

ELEKTRISCH,

LEERLAUFTTEST – EIN HEIßES SPIEL MIT DEM WIRKUNGSGRAD

ABER RICHTIG

Nicht selten kritisieren Elektroflieger ein potentielles Problem, wenn der Elektromotor beim Testlauf ohne Luftschraube auf der Werkbank heiß läuft. Markus Müller klärt auf, warum so ein Leerlauftest bei Nennspannung eine schlechte Idee ist.

Auf die Feststellung, „das ist normal und kann gar zum Abfackeln des Motors bei relativ geringen Strömen führen“, folgt oftmals ungläubiges Staunen. Nun, lasst es mich erklären: Ein elektrisches Gerät heizt sich durch seine eigene Verlustleistung auf. Bei einem Elektromotor entspricht die Verlustleistung der Differenz zwischen der elektrischen Eingangsleistung (= Strom x Spannung) und der mechanischen Wellenleistung. Unter Last haben Elektromotoren einen Wirkungsgrad von bis zu 95 Prozent. Der Rest – die Verlustleistung – wird in Wärme umgewandelt und muss abgeführt werden, da sonst der Motor zu überhitzen droht. Und dabei dann permanenten und irreversiblen Schaden an den Magneten nehmen kann.

Die Verluste im Motor sind hauptsächlich in vier Faktoren begründet: Reibung, Luftwiderstand, Eisenverlust und Windungsverlust. Reibungsverluste entstehen in den Wellenlagern und einem allfällig angebauten Getriebe (vgl. AUFWIND 4/2017). Der Luftwiderstand entsteht zwischen den rotierenden Teilen (z.B. Rotor und Lüfter) und der Umgebungsluft. Insbesondere verbaute interne Lüfter erzeugen einen entsprechenden Luftwiderstand. Reibung und Luftwiderstand wirken sich bei einem sauber gewarteten und intakten Motor nur sehr gering aus. In der nachfolgenden Betrachtung werden wir der Einfachheit halber diese beiden Verluste außen vorlassen und uns auf die beiden nachfolgenden, maßgebenden Verluste beschränken:

Durch den erzeugten Drehstrom des Reglers wird in den Spulen ein drehendes Magnetfeld erzeugt, das den Eisenverlust hervorruft. Im Eisenkern des Stators entstehen durch den Wechsel der Polaritäten Wirbelströme, die einen Verlust darstellen und die Statorbleche erwärmen. Die Kupferwindungen des Stators haben einen ohmschen Widerstand. Dieser Innenwiderstand R_i erzeugt den Windungsverlust, der quadratisch mit der Stromstärke zunimmt. Reibungsverlust, Luftwiderstand, Eisenverluste und Windungsverlust sind verantwortlich für die Höhe des Leerlaufstroms I_0 , der ein typisches Spezifikationsmerkmal des Elektromotors ist.



Verschiedene Motoren haben unterschiedliche Parameter. Hier ein Innenläufer mit Getriebe (links) und der Außenläufer-Direktantrieb

Elektrische (Verlust-) Leistung definiert sich grundsätzlich als Spannung mal Strom oder auch Strom im Quadrat mal ohmscher Widerstand ($P = U \times I = I^2 \times R$). Somit können wir die vereinfachte Verlustleistung am Motor ermitteln (Reibung und Luftwiderstand vernachlässigt):

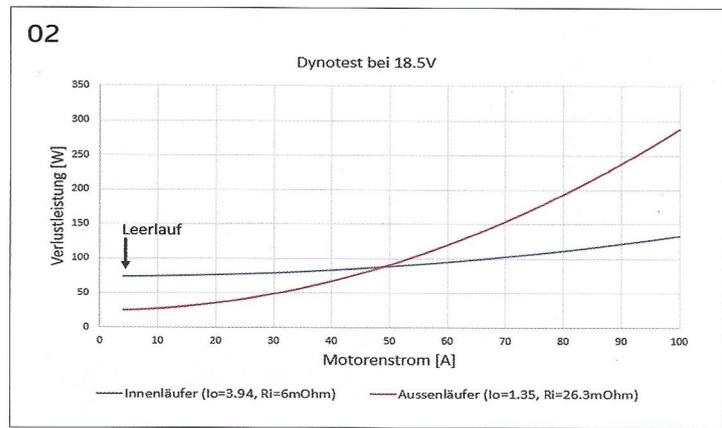
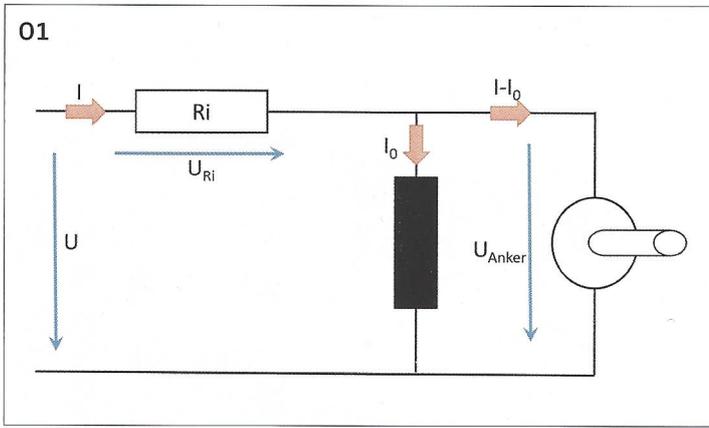
$$P_{\text{Verlust}} = \text{Eisenverlust} + \text{Widerstandsverlust} = U_{\text{Anker}} \times I_0 + I_0^2 \times R_i$$

Die uns bekannten Bauarten des Innen- und Außenläufers unterscheiden sich nicht nur optisch, sondern auch bezüglich ihrer spezifischen Parameter. Ein Innenläufer gleicher Leistungsklasse weist gegenüber einem Außenläufer typischerweise eine höhere spezifische Drehzahl (KV), einen höheren Leerlaufstrom I_0 und einen tieferen Innenwiderstand R_i auf.

