

ELEKTRISCH, ABER RICHTIG

DER BÜRSTENLOSE GLEICHSTROMOTOR

In dieser und den folgenden Ausgaben gehen wir auf die Elemente des modernen elektrischen Modellantriebs ein: Motor, Regler und Akku. Der bürstenlose Gleichstrommotor (engl. brushless DC motor) war die erste Evolution zur elektrischen Revolution im Modellbau.

Obwohl Michael Faraday bereits 1821 die Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie demonstrierte, wurde erst 1837 der „erste Elektromotor“ von Thomas Davenport patentiert. 1962 stellten T.G. Wilson und P.H. Trickey ein neues revolutionäres Motorendesign vor. Im Gegensatz zu den bis dahin verwendeten Bürstenmotoren kam ihr Motor ohne mechanische Phasenumkehr (Kommutierung) aus – der Brushless-Motor (kurz: BL-Motor) war geboren. Die Entwicklung zur Herstellung von Permanentmagneten aus Seltener-Erde in den 60er-Jahren war eine wichtige Voraussetzung für die industrielle Herstellung von bürstenlosen Gleichstrommotoren. Die Verfügbarkeit von Permanentmagneten und die Transistor-Technologie führten in den 80er-Jahren zur Entwicklung von leistungsstarken BL-Motoren, die herkömmlichen Bürstenmotoren weit überlegen waren. Zu Beginn der 90er-Jahre kamen die ersten, eigens für den Modellbau konzipierten Motoren auf den Markt. Die BL-Motoren haben den Modellflug revolutioniert und bilden heute einen unverzichtbaren Bestandteil.



01 | Außenläufer vs. Innenläufer auf einen Blick 02 | Die Hauptbestandteile eines typischen Innenläufers 03 | Und hier die Hauptbestandteile eines Außenläufers



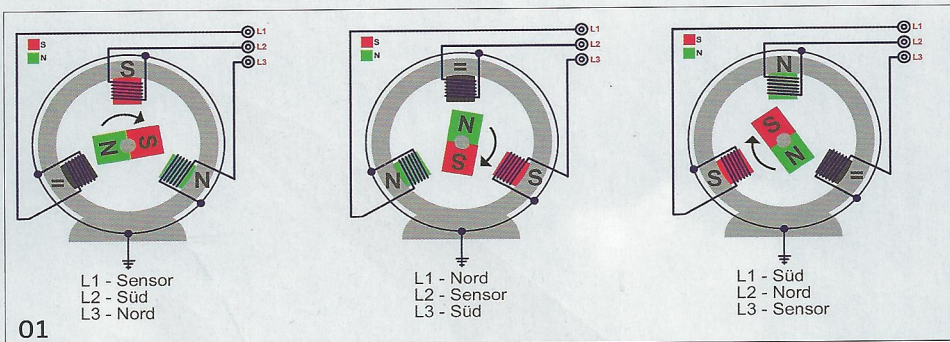
Der bürstenlose oder auch elektronisch kommutierte Motor besteht aus einem Rotor mit den aufgeklebten Permanentmagneten und dem Stator mit den Kupferwicklungen. Die offensichtlichen Aufbauvarianten sind der Innen- und Außenläufer. Beim Innenläufer läuft der Rotor innerhalb des Stators. Der Stator ist mit dem Gehäuse verklebt. Da die meiste Abwärme im Stator anfällt, ist die Wärmeabfuhr bei kompakter Bauweise eines Innenläufers sehr effizient. Die Leistungsdichte (W/kg) ist folglich höher als bei einem Außenläufer. Die im Zusammenhang mit dem Außenläufer oft genannte Glocke ist der Rotor, der sich außerhalb um den Stator dreht. Durch die konstruktiv bedingte größere Rotoroberfläche lassen sich mehr Permanentmagnete platzieren. Damit lassen sich tiefere spezifische Drehzahlen (Kv) bei kompakter Bauweise erzielen. Oft wird den Außenläufern höhere Drehmomentstärke (Drehmomentkonstante K_t) nachgesagt. Das ist nur bedingt

korrekt, denn $K_t \times K_v$ bleibt konstant und somit ist die vermeintliche Drehmomentstärke eine Folge des tieferen K_v 's.

Dynamisch gewuchtete Rotoren (inkl. Welle) erhöhen die Laufruhe. Im Gegensatz zum Bürstenmotor ist der bürstenlose Rotor kontaktlos und macht ihn damit äußerst wartungsarm.

Durch die Magnetstärke und Anzahl der Magnete lassen sich die spezifische Drehzahl (K_v) beeinflussen. Überhitzten Permanentmagnete verlieren sie teilweise oder gar vollständig an Stärke. Drehzahllimits eines Motors sind stets in den auftretenden Fliehkräften der auf dem Rotor mitdrehenden Magneten bedingt. Bei Wettbewerbsmotoren werden die Magnete von Innenläufern oftmals durch Faserverbundstoffe armiert, um ein höheres Drehzahllimit zu erzielen.

