

Elektroantrieb für Modellflugzeuge

Leistungsklassen

Als erste Frage sollte geklärt werden, wie ein Modell geflogen werden soll. Dazu kann man die elektrische Leistung des Motors bezogen auf das Modellgewicht betrachtet werden. Mit 100W/kg kann man einen Segler im gemächlichen Steigflug langsam auf Höhe bringen. Bei 200 W/kg sind schon steilere Steigflüge möglich, aber senkrecht Steigen oder Hovern geht meist noch nicht. Mit 300 W/kg ist in der Regel senkrecht Steigen und Hovern möglich. Die Leistungsklasse sollte dem Modell angepaßt sein. Einen leichten Elektrosegler könnte eine Motorisierung mit 300W/kg in der Luft zerreißen. Ein Hotliner wird mit 100W/kg schwer zu starten und zu fliegen sein, weil man hier schnell überzieht und einen Strömungsabriß riskiert.

Grundlagen

Die folgenden Betrachtungen gelten sowohl für einen klassischen Bürstenmotor als auch für einen Drehstrommotor. Dabei spielt es keine Rolle, ob es ein Außenläufer ist oder nicht. Die mechanische Leistung, die ein Elektromotor abgibt, ist das Produkt aus dem Drehmoment M und der Drehzahl der Welle N :

$$P_m = 2 \pi M N \quad .$$

Die elektrische Leistung die er aufnimmt ist das Produkt aus Spannung und Strom:

$$P_e = U I$$

Das Verhältnis aus beiden Größen ist der Wirkungsgrad, der vom Arbeitspunkt abhängt:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e}$$

Die Leerlaufdrehzahl ist etwa proportional zur angelegten Spannung.

$$N_l = N_u U$$

Zwischen dem Drehmoment und dem Strom besteht auch ein in erster Linie linearer Zusammenhang:

$$M = k_n I \quad .$$

Die letzten beiden Gleichungen treffen nur dann zu, wenn man einen idealen Motor betrachtet, der keine weiteren Verluste aufweist. Durch interne Reibung gibt der Motor nicht das gesamte Drehmoment ab. Anders ausgedrückt verbraucht er schon einen Strom I_0 im Leerlauf. Etwas genauer betrachten sehen die letzten beiden Gleichungen wie folgt aus.

$$N = N_u (U - R_i I)$$

Der Term $R_i I$ entspricht der Spannung, die über dem Innenwiderstand abfällt. Der Innenwiderstand R_i kann dabei zwei Bedeutungen haben:

- Wenn U die Spannung an den Klemmen des Motors ist, so ist R_i der Innenwiderstand des Motors.
- Wenn U die Spannung am Akkus ist, so beinhaltet R_i die Innenwiderstände des Reglers, des Motors und der Zuleitungen.

Für das Drehmoment, welches der Motor abgibt, gilt:

$$M = k_n (I - I_0)$$

Die elektrische Verlustleistung ergibt sich zu:

$$P_v = R_i I^2 + I_0 (U) U \quad .$$

Für das Drehmoment des Motors erhält man:

$$M = \frac{\eta U I}{2 \pi N_u (U - R_i I)}$$

Begrenzung für die Leistung

Betrachtet man einen Motor mit einer Bauform so ist das maximale Drehmoment, welches erzeugt werden kann, durch den Aufbau festgelegt. Auch wenn der Motor mit verschiedenen Windungen angeboten wird, ändert das an dem Drehmoment nicht viel. Das liegt daran, daß die Stromdichte in den Windungskammern etwa die gleiche GröÙer erreicht. Je nach Packungsdichte der Windungen kann die Stromdichte etwas variieren.

Da die mechanische Leistung das Produkt aus der Drehzahl und dem Drehmoment ist, hängt die abgegebene Leistung beim maximalen Drehmoment von der Drehzahl ab. Vernachlässigt man mal die Verluste so steigt die Leistung, die ein Motor bei dem maximal zulässigen Strom abgibt, linear mit der Drehzahl oder auch mit der Spannung. Um die maximale Leistung pro Gewicht im Motor umzusetzen, müssen die maximale Stromstärke (Drehmoment) und die maximale Spannung (Drehzahl) ausgenutzt werden.

Der Strom führt über den Innenwiderstand zur Erwärmung des Motors. Die Drehzahl erzeugt einige weitere Verluste wie:

- Reibung an Lagern, dem Kollektor und der Luft
- Ummagnetisierungsverluste durch Hysterese im Eisen
- Wirbelstromverluste durch schneller Wechselfelder
- Skineffekt in den Windungen

Zum einen führt eine höhere Drehzahl zu größeren Verlusten, die durch $I_0(U)$ in den Formeln zusammengefaßt werden. Zum anderen können auftretende Fliehkräfte den Rotor bei zu hoher Drehzahl zerstören oder zu Vibrationen führen.

