



# **Simulation von Multikopter-Systemen für die effiziente Entwicklung neuer Regelungsalgorithmen**

Jan Vervoorst  
Intel Deutschland GmbH  
[jan.willem.vervoorst@intel.com](mailto:jan.willem.vervoorst@intel.com)

- Überblick Multikoptersysteme
- Modellierung der Systemdynamik
  - Geometrie/Aerodynamik/Diskrete Ereignisse
  - Komponenten der Systemdynamik-Simulation
- Modellierung von Guidance/Navigation/Control (GNC) Komponenten
  - Zustandsschätzung/Sensorik
  - Regelkreise
- Einbindung der Simulation in den Entwicklungsprozess
  - Initiale Tests und Auslegung von GNC-Algorithmen
- Zusammenfassung/Ausblick

# Übersicht Multikoptersysteme

- Intel® Falcon™ 8+ System



- Professionelle Flugdrohne zur industriellen Nutzung (Inspektion, Vermessung, ...)
- Dreifach redundantes Autopilotensystem basierend auf AscTec Trinity Technology
- Patentierte V-Form mit 8 Rotoren
- Max. Abfluggewicht 2,8kg
- Abmessungen ca. 770 x 820 x 160mm

# Übersicht Multikoptersysteme

- Intel® Shooting Star™ Drone



- Flugdrohne speziell für Lichtshows
- Farb-LED mit über 4 Mio. Farbkombinationen
- Symmetrische Quadrocopter-Struktur
- Gesamtgewicht ca. 300g

# Übersicht Multikoptersysteme

- Volocopter VC200



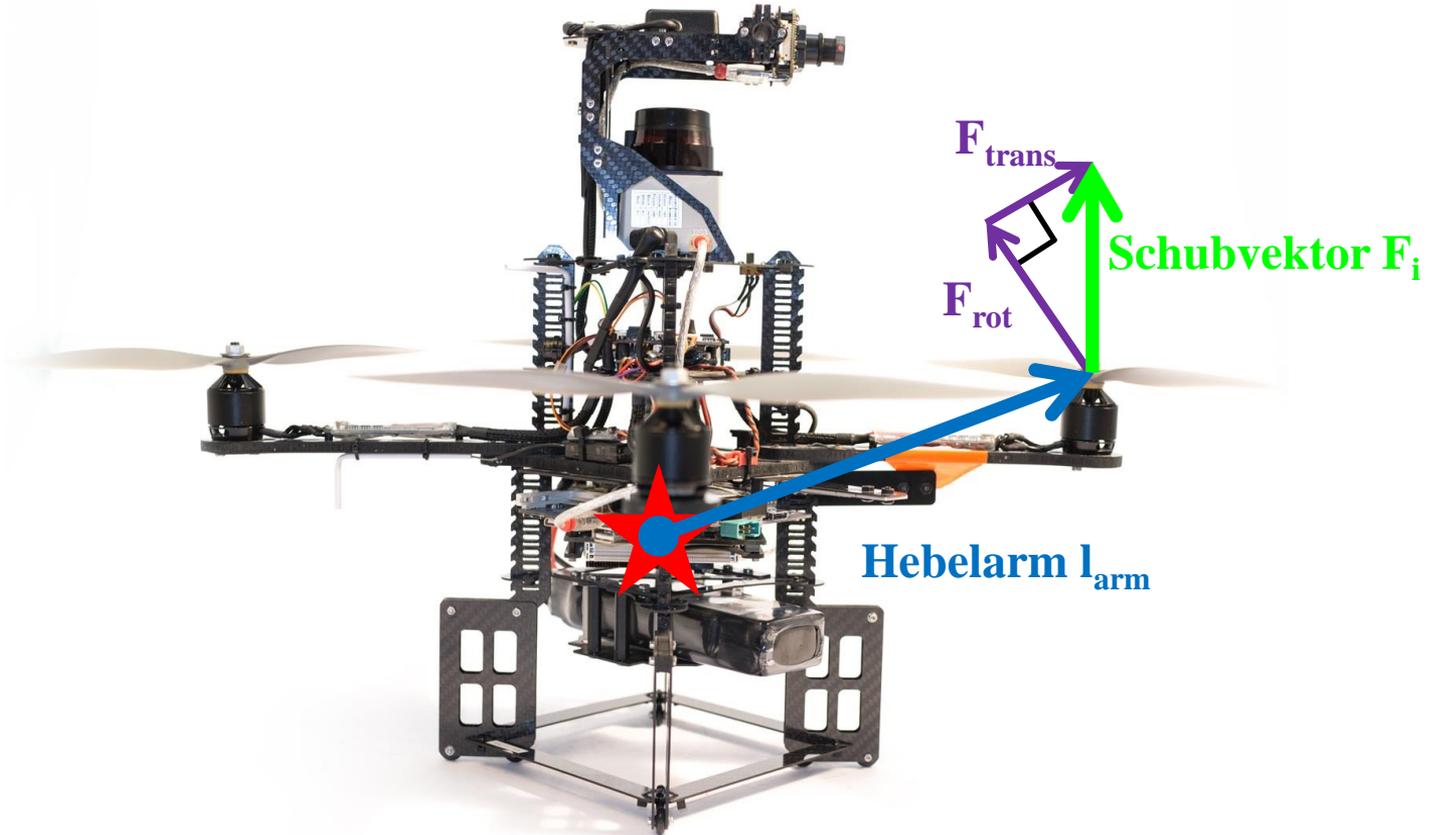
- Senkrechtstarter (VTOL) für 2 Personen
- Reiner Elektroantrieb
- Autopilotensystem basierend auf AscTec Trinity Technology
- Multikoptersystem mit 18 Rotoren
- Zulassung als Ultraleichtflugzeug mit maximalem Gesamtgewicht bis 450kg

