 1. Bereich beschäftigt sich mit der Regelung des Quadrocopters und der Verteilung der Sensordaten. Dieser Teil wird auf einem Mikrocontroller ausgeführt und umfasst über 50 Quelldateien, in welchen u.a. das vorgestellte Konzept II implementiert wird. Verwendet wird dabei die Programmiersprache C, da diese besonders für Hardware-Nahe Programmierung geeignet ist.

Der 2 . Bereich befasst sich mit den komplexeren Aufgaben des Quadrocopters, zu denen beispielsweise die Objekterkennung zählt. Dieser Teil wird auf einem kleinen Windows-basierten PC in C++ ausgeführt. Der Fokus des Projekts liegt vor allem in der Schaffung eines autonomen Fluggeräts, dass selbständig anspruchsvolle Aufgaben erfüllen kann.

Da sich gerade die Regelung im Flugbetrieb, als höchst zeitkritisch darstellt, muss bei der Entwicklung des Codes besonders auf Performance-Aspekte geachtet werden, um die wertvollen Systemressourcen nicht unnötig zu beanspruchen. Konkret heißt dies, dass versucht wird so wenig wie möglich Arbeitsspeicher zu belegen und durch Verwendung von Pointern überflüssige Kopiervorgänge zu minimieren. Für dieses Vorhaben bieten sich vor allem Structs an. Aber auch unabhängig von Geschwindigkeitsfragen, eignen sich Structs besonders um den Nachteil der fehlenden Objektorientierung in C auszugleichen, da gerade Messwerte sinnvoll gruppiert werden können und so die Effizienz sowohl beim Programmieren als solches, als auch im eigentlichen Betrieb gesteigert wird. Weithin dienen sie als Interfaces zwischen den Funktionen. Auch die Möglichkeit der beliebigen späteren Erweiterung, bietet einen unschlagbaren Vorteil. Im Code werden Structs in dieser Form verwendet:

```
typedef struct {
    double gyro_x;
    double gyro_y;
    double gyro_z;

    double mag_x;
    double mag_y;
    double mag_z;

    ...
} sensorDaten;
```

4.2. Die wichtigsten Funktionen

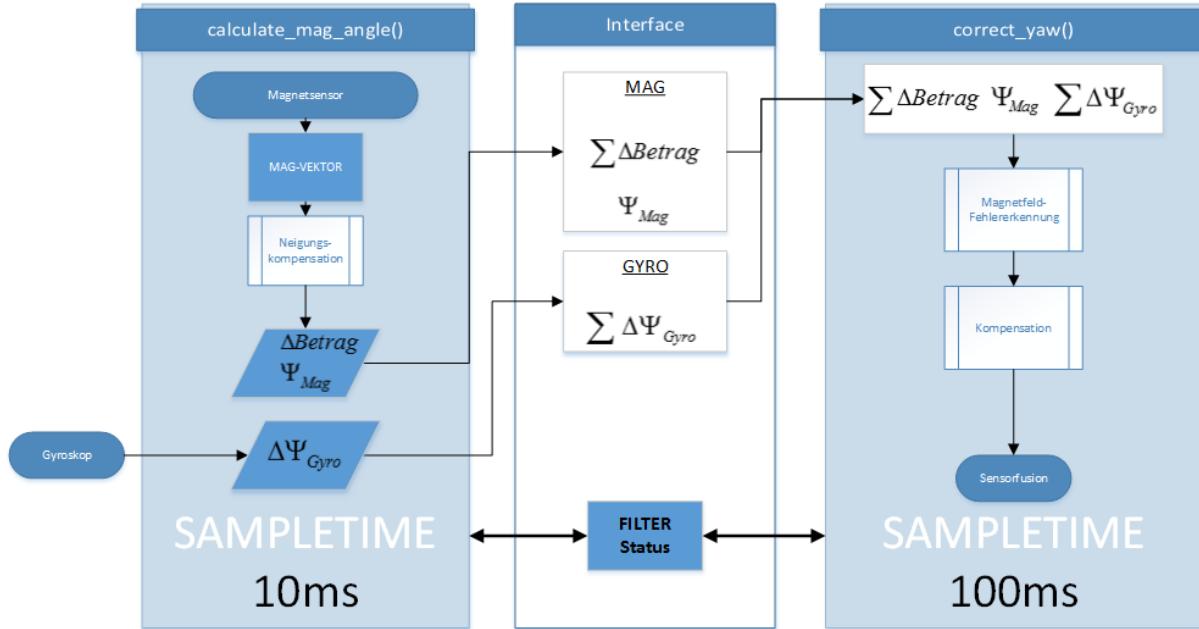


Abb.: 22 Modulübersicht

Bei der Implementierung wurde besonders darauf geachtet, die bereits vorhandene Struktur der Software beizubehalten bzw. sinnvoll zu ergänzen. Weiterhin wurde der Fokus darauf gelegt, dass der entwickelte Filter einfach Ein- und Ausgeschaltet werden kann, um einen Vergleich zur bisherigen Implementierung unkompliziert anstellen zu können. Die Hauptaufgabe des Filters verteilt sich dabei auf 2 Haupt-Funktionen. Die Funktionen sind durch ein Interface (C-Struct) miteinander verbunden, welches den einfachen Datenaustausch gewährleistet (vgl. Abb.: 22). Außerdem gibt es das zentrale Element *Filter-Status*. Mit diesem werden die Algorithmen beider Funktionen, logisch miteinander verzahnt.

4.2.1. `calculate_mag_angle`

Die Funktion `calculate_mag_angle()` übernimmt die Aufgabe der Berechnung des Gier-Winkels aus den Magnetsensor-Messdaten (vgl. Abb.: 23). Die Funktion ist dabei Teil der Quelldatei `SignalProcessing.c`, in der die komplette Auswertung aller Messdaten der verschiedenen Lagesensoren stattfindet. Der Aufruf der Funktion, erfolgt in der bestehenden `SignalProcessing()` Funktion und teilt sich deren Sampletime von 10ms.

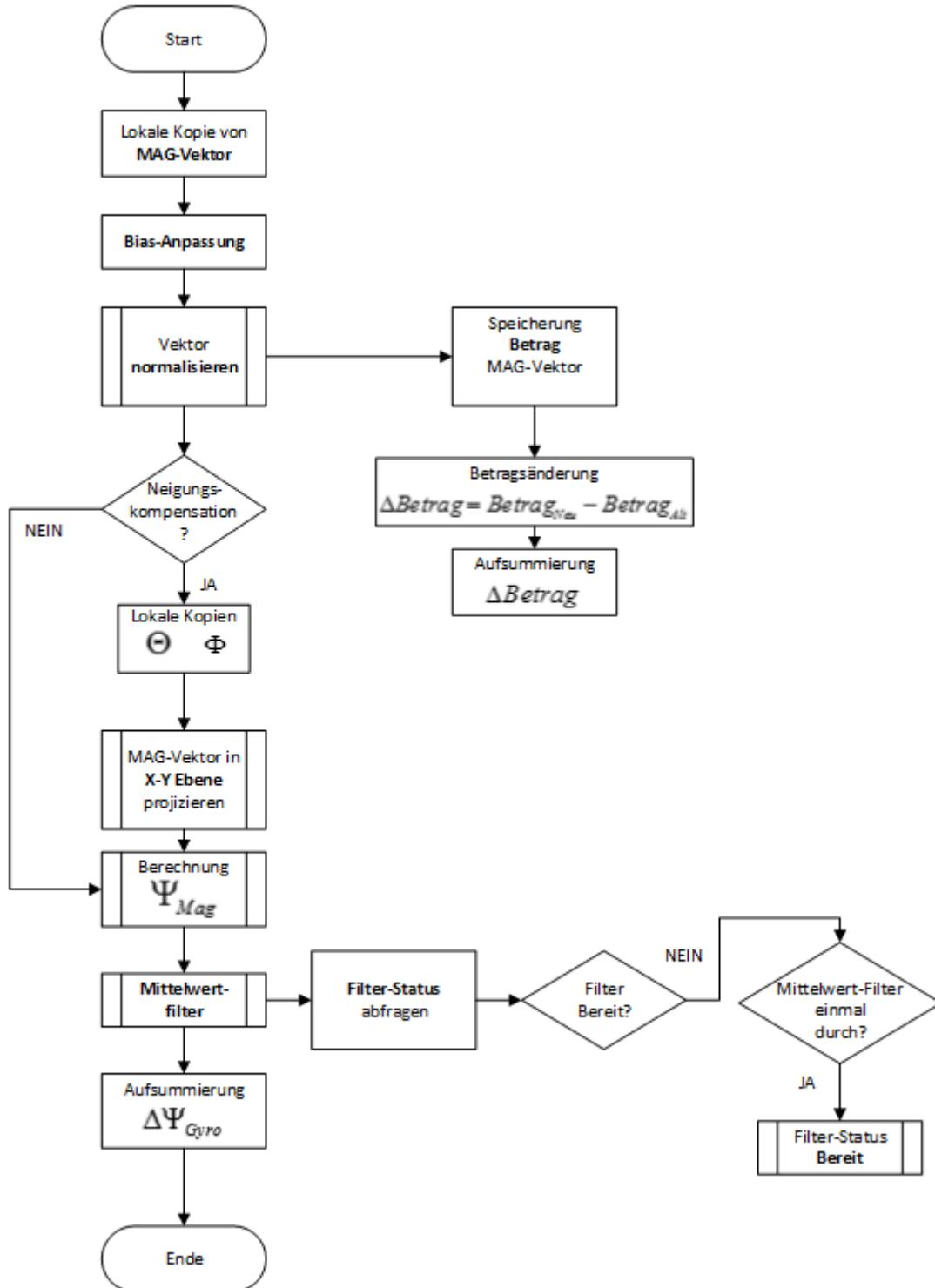


Abb.: 23 Programmablaufplan - calculate_mag_angle Funktion

Zunächst werden die Messdaten des Magnetsensors, in lokale Variablen gespeichert. Nachfolgenden wird auf den Magnetfeldvektor *MAG – Vektor*, dass in der Kalibrierung ermittelte Bias angewendet und der Vektor normalisiert. Um etwaige neue Magnetfelder zu erkennen, wird außerdem bei jeder Messung, der Betrag von *MAG – Vektor* gespeichert. Dabei ist die wichtigste Information weniger der absolute Betrag, als die Änderung des Betrages

Δ Betrag im Vergleich zur vorherigen Messung, da eine größere Änderung des Betrages, ein neues magnetisches Störfeld bedeuten könnte. Da die eigentliche Filterfunktion `correct_yaw()`, eine größere Sampletime aufweist, wird Δ Betrag zwischen der Ausführung des Filters aufsummiert und im Interface gespeichert.

Ist die Neigungskompensation aktiviert, werden zunächst der Nick-Winkel Θ und der Roll-Winkel Φ abgerufen und in lokalen Variablen gespeichert. Anschließend wird dann *MAG – Vektor*, durch Anwenden von Glg.: 16 und Glg.: 17., in die X-Y Ebene projiziert. Ist die Neigungskompensation deaktiviert, wird *MAG – Vektor* nicht verändert.

Im nächsten Schritt wird der Gier-Winkel Ψ_{Mag} mit Glg.: 15 Gier-Winkel durch Magnetfeldvektorberechnet. Da die Messdaten des Magnetsensors stark rauschen, wird Ψ_{Mag} erst durch einen Mittelwertfilter geglättet. Der Mittelwertfilter ist dabei speziell für die Anwendung auf einem Mikrocontroller optimiert. Da der Filter, den Winkel Ψ_{Mag} über einen Zeitraum filtert, welcher über die Sampletime der Filterfunktion `correct_yaw()` hinaus geht, wird bei einem erkannten Störfeld, der Filterstatus auf *Nicht – Bereit* gesetzt. Dieser Status wird erst wieder auf *Bereit* gesetzt, sobald der Mittelwertfilter, einmal komplett durchgelaufen ist.

Um alle gemessenen Winkeländerungen des Gyroskops aufzuzeichnen, wird ähnlich wie bei der Betragsänderung des Vektors Δ Betrag, die Winkeländerung $\Delta \Psi_{Gyro}$ aufsummiert und im Interface abgespeichert.

4.2.2. `correct_yaw`

Die Funktion `correct_yaw()` übernimmt die Aufgabe der Sensorfusion und der Magnetfeld-Fehlererkennung. Anders als `calculate_mag_angle()` befindet sich die Funktion in der neu erstellen Quelldatei `yaw_filter.c`. Die Sampletime ist unabhängig von sonstigen Lageregelungsfunktionen, separat in der Headerdatei `yaw_filter.h` einstellbar. Ausgeführt wird die Funktion dabei in der Hauptprogrammschleife, als eigenständiger Part des Prozess-Schedulers der Main-Funktion. Die Funktion lässt sich in 2 Teile untergliedern.

