

WIRKUNGSGRAD VON ELEKTROMOTOREN

In diesem Heft steht, wie man mir gesagt hat, ein Artikel darüber, wie man nur mit verschiedenartigen Luftschrauben und Drehzahlmessungen die Leistung von Modellverbrennungsmotoren genau festlegen kann. Es wäre falsch, zu glauben, daß die Elektromotoriker nicht mit ähnlichen Kunststückchen aufwarten könnten. Klein-Elektro-Motoren lassen sich allein mit Hilfe eines Meßinstrumentes genau berechnen. Ein genaues Milliampereometer genügt, um zu erfahren, welchen besten Wirkungsgrad ein E-Motor hat, bei welcher Stromaufnahme seine Drehzahl für höchste Leistung liegt, wie hoch die innere Reibung ist; man kann dies sogar direkt am Verkaufstisch im Geschäft festlegen und braucht dazu, außer dem Motor und dem Meßinstrument, nur noch eine Batterie und zwei Finger, um die Achse des Motors festzuhalten. Mehr noch: wenn man einen Motor, den man noch nie gesehen hat und von dem man überhaupt nicht weiß, wie er gebaut ist, in einen Betonklotz so eingegossen vorgesezt bekäme, daß nur die Zuleitungsdrähte herausguckten, man könnte allein mit dem Meßinstrument alle technischen Eigenschaften dieses Motors messen, ohne Drehzahl und Drehmoment festzulegen. Der Kurzschlußstrom läßt sich nämlich nach einer Messung mit dem Ohmmeter errechnen.

Das gilt ganz streng für alle Motoren mit eisenlosem Läufer, sogenannte Glockenankermotoren, also Distler, Punker, Escap, Faulhaber (Micro-Max), um wenigstens diejenigen zu nennen, welche im Modellbau bekannt sind.

Das allererste, was an einem Motor interessiert, ist der Wirkungsgrad. Er sagt, wieviel der Bursche von der elektrischen Leistung, die er frißt, wieder an mechanischer Leistung abgibt, wie wirksam der Kerl seine elektrische Nahrung verdaut, ganz einfach: welche konstruktive Qualität der Motor hat. Bei allen Motoren zumindest, die aus Batterien betrieben werden, braucht man unbedingt einen hohen Wirkungsgrad, damit nicht die wertvolle Batterieladung zum großen Teil nutzlos vertan wird.

Den Wirkungsgrad von Glockenankermotoren kann man ganz einfach nach folgender Formel berechnen:

$$\eta_{\max} = \left(1 - \sqrt{\frac{I_L}{I_k}}\right)^2$$

Dabei ist η der Wirkungsgrad als Dezimalbruch der aufgenommenen Leistung.

$$I_L = \text{Leerlauf-Stromaufnahme} \\ I_k = \text{Kurzschluß-Stromaufnahme}$$

Dies ist keine Geheimformel der Elektrohener, sondern sie wird zum Gebrauch durch das Publikum wärmstens empfohlen. Sie verlangt nur die Messung von I_L und I_k . Das geht so: Nimm den Motor der dich interessiert, schließ ihn an eine Batterie an mit einem Meßinstrument dazwischen und laß ihn sausen, so schnell wie er will. Miß den Strom; das ist dann der Leerlaufstrom I_L . Dann halte die Achse des Motors fest, so daß er sich nicht mehr drehen kann und miß wieder den Strom, der jetzt sehr viel höher sein wird — das ist der Kurzschlußstrom I_k . Der wird bei den Modellbauern oft auch „Würgestrom“ genannt, weil es der Strom ist, den der Motor in „abgewürgtem Zustand“ aufnimmt.

Die Messung am Motor ist damit beendet, der Rest ist Rechnen.

Wurzelziehen aus Brüchen ist zwar vielen so unangenehm wie das Wurzelziehen von abgebrochenen Zähnen, aber probieren wir es doch einmal: stellen wir uns einen Glockenankermotor vor, der mit 4,5 Volt betrieben wird. Der Leerlaufstrom I_L sei 10 mA, der Kurzschlußstrom 200 mA (das trifft etwa für den Distler-Motor zu, der mit 4,5 Volt aus einer Taschenlampenbatterie betrieben wird. Der Motor hat 22 Ohm Wicklungswiderstand).

$$\frac{I_L}{I_k} \text{ ist also } \frac{10}{200} = \frac{1}{20}$$

Jetzt kommt die Wurzel:

$$\sqrt{\frac{1}{20}} = \frac{1}{\sqrt{20}}$$

Was gibt mit sich selbst multipliziert 20? Preisrätsel? Nein, Rechenschieber!

$$\sqrt{20} = 4,48$$

Also ist

$$\sqrt{\frac{1}{20}} = \frac{1}{4,48}$$

und wieder Rechenschieber:

$$\frac{1}{4,48} = 0,223$$

Das muß man jetzt von 1 abziehen; die einzige Operation für die man Papier braucht:

$$\begin{array}{r} 1,000 \\ - 0,223 \\ \hline = 0,777 \end{array}$$

Jetzt ist der Klammerausdruck aufgelöst, wir müssen nur noch das Ergebnis quadrieren:

$$0,777^2 = 0,777 \times 0,777 = 0,6037 \dots$$

Der Motor ist also im besten Falle fähig (bei der Spannung, bei der I_L und I_k gemessen wurden), von der aufgenommenen elektrischen Leistung 0,603 als mechanische Wellenleistung wieder abzugeben, das heißt:

der maximale Wirkungsgrad η_{\max} ist 0,603 oder 60,3 %.

Auch die raffinierteste Laborprüfung mit allen Instrumenten wird ergeben, daß der beste Wirkungsgrad eines 6-Volt-Distler, der nicht besonders gut eingelaufen wurde, bei 4,5 Volt knapp über 60 % liegt.

Auf diese Weise läßt sich tatsächlich ganz rasch der Wirkungsgrad jedes Glockenankermotors bestimmen; wie genau, hängt nur davon ab, wie genau man das Verhältnis von Leerlauf- zu Kurzschlußstrom abliest und wie genau man rechnet.

