

maxon DC motor und maxon EC motor

Das Wichtigste

Der Motor als Energiewandler

Der Elektromotor wandelt elektrische Leistung P_{el} (Strom I und Spannung U) in mechanische Leistung P_{mech} (Drehzahl n und Drehmoment M) um. Die dabei entstehenden Verluste teilen sich in die Reibverluste, die zu P_{mech} gezählt werden, und in die Joulsche Verlustleistung P_J der Wicklung (Widerstand R) auf. Eisenverluste treten bei den eisenlosen maxon DC-Motoren praktisch nicht auf. Beim maxon EC motor werden sie formal wie ein zusätzliches Reibmoment behandelt. Die Leistungsbilanz kann somit formuliert werden als:

$$P_{el} = P_{mech} + P_J$$

Im Detail ergibt sich

$$U \cdot I = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot I^2$$

Elektromechanische Motorkonstanten

Die geometrische Anordnung von Magnetkreis und Wicklung definiert, wie der Motor im Detail die elektrische Eingangsleistung (Strom, Spannung) in die mechanische Abgabeleistung (Drehzahl, Drehmoment) umwandelt. Zwei wichtige Kennzahlen dieser Energieumwandlung sind die Drehzahlkonstante k_n und die Drehmomentkonstante k_M .

Die Drehzahlkonstante verbindet die Drehzahl n mit der in der Wicklung induzierten Spannung U_{ind} (=EMK). U_{ind} ist proportional zur Drehzahl, es gilt:

$$n = k_n \cdot U_{ind}$$

Analog verknüpft die Drehmomentkonstante das mechanische Drehmoment M mit dem elektrischen Strom I .

$$M = k_M \cdot I$$

Die Kernaussage dieser Proportionalität ist, dass für den maxon-Motor die Größen Drehmoment und Strom äquivalent sind.

In den Motordiagrammen wird die Stromachse deshalb auch parallel zur Drehmomentachse gezeichnet.

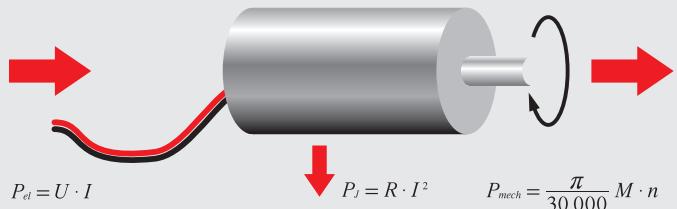
Siehe auch: Technik – kurz und bündig, Erklärungen zu den Motordaten

Einheiten

In allen Formeln sind die Größen in den Einheiten gemäss Katalog (vgl. Physikalische Größen und ihre Einheiten Seite 42) einzusetzen.

Speziell gilt:

- Alle Drehmomente in mNm
- Alle Ströme in A (auch Leerlaufströme)
- Drehzahl (min^{-1}) statt Winkelgeschwindigkeit (rad / s)



Motorkonstanten

Drehzahlkonstante k_n und Drehmomentkonstante k_M sind nicht unabhängig voneinander. Es gilt

$$k_n \cdot k_M = \frac{30\,000}{\pi}$$

Die Drehzahlkonstante nennt man auch spezifische Drehzahl. Spezifische Spannung, Generator- oder Spannungskonstante sind im Wesentlichen der Kehrwert der Drehzahlkonstante und beschreiben die im Motor induzierte Spannung pro Drehzahl. Die Drehmomentkonstante wird auch als spezifisches Drehmoment bezeichnet. Der Kehrwert heisst spezifischer Strom oder Stromkonstante.

Motorkennlinien

Zu jedem maxon DC- und EC-Motor lässt sich ein Diagramm erstellen, aus dem die für viele Anwendungen wichtigsten Motordaten entnommen werden können. Obwohl Toleranzen und Temperatureinflüsse nicht berücksichtigt sind, reichen die Werte für überschlagsmässige Betrachtungen aus. Im Diagramm werden bei konstanter Spannung U , Drehzahl n , Strom I , Abgabeleistung P_2 und Wirkungsgrad η als Funktion des Drehmoments M aufgetragen.

Drehzahlkennlinie

Diese Kennlinie beschreibt das mechanische Verhalten des Motors bei konstanter Spannung U :

- Mit steigendem Drehmoment nimmt die Drehzahl linear ab.
- Je schneller der Motor dreht, desto weniger Drehmoment kann er abgeben.

Mit Hilfe der beiden Endpunkte, Leerlaufdrehzahl n_0 und Anhaltemoment M_H , lässt sich die Kennlinie beschreiben (vgl. Zeilen 2 und 7 in den Motordaten).

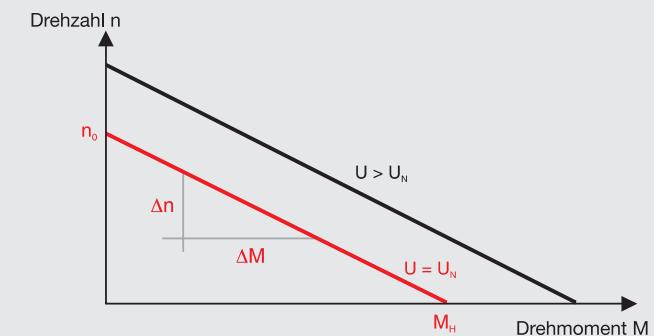
DC-Motoren können bei beliebigen Spannungen betrieben werden. Leerlaufdrehzahl und Anhaltemoment verändern sich proportional zur angelegten Spannung, was einer Parallelverschiebung der Drehzahl-Kennlinie im Diagramm gleich kommt. Zwischen Leerlaufdrehzahl und Spannung gilt in guter Näherung die wichtige Proportionalität

$$n_0 \approx k_n \cdot U$$

wobei k_n die Drehzahlkonstante ist (Zeile 13 der Motordaten).

Spannungsunabhängig wird die Kennlinie am zweckmässigsten durch die Kennliniensteigung beschrieben (Zeile 14 der Motordaten).

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} = \frac{n_0}{M_H}$$



Herleitung der Drehzahlkennlinie

Ersetzt man mittels der Drehmomentkonstante in der detaillierten Leistungsbilanz den Strom I durch das Drehmoment M so erhält man

$$U \cdot \frac{M}{k_M} = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot \left(\frac{M}{k_M} \right)^2$$

Umgeformt und unter Berücksichtigung der engen Verwandtschaft von k_M und k_n , erhält man die Gleichung einer Geraden zwischen Drehzahl n und Drehmoment M .

$$n = k_n \cdot U - \frac{30\,000}{\pi} \cdot \frac{R}{k_M^2} \cdot M$$

oder mit der Kennliniensteigung und der Leerlaufdrehzahl n_0

$$n = n_0 - \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M$$

Die Kennliniensteigung ist eine der aussagekräftigsten Kennzahlen und erlaubt den direkten Vergleich zwischen verschiedenen Motoren. Je kleiner die Steigung, desto weniger empfindlich reagiert die Drehzahl auf Drehmoment (Last)-Änderungen und desto kräftiger ist der Motor. Beim maxon motor ist die Kennliniensteigung innerhalb der Wicklungsreihe eines Motortyps (jeweils auf einer Katalogseite) praktisch konstant.

Strom-Kennlinie

Die Äquivalenz des Stroms zum Drehmoment wird durch eine zum Drehmoment parallele Achse dargestellt: Je mehr Strom durch den Motor fließt, desto mehr Drehmoment wird erzeugt. Die Stromskala wird durch die beiden Punkte Leerlaufstrom I_0 und Anlaufstrom I_A (Zeilen 3 und 8 der Motordaten) festgelegt. Der Leerlaufstrom entspricht dem Reibmoment M_R , das die innere Reibung in Lagern und Kommutierungssystem beschreibt.

$$M_R = k_M \cdot I_0$$

Beim maxon EC motor treten anstelle der Reibverluste im Kommutierungssystem die stark drehzahlabhängigen Eisenverluste im Statorpaket auf.

Das höchste Drehmoment entwickeln die Motoren beim Anlauf. Es ist um ein Mehrfaches grösser als das normale Betriebsdrehmoment. Entsprechend ist auch die Stromaufnahme am grössten.

Für Anhaltemoment M_H und Anlaufstrom I_A gilt:

$$M_H = k_M \cdot I_A$$

Wirkungsgrad-Kennlinie

Der Wirkungsgrad η beschreibt das Verhältnis von abgegebener mechanischer Leistung zu aufgenommener elektrischer Leistung

$$\eta = \frac{\pi}{30\,000} \cdot \frac{n \cdot (M - M_R)}{U \cdot I}$$

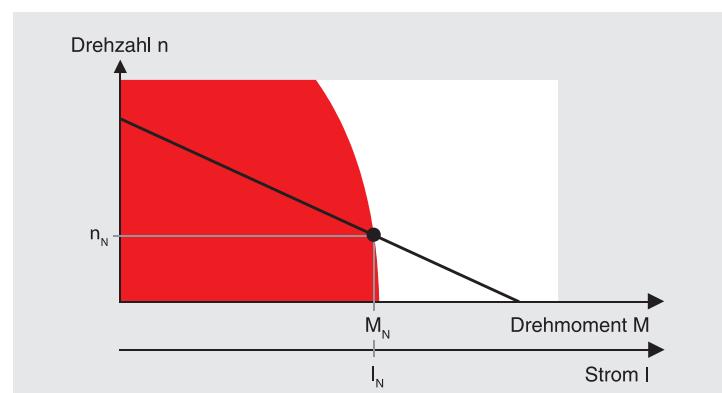
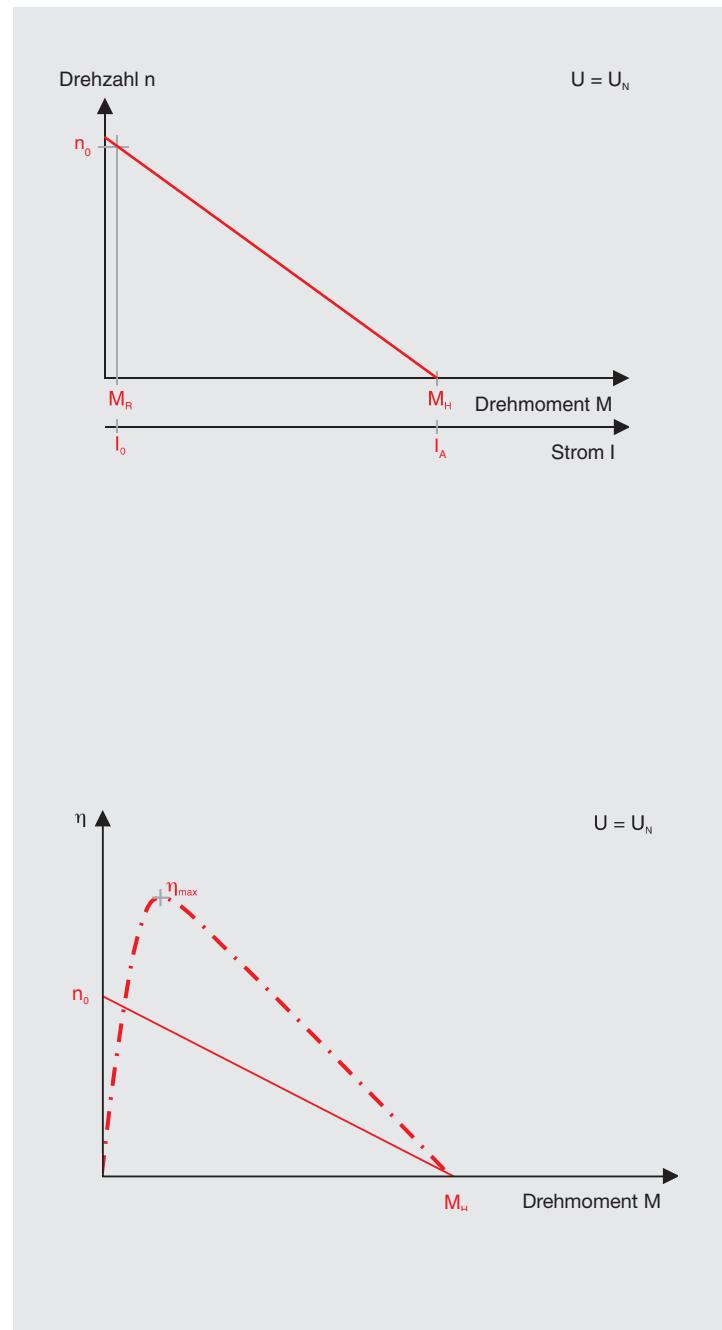
Man erkennt, dass bei konstanter Spannung U und wegen der Proportionalität von Drehmoment und Strom der Wirkungsgrad mit zunehmender Drehzahl (abnehmendem Drehmoment) linear zunimmt. Bei kleinen Drehmomenten werden die Reibverluste immer bedeutender und der Wirkungsgrad geht steil gegen Null. Der maximale Wirkungsgrad (Zeile 9 der Motordaten) berechnet sich aus Anlaufstrom und Leerlaufstrom und ist spannungsabhängig

$$\eta_{\max} = \left(1 - \sqrt{\frac{I_0}{I_A}}\right)^2$$

Als Faustregel gilt, dass der maximale Wirkungsgrad bei etwa einem Siebtel des Anhaltemoments auftritt. Das heisst, maximaler Wirkungsgrad und maximale Abgabeleistung treten nicht bei gleichem Drehmoment auf.

Nennarbeitspunkt

Der Nennarbeitspunkt ist ein ausgezeichneter Arbeitspunkt des Motors und ergibt sich aus dem Betrieb bei Nennspannung U_N (Zeile 1 der Motordaten) und Nennstrom I_N (Zeile 6). Aus der Äquivalenz von Drehmoment und Strom folgt das erzeugte Nenndrehmoment M_N (Zeile 5) in diesem Arbeitspunkt und gemäss der Drehzahlkennlinie stellt sich die Nenndrehzahl n_N (Zeile 4) ein. Die Wahl der Nennspannung folgt aus Überlegungen, wo die maximale Leerlaufdrehzahl liegen sollte. Der Nennstrom ergibt sich aus der thermisch maximal zulässigen Dauerbelastung des Motors.



Motordiagramme, Betriebsbereiche

Im Katalog findet man zu jedem maxon DC- und EC-Motortyp ein Diagramm, das anhand eines typischen Motors die Betriebsbereiche der Wicklungsreihe exemplarisch darstellt.

Dauerbetriebsbereich

Die beiden Kriterien «zulässiges Dauerdrehmoment» und «Grenzdrehzahl» begrenzen den Dauerbetriebsbereich. Betriebspunkte innerhalb dieses Bereiches sind thermisch nicht kritisch und führen im Allgemeinen nicht zu erhöhtem Verschleiss des Kommutierungssystems.

Kurzzeitbetriebsbereich

Der Motor darf aus thermischen Gründen dauernd nur mit dem maximal zulässigen Dauerstrom belastet werden. Kurzzeitig sind aber durchaus höhere Ströme (Drehmomente) erlaubt. Solange die Wicklungstemperatur unterhalb des kritischen Wertes liegt, wird die Wicklung keinen Schaden nehmen. Phasen mit erhöhten Strömen sind zeitlich begrenzt. Ein Mass, wie lange solche kurzzeitigen Überbelastungen dauern dürfen, gibt die thermische Zeitkonstante der Wicklung (Zeile 19 der Motordaten). Die Grössenordnung der Zeiten mit Überlast liegt im Bereich einiger Sekunden für die kleinsten Motoren (6 bis 13 mm Durchmesser) bis zu etwa einer Minute für die grössten Motoren (60 bis 90 mm Durchmesser). Die Berechnung der exakten Überlastzeit hängt stark vom Motorstrom und der Starttemperatur des Rotors ab.

Zulässiger Dauerstrom, zulässiges Dauerdrehmoment

Die Stromwärmeverluste heizen die Wicklung auf. Die entstehende Wärme muss abfließen können, sodass die maximale Wicklungstemperatur (Zeile 22 der Motordaten) nicht überschritten wird. Dies definiert den maximal zulässigen Dauerstrom, bei dem unter Standardbedingungen (25°C Umgebungstemperatur, keine Wärmeabfuhr über den Flansch, freie Luftzirkulation) die maximale Wicklungstemperatur erreicht wird. Grösere Motorströme ergeben zu hohe Wicklungstemperaturen.

Der Nennstrom wird so gewählt, dass er diesem maximal zulässigen Dauerstrom entspricht. Er ist stark wicklungsabhängig. Dünndrahtwicklungen haben kleinere Nennströme als Dickdrahtwicklungen. Bei sehr niederohmigen Wicklungen kann die Stromaufnahmefähigkeit des Bürstensystems den zulässigen Dauerstrom weiter begrenzen. Bei Graphitbürstenmotoren steigen die Reibverluste bei höheren Drehzahl stark an. Bei EC-Motoren nehmen die Wirbelstromverluste im Rückschluss mit steigender Drehzahl zu und erzeugen eine zusätzliche Erwärmung. Entsprechend nimmt der maximal zulässige Dauerstrom bei höheren Drehzahlen ab. Das dem Nennstrom zugeordnete Nenndrehmoment, ist innerhalb der Wicklungsreihe eines Motortyps praktisch konstant und stellt eine charakteristische Grösse des Motortyps dar.

