

# ELEKTROTRISCH, ABER RICHTIG

## ANTRIEBSBERECHNUNG IM DETAIL

In der vorigen Ausgabe haben wir uns mit der Systematik der Antriebsauslegung befasst. Heute setzen wir uns mit dem Vergleich der errechneten Resultate und der Messung eines Antriebs bei Inbetriebnahme auseinander.

Jeder RC-Calculator basiert auf Rechenmodellen, die versuchen die reale Welt möglichst genau abzubilden. Dabei müssen gewisse Annahmen oder Vereinfachungen getroffen werden, um die Eingabe der benötigten Daten möglichst einfach zu halten. Somit ist auch jeder RC-Calculator bezüglich Ergebnisqualität abhängig von der Verlässlichkeit der Ausgangsparameter der verwendeten Komponenten und ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

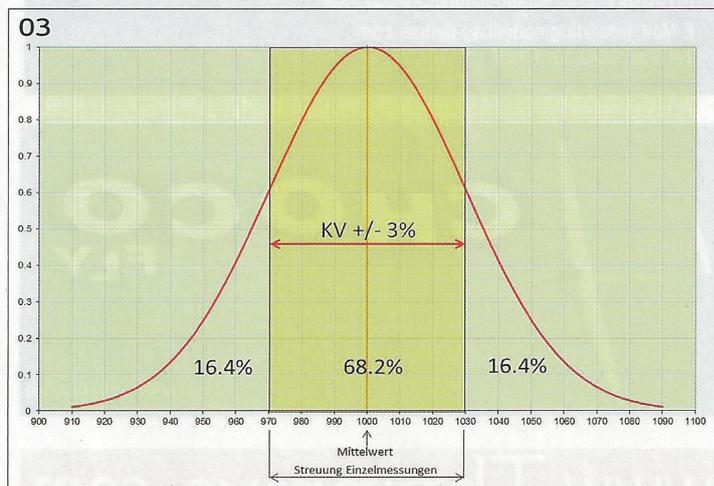
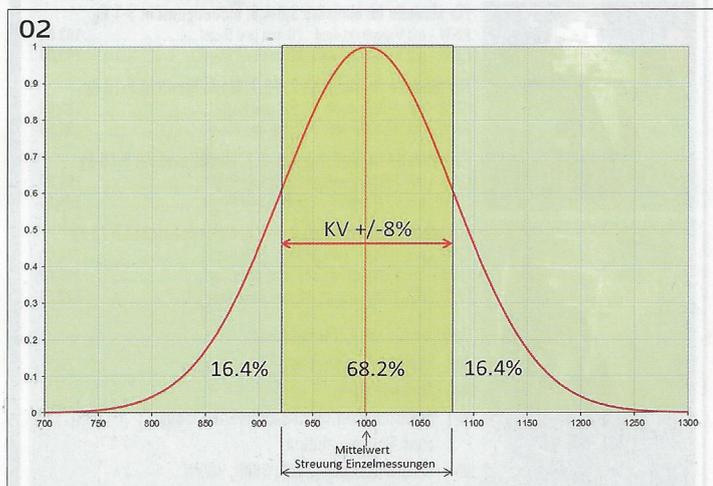
Das Rechenmodell heutiger Calculatoren ist entweder ausgelegt und optimiert auf gemittelte Herstellerangaben (z.B. eCalc) oder „eigene“ Messungen. Beide Arten kommen mit einer relativ geringen Anzahl an Parametern aus. Wer daraus voreilig schließt, dass eigene Messungen von Einzelexemplaren bessere Resultate liefern als gemittelte Herstellerangaben, der verfällt einem Trugschluss. Insbesondere namhafte Hersteller sind nicht an geschönten Daten interessiert, da solche Beschönigungen früher oder später aufgedeckt werden oder gar in Rauch aufgehen. Vermeintlich „geschönte“ Herstellerdaten sind oft auch mit erhöhter produktions-



technischer Streuung gekoppelt und wegen ungenügender Beherrschung des Produktionsprozesses nicht genauer ermittelbar. Die produktionstechnische Streuung führt zu unvermeidlichen Parameterabweichungen. Diese können je nach Produktionsprozessqualität von +/- drei Prozent (Qualitätshersteller) bis +/- zehn Prozent oder mehr betragen.

