

Regelungstechnik

Programmieraufgaben





Inhalt

Umfang: ca. 1-2 Zeitstunden

- Lageregelung (Teilweise Wiederholung)
- Theorie zur Regelung (Wiederholung)
- Sicherheitsbelehrung (Wiederholung)
- Aufgaben





Lageregelung

Definition Lageregelung:

Die Lageregelung (engl. Attitude Control) ist das Kernstück des Quadropters. Durch sie wird er in der Luft gehalten. Im Gegensatz zu anderen Fluggeräten (Flugzeug, Hubschrauber) ist der Quadropter ein instabiles System und eine Regelung (Roll, Pitch) somit unverzichtbar:

- > 2 Lageregler übernehmen die Lageregelung in der z- Ebene
- > Entspricht dem Problem der Wippenregelung: 2 Motorenregelung





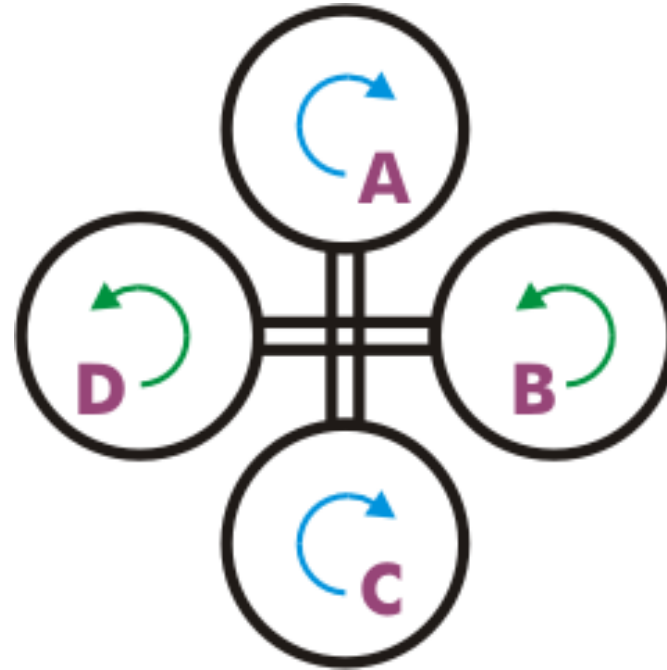
Lageregelung

- Die Lageregelung ist der Kern eines jeden Quadropters.
- Ohne permanente Lageregelung stürzt der Quadropter sofort ab.
- Die Lageregelung regelt vorrangig den Quadropter in der z-Ebene, so dass er nicht kippt.
- 2 Lageregler halten die Quadropter in der z-Ebene:
Einer für die x-Achse (Rollen) und einer für die y-Achse
- Jeweils zwei Motoren, die einer Achse und ein Sensorwert dieser Achse, sind an dieser Regelung beteiligt.
- Diese Regelung entspricht einem inversen Pendel oder einer Wippe.
- Beide Achsen werden als unabhängig angesehen (Vereinfachung!)
- Wir beginnen mit der Lageregelung in einer Achse!
- 1DOF -> 2DOF -> 3DOF (Optional / So wie Zeit ist)