Nicht so einfach ist es dagegen, klarzulegen, wie diese Formel von Dipl.-Ing. Brinkmann, Frankfurt/Main, zustande kommt; es steckt nämlich ein ganz verfluchtes Differential darin, und dies hier ist ja letzten Endes keine Zeitschrift für Nachhilfeunterricht im Differentialrechnen. Trotzdem läßt sich einfach verständlich machen, daß der Wirkungsgrad mit dem Verhältnis von Leerlaufstrom zu Kurzschlußstrom zusammenhängen muß und daß dieses Verhältnis letzten Endes auch alle Verluste, die dem Motor durch Lagerreibung, Widerstand der Kupferleitungen, Stromaufnahme bei bester Leistungsabgabe aufzeigt.

1. Die Verbindung der Meßfeile von Leerlaufstrom und Kurzschlußstrom, die auf der Skala des Motordrehmoments aufgetragen sind, ergibt Stromaufnahme-Gerade für verschiedene Belastungen des Motors. Die Verlängerung dieser Geraden nach links zeigt das Drehmoment, das der Motor selbst zur Überwindung der inneren Reibung (Lagerreibung, Bürstenreibung, Unwucht, auch zu einem geringen Teil Luftwiderstand) braucht, um seine Leerlaufdrehzahl zu erreichen. Der zweite Verlustfaktor in einem E-Motor, der Kupferverlust, der elektrische Verlust durch den Widerstand der Drahtwindungen, der in allen diesen Diagrammen nicht eingetragen ist, hat im Leerlauf keinen nennenswerten Betrag mehr, weil ja ein ganz geringer Strom fließt: Im Leerlauf erwärmt sich der Motor nicht. Das Leerlaufdrehmoment, mit mechanischen Meßmitteln nicht feststellbar, ist die Strecke vom ideellen Leerlauf I_x bis 0, bezeichnet mit Reibungsdrehmoment M_{dr} .

Erste Überlegung: beim Leerlauf gibt der Motor keinerlei Leistung ab, seine Drehzahl ist in diesem Laufzustand am höchsten, seine Stromaufnahme am geringsten.

In abgewürgtem Zustand aber gibt der Motor sein höchstes Drehmoment $M_{d,max}$ ab (man spürt ja direkt, wie sich das Ächseln zwischen den bremsenden Fingern drehen will), seine Stromaufnahme ist am höchsten, aber Leistung gibt er auch in diesem Zustand nicht ab, denn seine Drehzahl ist null. Und die Leistung ist auch bei Elektro-Motoren das Produkt aus Drehzahl mal Drehmoment.

Der Punkt des höchsten Wirkungsgrades muß also — das ist an sich ganz klar — zwischen Leerlauf und voller Bremsung liegen.

Zweite Überlegung: es stimmt gar nicht, daß der Motor im Leerlauf nichts leistet! Er rennt zwar völlig nutzlos, aber unsinnig umherzurrennen ist letzten Endes auch eine Leistung. Der Motor gibt im Leerlauf nur keine nach außen verwertbare Leistung ab, aber leisten muß der Kerl trotzdem etwas, nämlich das, was notwendig ist, um die inneren Lagerreibungen usw. zu überwinden. Die Leerlaufleistung ist ganz einfach das, was notwendig ist, um den Anker, so wie er gebaut ist, mit der erreichten Leerlaufdrehzahl zu drehen. Folglich hat der Motor auch im Leerlauf ein Drehmoment. Wäre für den Leerlauf überhaupt keine Leistung notwendig, so würde der Motor im Leerlauf logischerweise auch keinen Strom aufnehmen. Ein Motor, der im Leerlauf nichts braucht, wäre ideal. Deshalb gibt es ihn nicht.

Das außen am Motor niemals meßbare Leerlaufdrehmoment kann man aber mathematisch-graphisch darstellen; zeichnen wir einmal ein Diagramm wie in Abb. 1. Auf der waagerechten Achse ist nicht, wie auf Diagrammen von Modelldieseln, die Drehzahl aufgetragen, sondern das Drehmoment. Wie groß dieses Drehmoment nun im einzelnen ist, interessiert überhaupt nicht, wir nehmen einfach an, das maximale Drehmoment im abgewürgten Zustand, das $M_{d,max}$ habe den Wert 5; deshalb ist die waagerechte Achse des Diagramms in fünf Teile aufgeteilt. Beim

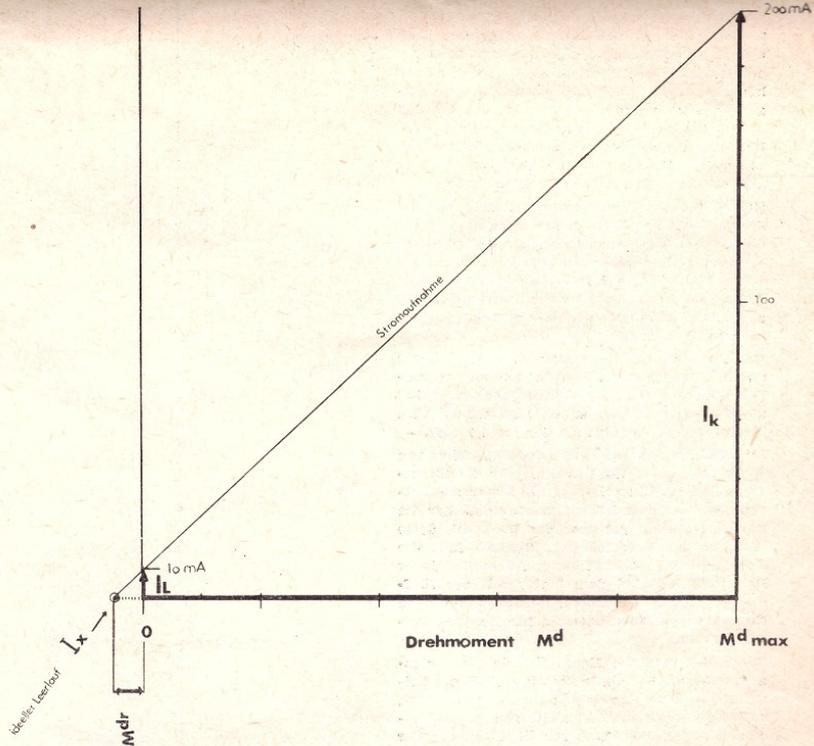


Abb. 1

abgegebenen Drehmoment 0 gehen wir 10 mm senkrecht nach oben; das ist das aufgetragene Maß für die Leerlaufstromaufnahme, für I_L . Bei $M_{d,max}$ gehen wir 200 mm nach oben, das ist die Stromaufnahme beim Abwürgen, der Kurzschlußstrom I_k . Verbindet man die Spitzen der Meßfeile I_L und I_k durch eine Gerade, so gibt sie genau an, wie die Stromaufnahme des Motors mit wachsender Belastung steigt.

