

Antriebsdynamik von Multirotor- VTOL's

Die Antriebe von Multirotor- VTOL's (Vertical Take Off and Landings) bestehen heute aus mehreren Propellern mit Brushless- Motoren. Die Propeller sind dabei in fast allen Fällen starr mit den Motorachsen gekoppelt. Um die Systeme in der Luft zu navigieren und zu stabilisieren, ist es nötig, die Drehzahlen dynamisch zu verändern. Die Dynamik der ganzen Systeme ist dabei wesentlich von der Dynamik der Antriebe abhängig. Dieser Fachbeitrag beschäftigt sich mit der Simulation der Motor-/Propellerkombination und zeigt auch auf, worauf speziell geachtet werden muss, damit diese eine hohe Dynamik erreicht.

Multirotor- VTOL's werden heute sehr häufig eingesetzt, wenn es darum geht, Sensoren oder andere technische Systeme frei schwebend in der Luft zu halten. Oft sind das beispielsweise Kameras, welche Fotos aus einer frei wählbaren Perspektive machen können oder auch andere Anwendungen. ‚Multirotor‘ steht dabei in vielen Fällen für Quadro- oder Oktokopter. Bei ersterem sorgen vier übers Kreuz angeordnete Motoren und Propeller für den Auftrieb, bei letzterem sind es deren acht. Allen Systemen ist es jedoch gemeinsam, dass die Propeller starr mit der Achse des Motors gekoppelt sind. So wird der Schub durch die Motordrehzahl verändert. Das führt auf eine sehr einfache Mechanik. Sie ist viel einfacher aufgebaut als bei den Hubschraubern mit einer Taumelscheibe. Dort wird die Steigung der Rotorblätter über eine Umdrehung ständig verändert. Die einfache Mechanik ist auch der Hauptgrund, weshalb sich diese Systeme in der Technik und im Modellbau so schnell und in so grosser Zahl verbreiten konnten.

Ein Modell einer Achse

Um die Dynamik von solchen Systemen untersuchen zu können, wird nur eine Achse bestehend aus zwei Motor-/Propellerkombinationen angeschaut. Um hier das Kleinsignalverhalten vom Arbeitspunkt unterscheiden zu können, wird eine Überlegung mit Abbildung 1 gemacht. Dort wird der allgemeine Fall mit zwei unterschiedlichen Schubkräften F_1 und F_2 behandelt. Diese können in zwei Kräfte F und F_R zerlegt werden, wie es Abbildung 2 zeigt. Die beiden gleichen Kräfte F sind dann für den Arbeitspunkt zuständig. Als dieser wird hier bei angestelltem Winkel φ eine Driftbewegung in eine Richtung angesehen, ausserdem auch ein Steig- oder Sinkflug. Die Kräfte F_R wirken je in die entgegengesetzte Richtung und erlauben so eine Drehung des Systems. Das wird hier als Kleinsignalverhalten definiert.