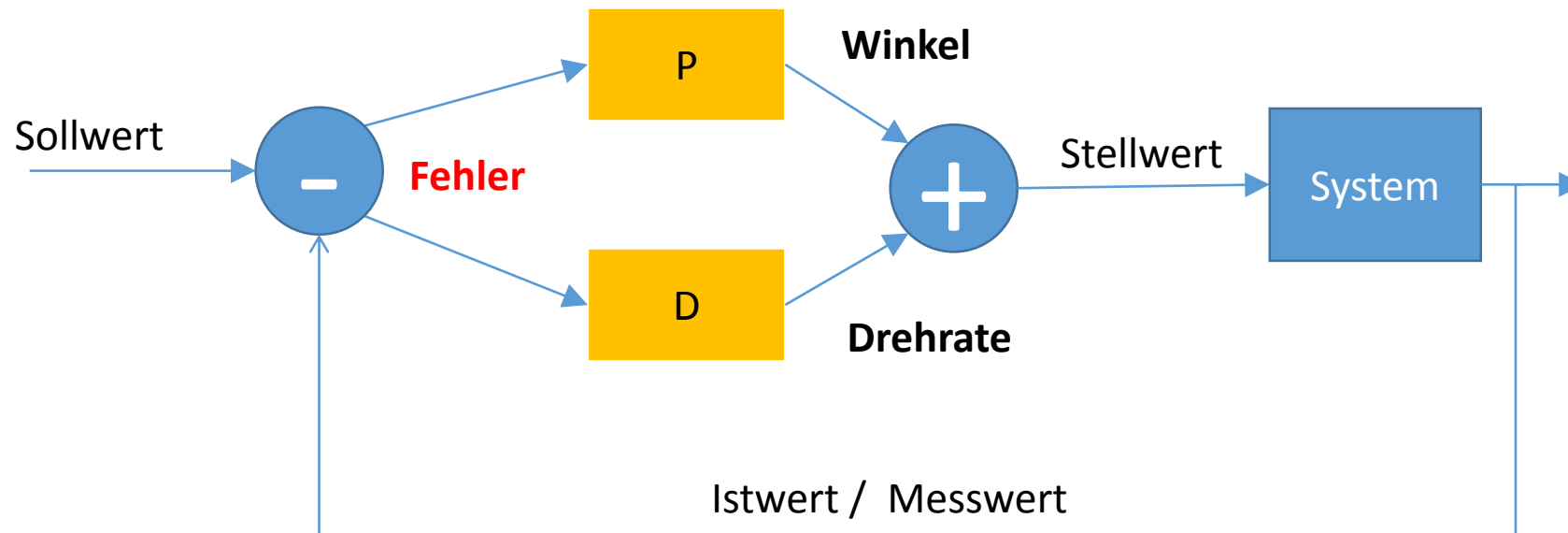
Gierregelung

- Die Gierregelung dient der Regelung der Ausrichtung, d.h. Drehung um die eigene Achse.
- Jeder Motor erzeugt ein Drehmoment aufgrund des Luftwiderstandes.
- Die Motoren einer Achse laufen in die selbe Richtung, die Motoren der anderen Achse dazu gegenläufig.
- Durch eine Änderung der Summe der Motorkräfte einer Achse wird das Gieren “unabhängig” von der Lage beeinflusst.



Theorie zur Regelung

Mit einem PD-Regler und einem Gyrosensor lässt sich das System regeln. Als Regelgröße dient der Neigungswinkel.

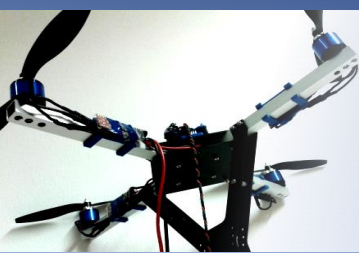


Der **Fehler** F ist die Abweichung des Istwerts M (Messung) vom Sollwert S (Wunschwert).

$$F = S - M$$

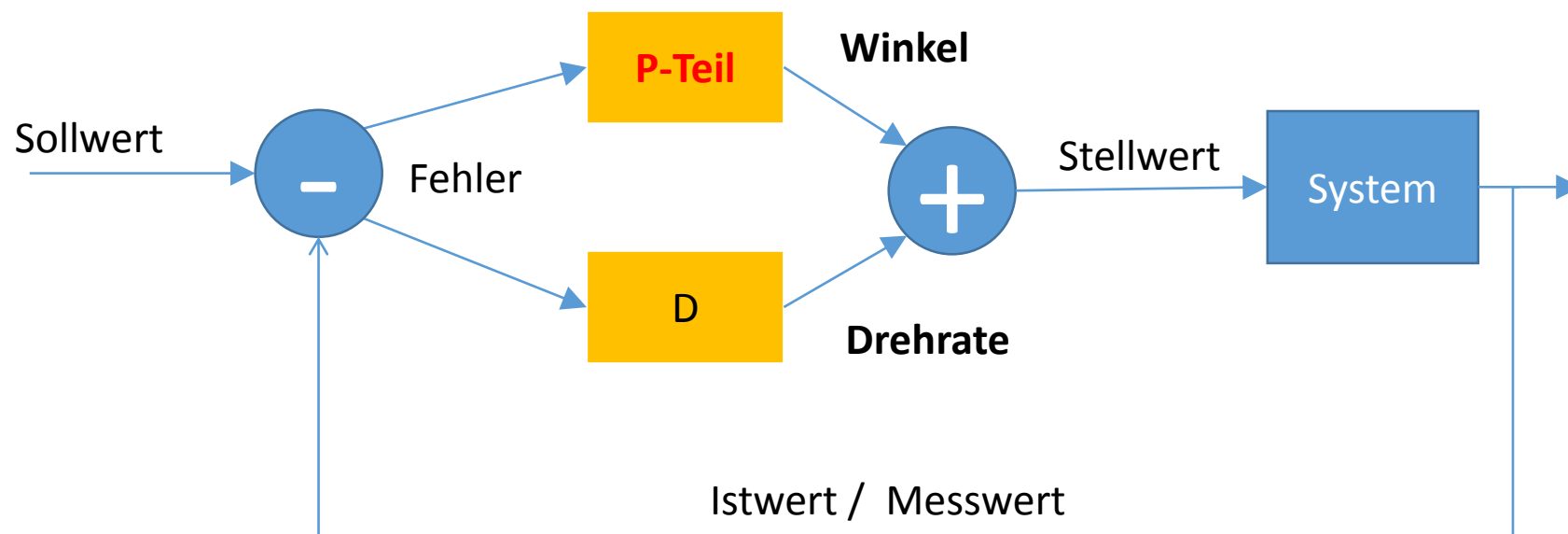
Für $S = 0$ gilt:

$$F = -M$$



Theorie zur Regelung

Der P-Teil liefert die „Power“.



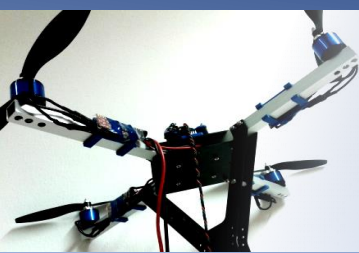
Der PD-Regler besteht nun aus 3 Schritten:

1.) Der P-Teil P ist Proportional zum Fehler und wird wie folgt berechnet:

$$P = k_p * F$$

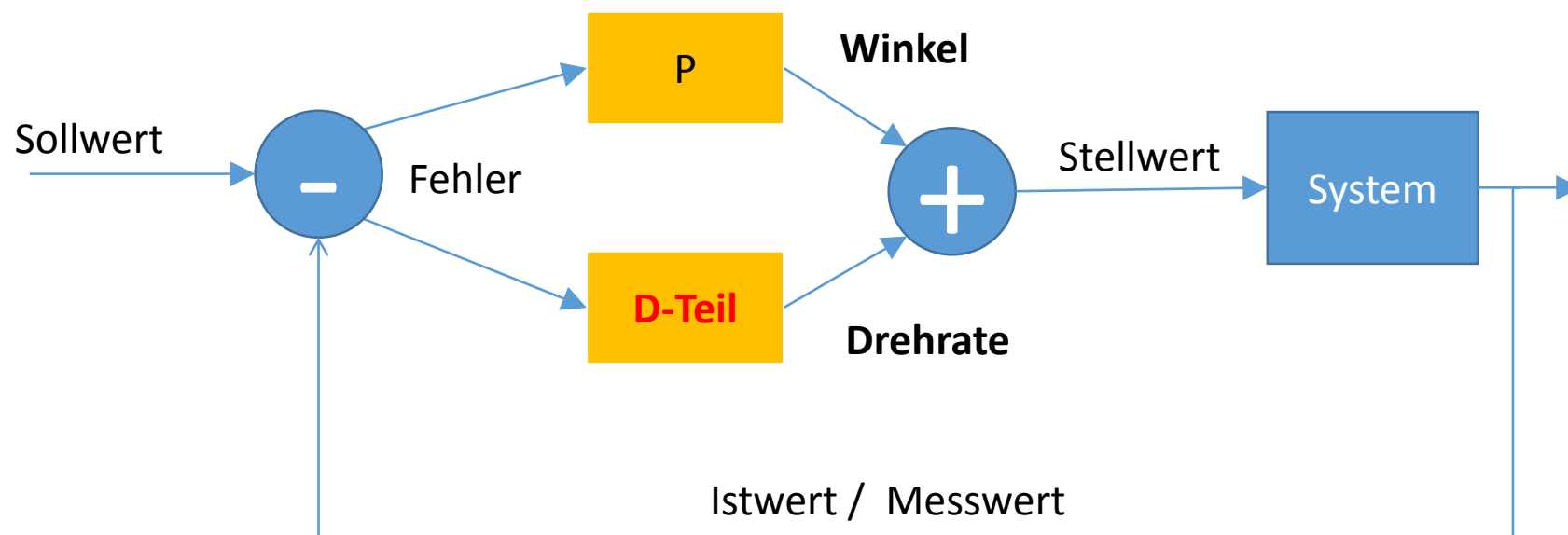
D.h. multipliziere den Fehler mit einem Faktor k_p .

Der P-Teil liefert die „Power“ den Fehler zu beheben. Mehr P macht das System stärker und schneller, kann es aber auch instabil machen.



Theorie zur Regelung

Der D-Teil liefert die Dämpfung.

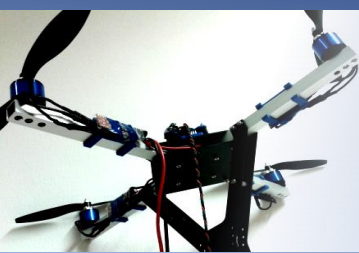


Der PD-Regler besteht nun aus 3 Schritten:

2.) Der D-Teil D ist die Ableitung bzw. Änderung (Differential) des Fehlers und wird wie folgt berechnet:

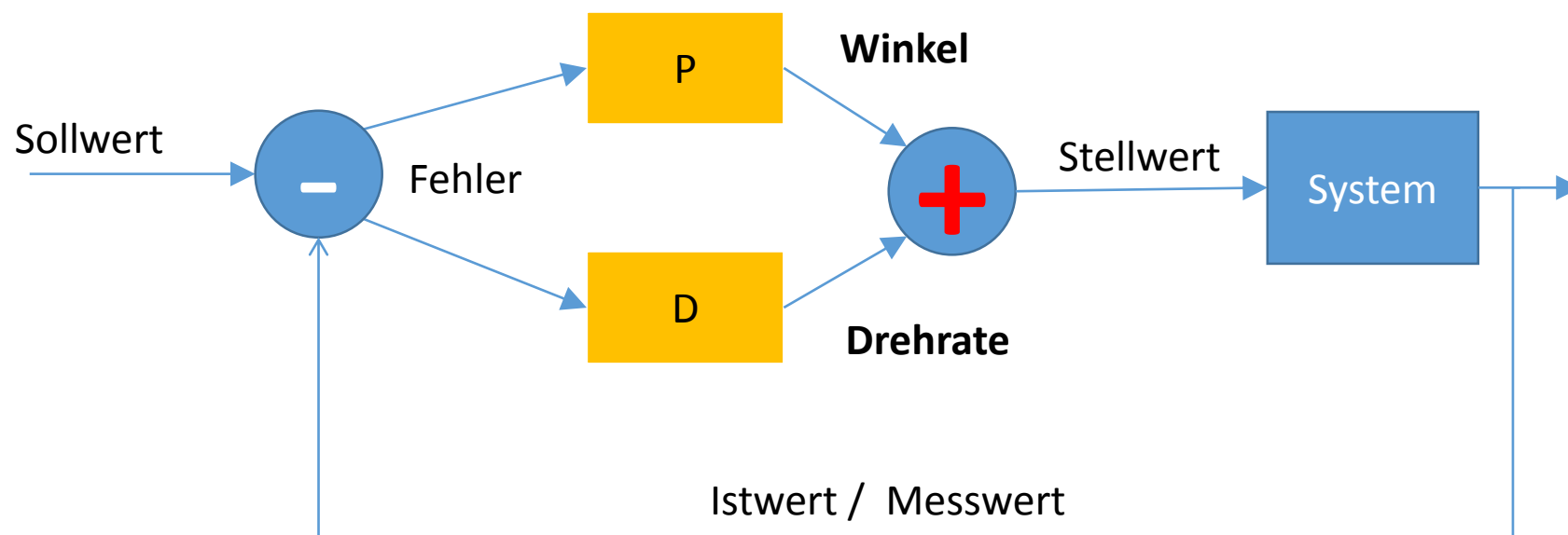
$D = k_d * (F(t) - F(t-1))$, t ist Zeit
D.h. bilde die Differenz des Fehlers zu zwei Zeitpunkten und multipliziere das Ergebnis mit einem Faktor k_d .