Die maximale Drehzahl (Grenzdrehzahl)

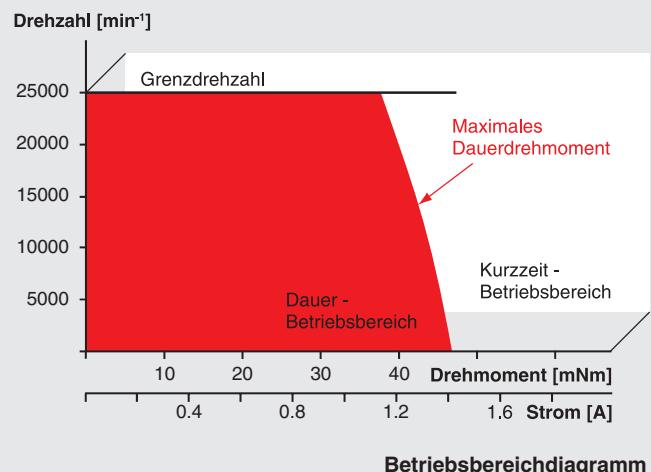
Diese wird beim DC-Motor primär durch das Kommutierungssystem begrenzt. Bei sehr hohen Drehzahlen werden Kollektor und Bürsten stärker abgenutzt. Die Gründe sind:

- Erhöhter mechanischer Verschleiss durch den grossen zurückgelegten Weg des Kollektors
- Erhöhte Elektroerosion durch Bürstenvibration und Funkenbildung

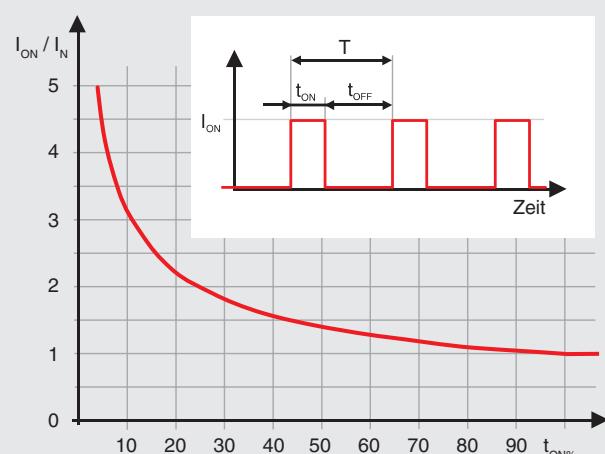
Ein weiterer Grund, die Drehzahl zu beschränken, ist die mechanische Restunwucht des Rotors, die die Lebensdauer der Lager beeinträchtigt. Höhere Drehzahlen als die Grenzdrehzahl n_{max} (Zeile 23) sind durchaus möglich, werden aber meist mit einer reduzierten Lebenserwartung «erkauf». Die Grenzdrehzahl beim EC-Motor wird durch Lebensdauerüberlegungen der Kugellager (mindestens 20 000 Stunden) bei maximal zulässiger Restunwucht und Lagerbelastung berechnet.

Maximal zulässige Wicklungstemperatur

Der Motorstrom führt auf Grund des Wicklungswiderstandes zu einer Erwärmung der Wicklung. Damit der Motor nicht überhitzt, muss diese Wärme über den Stator an die Umgebung abgegeben werden. Die selbsttragende Wicklung ist der thermisch kritische Bereich. Die maximale Rotortemperatur darf auch kurzzeitig nicht überschritten werden. Sie beträgt bei Graphitbürstenmotoren und EC-Motoren mit ihrer tendenziell höheren Strombelastung 125°C (in Einzelfällen bis 155°C). Edelmetallkommutierte Motoren erlauben nur geringere Strombelastungen, sodass die Rotortemperaturen 85°C nicht überschreiten dürfen. Einbautechnische Massnahmen, wie gute Luftzirkulation oder Kühlbleche, können die Temperaturen deutlich senken.



Betriebsbereichdiagramm



ON	Motor in Betrieb
OFF	Motor steht still
I_{ON}	Max. Spitzstrom
I_N	Max. Dauerbelastungsstrom (Zeile 6)
t_{ON}	Einschaltzeit [s], sollte τ_w (Zeile 19) nicht überschreiten
T	Zykluszeit $t_{ON} + t_{OFF}$ [s]
$t_{ON\%}$	Einschaltdauer in Prozenten der Zykluszeit. Bei der Einschaltdauer von X % darf der Motor um das Verhältnis I_{ON} / I_N überlastet werden.

$$I_{ON} = I_N \sqrt{\frac{T}{t_{ON}}}$$

maxon flat motor

Die mehrpoligen maxon-Flachmotoren benötigen für eine Motorumdrehung eine höhere Anzahl Kommutierungsschritte (6 x Anzahl Polpaare). Sie weisen aufgrund der bewickelten Statorzähne eine höhere Anschlussinduktivität als Motoren mit eisenloser Wicklung auf. Bei hohen Drehzahlen kann sich der Strom während der entsprechend kurzen Kommutierungsintervalle nicht mehr voll ausbilden, sodass das erzeugte Drehmoment entsprechend kleiner ausfällt. Zusätzlich wird Strom in die Endstufe des Reglers zurückgespiesen. Als Resultat ergibt sich ein von der ideellen linearen Kennlinie abweichendes Verhalten, das von der Spannung und der Drehzahl abhängt: Die scheinbare Steigung der Kennlinie ist bei hohen Drehzahlen steiler.

Bei den Flachmotoren ist vor allem der Dauerbetrieb interessant. Dort kann die Kennlinie durch eine Gerade zwischen der Leerlaufdrehzahl und dem Nennarbeitspunkt angenähert werden. Für diese erreichbare Kennliniensteigung gilt angenähert:

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} \approx \frac{n_0 - n_N}{M_N}$$

Die Beschleunigung

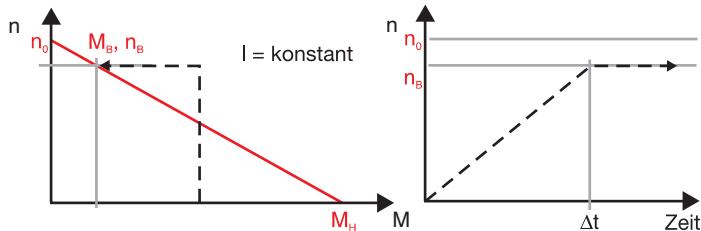
Gemäß den elektrischen Randbedingungen (Netzgerät, Steuerung, Batterie) sind prinzipiell zwei verschiedene Anlaufvorgänge zu unterscheiden:

- Anlauf bei konstanter Spannung (ohne Strombegrenzung)
- Anlauf bei konstantem Strom (mit Strombegrenzung)

Anlauf bei konstantem Strom

Eine Strombegrenzung bedeutet immer, dass der Motor nur ein beschränktes Drehmoment abgeben kann. Im Drehzahl-Drehmoment-Diagramm steigt die Drehzahl auf einer senkrechten Linie mit konstantem Drehmoment. Die Beschleunigung ist ebenfalls konstant, was die Berechnungen vereinfacht.

Anlauf bei konstantem Strom findet man meistens in Anwendungen mit Servoverstärkern, wo die Beschleunigungsmomente durch den Spitzstrom des Verstärkers begrenzt sind.



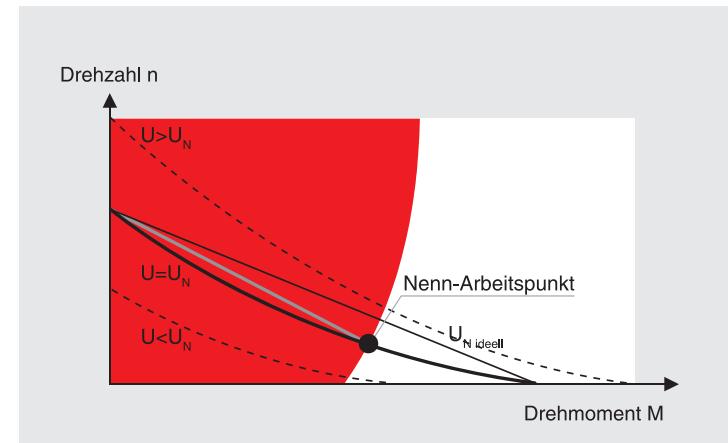
- Winkelbeschleunigung α (in rad / s²) bei konstantem Strom I oder konstantem Drehmoment M beim Antrieb einer zusätzlichen Massenträgheit J_L :

$$\alpha = 10^4 \cdot \frac{k_M \cdot I}{J_R + J_L} = 10^4 \cdot \frac{M}{J_R + J_L}$$

- Hochlaufzeit Δt (in ms) bei einer Drehzahländerung Δn beim Antrieb einer zusätzlichen Massenträgheit J_L :

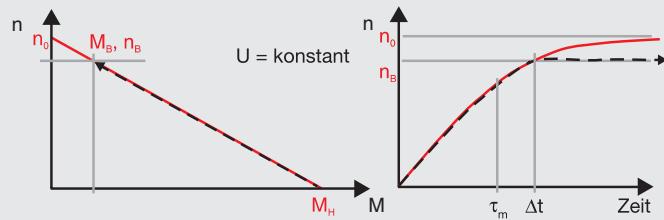
$$\Delta t = \frac{\pi}{300} \cdot \Delta n \cdot \frac{J_R + J_L}{k_M \cdot I}$$

(alle Größen in Einheiten gemäß Katalog)



Anlauf bei konstanter Klemmenspannung

Dabei steigt die Drehzahl vom Anhaltemoment ausgehend entlang der Drehzahlkennlinie. Das größte Drehmoment und damit die größte Beschleunigung sind beim Start wirksam. Je schneller der Motor dreht, desto kleiner ist die Beschleunigung. Die Drehzahl nimmt langsamer zu. Diese exponentiell abflachende Zunahme wird durch die mechanische Zeitkonstante τ_m beschrieben (Zeile 15 der Motordaten). Nach dieser Zeit hat der Rotor bei freiem Wellenende 63% der Leerlaufdrehzahl erreicht. Nach etwa drei mechanischen Zeitkonstanten hat der Rotor nahezu die Leerlaufdrehzahl erreicht.



- Mechanische Zeitkonstante τ_m (in ms) des unbelasteten Motors:

$$\tau_m = 100 \cdot \frac{J_R \cdot R}{k_M^2}$$

- Mechanische Zeitkonstante τ_m' (in ms) beim Antrieb einer zusätzlichen Massenträgheit J_L :

$$\tau_m' = 100 \cdot \frac{J_R \cdot R}{k_M^2} \left(1 + \frac{J_L}{J_R} \right)$$

- Maximale Winkelbeschleunigung α_{max} (in rad / s²) des unbelasteten Motors:

$$\alpha_{max} = 10^4 \cdot \frac{M_H}{J_R}$$

- Maximale Winkelbeschleunigung α_{max} (in rad / s²) beim Antrieb einer zusätzlichen Massenträgheit J_L :

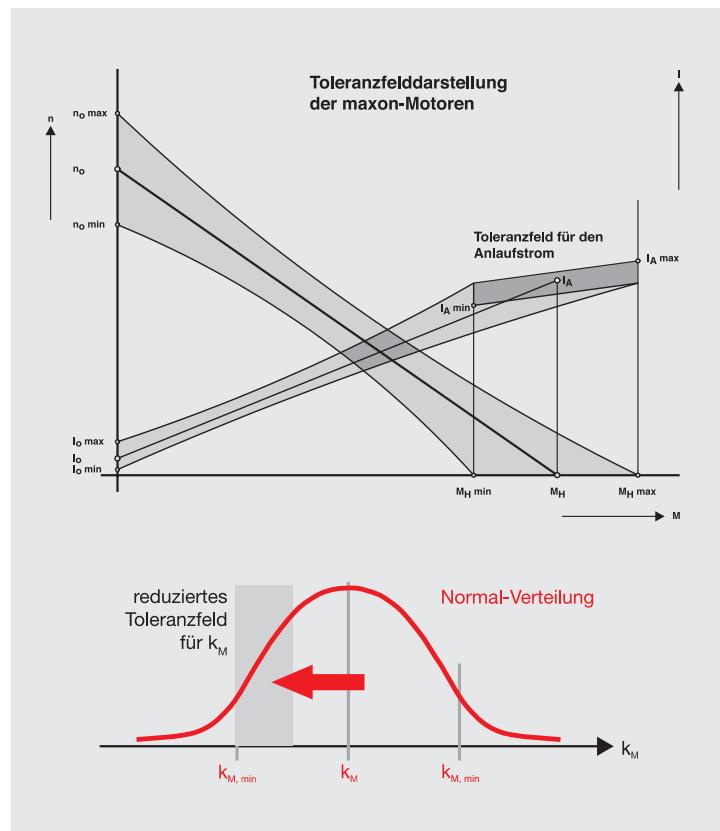
$$\alpha_{max} = 10^4 \cdot \frac{M_H}{J_R + J_L}$$

- Hochlaufzeit (in ms) bei konstanter Spannung bis zum Betriebspunkt (M_B, n_B):

$$\Delta t = \tau_m' \cdot \ln \left(\frac{\left(1 - \frac{M_B + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0}{\left(1 - \frac{M_B + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0 - n_B} \right)$$

Toleranzen

In kritischen Bereichen lassen sich die Toleranzen nicht mehr vernachlässigen. Die möglichen Abweichungen der mechanischen Masse sind in den Übersichtszeichnungen zu finden. Die Motordaten sind Mittelwerte. Das nebenstehende Diagramm macht die Auswirkungen der Toleranzen auf die Kurvencharakteristik sichtbar. Sie werden im Wesentlichen durch Unterschiede im Magnetfeld und im Drahtwiderstand verursacht, weniger durch mechanische Einflüsse. Im Diagramm sind die Veränderungen zum besseren Verständnis stark überzeichnet und vereinfacht dargestellt. Es wird aber deutlich, dass im eigentlichen Betriebsbereich des Motors die Toleranzbreite weniger gross ist als im Anlauf bzw. Leerlauf. Unsere Computerblätter enthalten hierfür alle Detailangaben.



Kalibrieren

Durch gezieltes Entmagnetisieren der Motoren können die Toleranzen eingeschränkt werden. Motordaten werden auf 1 bis 3 % genau spezifizierbar. Allerdings liegen die Motorkennwerte im unteren Teil der üblichen Toleranzbreite.

Das thermische Verhalten

In einem vereinfachten Modell sind für die Erwärmung des Motors primär die Jouleschen Verluste P_J in der Wicklung massgebend. Diese Wärmeenergie muss über die Wicklungs- und Motoroberfläche abgeführt werden. Die Erhöhung ΔT_W der Wicklungstemperatur T_W gegenüber der Umgebungstemperatur T_U entsteht durch die produzierten Wärmeverluste P_J und die Wärmewiderstände R_{th1} und R_{th2} .

$$T_W - T_U = \Delta T_W = (R_{th1} + R_{th2}) \cdot P_J$$

Dabei kennzeichnet der Wärmewiderstand R_{th1} den Wärmeübergang zwischen Wicklung und Stator (Rückschluss und Magnet), während R_{th2} den Wärmeübergang vom Gehäuse an die Umgebung beschreibt. Die Montage des Motors auf einem wärmeabgebenden Chassis senkt den Wärmewiderstand R_{th2} merklich. Die in den Datenblättern angegebenen Werte für die Wärmewiderstände und den zulässigen Dauerstrom wurden in Versuchsreihen ermittelt, bei denen der Motor stromseitig auf eine vertikale Kunststoffplatte montiert war. Der im speziellen Anwendungsfall auftretende Wärmewiderstand R_{th2} muss unter originalen Einbau- und Umgebungsbedingungen ermittelt werden. Bei Motoren mit Metallflansch verringert sich der thermische Widerstand R_{th2} um bis zu 80%, sofern der Motor an eine gut wärmeleitende (z.B. metallische) Aufnahme angekoppelt wird.

Die Erwärmung verläuft für Wicklung und Stator wegen der unterschiedlichen Massen unterschiedlich schnell. Nach Einschalten des Stromes erwärmt sich zuerst die Wicklung (mit Zeitkonstanten von einigen Sekunden bis etwa eine halbe Minute). Der Stator reagiert viel trüger. Seine Zeitkonstante liegt je nach Motorgröße im Bereich von 1 bis 30 Minuten. Nach einiger Zeit stellt sich ein thermisches Gleichgewicht ein. Die Temperaturdifferenz der Wicklung gegenüber der Umgebungstemperatur lässt sich im Dauerbetrieb mit Hilfe des Stroms I (oder im zyklischen Betrieb mit dem Effektivwert des Stroms $I = I_{RMS}$) bestimmen.

$$\Delta T_W = \frac{(R_{th1} + R_{th2}) \cdot R \cdot I^2}{1 - \alpha_{Cu} \cdot (R_{th1} + R_{th2}) \cdot R \cdot I^2}$$

Dabei muss der elektrische Widerstand R bei der aktuellen Umgebungstemperatur eingesetzt werden.

Einfluss der Temperatur

Eine erhöhte Motortemperatur beeinflusst den Wicklungswiderstand und die Magnetkennwerte.

Der Wicklungswiderstand steigt gemäss dem thermischen Widerstandscoefficient für Kupfer linear an:

$$R_T = R_{25} \cdot (1 + \alpha_{Cu} (T - 25^\circ C))$$

Beispiel: Eine Wicklungstemperatur von $75^\circ C$ bewirkt eine Erhöhung des Wicklungswiderstandes um fast 20%.

Der Magnet wird bei höherer Temperatur schwächer. Je nach Magnetmaterial beträgt die Abnahme 1 bis 10% bei $75^\circ C$.

Die wichtigste Konsequenz einer erhöhten Motortemperatur ist, dass die Drehzahlkennlinie steiler wird und sich damit das Anhaltemoment verringert. Das veränderte Anhaltemoment kann in erster Näherung aus der Spannung und dem erhöhten Wicklungswiderstand berechnet werden

$$M_{HT} = k_M \cdot I_{AT} = k_M \cdot \frac{U}{R_T}$$

Motorauswahl

Bevor zur Motorauswahl geschritten werden kann, müssen die Anforderungen an den Antrieb definiert werden.

- Wie schnell und bei welchen Drehmomenten bewegt sich die Last?
- Wie lange dauern die einzelnen Lastphasen?
- Welche Beschleunigungen treten auf?
- Wie gross sind die Trägheitsmomente?

Vielfach ist der Antrieb indirekt, das heisst, es findet eine mechanische Umformung der Motor-Abgabeleistung durch Riemen, Getriebe, Spindeln und ähnliches statt. Die Antriebsgrössen sind also auf die Motorwelle umzurechnen. Die zusätzlichen Schritte für eine Getriebeauslegung sind unten aufgeführt.

Weiter gilt es, die Voraussetzungen der Stromversorgung abzuklären.

- Welche maximale Spannung steht am Motor zur Verfügung?
- Welche Einschränkungen gelten bezüglich des Stromes?

Bei mit Batterie oder Solarzellen versorgten Motoren sind Strom und Spannung sehr stark eingeschränkt. Bei Ansteuerung der Einheit über einen Servoverstärker stellt der maximale Strom des Verstärkers oft eine wichtige Grenze dar.

Auswahl der Motortypen

Die Motortypen werden anhand der geforderten Drehmomente ausgewählt. Einerseits gilt es, das Spitzendrehmoment M_{max} zu berücksichtigen, andererseits das effektive Dauerdrehmoment M_{RMS} .