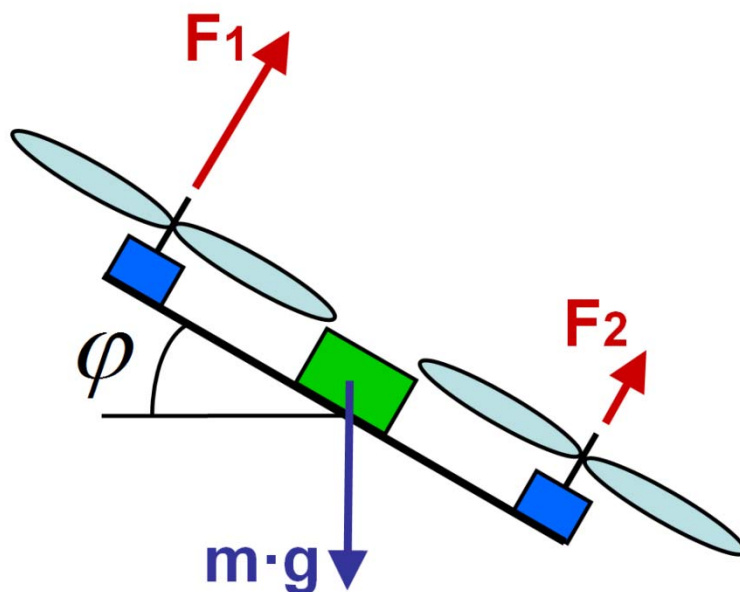


Abbildung 1: Allgemeiner Fall mit Schubkräften F_1 und F_2

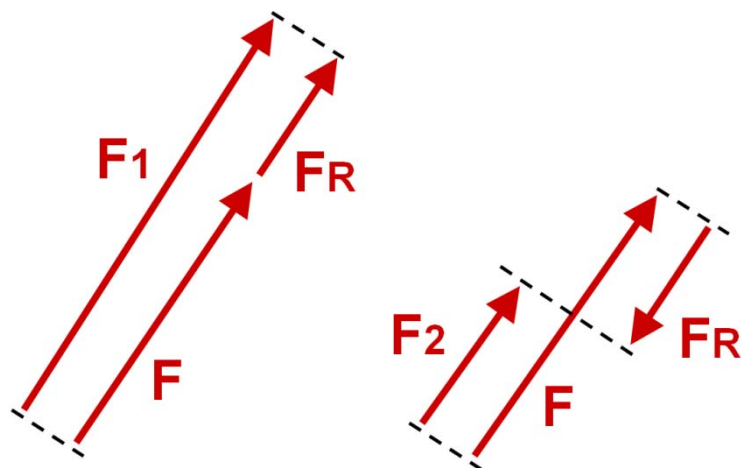


Abbildung 2: Aufteilung der Kräfte

Mit wenigen physikalischen Überlegungen findet man, dass zwischen der Kraft F_R als Eingang und dem Winkel φ im Blockschaltbild zwei Integratoren zu setzen sind. Als Sensoren werden bei den heutigen Quadroptern sogenannte Inertial Measurement Units (IMU) eingesetzt. Sie stellen die Lagewinkel und die Winkelgeschwindigkeiten in allen Raumachsen zur Verfügung. Diese werden mit einer Datenfusion von Gyro- und Beschleunigungssensoren ermittelt. Da doppelt integrierende Strecken mit PD- Reglern stabilisiert werden können, führt das auf das Blockschaltbild in Abbildung 3.