Was bedeutet das nun für unsere Betrachtung des Motorverlustes? Dazu schauen wir uns den Verlauf der Verlustleistung mit zunehmender Leistungsaufnahme an. Beim sogenannten Dynotest wird eine anliegende Last (z.B. Luftschraube) simuliert und der Motor extern „abgebremst“. Durch dieses anliegende und stetig zunehmende Drehmoment steigt die Stromaufnahme des Motors, damit er seine, durch die Spannung U „aufgezwungene“ Drehzahl ($U \times KV$) halten kann.

Innen- und Außenläufer zeichnen nun durch ihre verschiedenen Charakteristika unterschiedliche Kurven. Bei Leerlauf hat der Außenläufer bedingt durch den geringeren Leerlaufstrom I_0 (Eisenverlust) eine deutlich kleinere Verlustleistung, die aber wegen dem höheren Innenwiderstand R_i mit zunehmendem Motorstrom erheblich und schneller ansteigt. Im Kontrast dazu weist der Innenläufer bereits im Leerlauf eine deutlich höhere Verlustleistung auf, die mit zunehmender Last nur noch marginal ansteigt. Wenn nun ein Leerlauftest, also ein Testlauf ohne anliegende Last unternommen wird, gibt die Motorwelle keine Leistung ab und die anliegende mechanische Wellenleistung ist faktisch null Watt. Folglich ist der Wirkungsgrad null Prozent und die gesamte anliegende elektrische Leistung wird zur Verlustleistung und in Wärme umgewandelt.

Der Leerlaufstrom der Motorenspezifikation wird in der Regel zwischen fünf und zehn Volt ermittelt. Wenn wir nun einen Leerlauftest bei entsprechend höherer Betriebsspannung (z.B. 5s-LiPo = 18,5 Volt) anstellen, steigt der Leerlaufstrom an. Die anliegende höhere Betriebsspannung und der ansteigende Leerlaufstrom führt zur signifikant höheren Verlustleistung (= $U \times I_0$, Eisenverlust). Die Verlustleistung steigt in unserem Beispiel um beinahe den Faktor 3 an. Bei



01 | Das Blockschaltbild des Motors veranschaulicht den Aufbau **02** | Beim Dynotest wird der Motor sukzessive extern abgebremst und damit die Last erhöht

Motoren mit hohem Leerlaufstrom und tiefem Innenwiderstand – also vorwiegend bei Hochleistungsinnenläufern – führt dies nun dazu, dass bereits im Leerlauf ohne Luftschaube bis zu 95 Prozent der Verlustleistung entsteht, die mit Luftschaube im Normalbetrieb anfällt. In Verbindung mit dem auf der Werkbank fehlenden, kühlenden Luftstrom erwärmt sich der Motor nun merklich und kann im Extremfall bereits beim Leerlaufstest bei vermeintlich tiefem Strom überhitzen.

Ein Leerlaufstest bei voller Betriebsspannung beweist gar nichts und macht den Motor nur heiß. Ist ein Leerlaufstest dennoch nötig – zum Beispiel zum Prüfen, ob alles normal läuft – empfehle ich eine Betriebsspannung um fünf bis zehn Volt zu wählen (z.B. 2s- oder 3s-Akku), um den Motor nicht unnötig zu belasten. Der Testlauf sollte nur kurz sein (unter zehn Sekunden) mit angemessener Kühlzeit dazwischen.

Also, seid vorsichtig mit Leerlaufstest ohne Luftschaube. Niederohmige Motoren mit mo-

deraten bis hohen Leerlaufströmen (größer 1.5A@10V) drohen bei höheren Betriebsspannungen im Leerlauf schnell heiß zu werden. Unvermeidliche Leerlaufstests sollten nur kurz und mit deutlich reduzierter Betriebsspannung erfolgen.

Markus Müller
www.eCalc.ch

Motor @ Maximum

Strom:	2.50 A
Spannung:	9.97 V
Drehzahl*:	21231 U/min
el. Leistung:	24.9 W
mech. Leistung:	0.0 W
Wirkungsgrad:	0.0 %
Temperatur (ca.):	39 °C 102 °F

Motor @ Maximum

Strom:	3.94 A
Spannung:	18.44 V
Drehzahl*:	39290 U/min
el. Leistung:	72.7 W
mech. Leistung:	0.1 W
Wirkungsgrad:	0.2 %
Temperatur (ca.):	65 °C 149 °F

Motor @ Maximum

Strom:	96.44 A
Spannung:	17.01 V
Drehzahl*:	34868 U/min
el. Leistung:	1640.0 W
mech. Leistung:	1518.8 W
Wirkungsgrad:	92.6 %
Temperatur (ca.):	67 °C 153 °F

von I. | Der Leerlaufstrom bei zehn Volt (Verlustleistung: 25 Watt) ...
... und bei Betriebsspannung 18,4 Volt/5s-LiPo (Verlustleistung: 73 Watt) ...
... und unter Last (Verlustleistung: 79 Watt)