Man kann diese Gerade der Stromaufnahme einfach über die senkrechte Nullachse hinaus nach links verlängern, bis sie die waagerechte Achse, auf der das Drehmoment aufgetragen ist, schneidet. Der Schnittpunkt ist dann der Punkt des ideellen Leerlaufs, bei dem der Motor keinen Strom mehr aufnehmen würde, der Punkt I_x . Und die Strecke $I_x/0$ gibt das Drehmoment an, das der Motor innerlich zum Leerlauf benötigt. Das äußerlich nicht meßbare Drehmoment also, das allein zum Leerlauf bzw. zur Überwindung der Lagerreibung notwendig ist. Je steiler die Kurve der Stromaufnahme verläuft, d. h. je geringer der Leerlaufstrom im Verhältnis zum Kurzschlußstrom ist, umso geringer ist auch das Leerlaufdrehmoment, das ein Maß für die inneren Motorverluste ist. Dies ergibt sich schon aus dem einfachsten Dreiecks-Satz.

Beweis: nehmen wir einen Motor, der im Leerlauf statt 10 m/A den fünffachen Betrag von 50 m/A aufnimmt. Dann verläuft

die Kennlinie der Stromaufnahme wesentlich flacher. Sie schneidet auch viel weiter links die Achse der Drehmomentaufnahme; das Leerlaufdrehmoment ist bei diesem Motor wesentlich größer.

Ideelle Leerlaufdrehzahl

Der ideale Motor, der keine inneren Reibungsverluste hätte, würde im Leerlauf eine höhere Drehzahl erreichen als der Motor mit Verlusten. Auch diese „ideelle“ Leerlaufdrehzahl läßt sich ohne weiteres aus den beiden Messungen des Leerlauf- und des Kurzschlußstromes konstruieren. Man zeichnet dazu einfach noch die Linie der Drehzahlen über dem Drehmoment ein; das ist in dem Diagramm 2 die punktierte Linie. Im Leerlauf habe man die Drehzahl von 10 000 gemessen, angenommen. Das ist der Punkt N_L . In abgewürgtem Zustand ist die Drehzahl null. Das braucht man natürlich nicht zu messen, denn das weiß man von vorneherein. Folgedessen verläuft die Kennlinie der Drehzahl über dem Drehmoment von dem Punkt N_L abwärts bis zum Punkt $M_{d,max}$, dem Punkt des Würge Drehmoments. Bei einem guten Glockenankermotor ist diese Kennlinie der Drehzahl eine Gerade. Auch diese Gerade kann man über die senkrechte Nullachse hinaus nach links verlängern, bis sie das Lot über der idea-

2. Gepunktet ist auf diesem Diagramm auch eine angenommene Gerade für die Drehzahl eingetragen. Beim Leerlauf ist die Drehzahl am höchsten: n_1 = Leerlaufdrehzahl. Die Verlängerung der Drehzahlgeraden bis zum Lot auf I_x zeigt die ideale Leerlaufdrehzahl n_1 die Drehzahl, die der Motor erreichen würde, wenn es in ihm überhaupt keine Verluste gäbe, er also ein vollkommen idealer Motor wäre.

Neben der schon bekannten Geraden für die Stromaufnahme zeigt dieses Diagramm noch die Gerade für einen Motor, der bei gleichem I_k eine fünfmal höhere Leerlaufstromaufnahme I_1 hat. Man sieht, daß in diesem Motor ein sehr wesentlich größeres Leerlaufdrehmoment für die innere Reibung notwendig ist, denn $I_{x2} = 0$ ist erheblich länger als $I_{x1} = 0$.

Das Lot auf I_{x2} zeigt weiterhin, daß dieser zweite angenommene Motor auch eine erheblich höhere ideale Leerlaufdrehzahl (n_{x2}) hat als der erste Motor, er ist also weiter vom idealen Motor entfernt als der erste Motor.

Eine Gerade von der Spitze des Meßpfelles von I_1 zu Md_{max} ist die Kennlinie für die Stromaufnahme zur Überwindung der Motorreibungsverluste über dem Drehmoment. Je stärker die Belastung, desto geringer die Drehzahl, desto geringer die Motorreibung. Deshalb fällt die Kennlinie der Motorreibung. Aber: Bei jeder Belastung fällt bei dem Motor mit der fünfmal so hohen Leerlauf-Stromaufnahme auch fünfmal soviel Betriebsstrom für die Reibungsverluste an.

Betrachtet man die Kennlinie für die Stromaufnahme als Kennlinie für die elektrische Leistungsaufnahme (bei 1 Volt Betriebsspannung), so stellt r auch die Kennlinie für die elektrische Leistungsaufnahme zur Überwindung der Reibungsverluste dar.