Eigene Messungen sind eine Momentaufnahme eines Einzelexemplars und liegen innerhalb

dieser Streuung. Die so ermittelten Parameter sind ausschließlich genau für das entsprechend vermessene Einzelexemplar. Wenn nun das Einzelexemplar am Rande der Streuung liegt, kann die Abweichung zu einem anderen Einzelexemplar im Gegensatz zu gemittelten Herstellerparameter im Extremfall die doppelte Streuung betragen – ganz zu schweigen von Resultatverfälschungen durch geschätzte oder von ähnlichen Motoren abgeleiteten Parametern. Eine



**01** | Mit der richtigen Auslegung lassen sich auch eher ungewöhnliche und große Modelle passend motorisieren.  
**Foto: Stana Valnoha** **02** | Die Gauss'sche Normalverteilung für spezifische Drehzahl KV = 1000 U/V, Standardabweichung 80 U/V (8 Prozent) **03** | Gauss'sche Normalverteilung für spezifische Drehzahl KV = 1000 U/V, Standardabweichung 30 U/V (3 Prozent)

|                   |   |                                       |   |   |  |                                     |   |                              |
|-------------------|---|---------------------------------------|---|---|--|-------------------------------------|---|------------------------------|
| <b>Generell</b>   | Motor Kühlung:<br>gut   | Anz. Motoren:<br>1<br>(an einem Akku) | Modellgewicht:<br>2800 g ohne Akku<br>98.8 oz | Flügelfläche:<br>86.1 dm <sup>2</sup><br>1024.6 in <sup>2</sup> | Flugplatzhöhe:<br>500 m ü.M<br>1640 ft ü.M | Lufttemperatur:<br>25 °C<br>77 °F   | Luftdruck(QNH):<br>1013 hPa<br>29.91 inHg |                              |
| <b>Akku-Zelle</b> | Typ (Dauer / max. C) - Ladezustand:<br>LiPo 4500mAh - 4S/80C - voll       | Konfiguration:<br>8 S 1 P             | Kapazität:<br>4500 mAh                        | Gesamtkapazität:<br>4500 mAh                                    | Widerstand:<br>0.0027 Ohm                  | Spannung:<br>3.7 V                  | C-Rate:<br>45 C Dauer<br>60 C max         | Gewicht:<br>126 g<br>4.4 oz  |
| <b>Regler</b>     | Typ:<br>max 90A   | Dauerstrom:<br>90 A                   | max. Strom:<br>90 A                           | Widerstand:<br>0.003 Ohm  | Gewicht:<br>115 g<br>4.1 oz                |                                     |   |                              |
| <b>Motor</b>      | Hersteller - Typ (KV):<br>Leomotion - LEO 5330-0240 Cp (242)<br>suchen... | Kv:<br>242 U/V                        | Leerlaufstrom:<br>1.5 A @ 10 V                | Limite (max. 15s):<br>3740 W                                    | Widerstand:<br>0.02 Ohm                    | Gehäuselänge:<br>60 mm<br>2.36 inch | Anz. mag. Pole:<br>14                     | Gewicht:<br>655 g<br>23.1 oz |
| <b>Propeller</b>  | Typ - Schränkung Mittelstück:<br>Fiala - 0°                               | Durchmesser:<br>20 inch               | Pitch:<br>12 inch                             | Anz. Blätter:<br>2  | PConst.:<br>1.09                           | Getriebe:<br>1 : 1                  | <b>berechnen</b>                          |                              |

