

maxon DC motor und maxon EC motor

Das Wichtigste

Der Motor als Energiewandler

Der Elektromotor wandelt elektrische Leistung P_{el} (Strom I_{mot} und Spannung U_{mot}) 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

$$U_{mot} \cdot I_{mot} = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot I_{mot}^2$$

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_{mot} .

$$M = k_M \cdot I_{mot}$$

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.

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_{mot} , Drehzahl n , Strom I_{mot} , 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_{mot} :

- 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 Anhaltmoment 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 Anhaltmoment verändern sich proportional zur angelegten Spannung, was einer Parallelverschiebung der Drehzahl-Kennlinie im Diagramm gleichkommt. Zwischen Leerlaufdrehzahl und Spannung gilt in guter Näherung die wichtige Proportionalität

$$n_0 \approx k_n \cdot U_{mot}$$

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

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

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

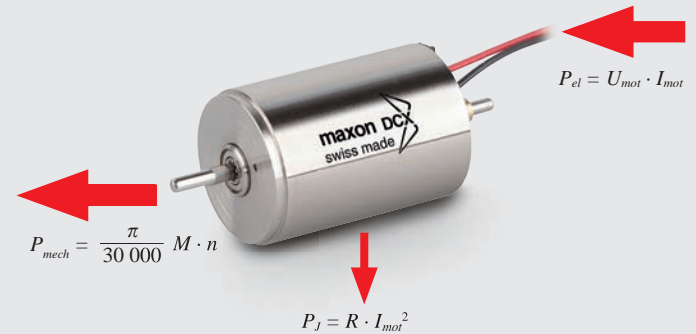
Siehe auch: Technik – kurz und bündig, Erklärungen zu den Motordaten

Einheiten

In allen Formeln sind die Grössen in den Einheiten gemäss Katalog (vgl. Physikalische Grössen und ihre Einheiten, Seite 48) einzusetzen.

Speziell gilt:

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

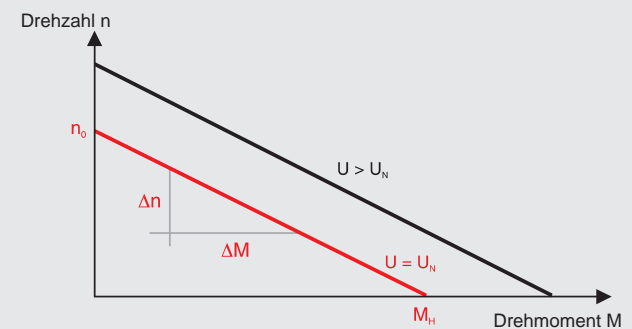


Motorkonstanten

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.



Herleitung der Drehzahlkennlinie

Ersetzt man mittels der Drehmomentkonstante in der detaillierten Leistungsbilanz den Strom I_{mot} durch das Drehmoment M , so erhält man

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

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 .

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

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 im 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 Anhaltmoment 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

$$\eta = \frac{\pi}{30\,000} \cdot \frac{n \cdot (M - M_R)}{U_{mot} \cdot I_{mot}}$$