Der D-Teil liefert die „Dämpfung“ und bremst das System. Mehr D macht das System stabiler und langsamer, kann es aber auch instabil machen.



Theorie zur Regelung

Beide Teile sind zu addieren und liefern den sogenannten Stellwert, auch Output O genannt.



Der PD-Regler besteht nun aus 3 Schritten:

3.) Schließlich sind P-Teil und D-Teil D zu addieren und ergeben den Stellwert O (Output):

$$O = P + D$$

Das Output ist der Wert, der zur Regelung auf die Motoren zu addieren ist.

Problem: 2 Motoren / Stellwerte , 1 Messwert (Winkel)

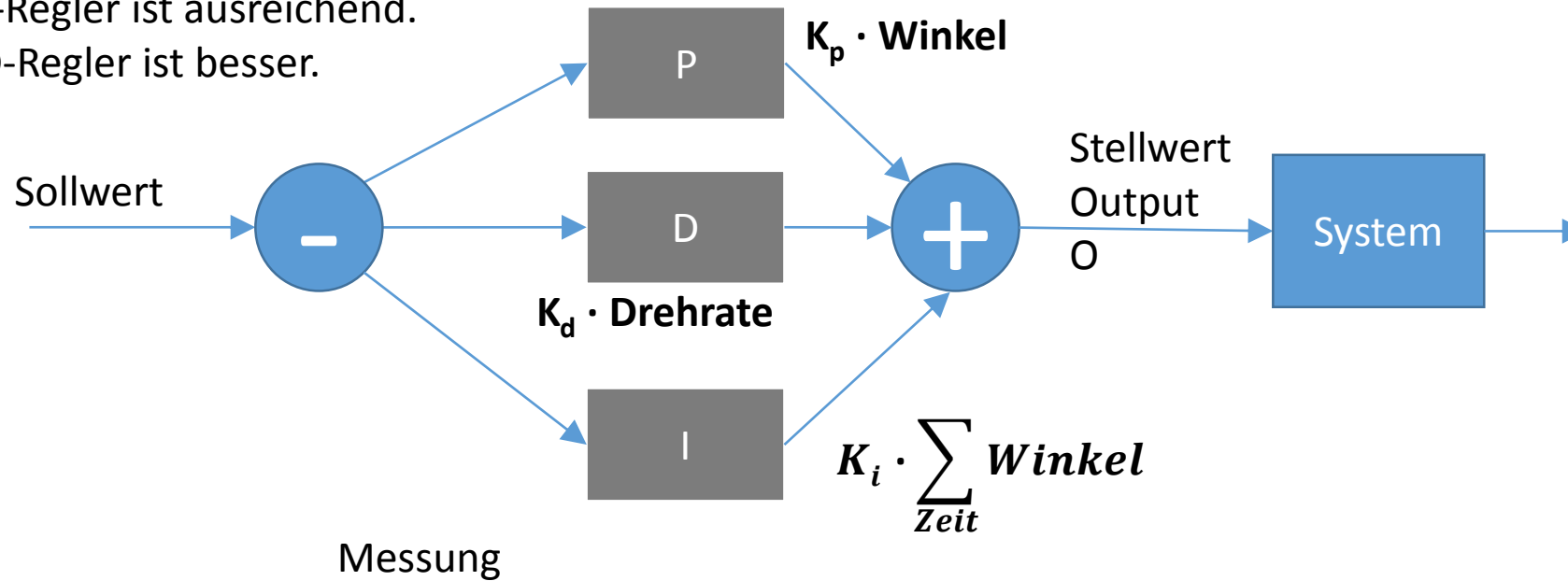
Zunächst müssen die Motoren immer einen Wert haben, damit der Qopter fliegt. D.h. im Idealfall (Output=0) haben alle Motoren M den Wert G (Schwebegas): $M = G$. Da wir zwei Motoren haben, wird nun entsprechend der Drehrichtung auf einen Motor das Output addiert und beim anderen abgezogen, so dass sich das Schwebegas nicht verändert:

$$\text{Motor 1: } M_1 = G + O$$

$$\text{Motor 3: } M_3 = G - O$$

Theorie zur Regelung

PD-Regler ist ausreichend.
PID-Regler ist besser.



$$\text{Stellwert } O = +/- K_p \cdot \text{Winkel} +/- K_d \cdot \text{Drehrate} +/- K_i \cdot \sum_{\text{Zeit}} \text{Winkel}$$