# Modellierung der Systemdynamik

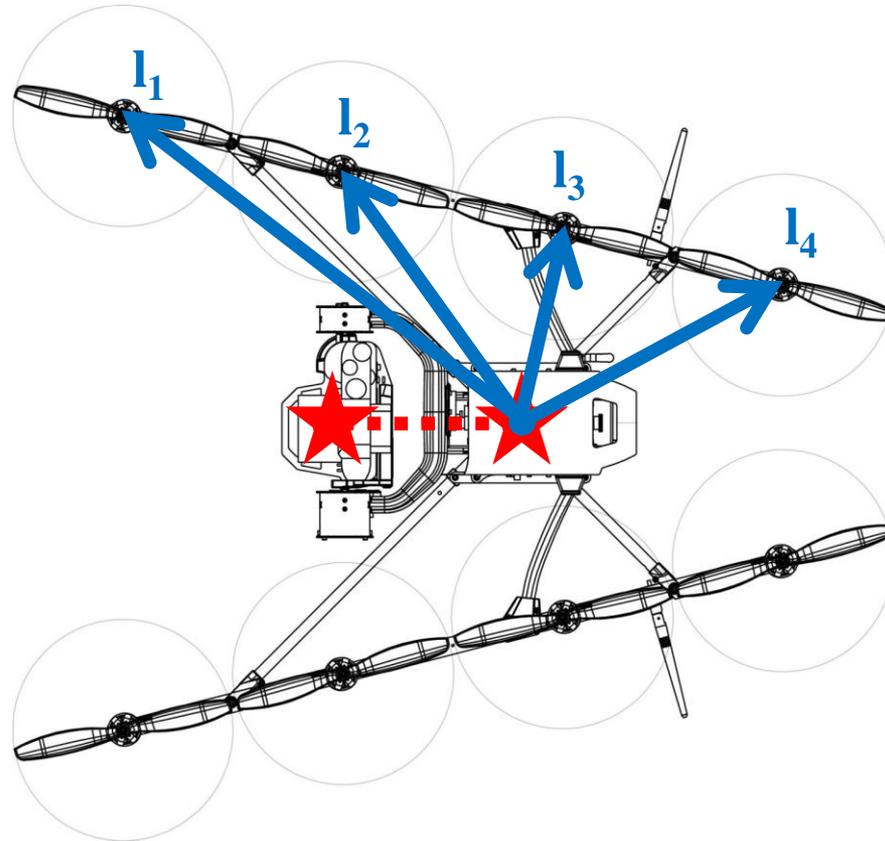
- Die Simulation sollte flexibel alle Multikopter-Strukturen abbilden können
  - Beliebige Anzahl Rotoren, Geometrie, Größe, Gewicht, ...
- Das reale Flugverhalten sollte von der Simulation bestmöglich reproduziert werden
  - Welche Kräfte wirken auf das Flugsystem während des Fluges?
- Vereinfachte Modelle reichen dafür nicht aus, daher müssen alle relevanten Wirkeffekte detailliert abgebildet werden
  - Geometrie
  - Aerodynamik
  - Diskrete Ereignisse
- Kompletter modularer Aufbau der Simulation erlaubt hohe Flexibilität
  - Alle Komplexitäten können vom Nutzer wahlweise aus-/zugeschaltet werden
  - Systemdynamik als Teil einer Simulation des Gesamtsystems

# Geometrie

- Hebelarm zum echten Schwerpunkt



- Nichtsymmetrische Geometrie

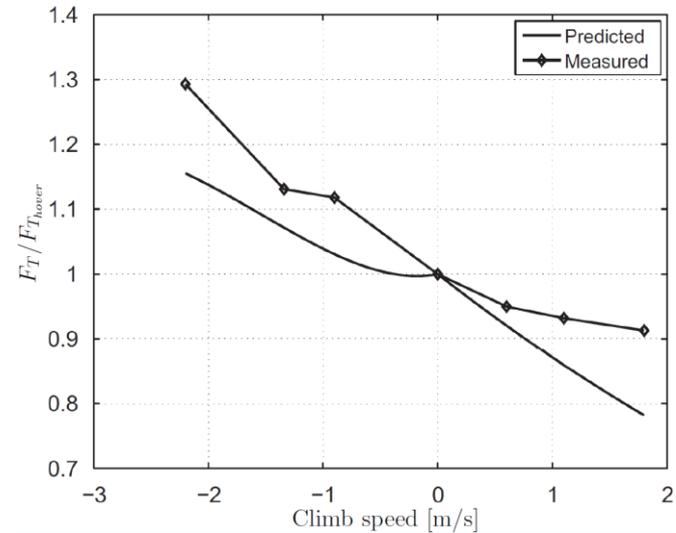
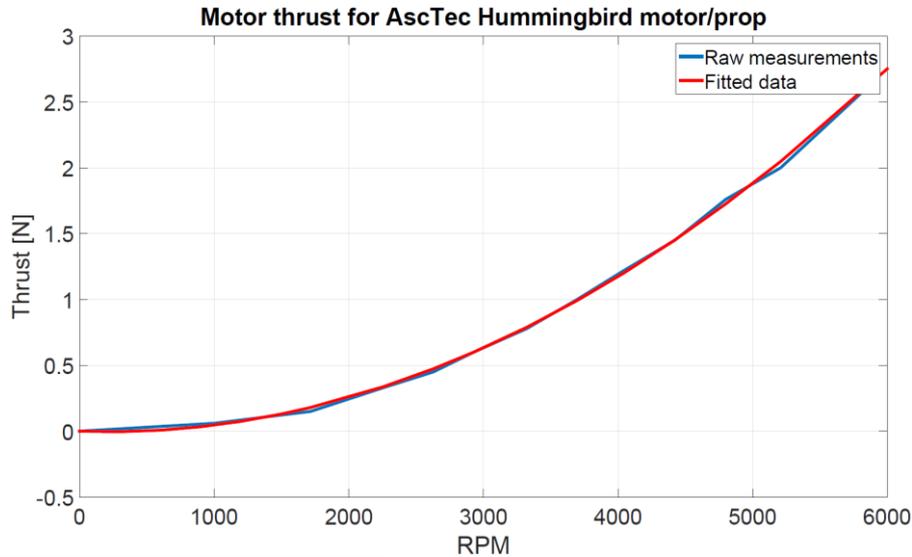


- Außermittige Kräfte und Aufnahme/Abwurf von Lasten
  - Außermittige Kräfte machen den Trägheitstensor nichtdiagonal und nichtsymmetrisch
  - Masse und Trägheitsmoment ändern sich, wenn Lasten aufgenommen/abgeworfen werden
- Alle Systemparameter müssen dynamisch konfigurierbar sein