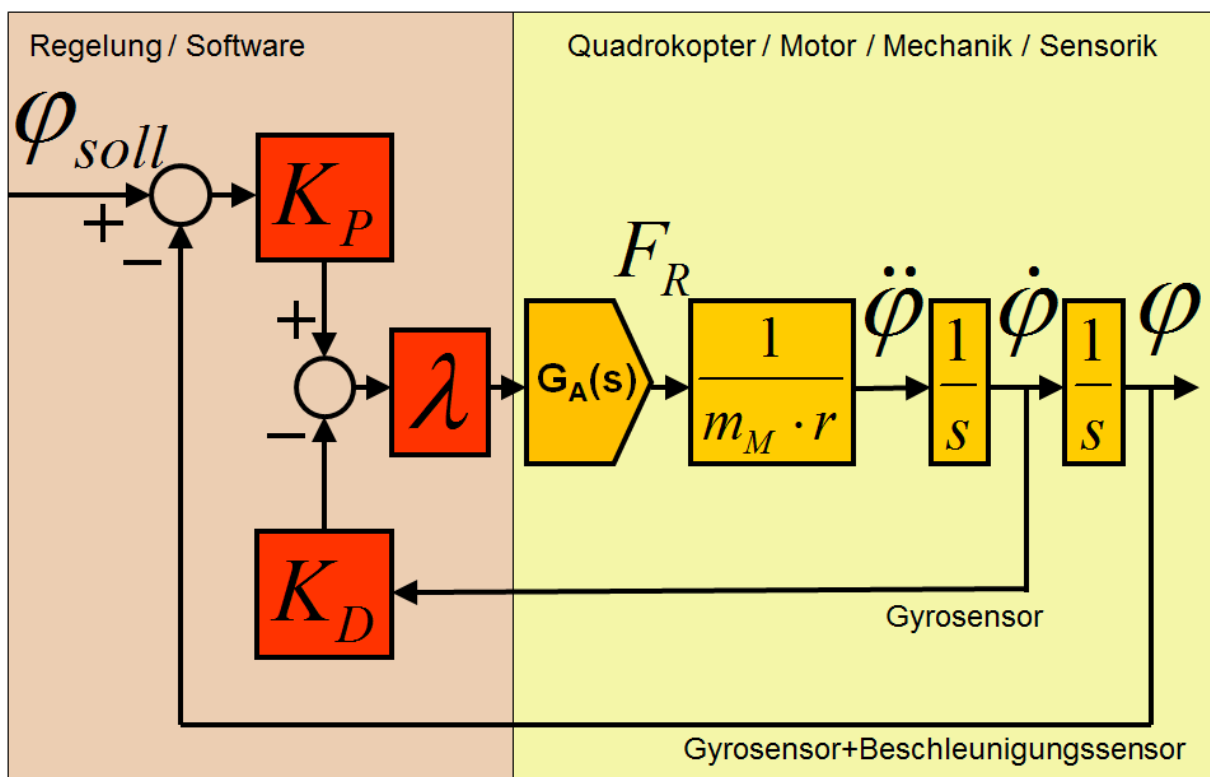


Abbildung 3: Blockschaltbild von Regler und Strecke

Dynamik des Antriebs

Der Ausgang des Reglers führt aber nicht direkt auf die Kraft F_R , sondern zuerst einmal auf einen Brushless- Regler und einen Brushless- Motor mit Propeller. Dieser nichtlineare Block wird im Blockschaltbild mit $G_A(s)$ bezeichnet. Wie dort ersichtlich ist, steht er direkt im Zentrum und ist auch massgebend für die Dynamik des ganzen Systems verantwortlich.

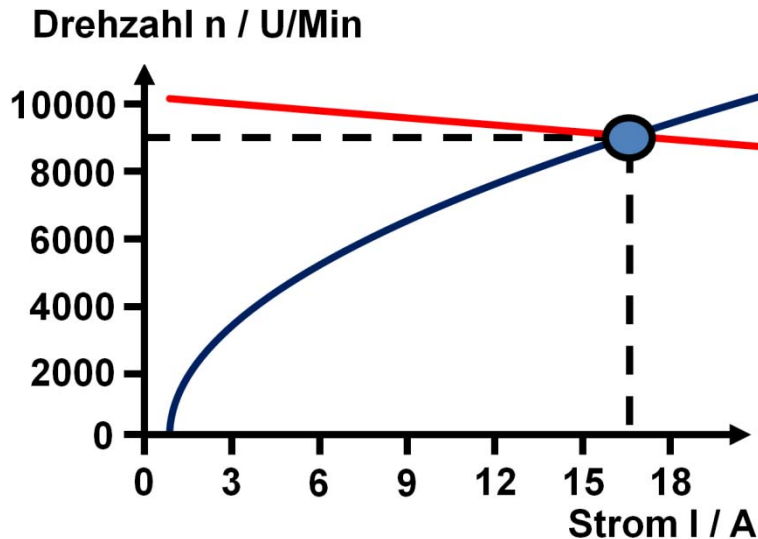


Abbildung 4: Betriebspunkt eines Brushless-Motors mit Propeller

Die Motorkennlinie eines Brushless- Motors mit Regler ist dieselbe wie diejenige eines permanentmagneterregten Gleichstrommotors. Die Technologie ist ebenfalls dieselbe, sie basiert auf der Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetischen Feld. Im Unterschied zum Gleichstrommotor befindet sich hier einfach der Permanentmagnet auf dem Rotor (anstatt auf dem Stator), während die Wicklungen auf dem Stator (anstatt auf dem Rotor) angebracht sind. Die beim Gleichstrommotor mechanisch und mit Bürsten realisierte Kommutierung wird beim Brushless- Motor mit dem Regler gelöst. Bei der häufig eingesetzten sensorlosen Variante werden zwei Phasen bestromt, während bei der dritten der Phasennulldurchgang der induzierten Spannung gemessen wird. So wird elektronisch auf die Bestromung der nächsten Phasen umgeschaltet. Die Motorkennlinie verläuft indes umso näher an einer horizontalen Linie, je kleiner der Wicklungswiderstand ist. Die Eingangsspannung wird im Modellbau üblicherweise mit einem PWM- Signal vorgegeben. Ein Standard ist ein sich alle 20 ms wiederholender Puls, welcher je nach gewünschter Spannung zwischen 1 ms und 2 ms lang ist. Bei grösseren Quadrocoptern genügt diese Wiederholrate, bei kleineren und agileren Systemen wird manchmal auch eine höhere Wiederholrate angewendet, welche beispielsweise auf PWM oder einem I2C-Busprotokoll basiert. Dadurch wird erreicht, dass sich die Motorkennlinie analog zum Verhalten des Gleichstrommotors auf parallelen Linien zur in Abbildung 4 dargestellten bewegt. Somit ändern sich dann auch die Betriebspunkte. Das ergibt dann auch eine veränderte Stromaufnahme und damit einhergehend einen veränderten Schub.