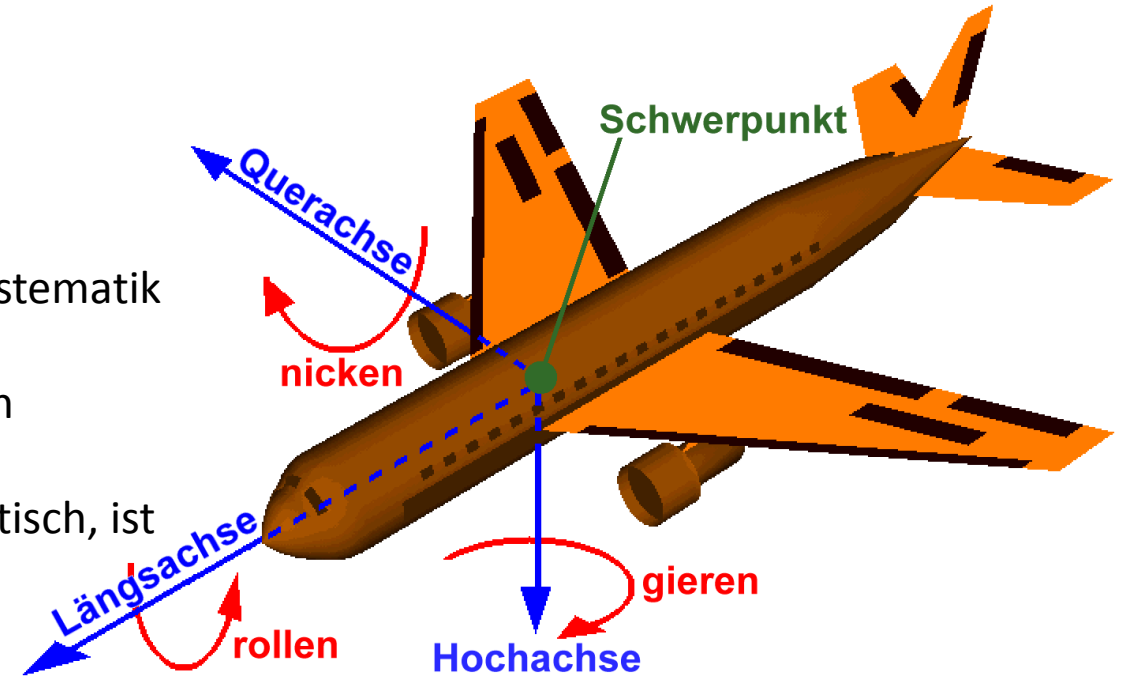


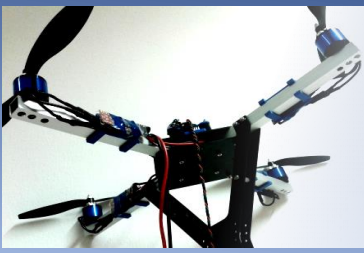
+/- bedeutet, dass je nach Orientierung der Sensoren und Motor zu addieren oder zu subtrahieren ist.

Theorie zur Regelung

- Roll: rollen (Längsachse)
- Pitch: nicken (Querachse)
- Yaw: gieren (Hochachse)
- Für jede Regelung Bedarf es eines separaten Reglers.
- Das Prinzip ist bei Roll, Pitch und Yaw dasselbe.
- Roll und Pitch haben zudem beim Quadropter aufgrund der Systematik und Symmetrie die selben Parameter. **Nicht** das selbe Output.
- Die Regler-Outputs sind zu überlagern / addieren. Dies nennt sich Superposition. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Regler unabhängig voneinander sind. Dies gilt nur eingeschränkt theoretisch, ist aber eine nützliche, hinreichende Vereinfachung. Es gilt z.B.:

$M_1 = G + O(\text{roll}) + O(\text{yaw})$	Motor 1
$M_2 = G + O(\text{pitch}) - O(\text{yaw})$	Motor 2
$M_3 = G - O(\text{roll}) + O(\text{yaw})$	Motor 3
$M_4 = G - O(\text{pitch}) - O(\text{yaw})$	Motor 4





Theorie zur Regelung

Praktische Probleme bei der Superposition:

- Die Kraft der Motoren ist begrenzt, z.B: 0 = aus, 255 = Vollgas
- Die Regelungstechnik kennt theoretisch aber keine Begrenzung.
- Wenn also die Motoren mehr oder weniger Kraft liefern sollen, als sie können, führt dies zu Problemen bzw. Abhängigkeiten der Regler.
- Es gilt: $M_4 = G - O(\text{pitch}) - O(\text{yaw})$
- M_1 kann maximal 255 und minimal 0 ergeben. Wenn also $O(\text{pitch}) > G$ würde, dann hätte ein positives $O(\text{yaw})$ keinen Effekt mehr.
- Daraus folgt: Die Regler stören einander und sind sehr wohl nicht unabhängig.
- Das Problem kann durch folgende Maßnahmen behoben werden:
 - Die Regelungsparameter werden ausgewogen gewählt. Insbesondere der Yaw-Regler wird schwach ausgelegt.
 - Der Yaw-Regler wird begrenzt (Yaw-Maßnahme 2).
 - Der Yaw-Regler wird dynamisch immer dann begrenzt, wenn Roll- und Pitch arbeiten müssen. Gleichzeitig erhält er aber einen festen „Mindestanteil“ (Yaw-Maßnahme 3).
- Die Maßnahmen sind unterschiedlich sinnvoll und aufwändig. Alle drei Yaw-Maßnahmen empfehlen sich.



Theorie zur Regelung

Was sende ich nun an den Motor?

