

# ELEKTRISCH, ABER RICHTIG

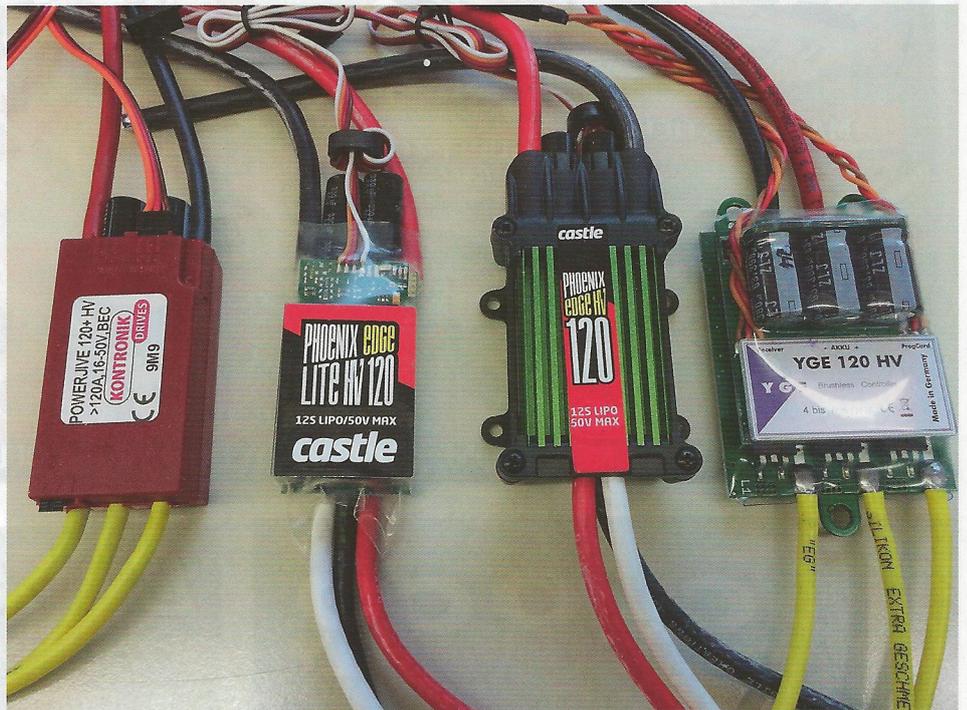
## BRUSHLESS-REGLER I – FUNKTIONSWEISE BEI VOLLLAST

In dieser und der nächsten Ausgabe beschäftigen wir uns mit der Funktionsweise aktueller Brushless-Regler und gehen der Frage nach, warum Regler im Teillastbereich heißer werden.

In der vorigen Ausgabe haben wir den Aufbau von bürstenlosen Gleichstrommotoren und das Prinzip eines drehenden Magnetfeldes kennengelernt. Dafür sind drei um 120° versetzte sinusförmige Phasen nötig – auch Drehstrom genannt. Aber wie kann denn aus dem Gleichstrom der Batterie ein sinusförmiger Wechselstrom für die Ansteuerung des Motors erzeugt werden? Diese Aufgabe übernimmt der Brushless-Regler.

Das Blockschaltbild (Bild 1) zeigt die abstrahierten Hauptbestandteile, beziehungsweise Funktionen des Reglers für bürstenlose Motoren. Die Signalverarbeitung arrangiert die Signale des Empfängers (Gasstellung, Entstörung) und die im Regler verfügbaren Werte (z.B. Pulsweitenmodulation, Temperaturüberwachung). Die Motorsteuerung zeichnet verantwortlich für unterschiedliche Funktionen für die Ansteuerung des Motors (sauberen Anlauf des Motors, Timing, Phasen-Kommutierung und -Synchronisation, Bremse, Drehzahlbegrenzung und mehr). Treiberstufe und Leistungsstufe erzeugen die nötigen Signalformen damit sich der Motor zu drehen beginnt. Zu guter Letzt misst der Komparator die Phasen-Nulldurchgänge zur Sicherstellung, dass der Drehstrom des Reglers und die Drehzahl des Motors synchron laufen.

