

# Regelungstechnik

QCS-Einführungskurs





# Inhalt

**Umfang: ca. 1-2 Zeitstunden**

- Lageregelung
- Theorie zur Regelung
- Bürstenlose Motoren
- Motorregler
- Qt Steuerungssoftware EMQPlay
- Sicherheitsbelehrung
- Aufgaben





# Lageregelung

## **Definition Lageregelung:**

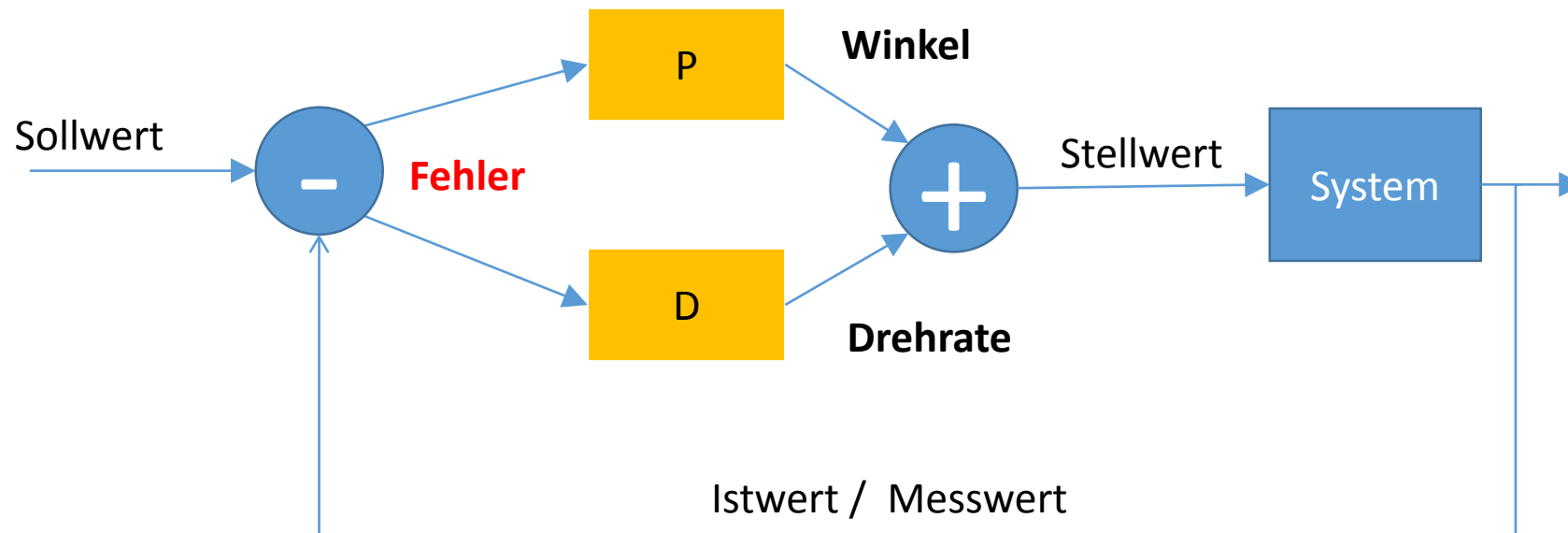
Die Lageregelung (engl. Attitude Control) ist das Kernstück des Quadropters. Durch sie wird er in der Luft gehalten. Im Gegensatz zu anderen Fluggeräten (Flugzeug, Hubschrauber) ist der Quadropter ein instabiles System und eine Regelung (Roll, Pitch) somit unverzichtbar:

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



# Theorie zur Regelung

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

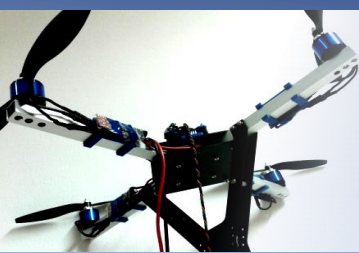


Der **Fehler**  $F$  ist die Abweichung des Istwerts  $M$  (Messung) vom Sollwert  $S$  (Wunschwert).