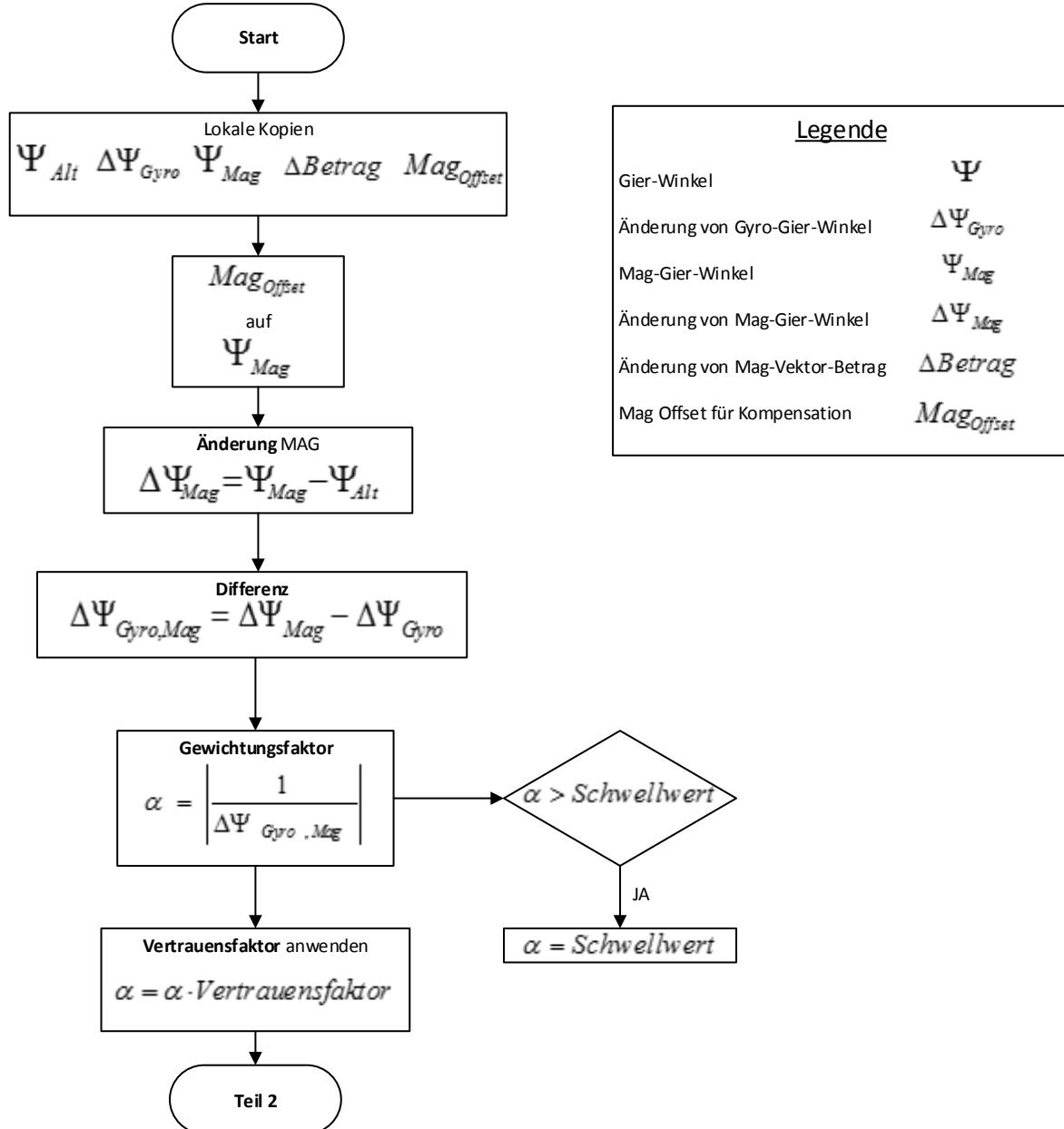


Abb.: 24 Programmablaufplan - correct_yaw Funktion Part I

Zuerst werden wieder alle benötigten Daten, in lokale Variablen gespeichert. Danach wird die Änderung des Gier-Winkels $\Delta \Psi_{Mag}$ bestimmt, auf alleiniger Basis der Messwerte des Magnetsensors.

In $\Delta \Psi_{Gyro,Mag}$ wird die entscheidende Information über die Differenz zwischen den ermittelten Winkeländerungen $\Delta \Psi_{Gyro}$ und $\Delta \Psi_{Mag}$ gespeichert. Aus der Differenz der Änderungen $\Delta \Psi_{Gyro,Mag}$, wird nach Glg.: 19 α bestimmt, welches den Gewichtungsfaktor des Exponential-Filters darstellt. Da zum einen, bei einem sehr kleinen α ($< 1^\circ$), ein α errechnet werden kann, welches größer als 1 ist und zum anderen, α einen wichtigen Parametrisierungsfaktor darstellt, wird α auf einen Wert zwischen 0 und einem definierten

Schwellwert (0.1) begrenzt. Weiterhin wird α mit einem Vertrauensfaktor multipliziert. Mit diesem Faktor wird dem Umstand Sorge getragen, dass neue Magnetfeldänderungen erst etwas gedämpft werden, bevor diese vollständig, im Rahmen von α , in die Berechnung des Gier-Winkels eingehen. Wie sich der Faktor zusammensetzt wird später erklärt.

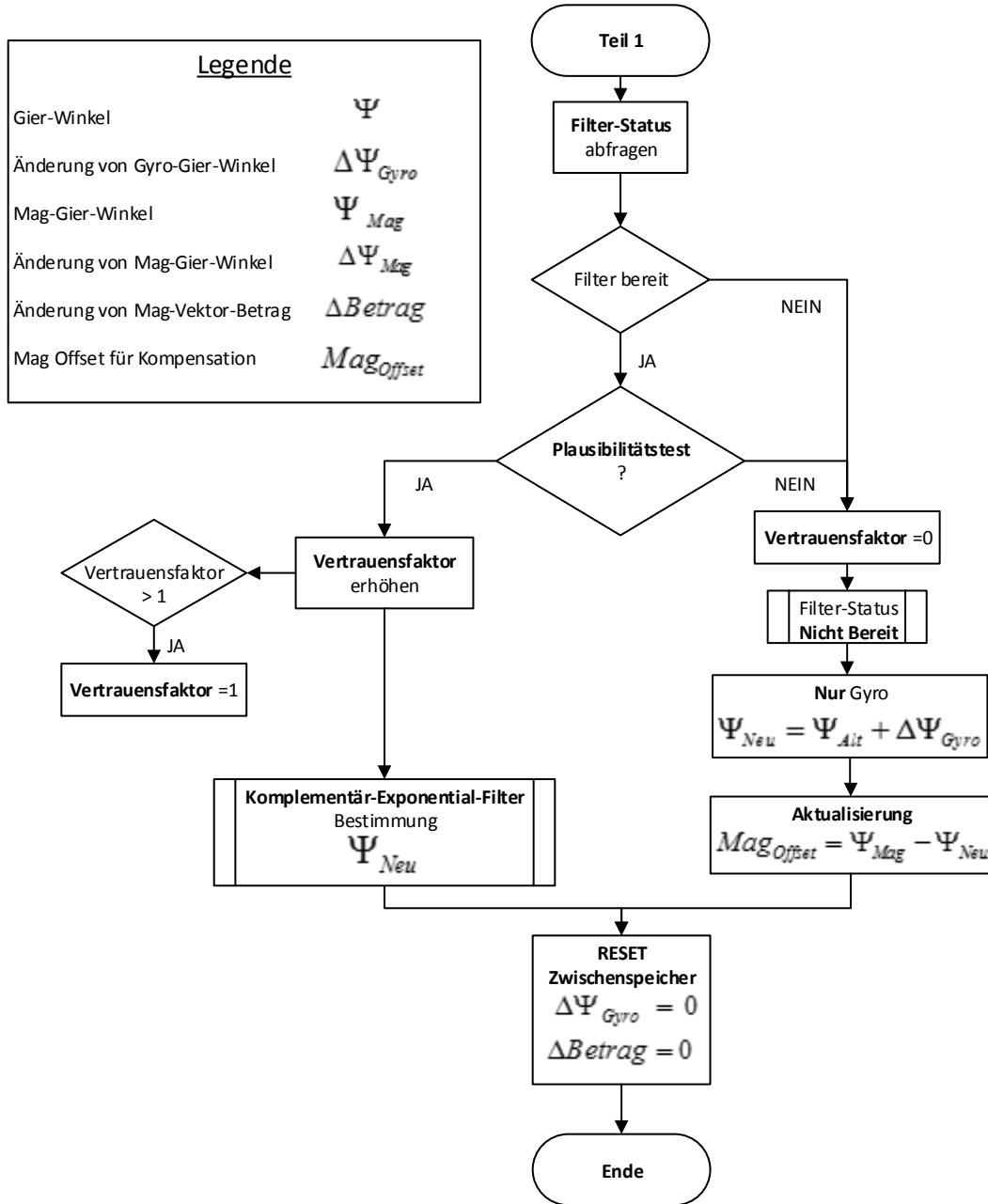


Abb.: 25 Programmablaufplan - correct_yaw Funktion Part II

Im nächsten Schritt wird der Filter-Status abgefragt. Ist der Filter bereit, bedeutet das, dass seit der letzten erkannten magnetischen Störung, der Mittelwertfilter einmal komplett „durchgelaufen“ ist. In diesem Fall, wird nun der Plausibilitätstest durchgeführt, welcher sicherstellt, dass der Magnetfeldvektor nur berücksichtigt wird, solange sich dieser im Rahmen einer wirklichen Drehung verändert haben kann. Der Test besteht aus 3 Kriterien.

Das **1.** Kriterium stellt sicher, dass größere Winkeländerungen, ungeachtet der Orientierung des Magnetfeldvektors, sofort in die Messung eingehen.

Das **2.** Kriterium stellt sicher, dass bei zu großen Abweichungen in der Länge des Magnetfeldvektors, der Magnetsensor nicht beachtet wird. Damit wird vor allem der Einfluss von starken Magnetfeldern gemindert.

Das **3.** Kriterium stellt sicher, dass bei zu großen Abweichungen von Magnetsensor zu Gyroskop, der Magnetsensor nicht beachtet wird. Damit wird vor allem der Einfluss von ferromagnetischen Körpern gemindert.

Tab.: 3 Beispiel-Stellwerte für Plausibilitätstest

Nr.	Kriterium	Stellwert
1	$\Delta \Psi_{Gyro} <$	0.2°
2	$\Delta \text{Betrag} <$	0.5
3	$\Delta \Psi_{Gyro,Mag} <$	0.1°

Der Plausibilitätstest bildet den Schlüssel, für die Effizienz des ganzen Filters. Der Optimierung der Schwellwerte, muss dabei die meiste Beachtung geschenkt werden. Bereits geringe Veränderungen, können im jeweiligen Anwendungsfall, die Magnetfeld-Fehlererkennung stark beeinflussen. Besonders in Fällen, in denen häufiger Störeinflüsse auftreten, kann ein zu „scharf“ eingestellter Plausibilitätstest dazu führen, dass der Filter die meiste Zeit im *Nicht – Bereit* Modus bleibt und nur eine sehr geringe Driftreduzierung des Gier-Winkel erreicht wird. Wenn die Schwellwerte allerdings zu hoch eingestellt werden, können unerkannte Störfelder, eine starke Änderung des gefilterten Winkels bewirken, die im schlechtesten Fall, weit über die Driftreduzierung hinausgehen kann.

Fällt der Plausibilitätstest positiv aus, wird der Komplementär-Exponential-Filter nach Glg.: 18 angewendet, sowie der Vertrauensfaktor um den Faktor 0.2 inkrementiert. Damit der Vertrauensfaktor nicht über 1, also 100% steigen kann, wird auch dieser saturiert. Liegt auch nur einer der Kriterien über seinem Schwellwert, geht nur die Messung des Gyroskops in den Winkel Ψ_{Neu} ein. In diesem Fall, wird nun das Offset Mag_{offset} des Magnetsensors aktualisiert, was bewirken soll, dass der magnetische Störeinfluss kompensiert wird. Weiterhin wird der Vertrauensfaktor auf 0, sowie der Filter-Status auf *Nicht – Bereit* gesetzt. D.h. ungeachtet dessen, ob bei der nächsten Messung alle Kriterien erfüllt werden, geht nur das Gyroskop in den gefilterten Gier-Winkel ein. Erst durch mehrmaliges positives Ausfallen des Plausibilitätstest, erreicht der Magnetsensor wieder seinen maximal möglichen

Gewichtungsfaktor. Allerdings erst, sobald der Filter-Status durch die Funktion `calculate_mag_angle`, wieder auf *Bereit* gesetzt wurde. Ist der Filter nicht bereit, wird dieselbe Schrittfolge unternommen, wie im Falle eines erkannten Störfeldes.

Abschließend werden alle relevanten Daten gespeichert und die als temporären Zwischenspeicher dienenden Variablen $\sum \Delta \Psi_{Gyro}$ und $\sum \Delta \text{Betrag}$ im Interface zurückgesetzt(vgl. Abb.: 22). Die Schwellwerte von `correct_yaw()`, sowie alle anderen Steuerungselemente des Filters, können in der Headerdatei `yaw_filter.h` eingestellt werden.

4.3. Aufbau der Testhardware

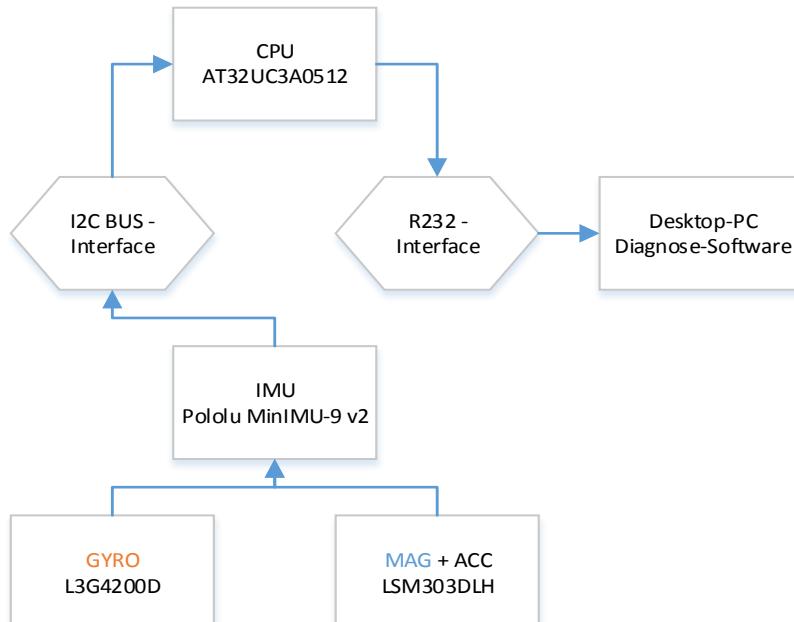


Abb.: 26 Blockdiagramm Aufbau der Testhardware

Kernstück der Test-Hardware bildet der Mikrocontroller AT32UC3A0512 der Firma Atmel. Dieser befindet sich auf dem EVK1100, einem sog. Evaluationsboard ebenfalls von Atmel, welches dazu dient einfach und effizient Projekte auf echter Hardware zu testen zu können.