Der Dauerbetrieb ist durch einen einzigen Betriebspunkt charakterisiert (M_B , n_B). Die in Frage kommenden Motortypen müssen ein Nennmoment (= max. Dauerdrehmoment) M_N aufweisen, das grösser ist als das Betriebsdrehmoment M_B .

$$M_N > M_B$$

Bei Arbeitszyklen, wie Start-Stopp-Betrieb, muss das Nennmoment des Motors grösser sein als das effektive Lastdrehmoment (quadratisch gemittelt). Das vermeidet eine Überhitzung des Motors.

$$M_N > M_{RMS}$$

Das Anhaltemoment des gewählten Motors sollte im Normalfall das auftretende Last-Spitzenmoment übersteigen.

$$M_H > M_{max}$$

Auswahl der Wicklung: Elektrische Anforderungen

Bei der Auswahl der Wicklung ist sicherzustellen, dass die direkt am Motor anliegende Spannung ausreicht, in sämtlichen Betriebspunkten die nötige Drehzahl zu erreichen.

Ungeregelter Antrieb

Bei Anwendungen mit nur einem Betriebspunkt soll dieser oft mit einer festen Spannung U erreicht werden. Gesucht ist somit diejenige Wicklung, deren Kennlinie bei vorgegebener Spannung durch den Betriebspunkt geht. Die Berechnung nutzt die Tatsache, dass alle Motoren eines Typs praktisch dieselbe Kennliniensteigung aufweisen. Vom Betriebspunkt (n_B , M_B) ausgehend lässt sich deshalb eine Soll-Leerlaufdrehzahl $n_{0, theo}$ berechnen.

$$n_{0, theo} = n_B + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_B$$

Diese Soll-Leerlaufdrehzahl muss mit der vorhandenen Spannung U erreicht werden, was die Soll-Drehzahlkonstante $k_{n, theo}$ definiert.

$$k_{n, theo} = \frac{n_{0, theo}}{U}$$

Diejenige Wicklung, deren k_n möglichst nahe bei $k_{n, theo}$ liegt, wird somit bei gegebener Spannung den Betriebspunkt am besten annähern. Eine etwas grössere Drehzahlkonstante bewirkt eine etwas höhere Drehzahl, eine kleinere Drehzahlkonstante eine tiefere. Das Variieren der Spannung gleicht die Drehzahl dem geforderten Wert an, ein Prinzip, das auch Servoverstärker anwenden.

Der Motorstrom I errechnet sich aus der Drehmomentkonstante k_M der gewählten Wicklung und dem Betriebsdrehmoment M_B .

$$I = \frac{M_B}{k_M}$$

Tipps zur Evaluation der Anforderungen:

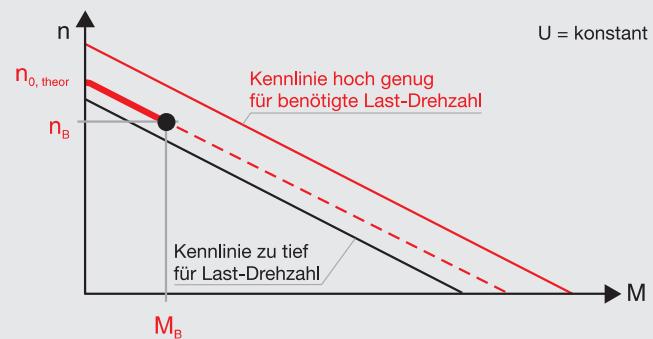
Vielfach sind die Lastpunkte (insbesondere die Drehmomente) noch unbestimmt oder lassen sich nur schwer ermitteln. In solchen Fällen hilft ein Kniff: Betreiben Sie Ihr Gerät mit einem nach Baugrösse und Leistung grob abgeschätzten Messmotor. Variieren Sie die Spannung bis die gewünschten Betriebspunkte und Bewegungsabfolgen erreicht sind. Messen Sie Spannung und Stromverlauf. Mit diesen Angaben und der Bestellnummer des Messmotors können Ihnen unsere Ingenieure oftmals den für Ihren Anwendungsfall geeigneten Motor angeben.

Weitere Optimierungskriterien sind zum Beispiel:

- die zu beschleunigende Masse (Art, Massenträgheit)
- die Betriebsart (kontinuierlich, intermittierend, reversierend)
- die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Medium)
- die Spannungsversorgung (Batterie, Netzgerät)

Bei der Wahl des Motortyps spielen auch Randbedingungen eine grosse Rolle.

- Welche maximale Länge darf die Antriebseinheit inklusive Getriebe und Encoder haben?
- Welcher Durchmesser?
- Welche Lebensdauer wird vom Motor erwartet und welches Kommunikationssystem soll verwendet werden?
- Edelmetallkommutierung für Dauerbetrieb bei kleinen Strömen (Faustregel für höchste Lebensdauer: bis ca. 50% von I_N)
- Graphitkommutierung für hohe Dauerströme (Faustregel: 50% bis ca. 75% von I_N) und häufige Stromspitzen (Start-Stopp-Betrieb, Reversierbetrieb).
- Elektronische Kommutierung für höchste Drehzahlen und Lebensdauer.
- Wie gross sind die Kräfte auf die Welle, müssen Kugellager verwendet werden oder reichen preisgünstigere Sinterlager?



Geregelte Servoantriebe

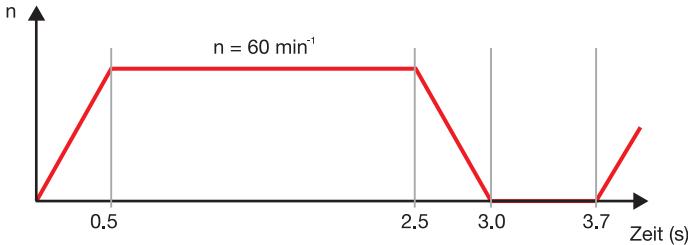
Bei Arbeitszyklen müssen alle Betriebspunkte unterhalb der Kennlinie bei maximaler Spannung U_{max} liegen. Mathematisch heisst dies, dass für alle Betriebspunkte (n_B, M_B) gelten muss:

$$k_n \cdot U_{max} = n_0 > n_B + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_B$$

Bei der Verwendung von Servoverstärkern gehen meist einige Volt der Spannung über den Leistungstransistoren verloren, sodass die effektiv am Motor anliegende Spannung um diesen Betrag kleiner ist. Dies gilt es bei der Festlegung der maximalen Versorgungsspannung U_{max} zu berücksichtigen. Es wird empfohlen, eine Regelreserve von etwa 20% einzubeziehen, sodass die Regelung auch bei ungünstiger Toleranzlage von Motor, Last, Verstärker und Versorgungsspannung gewährleistet ist. Schliesslich wird die mittlere Strombelastung und der Spitzstrom berechnet und sichergestellt, dass der verwendete Servoverstärker diese Ströme liefern kann. Allenfalls muss eine höherohmige Wicklung gewählt werden, sodass die Ströme kleiner werden. Die benötigte Spannung erhöht sich dann allerdings.

Beispiel zur Motor-Getriebe-Auswahl

Ein Antrieb soll sich gemäss folgendem Drehzahldiagramm zyklisch bewegen.



Die zu beschleunigende Trägheit der Last J_L betrage $130\,000\text{ gcm}^2$. Das konstante Reibmoment sei 300 mNm . Der Motor soll mit dem linearen 4-Q-Servoverstärker von maxon (LSC) angetrieben werden. Vom Netzgerät stehen maximal 5 A und 24 V zur Verfügung.

Berechnung der Lastdaten

Das für die Beschleunigung und das Abbremsen benötigte Drehmoment berechnet sich folgendermassen (Vernachlässigung der Motor- und Getriebeträgheit):

$$M_a = J_L \cdot \alpha = J_L \cdot \frac{n}{t} = J_L \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} = 0.013 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{60}{0.5} = 0.163\text{ Nm} = 163\text{ mNm}$$

Zusammen mit dem Reibmoment ergeben sich somit folgende Drehmomente für die verschiedenen Bewegungsphasen:

- Beschleunigungsphase	(Dauer 0.5 s)	463 mNm
- konstante Geschwindigkeit	(Dauer 2 s)	300 mNm
- Abbremsen (die Reibung bremst mit 300 mNm)	(Dauer 0.5 s)	137 mNm
- Stillstand	(Dauer 0.7 s)	0 mNm

Das Spitzendrehmoment tritt beim Beschleunigen auf.

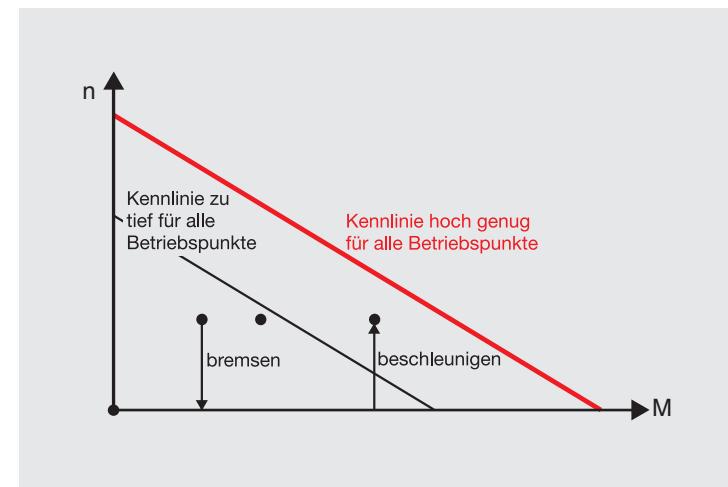
Das RMS-gemittelte Drehmoment des gesamten Arbeitszyklus ist

$$M_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{tot}} (t_1 M_1^2 + t_2 M_2^2 + t_3 M_3^2 + t_4 M_4^2)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{3.7} (0.5 \cdot 463^2 + 2 \cdot 300^2 + 0.5 \cdot 137^2 + 0.7 \cdot 0^2)} \approx 280\text{ mNm}$$

Die maximale Drehzahl (60 min^{-1}) tritt am Ende der Beschleunigungsphase beim maximalen Drehmoment (463 mNm) auf. Die mechanische Spitzenleistung ist somit

$$P_{max} = M_{max} \cdot n_{max} \cdot \frac{\pi}{30} = 0.46 \cdot 60 \cdot \frac{\pi}{30} \approx 2.9\text{ W}$$



Physikalische Größen		und ihre Einheiten	
		SI	Katalog
i	Getriebeuntersetzung*		
I	Motorstrom	A	A, mA
I_A	Anlaufstrom*	A	A, mA
I_0	Leerlaufstrom*	A	mA
I_{RMS}	RMS-gemittelter Strom	A	A, mA
I_N	Nennstrom (= max. Dauerstrom)*	A	A, mA
J_R	Trägheitsmoment des Rotors*	kgm^2	gcm^2
J_L	Trägheitsmoment der Last	kgm^2	gcm^2
k_M	Drehmomentkonstante*	Nm/A	mNm/A
k_n	Drehzahlkonstante*	min^{-1}/V	
M	(Motor-)Drehmoment	Nm	mNm
M_B	Betriebsdrehmoment	Nm	mNm
M_H	Anhalte(dreh)moment*	Nm	mNm
M_{mot}	Motordrehmoment	Nm	mNm
M_R	Reibdrehmoment	Nm	mNm
M_{RMS}	RMS-gemitteltes Drehmoment	Nm	mNm
M_N	Nennmoment (= max. Dauerdrehmoment)*	Nm	mNm
$M_{N,G}$	Max. Drehmoment des Getriebes*	Nm	Nm
n	Drehzahl	min^{-1}	
n_B	Betriebsdrehzahl	min^{-1}	
n_{max}	Grenzdrehzahl des Motors*	min^{-1}	
$n_{max,G}$	Grenzdrehzahl des Getriebes*	min^{-1}	
n_{mot}	Motordrehzahl	min^{-1}	
n_0	Leerlaufdrehzahl*	min^{-1}	
P_{el}	Elektrische Leistung	W	W
P_J	Joulsche Verlustleistung	W	W
P_{mech}	Mechanische Leistung	W	W
R	Anschlusswiderstand	Ω	Ω
R_{25}	Widerstand bei 25°C *	Ω	Ω
R_T	Widerstand bei Temperatur	Ω	Ω
R_{th1}	Wärmewiderstand Wicklung-Gehäuse*	K/W	
R_{th2}	Wärmewiderstand Gehäuse-Luft*	K/W	
t	Zeit	s	s
T	Temperatur	K	$^\circ\text{C}$
T_{max}	Max. zul. Wicklungstemperatur*	K	$^\circ\text{C}$
T_U	Umgebungstemperatur	K	$^\circ\text{C}$
T_W	Wicklungstemperatur	K	$^\circ\text{C}$
U	Motorspannung	V	V
U_{ind}	Induzierte Spannung (EMK)	V	V
U_{max}	Max. Versorgungsspannung	V	V
U_N	Nennspannung*	V	V
α_{Cu}	Widerstandskoeffizient von Cu		
α_{max}	Maximale Winkelbeschleunigung		rad/s^2
$\Delta n/\Delta M$	Kennliniensteigung*		$\text{min}^{-1}/\text{mNm}$
ΔT_W	Temperaturdiff. Wickl.-Umgeb.	K	K
Δt	Hochlaufzeit	s	ms
η	(Motor-)Wirkungsgrad	%	%
η_G	(Getriebe-)Wirkungsgrad*	%	%
η_{max}	Maximaler Wirkungsgrad*	%	%
τ_m	Mechanische Zeitkonstante*	s	ms
τ_S	Therm. Zeitkonstante des Stators*	s	s
τ_W	Therm. Zeitkonstante der Wicklung*	s	s

(*in den Motor- und Getriebedaten gegeben)

Wahl des Getriebes

Gesucht ist ein Getriebe mit einem maximalen Dauerdrehmoment von mindestens 0.28 Nm und einem Kurzzeitdrehmoment von mindestens 0.46 Nm. Diese Anforderung erfüllt beispielsweise das Planetengetriebe mit Durchmesser 22 mm (Metallversion).

Die maximale Getriebeeingangsdrehzahl von 6000 min⁻¹ erlaubt eine maximale Untersetzung von

$$i_{\max} = \frac{n_{\max, G}}{n_B} = \frac{6000}{60} = 100 : 1$$

Wir wählen das dreistufige Getriebe mit der nächst kleineren Untersetzung von 84:1 (Lagerprogramm). Der Wirkungsgrad beträgt maximal 59 %.

Wahl des Motortyps

Drehzahl und Drehmoment werden auf die Motorwelle umgerechnet

$$n_{\text{mot}} = i \cdot n_B = 84 \cdot 60 = 5040 \text{ min}^{-1}$$

$$M_{\text{mot, RMS}} = \frac{M_{\text{RMS}}}{i \cdot \eta} = \frac{280}{84 \cdot 0.59} \approx 5.7 \text{ mNm}$$

$$M_{\text{mot, max}} = \frac{M_{\max}}{i \cdot \eta} = \frac{460}{84 \cdot 0.59} = 9.3 \text{ mNm}$$

Die möglichen Motoren, die gemäss dem maxon Baukastensystem mit dem oben ausgewählten Getriebe zusammenpassen, sind in der **nebenstehenden Tabelle** zusammengefasst. Die Tabelle enthält nur Motoren mit Graphitkommutterierung, die für Start-Stopp-Betrieb besser geeignet sind.

Die Wahl fällt auf einen A-max 22, 6 W, der ein genügend grosses Dauerdrehmoment aufweist. Der Motor sollte eine Drehmomentreserve haben, um auch bei etwas ungünstigerem Wirkungsgrad des Getriebes zu funktionieren. Die zusätzliche Drehmomentanforderung während der Beschleunigung kann von dem Motor problemlos erbracht werden. Das kurzzeitige Spitzendrehmoment ist nicht einmal doppelt so hoch wie das zulässige Dauerdrehmoment des Motors.

Wahl der Wicklung

Der Motortyp A-max 22, 6 W, hat eine mittlere Kennliniensteigung von etwa 480 min⁻¹/mNm. Allerdings ist zu beachten, dass die beiden niedrigsten Wicklungen eine etwas steilere Kennlinie aufweisen. Die gewünschte Leerlaufdrehzahl errechnet sich wie folgt:

$$n_{0, \text{theor}} = n_{\max} + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_{\max} = 5040 + 450 \cdot 9.3 \approx 9200 \text{ min}^{-1}$$

Bei der Berechnung ist natürlich der extreme Arbeitspunkt einzusetzen (max. Drehzahl und max. Drehmoment), da die Kennlinie der Wicklung oberhalb aller Arbeitspunkte im Drehzahl-Drehmoment-Diagramm verlaufen soll. Diese Soll-Leerlaufdrehzahl muss mit der maximal von der Steuerung (LSC) abgegebenen Spannung $U = 19 \text{ V}$ erreicht werden (Spannungsabfall über der Endstufe der LSC 5 V), was die minimale Drehzahlkonstante $k_{n, \text{theor}}$ des Motors definiert.

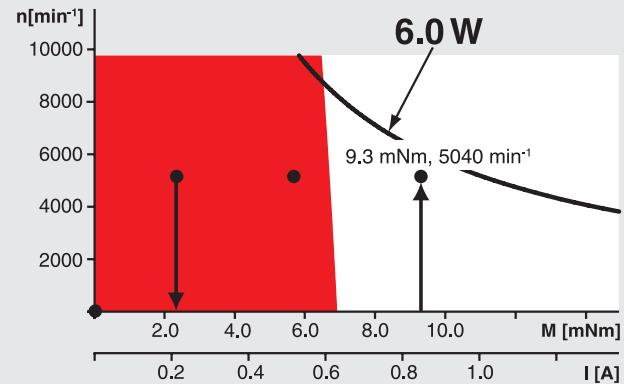
$$k_{n, \text{theor}} = \frac{n_{0, \text{theor}}}{U} = \frac{9200}{19} = 485 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}$$

Den Berechnungen folgend, fällt die Wahl auf den Motor 110162, der mit genügend hohen Drehzahlkonstanten (689 min⁻¹/V), und der ein zweites Wellenende zur Montage eines Encoders hat. Die höhere Drehzahlkonstante der Wicklung gegenüber dem Sollwert bedeutet, dass der Motor bei 19 V schneller läuft als verlangt, was sich aber mit dem Regler ausgleichen lässt. Diese Wahl stellt auch sicher, dass eine Drehzahl-Regelreserve von über 20 % besteht. Damit sind auch ungünstige Toleranzen kein Problem. Die Drehmomentkonstante dieser Wicklung beträgt 13.9 mNm/A. Das maximale Drehmoment entspricht somit einem Spitzenstrom von.

$$I_{\max} = \frac{M_{\max}}{k_M} + I_0 = \frac{9.3}{13.9} + 0.036 \approx 0.7 \text{ A}$$

Dieser Strom ist kleiner als der Maximalstrom (2 A) des Reglers (LSC).