$$F = S - M$$

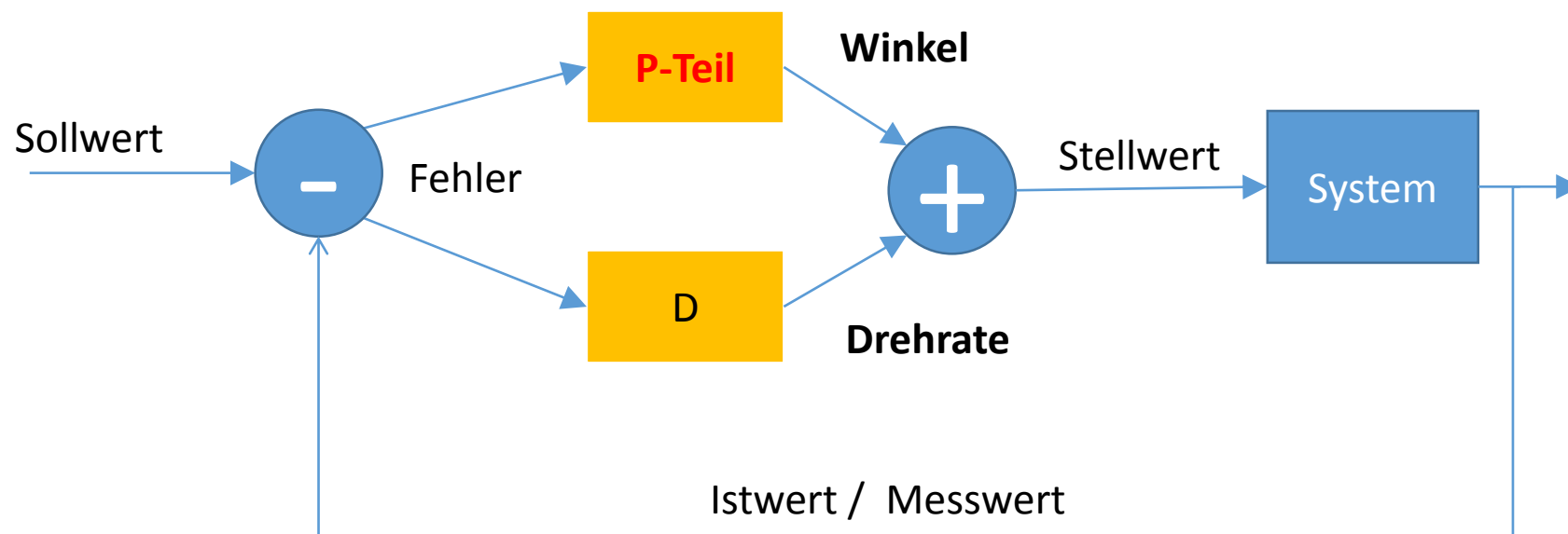
Für  $S = 0$  gilt:

$$F = -M$$



# Theorie zur Regelung

Der P-Teil liefert die „Power“.



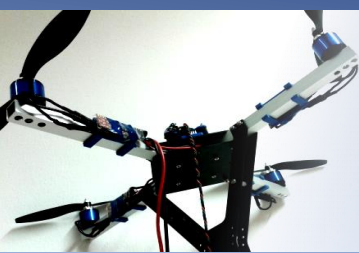
Der PD-Regler besteht nun aus 3 Schritten:

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

$$P = k_p * F$$

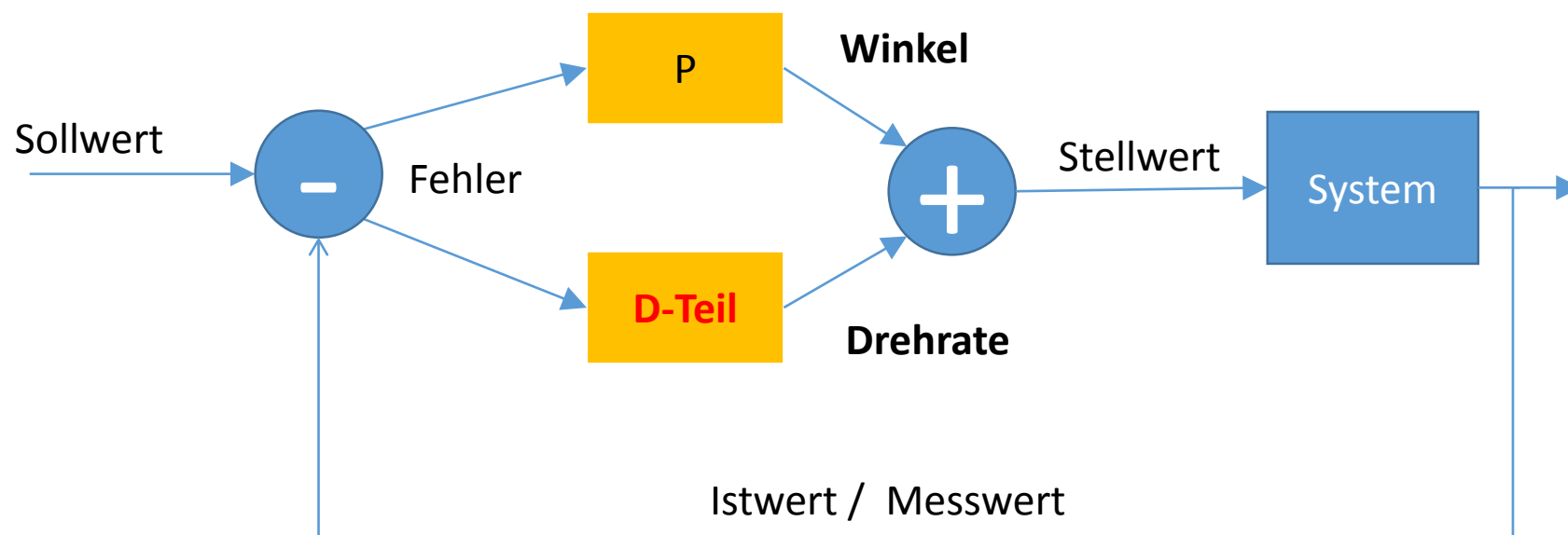
D.h. multipliziere den Fehler mit einem Faktor  $k_p$ .