Abb.: 27 ATMEV1100 (ELMICRO Computer GmbH)



Abb.: 28 Pololu MinIMU-9 v2 (Pololu)

Auf dem Board (vgl. Abb.: 27), befinden sich neben 2 R232 Seriellen-Schnittstellen, einem Display und verschiedenen Eingabemöglichkeiten in Form von Buttons, auch ein I2C-Bus. Die Programmierung erfolgt über die USB-Schnittstelle mit Hilfe eines von Atmel, zur Verfügung gestelltem Bootloaders. Bei dem AT32UC3A0512 handelt es sich um ein 32Bit RISC Mikrocontroller mit 64kB SRAM, 512kB Flash-Speicher und einer Taktrate von 66 MHz.

Bei der IMU (vgl. Abb.: 28) handelt es sich um ein Modell der Firma Pololu mit den Sensoren L3G4200D (Gyroskop) und LSM303DLHC (Magnetsensor, Beschleunigungssensor).

Die Kommunikation findet mit Hilfe eines I2C-Bus statt, welcher bei Atmel Produkten als TWI¹⁰ bezeichnet wird. Auf PC Seite werden die Messdaten über die R232-Schnittstelle empfangen und von einem Diagnosetool aufbereitet.

Das modular aufgebaute Diagnosetool I8QuatPlay, ist vom Lehrstuhl VI der Universität Würzburg entwickelt worden und bietet vielfältige Möglichkeiten. Dazu gehört z.B. Telemetrie-Daten aufbereitet darzustellen und bei Bedarf als CSV-Datei zu exportieren.

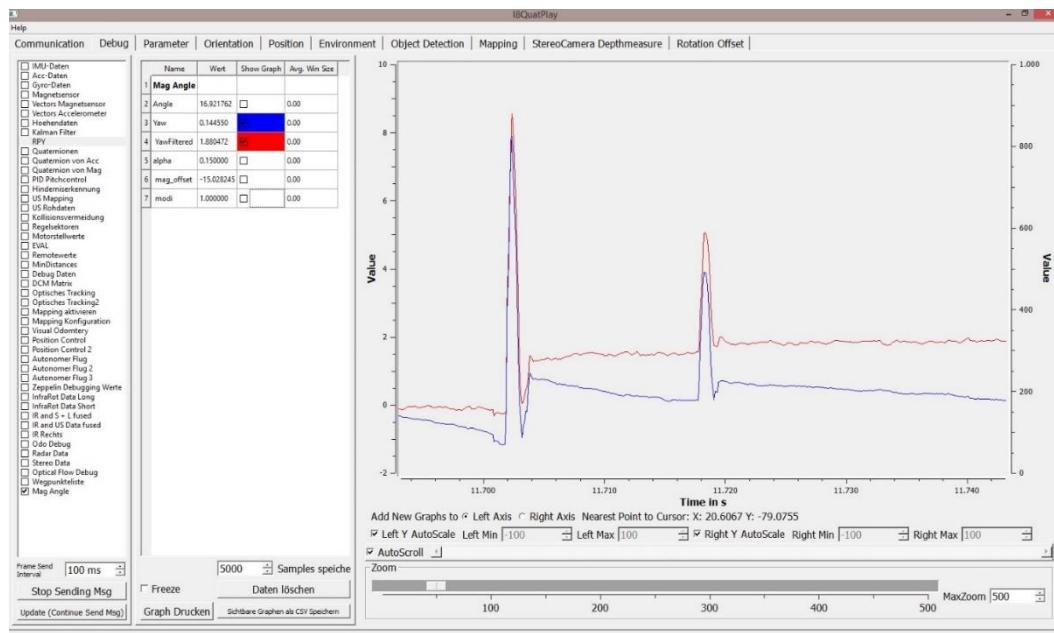


Abb.: 29 I8QuatPlay Screenshot

Die Kommunikation basiert dabei auf einem einfachen Protokoll, welches das Austauschen von Daten stark vereinfacht.

¹⁰ TWI – Two Wire Interface

5. Evaluierung

5.1. Überblick

Die Evaluierung wird in drei Teile gegliedert:

1. Testen des Filters ohne Quadrocopter
2. Testen des Filters im eingeschränkten Quadrocopterbetrieb
3. Testen des Filters im freien Quadrocopterbetrieb

5.2. Tests ohne Quadrocopter

Um die prinzipielle Funktionstüchtigkeit des implementierten Filters zu überprüfen, wurden zunächst verschiedene Situationen simuliert, ohne dabei auf eventuelle Besonderheiten im späteren Flug auf einem Quadrocopter einzugehen. Der Magnetsensor wurde vor den folgenden Tests einmalig, nach dem in Kap.:2.5.1 beschriebenen Verfahren, kalibriert.

5.2.1. Rauschverhalten des Magnetsensors

Dieser Test soll den Einfluss des Mittelwertfilters, auf den Magnetfeld-Winkel untersuchen, um eine sinnvolle Größe des Filters bestimmen zu können. Dazu wird der Winkel drei Mal, unter gleichen Bedingungen, aber mit unterschiedlichen Filtergrößen, im unbewegten System gemessen. Die Filtergrößen betragen dabei 1, 50 und 100 Samples.

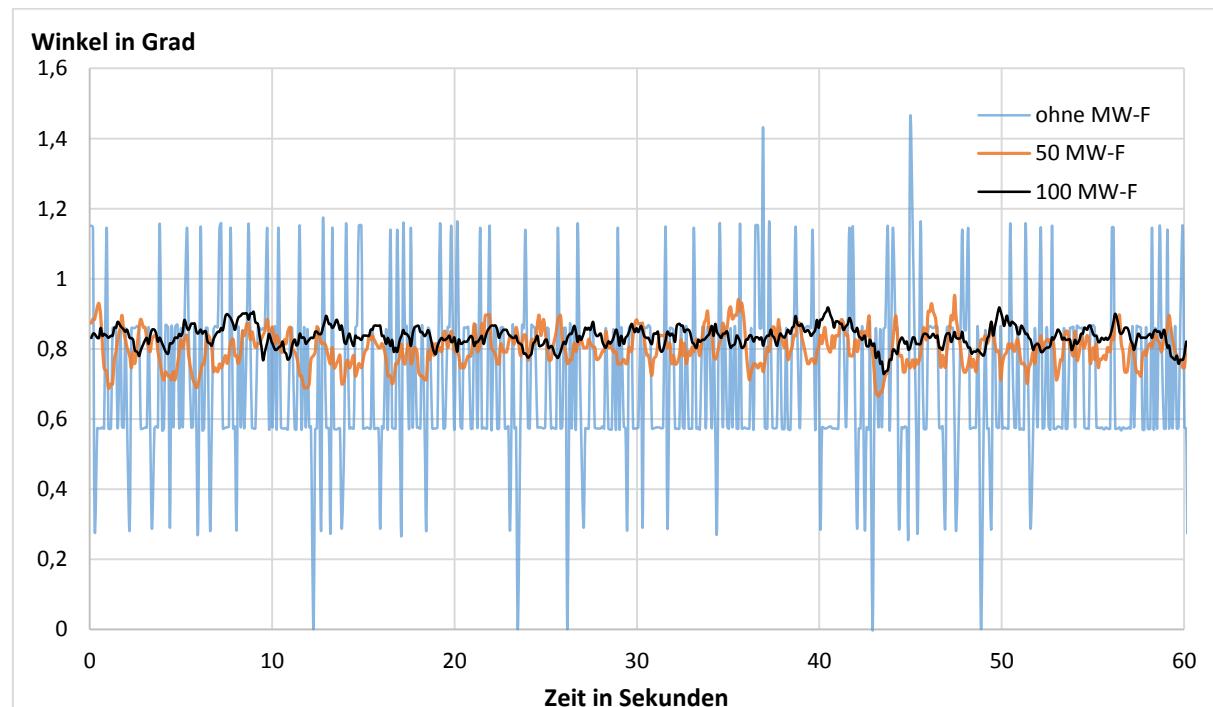


Abb.: 30 Rauschen Magnetsensor-Winkel - [MW-F] = Mittelwert-Filter

Der Test zeigt deutlich, die Notwendigkeit des Mittelwert-Filters. Ohne diesen, ist das Rauschen des Magnetsensors, weit überhalb des Gyroskop-Drifts. In diesem Fall, kann daher auch keine Kompensation erfolgen, da zwischen kleinen Drehungen und einem Sensordrift, nicht unterschieden werden kann. Bei einer Filtergröße von 50 Samples, ist bereits eine sichtbare Verbesserung festzustellen. Allerdings sind auch hier, kleinere „Ausreißer“ erkennbar. Daher ist eine Filter-Größe von 100 Samples zu bevorzugen. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Messdaten gleichmäßig in beide Richtungen streuen (Weißrauschen), was die Verwendung eines Mittelwert-Filters überhaupt erst ermöglicht.

5.2.2. Statisches System ohne magnetische Störungen

In diesem Test, wird der Sensor, nach der Kalibrierung, nicht bewegt. Weiterhin werden keine magnetischen Störungen bewusst hervorgerufen.

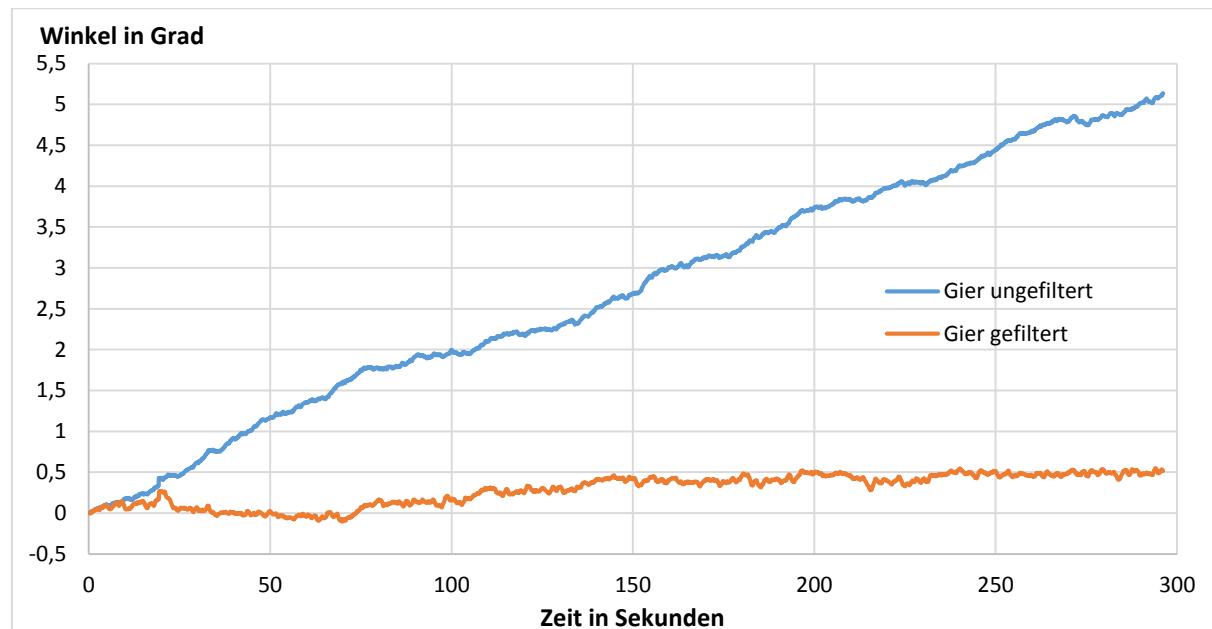


Abb.: 31 Keine Drehung, keine Störungen

Der Test zeigt eine klare Verbesserung im Driftverhalten des Gier-Winkels. Während der ungefilterte Gier-Winkel nach 300s Sekunden um etwa 5° gedriftet ist, weist der gefilterte Winkel nur einen Drift von 0.5° auf.

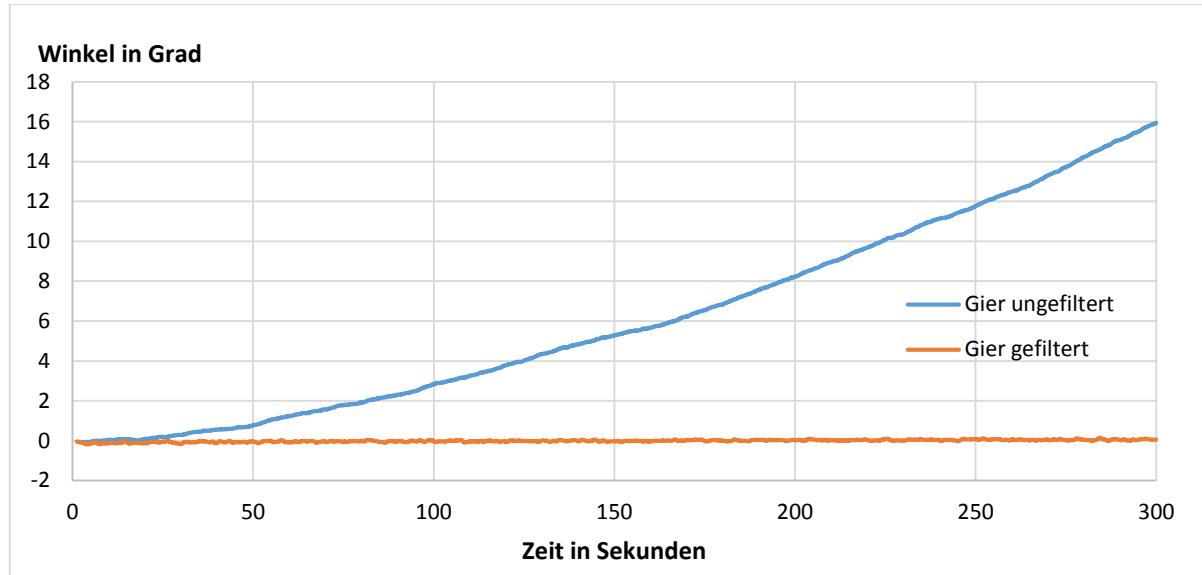


Abb.: 32 Keine Drehung, keine Störungen, starker Gyro-Drift

In mehreren Tests zeigte sich außerdem, wie unterschiedlich der Drift, des ungefilterten Gier-Winkels ist. Verursacht wird dieser erhöhte Drift, wahrscheinlich durch eine fehlerhafte Kalibrierung, da bei unmittelbar nachfolgenden Messungen, ein solch starker Drift nicht auftrat. Da dieses Verhalten willkürlich und nicht reproduzierbar auftritt, kann keine endgültige Aussage über die Ursache getroffen werden. Möglich wäre, dass der Sensor, durch Erschütterungen während der Kalibrierung, nicht absolut still steht und dadurch ein zu großes Bias ermittelt wird. Allerdings ist auch ein Fehler bei der Datenübertragung via I2C-Bus, nicht auszuschließen.