Der Stator besteht aus mehreren gestanzten Einzelblechen, welche zum Stator laminiert werden. Materialwahl, Blechdicke und -schnitt sowie die Anzahl der Statorpole sind entschei-



Strom Φ magnetischer Fluss

Ohm'sches Gesetz:

Hopkinson'sches Gesetz:

$$U = Ri * I$$

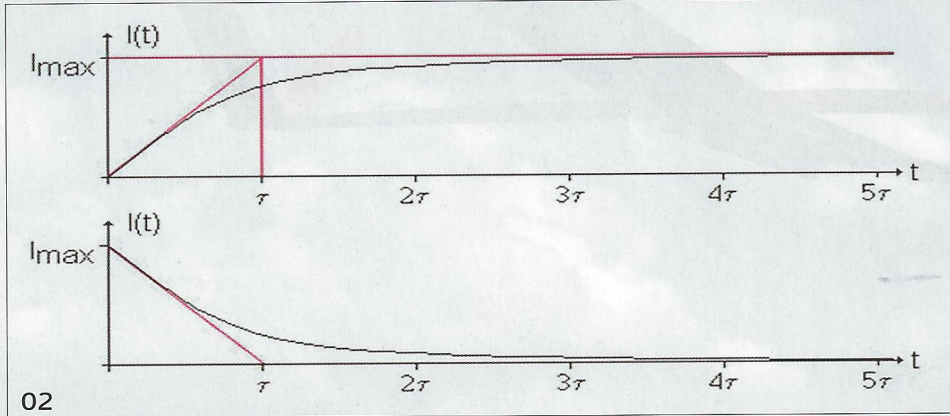
$$\Phi = Rm * \Phi$$

Die Spezifikationen eines Motors charakterisieren in vereinfachter Form diese beiden Kreise und bilden die Ausgangslage für heutige Modellbauantriebs-Calculatoren:

Kv: Spezifische Drehzahl ohne Last (U/V)

Ri: Ohm'scher Innenwiderstand (Ohm) charakterisiert die elektrischen Verluste

Io: der Leerlaufstrom (A) ist ein Maß für die magnetischen Verluste wie auch Reibungsverluste



01 | Die Funktionsweise eines bürstenlosen Motors. Bild: Peter Henning, www.heli-planet.de 02 | Der Stromverlauf einer Spule

dende Konstruktionsmerkmale, welche die Eisenverluste und Flusseigenschaften beeinflussen. Die Statorschlitze nehmen die Wicklung auf.

Die Drei-Phasen-Wicklungen werden in einer definierten Anzahl Windungen um den einzelnen Statorpol maschinell oder in Handarbeit gewickelt. Handgewickelte Statoren erreichen eine höhere Kupferdichte, was sich positiv auf den Wirkungsgrad auswirkt. Die Windungen können in Delta- (D) oder Sternform (Y) angeordnet sein. Die Windungszahl und die Wicklungsanordnung beeinflusst die spezifische Drehzahl maßgeblich. Je geringer die Windungszahl desto höher die Drehzahl.

Entgegen seinem Namen basiert der bürstenlose Gleichstrommotor nicht auf dem Prinzip der Gleichstrommaschine, sondern auf jenem der Drehstrom-Synchronmaschine. Betrachten wir den einfachsten Fall eines bürstenlosen Motors: Der Stator besitzt drei räumlich um 120 Grad 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, die zeitlich um 120° versetzt sind, wird ein drehendes Magnetfeld erzeugt – auch Drehstrom genannt. Dieses drehende Magnetfeld zieht nun den Permanentmagneten des Rotors hinter sich her – der Motor beginnt sich zu drehen. Daraus erkennt man bereits ein Grundproblem des BL-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 erst gar nicht an.

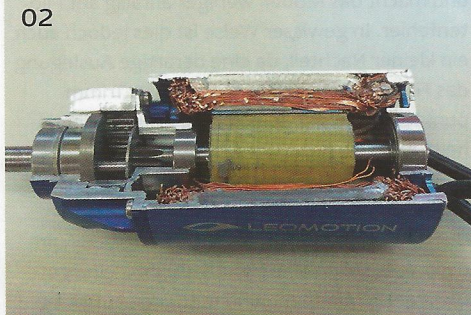
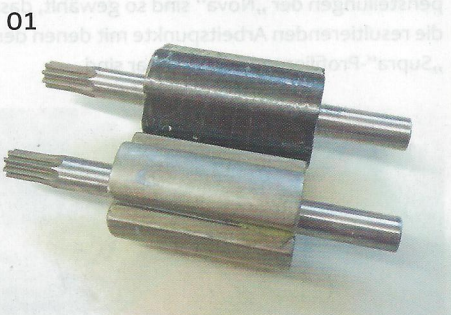
Ein BL-Motor wird durch seinen elektrischen wie auch magnetischen Kreis definiert:

elektrischer Kreis:	magnetischer Kreis:
U Spannung	Φ magnetische Durchflutung
Ri ohmscher Innenwiderstand	Rm magnetischer Widerstand

Die Wicklungen eines elektrischen Motors sind aus elektrotechnischer Sicht Spulen, beziehungsweise ein induktiver Widerstand. In einer Spule kann sich 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. 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.

Dieses Wissen benötigen wir für die nächste Ausgabe. Denn dort gehen wir auf die Funktionsweise der Regler für bürstenlose Motoren ein und lüften das Geheimnis, warum ein Regler im Teillastbereich heißer wird als unter Volllast.

Markus Müller
www.eCalc.ch



01 | Ein normaler und ein armierter Rotor 02 | Die im Text erwähnten Wicklungsarten D und Y 03 | Die offene Bauweise mit innenbelüftetem Rotor