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.

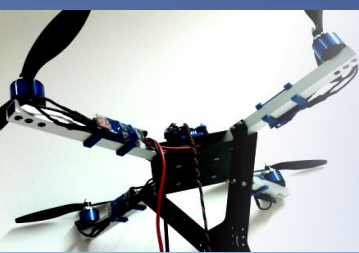


Der PD-Regler besteht nun aus 3 Schritten:

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

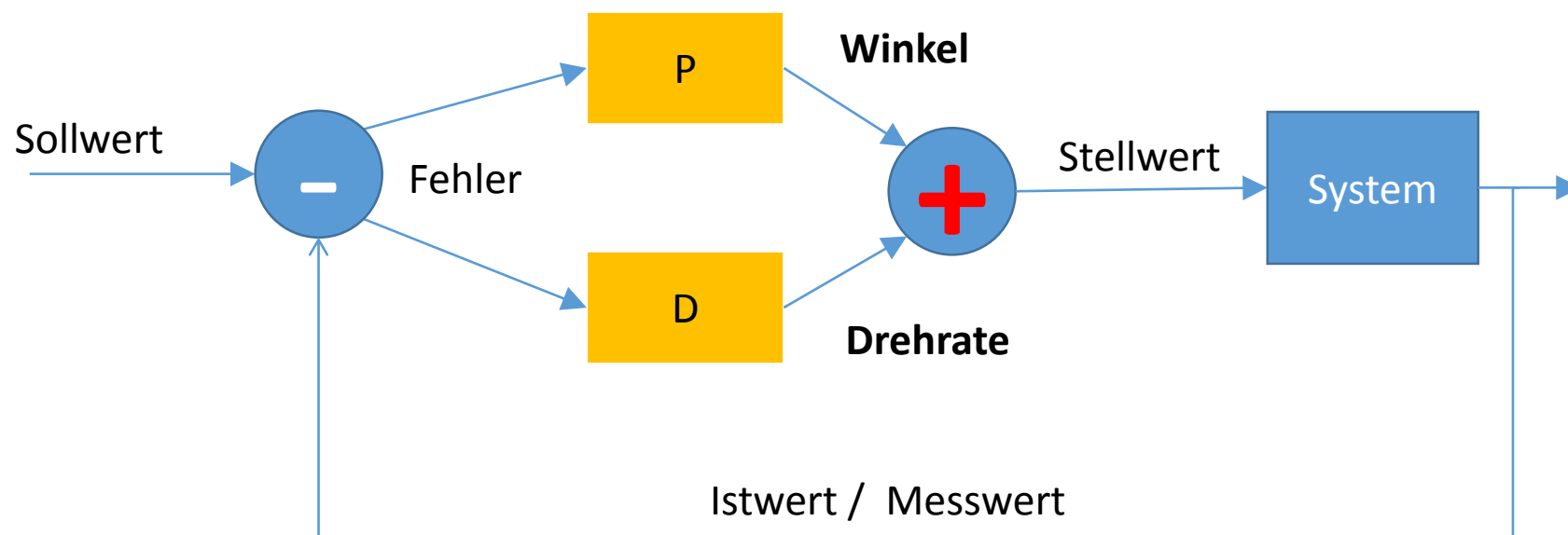
$D = k_d * (F(t) - F(t-1))$ ,  $t$  ist Zeit  
D.h. bilde die Differenz des Fehlers zu zwei Zeitpunkten und multipliziere das Ergebnis mit einem Faktor  $k_d$ .