- Der – ein jeder - Motor muss einmal einen Startgas oder Schwebegas Wert erhalten, welcher den Quadrokofter in der Luft hält. Wir verwenden hier aus Sicherheitsgründen den Wert 80. Idealerweise entspricht dies 50% des Gesamtgases, d.h. Gesamtkraft des Motors.
- Dann haben wir noch folgendes Problem: Wir haben 2 Motoren pro Achse, brauchen also zwei Stellwerte, aber unser Regler liefert uns nur einen Stellwert 0 . Die Lösung lautet: Der Stellwert wird auf den einen Motor addiert und vom anderen subtrahiert. Dadurch bleibt auch die Summe konstant. Andernfalls würde sich ja auch der Auftrieb ändern, was unerwünscht ist.
- Der Wert 80 bedeutet auch, dass wir maximal 79 abziehen und aufaddieren können, bevor die Motoren ausgehen – wäre ungewollt - oder die Summe sich ändert – wäre ebenfalls ungewollt. Denn gehen die Motoren aus, so dauert es lange, bis Sie wieder starten. Ändert sich die Summe, so steigt oder sinkt der Quadrokofter.





Theorie zur Regelung

Was sende ich nun an den Motor?

- Für Attitude (Roll, 1DOF) ergibt sich folgende Formel:

```
#define START_GAS      80
```

```
M1 = (unsigned char)(START_GAS + O);
```

```
M3 = (unsigned char)(START_GAS - O);
```

- Als nächstes sind die Regler Roll und Yaw zu superpositionieren. Schließlich sind die Regler Roll, Pitch und Yaw zu superpositionieren. Am Ende ergibt dies je ein Output O für jede der drei Achsen. Diese Outputs O nennen wir nun roll, pitch und yaw:

```
M1 = (unsigned char)(START_GAS + roll + yaw);
```

```
M2 = (unsigned char)(START_GAS + pitch - yaw );
```

```
M3 = (unsigned char)(START_GAS - roll + yaw);
```

```
M4 = (unsigned char)(START_GAS + pitch - yaw);
```





Theorie zur Regelung

Was sende ich nun an den Motor?

- Für Attitude (Roll, 1DOF) ergibt sich folgende Formel:

```
#define START_GAS      80
```

```
M1 = (unsigned char)(START_GAS + O);
```

```
M3 = (unsigned char)(START_GAS - O);
```

O sei hier der Output des Attitude Reglers.

1 DOF Roll (Rollen)

- Für Yaw (1 DOF) ergibt sich folgende Formel:

```
M1 = (unsigned char)(START_GAS + O);
```

```
M2 = (unsigned char)(START_GAS - O);
```

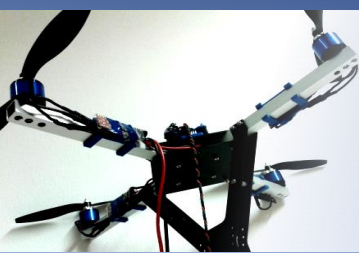
```
M3 = (unsigned char)(START_GAS + O);
```

```
M4 = (unsigned char)(START_GAS - O);
```

O sei hier der Output des Yaw Reglers.

1 DOF Yaw (Gieren)





Theorie zur Regelung

Was sende ich nun an den Motor?

- Als nächstes sind die Regler Roll und Yaw zu superpositionieren. Dies ergibt je ein Output O pro Regler, dass wir nun roll und yaw nennen:

$M1 = (\text{unsigned char})(\text{START_GAS} + \text{roll} + \text{yaw});$

$M2 = (\text{unsigned char})(\text{START_GAS} - \text{yaw});$

$M3 = (\text{unsigned char})(\text{START_GAS} - \text{roll} + \text{yaw});$

$M4 = (\text{unsigned char})(\text{START_GAS} - \text{yaw});$

2 DOF
Roll + Yaw

- Im letzten Schritt sind alle drei Regler zu superpositionieren, d.h. die Stellwerte der Regler Roll, Pitch und Yaw werden additiv verrechnet. Die drei Regler liefern je ein Output O für jede der drei Achsen. Diese Outputs O nennen wir roll, pitch und yaw:

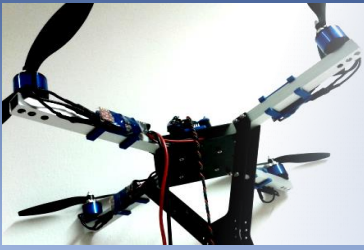
$M1 = (\text{unsigned char})(\text{START_GAS} + \text{roll} + \text{yaw});$

$M2 = (\text{unsigned char})(\text{START_GAS} + \text{pitch} - \text{yaw});$

$M3 = (\text{unsigned char})(\text{START_GAS} - \text{roll} + \text{yaw});$

$M4 = (\text{unsigned char})(\text{START_GAS} + \text{pitch} - \text{yaw});$

3 DOF
Roll + Pitch + Yaw



Theorie zur Regelung

Vorgehen bei der Regler-Parametrisierung:

1. Fange mit $D = 0$ an und erhöhe P solange, bis das System „regelt“. Wenn es allzu heftig bzw. instabil sich verhält, ist P bereits zu hoch. Wenn das System den Sollwert nie erreicht, ist P zu niedrig. Im Normalfall sollte das System oszillieren, d.h. hin und her schlagen.
2. Als Nächstes erhöhe D um ein Überspringen abzdämpfen. D sollte der Bewegung (Änderung) entgegenwirken und so das System verlangsamen.
3. Wenn erwünscht: Am Ende kann ein I-Teil hinzugefügt werden (Für Profis).