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

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

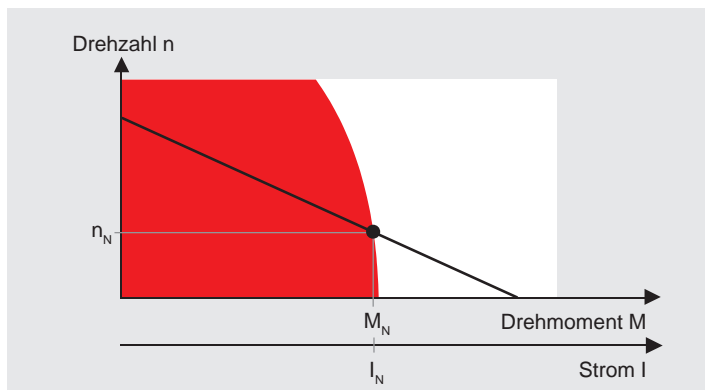
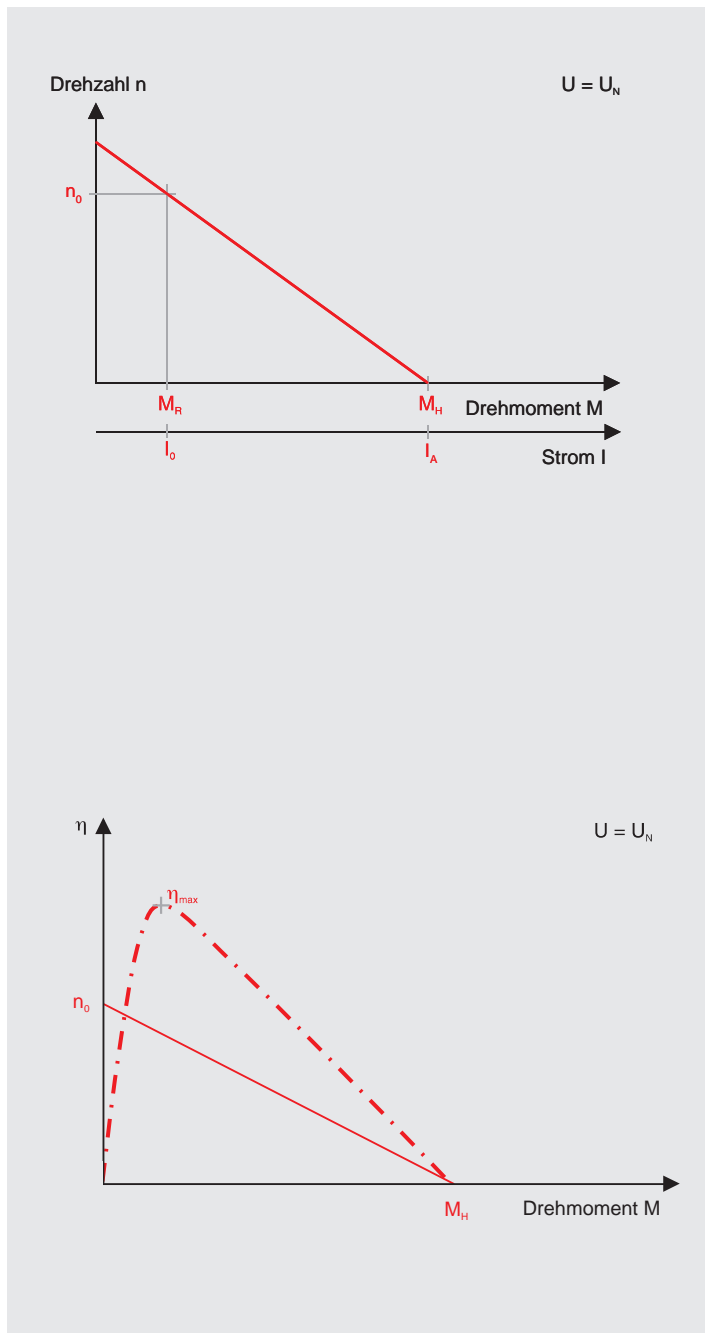
Maximaler Wirkungsgrad und maximale Abgabeleistung treten nicht bei gleichem Drehmoment auf.

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 Nennmoment M_N (Zeile 5) in diesem Arbeitspunkt.

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

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. Grössere 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 Drehzahlen 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)

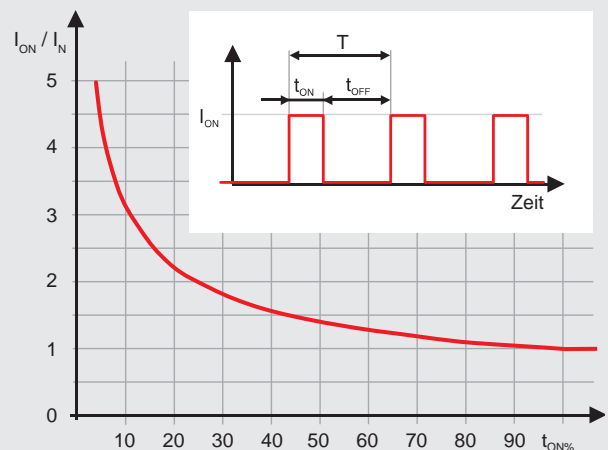
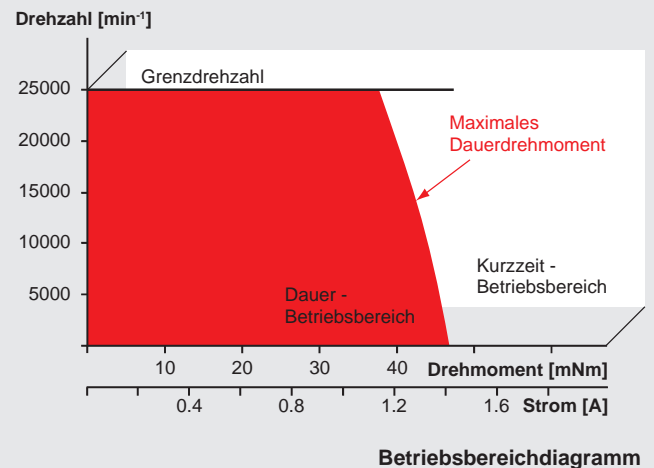
Diese wird beim DC-Motor primär durch das Kommutierungssystem begrenzt. Bei sehr hohen Drehzahlen werden Kollektor und Bürsten stärker abgenützt. Die Gründe sind:

- 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 Lebensdauer «erkauf». Die Grenzdrehzahl beim EC-Motor wird durch Lebensdauerüberlegungen der Kugellager (mindestens 20000 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.