Somit ist ein Getriebemotor gefunden, der die Anforderungen (Drehmoment und Drehzahl) erfüllt und mit dem vorgesehenen Regler betrieben werden kann.



Motor	M_N	Eignung
A-max 22, 6 W	≈ 6.9 mNm	gut
A-max 19, 2.5 W	≈ 3.8 mNm	zu schwach
RE-max 21, 6 W	≈ 6.8 mNm	gut

maxon DC motor and maxon EC motor

Key information

The motor as an energy converter

The electrical motor converts electrical power P_{el} (current I and voltage U) into mechanical power P_{mech} (speed n and torque M). The losses that arise are divided into frictional losses, attributable to P_{mech} and in Joule power losses P_J of the winding (resistance R). Iron losses do not occur in the coreless maxon DC motors. In maxon EC motors, they are treated formally like an additional friction torque. The power balance can therefore be formulated as:

$$P_{el} = P_{mech} + P_J$$

The detailed result is as follows

$$U \cdot I = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot I^2$$

Electromechanical motor constants

The geometric arrangement of the magnetic circuit and winding defines in detail how the motor converts the electrical input power (current, voltage) into mechanical output power (speed, torque). Two important characteristic values of this energy conversion are the speed constant k_n and the torque constant k_M . The speed constant combines the speed n with the voltage induced in the winding U_{ind} (=EMF). U_{ind} is proportional to the speed; the following applies:

$$n = k_n \cdot U_{ind}$$

Similarly, the torque constant links the mechanical torque M with the electrical current I .

$$M = k_M \cdot I$$

The main point of this proportionality is that torque and current are equivalent for the maxon motor.

The current axis in the motor diagrams is therefore shown as parallel to the torque axis as well.

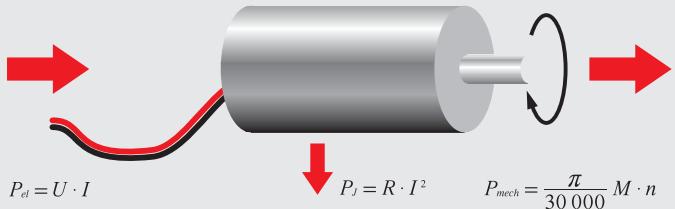
See also: Technology – short and to the point, explanation of the motor

Units

In all formulas, the variables are to be used in the units according to the catalog (cf. physical variables and their units on page 42).

The following applies in particular:

- All torques in mNm
- All currents in A (even no-load currents)
- Speeds (rpm) instead of angular velocity (rad/s)



Motor constants

Speed constant k_n and torque constant k_M are not independent of one another. The following applies:

$$k_n \cdot k_M = \frac{30\,000}{\pi}$$

The speed constant is also called specific speed. Specific voltage, generator or voltage constants are mainly the reciprocal value of the speed constant and describe the voltage induced in the motor per speed. The torque constant is also called specific torque. The reciprocal value is called specific current or current constant.

Motor diagrams

A diagram can be drawn for every maxon DC and EC motor, from which key motor data can be taken. Although tolerances and temperature influences are not taken into consideration, the values are sufficient for a first estimation in most applications. In the diagram, speed n , current I , power output P_2 and efficiency η are applied as a function of torque M at constant voltage U .

Speed-torque line

This curve describes the mechanical behavior of the motor at a constant voltage U :

– Speed decreases linearly with increasing torque.

– The faster the motor turns, the less torque it can provide.

The curve can be described with the help of the two end points, no-load speed n_0 and stall torque M_H (cf. lines 2 and 7 in the motor data).

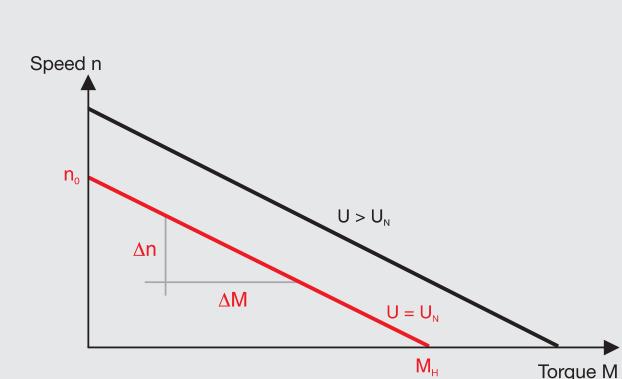
DC motors can be operated at any voltage. No-load speed and stall torque change proportionally to the applied voltage. This is equivalent to a parallel shift of the speed-torque line in the diagram. Between the no-load speed and voltage, the following proportionality applies in good approximation

$$n_0 \approx k_n \cdot U$$

where k_n is the speed constant (line 13 of the motor data).

Independent of the voltage, the speed-torque line is described most practically by the slope or gradient of the curve (line 14 of the motor data).

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} = \frac{n_0}{M_H}$$



Derivation of the speed-torque line

The following occurs if one replaces current I with torque M using the torque constant in the detailed power balance:

$$U \cdot \frac{M}{k_M} = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot \left(\frac{M}{k_M}\right)^2$$

Transformed and taking account of the close relationship of k_M and k_n , an equation is produced of a straight line between speed n and torque M .

$$n = k_n \cdot U - \frac{30\,000}{\pi} \cdot \frac{R}{k_M^2} \cdot M$$

or with the gradient and the no-load speed n_0

$$n = n_0 - \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M$$

The speed-torque gradient is one of the most informative pieces of data and allows direct comparison between different motors. The smaller the speed-torque gradient, the less sensitive the speed reacts to torque (load) changes and the stronger the motor. With the maxon motor, the speed-torque gradient within the winding series of a motor type (i.e. on one catalog page) remains practically constant.

Current gradient

The equivalence of current to torque is shown by an axis parallel to the torque: more current flowing through the motor produces more torque. The current scale is determined by the two points no-load current I_0 and starting current I_A (lines 3 and 8 of motor data). The no-load current is equivalent to the friction torque M_R , that describes the internal friction in the bearings and commutation system.

$$M_R = k_M \cdot I_0$$

In the maxon EC motor, there are strong, speed dependent iron losses in the stator iron stack instead of friction losses in the commutation system.

The motors develop the highest torque when starting. It is many times greater than the normal operating torque, so the current uptake is the greatest as well.

The following applies for the stall torque M_H and starting current I_A

$$M_H = k_M \cdot I_A$$

Efficiency curve

The efficiency η describes the relationship of mechanical power delivered to electrical power consumed.

$$\eta = \frac{\pi}{30\,000} \cdot \frac{n \cdot (M - M_R)}{U \cdot I}$$

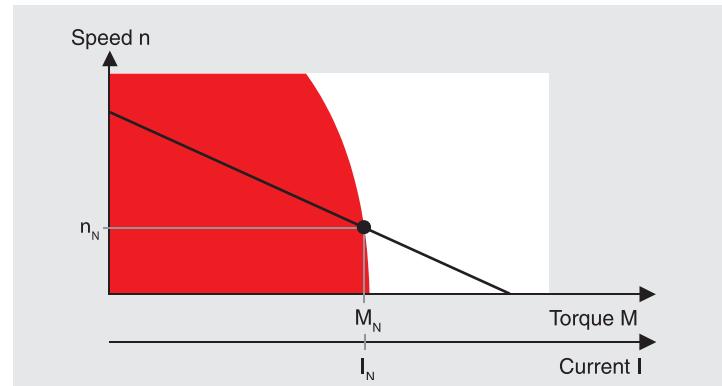
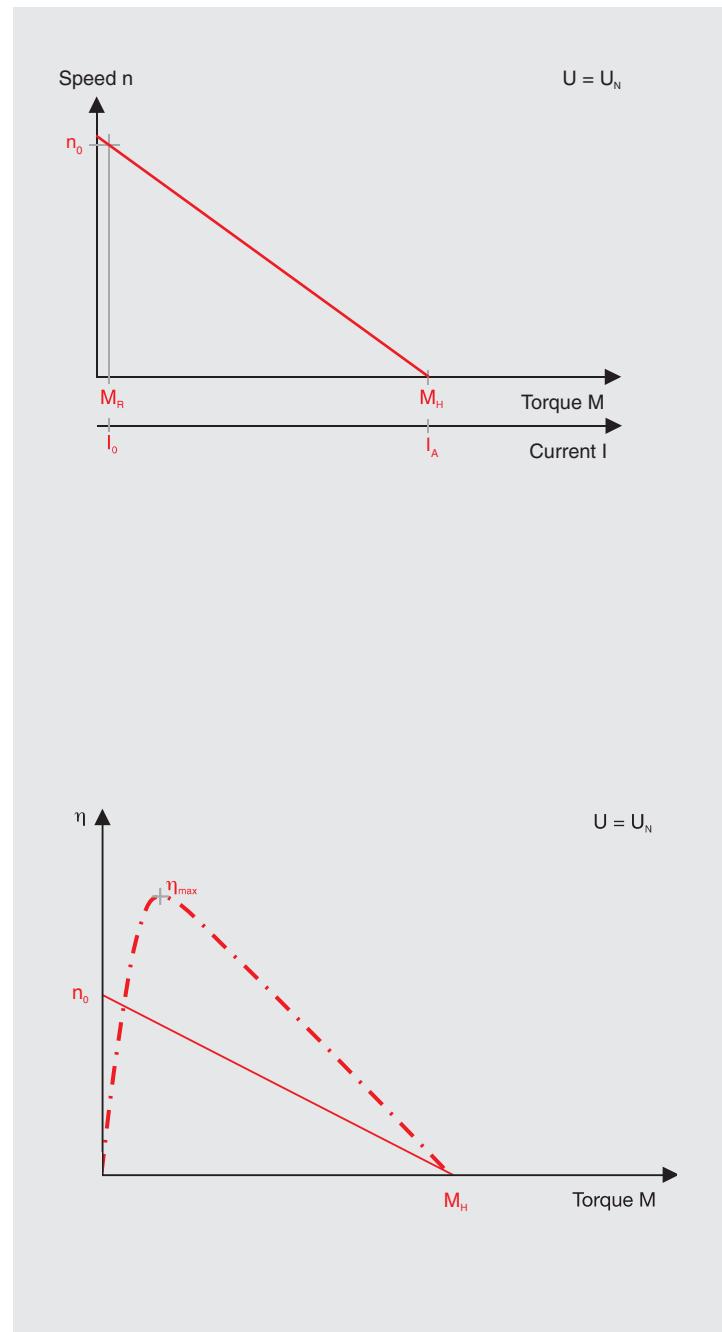
One can see that at constant applied voltage U and due to the proportionality of torque and current, the efficiency increases with increasing speed (decreasing torque). At low torques, friction losses become increasingly significant and efficiency rapidly approaches zero. Maximum efficiency (line 9 of motor data) is calculated using the starting current and no-load current and is dependent on voltage.

$$\eta_{\max} = \left(1 - \sqrt{\frac{I_0}{I_A}}\right)^2$$

A rule of thumb is that maximum efficiency occurs at roughly one seventh of the stall torque. This means that maximum efficiency and maximum output power do not occur at the same torque.

Rated working point

The rated working point is an ideal working point for the motor and derives from operation at nominal voltage U_N (line 1 of motor data) and nominal current I_N (line 6). The nominal torque M_N produced (line 5) in this working point follows from the equivalence of torque and current, and nominal speed n_N (line 4) is reached in line with the speed gradient. The choice of nominal voltage follows from considerations of where the maximum no-load speed should be. The nominal current derives from the motor's thermally maximum permissible continuous current.



Motor diagrams, operating ranges

The catalogue contains a diagram of every maxon DC and EC motor type that shows the operating ranges of the different winding types using a typical motor.

Permanent operating range

The two criteria "maximum continuous torque" and "maximum permissible speed" limit the continuous operating range. Operating points within this range are not critical thermally and do not generally cause increased wear of the commutation system.

Short-term operating range

The motor may only be loaded with the maximum continuous current for thermal reasons. However, temporary higher currents (torques) are allowed. As long as the winding temperature is below the critical value, the winding will not be damaged. Phases with increased currents are time limited. A measure of how long the temporary overload can last is provided by the thermal time constant of the winding (line 19 of the motor data). The magnitude of the times with overload ranges from several seconds for the smallest motors (6 mm to 13 mm diameter) up to roughly one minute for the largest (60 mm to 90 mm diameter). The calculation of the exact overload time is heavily dependent on the motor current and the rotor's starting temperature.

Maximum continuous current, maximum continuous torque

The Joule power losses heat up the winding. The heat produced must be able to dissipate and the maximum rotor temperature (line 22 of the motor data) should not be exceeded. This results in a maximum continuous current, at which the maximum winding temperature is attained under standard conditions (25°C ambient temperature, no heat dissipation via the flange, free air circulation). Higher motor currents cause excessive winding temperatures.

The nominal current is selected so that it corresponds to this maximum permissible constant current. It depends heavily on the winding. These thin wire windings have lower nominal current levels than thick ones. With very low resistive windings, the brush system's capacity can further limit the permissible constant current. With graphite brush motors, friction losses increase sharply at higher speeds. With EC motors, eddy current losses increase in the return as speed increases and produce additional heat. The maximum permissible continuous current decreases at faster speeds accordingly. The nominal torque allocated to the nominal current is almost constant within a motor type's winding range and represents a characteristic size of the motor type.

The maximum permissible speed

for DC motors is primarily limited by the commutation system. The commutator and brushes wear more rapidly at very high speeds.

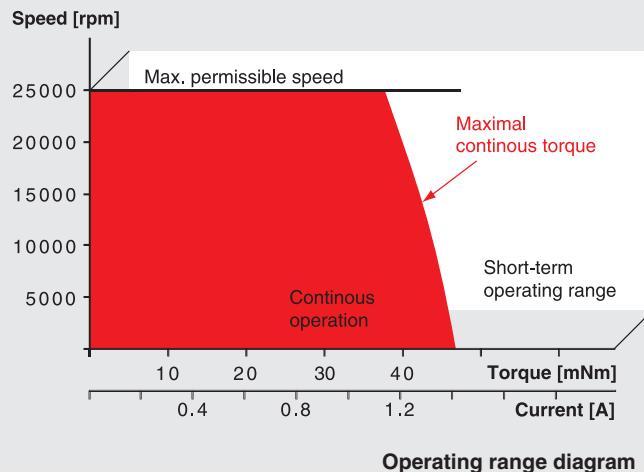
The reasons are:

- Increased mechanical wear because of the large traveled path of the commutator
- Increased electro-erosion because of brush vibration and spark formation.

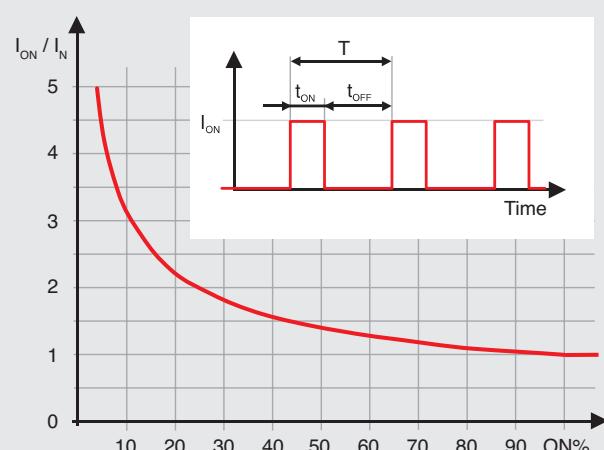
A further reason for limiting the speed is the rotor's residual mechanical imbalance which shortens the service life of the bearings. Higher speeds than the limit speed n_{max} (line 23) are possible, however, they are "paid for" by a reduced service life expectancy. The maximum permissible speed for the EC motor is calculated based on service life considerations of the ball bearings (at least 20 000 hours) at the maximum residual imbalance and bearing load.

Maximum winding temperature

The motor current causes the winding to heat up due to the winding's resistance. To prevent the motor from overheating, this heat must dissipate to the environment via the stator. The coreless winding is the thermally critical point. The maximum rotor temperature must not be exceeded, even temporarily. With graphite brush motors and EC motors which tend to have higher current loads, the maximum rotor temperature is 125°C (in individual cases up to 155°C). Motors with precious metal commutators only allow lower current loads, so that the rotor temperatures must not exceed 85°C. Favourable mounting conditions, such as good air circulation or cooling plates, can significantly lower temperatures.



Operating range diagram



ON

Motor in operation

OFF

Motor stationary

I_{ON}

Max. peak current

I_N

Max. permissible continuous current (line 6)

t_{ON}

ON time [s], should not exceed τ_w (line 19)

T

Cycle time $t_{ON} + t_{OFF}$ [s]

$t_{ON\%}$

Duty cycle as percentage of cycle time.

The motor may be overloaded by the relationship I_{ON} / I_N at X % of the total cycle time.

$$I_{ON} = I_N \sqrt{\frac{T}{t_{ON}}}$$

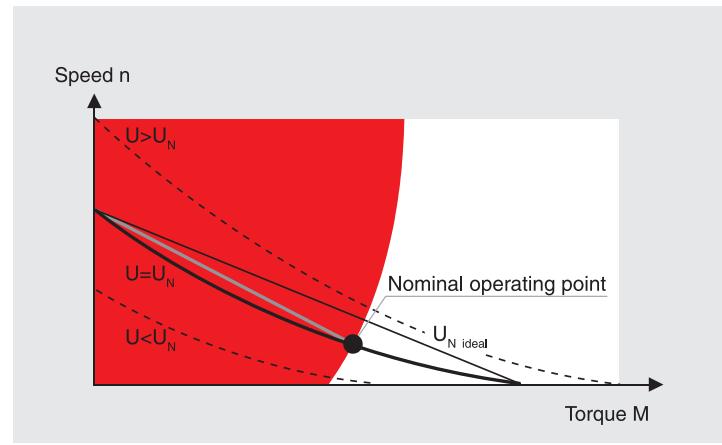
maxon flat motor

Multipole EC motors, such as maxon flat motors, require a greater number of commutation steps for a motor revolution ($6 \times$ number of pole pairs). Due to the wound stator teeth they have a higher terminal inductance than motors with an ironless winding. As a result at higher speed, the current cannot develop fully during the correspondingly short commutation intervals. Therefore, the apparent torque produced is lower. Current is also fed back into the controller's power stage.

As a result, motor behaviour deviates from the ideal linear speed-torque gradient. The apparent speed-torque gradient depends on voltage and speed: The gradient is steeper at higher speeds.