5.2.3. Statisches System unter magnetischen Störungen

Im nächsten Test wird mehrfach ein Dauermagnet in den Messbereich des Sensors hinein und heraus bewegt. Der Abstand zum Sensor beträgt dabei jeweils ca. 5cm. Um die Winkeländerung des Magnetfeld-Vektors besser darzustellen, bezieht sich dessen Auslenkung auf die rechte vertikale Achse. Nach etwa 240s, wurde der Magnet für Dauer von 20s, in einem Abstand von 5cm, neben dem Sensor platziert, um auch den Drift bei einer dauerhaften Änderung des Magnetfeldes zu untersuchen.

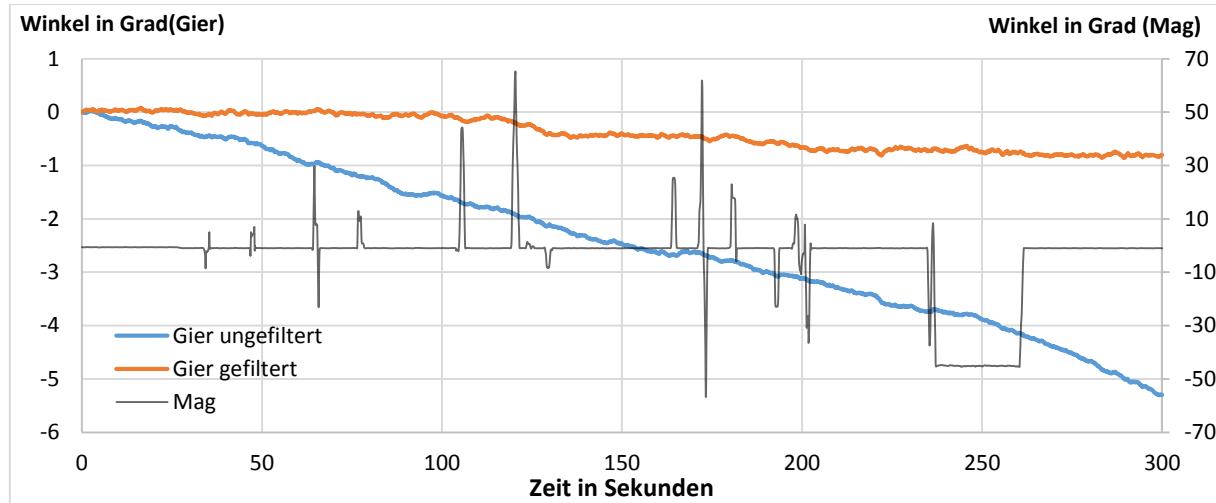


Abb.: 33 Keine Drehung, mit Störungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Driftkompensation, auch unter magnetischen Störeinflüssen funktioniert. Nach 300s beträgt der Drift des gefilterten Winkels 0.9° . Dies entspricht einer Driftreduktion von 4.2° , im Vergleich zum ungefilterten Winkel. Ebenfalls ist zu beobachten, dass auch ein dauerhaft auftretendes Störfeld kompensiert werden kann.

5.2.4. Dynamisches System ohne magnetische Störungen

In diesem Test soll überprüft werden, wie der entwickelte Filter Drehungen verarbeiten kann. Der Sensor wurde dazu mehrmals um die Z-Achse gedreht und am Ende wieder in Ausgangsorientierung gebracht.

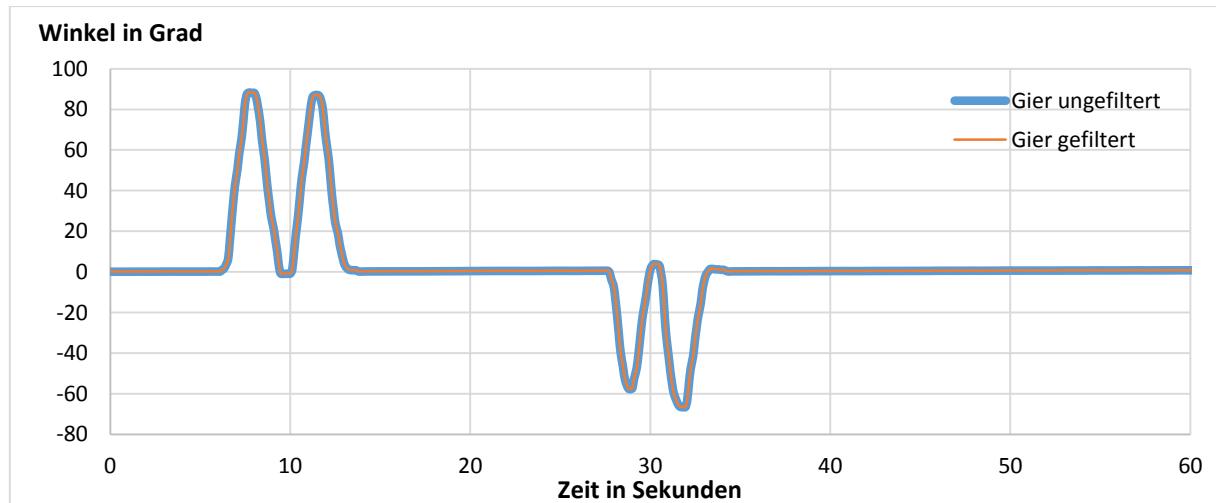


Abb.: 34 Mit Drehungen, keine Störungen

Die Messung zeigt, dass Drehungen von der Driftkompensation nicht beeinflusst werden.

5.2.5. Dynamisches System unter magnetischen Störungen

Der nächste Test soll überprüfen, inwieweit sich magnetische Störungen auf die Filterung auswirken, wenn der Sensor rotiert wird. Dazu wurde ein Magnet, während der Drehungen um die Z-Achse, im Abstand von ca. 5cm um den Sensor bewegt.

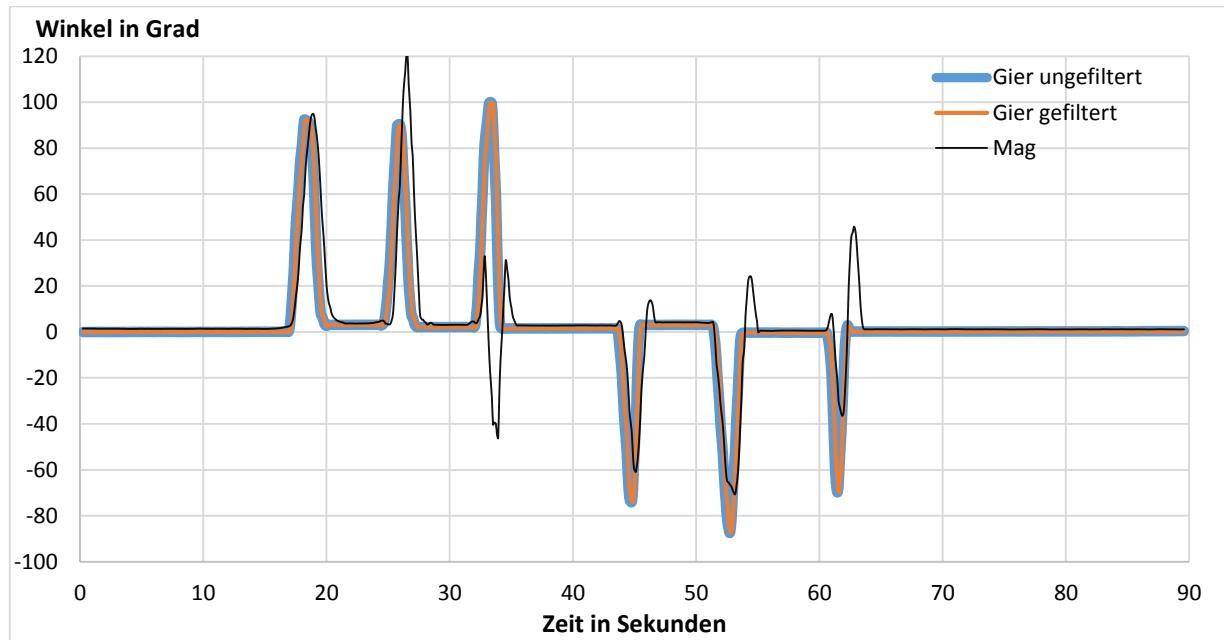


Abb.: 35 Mit Drehungen, mit Störungen

Auch hier zeigt das Experiment, dass selbst starke magnetische Störeinflüsse die Ermittlung der Orientierung nicht wesentlich beeinflussen. Besonders ersichtlich wird dies, bei etwa 34s, da dort eine Magnetfeld-Winkeländerung gemessen wurde, die weit entgegen der eigentlichen Drehrichtung stattgefunden haben soll, diese den gefilterten Winkel aber nicht beeinflusst hat. Während der ersten Rotation, wird auch der Einfluss des Mittelwert-Filters auf den Magnetfeld-Winkel deutlich. Die Filtergröße von 100 Samples führt, bei der Samptime von 10ms, zu einer Verzögerung von 1s.

5.2.6. Zusammenfassung

Die durchgeführten Tests belegen die grundsätzliche Fähigkeit des entwickelten Filters, einen Drift des Gier-Winkels, auch unter magnetischen Störungen, zu verringern. Dabei muss beachtet werden, dass bei einer erkannten Störung, einzige die ungefilterte Messung des Gyroskops, in den gefilterten Gier-Winkel eingeht. Da der ungefilterte Winkel sporadisch, ungewöhnlich stark driftet, kann es in diesem Fall, bei einer erkannten magnetischen Störung, während der Kompensationsphase auch bei dem gefilterten Winkel, zu einem starken Drift

kommen. Die verwendeten Schwellwerte für den Plausibilitätstest, können Tab.: 4 Schwellwerte für Plausibilitätstest, kein Flugbetriebentnommen werden.

Tab.: 4 Schwellwerte für Plausibilitätstest, kein Flugbetrieb

Kriterium:	max. $\Delta\Psi_{Gyro}$	max. ΔBetrag	max. $\Delta\Psi_{Mag,Gyro}$
Schwellwert:	0.5	0.1	0.2

5.3. Tests im eingeschränkten Quadrocopterbetrieb

Es soll nun überprüft werden wie sich der Filter, während des Quadrocopterbetriebs verhält. Da es sich bei einem Quadrocopter zum einen, um ein empfindliches Flugobjekt handelt, welches bei kleinsten Software-Fehlfunktionen abstürzen kann und es zum anderen die Optimierung der Filterkriterien stark vereinfacht, wird der Quadrocopter mit einer Vorrichtung daran gehindert wegzufliegen. Dazu wird der Quadrocopter, über ein Kugelgelenk mit einer Gewindestange verbunden, die sich in einem, am Arbeitsplatz befestigten, Aluprofil befindet. Der Quadrocopter kann sich dabei frei um die Z-Achse und im Bereich zwischen -30° bis +30° um die X- und Y-Achse drehen. Die Software des Quadrocopters, wird auf dem vorgestellten Testboard ausgeführt (vgl. Kap.:4.3), welches durch ein Kabel mit den Hardware Komponenten des Quadrocopters verbunden ist. Die Regelung ist dabei so eingestellt, dass der Quadrocopter versucht, die Ausgangslage beizubehalten oder ggf. in diese zurückzukehren. Weiterhin wurde der Magnetsensor neu kalibriert, um die magnetischen Störeffekte, die von den metallischen Komponenten des Quadrocopters verursacht werden, kompensieren zu können. Da im Flugbetrieb keine Möglichkeit besteht, die wirkliche Orientierung des Quadrocopters, mit äußerem Mitteln genau messen zu können, wird in den Experimenten, sofern nicht anders angegeben, der berechnete Winkel des Magnetfeldes, als Vergleichsbasis genutzt.