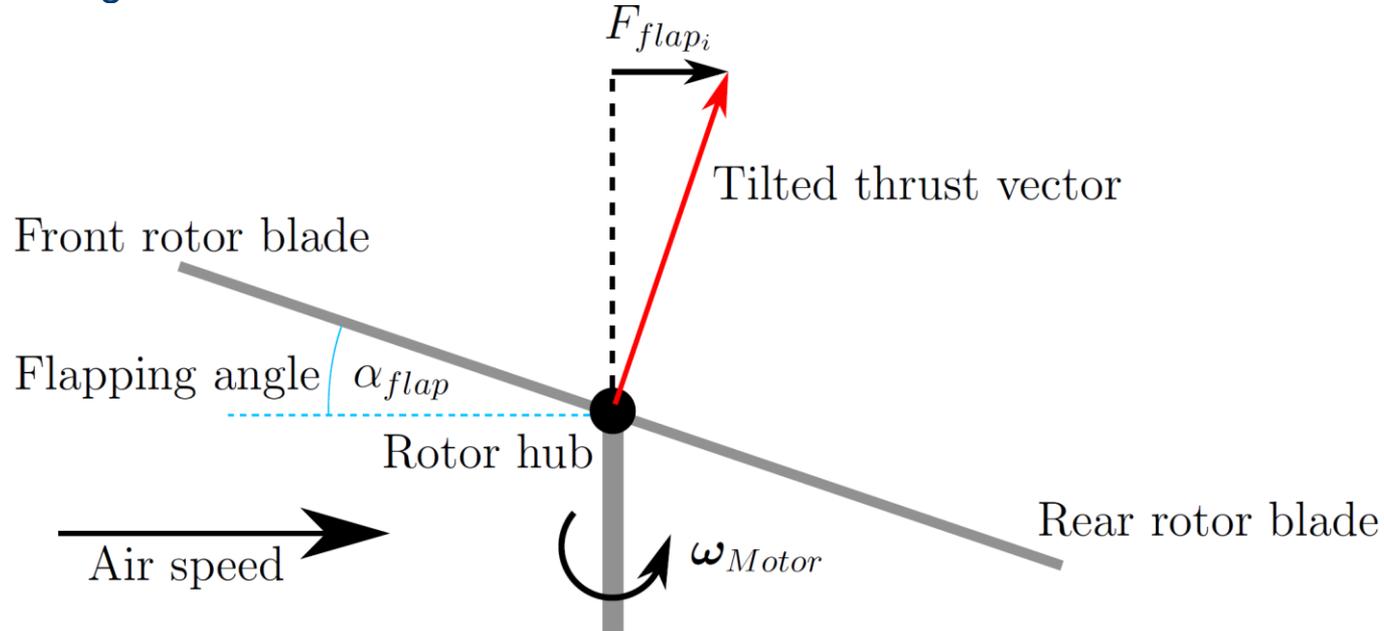


# Aerodynamik

- **Aerodynamischer Widerstand**
  - Die Struktur des Fluggeräts hat einen aerodynamischen Querschnitt und erzeugt Widerstand
  - Dieser Widerstand wirkt in der Translation als Dämpfungskraft
- **Dynamischer Schub**
  - Propeller-Kennwerte gibt es meist nur für statischen Schub
  - Maximale Fluggeschwindigkeit von ca. 15m/s hat signifikanten Einfluss auf wirkenden Schub



- Propeller-Effekte
  - Seitliche Anströmung eines Propellers führt zu einer dämpfenden Rückstellkraft
  - Unterschiedliche Anströmung des vorwärts und rückwärts drehenden Propellerblatts führt zu einer Verbiegung und Verkippung der Propellerebene nach hinten → Blade Flapping
    - Die Richtung des Schubvektors verändert sich



# Diskrete Ereignisse

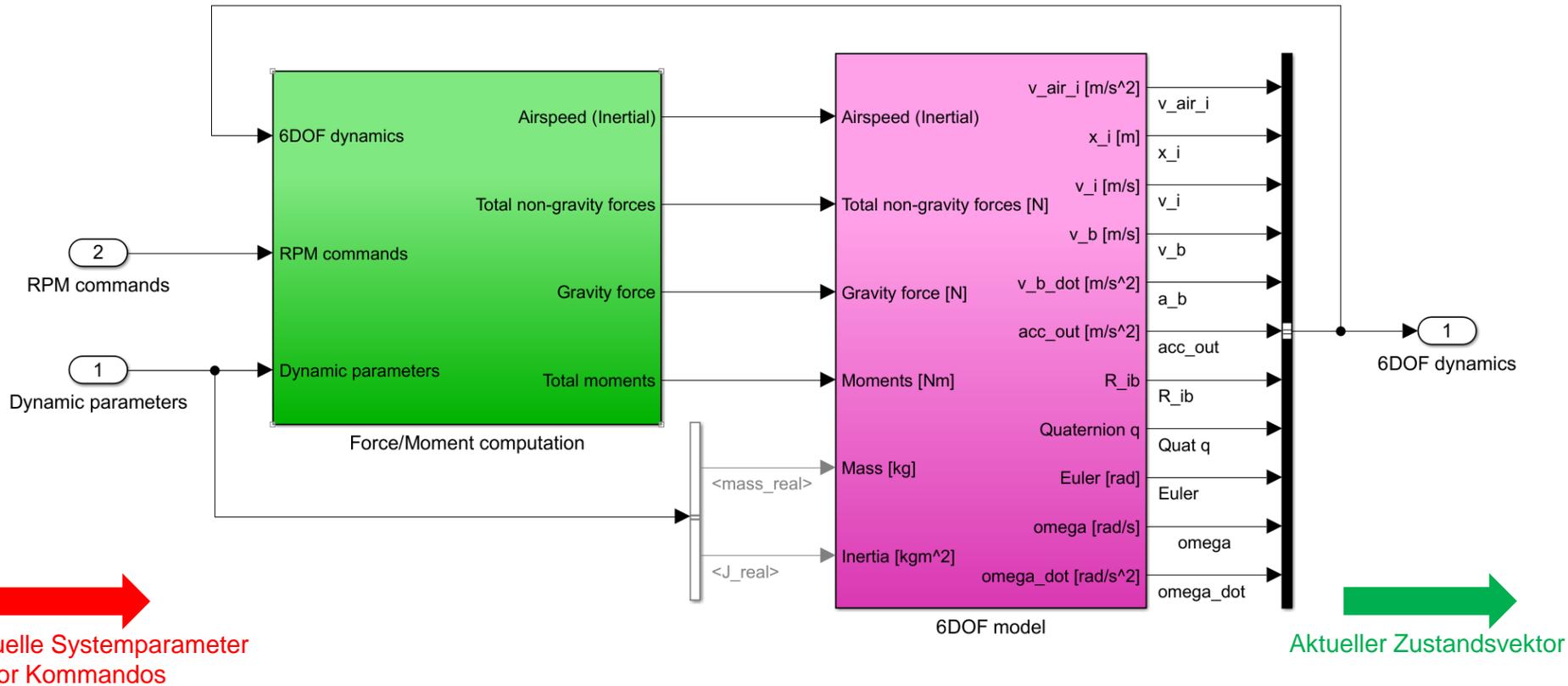
- Diskrete Ereignisse sind eine Reihe von mechanischen/elektrischen/elektronischen Veränderungen, die während des Betriebs auftreten können:
  - Aktuatorfehler:
    - Motorschaden
    - Verlust eines Propellers (komplett oder teilweise)
    - Veränderung der Aktuatordynamik (z. B. schwergängiger Lauf aufgrund von Beschädigung)
  - Aufnahme/Absetzen von Zuladung
    - Änderungen an Masse, Massenschwerpunkt, Trägheitsmomenten
  - Strukturschäden
    - Beschädigung/Verlust von Teilen
    - Verformung der Struktur → veränderte Schubverhältnisse
  - Sensorfehler
    - Fehler/Ausfall von Onboard-Sensoren → Wie verhält sich die Zustandsschätzung?

