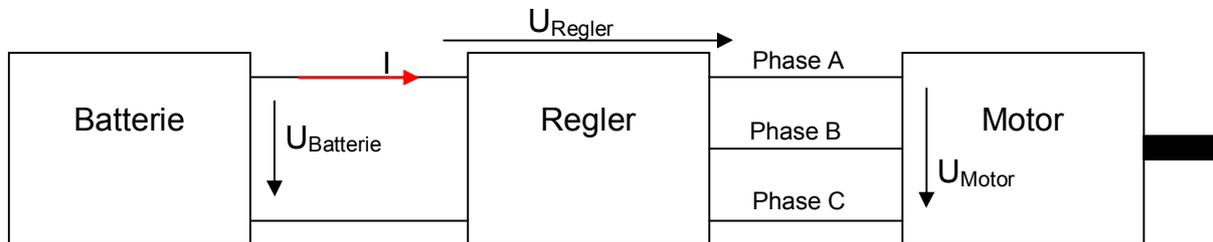


Warum überhitzen Modellflugregler?

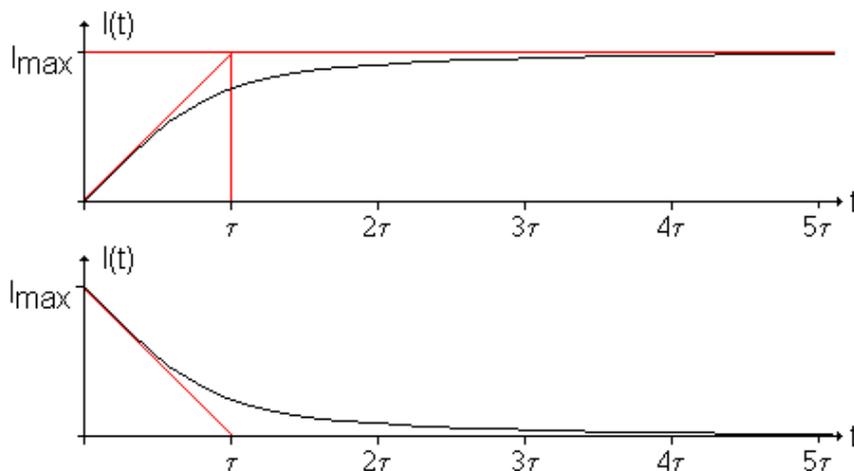
Die Ströme und Spannungen im Elektromodellflug – bei den Elektrojets im speziellen – werden immer höher. Die Leistungsdichte der LiPo-Technologie hat das Problem von überhitzten Reglern akzentuiert.



Nachfolgend wollen wir auf die elektro-technische Funktionsweise von brushless Motoren und heutiger Regler eingehen, Ursachen für Verlustleistung am Regler aufzeigen und Empfehlungen abgeben um thermische Überlast zu vermeiden.

Spule bzw. Wicklungen eines Motors

Wicklungen eines elektrischen Motors sind aus elektrotechnischer Sicht Spulen bzw. ein induktiver Widerstand. In einer Spule kann der Strom nicht sprunghaft ändern. Wird an einer Spule plötzlich eine Gleichspannung eingeschaltet, folgt ein asymptotischer Anstieg des Stromes (e-Funktionskurve). Wird die Spannung plötzlich abgeschaltet so fließt der Strom noch weiter und erzeugt eine Gegenspannung.



Stromverlauf in einer Spule beim Ein- (oben) bzw. Ausschalten (unten) der Gleichspannung

Ein plötzliches Abschalten des Spulenstroms führt zu Spannungsspitzen, deren Höhe steigt mit der Induktivität der Spule und der Stromstärke, mit der sie aufgeladen worden ist. Diese Spitzen können Schäden durch Überspannung verursachen. Mit Gleichstrom betriebene Spulen werden daher oft durch eine Freilaufdiode (Schottky-Diode) geschützt, die beim Abschalten des Stromkreises dem weiterfließenden Strom durch eine zur Spule antiparallel geschaltete Diode, das Freilaufen ermöglicht und die gespeicherte magnetische Energie aufbraucht, die Spannungsspitze wird damit verhindert.