Mostly, flat motors are operated in the continuous operation range where the achievable speed-torque gradient at nominal voltage can be approximated by a straight line between no-load speed and nominal working point. The achievable speed-torque gradient is approximately:

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} \approx \frac{n_0 - n_N}{M_N}$$



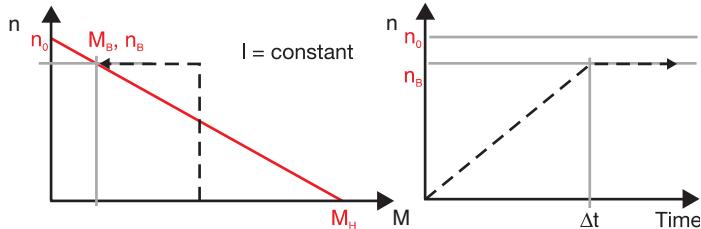
Acceleration

In accordance with the electrical boundary conditions (power supply, control, battery), a distinction is principally made between two different starting processes:

- Start at constant voltage (without current limitation)
- Start at constant current (with current limitation)

Start under constant current

A current limit always means that the motor can only deliver a limited torque. In the speed-torque diagram, the speed increases on a vertical line with a constant torque. Acceleration is also constant, thus simplifying the calculation. Start at constant current is usually found in applications with servo amplifiers, where acceleration torques are limited by the amplifier's peak current.



- Angular acceleration α (in rad / s²) at constant current I or constant torque M with an additional load of inertia J_L :

$$\alpha = 10^4 \cdot \frac{k_M \cdot I}{J_R + J_L} = 10^4 \cdot \frac{M}{J_R + J_L}$$

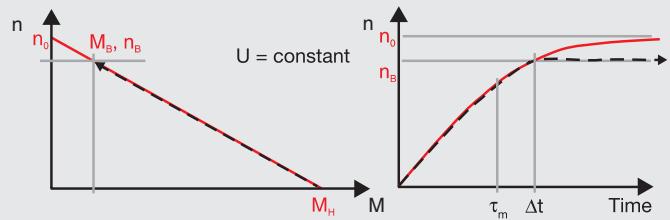
- Run-up time Δt (in ms) at a speed change Δn with an additional load inertia J_L :

$$\Delta t = \frac{\pi}{300} \cdot \Delta n \cdot \frac{J_R + J_L}{k_M \cdot I}$$

(all variables in units according to the catalog)

Start with constant terminal voltage

Here, the speed increases from the stall torque along the speed-torque line. The greatest torque and thus the greatest acceleration is effective at the start. The faster the motor turns, the lower the acceleration. The speed increases more slowly. This exponentially flattening increase is described by the mechanical time constant τ_m (line 15 of the motor data). After this time, the rotor at the free shaft end has attained 63% of the no-load speed. After roughly three mechanical time constants, the rotor has almost reached the no-load speed.



- Mechanical time constant τ_m (in ms) of the unloaded motor:

$$\tau_m = 100 \cdot \frac{J_R \cdot R}{k_M^2}$$

- Mechanical time constants τ_m' (in ms) with an additional load inertia J_L :

$$\tau_m' = 100 \cdot \frac{J_R \cdot R}{k_M^2} \left(1 + \frac{J_L}{J_R} \right)$$

- Maximum angular acceleration α_{max} (in rad / s²) of the unloaded motor:

$$\alpha_{max} = 10^4 \cdot \frac{M_H}{J_R}$$

- Maximum angular acceleration α_{max} (in rad / s²) with an additional load inertia J_L :

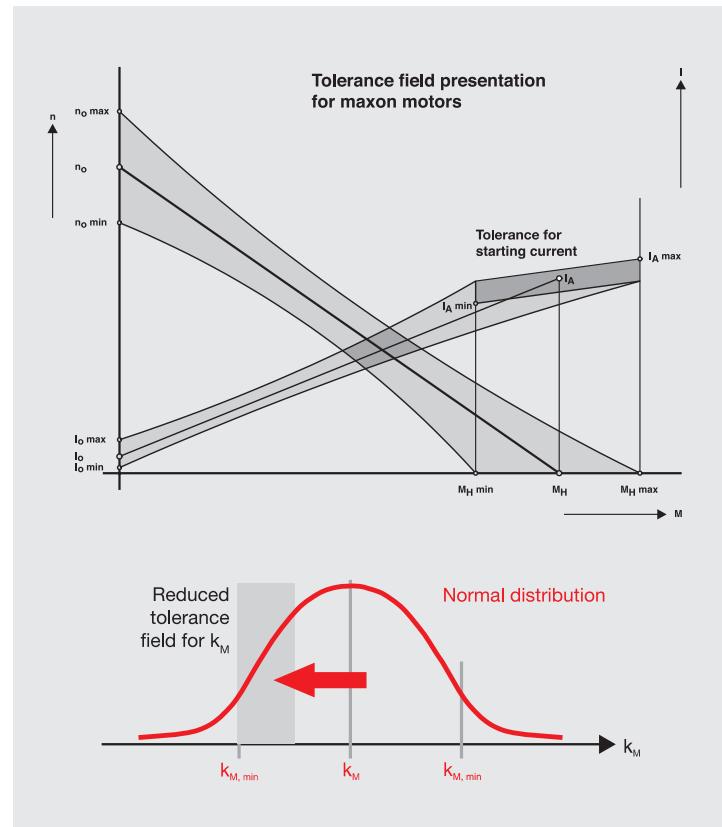
$$\alpha_{max} = 10^4 \cdot \frac{M_H}{J_R + J_L}$$

- Run-up time (in ms) at constant voltage up to the operating point (M_B, n_B):

$$\Delta t = \tau_m' \cdot \ln \left(\frac{\left(1 - \frac{M_B + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0}{\left(1 - \frac{M_B + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0 - n_B} \right)$$

Tolerances

Tolerances must be considered in critical ranges. The possible deviations of the mechanical dimensions can be found in the overview drawings. The motor data are average values: the adjacent diagram shows the effect of tolerances on the curve characteristics. They are mainly caused by differences in the magnetic field strength and in wire resistance, and not so much by mechanical influences. The changes are heavily exaggerated in the diagram and are simplified to improve understanding. It is clear, however, that in the motor's actual operating range, the tolerance range is more limited than at start or at no-load. Our computer sheets contain all detailed specifications.



Calibrating

The tolerances can be limited by controlled de-magnetization of the motors. Motor data can be accurately specified down to 1 to 3%. However, the motor characteristic values lie in the lower portion of the standard tolerance range.

Thermal behavior

The Joule power losses P_J in the winding determine heating of the motor. This heat energy must be dissipated via the surfaces of the winding and motor. The increase ΔT_W of the winding temperature T_W with regard to the ambient temperature arises from heat losses P_J and thermal resistances R_{th1} and R_{th2} .

$$T_W - T_U = \Delta T_W = (R_{th1} + R_{th2}) \cdot P_J$$

Here, thermal resistance R_{th1} relates to the heat transfer between the winding and the stator (magnetic return and magnet), whereas R_{th2} describes the heat transfer from the housing to the environment. Mounting the motor on a heat dissipating chassis noticeably lowers thermal resistance R_{th2} . The values specified in the data sheets for thermal resistances and the maximum continuous current were determined in a series of tests, in which the motor was end-mounted onto a vertical plastic plate. The modified thermal resistance R_{th2} that occurs in a particular application must be determined using original installation and ambient conditions. Thermal resistance R_{th2} on motors with metal flanges decreases by up to 50% if the motor is coupled to a good heat-conducting (e.g. metallic) retainer.

The heating runs at different rates for the winding and stator due to the different masses. After switching on the current, the winding heats up first (with time constants from several seconds to half a minute). The stator reacts much slower, with time constants ranging from 1 to 30 minutes depending on motor size. A thermal balance is gradually established. The temperature difference of the winding compared to the ambient temperature can be determined with the value of the current I (or in intermittent operation with the effective value of the current $I = I_{RMS}$).

$$\Delta T_W = \frac{(R_{th1} + R_{th2}) \cdot R \cdot I^2}{1 - \alpha_{Cu} \cdot (R_{th1} + R_{th2}) \cdot R \cdot I^2}$$

Here, electrical resistance R must be applied at the actual ambient temperature.

Influence of temperature

An increased motor temperature affects winding resistance and magnetic characteristic values.

Winding resistance increases linearly according to the thermal resistance coefficient for copper:

$$R_T = R_{25} \cdot (1 + \alpha_{Cu} (T - 25^\circ C))$$

Example: a winding temperature of $75^\circ C$ causes the winding resistance to increase by nearly 20%.

The magnet becomes weaker at higher temperatures. The reduction is 1 to 10% at $75^\circ C$ depending on the magnet material.

The most important consequence of increased motor temperature is that the speed curve becomes steeper which reduces the stall torque. The changed stall torque can be calculated in first approximation from the voltage and increased winding resistance.

$$M_{HT} = k_M \cdot I_{AT} = k_M \cdot \frac{U}{R_T}$$

Motor selection

The drive requirements must be defined before proceeding to motor selection.

- How fast and at which torques does the load move?
- How long do the individual load phases last?
- What accelerations take place?
- How great are the mass inertias?

Often the drive is indirect, this means that there is a mechanical transformation of the motor output power using belts, gears, screws and the like. The drive parameters, therefore, are to be calculated to the motor shaft. Additional steps for gear selection are listed below.

Furthermore, the power supply requirements need to be checked.

- Which maximum voltage is available at the motor terminals?
- Which limitations apply with regard to current?

The current and voltage of motors supplied with batteries or solar cells are very limited. In the case of control of the unit via a servo amplifier, the amplifier's maximum current is often an important limit.

Selection of motor types

The possible motor types are selected using the required torque. On the one hand, the peak torque, M_{max} , is to be taken into consideration and on the other, the effective torque M_{RMS} . Continuous operation is characterized by a single operating point (M_B, n_B). The motor types in question must have a nominal torque (= max. continuous torque) M_N that is greater than operating torque M_B .

$$M_N > M_B$$

In work cycles, such as start/stop operation, the motor's nominal torque must be greater than the effective load torque (quadratically averaged). This prevents the motor from overheating.

$$M_N > M_{RMS}$$

The stall torque of the selected motor should usually exceed the emerging load peak torque.

$$M_H > M_{max}$$

Selection of the winding: electric requirement

In selecting the winding, it must be ensured that the voltage applied directly to the motor is sufficient for attaining the required speed in all operating points.

Unregulated operation

In applications with only one operating point, this is often achieved with a fixed voltage U . A winding is sought with a speed-torque line that passes through the operating point at the specified voltage. The calculation uses the fact that all motors of a type feature practically the same speed-torque gradient. A target no-load speed $n_{0, theo}$ is calculated from operating point (n_B, M_B).

$$n_{0, theo} = n_B + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_B$$

This target no-load speed must be achieved with the existing voltage U , which defines the target speed constant.

$$k_{n, theo} = \frac{n_{0, theo}}{U}$$

Those windings whose k_n is as close to $k_{n, theo}$ as possible, will approximate the operating point the best at the specified voltage. A somewhat larger speed constant results in a somewhat higher speed, a smaller speed constant results in a lower one. The variation of the voltage adjusts the speed to the required value, a principle that servo amplifiers also use.

Motor current I is calculated from the torque constant k_M of the selected winding and the operating torque M_B .

$$I = \frac{M_B}{k_M}$$

Advices for evaluating the requirements:

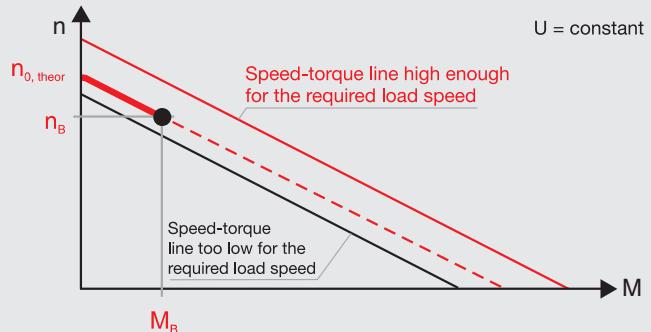
Often the load points (especially the torque) are not known or are difficult to determine. In such cases you can operate your device with a measuring motor roughly estimated according to size and power. Vary the voltage until the desired operating points and motion sequences have been achieved. Measure the voltage and current flow. Using these specifications and the order number of the measuring motor, our engineers can often specify the suitable motor for your application.

Additional optimization criteria are, for example:

- Mass to be accelerated (type, mass inertia)
- Type of operation (continuous, intermittent, reversing)
- Ambient conditions (temperature, humidity, medium)
- Power supply, battery

When selecting the motor type, other constraints also play a major role:

- What maximum length should the drive unit have, including gear and encoder?
- What diameter?
- What service life is expected from the motor and which commutation system should be used?
- Precious metal commutation for continuous operation at low currents (rule of thumb for longest service life: up to approx. 50% of I_N)
- Graphite commutation for high continuous currents (rule of thumb: 50% to approx. 75% of I_N) and frequent current peaks (start/stop operation, reversing operation).
- Electronic commutation for highest speeds and longest service life.
- How great are the forces on the shaft, do ball bearings have to be used or are less expensive sintered bearings sufficient?

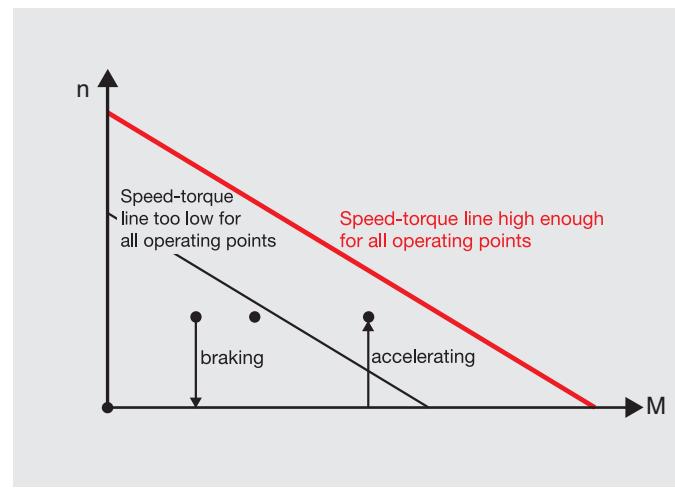


Regulated servo drives

In work cycles, all operating points must lie beneath the curve at a maximum voltage U_{max} . Mathematically, this means that the following must apply for all operating points (n_B, M_B):

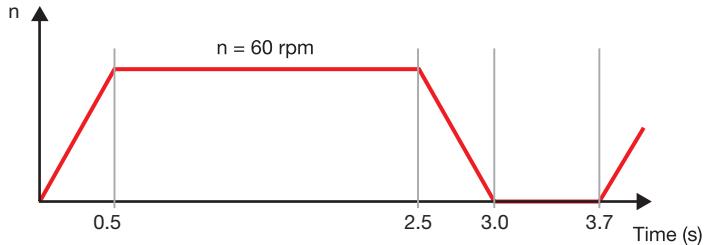
$$k_n \cdot U_{max} = n_0 > n_B + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_B$$

When using servo amplifiers, a voltage drop occurs at the power stage, so that the effective voltage applied to the motor is lower. This must be taken into consideration when determining the maximum supply voltage U_{max} . It is recommended that a regulating reserve of some 20% be included, so that regulation is even ensured with an unfavorable tolerance situation of motor, load, amplifier and supply voltage. Finally, the average current load and peak current are calculated ensuring that the servo amplifier used can deliver these currents. In some cases, a higher resistance winding must be selected, so that the currents are lower. However, the required voltage is then increased.



Example for motor/gear selection

A drive should move cyclically in accordance with the following speed diagram.



The inertia of load J_L to be accelerated is $130\,000\text{ gcm}^2$. The constant friction torque is 300 mNm . The motor is to be driven with the linear 4-Q servo amplifier from maxon (LSC). The power supply delivers max. 5 A and 24 V.

Calculation of load data

The torque required for acceleration and braking are calculated as follows (motor and gearhead inertia omitted):

$$M_a = J_L \cdot \alpha = J_L \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} = 0.013 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{60}{0.5} = 0.163 \text{ Nm} = 163 \text{ mNm}$$

Together with the friction torque, the following torques result for the different phases of motion.

- Acceleration phase	(duration 0.5 s)	463 mNm
- Constant speed	(duration 2 s)	300 mNm
- Braking (friction brakes with 300 mNm)	(duration 0.5 s)	137 mNm
- Standstill	(duration 0.7 s)	0 mNm

Peak torque occurs during acceleration.

The RMS determined torque of the entire work cycle is

$$M_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{tot}} (t_1 M_1^2 + t_2 M_2^2 + t_3 M_3^2 + t_4 M_4^2)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{3.7} (0.5 \cdot 463^2 + 2 \cdot 300^2 + 0.5 \cdot 137^2 + 0.7 \cdot 0^2)} \approx 280 \text{ mNm}$$

The maximum speed (60 rpm) occurs at the end of the acceleration phase at maximum torque (463 mNm). Thus, the peak mechanical power is:

$$P_{max} = M_{max} \cdot n_{max} \cdot \frac{\pi}{30} = 0.46 \cdot 60 \cdot \frac{\pi}{30} \approx 2.9 \text{ W}$$

Physical variables		and their units	
SI	Catalog		
i	Gear reduction*		
I	Motor current	A	A, mA
I_A	Starting current*	A	A, mA
I_0	No-load current*	A	mA
I_{RMS}	RMS determined current	A	A, mA
I_N	Nominal current*	A	A, mA
J_R	Moment of inertia of the rotor*	kgm^2	gcm^2
J_L	Moment of inertia of the load	kgm^2	gcm^2
k_M	Torque constant*	Nm/A	mNm/A
k_n	Speed constant*		rpm/V
M	(Motor) torque	Nm	mNm
M_B	Operating torque	Nm	mNm
M_H	Stall torque*	Nm	mNm
M_{mot}	Motor torque	Nm	mNm
M_R	Moment of friction	Nm	mNm
M_{RMS}	RMS determined torque	Nm	mNm
M_N	Nominal torque	Nm	mNm
$M_{N,G}$	Max. torque of gear*	Nm	Nm
n	Speed	rpm	rpm
n_B	Operating speed	rpm	rpm
n_{max}	Limit speed of motor*	rpm	rpm
$n_{max,G}$	Limit speed of gear*	rpm	rpm
n_{mot}	Motor speed	rpm	rpm
n_0	No-load speed*	rpm	rpm
P_{el}	Electrical power	W	W
P_J	Joule power loss	W	W
P_{mech}	Mechanical power	W	W
R	Terminal resistance	Ω	Ω
R_{25}	Resistance at 25°C *	Ω	Ω
R_T	Resistance at temperature T	Ω	Ω
R_{th1}	Heat resistance winding housing*	K/W	K/W
R_{th2}	Heat resistance housing/air*	K/W	K/W
t	Time	s	s
T	Temperature	K	$^\circ\text{C}$
T_{max}	Max. winding temperature*	K	$^\circ\text{C}$
T_U	Ambient temperature	K	$^\circ\text{C}$
T_W	Winding temperature	K	$^\circ\text{C}$
U	Motor voltage	V	V
U_{ind}	Induced voltage (EMF)	V	V
U_{max}	Max. supplied voltage	V	V
U_N	Nominal voltage*	V	V
α_{Cu}	Resistance coefficient of Cu		
α_{max}	Maximum angle acceleration		rad/s ²
$\Delta n/\Delta M$	Curve gradient*		rpm/mNm
ΔT_w	Temperature difference winding/ambient	K	K
Δt	Run up time	s	ms
η	(Motor) efficiency	%	%
η_G	(Gear) efficiency*		%
η_{max}	Maximum efficiency*		%
τ_m	Mechanical time constant*	s	ms
τ_s	Therm. time constant of the stator*	s	s
τ_w	Therm. time constant of the winding*	s	s

(*Specified in the motor or gear data)

Gear selection

A gear is required with a maximum continuous torque of at least 0.28 Nm and an intermittent torque of at least 0.46 Nm. This requirement is fulfilled, for example, by a planetary gear with 22 mm diameter (metal version).