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)

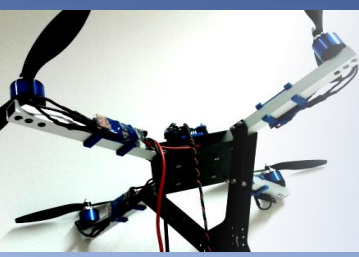
Zunächst müssen die Motoren immer einen Wert haben, damit der Qopter fliegt. D.h. im Idealfall (Output=0) haben alle Motoren M den Wert G (Schwebegas):  $M = G$ . Da wir zwei Motoren haben, wird nun entsprechend der Drehrichtung auf einen Motor das Output addiert und beim anderen abgezogen, so dass sich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

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

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

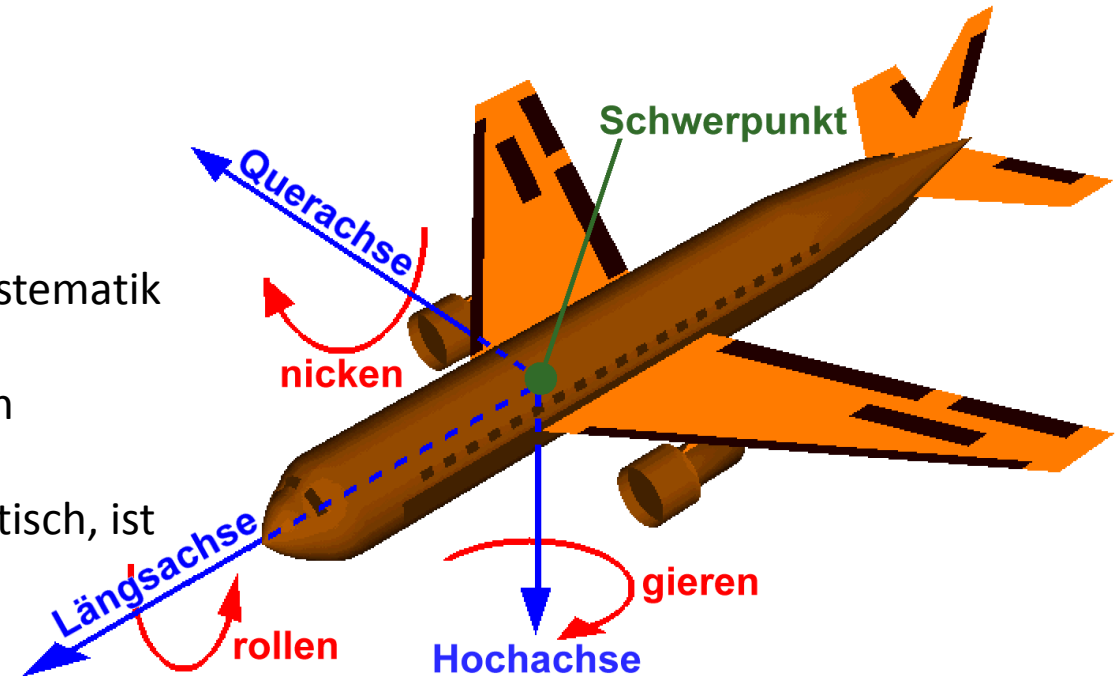


# Theorie zur Regelung

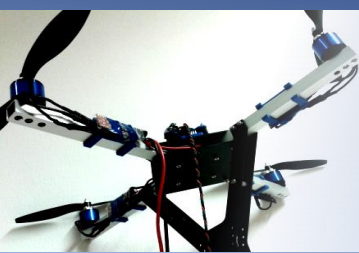


- Roll: rollen (Längsachse)
- Pitch: nicken (Querachse)
- Yaw: gieren (Hochachse)
- Für jede Regelung Bedarf es eines separaten Reglers.
- Das Prinzip ist bei Roll, Pitch und Yaw dasselbe.
- Roll und Pitch haben zudem beim Quadrokopter aufgrund der Systematik und Symmetrie die selben Parameter. **Nicht** 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



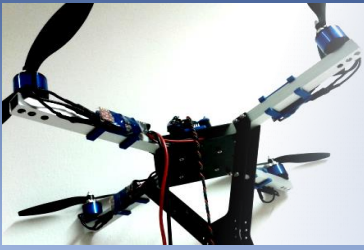




# Theorie zur Regelung

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

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:

$$I(t) = k_i * F(t) + I(t-1)$$

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.