Die Propellerkennlinie ist nichtlinear. Der Strom und das Drehmoment verlaufen quadratisch zur Drehzahl. Die Parameter, welche auf diese Kennlinie führen, werden weiter unten noch etwas eingehender zusammen mit einer Literaturangabe behandelt.

Eine physikalische Modellierung des gesamten Antriebs führt auf die Abbildung 5. Dieses Simulink- Modell hat als Eingang die Motorspannung und liefert als Ausgang den Schub zurück. Im Closed Loop nach Abbildung 3 werden die beiden weiteren Ausgänge ‚Umdrehungen pro Minute (rpm)‘ und ‚Leistung (Power)‘ nicht benötigt. Sie können aber mit den Zusammenhängen der Propellerberechnung einfach zur Verfügung gestellt werden.

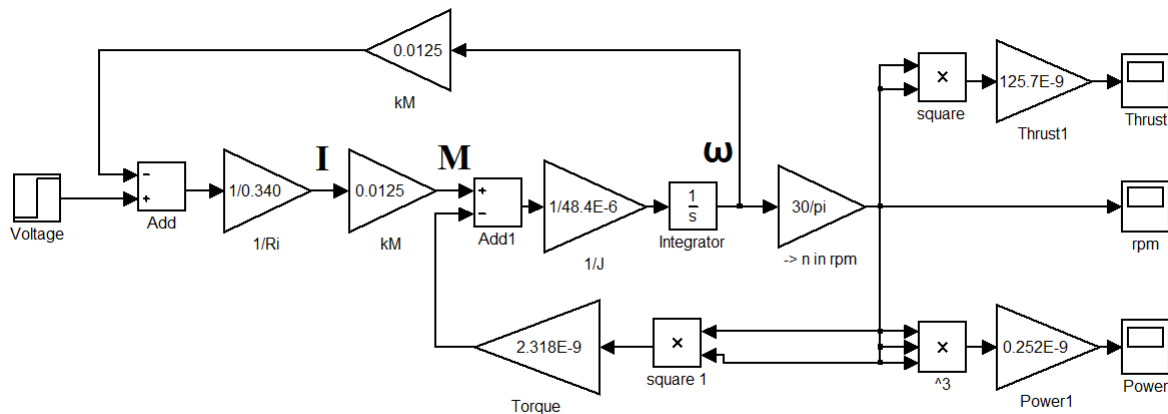


Abbildung 5: Simulink- Modell des Antrieb, $G_A(s)$

Von der Eingangsspannung wird zuerst die induzierte Gegenspannung abgezogen, welche sich aus der Kreisfrequenz ω multipliziert mit der Motorkonstante k_M ergibt. Die resultierende Spannung wird durch den Wicklungswiderstand R_i dividiert, woraus sich der Motorstrom ergibt. Die Motorinduktivität wird hier vernachlässigt. Das ist zulässig, da die Mechanik inklusive Propeller viel langsamer ist als der Aufbau des Motorstroms. Dieser wird wieder mit der Motorkonstante k_M multipliziert und daraus ergibt sich wiederum das Drehmoment. Das aus den Propellergleichungen berechnete Lastmoment des Propellers wird davon abgezogen und daraus ergibt sich dann dasjenige Drehmoment, welches für die Beschleunigung oder Verzögerung des Propellers zur Verfügung steht. Eine Division durch das Massenträgheitsmoment J des Rotors und ein nachgeschalteter Integrator führen schliesslich wieder auf die Kreisfrequenz ω .