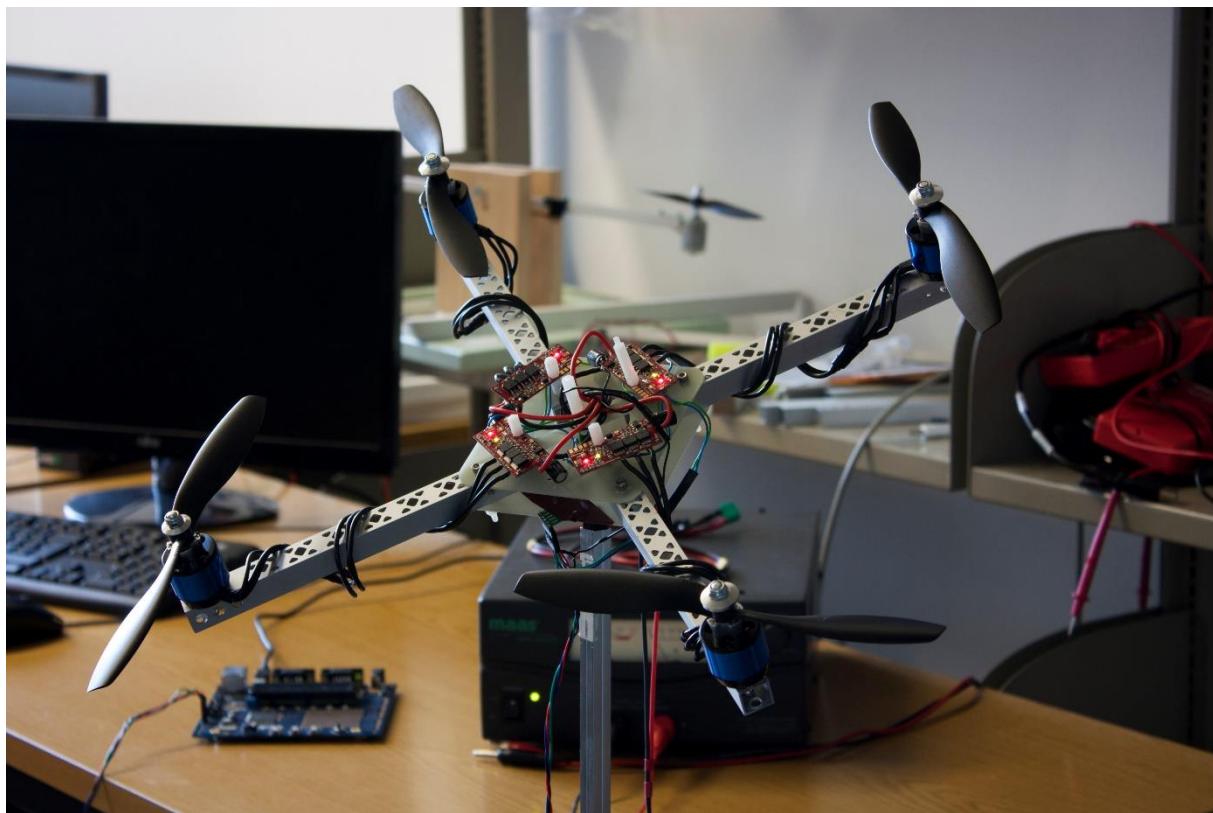


Abb.: 36 Quadrocopter Test-Model

5.3.1. Statisches System ohne Filterung

In diesem Test soll überprüft werden, wie stark sich der Gier-Drift im eingeschränkten Flug auswirkt. Dazu wurde der Filter in den *DEBUG*-Modus versetzt. In diesem Modus findet weiterhin eine Filterung statt, jedoch wird für die Lageregelung der ungefilterte Gier-Winkel genutzt.

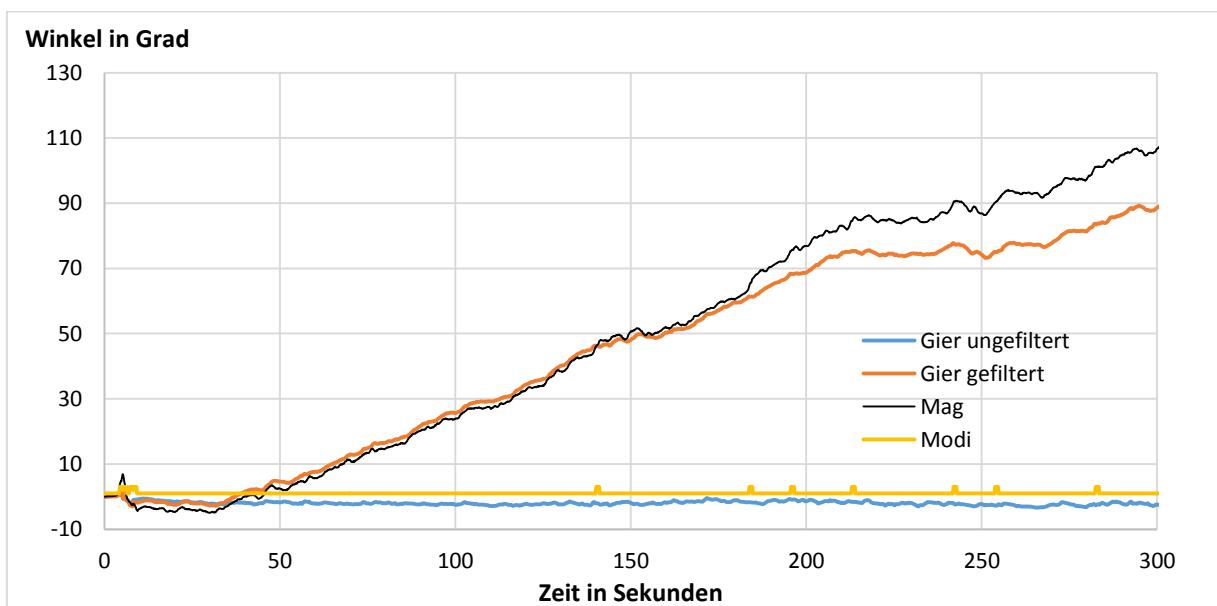


Abb.: 37 Keine Drehung, Regelung nach Gier un gefiltert, Modi entspricht dem Filterstatus

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verschlechterung, was den Gier-Drift des ungefilterten Winkels betrifft. Der Quadrocopter hat sich aufgrund des starken Drifts, in 5min um etwa 90° gedreht. Weiterhin ist zu beobachten, dass beim gefilterten Gier-Winkel, der Gier-Drift gut kompensiert wird und dadurch die Drehung des Quadrocopters registriert wurde. Dabei vertraut der Filter weitestgehend auf die Messungen des Magnetometers, was durch die wenigen Ausschläge, im Verlauf der Filterstatus-Kennlinie deutlich wird. Allerdings ist bei ca. 180s erkennbar, dass der Magnetsensor Winkel stärker ansteigt, als im bisherigen Verlauf der Messung. In Folge dessen, hat der Plausibilitätstest eine magnetische Störung erkannt und das Offset des Magnetsensors angepasst, sowie den Mittelwertfilter zurückgesetzt. Da in diesem Zeitabschnitt der Kompensation, nur der stark driftende, ungefilterte Gier-Winkel für die Winkelberechnung genutzt wird, kommt es im weiteren Verlauf zu einer Differenz zwischen Magnetsensor-Winkel und gefiltertem Winkel von ca. 10-15°. Es kann dabei nicht zweifelsfrei festgestellt werden, ob wirklich eine magnetische Störung auftrat oder aber die Kalibrierung fehlerhaft war.

5.3.2. Statisches System ohne magnetische Störungen

Im nächsten Test soll überprüft werden, wie sich der gefilterte Gier-Winkel auf die Lageregelung des Quadrocopters auswirkt. Dazu wird der Filter wieder in den normalen Betriebsmodus versetzt.

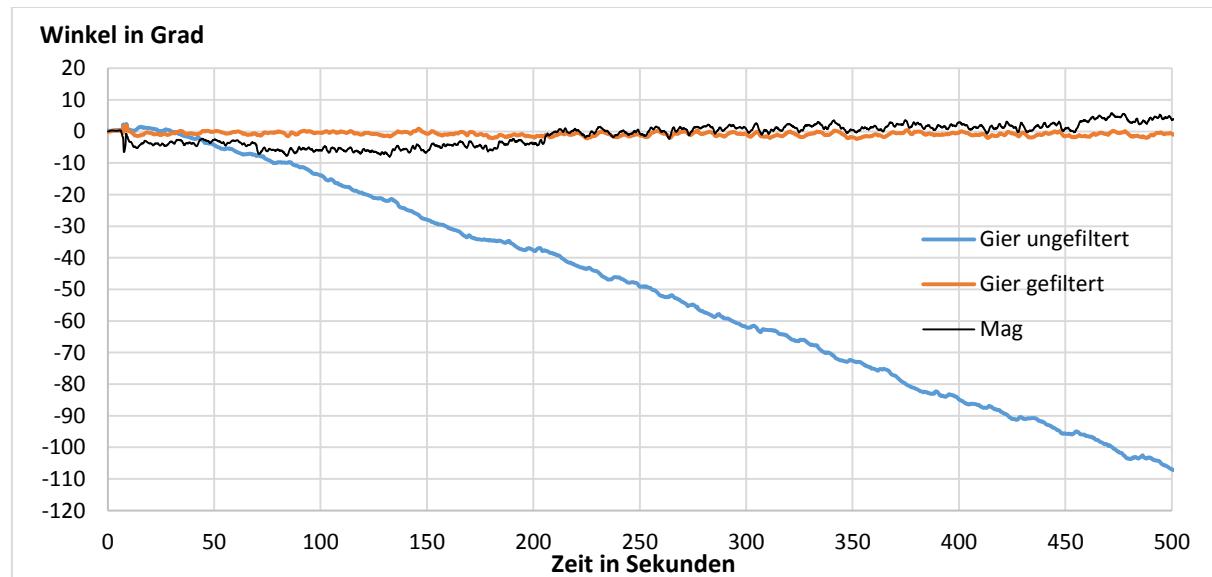


Abb.: 38 Keine Drehung, Regelung nach Gier gefiltert

Belegt durch die Messungen des Magnetsensors, zeigt sich, dass der Quadrocopter seine Orientierung auch über einen längeren Zeitraum stabil halten kann, ohne dabei einen

übermäßigen Drift zu entwickeln. Wie groß der Drift am Ende der Messung war, konnte mangels geeigneter Messinstrumente nicht genau ermittelt werden. Im Vergleich zum ungefilterten Gier-Winkel, ist der Drift jedoch als sehr gering zu beschreiben.

5.3.3. Statisches System unter magnetischen Störungen

In diesem Test soll überprüft werden, inwieweit sich magnetische Störungen, auf die Filterung im eingeschränkten Flugbetrieb auswirken. Dazu wurde zuerst, eine ferromagnetische Zange und dann ein Dauermagnet, in den Messbereich des Magnetsensors heraus und hinein bewegt. Um die Winkeländerung des Magnetfeld-Vektors besser darzustellen, bezieht sich dessen Auslenkung auf die rechte vertikale Achse.

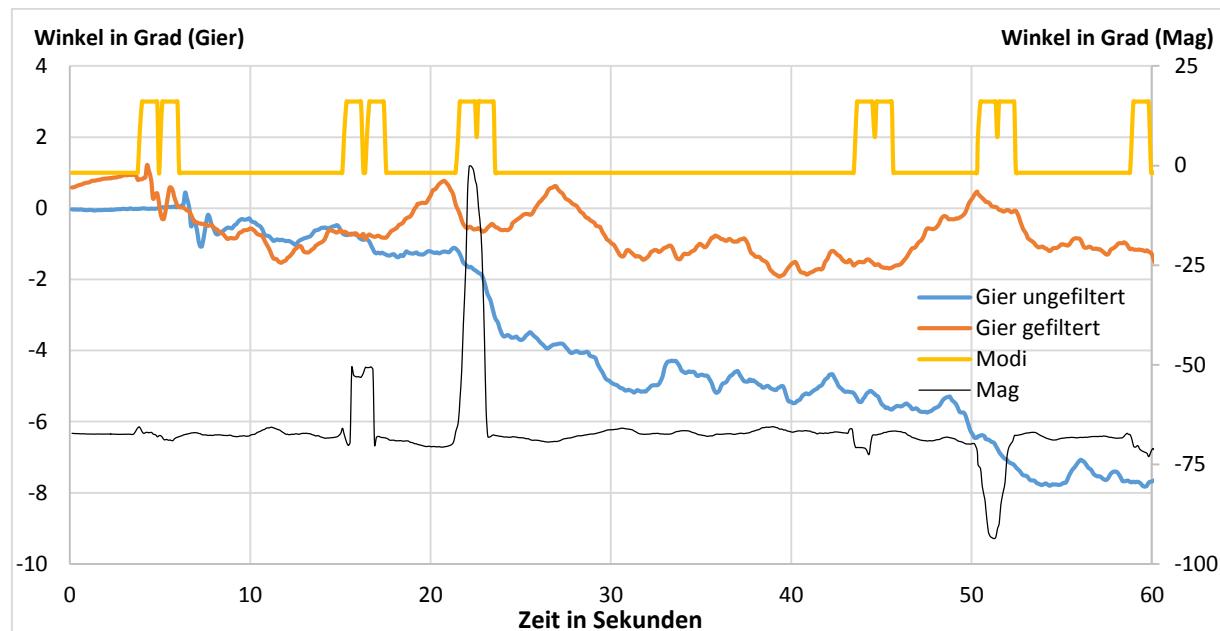


Abb.: 39 Keine Drehung, Regelung nach Gier gefiltert, magnetische Störung durch: Zange (16s-18s), Dauermagnet (21s-23s; 50s-52s), Modi entspricht dem Filterstatus

Das Experiment zeigt, dass die magnetischen Störungen erkannt und kompensiert wurden. Der entstehende Drift ist dabei, im Vergleich zum ungefilterten Winkel, gering.

5.3.4. Dynamisches System ohne magnetische Störungen

Im nächsten Test soll überprüft werden, wie sich Rotationen des Quadrocopters, auf die Filterung auswirken. Dazu wird der Quadrocopter, durch äußere Krafteinwirkung gedreht. Da die Stellwerte der Lageregelung dabei nicht verändert werden, wird der Quadrocopter versuchen seine Ausgangsorientierung wieder einzunehmen.