The recommended input speed of 6000 rpm allows a maximum reduction of:

$$i_{\max} = \frac{n_{\max, G}}{n_B} = \frac{6000}{60} = 100 : 1$$

We select the three-stage gear with the next smallest reduction of 84 : 1 (stock program). Efficiency is max. 59%.

Motor type selection

Speed and torque are calculated to the motor shaft

$$n_{\text{mot}} = i \cdot n_B = 84 \cdot 60 = 5040 \text{ rpm}$$

$$M_{\text{mot, RMS}} = \frac{M_{\text{RMS}}}{i \cdot \eta} = \frac{280}{84 \cdot 0.59} \approx 5.7 \text{ mNm}$$

$$M_{\text{mot, max}} = \frac{M_{\text{max}}}{i \cdot \eta} = \frac{460}{84 \cdot 0.59} = 9.3 \text{ mNm}$$

The possible motors, which match the selected gears in accordance with the maxon modular system, are summarized in the table opposite. The table only contains motors with graphite commutation which are better suited to start/stop operation.

Selection falls on an A-max 22, 6 W, which demonstrates a sufficiently high continuous torque. The motor should have a torque reserve so that it can even function with a somewhat unfavorable gear efficiency. The additional torque requirement during acceleration can easily be delivered by the motor. The temporary peak torque is not even twice as high as the continuous torque of the motor.

Selection of the winding

The motor type A-max 22, 6 W has an average speed-torque gradient of some 450 rpm/mNm. However, it should be noted that the two lowest resistance windings have a somewhat steeper gradient. The desired no-load speed is calculated as follows:

$$n_{0, \text{theor}} = n_{\max} + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_{\max} = 5040 + 450 \cdot 9.3 \approx 9200 \text{ rpm}$$

The extreme working point should of course be used in the calculation (max. speed and max. torque), since the speed-torque line of the winding must run above all working points in the speed / torque diagram.

This target no-load speed must be achieved with the maximum voltage $U = 19 \text{ V}$ supplied by the control (LSC), (voltage drop of the power amplifier of the LSC 5 V), which defines the minimum target speed constant $k_{n, \text{theor}}$ of the motor.

$$k_{n, \text{theor}} = \frac{n_{0, \text{theor}}}{U} = \frac{9200}{19} = 485 \frac{\text{rpm}}{\text{V}}$$

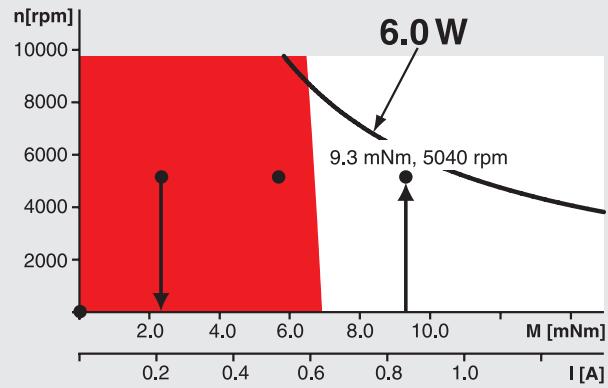
Based on the calculation, motor 110162 is chosen which corresponds to the winding with the next highest speed constant (689 rpm/V) and has a second shaft end for mounting the encoder. The winding's higher speed constant compared to the target value means that the motor runs faster than required at 19 V which, however, can be compensated for by the controller. This selection also ensures that there is a speed regulating reserve of more than 20%. Thus, even unfavorable tolerances are not a problem.

The torque constant of this winding is 13.9 mNm/A. The maximum torque corresponds to a peak current of:

$$I_{\max} = \frac{M_{\max}}{k_M} + I_0 = \frac{9.3}{13.9} + 0.036 \approx 0.7 \text{ A}$$

This current is lower than the maximum current (2 A) of the controller (LSC).

Therefore, a gear motor combination has been found that fulfills the requirements (torque and speed) and can be operated with the controller provided.



Motor	M_N	Suitability
A-max 22, 6 W	≈ 6.9 mNm	Good
A-max 19, 2.5 W	≈ 3.8 mNm	Too weak
RE-max 21, 6 W	≈ 6.8 mNm	Good

maxon DC motor y maxon EC motor

Información clave sobre

El motor como transformador de energía

El motor eléctrico convierte la potencia eléctrica P_{el} (corriente I y tensión U) en potencia mecánica P_{mech} (velocidad n y par M). Las pérdidas que se producen se dividen en pérdidas por fricción en P_{mech} y pérdida de potencia en Julios P_J en el bobinado (resistencia R). Los motores de rotor sin hierro maxon DC motor no tienen pérdidas en el hierro. En los motores EC estas pérdidas se tratan como un par de fricción adicional. Por lo tanto, el equilibrio de potencia puede ser tratado cómo sigue:

$$P_{el} = P_{mech} + P_J$$

En detalle resulta en:

$$U \cdot I = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot I^2$$

Constantes electromecánicas del motor

La disposición geométrica de la bobina y el circuito magnético determina detalladamente como transforma la potencia eléctrica entrante (corriente, tensión) en potencia mecánica de salida (velocidad, par). Dos importantes valores de esta conversión de energía son la constante de velocidad k_n y la constante de par k_M . La constante de velocidad combina la velocidad n con el voltaje inducido en el bobinado U_{ind} (= FEM). U_{ind} es proporcional a la velocidad y se presenta así:

$$n = k_n \cdot U_{ind}$$

De manera análoga, la constante de par combina el par mecánico M con la corriente eléctrica I .

$$M = k_M \cdot I$$

El aspecto más importante de esta relación, es que en el caso de los motores maxon los valores de par y corriente son equivalentes.

El eje de corriente en los diagramas del motor se muestra paralelo al eje de par.

Curvas de motor

Se puede representar un diagrama para cada motor maxon DC y EC del cual se pueden extraer datos clave. Aunque no se tienen en cuenta las tolerancias y la influencia de la temperatura, sus valores son suficientes para una primera estimación de la mayoría de las aplicaciones. En el diagrama, la velocidad n , la corriente I , la potencia de salida P_2 y la eficiencia son calculadas en función del par M a tensión constante U .

Curva velocidad-par

Esta curva describe el comportamiento mecánico de un motor a voltaje constante U :

- La velocidad decrece linealmente cuando aumenta el par
- Cuanto más rápido va un motor, menos par puede suministrar.

La curva se puede describir mediante los dos extremos, velocidad en vacío n_0 y el par de arranque M_H (ver líneas 2 y 7 de los datos de motor).

Los maxon DC motor se pueden alimentar a cualquier tensión. La velocidad en vacío y el par de arranque cambian proporcionalmente al voltaje aplicado. Esto es equivalente a un deslizamiento paralelo de la línea velocidad / par en el diagrama. Entre la velocidad en vacío y el voltaje, la siguiente proporción se aplica

$$n_0 \approx k_n \cdot U$$

Siendo k_n la constante de velocidad (línea 13 de los datos de motor).

Independientemente del voltaje, la línea velocidad / par se describe prácticamente como la pendiente o gradiente de la curva (línea 14 de los datos del motor).

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} = \frac{n_0}{M_H}$$

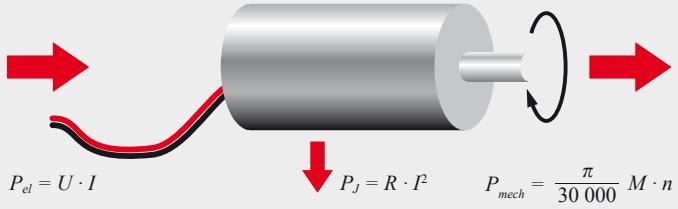
Ver también: Tecnología – breve y conciso, explicación de datos del motor

Unidades

En todas las fórmulas, las variables se usarán con las unidades que figuran en el catálogo (ver magnitudes físicas y sus unidades en pág. 42).

En particular:

- Todos los pares son en mNm
- Todas las corrientes en A (incluso las corrientes en vacío)
- Velocidades en rpm en vez de velocidad angular (rad / s)



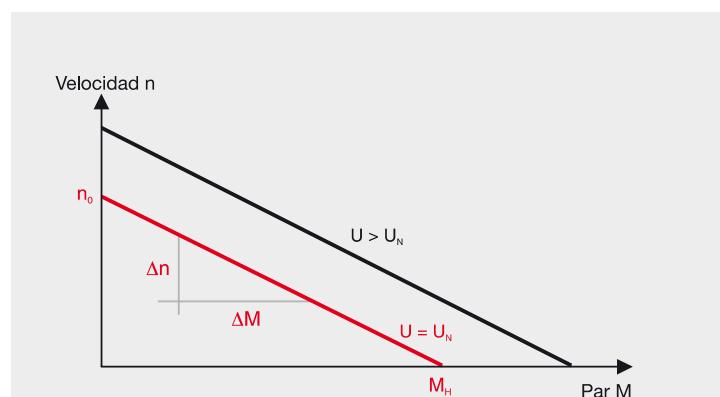
Constantes del motor

La constante de velocidad k_n y constante de par k_M son dependientes entre sí, como sigue:

$$k_n \cdot k_M = \frac{30\,000}{\pi}$$

La constante de velocidad también se llama velocidad específica. El voltaje específico, generador o constantes de voltaje son principalmente el valor recíproco de la constante de velocidad y describen el voltaje inducido en el motor por cada vuelta.

La constante de par también se llama par específico. El valor recíproco es la corriente específica o constante de corriente.



Derivación de la curva velocidad-par

Si se sustituye la corriente I por el par M usando la constante de par se obtiene:

$$U \cdot \frac{M}{k_M} = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot \left(\frac{M}{k_M}\right)^2$$

Transformando y teniendo en cuenta la relación entre k_M y k_n , se obtiene la ecuación de la línea recta entre la velocidad n y el par M

$$n = k_n \cdot U - \frac{30\,000}{\pi} \cdot \frac{R}{k_M^2} \cdot M$$

o con el gradiente y la velocidad en vacío n_0 , se tiene:

$$n = n_0 - \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M$$

El gradiente velocidad-par es uno de los datos más importantes y permite una directa comparación entre diferentes motores. Cuanto más pequeño sea el gradiente velocidad-par, la velocidad será menos sensible a los cambios de par (carga) y el motor será más potente y estable. Con el motor maxon, el gradiente velocidad-par de un tipo de motor permanece prácticamente constante con los diferentes bobinados (de una misma página).

Curva de corriente

La curva de corriente representa la equivalencia entre par y corriente: cuanto más corriente fluya a través del motor, más par se produce. La curva de corriente se puede trazar entre los puntos de los dos extremos: el de corriente en vacío I_0 y la corriente de arranque I_A (líneas 3 y 8 de los datos del motor). La corriente en vacío I_0 es equivalente al par de fricción M_R producido por los rodamientos y el sistema de conmutación.

$$M_R = k_M \cdot I_0$$

En los motores maxon EC existen considerables pérdidas en el hierro, producidas en el estator, que dependen de la velocidad. Sin embargo no tienen pérdidas por fricción en el sistema de conmutación.

El motor desarrolla su máximo par cuando arranca. Este par es varias veces superior al par normal de funcionamiento, y por lo tanto la corriente también es muy superior.

$$M_H = k_M \cdot I_A$$

Curva de eficiencia

La eficiencia η describe la relación entre potencia mecánica entregada y potencia eléctrica consumida.

$$\eta = \frac{\pi}{30\,000} \cdot \frac{n \cdot (M - M_R)}{U \cdot I}$$

Se puede ver que a un voltaje constante dado U y debido a la proporcionalidad de par y corriente, la eficiencia aumenta con el aumento de la velocidad (disminución del par). A pares bajos, las pérdidas por fricción son cada vez más relevantes y la eficiencia se aproxima a cero. La máxima eficiencia (línea 9 de los datos del motor) se calcula usando la corriente de arranque y la velocidad en vacío y depende del voltaje.

$$\eta_{max} = \left(1 - \sqrt{\frac{I_0}{I_A}}\right)^2$$

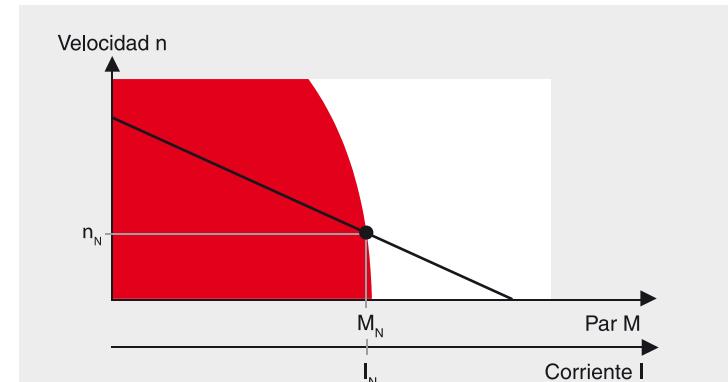
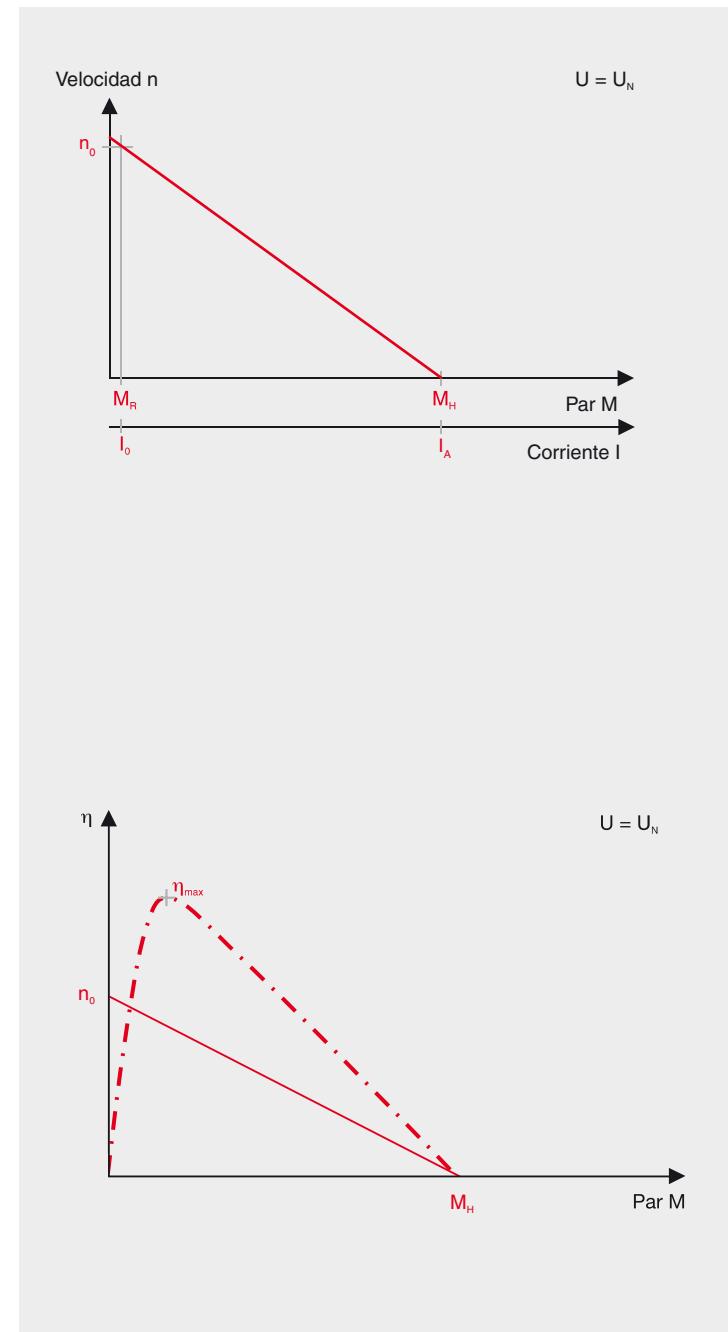
La máxima potencia y la máxima eficiencia no se producen al mismo nivel de par.

Punto de trabajo nominal

El punto de trabajo nominal es un punto de trabajo ideal del motor y viene del funcionamiento a tensión nominal U_N (línea 1 de los datos del motor) y a corriente nominal (línea 6). El par nominal M_N producido (línea 5) en este punto de trabajo sigue la constante de corriente/par.

$$M_N \approx k_M \cdot (I_N - I_0)$$

La velocidad nominal n_N (línea 4) sigue la pendiente de velocidad. La tensión nominal ha sido escogida de forma que el motor no sobrepase su velocidad máxima sin carga. La corriente nominal deriva de la máxima corriente en continuo, limitada por razones térmicas.



Diagramas del motor, rangos de funcionamiento

El catálogo contiene para cada tipo de motor maxon CC y EC un diagrama que muestra los rangos de funcionamiento de los diferentes bobinados usando un motor de ejemplo.

Rango de funcionamiento permanente

Los dos criterios, «máximo par en continuo» y «máxima velocidad permisible» limitan en rango de funcionamiento en continuo. Los puntos de trabajo dentro de esta zona no son críticos térmicamente y no causan aumento del desgaste del sistema de conmutación.