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

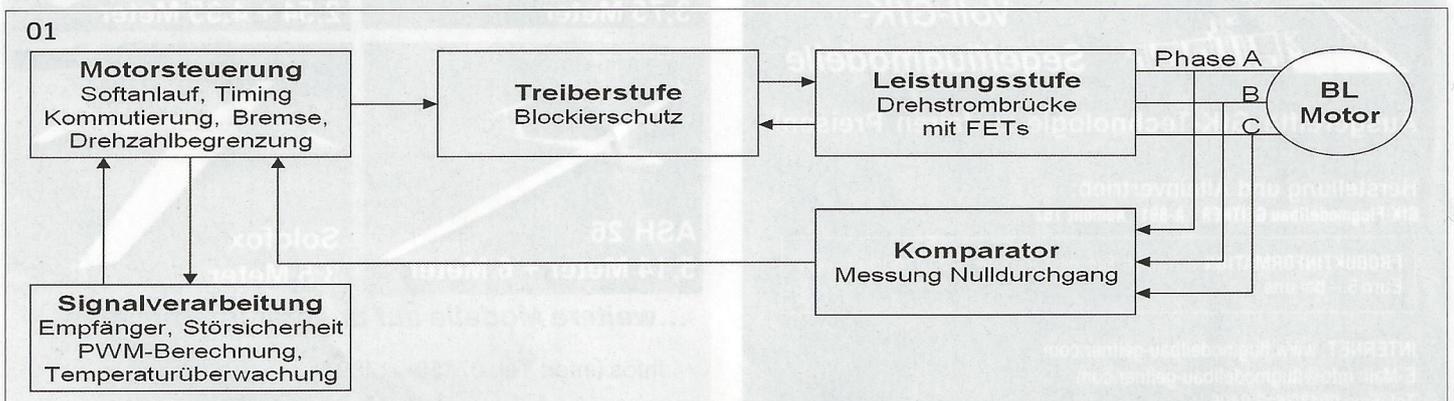


des FETs ist bereits seit den 40er Jahren bekannt, konnte jedoch erst mit der Beherrschung der Silizium-Technologie in den 60er Jahren umgesetzt werden. Ein FET hat drei Anschlüsse: Zuleitung (Source), Ableitung (Drain) und die Steuerleitung (Gate). Durch ein elektrisches Feld, das durch eine kleine Steuerspannung zwischen Gate und Source hervorgerufen wird, lässt sich die Leitfähigkeit (Widerstand) zwischen Source und Drain beinahe leistungslos be-

einflussen.

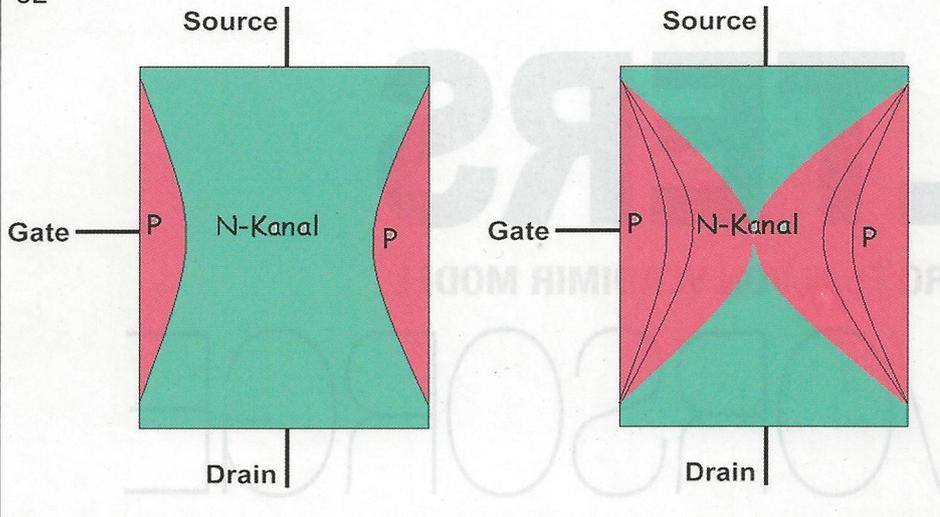
Für unsere Anwendung in der Leistungsstufe des Reglers verwenden wir den FET wie einen Schalter (Bild 2): Voll leitend (Schalter geschlossen) oder voll sperrend (Schalter offen).

Wie im vorigen Heft beschrieben, will der Brushless-Motor von einer Drehstrom-Sinus-Spannungsquelle angetrieben werden. Im Modellbau steht uns aber nur ein Akku zur Verfügung, was einer Gleichspannungsquelle



01 | Das Blockschaltbild eines Brushless-Reglers

02



## 02 | Voll leitender, beziehungsweise voll sperrender Feld-Effekt-Transistor (FET)

entspricht. Somit muss der Regler eine Spannung erzeugen, die dem Sinusverlauf angenähert wird. Dies wird durch eine Halb-Brücke (auch 1/3 Drehstrombrücke genannt), bestehend aus zwei FETs (Feld Effekt Transistor) erzielt.