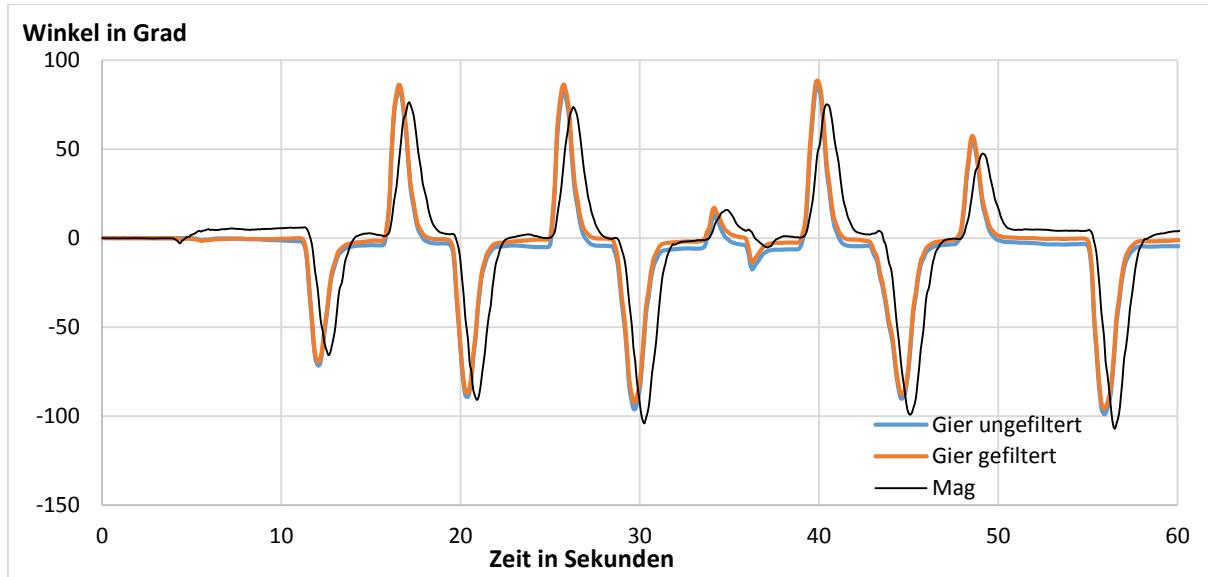


Abb.: 40 Drehung, Regelung nach Gier gefiltert

Die Ergebnisse belegen, dass der Filter die Lageregelung des Quadrocopters, nicht negativ beeinflusst, wenn dieser, durch äußere Einwirkung, aus seiner Lage gebracht wird.

5.3.5. Vergleich Kalibrierung

In diesem Test soll der Einfluss der Kalibrierung des Magnetsensors, auf den berechneten Magnetfeld-Winkel, überprüft werden. Dazu werden die Kalibrierungsparameter, die im 1. Teil der Evaluierung verwendet wurden, zur Berechnung des Magnetfeld-Winkels genutzt und der Quadrocopter anschließend in verschiedene Richtungen gedreht. Danach wird der Vorgang, mit der aktuellen Kalibrierung wiederholt. Die Motoren sind während des Tests ausgeschaltet. Um die Ergebnisse objektiver diskutieren zu können, wird zudem nur der ungefilterte Gier-Winkel, als Vergleichsbasis genutzt.

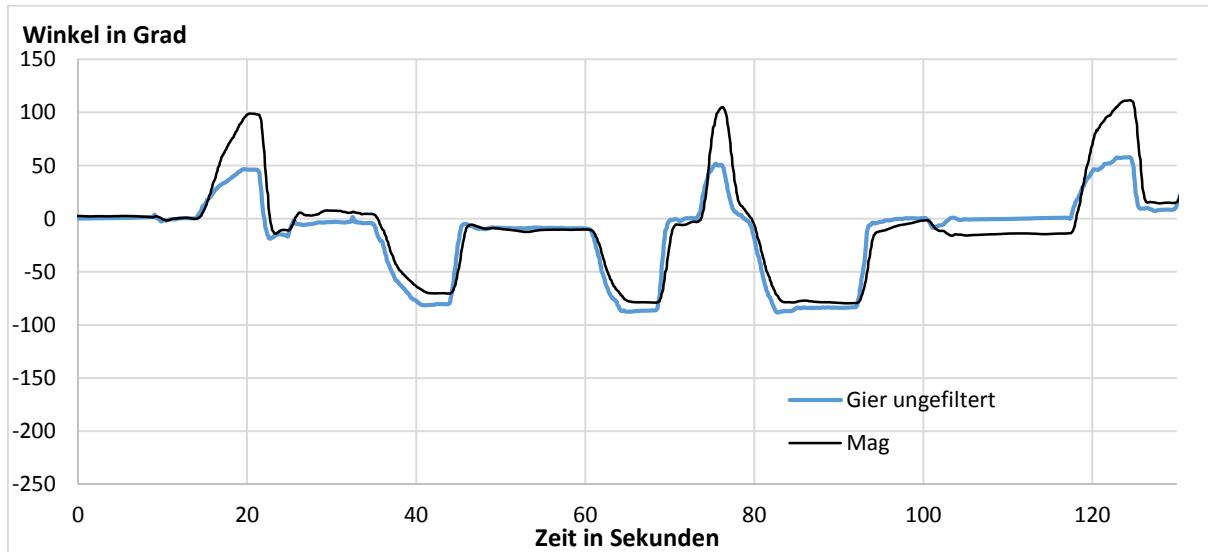


Abb.: 41 Drehung mit Kalibrierung aus Kap.:5.2, Motoren aus

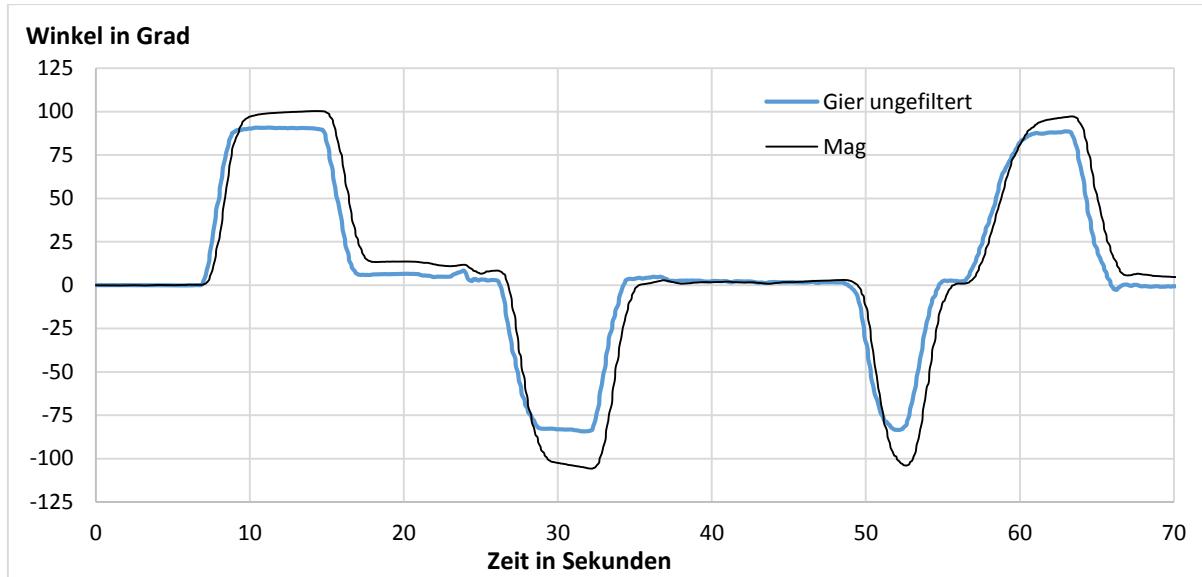


Abb.: 42 Drehung mit aktueller Kalibrierung, Motoren aus

Durch den Vergleich der Experimente wird deutlich, dass die Kalibrierung einen wesentlichen Einfluss auf den berechneten Magnetfeld-Winkel hat. Mit der aktuellen Kalibrierung, beträgt die Abweichung vom ungefilterten Winkel, maximal ca. 20° . Bei der Verwendung der alten Parameter, treten Abweichungen von über 50° auf. Da die Motoren ausgeschaltet sind, kann im Vergleich zu den Abweichungen, der Drift des ungefilterten Winkel vernachlässigt werden

5.3.6. Zusammenfassung

Die durchgeführten Test belegen, dass der Filter, auch im Flugbetrieb des Quadrocopters eine Driftreduktion des Gier-Winkels ermöglicht. Dabei wurde gezeigt, dass der Filter, die Lageregelung nicht negativ beeinflusst. Es wurde ebenfalls deutlich, dass der Drift des ungefilterten Winkels, im Vergleich zu den Tests ohne Quadrocopter, stark zugenommen hat. Dies führt dazu, dass auch der Drift des gefilterten Winkels zugenommen hat, wenn gleich in einem weit geringeren Maße. Die verwendeten Schwellwerte für den Plausibilitätstest, können Tab.: 5 entnommen werden.

Tab.: 5 Schwellwerte für Plausibilitätstest, eingeschränkter Flugbetrieb

Kriterium:	$\max. \Delta\Psi_{Gyro}$	$\max. \Delta\text{Betrag}$	$\max. \Delta\Psi_{Mag,Gyro}$
Schwellwert:	0.5	0.3	1.5

5.4. Tests im Flugbetrieb

In den folgenden Tests, soll untersucht werden, ob der entwickelte Filter auch im uneingeschränkten Flugbetrieb einsetzbar ist. Die Tests finden aus Sicherheitsgründen, in der Quadrocopter-Testhalle der Universität Würzburg statt. Da der bisher verwendete Quadrocopter, nur ein einfaches Testmodell darstellt, werden die folgenden Experimente an einem anderen Quadrocopter durchgeführt.

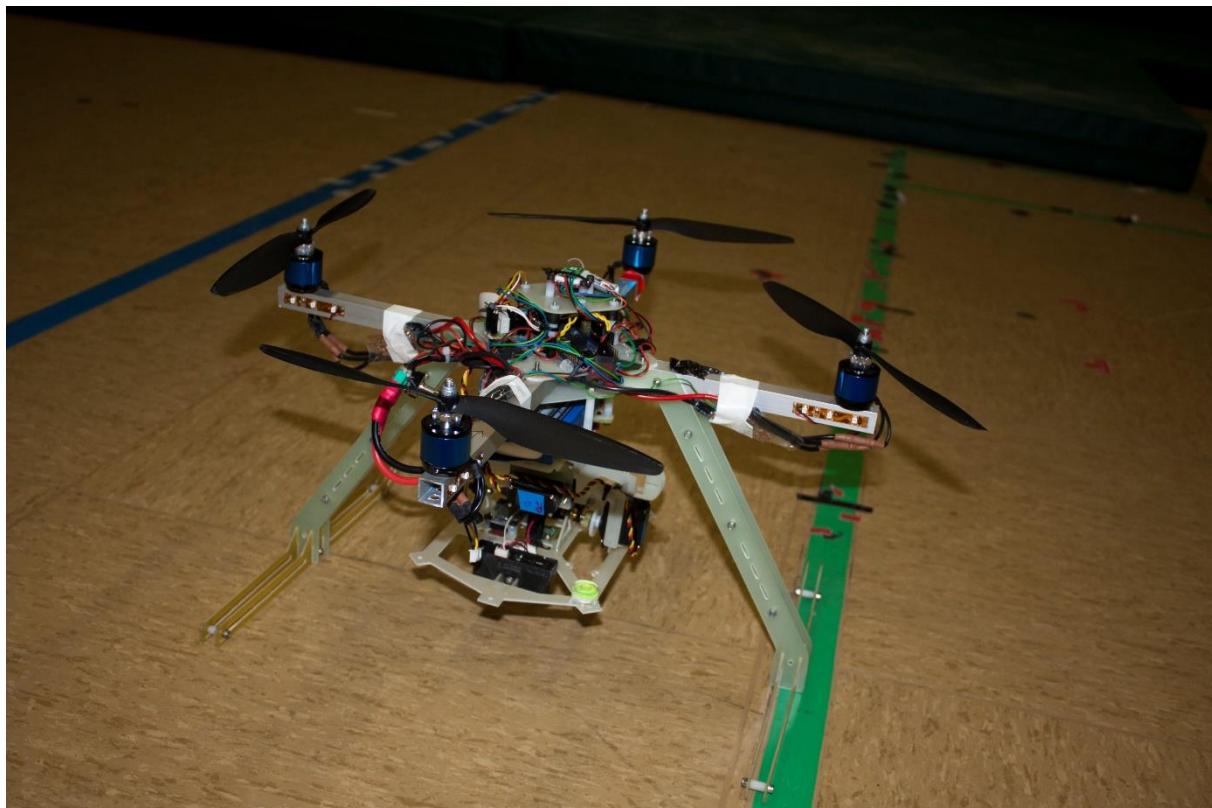


Abb.: 43 Quadrocopter voll einsatzbereit für autonomen Flugbetrieb

Dieses Modell lässt sich per Fernsteuerung bedienen und sendet alle relevanten Daten via Bluetooth/WLAN, an den Evaluierungs-PC. Bei den verwendeten Sensoren, handelt es sich nur bei dem Magnetsensor, um den gleichen Typ, der bisher genutzt wurde. Sowohl Gyroskop, als auch Beschleunigungsmesser, sind von einem anderen Hersteller. Darüber hinaus, befinden sich noch einige weitere Komponenten auf dem Quadrocopter, weshalb eine erneute Kalibrierung des Magnetsensors notwendig ist, um den Einfluss möglicher magnetischer Störeffekte zu minimieren.

5.4.1. Statisches System, ohne Motoren

In diesem Test soll zunächst überprüft werden, wie groß der Gier-Drift im unbewegten System ist.