Funcionamiento intermitente

El motor no debe funcionar en continuo más alla de su máxima corriente por razones térmicas. Sin embargo se pueden permitir cortos periodos de corrientes (pares) más elevadas. Siempre que el bobinado esté por debajo de su máxima temperatura, no sufrirá daños. Los periodos con corrientes altas deben ser cortos. Una medida de cuánto puede durar la sobrecarga viene dada por la constante térmica del bobinado (línea 19 de los datos del motor). La magnitud de los tiempos de sobrecarga varía desde varios segundos para los motores pequeños (6 a 13 mm de diámetro) hasta aproximadamente un minuto para los más grandes (60 a 90 mm de diámetro). El cálculo exacto del tiempo de sobrecarga depende de la corriente en el motor y de la temperatura inicial del rotor.

Máxima corriente en continuo, máximo par en continuo

Las pérdidas por efecto Joule calientan el bobinado. Esto da lugar a una máxima corriente en continuo I_{cont} . (línea 22 de los datos del motor), a la cual se alcanza la máxima temperatura del rotor en condiciones estándar (a 25°C de temperatura ambiente, no disipación de calor a través de la brida del motor, libre circulación de aire). Las corrientes por encima de este valor causan temperaturas excesivas en el bobinado.

valor causan temperaturas excesivas en el bobinado. La corriente nominal corresponde con la máxima corriente en continuo admisible. La máxima corriente en continuo depende principalmente del bobinado. Los hilos finos en el bobinado tienen corrientes en continuo menores que los hilos más gruesos. En el caso de bobinados de baja resistencia óhmica, la capacidad de soportar corrientes se ve limitada por el sistema de commutación. En los motores con escobillas de grafito al aumentar la velocidad, las pérdidas por fricción aumentan bruscamente.

En los motores EC, las pérdidas por corrientes de Eddy en el retorno magnético, aumentan con la velocidad y producen un calentamiento adicional. Consecuentemente, al aumentar la velocidad, la máxima corriente en continuo admisible disminuye.

El par nominal asignado a la corriente nominal es prácticamente constante para todos los bobinados y representa una característica del tamaño y del tipo de motor.

La máxima velocidad permitida

La máxima velocidad permitida
Está limitada por el sistema de conmutación. El colector y las escobillas se desgastan más rápidamente a velocidades muy altas.

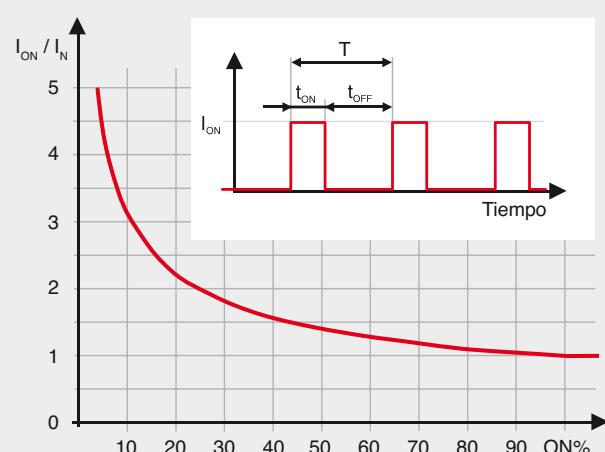
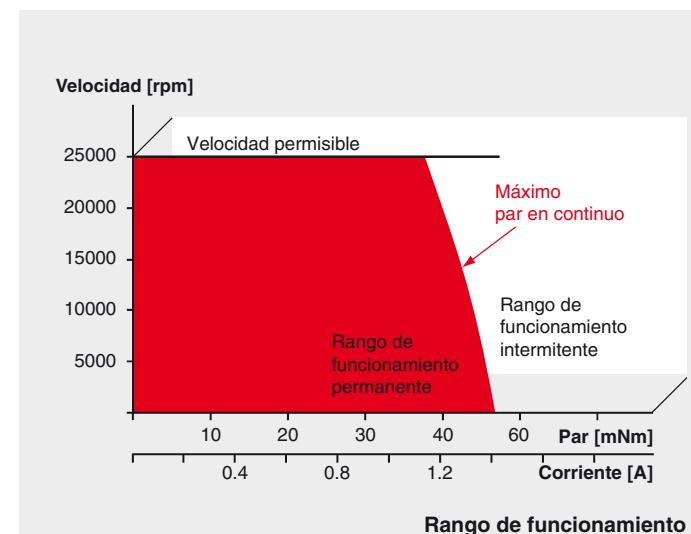
- Aumento del desgaste mecánico debido a que la distancia recorrida por el colector es mayor.
 - Aumento del desgaste por electroerosión debido a la vibración de las escobillas y la formación de chispas.

Además la velocidad debe limitarse debido al desequilibrio residual del rotor el cual reduce la vida útil de los rodamientos. Es posible obtener velocidades por encima de la máxima velocidad permisible n_{max} (línea 23), pero se «paga el precio» con una reducción de la vida útil del motor. La máxima velocidad permitida en los motores EC se calcula en función de la vida útil de los rodamientos a bolas (como mínimo 20 000 horas) con el máximo desequilibrio residual del rotor y máxima carga admisible.

Máxima temperatura del bobinado

Máxima temperatura del bobinado
La corriente del motor causa el calentamiento del bobinado debido a su resistencia óhmica. Para evitar el sobrecaleamiento, este calor debe ser disipado al ambiente a través del estator. El bobinado del rotor sin hierro es la parte más crítica. La máxima temperatura no debe excederse ni siquiera durante cortos períodos. Los motores de escobillas de grafito suelen tener corrientes más elevadas. La máxima temperatura del rotor es de 125°C (en algunos casos hasta 155°C). Los motores con conmutación de metal precioso solamente admiten bajas corrientes, de tal manera que la temperatura del rotor no excede los 85°C.

Las temperaturas se reducen notablemente en condiciones favorables, como una buena circulación de aire o con disipadores de calor.



ON	Motor en funcionamiento
OFF	Motor parado
I_{ON}	Máx. corriente de pico
I_N	Máx. corriente en continuo (línea 6)
t_{ON}	Tiempo en funcionam. [s], debe ser inferior τ_w (línea 19)
T	Duración del ciclo de trabajo $t_{ON} + t_{OFF}$ [s]
$t_{ON\%}$	tiempo de funcionam. como porcentaje del tiempo total T. El motor puede ser sobrecargado por la relación I_{ON}/I_{cont} durante X % del total Ciclo de Trabajo

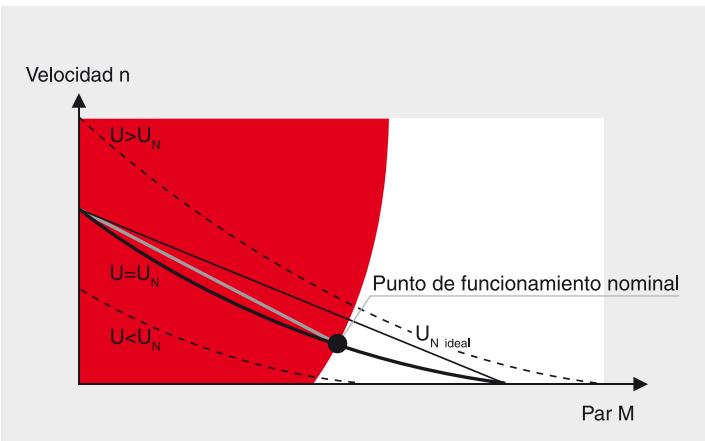
$$I_{on} = I_N \sqrt{\frac{T}{t_{ON}}}$$

maxon flat motor

Los motores EC multipolares, como los motores planos maxon, necesitan un mayor número de pasos de conmutación por cada vuelta de motor ($6 \times$ número de pares de polos). Tienen una inductancia mayor que los motores de rotor sin hierro debido a los bobinados del estator. A velocidades muy elevadas, el corto espacio de tiempo de conmutación no permite que la corriente alcance su valor máximo, por lo que el par producido es ligeramente inferior. Además, la corriente es devuelta a la etapa de potencia. Como resultado, el comportamiento del motor se desvía de la curva ideal y depende del voltaje y la velocidad.

El aparente incremento en la curva es más elevado a velocidades altas. En funcionamiento en continuo, los motores planos alcanzan una curva que se aproxima a una línea recta entre el punto de velocidad en vacío y el punto de trabajo nominal. Este incremento del gradiente se aproxima a:

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} \approx \frac{n_0 - n_N}{M_N}$$



Aceleración

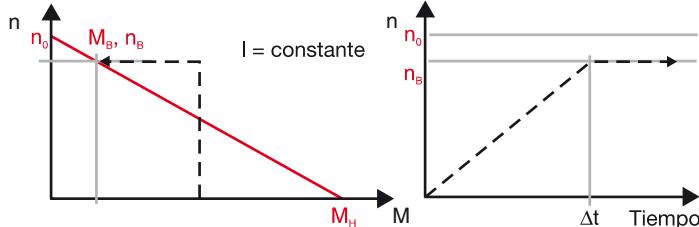
De acuerdo con las limitaciones eléctricas (alimentación, sistema de control, batería), se diferencian dos tipos de arranque:

- Arranque a voltaje constante (sin límite de corriente)
- Arranque con corriente constante (con límite de corriente)

Arranque con corriente constante

Un límite de corriente significa que el motor no sólo puede entregar un par limitado. En el diagrama velocidad-par la velocidad aumenta siguiendo una línea vertical con un par constante. La aceleración también es constante, simplificando el cálculo.

El arranque con corriente constante es típico de los servoamplificadores, donde el par de aceleración está limitado por el pico de corriente del amplificador.



- Aceleración angular α (en rad / s²) a corriente constante I , o par constante M con una carga adicional de inercia J_L :

$$\alpha = 10^4 \cdot \frac{k_M \cdot I}{J_R + J_L} = 10^4 \cdot \frac{M}{J_R + J_L}$$

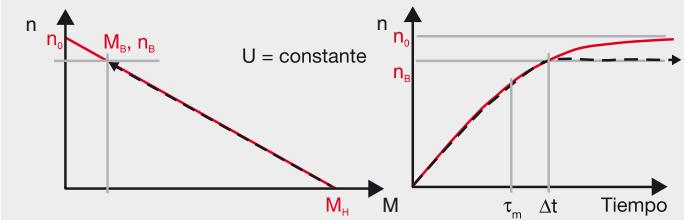
- Tiempo de giro Δt (en ms) con cambio de velocidad Δn y una carga adicional de inercia J_L :

$$\Delta t = \frac{\pi}{300} \cdot \Delta n \cdot \frac{J_R + J_L}{k_M \cdot I}$$

(unidades de acuerdo con el catálogo)

Arranque con voltaje constante en los terminales

En este caso, la velocidad aumenta desde el punto de par de arranque a lo largo de la curva velocidad-par. El par más elevado y por lo tanto la mayor aceleración, tienen lugar en la arrancada. Cuanto más rápido gira el motor, menor es la aceleración. La velocidad aumenta más despacio. Esta curva exponencial, que tiende a hacerse plana, está descrita con la constante mecánica de tiempo τ_m (línea 15 de los datos del motor). Despues de este tiempo, el rotor sin carga del motor ha alcanzado el 63% de la velocidad en vacío. Aproximadamente después de tres veces este tiempo τ_m el motor casi ha alcanzado la velocidad en vacío.



- Constante mecánica de tiempo τ_m (en ms) del motor en vacío:

$$\tau_m = 100 \cdot \frac{J_R \cdot R}{k_M^2}$$

- Constante mecánica de tiempo τ_m' (en ms) con una carga adicional de inercia J_L :

$$\tau_m' = 100 \cdot \frac{J_R \cdot R}{k_M^2} \left(1 + \frac{J_L}{J_R} \right)$$

- Máxima aceleración angular α_{max} (en rad / s²) del motor en vacío:

$$\alpha_{max} = 10^4 \cdot \frac{M_H}{J_R}$$

- Máxima aceleración angular α_{max} (en rad / s²) con una carga adicional de inercia J_L :

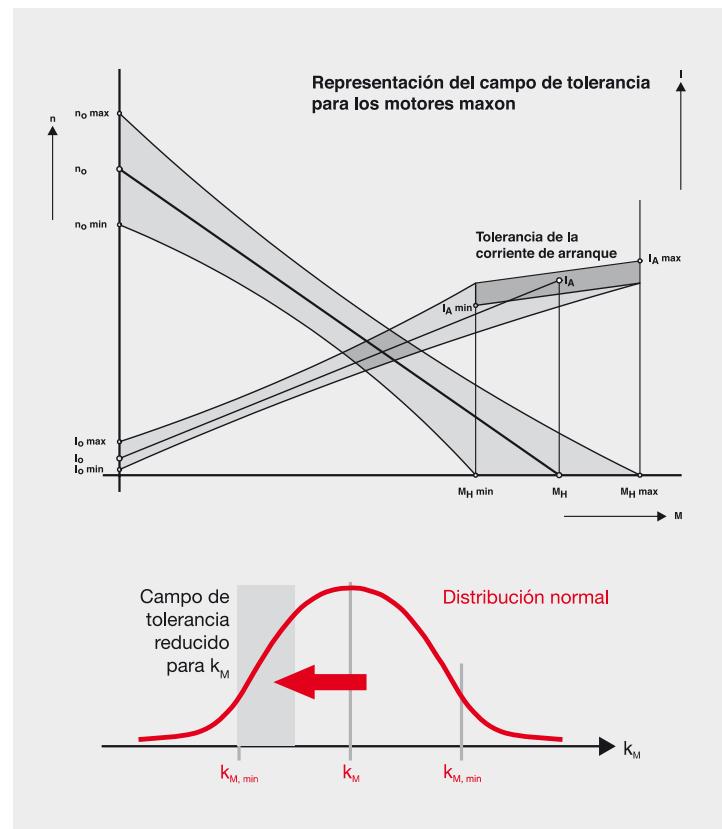
$$\alpha_{max} = 10^4 \cdot \frac{M_H}{J_R + J_L}$$

- Tiempo de giro (en ms) a voltaje constante hasta llegar al punto de trabajo (M_L, n_L):

$$\Delta t = \tau_m' \cdot \ln \left(\frac{\left(1 - \frac{M_L + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0}{\left(1 - \frac{M_L + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0 - n_L} \right)$$

Tolerancias

Hay que considerar las tolerancias en las zonas críticas. Las posibles desviaciones mecánicas se encuentran en los dibujos. Los datos del motor son datos medios: el diagrama de al lado muestra los efectos de las tolerancias en la curva característica. Principalmente están causadas por las variaciones en la fuerza de los campos magnéticos, y las diferencias en la resistencia del hilo del bobinado. No dependen tanto de influencias mecánicas. Estas diferencias se han exagerado y simplificado en el diagrama para una mejor visualización. En el rango de funcionamiento del motor la tolerancia es menor que en los puntos extremos de par de arranque y velocidad en vacío. A lo largo de la curva del motor las tolerancias son menores que en los extremos la misma (par de arranque y funcionamiento en vacío).



Calibración

Las tolerancias se pueden limitar mediante una desmagnetización controlada de los motores. Los datos del motor se pueden especificar con precisión entre 1 y 3%. No obstante las características del motor estarán en la parte inferior del rango normal de tolerancia.

Comportamiento térmico

En un modelo simplificado, las pérdidas de potencia por el efecto Joule P_J en el bobinado determinan el calentamiento del motor. La energía térmica producida debe ser evacuada a través de las superficies del bobinado y la carcasa del motor. El incremento ΔT_W de la temperatura del bobinado T_W con respecto a la temperatura ambiente T_U surge de las pérdidas de calor P_J y las resistencias térmicas R_{th1} y R_{th2} .

$$T_W - T_U = \Delta T_W = (R_{th1} + R_{th2}) \cdot P_J$$

Aquí la resistencia térmica R_{th1} se refiere a la transferencia de calor entre el bobinado y el estator (imán y retorno magnético), mientras que R_{th2} describe la transferencia de calor de la carcasa del motor al ambiente. Montando el motor en un chasis que disipa calor se reduce notablemente el valor de la resistencia térmica R_{th2} . Los valores especificados en las hojas de datos del motor para las resistencias térmicas y la máxima corriente en continuo han sido determinados en una serie de tests, en los cuales el motor estaba montado por un extremo en una placa de plástico vertical. La nueva resistencia térmica R_{th2} que tiene lugar en una aplicación en particular debe ser determinada usando la instalación original y reproduciendo las condiciones ambientales.

El calor se propaga a diferentes velocidades para el bobinado y el estator debido a la diferencia de masas. Cuando se conecta la corriente, el bobinado se calienta primero (con las constantes de tiempo que varían entre algunos segundos y medio minuto). El estator reacciona mucho más lento, con constantes entre 1 y 30 minutos dependiendo del tamaño del motor. El equilibrio de calor se alcanza gradualmente. La diferencia entre la temperatura del bobinado y la temperatura ambiente se puede determinar con el valor de la corriente I (o en funcionamiento intermitente con el valor efectivo de la corriente $I = I_{RMS}$).

$$\Delta T_W = \frac{(R_{th1} + R_{th2}) \cdot R \cdot I^2}{1 - \alpha_{Cu} \cdot (R_{th1} + R_{th2}) \cdot R \cdot I^2}$$

La resistencia eléctrica R debe ser aplicada a la temperatura ambiente actual.

Influencia de la temperatura

El incremento de la temperatura del motor afecta a la resistencia del bobinado y a las características magnéticas.

La resistencia del bobinado aumenta linealmente siguiendo el coeficiente térmico de resistencia del cobre ($\alpha_{Cu} = 0.0039$):

$$R_T = R_{25} \cdot (1 + \alpha_{Cu} (T - 25^\circ C))$$

Ejemplo: Una temperatura de bobinado de 75°C provoca un incremento de la resistencia del bobinado de más del 20%.

El imán se debilita con las temperaturas altas. La pérdida oscila entre un 1 y el 10% dependiendo del material magnético 75°C.

La consecuencia más importante del aumento de temperatura del motor es que la curva de velocidad se vuelve más empinada, lo cual reduce el par de arranque. El nuevo par de arranque se puede calcular en una primera aproximación con el voltaje y el incremento de la resistencia del bobinado.

$$M_{HT} = k_M \cdot I_{AT} = k_M \cdot \frac{U}{R_T}$$

Selección del motor

Los requerimientos de la aplicación deben ser definidos antes de proceder a seleccionar el motor.

- Con qué par y a qué velocidad ha de moverse la carga?
- Cuánto duran los intervalos individuales de carga?
- Qué aceleraciones han de producirse?
- Qué valores tienen las inertias de las masas?