# Systemdynamik-Simulation

- Systemparameter werden von einem Initialisierungsskript in den Workspace geladen
  - Masse, Geometrie, Trägheitsmomente, Übertragungsfunktionen, ...
- Dimension bestimmter Parameter definiert dynamisch Systemgrößen der Simulation
  - Anzahl der Zeilen in der Aktuatormatrix = Anzahl von Rotoren des Flugsystems
- Verschiedene Simulationsmodi können gewählt werden:
  - Rauschen an/aus
  - Auswahl verschiedener Reglertypen

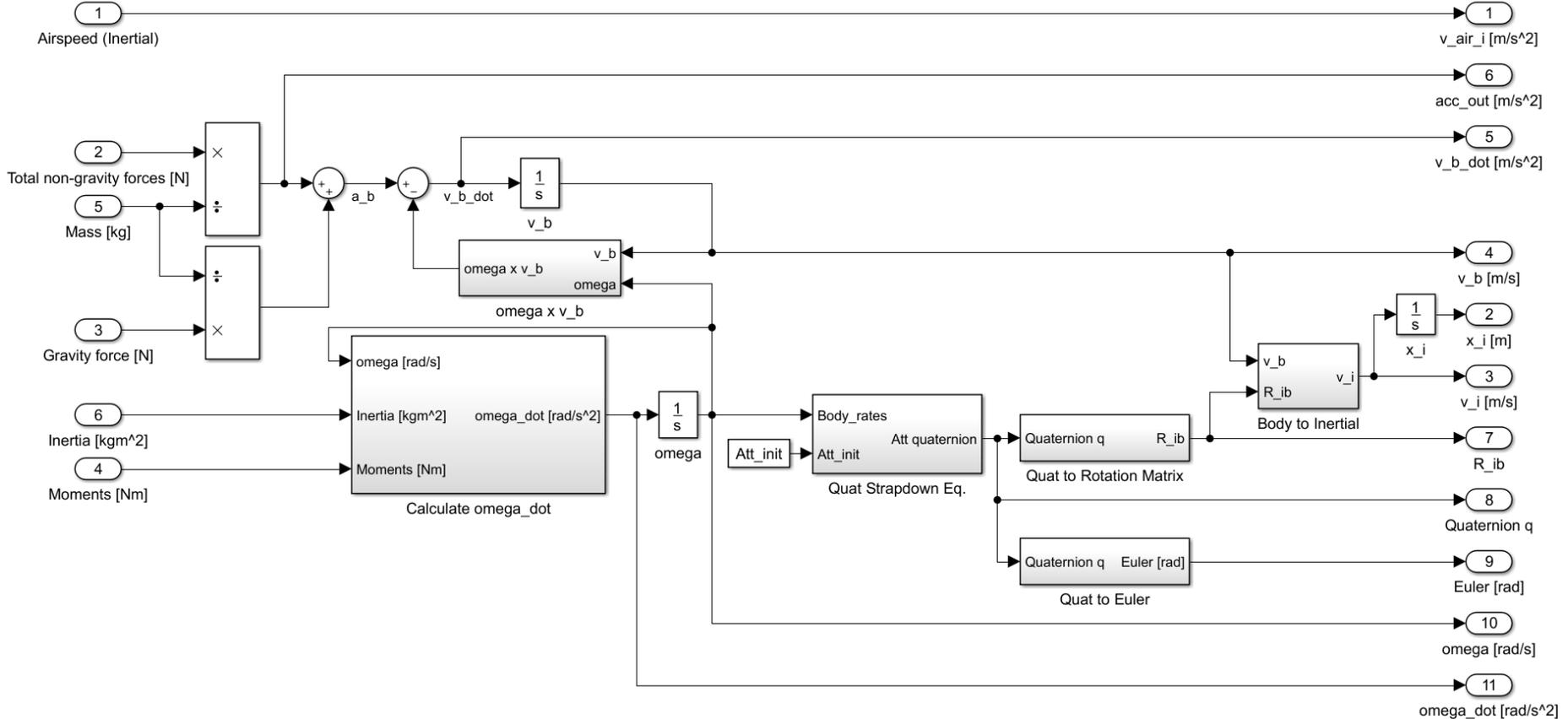
```
*****
% MotorMatrix_real holds all the information about the actual performance
% of each actuator. The data is arranged as one row per motor/prop combo:
% 1      : Motor arm angle measured clockwise (looking from above) from the positive X axis (forward direction) [deg]
% 2      : Distance of prop/motor in X/Y plane from the geometric center of the airframe [m]
% 3      : Distance of prop/motor in Z direction from the geometric center of the airframe [m]
% 4      : Direction of prop rotation: +1 for CW, -1 for CCW [unitless]
% 5      : Control effectiveness of the actuator (nominally 1.0)
% 6      : First-order motor transfer function time constant [sec]
% 7..8   : Two coefficients that describe the RPM to thrust [N] transfer function for static conditions [a1 a2]
% Thrust = a1 * RPM + a2 * RPM^2
% 9..10  : Two coefficients that describe the RPM to torque [Nm] transfer function for static conditions [b1 b2]
% Torque = b1 * RPM + b2 * RPM^2
% 11     : Minimum RPM value of the actuator
% 12     : Maximum RPM value of the actuator
% 13..15 : Rotations of thrust vector around Body-fixed axes away from nominal direction [deg]
% Nominal direction of thrust vector is [0;0;-1]
% Rotation order from body to motor axes is Yaw/Pitch/Roll (Euler angle sequence (1,2,3))
% 16     : Propeller diameter [m]
% 17     : Propeller mass [kg]
MotorMatrix_real = [045 , 0.170 , -0.028 , +1 , 1.0 , 0.010 , [9.6820 , 0.010872]*1e-5 , [1.4504 , 0.0016312]*1e-6 , 0000 , 6000 , [0.0 , 0.0 , 0.0] , 8*2.54/100 , 11/1000; ...
                  135 , 0.170 , -0.028 , -1 , 1.0 , 0.010 , [9.6820 , 0.010872]*1e-5 , [1.4504 , 0.0016312]*1e-6 , 0000 , 6000 , [0.0 , 0.0 , 0.0] , 8*2.54/100 , 11/1000; ...
                  225 , 0.170 , -0.028 , +1 , 1.0 , 0.010 , [9.6820 , 0.010872]*1e-5 , [1.4504 , 0.0016312]*1e-6 , 0000 , 6000 , [0.0 , 0.0 , 0.0] , 8*2.54/100 , 11/1000; ...
                  315 , 0.170 , -0.028 , -1 , 1.0 , 0.010 , [9.6820 , 0.010872]*1e-5 , [1.4504 , 0.0016312]*1e-6 , 0000 , 6000 , [0.0 , 0.0 , 0.0] , 8*2.54/100 , 11/1000];
```