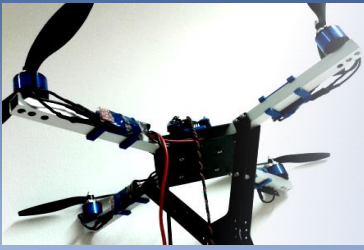
Der I-Teil steht für Integral und ist die Summe des Fehlers über die Zeit:

$$I(t) = k_i \cdot F(t) + I(t-1)$$

Aufgabe des I-Teil ist es Asymmetrien zu beheben, z.B. weil ein Motor schwächer ist. Somit behebt der I-Teil die stationäre Regelabweichung, indem kleine Fehler über die Zeit aufaddiert werden und so systematische Fehler (z.B. mehr Gewicht auf einer Seite) korrigiert werden können.

Vorsicht: Zuviel k_i führt zum Oszillieren bzw. zur Instabilität.

Meist wird das Integral begrenzt, damit das Integral nicht „wegläuft“, wenn man den Qopter z.B. festhält.



Steuerung / Buttons

Knöpfe / Buttons

1. Der Push Button 0 (PB0) ist reserviert zum An- und Abschalten der Motoren.
2. Der Push Button 1 (PB 1) und Push Button 2 (PB 2) kann zur Steuerung verwendet werden. Dazu dienen die Funktionen `Push_Button_1_Pressed()` und `Push_Button_2_Pressed()` .



Sicherheitsbelehrung

Sicherheitsbelehrung:

- Vor dem Start der Motoren stets prüfen, dass alles fest sitzt:
Dies betrifft alle Schrauben, Motoren, Ausleger, Y-Teile, Schrauben, Muttern, Stifte, etc.
- NUR mit Genehmigung des Betreuers die Motoren anschließen und starten.
- Abstand halten. Nachbarn warnen. Vorsicht walten lassen. Ausschaltknopf stets parat haben (Finger drüber)!



Not-Aus:

- PBO drücken
- Spannungsquelle ausschalten bzw. trennen
- I2C Kabel trennen (herausziehen)
- MCU ausschalten / reseten

Das QCS ist kein Spielzeug und kann bei falscher Bedienung ernsthafte Verletzungen hervorrufen.

Die Motoren haben genug Kraft, um abzuheben oder tiefe Wunden zu schneiden !



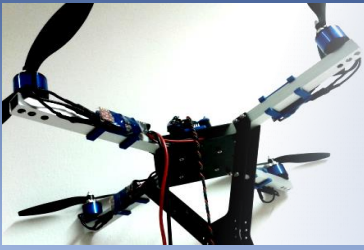
Aufgaben

Notwendige Hardware:

- EVK1100
- QCS / QCSF: Anfangs im 1 DOF Attitude Control Modus
- Mikro USB Kabel für Strom und zum Flashen
- USART Kabel für Kommunikation: RS232 auf PC (RS232 oder USB)

Notwendige Software:

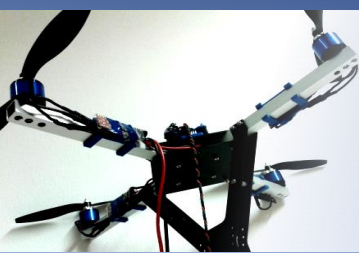
- AVR Studio 32 installiert (mit Tool Chain und FLIP Treiber)
- Projekt-Code (Framework + Lösung) und Library:
EMQ_Framework, EMQ_QCS, libemq.a



Aufgaben

Hinweis zu den Aufgaben:

- Die Lösungen dieser Aufgaben sind in dem Ordner **Control** im Modul **AttitudeControl** zu implementieren.
- Dazu sind die Funktionen `my_Attitude_Control_Init()` bzw. `my_Attitude_Control()` zu füllen.
- `my_Attitude_Control_Init()` wird einmalig zu Beginn, `my_Attitude_Control()` wird alle 10ms aufgerufen.
- `my_Attitude_Control_Init()` muss nicht verwendet werden.
- Der Regler (Regelschleife) kommt also in `my_Attitude_Control()`.
- Als Parameter erhält die Funktion die IMU Daten, d.h. RPY Winkel und Drehraten. Diese Daten beinhalten gleichzeitig alle notwendigen Sensordaten und stellen den „Eingang“ der Funktion dar.
- Durch „Reglerformel“ und Verarbeitung des „Eingangs“, d.h. der Sensordaten, wird der „Ausgang“ der Funktion, die Motorstellwerte, ermittelt.
- Um die Motorstellwerte zu setzen, dienen die Motordaten, die den „Ausgang“ der Funktion darstellen, also das Ergebnis. Die Motorstellwerte sind 1 Byte lang und nehmen Werte von 0 (Aus) bis 255 (Vollgas) an.



Aufgaben

Aufgabe 1:

Implementieren Sie eine Lageregelung (1 DOF Roll-Regelung), um den Quadrokopter in der z-Ebene zu stabilisieren. Dazu ist das QCS mechanisch so einzustellen, dass nur die Roll-Achse beweglich ist.

Orientieren Sie sich bei der Bearbeitung an den Hilfen auf den Folien. Insbesondere die Folien 10 , 15 und 17 beinhalten - in dieser Reihenfolge - die wesentlichen Lösungsschritte. Die Reglerparameter sind durch ausprobieren zu bestimmen, wobei folgende Werte-Bereiche die Suche nach einem guten Parameter erleichtern helfen:

Werte-Bereich:	$1 < K_p < 4$	$0.4 < K_d < 0.8$	$0.01 < K_i < 0.02$
Parameter-Funktion:	Bringt Kopter zurück. Gibt Kraft.	Dämpfung. Stoppt Überschwingen.	Behebt Stationäre Regelabweichung. Notwendig bei Assymetrie.