|                     |                           |                                       |                                   |                                    |                             |  |
|---------------------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| <b>Anmerkungen:</b> | <b>Batterie</b>           | <b>Motor @ Optimaler Wirkungsgrad</b> | <b>Motor @ Maximum</b>            | <b>Propeller</b>                   | <b>Gesamter Antrieb</b>     | <b>Modellflugzeug</b>                  |
|                     | Belastung: 18.40 C        | Strom: 54.78 A                        | Strom: 82.79 A                    | Standeschub: 10908 g               | Komponenten: 1956 g         | Abfluggewicht: 3808 g                  |
|                     | Spannung: 29.59 V         | Spannung: 30.03 V                     | Spannung: 29.34 V                 | 384.8 oz                           | 69 oz                       | 134.3 oz                               |
|                     | Nennspannung: 29.60 V     | Drehzahl*: 6792 U/min                 | Drehzahl*: 6498 U/min             | Drehzahl*: 6498 U/min              | Leistungs-Gewicht: 682 W/kg | Flächenbelastung: 58 g/dm <sup>2</sup> |
|                     | Flugzeit Vollgas: 3.3 min | el. Leistung: 1645.1 W                | el. Leistung: 2428.9 W            | Schub bei Abriss: 7108 g           | 310 W/lb                    | 19 oz/ft <sup>2</sup>                  |
|                     | Ø Flugzeit: 5.5 min       | mech. Leistung: 1527.9 W              | mech. Leistung: 2238.5 W          | Pitch Geschw.: 119 km/h            | Schub-Gewicht: 2.86 : 1     | Kubische Flächenbel.: 7.1              |
|                     | Gewicht: 1008 g           | Wirkungsgrad: 92.9 %                  | Wirkungsgrad: 92.2 %              | 74 mph                             | P(in) @ max: 2597.5 W       | Überziehgeschwind.: 36 km/h            |
|                     | 35.6 oz                   |                                       | Temperatur (ca.): 66 °C<br>151 °F | Blattspitze: 622 km/h<br>386 mph   | P(out) @ max: 2238.5 W      | 22 mph                                 |
|                     |                           |                                       |                                   | spez. Schub: 4.49 g/W<br>0.16 oz/W | Wirkungsgrad @ max: 86.2 %  |  |

**Bild 04 | Die im Text erwähnte Antriebsberechnung**

Abweichung in der spezifischen Drehzahl (KV) schlägt sich in etwa quadratisch und somit signifikant in der entsprechenden maximalen Stromveränderung nieder. Ein Beispiel: Weicht das effektive KV um zehn Prozent von der Berechnungsgrundlage ab, wird der effektive Strom um circa 21 Prozent ( $=1,1^2$ ) von der Berechnung abweichen.

Aufgrund der Parameter-Streuung sind Resultatabweichungen also unabhängig von der Parameterermittlung unvermeidlich. Diese werden mit Mittelwerten geglättet und können mit Einzelmessungen zu Ausreißern führen. Beide Ansätze haben ihre spezifische Stärken, aber auch ihre unvermeidlichen Schwächen. Daher erachte ich ein einfaches Vermessen des Antriebs vor Inbetriebnahme als unumgänglich und notwendig. Für eine Standmessung bevorzuge ich ein Zangenampere- und Voltmeter, welches ein kontaktloses Messen erlaubt, und ein einfaches Voltmeter.

Beim Vergleich zwischen Messung und Berechnung ist es wichtig, dass man nicht Äpfel mit Birnen vergleicht. Den größten Einflussfaktor übt die Drehzahl aus. Sie wirkt sich in etwa quadratisch auf den Strom aus. Abweichungen sind bedingt durch die KV-Streuung (vgl. oben) oder die effektiv anliegende Akku-Spannung. Die Akku-Spannung nimmt bedingt durch seinen

Innenwiderstand mit zunehmendem Strom ab. Durch Alterung des Akkus nimmt der Innenwiderstand über seine Lebensdauer langsam zu, wodurch die abgegebene Spannung unter Last langsam abnimmt. Zu hoch veranschlagte und überzeichnete C-Raten gehen ebenfalls einher mit erhöhten Innenwiderständen. Beides führt zum allgemein bekannten Eindruck, dass der Akku an «Leistung» verliert oder der letzte „Bumms“ fehlt.

Somit ist es wichtig bei der Standmessung nicht nur den Strom sondern auch die Spannung zu ermitteln. Führen Sie die Messung mit frisch und vollständig geladenen Akkus durch (entspricht in eCalc der Berechnungsgrundlage „Ladezustand: voll“). Dies kann mit Logger, Wattmeter oder Ampere- und Voltmeter erfolgen. Aus eigener Erfahrung mit in Reglern integrierten Logger-Systemen bin ich skeptisch bezüglich deren Genauigkeit. Ich empfehle unbedingt deren Verlässlichkeit mit konventionellen Messgeräten anhand einer Referenzmessung zu überprüfen. Nicht selten sind Abweichungen von über zehn Prozent festzustellen. Stellen Sie beim Vergleich mit der Berechnung fest, dass die berechnete Akku-Spannung erheblich abweicht, kann dies wie folgt verglichen werden.