# Systemdynamik-Simulation



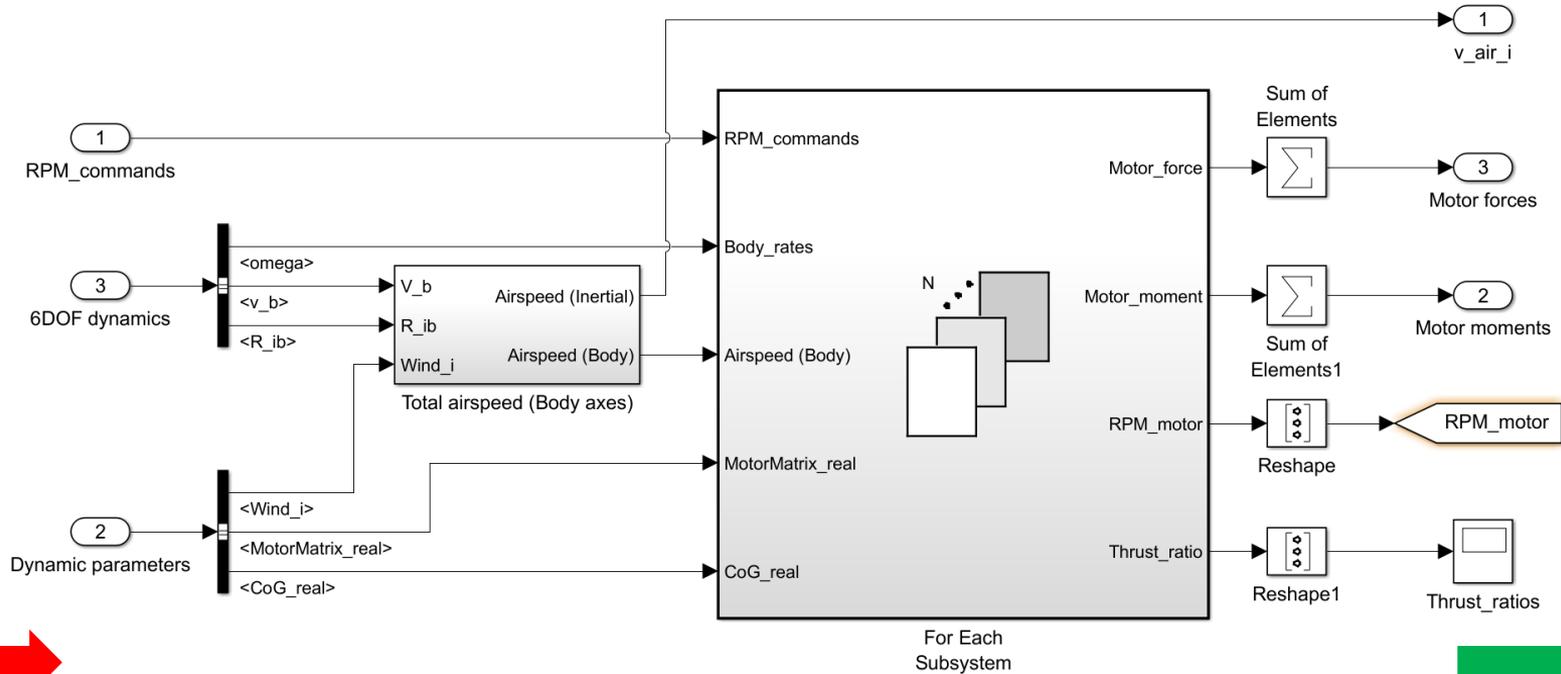
# Systemdynamik-Simulation

## Implementation of the standard 6DOF equations of motion



# Systemdynamik-Simulation

Computation of forces and moments for each actuator specified in the initialization routine