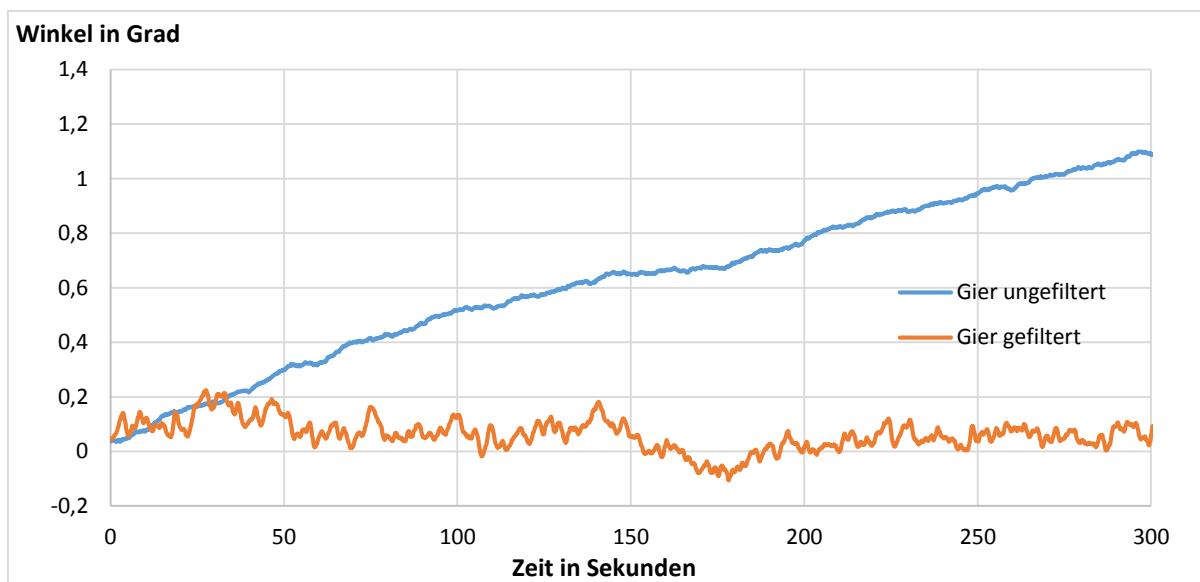


Abb.: 44 Keine Drehung, Motoren aus

In dem Test wird deutlich, dass das hier verwendete Gyroskop, einen wesentlich geringeren Drift aufweist, als das bisherige, denn die Abweichung des ungefilterten Winkels, beträgt nach 5min nur etwa $1,1^\circ$. Außerdem belegt der Test, dass die Driftreduzierung des Gier-Winkels, im statischen System auch mit anderen Gyroskopen funktioniert.

5.4.2. Dynamisches System, freier Flug

In diesem Test soll überprüft werden, welche Resultate im freien Flugbetrieb erreicht werden können. Dazu wird der Quadrocopter, per Fernsteuerung, in der Testhalle umher geflogen. Allerdings werden dabei nur die Soll-Werte von Roll- und Nick-Winkel verändert. Der Gier-Winkel wird nicht beeinflusst, d.h. der Quadrocopter ist bestrebt einen Gier-Winkel von 0° beizubehalten. Es wurde versucht, den Quadrocopter an selben Stelle zu landen, an dem dieser gestartet ist.

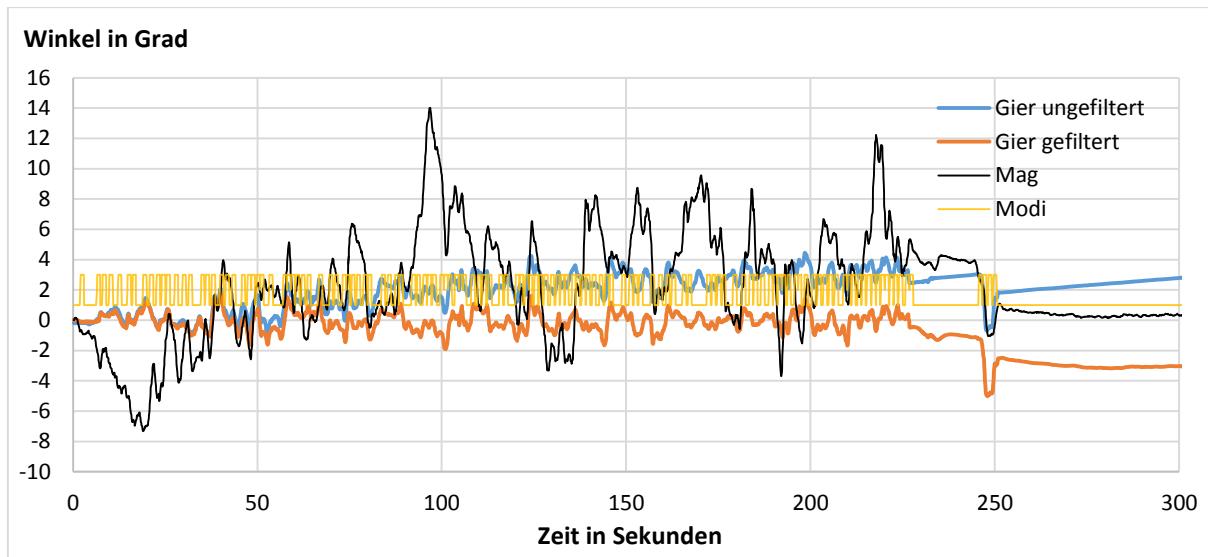


Abb.: 45 Flug, Regelung nach Gier gefiltert

In dem Experiment stellte sich heraus, dass durch die Regelung nach dem gefilterten Gier-Winkel, ein schlechteres Ergebnis erzielt wurde. Nach der Landung nach 230s, wurde der Quadrocopter bei 245s gerade ausgerichtet, damit ein besserer Vergleich erfolgen kann. Die Abweichung zur der inertialen Orientierung, betrug bei dem gefilterten Winkel ca. 2.5° , beim ungefilterten 2.0° . Es muss dabei beachtet werden, dass die Angaben nur eine bedingte Aussagekraft besitzen, da keine geeigneten Messinstrumente zur Verfügung standen, um die Ergebnisse zu verifizieren. Da der Magnetfeld-Winkel allerdings eine Abweichung von nur 0.2° zur Ursprungsausrichtung aufwies, kann angenommen werden, dass der Fehler in etwa diesem Bereich liegt. Unabhängig von dem absoluten Betrag der Abweichung, wurde deutlich, dass keine Driftreduktion erfolgte, sondern wahrscheinlich der Drift verstärkt wurde. Allerdings ist auffällig, dass der Drift in unterschiedliche Richtungen erfolgte. Das lässt darauf schließen, dass eventuell ein Vorzeichenfehler in der Implementierung, die Berechnung verfälscht. Die Haupt-Ursache für das Versagen des Filters, liegt allerdings vielmehr daran, dass das Gyroskop einen ungewöhnlich geringen Drift aufweist. Im Vergleich dazu, ist das Rauschverhalten des verwendeten Magnetometers, im Flugbetrieb, zu stark. Dies zeigt sich besonders, durch die vielen Sprünge im Filter-Status. Dabei stellen magnetische Störungen, wahrscheinlich nur einen Teil des Problems dar. Auf Basis von empirischen Beobachtungen, wird ein Zusammenhang zwischen den vermeintlichen Magnetfeldstörungen und der Lage des Quadrocopters vermutet. Denn die größeren Ausschläge des Magnetfeld-Winkels, fanden meist in den Momenten statt, in denen sich der Quadrocopter um die Nick- bzw. Roll-Achse drehte. Dies könnte auf eine unzureichende Neigungskompensation des Magnetfeld-Vektors hindeuten.

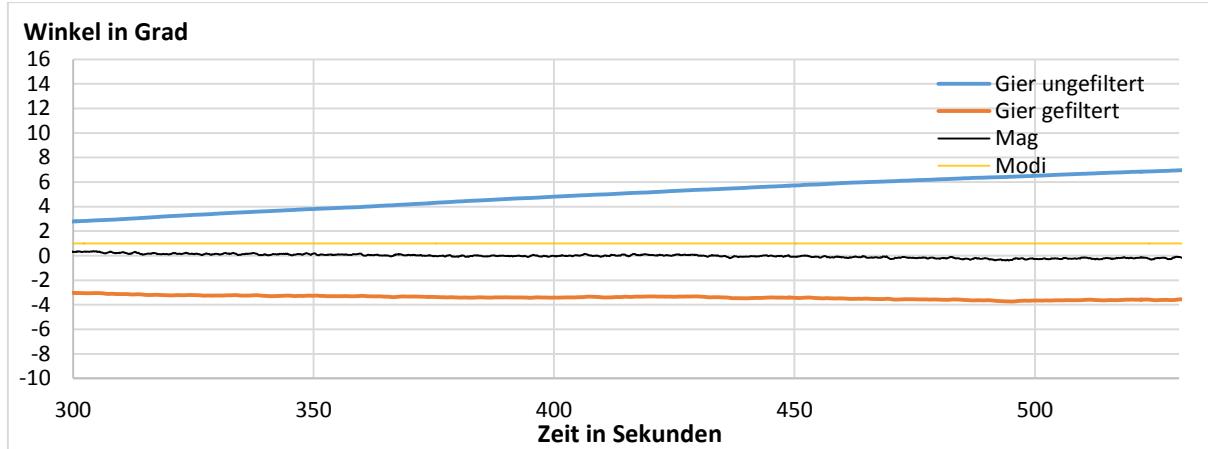


Abb.: 46 Fortsetzung von Abb.: 45, Stand ohne Motoren

Im weiteren Verlauf des Experimentes (siehe Abb.: 46) wird deutlich, dass das der Drift des ungefilterten Winkel, im Vergleich zum Beginn, stark angestiegen ist. Leider konnte für dieses Verhalten, keine Ursache determiniert werden. Ein weiterer Aspekt, der in Abb.: 46 deutlich wird, ist dass der Magnetfeld-Winkel, ohne eine äußere Beeinflussung, um etwa 0.6° driftet. Dieser Drift, ist auf den Drift von Nick- und Roll-Winkel zurückzuführen, da dieser im Rahmen der Neigungskompensation, in die Berechnung des Magnetfeld-Winkels eingeht. Die Abweichung von 0.6° , entspricht dabei auch dem Drift des gefilterten Winkels, der zwischen der Landung und dem Ende des Experimentes entstanden ist.

5.4.3. Zusammenfassung

Die Experimente im uneingeschränkten Flugbetrieb zeigten, dass eine Drift-Reduktion des Gier-Winkels, mit dem entwickelten Verfahren, nur in einem eingeschränkten Maße möglich ist. Ob durch den Filter die Orientierungsbestimmung, in den durchgeführten Experimenten negativ beeinflusst wurde, kann nicht zweifelsfrei bewiesen werden. Leider ließen äußere Umstände, weitere Experimente nicht zu. Es kann daher keine endgültige Aussage, über die Tauglichkeit des Verfahrens im uneingeschränkten Flugbetrieb, getroffen werden. Die verwendeten Schwellwerte für den Plausibilitätstest, können Tab.: 6 entnommen werden.

Tab.: 6 Schwellwerte für Plausibilitätstest, uneingeschränkter Flugbetrieb

Kriterium:	$\max. \Delta\Psi_{Gyro}$	$\max. \Delta\text{Betrag}$	$\max. \Delta\Psi_{Mag,Gyro}$
Schwellwert:	0.2	0.3	0.85

6. Diskussion und Ausblick

6.1. Ergebnisse

In den ersten zwei Phasen der Evaluierung, wurde erfolgreich belegt, dass mit dem vorgestellten erdmagnetfeldbasierten Filterungsverfahren, eine verbesserte Orientierung, bei Rotationen um die Gier-Achse erreicht werden kann, im Vergleich zur alleinigen Verwendung eines Gyroskops. Die durchgeführten Tests zeigten, dass auftretende magnetische Störfelder zuverlässig erkannt und kompensiert werden können, ohne dass dabei die Lageregelung des Quadrocopters negativ beeinflusst wird.

Allerdings hat der letzte Teil der Evaluierung auch gezeigt, dass die Effizienz des Verfahrens, abhängig von dem verwendeten Gyroskop ist. Wenn das Gyroskop eine sehr hohe Genauigkeit aufweist, kann eine Driftreduktion nicht mehr gewährleistet werden. Die möglichen Ursachen dafür sind vielfältig und können nicht genau bestimmt werden, da das Filterverfahren für weniger genaue Gyroskope entwickelt wurde. Dabei ist anzumerken, dass die hohe Genauigkeit des verwendeten Gyroskops, eher die Ausnahme, als die Regel darstellt, was durch die Experimente, in Phase 1 und 2 der Evaluierung, bewiesen wurde. Darüber hinaus zeigte sich, dass die ungewöhnliche Genauigkeit des Gyroskops, nicht zu jedem Zeitpunkt vorhanden ist, sondern zeitlichen Veränderungen unterliegt. Leider war es durch äußere Umstände nicht möglich, vergleichende Tests mit dem bisher verwendeten Gyroskop durchzuführen.

Da MEMS Gyroskope dieser Preisklasse, gewöhnlich einen weitaus stärkeren Drift aufweisen, erfüllt das entwickelte Verfahren, die ursprünglich gestellten Ansprüche und zeigt damit auch Potential für die Verwendung im Flugbetrieb eines Quadrocopters, welcher ein weniger genaues Gyroskop verwendet.

6.2. Ausblick

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens, ist hauptsächlich von der Magnetfeld-Fehlererkennung des Filters abhängig. Werden z.B. Störfelder erkannt, die gar nicht aufgetreten sind, so wird ein falsches Offset für den Magnetsensor ermittelt und damit auch ein fehlerhafter Magnetfeld-Winkel. Dieses Problem tritt vor allem auf, wenn die Kalibrierung des Magnetsensors zu ungenau durchgeführt wurde. Allerdings stellte sich eine genaue Kalibrierung als schwierig heraus, wenn sich der Sensor bereits auf dem Quadrocopter befindet. Ein verbessertes

Verfahren, wäre an dieser Stelle sinnvoll und würde die Zahl der Fehldetections wahrscheinlich verringern.