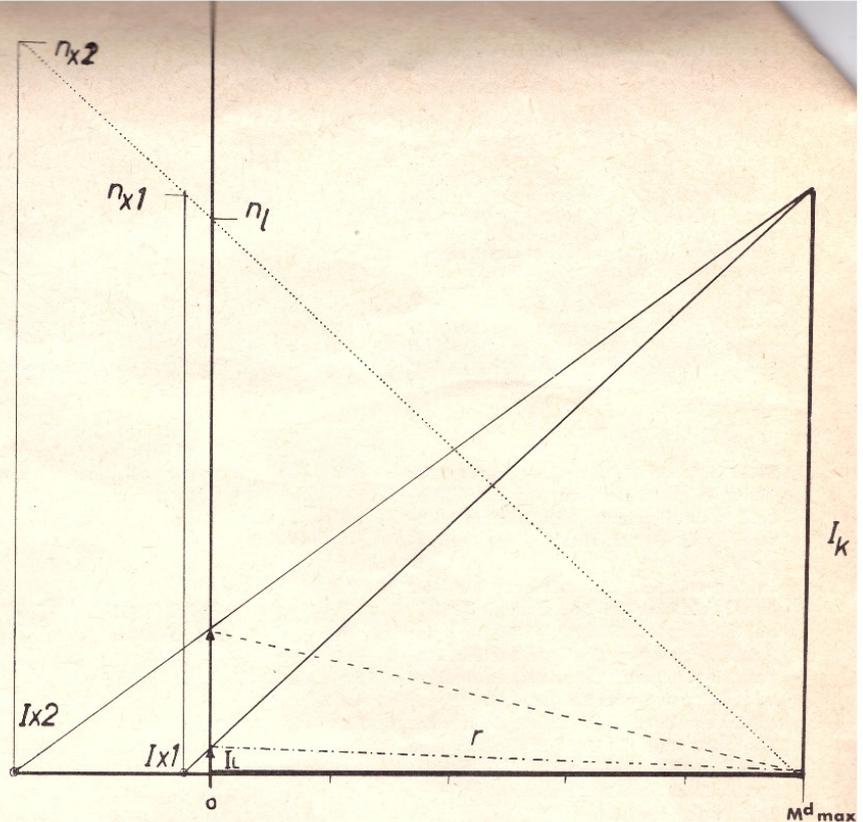


Abb. 2

len Stromaufnahme I_x schneidet. Die Strecke $I_x - N_x$ gibt dann die ideale Leerlaufdrehzahl an. Prüfen Sie bitte nach: der Motor mit der größeren Leerlaufstromaufnahme hätte eine sehr viel höhere ideale Leerlaufdrehzahl als der Motor mit der niedrigeren Leerlaufstromaufnahme. Dies deutet klar darauf hin, daß die höhere Leerlaufstromaufnahme in erster Linie von höheren Reibungswiderständen im Motor Nr. 2 herrührt.

Kurve der Reibungsverluste

Nun ziehen wir noch einen weiteren Strich in dem bereits gezeichneten Diagramm; hier ist das auf einem neuen Diagramm dargestellt auf Abb. 2, in dem genau die gleichen Werte der Leerlauf- wie auch der Kurzschlußstromaufnahme wie in Abb. 1 eingetragen sind. Wir ziehen eine Gerade vom Punkt der Leerlaufstromaufnahme auf der Nullachse bis zum Punkt Md_{max} , dem maximalen Drehmoment. Wir haben dann eine Linie, welche bei jeder beliebigen Belastung des Motors zwischen 0 und Md_{max} die jeweilige Stromaufnahme angibt, welche auf die Reibungsverluste im Motor allein entfallen. Man sieht, daß die Reibungsverluste immer geringer werden, je stärker der Motor belastet ist. Warum? Ganz einfach deshalb, weil die Reibungsverluste in

gleichem Maße zurückgehen, wie die Drehzahl des Motors zurückgeht. Im Leerlauf ist die Motordrehzahl am höchsten; ganz klar, daß dann auch die Reibungsverluste am größten sein müssen. Wenn aber der Motor vollständig abgewürgt ist, also bei Md_{max} sind auch die Reibungsverluste null, denn es gibt keine Reibungsverluste, wenn sich nichts dreht. Die Reibungsverluste in dem Motor nehmen in demselben Maße ab, wie die Belastung gesteigert wird und die Drehzahl zurückgeht. Bei Belastung mit dem halben Höchstdrehmoment hat der Motor halbe Leerlaufdrehzahl und damit auch die Hälfte der Reibungsverluste wie im Leerlauf. Der ideale Motor würde keinen Leerlaufstrom aufnehmen und hätte damit auch keinerlei Reibungsverluste. Das Diagramm zeigt es.

Aber: Der Motor mit der höheren Leerlaufdrehzahl hat auch höhere Reibungsverluste über dem ganzen Bereich der möglichen Belastung. Wie dieser Motor auch immer belastet sein möge: die in ihm auftretenden Verluste durch Reibung sind immer in demselben Maße höher als bei Motor 1, wie sein Leerlaufstrom höher ist gegenüber dem Motor mit dem geringeren Leerlaufstrom. Der Motor, bei dem man höheren Leerlaufstrom mißt bzw. der ein schlechteres Verhältnis von Leerlaufstrom zu Kurzschlußstrom zeigt, ist weiter vom Idealmotor entfernt als derjenige, der einen geringeren Leerlaufstrom bzw. ei-

nen großen Unterschied zwischen Leerlaufstrom und Kurzschlußstrom aufweist. Auf einem auf mm-Papier mit den tatsächlichen Maßen von Leerlaufstrom und Kurzschlußstrom aufgetragenen Diagramm läßt sich direkt mit dem cm-Stab ablesen, wie viel bei jeder unter Belastung gemessenen Gesamtstromaufnahme des Motors auf die innere Reibung der Maschine entfällt — und das, ohne das Drehmoment und ohne die Drehzahl des Motors überhaupt zu messen!

Bestimmung der Höchstleistung

Nach Messung des Leerlaufstroms und des Kurzschlußstroms läßt sich aber auch mit dem Meßinstrument jederzeit feststellen, ob der Motor im praktischen Betrieb die Drehzahl erreicht, bei der er seine Höchstleistung abgibt oder ob seine Drehzahl zu niedrig oder zu hoch ist — wiederum ohne die Drehzahl zu messen! Auch bei einem Elektronentreibling errechnet sich die Leistung, wie bei jedem anderen Motor aus Drehzahl mal Drehmoment. Beim Leerlauf ist die abgegebene Leistung null. Beim Kurzschluß ist sie auch null. Dazwischen hat sie ihren Höchstwert. Bis zu einer gewissen Drehmomentbelastung steigt die abgegebene Leistung an, darüber hinaus sinkt sie wieder. Wo aber liegt die Leistungsspitze?

3. Der Motor gibt seine höchstmögliche mechanische Leistung ab, wenn er mit der Hälfte seines maximalen Drehmoments belastet wird, weil dann auch seine Drehzahl auf die Hälfte der Leerlaufdrehzahl zurückgegangen ist. In diesem Laufzustand nimmt der Motor dann die Hälfte der Summe von Leerlaufstrom und Kurzschlußstrom auf.