Jeder Anschluss des Motors kann so direkt mit dem Pluspol (A+) oder dem Minuspol (A-) des Akkus verbunden werden (Bild 4). Zusätzlich kann die Phase auch offen sein (beide FETs voll sperrend). 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 (Bild 5). Die drei Phasen sind zeitlich um 120° verschoben.

Man erkennt die beiden Zustände «Phase an Pluspol» und «Phase an 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, beziehungsweise fällt. Das kommt daher, weil sich der Rotor dreht und in der offenen Wicklung des Motors eine Spannung induziert. Diese Tatsache macht man sich zu Nutze und baut darauf den Regelkreis auf. Wenn der Rotor synchron zum Drehfeld läuft, dann wird

die halbe Akkuspannung etwa in der Mitte des Kommutierungszustandes nach 30° erreicht. Läuft der Motor zu schnell, erreicht die offene Phase die halbe Akkuspannung früher, wenn der Motor zu langsam läuft später. Man muss also die Zeitpunkte des Nulldurchgangs (Bild 4) messen und kann daraus schließen, ob das Drehfeld synchron mit dem Motor läuft oder – wenn erforderlich – die Drehfrequenz 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 Zweipols ein wenig später als 30° nach Kommutierungswechsel erfolgen, beispielsweise bei 35°. Diese Verzögerung von 5° (= 35°-30°) wird gemeinhin Timing genannt. Den besten Wirkungsgrad hat der Motor bei einem Timing, das nahezu Null ist. Bei manchen Regler-Exemplaren funktioniert damit die Regelung nicht gut genug, um diesen Zustand mit jedem Motor zu erreichen – der Motor läuft nicht sauber an oder dreht im Extremfall gar nicht mehr. Dann muss ein größeres Timing benutzt werden. In der Praxis bewährt sich das sogenannte „Auto-Timing“. Der Regler erkennt

selbständig, welches Timing für ein optimales Laufen notwendig ist. Für Regler die manuell konfiguriert werden müssen, haben sich 5° für eine Vielzahl unterschiedlicher Innenläufer und 15-25° für Außenläufer bewährt. Die Faustregel Timing [in °] ~ 2x Polzahl des Motors liefert einen guten Ausgangswert. Eine weitere Korrektur um diesen Wert herum kann nötig sein.

Um im nächsten Heft die Funktionsweise eines Reglers im Teillastbereich 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 (Bild 6).

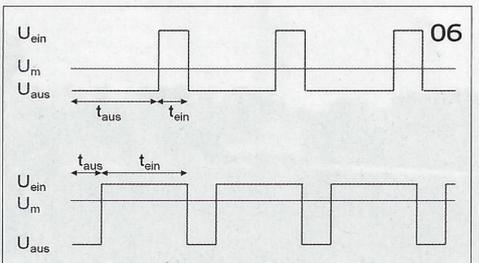
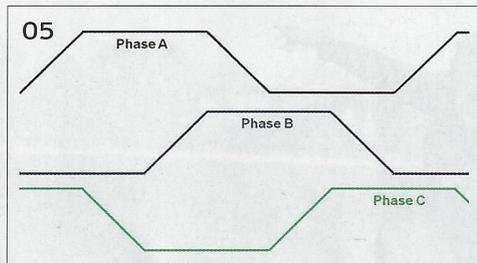
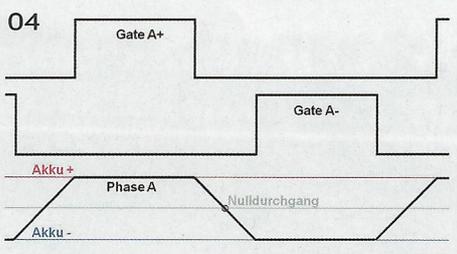
Somit gilt für den Mittelwert der Spannung:

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

Das kann man sich wie einen Lichtschalter vorstellen, den man sehr schnell ein- und ausschaltet: Ist die Ausschaltzeit größer als die Einschaltzeit erscheint das Licht im Durchschnitt ( $U_m$ ) dunkler. Ist hingegen 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 sehr hohe Wirkungsgrad, beziehungsweise die geringe Verlustleistung. Die verwendete Frequenz liegt meist im Bereich von einigen 10 kHz.

Markus Müller

## 07 | FETs der Drehstrombrücken an einem „YGE 320 HV“-Regler



04 | Phase A mit zugehöriger Steuerspannung (Gate A+ und A-) 05 | Angenäherter (Sinus-) Dreiphasenstrom  
06 | Pulsweitenmodulation (PWM) mit gleicher Taktfrequenz und unterschiedlichen Ein-/Ausschaltzeiten