# Bürstenlose Motoren

## Bürstenlose Motoren (engl. Brushless Motors, BL-Motor):

Es werden sogenannte bürstenlose Gleichstrommotoren verwendet. Im Gegensatz zu Bürstenmotoren wird hier also eine elektronische Kommutierung verwendet. Trotz des Namens entspricht das Funktionsprinzip einem Drehstrom-Motor mit Permanentmagneten und sogenannten drei Phasen: (+/-/0)

Vorteile der BL-Motoren:

- Hohe Leistungsdichte (Leistung / Gewicht)
- Hohe Drehzahlen
- Kaum Verschleiß (nur Lager, keine Bürsten)
- Große Verbreitung / Auswahl

Nachteil:

- Es wird ein Motorregler benötigt, womit das synchrone Drehfeld für die Motoren erzeugt werden kann (Motoren haben 3 Anschlüsse ).
- Kosten
- Niedrige Drehzahlen schwierig bzw. sehr teuer



# Motorregler

## Motorregler:

Der Motorregler (engl. Brushless Controller (BICtrler), Electronic Speed Controller (ESC)) steuert die Motoren an und wird per I<sup>2</sup>C bzw. PWM angesprochen. Er leistet also die Kommutierung, d.h. das Umschalten der Phasen zum richtigen Zeitpunkt. Dabei ist stets wechselnd eine Phase mit (+), eine Phase mit (-) und eine Phase mit einem ADC verbunden. Die angelegte Spannung am BI-Motor (klassisch via PWM reguliert) gibt die Geschwindigkeit vor, wobei der BICtrler durch Messung der freien Phase stets beim Nulldurchgang umschaltet und so einen kontinuierlichen Lauf gewährleistet. Wird die Spannung erhöht, drehen sich die Motoren „automatisch“ schneller und die Umschaltzeit reduziert sich.

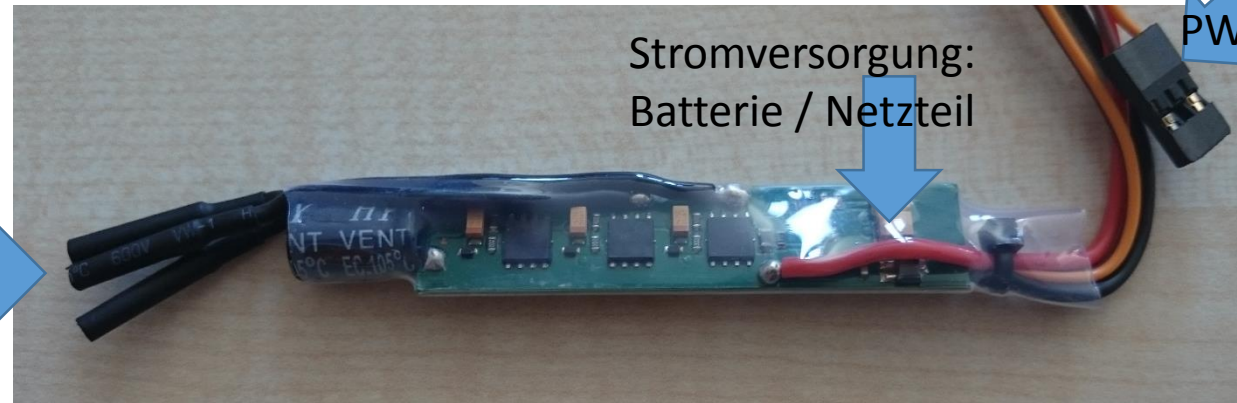
Vorteile der verwendeten BICtrler:

- Verkabelung (I<sup>2</sup>C + PWM)
- Sollwertstellzeit < 0,5ms (schnell)

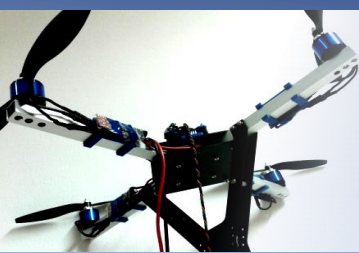
Stellwert: 1 Byte U8

Wertebereich 0 bis 255

3 Phasen  
zum Motor



Verpolung: Tauscht man die Motorphasen, ändert sich die Drehrichtung.  
Verpolen kann man auf der „Motor-Seite“ nichts.