Mit anderen Worten: Ohne Drehzahl und Drehmoment überhaupt zur Kenntnis zu nehmen, kann man den Motor allein dadurch auf Höchstleistung einstellen, daß man seine Belastung verändert, bis er die Hälfte der Summe aus Leerlaufstrom und Kurzschlußstrom aufnimmt. Und diese Stromaufnahme kann man vorher auf dem Papier festlegen. Nimmt er mehr oder weniger Strom auf, leistet er auf alle Fälle weniger, als er mit der betreffenden Spannung könnte. Höhere Stromaufnahme bedeutet geringere Leistung bei erhöhtem Strom. Das ist reiner Unsinn, denn wenn man Geld vergeuden will, ist es einfacher, es aus dem Fenster zu werfen, als dafür noch Batterien zu kaufen und sie sinnlos zu verbrauchen.

Niedrigere Stromaufnahme als $\frac{I_k + I_L}{2}$ bedeutet Leistungsverminderung bei Stromersparnis und erhöhten Wirkungsgrad und kann sehr sinnvoll sein.

Der auf die Motorreibung entfallende Verluststrom ist bei Höchstleistung genau halb so groß wie im Leerlauf.

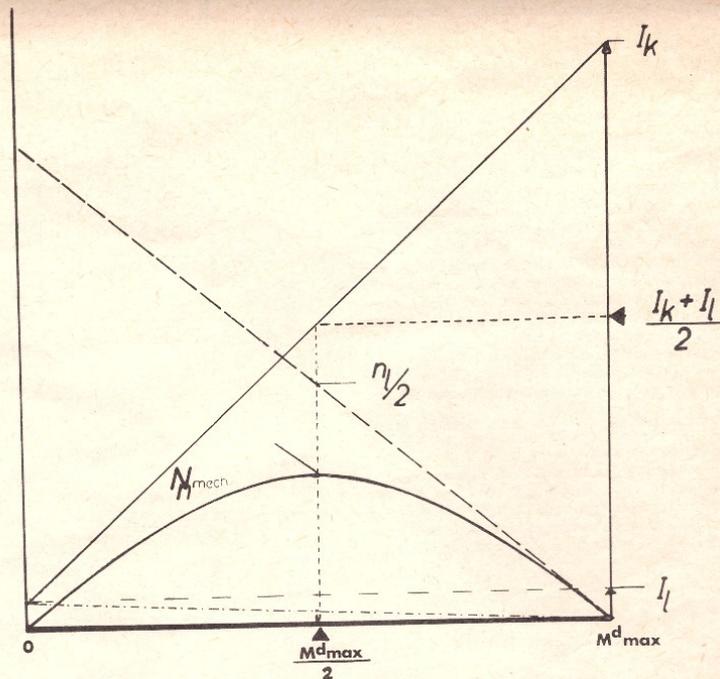


Abb. 3

Die Antwort ist lächerlich einfach: Beim halber $M_{d,max}$ bei der Hälfte des Kurzschlußdrehmoments. Auf Diagramm 3, wiederum in denselben Maßen der beiden anderen Diagramme, ist auch die Kurve der mechanischen Leistungsabgabe eingezeichnet. Beim halben Höchstdrehmoment liegt die Leistungsspitze, bei dieser Belastung erreicht der Motor auch genau die halbe Leerlaufdrehzahl: Nach dem Dreiecksgesetz muß der Motor bei halber Drehmomentbelastung die Hälfte der Leerlaufdrehzahl haben. Warum liegt aber gerade dort die Leistungsspitze? Weil das Produkt aus zwei Größen, die zusammen eine bestimmte Summe bilden müssen, dann am höchsten ist, wenn die beiden Größen einander gleich sind. Die meisten Leute erschrecken, wenn man Ihnen so etwas ohne jede Vorwarnung entgegenschleudert — bis man beweist daß es eine Binsenwahrheit ist.

Bei unserem „Mustermotor“ haben wir einen Drehmomentsbereich von 0 bis 5 und einen Drehzahlbereich von 10000 bis 0. Drehzahl und Drehmoment stehen immer in einem ganz bestimmten Verhältnis zueinander, wie man aus jedem Diagramm ersehen kann, und zwar fällt die Drehzahl in gleichem Maße wie die Drehmomentbelastung steigt. Wir haben also zwischen Leerlauf und Kurzschluß zwei gegeneinander laufende Größen. Wir schreiben diese als Zahlenreihen an, links

die steigenden Größen des Drehmoments, rechts die fallenden Größen der Drehzahl:

Drehmoment × Drehzahl = Kennzahl für Leistung	
0	× 10000 = 0
1	× 8000 = 8000
2	× 6000 = 12000
2,5	× 5000 = 12500
3	× 4000 = 12000
4	× 2000 = 8000
5	× 0 = 0

Ergebnis: bei der Hälfte der Drehmomentbelastung und der Hälfte der Drehzahl ist die Leistungsabgabe jedes E-Motors am höchsten. Deshalb läßt sich auch die Drehzahl für die Höchstleistung allein mit dem Meßinstrument feststellen, ohne überhaupt die Drehzahl zu messen. Das Lot auf der Drehmomentskala bei der Hälfte des maximalen Drehmoments teilt nämlich nicht nur die Kennlinie der Drehzahlen genau in der Mitte, sondern auch die Kennlinie der Stromaufnahme. Bei der Höchstleistungsdrehzahl nimmt der Motor deshalb den Leerlaufstrom plus der Hälfte der Differenz zwischen Leerlaufstrom und Kurzschlußstrom auf.

Stromaufnahme für höchste Leistungsabgabe:

$$I_{ges} = I_L + \frac{I_k - I_L}{2} = \frac{I_k + I_L}{2}$$

Der Motor gibt immer dann die höchste Leistung ab, wenn er die Hälfte der Summe des Leerlaufstroms plus des Kurzschlußstroms aufnimmt.

Für diese Einstellung müssen aber Leerlaufstrom und Kurzschlußstrom mit derselben Spannung gemessen werden, mit der nachher der Motor praktisch betrieben werden soll. Man kann dann aber sicher sein, daß der E-Motor tatsächlich bis auf 2% genau am Punkt seiner Höchstleistung arbeitet.