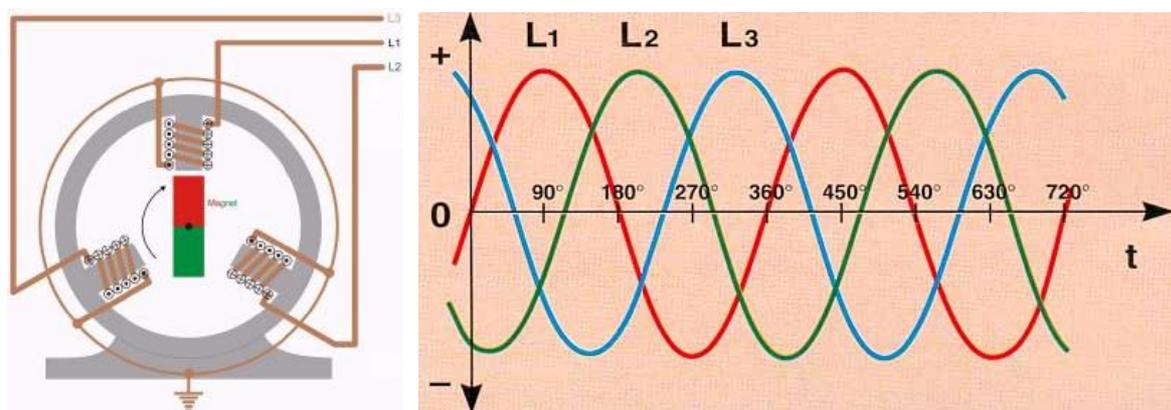
Wird eine Spule an Wechselspannung betrieben, so eilt der Strom der Spannung stets 90° hinterher.

Brushless Motor

Ein brushless bzw. bürstenloser, oder elektronisch kommutierter, Motor ist eine Mischform aus Drehstrom-Synchro-Motor und Gleichstrommotor. Betrachten wir den einfachsten Fall eines bürstenlosen Motors: der Stator besitzt drei räumlich um 120° versetzte Wicklungen (Spulen) und der Rotor hat einen zweipoligen Permanentmagneten.

Fließt ein Strom durch eine Spule (Wicklung), wird ein Magnetfeld erzeugt. Werden die drei Wicklungen des Motors mit je einem sinusförmigen Strom angesteuert, welcher zeitlich um 120° versetzt sind (Drehstrom genannt), wird ein drehendes Magnetfeld erzeugt. Dieses drehende Magnetfeld zieht nun den Permanentmagneten des Stators hinter sich her – der Motor beginnt sich zu drehen.

Daraus erkennt man bereits ein Grundproblem des brushless Motors: das drehende Magnetfeld des Stators und die Drehzahl des Rotors müssen stets gleich schnell sein – eben synchron – sonst bleibt der Motor stehen oder läuft gar nicht an.