Worauf speziell geachtet werden muss, um eine hohe Dynamik des Antriebs zu erzielen

Es wurden in der Folge je zwei häufig eingesetzte Motoren und je zwei häufig eingesetzte Propeller miteinander kombiniert und verglichen. Bei den Motoren handelt es sich um den Hacker A20-22S und den Robbe Roxxy 2827-34 und bei den Propellern handelt es sich um den EPP1045 und den APC SF1047, mit jeweils 10" (25.4 cm) Durchmesser und 4.5" bzw. 4.7" Steigung. Die für die Simulation relevanten Daten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Hacker A20-22S (kleines R_i)	Roxy 2827-34 (grosses R_i)	EPP1045 Kleines Massen- trägheitsmoment J	APC SF10"4.7" Grosses Massen- trägheitsmoment J
$k_V = 924 \text{ rpm/V}$ $k_M = 1/k_V * 30/\text{Pi} = 0.0103 \text{ Nm/A}$ $R_i = 0.089 \Omega$	$k_V = 760 \text{ rpm/V}$ $k_M = 1/k_V * 30/\text{Pi} = 0.0126 \text{ Nm/A}$ $R_i = 0.340 \Omega$	$J = 26.8 \text{ E-6 kgm}^2$ $CT = 0.085$ $CP = 0.04$ $D = 0.0254\text{m}$	$J = 48.4 \text{ E-6 kgm}^2$ $CT = 0.085$ $CP = 0.04$ $D = 0.0254\text{m}$

Tabelle 1: Daten der simulierten Motoren und Propeller

Es wären damit insgesamt vier Simulationskombinationen möglich. Diskutiert werden hier jedoch nur jeweils die beiden extremen Kombinationen Roxxy 2827-34 mit einem APC SF10"4.7" mit grossem R_i bzw. grossem Massenträgheitsmoment J sowie der Hacker A20-22S und EPP1045 mit kleinem R_i bzw. kleinem Massenträgheitsmoment J . Die Abbildung 6 zeigt eine Sprungantwort von 0 auf 2N, was also bei einem Quadropter einem Sprung auf 4x2N, bei einem Octokopter auf 8x2N entspräche.