Die Stromaufnahme an einem fahrenden Modell ist übrigens absolut nicht schwierig festzustellen. Es genügt eine kurze Probefahrtsstrecke an den Drahtstrippen zum Meßinstrument, das man in der Hand hält, als „Fesselleine“.

Die effektive mechanische Leistung

Wenn man das Tabellarium bis hierher durchstudiert hat, ist es auch keine Kunst mehr, allein mit dem Meßinstrument zusätzlich noch die tatsächlich abgegebene mechanische Leistung festzulegen. Aus der Messung von Leerlaufstrom und Kurzschlußstrom haben wir den maximalen Wirkungsgrad η_{max} erkannt, ferner kennen wir die Stromaufnahme für die Höchstleistung (immer bei Messungen von Leerlauf und Kurzschlußstrom für die be-

Das vermessene Diagramm eines Glockenanker-motors, des Mikromotors T05/01 (Läuferwicklung mit CuL 0,1 mm ϕ) bei 2 Volt Betriebs-spannung. Dieser Motor ist eine noch weiter verkleinerte Ausführung des Stellmotors T05, der auf dem Modellbausektor „Mikromax“ heißt.

Man erkennt alle Zusammenhänge, die aus den vorhergehenden Diagrammen eines angenom-menen Motors konstruiert wurden.

Auf der waagerechten Skala ist das Dreh-moment aufgetragen, links daneben ist die Skala für den Wirkungsgrad. Ausgezogen ist die Kennlinie für die elektrische Leistungsauf-nahme, die sich ergibt, wenn man die Strom-aufnahme mit der Betriebsspannung multipli-ziert. Punktirt-gestrichelt ist die Kennlinie für die Motordrehzahl, sie geht von rund 17000 u/min bis 0 bei Kurzschluß und $M_{d,max}$. Rechts neben der Skala für Leistung in Watt ist die Skala für die Stromaufnahme.

Die Höchstleistung liegt beim halben Dreh-moment und der halben Drehzahl und 300 mA Stromaufnahme ($\frac{I_k I_L}{-2}$) und beträgt etwas mehr als 0,25 Watt.

Der Wirkungsgrad bei Höchstleistung ist 43 % und damit rund ein Drittel niedriger als der maximale Wirkungsgrad.

Der maximale Wirkungsgrad liegt bei 62 %; in diesem Laufzustand nimmt der Motor nur rund 100 mA auf.

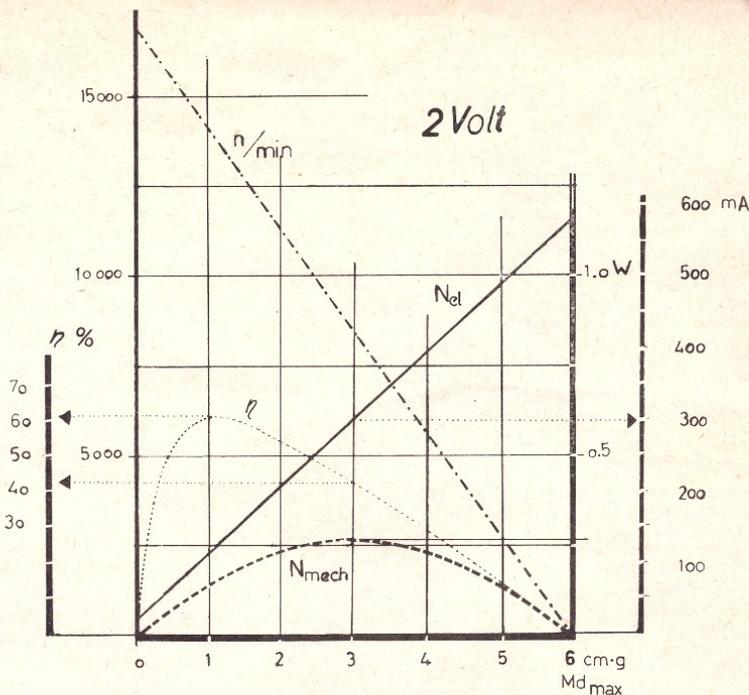


Abb. 2

treffende Betriebsspannung). Aus der Stromaufnahme für die Höchstleistung läßt sich einfach die elektrische Leistungsaufnahme bei Höchstleistung errechnen: man braucht die Stromaufnahme nur mit der Betriebsspannung zu multiplizieren. Stromaufnahme im Beispiel Distler bei 4,5 V: 105 mA, Betriebsspannung 4,5 Volt, Leistungsaufnahme bei Höchstleistung $0,105 \times 4,5 = 0,47$ Watt.

Wie bei allen anderen Motoren auch, liegt die Höchstleistung nicht am Punkt des höchsten Wirkungsgrads. Bei Höchstleistung nimmt der Wirkungsgrad schon wieder ab. Als gute Faustregel darf man jedoch annehmen, daß beim Betrieb mit Höchstleistung der Wirkungsgrad auf $\frac{2}{3}$ seines Höchstwertes zurückgegangen ist.

In unserem Beispiel war der höchste Wirkungsgrad 60,08 %. Zwei Drittel davon sind $60,08 \times 0,66 =$ rund 40 %. Die abgegebene Maximalleistung ist dann $0,47 \times 0,4 =$ rund 0,19 Watt. Das ist gewiß eine recht geringe mechanische Leistung — allerdings ist auch die Stromaufnahme so klein, daß eine gewöhnliche Taschenlampe-batterie dies viele Stunden pausenlos durchhält.