A menudo el accionamiento es indirecto, esto significa que existe una transformación mecánica de la potencia de salida del motor usando correas, engranajes, tornillos sin fin y similares. Por lo tanto, los parámetros del accionamiento se tienen que considerar en el eje del motor. Los consiguientes pasos para la selección del reductor se describen más adelante.

Además hay que comprobar los requisitos de la alimentación.

- Cuál es máximo voltaje disponible en los terminales del motor?
- Qué limitaciones hay en cuanto a la corriente?

La corriente y el voltaje de motores alimentados con baterías o energía solar son limitadas. En el caso de control a través de un servoamplificador, la máxima corriente del mismo es a menudo un límite importante.

Selección de los tipos de motor

La elección de los tipos de motor se realiza en función del par requerido. Por un lado hay que considerar el pico de par M_{max} , y por el otro el par efectivo (medio) M_{RMS} . El funcionamiento permanente se caracteriza por un único punto de trabajo o de carga (M_L , n_L). Los tipos de motor en cuestión deben tener un par nominal (= máx. par en continuo) M_N mayor que el par de funcionamiento M_B .

$$M_N > M_B$$

En funcionamiento cíclico, como aplicaciones de arranque y parada, el par nominal del motor debe ser mayor que el par efectivo de la carga (media cuadrática). Esto evita que el motor sufra un sobrecalentamiento.

$$M_N > M_{RMS}$$

El par de arranque del motor seleccionado normalmente debería ser superior al par máximo de la carga.

$$M_H > M_{max}$$

Selección del bobinado: requerimientos eléctricos

A la hora de elegir el bobinado, hay que asegurarse de que el voltaje aplicado directamente al motor es suficiente para alcanzar la velocidad deseada en todos los puntos de funcionamiento.

Funcionamiento sin regulación

En aplicaciones con sólo un punto de trabajo, ésto a menudo se consigue con un voltaje fijo U . Un bobinado se representa con una línea velocidad-par que pasa a través de los puntos de funcionamiento al voltaje especificado. El cálculo se basa en el hecho de que todos los motores de un mismo tipo presentan prácticamente la misma curva velocidad-par. La velocidad en vacío requerida $n_{0, theor}$ se calcula a partir del punto de trabajo (n_L , M_L).

$$n_{0, theor} = n_L + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_L$$

Esta velocidad en vacío deseada debe alcanzarse con la tensión disponible U , que define la constante de velocidad $k_{n, theor}$ requerida.

$$k_{n, theor} = \frac{n_{0, theor}}{U}$$

Aquellos bobinados cuya k_n está lo más próxima posible a $k_{n, theor}$ se aproximarán mejor al punto de funcionamiento con el voltaje especificado. Una constante de velocidad algo más grande produce una velocidad ligeramente más alta y viceversa. La variación del voltaje ajusta la velocidad al valor requerido, un principio que también usan los servoamplificadores.

La corriente del motor I se calcula a partir de la constante de par k_M del bobinado elegido y del par de la carga M_L .

$$I = \frac{M_L}{k_M}$$

Consejos para la evaluación de los requerimientos:

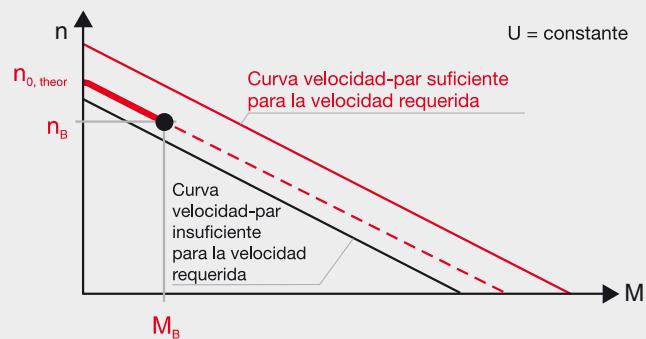
A menudo los puntos de trabajo (especialmente el par) no se conocen o son difíciles de calcular. En estos casos puede accionar su dispositivo con un motor de medida que esté sobredimensionado en tamaño y potencia. Varíe la tensión hasta que consiga alcanzar el punto de trabajo deseado. Entonces mida el voltaje y la corriente. Con estos datos y el número de referencia del motor de medida, nuestros ingenieros calcularán el motor que mejor se ajuste a su aplicación.

Otros criterios de optimización son, por ejemplo:

- Masa a acelerar (tipo, inercia de la masa)
- Tipo de funcionamiento (continuo, intermitente, reversible)
- Condiciones ambientales (temperatura, humedad, tipo de anclaje y de refrigeración)
- Fuente de alimentación, baterías

A la hora de elegir el tipo de motor, hay una serie de factores que también juegan un papel importante:

- Cuál es la longitud máxima que debe tener el accionamiento (motor), incluido el reductor y encoder?
- Qué diámetro?
- Cuál es la vida útil del motor que se espera y qué tipo de sistema de commutación debería usarse?
- Escobillas de metal precioso para funcionamiento continuo con bajas corrientes (recomendación para una larga vida útil: Utilice hasta el 50% de $I_{cont.}$)
- Escobillas de grafito para funcionamiento con altas corrientes en continuo (recomendación para una larga vida útil: Utilice entre el 50 y 75% de $I_{cont.}$) y frecuentes arranques / paradas e inversiones de giro.
- Conmutación electrónica para las velocidades más altas y la vida útil más larga.
- Qué valor tienen las fuerzas axiales y radiales en el eje?, ¿son necesarios rodamientos a bolas o sería suficiente con cojinetes sinterizados, más económicos?

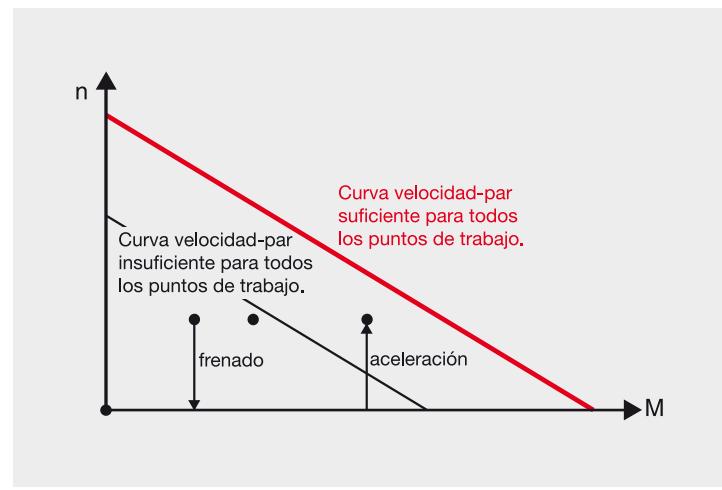


Servoaccionamientos

En todos los ciclos, los puntos de trabajo deben estar por debajo de la curva al máximo voltaje U_{max} . Matemáticamente esto significa que en todos los puntos de trabajo (n_L, M_L) se debe aplicar lo siguiente:

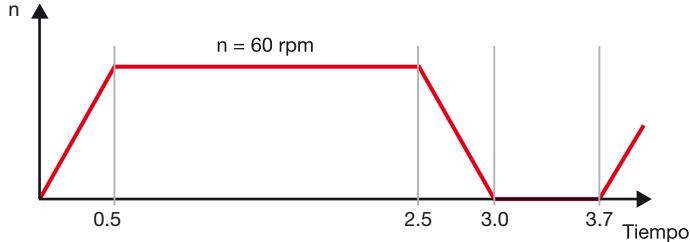
$$k_n \cdot U_{max} = n_0 > n_L + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_L$$

Cuando se usa un servoamplificador, se produce una caída de tensión en la etapa de potencia, por lo que el voltaje aplicado al motor es menor. Esto debe tenerse en cuenta cuando se determina la tensión de alimentación U_{max} . Se recomienda guardar una reserva del 20%, para poder hacer una regulación correcta incluso en el caso de una tolerancia desfavorable del motor, la carga, amplificador y fuente de alimentación. Finalmente, la corriente media y los picos de corriente se calculan asegurándose de que el servoamplificador usado puede entregar dichas corrientes. En algunos casos, se debe seleccionar un bobinado de mayor resistencia para que las corrientes sean menores. Por lo tanto, el voltaje requerido en este caso será más elevado.



Ejemplo del cálculo de un motorreductor

Un motor deberá efectuar un movimiento cíclico conforme al siguiente diagrama de velocidad de giro.



La inercia de la carga a desplazar J_L es de $140\,000 \text{ gcm}^2$. El par de fricción constante es de unos 300 mNm . Para accionar el motor debe emplearse el servoamplificador 4-Q de maxon ESCON 36/2. La fuente de alimentación suministra un máximo de 3 A y 24 V .

Cálculo de los datos de la carga

El par necesario para la aceleración y frenado, se calcula de la siguiente manera (se omiten la inercia del motor y reductor).

$$M_a = J_L \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} = 0.014 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{60}{0.5} = 0.176 \text{ Nm} = 176 \text{ mNm}$$

Junto con el par de fricción, los siguientes pares son necesarios para las diferentes fases del movimiento:

- Fase de aceleración	(duración 0.5 s)	476 mNm
- Velocidad constante	(duración 2 s)	300 mNm
- Frenado (frenado con un par de fricción de 300 mNm)	(duración 0.5 s)	124 mNm
- Motor parado	(duración 0.7 s)	0 mNm

La punta de par ocurre durante la aceleración. El par medio RMS del ciclo de trabajo completo es

$$\begin{aligned} M_{RMS} &= \sqrt{\frac{t_1 \cdot M_1^2 + t_2 \cdot M_2^2 + t_3 \cdot M_3^2 + t_4 \cdot M_4^2}{t_{tot}}} \\ &= \sqrt{\frac{0.5 \cdot 476^2 + 2 \cdot 300^2 + 0.5 \cdot 124^2 + 0.7 \cdot 0}{3.7}} \approx 285 \text{ mNm} \end{aligned}$$

La velocidad máxima (60 rpm) se alcanza al final del proceso de aceleración con el máximo par (463 mNm). Por lo tanto, el pico de potencia mecánica es:

$$P_{max} = M_{max} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot n_{max} = 0.476 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot 60 \approx 3 \text{ W}$$

Variables físicas		SI	y sus unidades Catálogo
i	Reducción*		
I	Corriente del motor	A	A, mA
I_A	Corriente de arranque*	A	A, mA
I_0	Corriente en vacío*	A	mA
I_{RMS}	RMS-Corriente media	A	A, mA
I_N	Corriente nominal*	A	A, mA
J_R	Momento de inercia del rotor*	kgm^2	gcm^2
J_L	Momento de inercia de la carga	kgm^2	gcm^2
k_M	Constante de par*	Nm/A	mNm/A
k_n	Constante de velocidad*		min ⁻¹ /V
M	Par (motor)	Nm	mNm
M_L	Par de carga	Nm	mNm
M_H	Par de arranque*	Nm	mNm
M_{mot}	Par del motor	Nm	mNm
M_R	Par de fricción	Nm	mNm
M_{RMS}	Par efectivo (medio) RMS	Nm	mNm
M_N	Par nominal*	Nm	mNm
$M_{N,G}$	Máx. Par del reductor*	Nm	Nm
n	Velocidad		rpm
n_L	Velocidad de giro de trabajo de la carga		rpm
n_{max}	Máx velocidad del motor*		rpm
$n_{max,G}$	Máx. velocidad del reductor*		rpm
n_{mot}	Velocidad del motor		rpm
n_0	Velocidad en vacío*		rpm
P_{el}	Potencia eléctrica	W	W
P_J	Pérdidas por efecto Joule	W	W
P_{mech}	Potencia mecánica	W	W
R	Resistencia en bornes	Ω	Ω
R_{25}	Resistencia a 25°C*	Ω	Ω
R_T	Resistencia a T	Ω	Ω
R_{th1}	Resistencia térmica bobinado/carcasa*	K/W	
R_{th2}	Resistencia térmica carcasa/ambiente*	K/W	
t	Tiempo	s	s
T	Temperatura	K	°C
T_{max}	Máx. Temperatura del rotor*	K	°C
T_U	Temperatura ambiente	K	°C
T_W	Temperatura del rotor	K	°C
U	Tensión del motor	V	V
U_{ind}	Tensión inducida (FEM)	V	V
U_{max}	Máx. Tensión de alimentación	V	V
U_N	Tensión nominal*	V	V
α_{Cu}	Coeficiente de resistencia del Cu	= 0.0039	
α_{max}	Máx. aceleración angular	rad/s ²	
$\Delta n/\Delta M$	Relación velocidad/par*	rpm/mNm	
ΔT_W	Diferencia de temp. bobinado/ambiente	K	K
Δt	Tiempo de aceleración	s	ms
η	Rendimiento (motor)		%
η_G	Rendimiento (reductor)*		%
η_{max}	Rendimiento máximo*		%
τ_m	Constante mecánica de tiempo*	s	ms
τ_s	Const. de tiempo térmica del estator*	s	s
τ_w	Const. de tiempo térmica del bobinado*	s	s

(*indicado en los datos del motor u reductor)

Selección del reductor

Se necesita un reductor con un par máximo en continuo de al menos 0.28 Nm y un par intermitente de por lo menos 0.47 Nm. Este requerimiento se alcanza por ejemplo, con una reductora planetaria de 22 mm de diámetro (versión metal GB 22 A).

La máx. velocidad de entrada recomendada de 6000 rpm permite una reducción máxima de

$$i_{\max} = \frac{n_{\max, G}}{n_B} = \frac{6000}{60} = 100:1$$

Seleccionamos el reductor de 3 etapas con la reducción inmediatamente inferior, en este caso 84 : 1 (programa stock). La eficiencia máxima es del 59%.

Selección del tipo de motor

La velocidad y el par se calculan en el eje del motor

$$n_{\text{mot}} = i \cdot n_L = 84 \cdot 60 = 5040 \text{ rpm}$$

$$M_{\text{mot, RMS}} = \frac{M_{\text{RMS}}}{i \cdot \eta} = \frac{285}{84 \cdot 0.59} \approx 5.8 \text{ mNm}$$

$$M_{\text{mot, max}} = \frac{M_{\max}}{i \cdot \eta} = \frac{476}{84 \cdot 0.59} \approx 9.6 \text{ mNm}$$

Los posibles motores que, según el sistema modular maxon, se montan con las reductoras seleccionadas se muestran en *la tabla adjunta*. La tabla contiene solamente motores CC con conmutación de grafito, que son más aptos para el funcionamiento con arranque-parada, así como motores EC sin escobillas.

La selección recae sobre un A-max 22, 6 W, que entrega un par en continuo suficiente. El motor debe tener una reserva de par para poder funcionar incluso en el caso de rendimientos desfavorables en la reducción. El motor puede cubrir fácilmente los requerimientos adicionales de par durante la aceleración. El pico de par no alcanza ni dos veces el valor del máximo par en continuo del motor.

Selección del bobinado

El motor tipo A-max 22, 6 W, tiene un gradiente velocidad-par de aproximadamente 450 rpm/mNm. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que los 2 bobinados de menor resistencia tienen un gradiente más inclinado. La velocidad en vacío deseada se calcula de la siguiente manera:

$$n_{0, \text{theor}} = n_{\text{mot}} + \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M_{\max} = 5040 + 450 \cdot 9.6 = 9360 \text{ rpm}$$

El punto de trabajo extremo (máx. velocidad y máx. par) debería de tomarse en consideración, puesto que la línea de velocidad/par del bobinado debe estar por encima de todos los puntos de trabajo del diagrama velocidad/par. Esta velocidad en vacío requerida debería ser alcanzada con el máximo voltaje $U = 24 \text{ V}$ suministrado por el control (ESCON 36/2). Esto define la mínima constante de velocidad requerida $k_{n, \text{theor}}$ del motor.

$$k_{n, \text{theor}} = \frac{n_{0, \text{theor}}}{U} = \frac{9360}{24} = 390 \frac{\text{rpm}}{\text{V}}$$

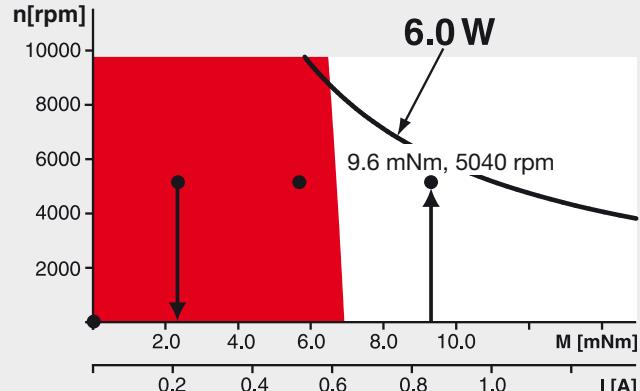
Siguiendo los cálculos, la elección recae en el motor 110163, que con una velocidad de giro constante de $558 \text{ min}^{-1}/\text{V}$ presenta una reserva de regulación de velocidad del 20%. De esta manera, las tolerancias poco favorables no constituyen un problema. El valor más alto de la constante de velocidad del bobinado respecto al valor calculado, indica que el motor gira a 24 V más rápido de lo requerido, lo que se puede compensar mediante el regulador. Este motor cuenta también con un eje trasero para el montaje de un encoder.

La constante de velocidad de giro de este bobinado es de 17,1 mNm/A. El par máximo se corresponde así con una corriente pico de:

$$I_{\max} = \frac{M_{\max}}{k_M} + I_0 = \frac{9.6}{17.1} + 0.029 = 0.6 \text{ A}$$

Este valor de corriente es inferior a la corriente máxima (4 A) del regulador y de la fuente de alimentación (3 A).

Se encuentra así un motorreductor que reúne los requisitos (par y velocidad de giro) y que puede hacerse funcionar con el regulador previsto.



Motor	M_N	Comentarios
A-max 22, 6 W	≈ 6.9 mNm	bueno
A-max 19, 2.5 W	≈ 3.8 mNm	demasiado débil
RE-max 21, 6 W	≈ 6.8 mNm	bueno
EC 16, 30 W	≈ 8.5 mNm	bueno
EC 16, 60 W	≈ 17 mNm	demasiado fuerte
EC 20 flat, 3 W	≈ 3-4 mNm	demasiado débil
EC 20 flat, 5 W	≈ 7.5 mNm	bueno
EC 20 flat, 5 W, iE.	≈ 7.5 mNm	bueno, posible alternativa con regulador de velocidad integrado, no se precisa sistema de control ESCON