# EMQPlay

## 1. Attitude Control

Yaw deaktiv

## Auto Apply:

Jede Parameteränderung wird sofort übertragen.

## Full Stop:

Stop Button schaltet nicht nur Regler, sondern auch Motoren aus.

EMQPlay ist unsere Qt Steuerungssoftware

The screenshot shows the EMQPlay software interface with the following sections:

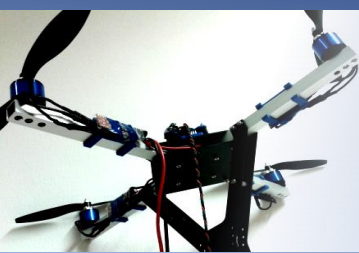
- Top Bar:** Help, HMD, Comm, Debug, QCS.
- Left Panel:** A dropdown menu set to "2. Yaw Control", buttons for "Apply Values", "Reset Values", and a large "STOP" button.
- Main Panel:**
  - 1. Attitude Control Parameters:** Includes sliders for P [‰] (0), I [‰] (0), and D [‰] (0). A checkbox for "Saturierung" is set to 1000. A dropdown menu is set to "Roll".
  - 2. Yaw Control Parameters:** Includes sliders for P [‰] (0), I [‰] (0), and D [‰] (0). A checkbox for "360° Yaw Limit" is checked. A checkbox for "Saturierung" is set to 1000.
  - 3. 2DOF Control Parameters:** Includes "Yaw Controller Limit - Absolute" (0 to 255) and "Yaw Controller Minimal Grade - Relative" (0% to 100%).
  - 4. Steering:** Includes sliders for Roll (-20° to +20°) and Yaw (-180° to +180°), both set to 0. A Pitch slider (-20° to +20°) is also set to 0.

Auswahl des Lagereglers / Achse:

Roll oder Pitch oder Roll & Pitch

Saturierung begrenzt den I-Teil,  
Schwellwert einstellbar





# EMQPlay

## 2. Yaw Control Attitude deaktiv

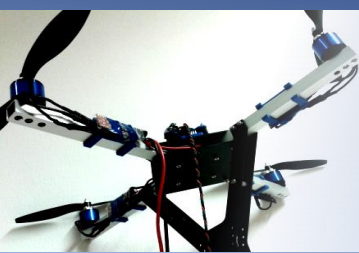
360° Yaw Limit:  
- Nach 180° kommt -180°  
- Beugt Instabilitäten  
und Überdrehungen an der  
Sprungstelle vor

The screenshot shows the EMQPlay software window with the following sections:

- Left Panel:** A dropdown menu set to "2. Yaw Control", buttons for "Apply Values" and "Reset Values", checkboxes for "Auto Apply" and "Full Stop", and a large "STOP" button.
- 1. Attitude Control Parameters:** Includes sliders and input fields for P [%], D [%], and I [%], all set to 0. A "Saturierung" checkbox is checked with a value of 1000. A "Roll" dropdown menu is also present.
- 2. Yaw Control Parameters:** Includes sliders and input fields for P [%], D [%], and I [%], all set to 0. A "360° Yaw Limit" checkbox is checked, and a "Saturierung" checkbox is checked with a value of 1000.
- 3. 2DOF Control Parameters:** Includes a "Yaw Controller Limit - Absolute:" slider set to 255, and a "Yaw Controller Minimal Grade - Relative:" slider set to 0%.
- 4. Steering:** Includes sliders and input fields for Roll (-20° to +20°) and Yaw (-180° to +180°), both set to 0. A "Pitch" slider is also visible, set to 0.

Saturierung begrenzt den I-Teil,  
Schwellwert einstellbar





# EMQPlay

## 3. 2DOF Control, d.h.

Attitude + Yaw sind aktiv, zur Superposition der Regler: Gleichzeitige Regelung von Attitude + Yaw