Schub / N

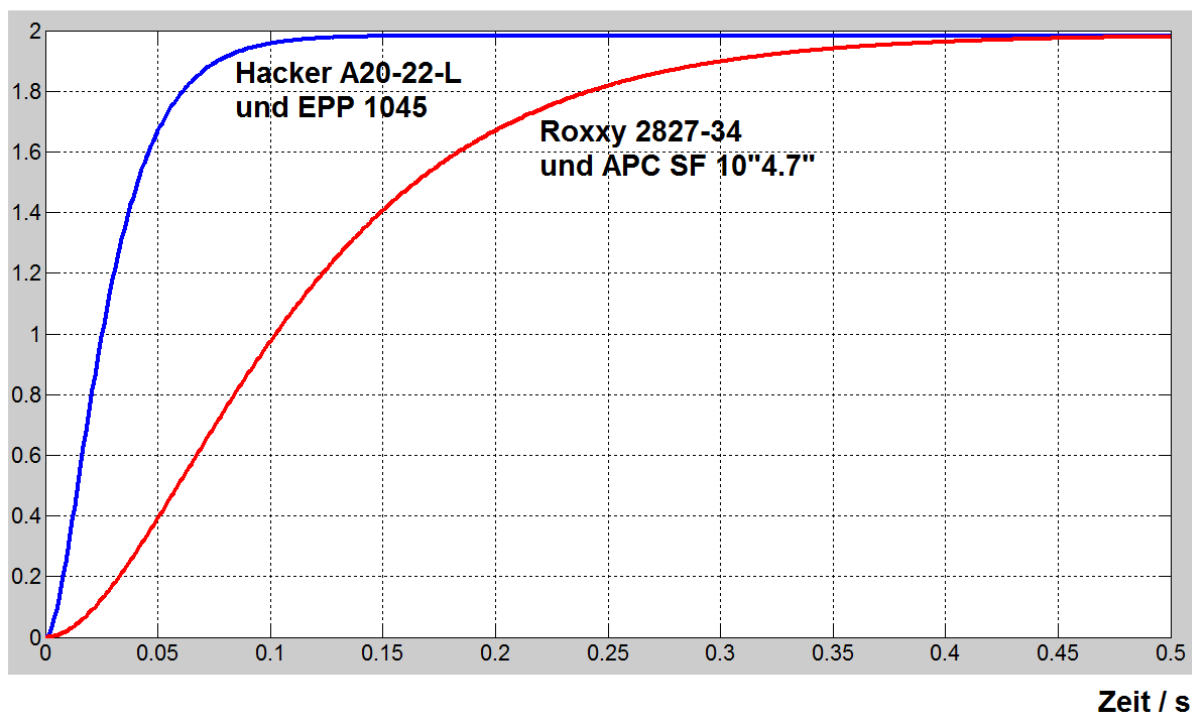


Abbildung 6: Sprungantworten von zwei Motor-/ Propellerkombinationen

Der Vergleich zeigt, dass die schnelle Kombination mit einem Motor mit kleinem Wicklungswiderstand und einem Propeller mit kleinem Massenträgheitsmoment schon nach etwas mehr als 50 ms 90% des Sollwerts erreicht hat, während die langsame Kombination dafür knapp 250 ms benötigt. Obwohl die beiden Antriebskombinationen von aussen fast gleich aussehen, zeigen die beiden doch einen sehr grossen Unterschied in der Dynamik. Die beiden Parameter ‚Wicklungswiderstand R_i des Motors‘ und ‚Massenträgheitsmoment J ‘ des Rotors sind dann auch die beiden wichtigsten Parameter, auf welche geachtet werden muss, wenn man einen dynamischen Antrieb realisieren möchte. Mit in der Kette ist auch noch die Motorkonstante k_M , diese ist jedoch bei den verwendeten Antrieben, welche Propeller um die 10" antreiben, immer ähnlich gross.

Gratis ist aber auch hier nichts zu haben, die schnelle Kombination zieht wegen des kleinen R_i beim Beschleunigen dafür einen höheren Strom. Ausserdem darf auch gesagt werden, dass man mit den entsprechenden gutmütigeren Reglerparametern auch die langsamere Antriebskombination für die Stabilisierung von Quadro- und Octokoptern einsetzen kann.

Schub-/Leistungs- und Drehzahlberechnung des Propellers

Die Formeln und die Tabellen zur Berechnung der Propellerparameter werden auf einem im Internet downloadbaren Dokument ‚Der Standschub von Propellern und Rotoren‘ von Helmut Schenk detailliert hergeleitet. (Google nach ‚Standschub Schenk‘, abgerufen am 28.2.2013). Die Leistungsbeiwerte C_P wurden dort aus der Tabelle gelesen, für die Berechnung des Schubbeiwerts C_T wurde ein konservativer Gütegrad ξ des Propellers von 0.5 angenommen. Für das Simulink- Modell wurden daraus ebenfalls einige Formeln verwendet, nämlich:

$$S = C_T \cdot \rho \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \cdot D^4 \qquad P = C_P \cdot \rho \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^3 \cdot D^5 \qquad M = C_P \cdot \rho \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \cdot D^5$$

S: Schub, P: Leistung, M: Drehmoment, ρ : Dichte der Luft, D: Propellerdurchmesser, n: Drehzahl in U/Min

Literatur:

Büchi, Roland: „Brushless- Motoren und –Regler“, Verlag für Technik und Handwerk, Baden-Baden 2011, ISBN 978-3-88180-427-1

Büchi, Roland: „Faszination Quadrocopter“, Verlag für Technik und Handwerk, Baden-Baden 2010, ISBN 978-3-88180-791-3

Grewal, Mohinder S., Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews: „Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration“, Verlag John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007, ISBN 978-0-470-04190-1

Hughes, Austin: „Electric motors and drives: fundamentals, types and applications“, Elsevier/Newnes, Amsterdam 2006, ISBN 0-7506-4718-3

Schenk, Helmut: „Der Standschub von Propellern und Rotoren“, Internet: http://www.rc-network.de/magazin/artikel_02/art_02-0037/Standschub.pdf, abgerufen am 28.2.2013