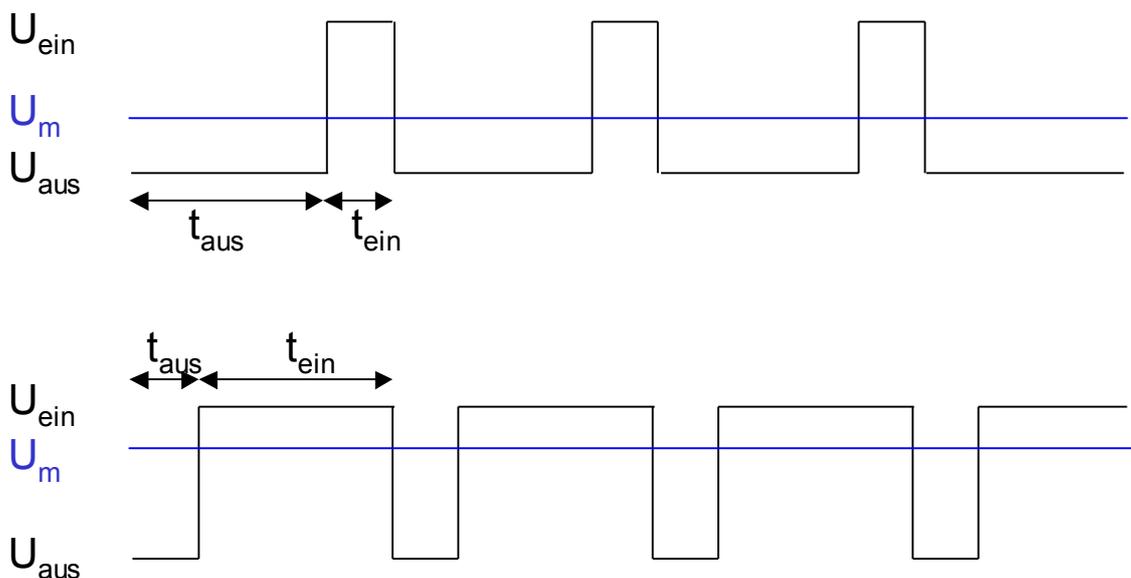


räumliche Anordnung der Wicklungen und 120° versetzter Drehstrom

Pulsweitenmodulation

Um später die Funktionsweise eines Reglers im Teilastbereich besser zu verstehen, müssen wir an dieser Stelle kurz auf die Pulsweitenmodulation eingehen.

Bei der **Pulsweitenmodulation** (engl. Pulse Width Modulation, abgekürzt **PWM**) wird die Aus- und Einschaltzeit eines Rechtecksignals bei fester Grundfrequenz variiert, wodurch unterschiedliche mittlere Spannungen (U_m) resultieren.



Unterschiedliche Pulsweiten bei gleicher Frequenz erzeugen unterschiedliche Mittelwerte der Spannung

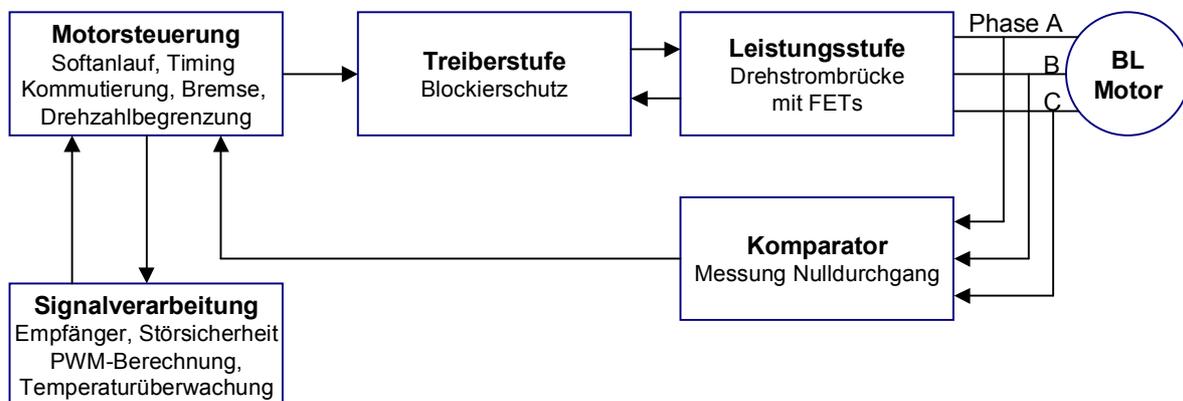
Wie leicht zu erkennen ist gilt für den **Mittelwert** der Spannung

$$U_m = U_{aus} + (U_{ein} - U_{aus}) \cdot \frac{t_{ein}}{t_{ein} + t_{aus}}$$

Das kann man sich wie einen Lichtschalter vorstellen, welchen man sehr schnell ein- und ausschaltet: Ist die Ausschaltzeit grösser als die Einschaltzeit erscheint das Licht im Durchschnitt (U_m) dunkler, ist aber die Einschaltzeit grösser als die Ausschaltzeit, erscheint das Licht im Durchschnitt heller (So funktionieren übrigens verlustarme Dimmer).