Da sich in der Evaluierung zeigte, dass der Drift von Nick- und Roll-Winkel, einen Einfluss auf die Neigungskompensation des Magnetfeld-Vektors hat, würde eine verbesserte Driftreduktion der Winkel, auch eine erhöhte Leistungsfähigkeit des Filters bedeuten.

Eine weitere Möglichkeit, die zur Verbesserung des Filterverfahrens beitragen würde, wäre es, wenn man den Drift des Gyroskops zur Laufzeit bestimmen und diesen von der Messung abziehen würde. Damit wäre eine Driftreduzierung, auch während der Magnetfeld-Kompensationsphasen, in einem gewissen Maße möglich.

Weithin sollte der Filter dahingehend überarbeitet werden, dass im Worst-Case der gefilterte Gier-Winkel, dem ungefilterten entspricht. In der jetzigen Fassung ist es möglich, dass bei zu hoch gewählten Schwellwerten, in Kombination mit einem sehr genauen Gyroskop, durch die Filterung schlechtere Ergebnisse erzielt werden könnten, als es ohne diese der Fall gewesen wäre.

6.3. Fazit

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren, verbessert das bisherige System zur Orientierung bei Rotationen um die Gier-Achse deutlich und zeigt, u.a. durch seine einfache Erweiterbarkeit, Potential für den Einsatz im Flugbetrieb.

Abbildungsverzeichnis

ABB.: 1 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG ACHSEN EINES FLUGZEUGES (WIKIPEDIA)	4
ABB.: 2 ZUSAMMENHANG ZW. KÖRPERFESTEM UND ERDFESTEN KOORDINATENSYSTEM (WIKIPEDIA)	5
ABB.: 3 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG - DREHEN EINES VektORS MIT QUATERNIONEN (GAGEIK, 2013)	6
ABB.: 4 MAGNETFELD EINES IDEALEN STABMAGNETEN (WIKIPEDIA)	8
ABB.: 5 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG HALLSENSOR (FÖLL)	12
ABB.: 6 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG FLUXGATE-SENSOR (NELKENBRECHER, 2008)	14
ABB.: 7 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG FUNKTIONSWEISE VON MEMS-GYROSKOP (FINDMEMS.COM, 2010)	16
ABB.: 8 GIER-WINKEL UNGEFILTERT IM RUHENDEN SYSTEM AUF TESTHARDWARE (SIEHE KAP.:4.3)	17
ABB.: 9 MESSDATEN VON X- UND Y-KOMPONENTE DES MAGNETSENSORS BEI 360° DREHUNG UM Z-ACHSE IM IDEALEN MAGNETFELD (CARUSO)	19
ABB.: 10 MESSDATEN VON X- UND Y-KOMPONENTE DES MAGNETSENSORS BEI 360° DREHUNG UM Z-ACHSE UNTER HARD-IRON-EFFEKTEN (CARUSO)	20
ABB.: 11 VERZERRUNG EINES HOMOGENEN MAGNETFELDES DURCH EINFLUSS VON FERROMAGNETISCHEM KÖRPER (CARUSO)	20
ABB.: 12 EINFLUSS VON BRUSHLESS-MOTOREN AUF MAGNETSENSOR (AB ROTER LINIE SIND MOTOREN EINGESCHALTET)	21
ABB.: 13 PROZENTUALE VERÄNDERUNG DES MESSRAUSCHENS, DURCH EINFLUSS VON BRUSHLESS-MOTOREN AUF MAGNETSENSOR, MIT POLYNOMINALEN KENNLINIEN. BEZIEHT SICH AUF ABB.: 12	22
ABB.: 14 SENSITIVITÄTEN VERSCHIEDENER MAGNETO-RESESTIVER SENSOREN, AUF VERÄNDERUNGEN IM UMGBEBENDEN MAGNETFELD UNTER UNTERSCHIEDLICHEN FREQUENZEN (STUTZKE, ET AL., 2004)	23
ABB.: 15 GIER-WINKEL GEFILTERT IM RUHENDEN SYSTEM AUF ARDUINOBOARD, OHNE MAGNETISCHE STÖRUNGEN	24
ABB.: 16 GIER-WINKEL GEFILTERT IM RUHENDEN SYSTEM AUF ARDUINOBOARD, MIT MAGNETISCHEN STÖRUNGEN	25
ABB.: 17 GIER-WINKEL GEFILTERT IM ROTIERENDEN SYSTEM UM Z-ACHSE, OHNE MAGNETISCHE STÖRUNGEN	26
ABB.: 18 GIER-WINKEL GEFILTERT IM RUHENDEN SYSTEM, MIT MAGNETISCHEN STÖRUNGEN	26
ABB.: 19 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG - ALLGEMEINES KONZEPT	28
ABB.: 20 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG KONZEPT I	29
ABB.: 21 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG KONZEPT II	31
ABB.: 22 MODULÜBERSICHT	35
ABB.: 23 PROGRAMMABLEAUFPLAN - CALCULATE_MAG_ANGEL FUNKTION	36
ABB.: 24 PROGRAMMABLEAUFPLAN - CORRECT_YAW FUNKTION PART I	38
ABB.: 25 PROGRAMMABLEAUFPLAN - CORRECT_YAW FUNKTION PART II	39
ABB.: 26 BLOCKDIAGRAMM AUFBAU DER TESTHARDWARE	41
ABB.: 27 ATMEL EVK1100 (ELMICRO COMPUTER GMBH)	41

Abbildungsverzeichnis

B

ABB.: 28 POLOLU MINIMU-9 V2 (POLOLU)	41
ABB.: 29 I8QUATPLAY SCREENSHOT	42
ABB.: 30 RAUSCHEN MAGNETSENSOR-WINKEL - [MW-F] = MITTELWERT-FILTER	43
ABB.: 31 KEINE DREHUNG, KEINE STÖRUNGEN	44
ABB.: 32 KEINE DREHUNG, KEINE STÖRUNGEN, STARKER GYRO-DRIFT	45
ABB.: 33 KEINE DREHUNG, MIT STÖRUNGEN	46
ABB.: 34 MIT DREHUNGEN, KEINE STÖRUNGEN	46
ABB.: 35 MIT DREHUNGEN, MIT STÖRUNGEN	47
ABB.: 36 QUADROCOPTER TEST-MODEL	49
ABB.: 37 KEINE DREHUNG, REGELUNG NACH GIER UNGEFILTERT, MODI ENTSPRICHT DEM FILTERSTATUS	49
ABB.: 38 KEINE DREHUNG, REGELUNG NACH GIER GEFILTERT	50
ABB.: 39 KEINE DREHUNG, REGELUNG NACH GIER GEFILTERT, MAGNETISCHE STÖRUNG DURCH: ZANGE (16S-18S), DAUERMAGNET (21S-23S; 50S-52S), MODI ENTSPRICHT DEM FILTERSTATUS	51
ABB.: 40 DREHUNG, REGELUNG NACH GIER GEFILTERT	52
ABB.: 41 DREHUNG MIT KALIBRIERUNG AUS KAP.:5.2, MOTOREN AUS	52
ABB.: 42 DREHUNG MIT AKTUELLER KALIBRIERUNG, MOTOREN AUS	53
ABB.: 43 QUADROCOPTER VOLL EINSATZBEREIT FÜR AUTONOMEN FLUGBETRIEB	54
ABB.: 44 KEINE DREHUNG, MOTOREN AUS	55
ABB.: 45 FLUG, REGELUNG NACH GIER GEFILTERT	56
ABB.: 46 FORTSETZUNG VON ABB.: 43, STAND OHNE MOTOREN	57

Formelverzeichnis

GLG.: 1 ROTATIONSMATRIX FÜR ROLL-WINKEL	5
GLG.: 2 ROTATIONSMATRIX FÜR NICK-WINKEL	5
GLG.: 3 ROTATIONSMATRIX FÜR GIER-WINKEL	5
GLG.: 4 DREHUNG MIT DREHMATRIX	5
GLG.: 5 QUATERNIONEN-MULTIPLIKATION	6
GLG.: 6 DREHACHSE DER ROTATION	7
GLG.: 7 ROTATIONS- QUATERNION	7
GLG.: 8 DREHACHSE DER ROTATION	7
GLG.: 9 EULERWINKEL IN QUATERNION	7
GLG.: 10 HALLSPANNUNG	13
GLG.: 11 WIDERSTAND DURCH AMR-EFFEKT	13
GLG.: 12 CORIOLISKRAFT	16
GLG.: 13 GYRO WINKEL	16
GLG.: 14 BIAS FÜR MAGNETSENSOR	18
GLG.: 15 GIER-WINKEL DURCH MAGNETFELDVEKTOR	19
GLG.: 16 TRANSFORMATION X-KOMPONENTE	19
GLG.: 17 TRANSFORMATION X-KOMPONENTE	19
GLG.: 18 FILTERGLEICHUNG	32
GLG.: 19 ALPHA FÜR FILTERGLEICHUNG	32

Tabellenverzeichnis

TAB.: 1 AUSWAHL AN MAGNETFELDSENSOREN MIT MESSPRINZIP UND TYPISCHEN MESSBEREICH, (MACINTYRE, 2000)	12
TAB.: 2 AUSWAHL AN GYROSKOPEN	15
TAB.: 3 BEISPIEL-STELLWERTE FÜR PLAUSIBILITÄTSTEST	40
TAB.: 4 SCHWELLWERTE FÜR PLAUSIBILITÄTSTEST, KEIN FLUGBETRIEB	48
TAB.: 5 SCHWELLWERTE FÜR PLAUSIBILITÄTSTEST, EINGESCHRÄNKTER FLUGBETRIEB	53
TAB.: 6 SCHWELLWERTE FÜR PLAUSIBILITÄTSTEST, UNEINGESCHRÄNKTER FLUGBETRIEB	57

Literaturverzeichnis

astronews.com. **2012.** Extrem kurze Umpolung des Erdmagnetfelds. [Online] 17. Oktober 2012. [Zitat vom: 16. Dezember 2013.]

Bundeshandelsakademie und Bundeshandelsschule Völkermarkt. Entstehung und Aufrechterhaltung des Erdmagnetfeldes. [Online] [Zitat vom: 29. Dezember 2013.] <http://www.hak-vk.at>.

Caruso, Michael J. *Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems.* [PDF] s.l. : Honeywell.

Demtröder, Wolfgang. **2004.** *Experimentalphysik II.* s.l. : Springer, 2004.

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. **2003.** Welt der Physik - Das Magnetfeld der Erde. [Online] 4. November 2003. [Zitat vom: 30. November 2013.] <http://www.weltderphysik.de>.

ELMICRO Computer GmbH. Elektroik Laden - Atmel EVK1100. [Online] <http://elmicro.com/>.

Extension Media. **2011.** SolidStateTechnology - MEMS bring magnetic sensors growth in mobile applications. [Online] 25. August 2011. [Zitat vom: 27. Dezember 2013.] <http://electroiq.com>.

findMEMS.com. **2010.** Introduction to MEMS gyroscopes. [Online] 2010. findMEMS.com.

Föll, Helmut. Messung des Hall-Effekts. [Online] [Zitat vom: 3. Dezember 2013.] <http://www.tf.uni-kiel.de>.

Gageik, Nils. **2013.** *Inertial Measurment Unit.* [PDF] Universität Würzburg : s.n., 2013.

—. **2013.** *Orientierungsdarstellung mit Quaternionen.* [PDF] 2013.

Grüninger, Klaus-Dieter. Hall-Effekt. [Online] Landesbildungsserver Baden-Württemberg.[Zitat vom: 3. Dezember 2013.] <http://www.schule-bw.de>.

Halliday, David. **2007.** *Halliday Physik.* s.l. : WILEY-VCH, 2007.

Honeywell. Digital Ring Laser Gyro. [Online] [Zitat vom: 29. November 2013.] <http://www.honeywellringlasergyro.com/>.

KVH Industries. Fiber Optic Gyro. [Online] [Zitat vom: 30. November 2013.] <http://www.kvh.com/dsp1750>.

Macintyre, Steven A. **2000.** *Magnetic Field Measurement.* [PDF] 2000.

Nelkenbrecher, Marco. **2008.** *Das Fluxgate-Magnetometer SAM: Aufbau und Inbetriebnahme.* [PDF] Universität Erlangen-Nürnberg : s.n., 2008. Das Fluxgate-Magnetometer SAM:.

- Otto, Stefan.** 2012. *Orientierungsbestimmung mit Inertialsensoren und Magnetometern auf Basis von Quaternionen.* [PDF] Bonn : s.n., 2012.
- Pololu.** 2013. GitHub - Minimu-9-AHRS-Arduino. [Online] 2013. November 2013. [Zitat vom: 3. Dezember 2013.] <https://github.com/pololu/minimu-9-ahrs-arduino>.
- . MinIMU-9 v2. [Online] [Zitat vom: 3. Dezember 2013.] <http://www.pololu.com>.
- Premerlani, William und Bizard, Paul.** 2009. *Direction Cosine Matrix IMU: Theory.* [PDF] 2009.
- STMicroelectronics.** 2010. STMicroelectronics Unveils MEMS Digital Compass Module. [Online] 5. Januar 2010. [Zitat vom: 27. Dezember 2013.] <http://st.com>.
- Stutzke, Nathan A., Russek, Stephen E. und Pappas, David P.** 2004. *Low-frequency noise measurements on commercial magnetoresistive magnetic field sensors.* Boulder, Colorado : s.n., 2004.
- Wendel, Jan.** 2007. *Integrierte Navigationssysteme.* s.l. : Oldenburg Verlag, 2007.
- Wikipedia.** [Online] [Zitat vom: 29. Dezember 2013.] <http://de.wikipedia.org>.