Wirkungsgrad steigt mit Betriebsspannung

Mehr Leistung ist auf jeden Fall aus jedem E-Motor herauszuholen, wenn man

seine Betriebsspannung erhöht. Dann erhöht sich auch sein Betriebsstrom — und zusätzlich sein bester Wirkungsgrad. Warum? Weil bei höherer Spannung der I_k genau im Verhältnis zur Spannungserhöhung ansteigt, der I_L aber fast gleich bleibt, statt dessen steigt nur die Leerlaufdrehzahl. Das Verhältnis von Leerlaufstrom zu Kurzschlußstrom jedes Motors wird bei Erhöhung der Betriebsspannung größer und damit sein Wirkungsgrad besser. Der Leistungsgewinn ist dann sogar sehr beträchtlich, weil nicht nur die Betriebsspannung steigt, sondern mit ihr auch die Stromaufnahme und damit auch das Produkt aus Strom und Spannung beträchtlich höhere Werte annimmt. Der zusätzlich erhöhte Wirkungsgrad trägt dann noch zu einer weiteren bemerkbaren Leistungssteigerung bei, als sich durch reine Multiplikation der erhöhten Betriebsspannung mit der erhöhten Stromaufnahme ergeben würde. Das haben offensichtlich die Modellbauer, die für besonders rasche E-Motoren und kurze Fahrzeiten „Überbelastung“ der Motoren empfehlen, empirisch herausgefunden, völlig in Übereinstimmung mit jeder Theorie und Labormessung.

Überbelastung ist dabei ein relativer Begriff und immer so weit erlaubt, wie die Maschine keinen Schaden nimmt. Dafür gibt es aber keine Maßzahlen, denn gerade für solche Verwendungszwecke wird im allgemeinen kein Wert darauf gelegt,

daß ein Motor 3000 Betriebsstunden durchhält, wie es zum Beispiel von Stellmotoren für die Industrie verlangt wird. In einem Spezialmodell sind 20 Betriebsstunden eine sehr lange Zeit.

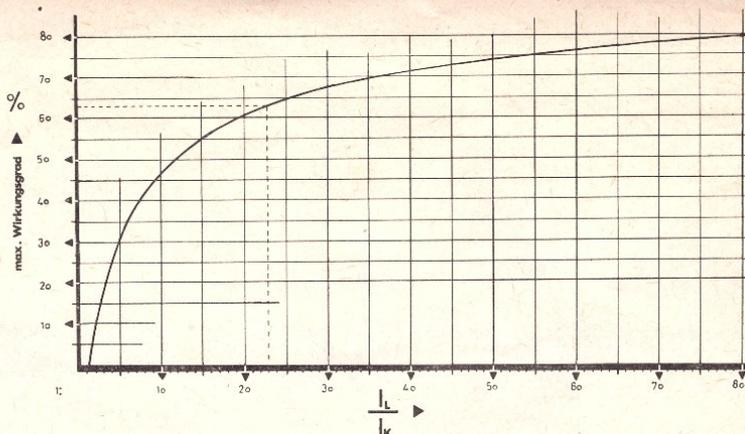
Um die Leistungs- und Wirkungsgrad-Steigerung bei Betrieb mit erhöhter Spannung zu ermitteln, muß man nur I_L und I_k ebenfalls mit der betreffenden Spannung messen. Dabei ist jedoch Vorsicht geboten: Nicht alle Motortypen halten einen Kurzschlußstrom bei erhöhter Spannung aus; den Typen mit hohem Wicklungswiderstand macht es nichts, die mit niedrigem Wicklungswiderstand können kaputt gehen. Hohe Wicklungswiderstände haben Distler- und Escep-Motoren. Dunker- und Faulhaber-Motoren haben jedoch nur ganz geringe Innenwiderstände, so daß bei höheren Spannung ein katastrophal hoher Kurzschlußstrom fließen würde. Bei diesen Motoren sollte der Kurzschlußstrom möglichst nicht bei einer Meßspannung höher als 1 Volt ermittelt werden. Das ergibt dann natürlich einen entsprechend reduzierten Wirkungsgrad. Um den Wirkungsgrad bei erhöhter Spannung zu ermitteln, kann man in solch einem Falle den Kurzschlußstrom bei erhöhter Spannung rechnerisch genau ermitteln. Beispiel: der Motor habe 4Ω Wicklungswiderstand, hat also nach dem Ohm'schen Gesetz bei 1 V Betriebsspannung einen Kurzschlußstrom von $1:4 = 0,25$ A oder 250 mA. Bei der vierfachen Spannung nimmt der Motor dann auch

Diagramm für Wirkungsgrad von E-Motoren mit eisenlosem Läufer

Auf diesem Diagramm kann man den maximalen Wirkungsgrad eines Motors direkt ablesen. Waagrecht aufgetragen ist das Verhältnis von Leerlaufstrom zu Kurzschlußstrom von 1:1 kontinuierlich bis 1:80. Als Ablesebeispiel eingezeichnet ist gestrichelt

$$\frac{I_L}{I_k} = \frac{1}{23} = M_{d_{max}} \quad 63\% \text{ } \leftarrow$$

Das Diagramm ist die graphische Auswertung der Formel von Dipl.-Ing. Brinkmann, die sich nicht auf die Absolutwerte von I_L und I_k bezieht, sondern nur auf deren Verhältnis zueinander und deshalb für alle Elektromotoren mit eisenlosem Läufer, gleich welcher Größe und Bauart, Gültigkeit hat. copyright „modell“



natürlich den vierfachen Kurzschlußstrom nämlich $4 \times 250 \text{ mA} = 1 \text{ A}$ auf. Darauf kann man sich verlassen. Die Leerlaufstromaufnahme kann man jedoch direkt mit der erhöhten Spannung vornehmen.

Motoren mit Eisenanker

Obwohl die dargestellten Formeln und Berechnungen streng genommen für Glockenankermotoren mit eisenlosen Läufern gelten, kann man sie dennoch benutzen, um auch Permanent-Magnet-Motoren mit Eisenanker in erster Näherung zu beurteilen. Bei Motoren mit Eisenankern ist die Formel für den höchsten Wirkungsgrad etwas komplizierter, weil noch Faktoren für die Wirbelstrom- und die Hysteresisverluste im Eisen hinzukommen. Es ist aber fraglich, ob sich für den Gebrauch eines E-Motors durch einen Modellbauer, selbst wenn der unbedingt

technisch vorgehen will, die haargenaue Darlegung dieser Zusammenhänge überhaupt rentiert, denn:

auch bei Permanent-Magnet-Motoren mit Eisenanker ist das Verhältnis von I_L zu I_k ein absolutes Maß für seine Qualität; der Motor mit dem größeren Verhältnis I_L zu I_k wird immer derjenige mit dem besseren Wirkungsgrad sein.

Ferner: auch ein Permanent-Magnet-Motor mit Eisenanker gibt seine höchste Leistung dann ab, wenn seine Stromaufnahme die Hälfte von Kurzschlußstrom plus Leerlaufstrom beträgt.