Der große Vorteil von PWM für Motoransteuerungen ist der gute Wirkungsgrad bzw. die geringe Verlustleistung. Die verwendete Frequenz liegt meist im Bereich von einigen 10 kHz.

brushless Regler



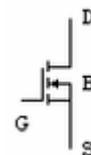
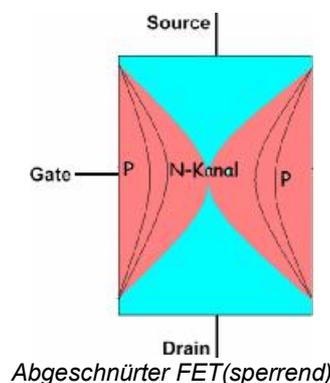
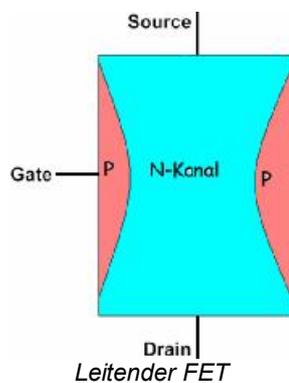
Blockschaltbild eines brushless Reglers

FET – der Feld Effekt Transistor

Bevor wir genauer auf den Regler eingehen, müssen wir kurz die Funktionsweise eines FETs (Feld Effekt Transistor) erläutern.

Das Prinzip des FETs ist bereits seit den 20er Jahren bekannt, konnte aber erst mit der Beherrschung der Silizium-Technologie umgesetzt werden.

Ein FET hat drei Anschlüsse: Zuleitung (Source), Ableitung (Drain) und die Steuerleitung (Gate). Durch ein elektrisches Feld, welches durch eine kleine Steuerspannung zwischen Gate und Source hervorgerufen wird, lässt sich die Leitfähigkeit (Widerstand) zwischen Source und Drain beinahe leistungslos beeinflussen.

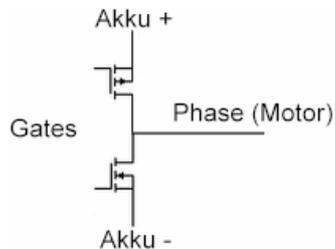


Schaltsymbol n-Kanal FET

Für unsere Anwendung im Regler verwenden wir den FET wie ein Schalter: Voll leitend (Schalter geschlossen) oder voll sperrend (Schalter offen).

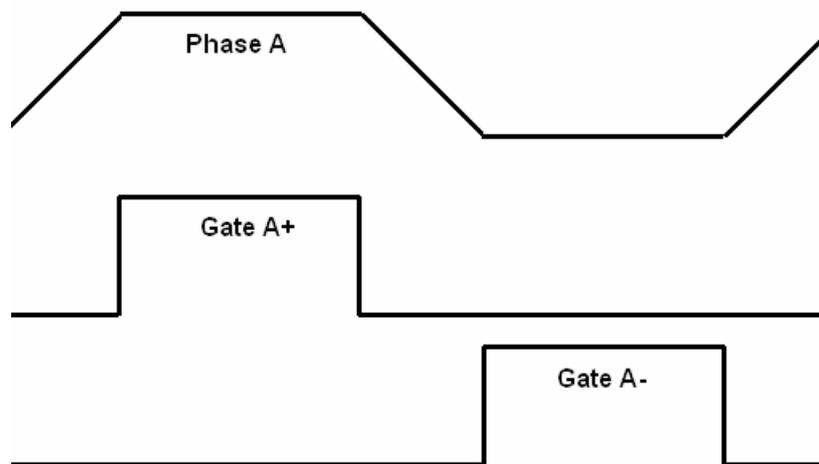
Arbeitsweise bei Vollast

Wie wir vorhin gesehen haben, will der brushless Motor von einer Drehstrom-Sinus-Spannungsquelle angetrieben werden. Im Modellbau steht uns aber ein Akku (Gleichspannungsquelle) zur Verfügung. So muss der Regler also eine Spannung erzeugen, welche dem Sinusverlauf angenähert wird. Dies wird durch eine Halb-Brücke (= 1/3 Drehstrombrücke), bestehend aus zwei FETs (Feld Effekt Transistor) erzielt.