Auch als 3DOF nutzbar

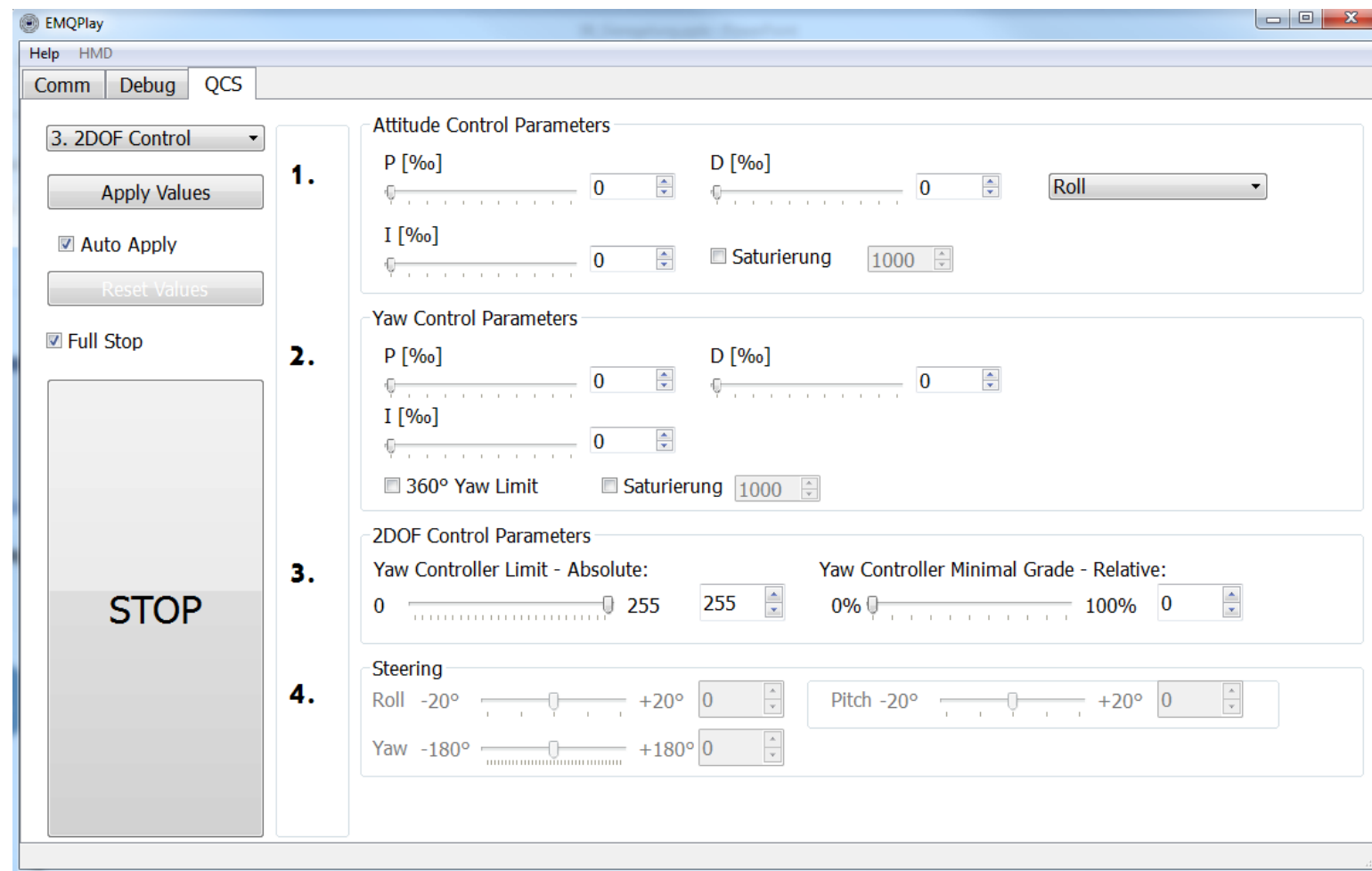
## Yaw Controller Limit – Absolute:

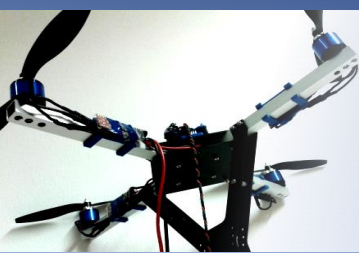
Yaw-Maßnahme 2 aus Folie 9: Das Output des Yaw-Regler wird auf einen Höchstwert beschränkt. Dies verlangsamt die Yaw-Bewegung.

## Yaw Controller Minimal Grade - Relative:

Yaw-Maßnahme 3 aus Folie 9: Das Output des Yaw-Regler wird dynamisch beschränkt und ein Mindestwertanteil steht dem Yaw zur Verfügung. Bei 0% ist diese Funktion deaktiv.

Dies verlangsamt die Yaw-Bewegung bedingt.





# EMQPlay

## 4. Steering, d.h.

Attitude + Yaw sind aktiv und können gesteuert werden, auch als 3DOF nutzbar

### Steering:

Die Sollwert (Wunschwerte) der Regler lassen sich hier einstellen und so der Qopter steuern.