**Hinweis: Bei Fragen und Problemen sowie nach jeder Aufgabe kontaktieren Sie bitte die Betreuer.
Bevor Sie anfangen und die Motoren starten, melde Sie sich zu Ihrer eigenen Sicherheit unbedingt beim Betreuer und stellen sicher, dass niemand zu Schaden kommen kann. Die Sicherheitsanweisungen aus Folie 19 sind zu beachten.**



Aufgaben

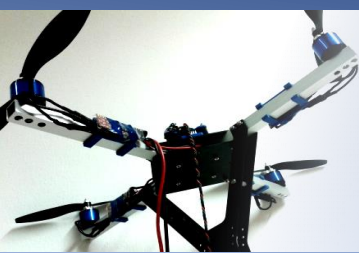
Aufgabe 2:

Implementieren Sie eine Gier-Regelung (1 DOF Yaw-Regelung), um Drehungen des Quadropters um die eigene Achse zu regeln. Dazu ist das QCS mechanisch so einzustellen, dass nur die Gier-Achse beweglich ist.

Deaktivieren Sie für diese Aufgabe die Roll-Regelung aus Aufgabe 1. Orientieren Sie sich bei der Bearbeitung an den Hilfen auf den Folien. Insbesondere die Folien 10, 15 und 17 beinhalten - in dieser Reihenfolge - die wesentlichen Lösungsschritte. Die Reglerparameter sind durch ausprobieren zu bestimmen, wobei folgende Werte-Bereiche die Suche nach einem guten Parameter erleichtern helfen:

Werte-Bereich:	$3 < K_p < 6$	$1 < K_d < 3$	$0.001 < K_i < 0.01$
Parameter-Funktion:	Bringt Kopter zurück. Gibt Kraft.	Dämpfung. Stoppt Überschwingen.	Behebt Stationäre Regelabweichung. Notwendig bei Assymetrie.

Hinweis: Bei Fragen und Problemen sowie nach jeder Aufgabe kontaktieren Sie bitte die Betreuer.
Bevor Sie anfangen und die Motoren starten, melde Sie sich zu Ihrer eigenen Sicherheit unbedingt beim Betreuer und stellen sicher, dass niemand zu Schaden kommen kann. Die Sicherheitsanweisungen aus Folie 19 sind zu beachten.



Aufgaben

Aufgabe 3a:

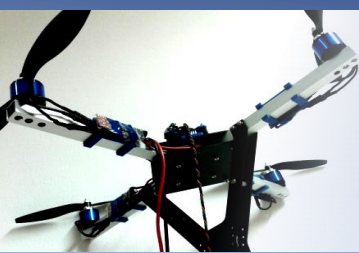
Implementieren Sie nun eine 2-DOF-Regelung (2 DOF Roll-Yaw-Regelung), um gleichzeitig die Roll-Achse und die Gier-Achse des Quadropters zu regeln. Dazu ist das QCS mechanisch so einzustellen, dass beide Achsen beweglich sind.

Verwenden Sie für diese Aufgabe die Ergebnisse aus Aufgabe 1 und 2. Orientieren Sie sich bei der Bearbeitung an den Hilfen von Folie 16.

Aufgabe 3b:

Beobachten Sie das Systemverhalten bei Drehungen um die z-Achse von ca. 45-90°. Beachten Sie, dass sich die Regler sehr wohl beeinflussen. Welches ungewünschte Verhalten lässt sich feststellen und woran liegt das? Implementieren Sie eine Lösung des Problems. Auf Folie 12 sind Hintergrundinformationen zu dieser Aufgabe zu finden.

Hinweis: Bei Fragen und Problemen sowie nach jeder Aufgabe kontaktieren Sie bitte die Betreuer. Bevor Sie anfangen und die Motoren starten, melde Sie sich zu Ihrer eigenen Sicherheit unbedingt beim Betreuer und stellen sicher, dass niemand zu Schaden kommen kann. Die Sicherheitsanweisungen aus Folie 19 sind zu beachten.



Aufgaben

Aufgabe 4:

Implementieren Sie nun eine 3-DOF-Regelung (Roll-Pitch-Yaw-Regelung), um gleichzeitig alle drei Achsen des Quadropters wie im freien Flug zu regeln. Dazu ist das QCS mechanisch umzustellen und das 3 DOF-Gelenk vom Betreuer zu installieren. Verwenden Sie für diese Aufgabe die Ergebnisse aus Aufgabe 1 bis 3.

Wichtig: Bevor Sie starten, sind aus Sicherheitsgründen alle Reglerparameter zu halbieren! Das 3DOF Gelenk hat weniger Reibung und benötigt weniger Kraft. Halten Sie stets einen Finger am Ausknopf (PBO, Power oder Reset) und schalten Sie das System sofort aus, wenn es instabil wird.

Orientieren Sie sich bei der Bearbeitung an den Hilfen auf der Folie 16.

Hinweis: Bei Fragen und Problemen sowie nach jeder Aufgabe kontaktieren Sie bitte die Betreuer. Bevor Sie anfangen und die Motoren starten, melde Sie sich zu Ihrer eigenen Sicherheit unbedingt beim Betreuer und stellen sicher, dass niemand zu Schaden kommen kann. Die Sicherheitsanweisungen aus Folie 19 sind zu beachten.