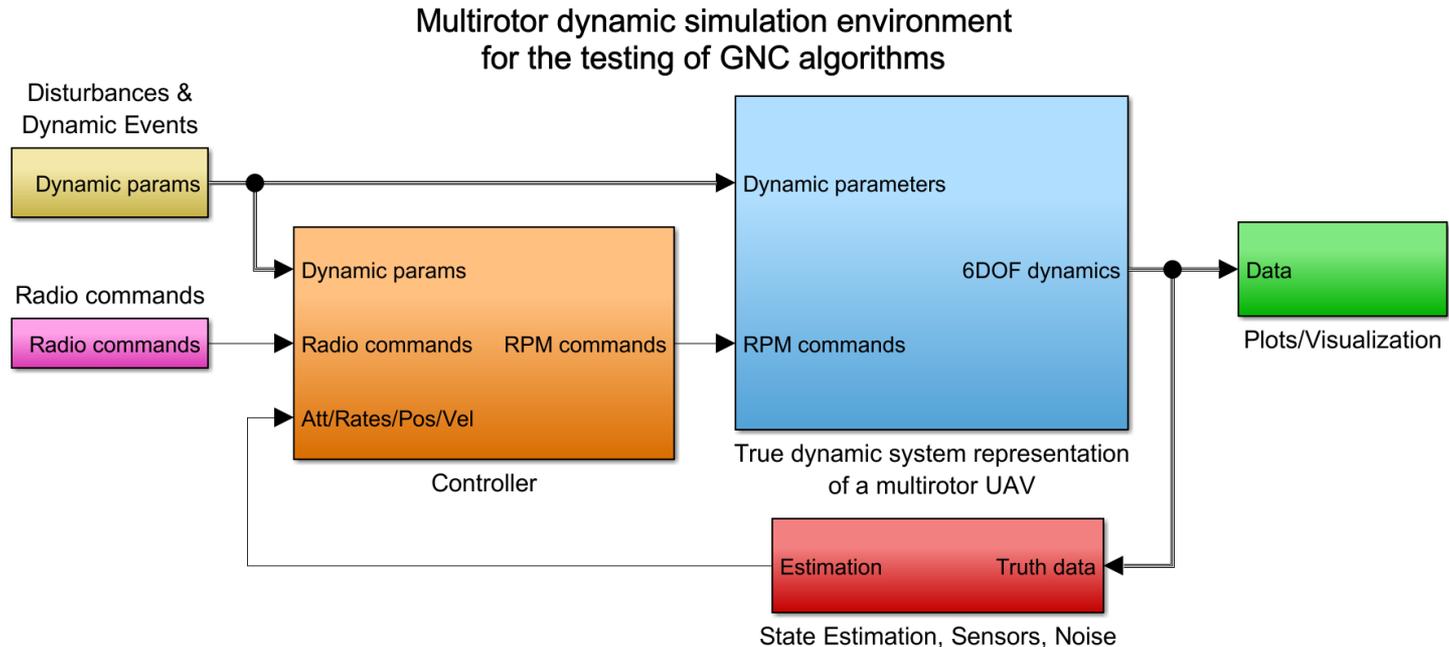
Motor Kommandos  
Zustandsvektor  
Systemparameter



Motorkräfte  
Motormomente  
Fluggeschwindigkeit

# Guidance/Navigation/Control

- Neben Systemdynamik sollte das „Gesamtsystem UAV“ simuliert werden können:
  - Guidance: Flugführungsalgorithmen zur Generierung fliegbarer Trajektorien
  - Navigation: Zustandsschätzung der aktuellen Lage/Position/Geschwindigkeit
  - Control: Regelungsalgorithmen auf Drehraten/Lage/Position/Geschwindigkeit

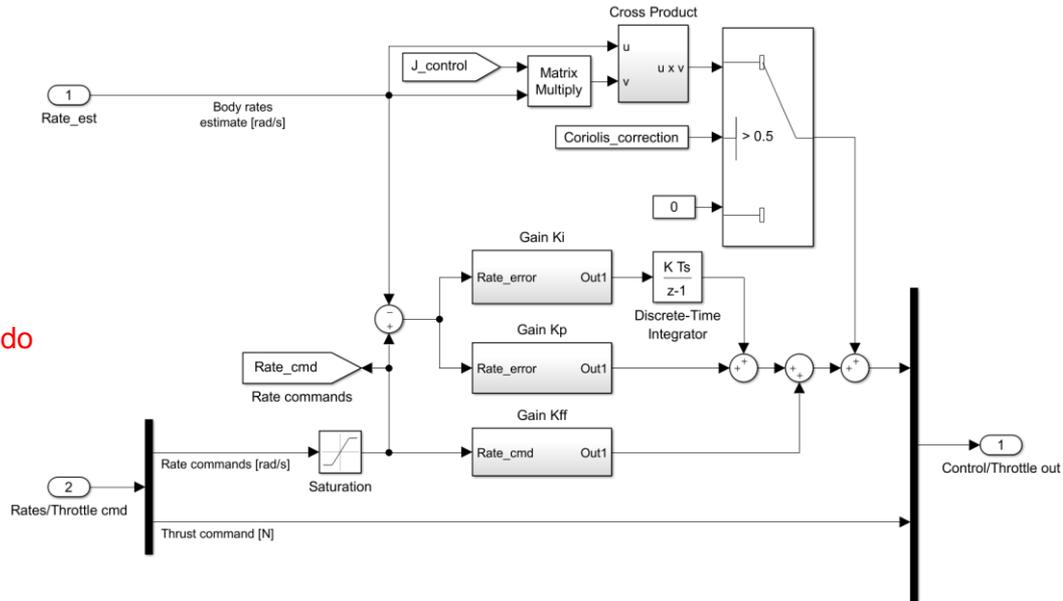


# Zustandsschätzung/Sensorik

- Das Flugsystem hat verschiedene Sensoren an Bord:
  - Drehraten, Beschleunigung, GPS, Kompass, Luftdruck
- Das Verhalten der Sensoren wird simuliert, in dem man folgende Effekte auf den (idealen) Zustandsvektor wirken lässt:
  - Sensordynamik, Rauschen, Mittelwert, Skalierung, Verkopplung
- Parameter für möglichst realistisches Sensorverhalten auswählen:
  - Analyse von Messdaten echter Sensoren
- So wird aus dem echten Systemzustand (nicht messbar) ein (verfälschter) Messwert
- Diese realistischen Messwerte werden in einem Zustandsschätzer (Kalman-Filter) kombiniert und ergeben den geschätzten Systemzustand:
  - Lage/Position/Geschwindigkeit
  - Mitschätzen von Sensor Biases

# Regelkreise

- Je nach Flugmodus wirken unterschiedliche Regelkreise
  - Lage/Höhe/Position/Geschwindigkeit/Trajektorienfolge
- Ziel der Simulation:
  - Test/Auslegung bestehender Algorithmen
  - Schnelle Entwicklung neuer Reglerstrukturen