Anpassung an die Luftschaube

Wenn man die maximale Leistung in einem Motor umsetzen will, so erhält man meist einen Arbeitspunkt mit zu hoher Drehzahl für einen Direktantrieb. Um diese Drehzahl an den Propeller anzupassen wird dann ein Getriebe benötigt. Alternativ wählt man den Motor etwas größer, so daß er die benötigte Leistung schon bei einer niedrigeren Drehzahl abgibt, die für einen Direktantrieb geeignet ist.

Kochrezept

Als Eingangsgrößen braucht man die Gesamtleistung und eine Drehzahl bei der der Motor betrieben werden soll. Über die Windungszahl kann der Motor an die gewünschte Akkuspannung angepasst werden.

Die Leistung kann über die Leistungsklasse relativ einfach festgelegt werden. Die Drehzahl ist schwieriger zu bestimmen. Dabei gilt die Faustregel, daß ein langsamerer Motor meist eine Luftschaube mit höherem Wirkungsgrad zuläßt. Der Wirkungsgrad der Luftschaube steigt mit dem Verhältnis H/D (Steigung zu Durchmesser). Weiterhin sollte die Fortschrittsgeschwindigkeit des Propellers NH etwa doppelt so groß wie die Kraftfluggeschwindigkeit des Modells sein.

Langsam laufende Außenläufer mit 14 Polen kommen dieser Forderung meist schon ganz nah. Man kann die Drehzahl durch zwei Maßnahmen verkleinern:

- Man benutzt ein Getriebe.
- Man wählt einen Motor, der eine Leistungsklasse größer ist, als benötigt. Mit einer großen Windungszahl erreicht man eine niedrigere Drehzahl.

Hat man den Motor ausgewählt, geht man in folgenden Schritten vor:

- Mit der Leerlaufdrehzahl, dem Innenwiderstand und der Akkuspannung berechnet man die Drehzahl im Arbeitspunkt.

- Aus der Spannung, dem Strom im Arbeitspunkt und dem Wirkungsgrad erhält man die mechanische Leistung.
- Aus der Leistung und der Drehzahl berechnet man den N_{100} Wert. Passend zu diesem Wert sucht man eine oder mehrere Luftschrauben aus einer Tabelle aus.
- Anschließend prüft man das Verhältnis zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Gleitgeschwindigkeit sowie das H/D Verhältnis.

Der Wirkungsgrad des Propellers steigt bis zu $H/D=1,2$ an. Den besseren Gesamtwirkungsgrad bekommt man aber nur dann hin, wenn gleichzeitig die Fortschrittsgeschwindigkeit zur Modellgeschwindigkeit paßt.

Stern-Dreieck-Schaltung

Einen Drehstrommotor kann man in Dreieck- oder Sternschaltung betreiben. Handelsübliche Motoren werden in Dreieckschaltung ausgeliefert. Dabei sind die Anfänge einer Windung mit dem Ende der nächsten Windung verbunden. Wenn man alle Windungsanfänge auf einen Punkt verbindet und die Enden mit dem Regler erhält man die Sternschaltung. Der Verbindungspunkt der Windungsanfänge wird dabei isoliert, d.h. mit nichts verbunden. Durch den Übergang von Dreieck auf die Sternschaltung reduziert sich die Leerlaufdrehzahl um den Faktor 1,7. D.h. man kann den Motor dann mit einer höheren Spannung betreiben oder er läuft langsamer. Wenn der Motor langsamer läuft, reduziert sich die abgegebene Leistung natürlich. Mit diesem Umbau kann man die Akkuspannung anpassen. Wenn man z.B. einen Motor anstatt mit zwei Lipo Zellen mit drei betreiben möchte, kann man diesen Umbau vornehmen.

Beispiele

Die folgende Beispiele wurden mit dem Antriebskalkulator www.fmsv-grossbreitenbach.de berechnet.

Als Antrieb mit Getriebe will ich mal einen AXI 2212/9 betrachten. Der Motor hat einen Stator Durchmesser von 22 mm, 12 mm lange Magnete und 9 Windungen. Die Leerlaufdrehzahl liegt bei 2750 U/min und der Innenwiderstand bei 30 mOhm. Der Motor kann 33 A verarbeiten. Wenn mal einen Arbeitspunkt von 30 A bei 11.1 V annimmt, und ein Getriebe von 3,1:1 ansetzt, so dreht er einen 11x7“ Propeller mit 8800 u/min, 1500 g Standschub und einer optimalen Kraftfluggeschwindigkeit von 13 m/s. Der Antrieb wiegt dann $59+23 = 81$ g.

Als Direktantrieb haben wir den AXI 2820/14 mit 151 g Gewicht ausgewählt. Die Leerlaufdrehzahl liegt bei 860 U/min bei einem Innenwiderstand von 78 mOhm. Im Arbeitspunkt von 30A bei 11.1 V dreht er einen Propeller von ca. 12x8“ mit 7300 U/min, 1400 g Standschub bei einer optimalen Kraftfluggeschwindigkeit von 12 m/s.

Der Direktantrieb erreicht in diesem Vergleich etwa die gleiche Leistung, ist aber deutlich schwerer.