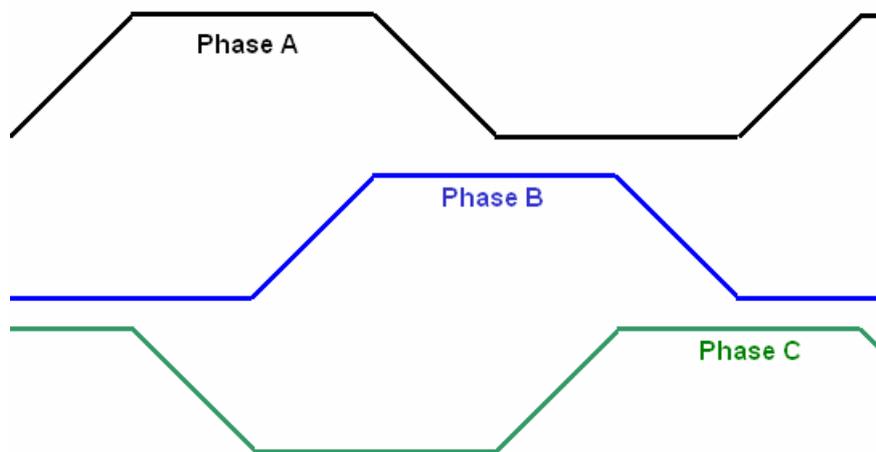
Prinzip Drehstrom-Brücke einer Motor-Phase

Jeder Anschluss des Motors kann so direkt mit dem **Pluspol (A+)** oder dem **Minuspol (A-)** des Akkus oder auch **offen** sein (beide FETs voll sperrend).



Phase A mit zugehöriger Steuerspannungen (Gate A+ und A-) der FETs

Für die drei Phasen A, B und C des Motors wird je eine solche Halb-Bücke benötigt. Durch gezielte Ansteuerung der insgesamt sechs FETs kann approximativ ein Drehstrom erzeugt werden. Die drei Phasen sind zeitlich um 120° verschoben.



angenäherter (Sinus-) Drehstrom

Man erkennt die beiden Zustände Phase an Pluspol und Minuspol deutlich. Dazwischen ist die Phase für jeweils 1/6-tel Motorumdrehung (60°) offen. In diesen Zeitabschnitten ist die Spannung nicht konstant die halbe Akkuspannung, wie man erwarten könnte, sondern steigt bzw. fällt. Das kommt daher, weil sich der Rotor dreht und in der offenen Wicklung eine Spannung induziert. Diese Tatsache macht man sich zu Nutze und baut darauf die Regelung auf. Wenn der Rotor synchron zum Drehfeld läuft, dann wird die halbe Akkuspannung etwa in der Mitte des Kommutierungszustandes nach 30° erreicht. Ist er zu schnell, erreicht er die halbe Akkuspannung früher bzw. wenn er zu langsam ist später. Man muss also die Zeitpunkte des Nulldurchgangs messen und kann dann sagen, ob das Drehfeld synchron mit dem Motor läuft und ggf. entsprechend korrigieren. Das ist das Prinzip der «sensorless» Regelung, also ohne spezielle Sensoren, die Auskunft über die Rotorposition geben.

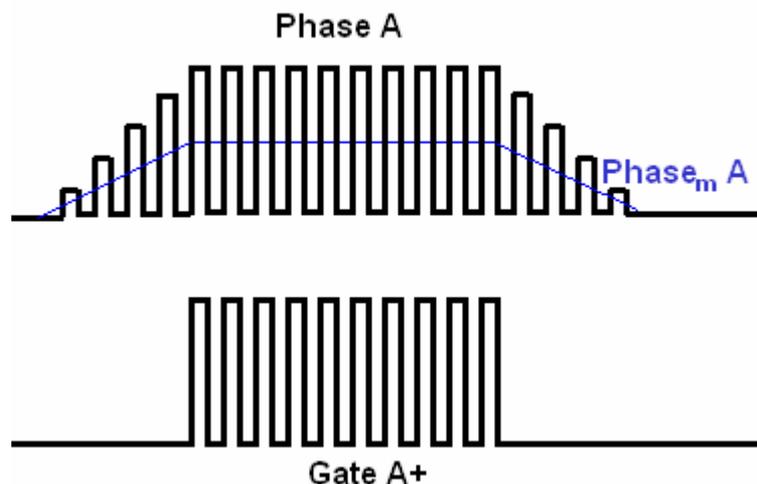
Bei der Messung des Nulldurchgangs durch den Komparator setzt nun das Prinzip des Timings an. In der Praxis muss der Nulldurchgang für einen stabilen Motorlauf eines 2-Polers ein wenig später als 30° nach Kommutierungswechsel erfolgen, beispielsweise 35° . Diese Verzögerung ($35^\circ - 30^\circ = 5^\circ$) wird gemeinhin Timing genannt. Den besten Wirkungsgrad hat der Motor bei einem Timing, das nahezu Null ist. Bei manchen Reglerexemplaren funktioniert die Regelung nicht gut genug, um diesen Zustand mit jedem Motor zu erreichen. Dann muß man ein größeres Timing benutzen.