Drehraten Messung  
Drehraten Kommando  
Schub Kommando



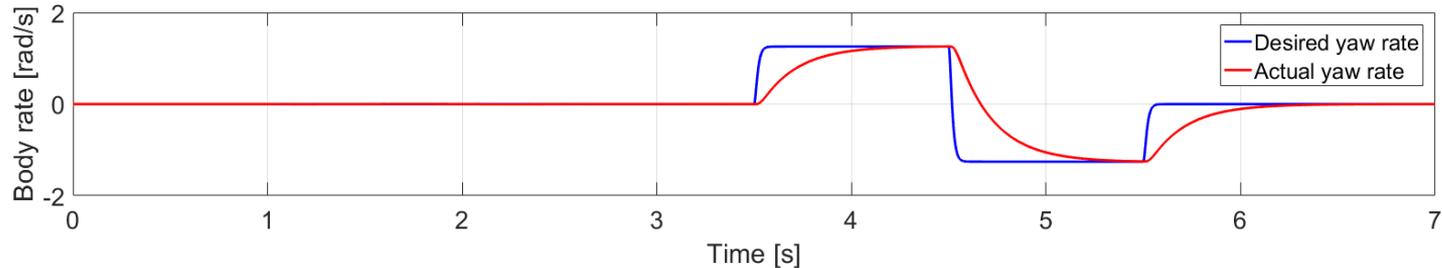
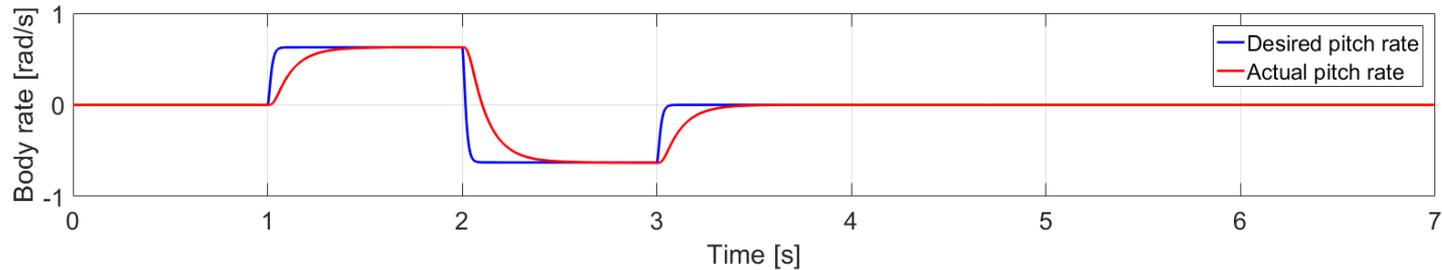
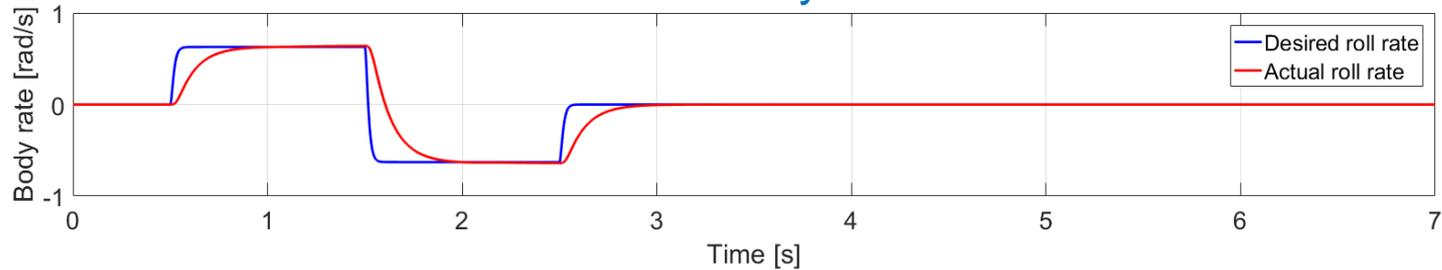
Drehmomente Kommando  
Schub Kommando

# Entwicklungsprozess

- Im Reglerentwurf sollte schon vor dem Testflug ein gutes Ergebnis vorliegen
  - Regler getunt auf die Parameter des spezifischen Flugmodells  
→ Flugsystem verhält sich stabil und vorhersehbar
  - Wie verhält sich der Regler im Bezug auf Umwelteinflüsse?
  - Ist der Regler robust gegenüber Parameteränderungen und dynamischen Events?
  - Wie wirkt sich Messrauschen aus?
  - Sind alle internen Zustände stabil?
  - Testen von Randbedingungen
- Alle diese Antworten müssten ohne modellbasierten Entwurf „erflogen“ werden
- Im Entwurf von Zustandsschätzern können im Testflug aufgezeichnete Messdaten „offline“ durch die Simulation gespielt und verglichen werden.
- Beispiel 1: Drehratenregler mit vereinfachtem/detailliertem Systemmodell
- Beispiel 2: Vollständige Simulation eines Trajektorienregelkreises