Ein Beispiel anhand des Antriebs aus der letzten Kolumne sehen Sie in Bild 4. Diesen Antrieb habe ich vor dem Erstflug mit einem Zangenampere- und Voltmeter vermessen. Mit meinen alten, vollgeladenen Akkus habe ich unter Vollast nur 73,2 Ampere bei 28 Volt gemessen. Auf den ersten Blick entspricht dies einer Differenz von 9,79 Ampere (13,4 Prozent) zur Rechnung. Grundlage der Berechnung bildet jedoch eine Akkuspannung von 29,59 Volt. Wir gehen nun hin und passen die Akku-Spannung gemäß gemessener 28 Volt an, in dem wir beim Akku „Andere“ wählen und die Parameter gemäß Bild 5 anpassen. Wir vergleichen das neu berechnete Resultat (vgl. Bild 6) mit den gemessenen 73,2 Ampere – es besteht noch eine Differenz von 3,38 Ampere (4,6 Prozent).

Mein Lehrmeister in der Ausbildung zum Elektroniker pflegte zu sagen: „Wer misst, misst Mist!“. Dieses Sprichwort hat auch nach 30 Jahren nicht an Bedeutung verloren. Sollten einmal die Strom- oder Leistungslimits des Herstellers überschritten werden, darf dies nie mit Begrenzung der Gaskurve sondern NUR mit der Wahl eines kleineren Propellers korrigiert werden. ■

Markus Müller  
www.eCalc.ch

|                   |  |                           |                        |                              |                            |                   |                                   |                               |
|-------------------|--|---------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| <b>Akku-Zelle</b> | Typ (Dauer / max. C) - Ladezustand:<br>Andere - normal | Konfiguration:<br>1 S 1 P | Kapazität:<br>4500 mAh | Gesamtkapazität:<br>4500 mAh | Widerstand:<br>0.00001 Ohm | Spannung:<br>28 V | C-Rate:<br>45 C Dauer<br>60 C max | Gewicht:<br>1008 g<br>35.6 oz |
|-------------------|--|---------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------|

|                           |                                       |                                   |                                    |                             |  |
|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| <b>Batterie</b>           | <b>Motor @ Optimaler Wirkungsgrad</b> | <b>Motor @ Maximum</b>            | <b>Propeller</b>                   | <b>Gesamter Antrieb</b>     | <b>Modellflugzeug</b>                  |
| Belastung: 16.80 C        | Strom: 51.41 A                        | Strom: 75.58 A                    | Standeschub: 9816 g                | Komponenten: 1956 g         | Abfluggewicht: 3808 g                  |
| Spannung: 28.00 V         | Spannung: 27.85 V                     | Spannung: 27.77 V                 | 346.2 oz                           | 69 oz                       | 134.3 oz                               |
| Nennspannung: 28.00 V     | Drehzahl*: 6295 U/min                 | Drehzahl*: 6184 U/min             | Drehzahl*: 6184 U/min              | Leistungs-Gewicht: 556 W/kg | Flächenbelastung: 58 g/dm <sup>2</sup> |
| Flugzeit Vollgas: 3.6 min | el. Leistung: 1431.6 W                | el. Leistung: 2099.0 W            | Schub bei Abriss: 6396 g           | 252 W/lb                    | 19 oz/ft <sup>2</sup>                  |
| Ø Flugzeit: 6.1 min       | mech. Leistung: 1328.0 W              | mech. Leistung: 1935.6 W          | 225.6 oz                           | Schub-Gewicht: 2.58 : 1     | Kubische Flächenbel.: 7.1              |
| Gewicht: 1008 g           | Wirkungsgrad: 92.8 %                  | Wirkungsgrad: 92.2 %              | 113 km/h                           | P(in) @ max: 2116.2 W       | Überziehgeschwind.: 36 km/h            |
| 35.6 oz                   |                                       | Temperatur (ca.): 60 °C<br>140 °F | 70 mph                             | P(out) @ max: 1935.6 W      | 22 mph                                 |
|                           |                                       |                                   | Blattspitze: 590 km/h<br>366 mph   | Wirkungsgrad @ max: 91.5 %  |  |
|                           |                                       |                                   | spez. Schub: 4.88 g/W<br>0.17 oz/W |                             |  |

**Bild 05 (oben) | Anpassung der Eingangsspannung an eigene Messung (28 Volt)**

**Bild 06 (unten) | Eine mit der eigenen Messung vergleichbare Berechnung**