In der Praxis haben sich 5° für eine Vielzahl unterschiedlicher Innenläufer-Motore bewährt. Die 5° gelten jedoch nur bei sinusförmiger Flußverteilung im Motor und relativ geringer Belastung. Hacker, Kontronik-Innenläufer und Lehner Motoren sind Sinus-Motoren, die in der Praxis stärker belastet werden und daher mit anderen Timings optimaler arbeiten. Folgende Faustregel hat sich bewährt: **Timing in $^\circ \sim 2 \times$ Polzahl des Motors**. Dies ist als Ausgangswert zu verstehen und eine weitere Korrektur um diesen Wert herum kann nötig sein.

Nun das war doch einfach? Jetzt wird es aber etwas komplexer.

Arbeitsweise bei Teillast

Da der Motor bei gleicher Akkuspannung für den Teillastbetrieb nun weniger Strom abkriegen soll, machen wir uns nun das Prinzip der Pulsweitenmodulation (PWM) zu Nutze. Wir «zerhacken» einfach die Steuerspannung der FETs, wodurch die Motorphase im Mittel weniger Strom erhält.



pulsweitenmoduliert Drehstrom-Brücke mit Mittelwert (Phase_m A)

So erhalten wir eine zerhackte Motorphase, welche aber weiterhin der angenäherten Sinusform folgt. Durch die Pulsweitenmodulation sinkt der Mittelwert der Spannung (Phase_m A) und somit der Strom bzw. Drehzahl.

Gründe für Verlustleistung im Regler – «Überhitzungsfall»

Am Regler stehen Spannungen an und fließen Ströme. Wo Spannung und Ströme gleichzeitig auftreten wird elektrische Leistung (= Spannung * Strom) in Wärme umgesetzt. Der Regler kann nur eine gewisse Leistung in Form von Wärme an seine Umgebung abgeben. Wird dieses Mass überschritten, erwärmt sich der Regler immer weiter bis er sich wegen Überhitzung selbst abschaltet (thermischer Überlastschutz) oder verbrennt (kein thermischer Überlastschutz).

Nachfolgend werden Gründe für Verlustleistungen im Regler aufgezeigt und wie man diesen entgegenwirken kann:

Ort des Verlusts	Grund	Minderung durch
FET-Drehstrom-Brücke (und Leiterplatten-Verluste)	<p>Beim «Abschalten» des FETs kann der Strom wegen der nachfolgenden Spule im Motor nicht unmittelbar folgen. Dadurch liegen am FET für kurze Zeit eine Spannung und ein Strom an = Verlustleistung. Bei Vollast-Betrieb ist diese Verlustleistung nicht weiter tragisch. Im Teillastbetrieb werden die Abschaltvorgänge durch die PWM (zerhacken) aber schlagartig vervielfacht und somit auch die Verlustleistung!</p> <p>Bei niedriger Induktivität (geringe Windungszahl) treten bei niedriger PWM-Frequenz hohe Stromspitzen auf. $P = R_i \int i^2 dt$. Dadurch entstehen hohe Verluste in den Innenwiderständen des Motors und des Stellers. Die R_{DSon}-Verluste der FETs gehen genauso wie die Wicklungswiderstände des Motors und der Kupferwiderstand der Leiterplatte noch in die Verlustrechnung ein: Wenn die PWM-Frequenz niedrig gewählt wird, ist die Stromwelligkeit höher, was wiederum zu erhöhten Verlusten führt. Eine hohe PWM-Frequenz führt zu mehr Schaltverlusten, die aber geringer als die Verluste durch die Stromwelligkeit sein können. Daher sollte man durch Probieren ermitteln bei welcher PWM-Frequenz der Steller am Kühlsten bleibt.</p>	<p>bei hoher Motorinduktivität (hoher Windungszahl): tiefste PWM-Frequenz am Regler wählen.</p> <p>bei kleiner Motorinduktivität (geringe Windungszahl): optimale PWM-Frequenz durch Probieren ermitteln</p> <p>Gaststellung 70%...99.9% vermeiden, 100% und 0...70% bevorzugen.</p>
Lange Akkukabel	Durch die PWM wirken lange Akku-Kabel ebenfalls wie Spulen, was den Eingang des Reglers zusätzlich belastet.	Kurze Akku-Kabel , Verlängerung zwischen Regler und Motor möglich.
Freilaufdiode	Verhindert Spannungsspitzen bei fallender Flanke der Motorphasen durch «Ableiten» der magnetischen Energie.	(nicht direkt beeinflussbar, da z.T. in den Reglern eingebaut)
BEC	Der Regler muss eine Konstantspannung für den Empfänger bereitstellen. Der Strom aus dem BEC für die Servos heizt den Regler noch zusätzlich auf.	evtl. auf BEC verzichten und Empfängerakku oder separate Akkuweiche verwenden.