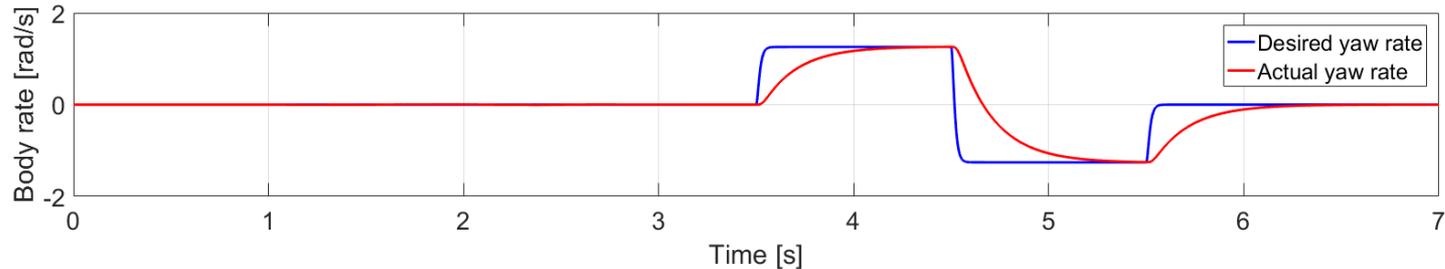
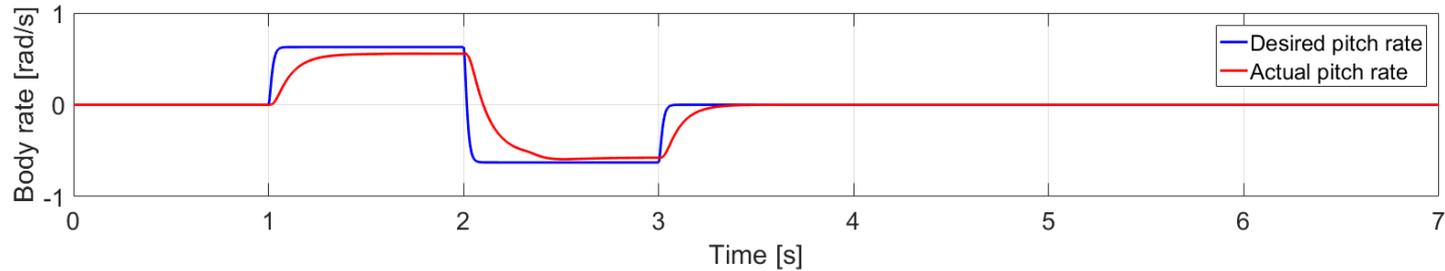
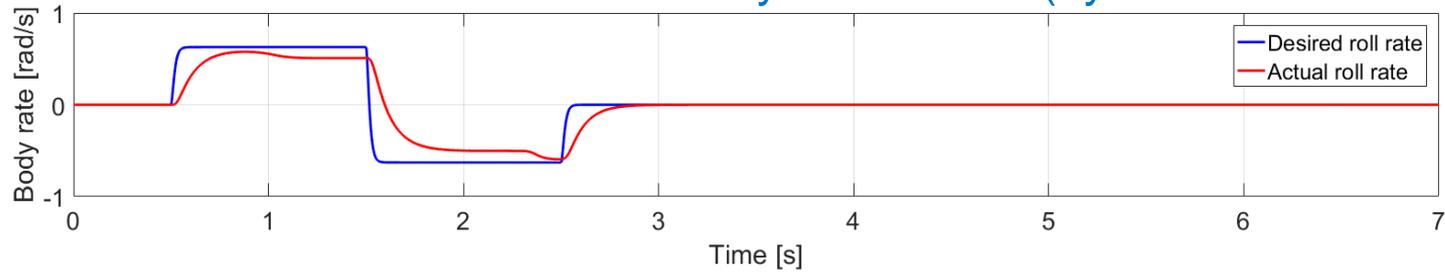
# Beispiel 1: Drehratenregler

- Beispiel 1: Simulation mit vereinfachtem Systemmodell



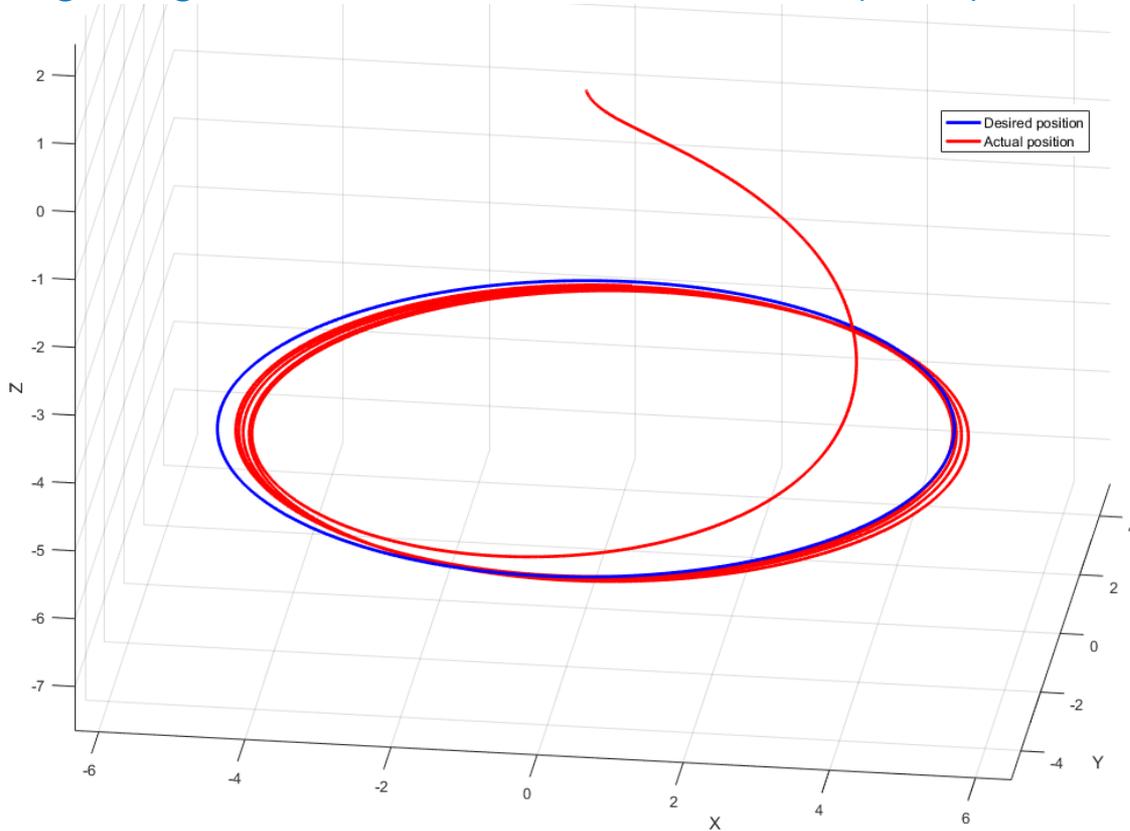
# Beispiel 1: Drehratenregler

- Beispiel 1: Simulation mit detailliertem Systemmodell (dynamischer Schub)



# Beispiel 2: Trajektorienregler

- Trajektorienregelung auf Kreisbahn mit Seitenwind (5m/s)



# Zusammenfassung/Ausblick

- Eine detaillierte Simulationsumgebung mit realistischem Systemverhalten und Umwelteinflüssen steht für schnellen und sicheren Reglerentwurf zur Verfügung
- Die Simulation erlaubt das Tuning und vorläufige Testen neuer Reglerstrukturen
- Weitere Verbesserung der Simulationsmodelle durch Zuhilfenahme von „Ground Truth“-Messungen
- Noch stärkere Einbindung der Simulation in den Entwicklungsprozess:
  - Auto Code Generation: sofortige Generierung operationellen Codes
  - „Hardware/Software in the Loop“ Testing
  - Verringerung des Testaufwandes bei gleichzeitiger Erhöhung der Testtiefe
  - Verkürzung von Entwicklungszyklen

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