The screenshot shows the EMQPlay software interface with the following sections:

- Left Panel:** A dropdown menu set to "4. Steering". Below it are buttons for "Apply Values", "Reset Values", and checkboxes for "Auto Apply" and "Full Stop". A large grey button labeled "STOP" is at the bottom.
- 1. Attitude Control Parameters:** Includes sliders and numeric inputs for P [%], D [%], and I [%] (all set to 0). A "Saturierung" checkbox is checked with a value of 1000. A dropdown menu is set to "Roll".
- 2. Yaw Control Parameters:** Includes sliders and numeric inputs for P [%] and I [%] (both set to 0). A "Saturierung" checkbox is checked with a value of 1000. A "360° Yaw Limit" checkbox is also present.
- 3. 2DOF Control Parameters:** Includes a "Yaw Controller Limit - Absolute:" slider (0 to 255) and a "Yaw Controller Minimal Grade - Relative:" slider (0% to 100%).
- 4. Steering:** Includes sliders and numeric inputs for Roll (-20° to +20°) and Yaw (-180° to +180°), both set to 0. A Pitch slider (-20° to +20°) is also present, set to 0.

# 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)!

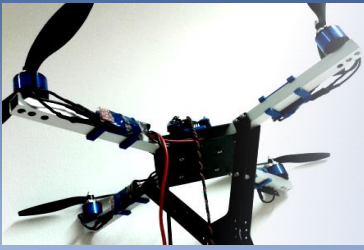


## Not-Aus:

- 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

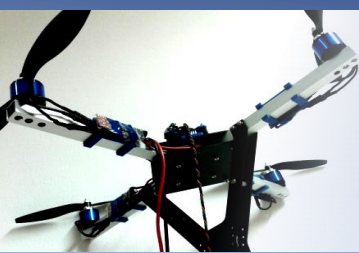
## Notwendige Hardware:

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

## Notwendige Software:

- Qt Steuerungssoftware EMQPlay
- EVK EMQP-Firmware: EMQP.elf

Die EVK EMQP-Firmwaredatei EMQP.elf ist vorab auf das EVK1100 zu flashen.



# Aufgaben

## **Aufgabe 1 / Schritt 1:**

Parametrisieren Sie den QCS im 1DOF Attitude Control Modus mit Hilfe der Qt Steuerungssoftware via serieller Schnittstelle, dass er die Lage stabil regelt. Vergleichen Sie dazu die Hinweise auf Folie 13.

## **Aufgabe 2 / Schritt 2:**

Stellen Sie den QCS nun auf 1DOF Yaw Control Modus (mechanisch) sowie in der Software EMQPlay um. Nun parametrisieren Sie die Yaw Regelung. Vergleichen Sie dazu die Hinweise auf Folie 14.

## **Aufgabe 3 / Schritt 3:**

Stellen Sie den QCS nun auf 2DOF Modus (mechanisch) sowie in der Software EMQPlay um. Nun parametrisieren Sie die überlagerte Regelung mit den Einstellungen aus Punkt 3. Die Einstellungen aus Schritt 1 und 2 sind eventuell zu optimieren. Vergleichen Sie dazu die Hinweise auf Folie 15.

**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 17 sind zu beachten.**



# Aufgaben

## Aufgabe 4 / Schritt 4:

Stellen Sie die Software EMQPlay auf Steering um und steuern den QCS. Die bisher getätigten Parameter sind eventuell zu optimieren.

## Aufgabe 5 / Schritt 5:

Stellen Sie den QCS nun mechanisch auf 3DOF Modus um und setzen Sie alle Parameter zurück: Dazu den „Reset Values“ Button drücken. Das 3DOF Axial-Gelenk ist ein anderes, regelungstechnisches System und benötigt andere Parameter. Nun sind die Schritte 1 bis 4 bei der Parametrisierung zu wiederholen.

**Hinweis: Das 3DOF-System benötigt schwächere Parameter. Daher sollte zunächst mit schwachen Parameter gestartet werden. Kräftige Oszillationen sind nach Möglichkeit zu vermeiden und belasten das Gelenk. Eine falsche Behandlung, Gewalteinwirkung, hohe Dauerbelastung und Materialermüden können zum Bruch des Gelenks führen. Bitte dazu unbedingt die Gebrauchsanleitung beachten, um Schäden, Reparaturen und Verletzungen vorzubeugen.**