Allgemein muss darauf geachtet werden, dass der Regler

- sich in «Zugluft» befindet, damit die anfallende Wärme effizient abgeleitet wird.
- bezüglich Strom und Anzahl Zellen korrekt ausgelegt ist.

Effiziente Kühlung

In der Praxis hat sich gezeigt, dass Falschluf auf der «Saugseite» eines Impellers nicht störend ist, vor allem nicht, wenn das Loch mittig zum Spinner geht. So lässt sich bei Modellen mit Hosenrohr eine einfache aber sehr effiziente Kühlung realisieren:

Wenn auf der Saugseite des Impellers ein Loch genau an der Zusammenführung des Hosenrohrs angebracht wird, bekommt der davor liegende Regler Zwangskühlung. Am besten den Regler noch in ein Rohr einpacken, welches bei der Zusammenführung des Hosenrohrs mittig zum Spinner steht. Zusammen mit einer NACA-Öffnung im Nasenbereich erhält man einen effizienten kühlenden Luftstrom, welche nicht nur den Regler sondern auch die Akkus umströmt.



Besteht keine Möglichkeit den Regler im Ansaugrohr zu platzieren, kann mit Kühlrippen und/oder einem günstigen CPU-Lüfter aus dem Computer gearbeitet werden.



Wahl des richtigen Reglers (ohne Rippenkühlkörper)

Bei der Auslegung eines Modellbau-Antriebs sind meist Zellenzahl und maximal zu erwartender Strom bekannt. Nun gilt es für diese Aufgabenstellung den richtigen Regler (ohne Rippenkühlkörper) zu wählen und zwar so, dass man nicht in die «Überhitzungsfall» tritt!

Die bekannte 80-20-Regel lässt sich auch hier als Faustregel verwenden:

**Den Regler maximal mit 80% des Dauerstroms betreiben (20% Reserve)
und
höchstens an 80% der maximal zulässigen Zellenzahl betreiben (20% Reserve)
(kumulativ!)**

Beispiel 1: max. erwarteter Strom 50A an 7s LiPo-Zellen

Hier sollte also gemäss der Faustregel ein Regler gewählt werden, der einen Dauerstrom von mindestens 62.5A verträgt und mit 9 LiPos (genau 8.75) betrieben werden kann. (z.B. Master 77-O-Flight)

Nun fragt sich aber manch einer, wie kann ich dann einen Motor mit 10s LiPos betreiben, wenn ein Regler für maximal 10 LiPo-Zellen zugelassen ist?

...deshalb das «kumulativ»: Kann bei einem der beiden Eckdaten die Reserve nicht eingehalten werden, muss der andere Wert eine umso höhere Reserve aufweisen.