ON	Motor in Betrieb
OFF	Motor steht still
I_{ON}	Max. Spitzenstrom
I_N	Max. Dauerbelastungsstrom (Zeile 6)
t_{ON}	Einschaltzeit [s], sollte t_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 zurückgespielt. Als Resultat ergibt sich ein von der Spannung und der Drehzahl abhängiges 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

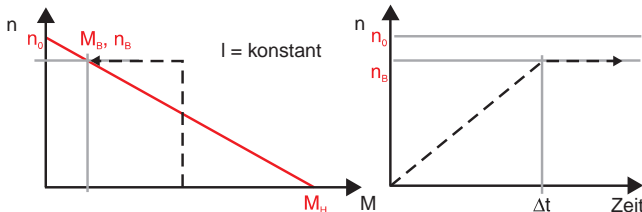
Gemäss den elektrischen Randbedingungen (Netzgerät, Steuerung, Batterie) sind prinzipiell zwei verschiedene Anlaufvorgänge zu unterscheiden:

- 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 Spitzenstrom des Verstärkers begrenzt sind.



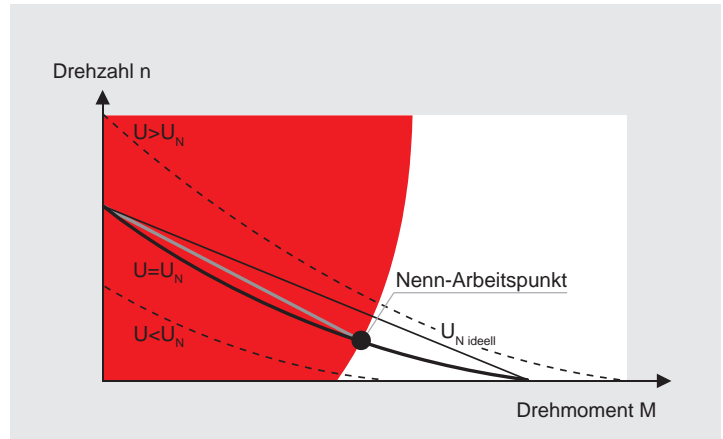
- Winkelbeschleunigung α (in rad / s^2) bei konstantem Strom I oder konstantem Drehmoment M beim Antrieb einer zusätzlichen Massenträgheit J_L :

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

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

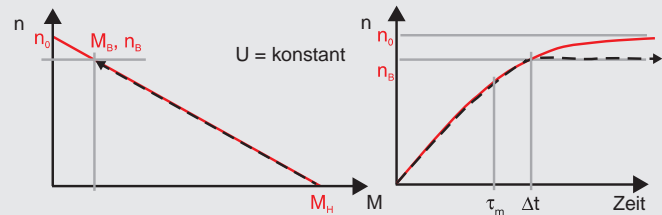
$$\Delta t = \frac{\pi}{300} \cdot \Delta n \cdot \frac{J_R + J_L}{k_M \cdot I_{\text{mot}}}$$

(alle Grössen in Einheiten gemäss Katalog)



Anlauf bei konstanter Klemmenspannung

Dabei steigt die Drehzahl vom Anhaltmoment 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 / s^2) des unbelasteten Motors:

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

- Maximale Winkelbeschleunigung α_{max} (in rad / s^2) beim Antrieb einer zusätzlichen Massenträgheit J_L :

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

- Hochlaufzeit (in ms) bei konstanter Spannung bis zum Betriebspunkt (M_L, n_L):

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

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 Compu-terblätter 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} .