Da aber bei solchen Motoren die Kennlinien für Stromaufnahme und bzw. Leistungsaufnahme und Drehzahl keine Geraden sind, sondern infolge der Wirbelstromverluste und der Hysteresis Kurvenformen haben, steigt die mechanische Leistungsabgabe bis zum Punkt der Höchstleistung relativ langsam an und fällt dann nach diesem Punkt bei höherer

Belastung sehr rasch ab. Unterhalb des Punktes der Stromaufnahme für Höchstleistung verliert man also wenig an mechanischer Leistung bei Stromersparnis, oberhalb dagegen bezahlt man für rasch niedriger werdende Leistung mit beträchtlich erhöhtem Strom.

Bei solchen Motoren bleibt der weise Mann deshalb eher unterhalb des Punktes der Stromaufnahme für maximale mechanische Leistung und betreibt den Motor in der Praxis im Bereich zwischen Maximalleistung und Maximalwirkungsgrad. Dafür gibt es aber eine ganz einfache Faustformel, für die auch der aller-schlechteste Volksschüler keinen Rechenstift braucht: Betrieb mit der Hälfte des Kurzschlußstroms!

Elektro-Motoren mit mehr als der Hälfte des Leerlaufstroms plus des Kurzschlußstroms (bei der betreffenden Spannung gemessen) laufen zu lassen, ist so unsinnig wie einem Hahn das Eierlegen zu lehren.

REUTER

elektronische Steuerelemente
6342 HAIGER (Dill), Postfach 104

Neuheiten

sind nur sinnvoll, wenn sie gegenüber dem bisher Gebräuchlichen echte Vorteile bieten. Von Vorteil waren in der letzten Zeit die hochstabilen L-C-NF-Generatoren nach Schumacher und Hoyer; mit verstellbaren Schalenkernen nach Kienzle ausgetüschelt, werden sie aber auch noch extrem weit durchstimmbare und universell verwendbar.

DURCHSTIMMBARE SCHALENKERNSPULEN für NF-Generatoren (wie in „modell“ 8/63, Seite 232 beschrieben) wurden daher in unser Programm aufgenommen; jede Schalenkernspule besitzt bereits die Verstelleinrichtung für die bewegliche Schalenkernhälfte und ist gebrauchsfertig bewickelt. Sie können zwei verschiedene Wicklungen wählen: für 800–1800 Hz und für 1800–5000 Hz. Jede Spule mit Kern kostet DM 6,90

Kaum eine grundsätzliche Verbesserung ist bei den heutigen Schaltungen für Pendelaudio-Empfänger mit Tonkreisen noch möglich — aber eine neue Auslegung von Schaltplatte und Bauanleitung erleichtert Aufbau, Verwendung und späteren Ausbau. Einen **EINKANAL-EMPFÄNGER** mit Tonkreisschaltstufe bringen wir jetzt als erste Einheit dieser Neuauslegung der bewährten Grundschaltung, mit neuartiger

Bauanleitung und auf einem Karton vorgeordneten Bauteilen. Dieses Gerätchen eignet sich vorzüglich zum Einarbeiten in die Schaltungstechnik.

Der Bausatz kostet komplett DM 46,00
Der betriebsfertige Empfänger
27,12 MHz und 1080 Hz Mod. DM 54,50
RELAISLOSE SCHALTSTUFEN sind nicht der letzte Schrei, sondern führen sich gegenwärtig in die R/C-Technik ein. Für eine relaislose Zweikanal-Brücke nach Schumacher mit zwei Tonkreisschaltstufen (wie in „modell“ 6/63) gibt es jetzt als eine Aufbauplatte, die Tonkreisschaltstufen sind als Module vorgefertigt. Frequenz nach Wunsch.
48 x 34 mm, für zwei Kanäle DM 59,75

Keine Neuheiten

sind unsere betriebsfertigen Senderbausteine, aber, da man die Modulationsfrequenzen frei wählen kann, universell auch für Industrieempfänger verwendbar.

SENDER-BAUSTEINE

N - 131 - ST Senderbaustein betriebsfertig aufgebaut, vorgesehen für fünf steckbare Tongeneratoren HO - TG 10/1 DM 78,50
dto. als Bausatz mit ausführlicher Bauanleitung DM 59,—
N - 131 - B Sender-Baustein betriebsfertig mit stabilem Dreikanal-Modulator 1080, 1320, 1610 Hz, Simultanbetrieb ist mit jedem Kanal möglich, erweiterungsfähig bis auf 10 Kanäle DM 121,—
dto. als Bausatz, jedoch mit abgestimmtem und aufgebautem Dreikanal-Modulator DM 101,50
Si - Tx Sender-Bausatz nach „modell“ 12/62 und 1/63 kompl. für 8 Kanäle DM 135,—

EMPFÄNGER-Bausätze

MONOFIX Einkanal-Empfänger nach „modell“ 10/61 DM 52,50
REHATON I Einkanal-Empfänger komplett, erweiterungsfähig bis auf 10 Kanäle DM 57,60
TRANSFILTER-Super nach Helmut Bruss mit 7 Transistoren in Kürze als Bausatz lieferbar. Beschreibung einzeln DM 1,80

R/C-SUPERHET

RX - 129 Bausatz SUPERHET-Empfänger, komplett DM 72,50
(Bauanleitung getrennt DM 1,50 zuzügl. Porto)

NF-BAUSTEINE

HO - TG 10 pro Frequenz ein steckbarer Tongenerator nach Gerd Hoyer, frequenz- und temperaturstabil, ab 1000 Hz, wie in „modell“ 3/63 beschrieben mit Diode DM 18,10
HO - TG 10/1 wie oben, jedoch ohne Diode, neue Ausführung, geeignet zur Modulation fast aller Sender DM 15,50
TB 104 - A betriebsfertiger Dreikanal-Modulator 400, 600, 900 Hz DM 21,25

R/C-MODULE

vergossene Bausteine für R/C-Empfänger-Pendelaudio, Verstärker, Schaltstufen

TONKREISE

alle Frequenzen, mit C, je DM 7,80
Funksprechgeräte 27,12, R/C und Amateurbedarf