Beispiel 2: max. erwarteter Strom 50A an 10s LiPo-Zellen

Da es z.Z. nur Regler ohne Kühlkörper bis 10 LiPo-Zellen gibt und somit keine Reserve möglich ist, muss also beim Strom eine höhere Reserve von 40% (20%+20%) eingerechnet werden. Somit darf der Strom von 50A nur gerade 60% des Dauerstroms sein. Unser Regler muss also mindestens einen Dauerstrom von 83.4A ertragen. (z.B. Master 90-Acro)

Regler mit Rippenkühlkörper

Regler mit Rippenkühlkörper (nicht zu verwechseln mit Kühlblech!) führen die Wärme wesentlich effizienter ab. Dadurch können die



20% Reserven meist beseitigt werden. So kann für das obige Beispiel 2 z.B. ein Schulze future-32.55K (10 LiPo, $I_{\text{Dauer}} 55\text{A}$, K = mit Rippenkühlkörper) in einem guten Luftstrom eingesetzt werden.

Akkukabellänge und seine tödliche Auswirkung

Generell gilt, dass die Gesamtsumme der Kabellängen **im** Akku und zwischen Akku und Drehzahlsteller-Leiterplattengrenze nicht über die Herstellerangabe hinausgehen darf! Leitungen sind Induktivitäten und führen bei den getakteten Drehzahlstellern (PWM) zu Spannungsspitzen von mehreren Hundert Volt, die von den außen angebrachten Kondensatoren (Low-ESR!) und internen Schutzschaltungen vernichtet werden müssen. Je länger die Kabel, desto mehr schädliche Energie müssen die Schutzschaltungen im Steller/Regler (die u. U. nicht dauerbelastbar sind) übernehmen. Dadurch werden sie heißer, als das von der reinen Betrachtung der in der oberen Tabelle angeführten Verluste erwartet werden würde.

Daher ist auf jeden Fall ratsam bei längeren Anschlußkabeln einen Drehzahlsteller zu benutzen, der für 14 LiPos (= 40 Nickel-Zellen z. B. Schulze future-40.160xx) konstruiert ist. Da z. Zt. aber die Steller/Regler bis 10 LiPo-Zellen preisgünstiger sind und somit keine Reserve möglich ist, muss in anderer Weise Reserve geschaffen werden.

Das macht man zum Einen durch die zusätzlichen Anbringung von Betriebsspannungskondensatoren mit niedrigem Innenwiderstand (Low-ESR-Kondensatoren aus dem Schaltnetzteilbau).

Zum Anderen muss beim Strom eine höhere Reserve von 40% (20%+20%) eingerechnet werden um möglichst wenig Verluste (= weniger Wärme) durch die FETs zu haben. Nur dann hat man die Chance, dass die von den Schutzschaltungen produzierte Wärme noch im Rahmen bleibt und nicht zur thermischen Überlast des Stellers/Reglers führt.

Die Überspannungsspitzen sind übrigens gemäss Hersteller die häufigste «Todesursache» der Steller/Regler, neben unsicherer Kontaktgabe durch verschmutzte und/oder abgenutzte Steckverbindungen, die dann zu Fehlkommutierungen in einem bürstenlosen System und damit wieder zu unerwartet hohen Spannungsspitzen führen können.

Fazit – Reserven schaffen

Die korrekte Programmierung, eine effiziente Kühlung, eine gesunde «Überdimensionierung» des Reglers und überlegter Umgang mit der Gasknüppel-Position verhindert die lästigen Motorabsteller wegen Regler-Überhitzung auch bei höheren Aussentemperaturen:

- Bei Motoren mit hoher Windungszahl tiefst mögliche PWM-Frequenz wählen
- Bei Motoren mit kleiner Windungszahl muss die optimale PWM-Frequenz ausprobiert werden.
- Regler in «Zugluft» anbringen.
- 80-20-Faustregel bei der Dimensionierung von Reglern ohne Rippenkühlkörper berücksichtigen.
- Maximal zulässige Kabellänge im Akku und zwischen Akku und Regler einhalten
- Gasstellung 0...70% und 100% bevorzugen

electric power – what else?!

www.s4a.ch/eflight

*Herzlichen Dank an Matthias Schulze (<http://www.schulze-elektronik-gmbh.de>) für seine technische Unterstützung.
Dieser Artikel ist im Magazin JetPower 1/2006 und Modell Flugsport 1/2008 erschienen.*