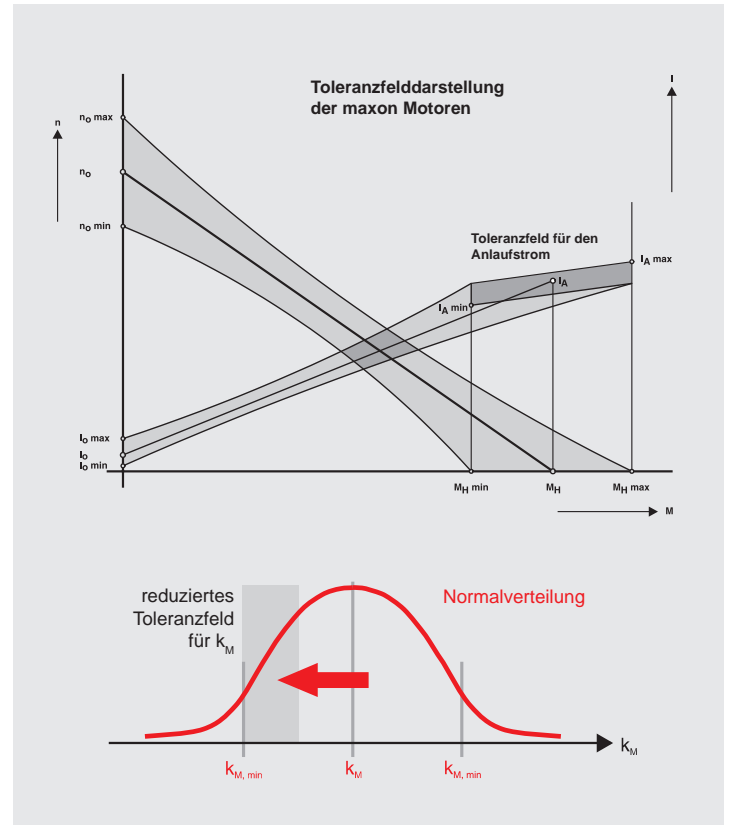
$$T_W - T_U = \Delta T_W = (R_{th1} + R_{th2}) \cdot P_J$$

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 stirnseitig 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 träger. Seine Zeitkonstante liegt je nach Motorgrosse 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.

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

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 Widerstandskoeffizient für Kupfer ($\alpha_{Cu} = 0.0039$) 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 Anhaltmoment verringert. Das veränderte Anhaltmoment kann in erster Näherung aus der Spannung und dem erhöhten Wicklungswiderstand berechnet werden:

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

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 Betriebs- oder Lastpunkt charakterisiert (M_L, n_L). Die in Frage kommenden Motortypen müssen ein Nennmoment (= max. Dauerdrehmoment) M_N aufweisen, das grösser ist als das Lastdrehmoment M_L .

$$M_N > M_L$$

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 Anhaltmoment 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_L, M_L) ausgehend lässt sich deshalb eine Soll-Leerlaufdrehzahl $n_{0, theor}$ berechnen.

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

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

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

Diejenige Wicklung, deren k_n möglichst nahe bei $k_{n, theor}$ 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_{mot} errechnet sich aus der Drehmomentkonstante k_M der gewählten Wicklung und dem Lastdrehmoment M_L .

$$I_{mot} = \frac{M_L}{k_M}$$

Tipps zur Evaluation der Anforderungen:

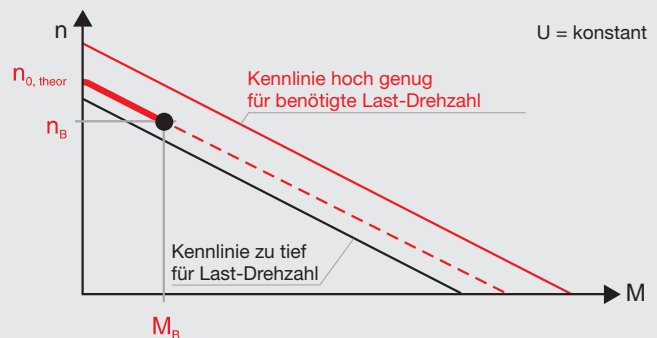
Vielfach sind die Lastpunkte (insbesondere die Drehmomente) noch unbestimmt oder lassen sich nur schwer ermitteln. In solchen Fällen hilft ein Kniff: Betreiben Sie Ihr Gerät mit einem nach Baugrösse und Leistung grob abgeschätzten Messmotor. Variieren Sie die Spannung, bis die gewünschten Betriebspunkte 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 Kommutierungssystem 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

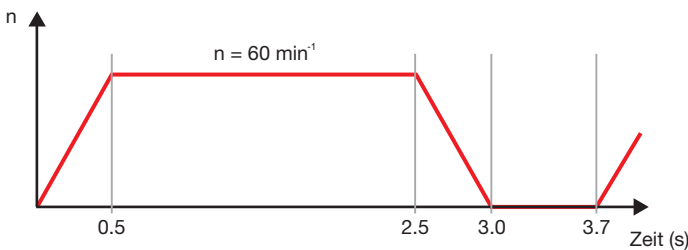
Bei Arbeitszyklen müssen alle Betriebspunkte unterhalb der Kennlinie bei maximaler Spannung U_{max} liegen. Mathematisch heisst dies, dass für alle Betriebspunkte (n_L, M_L) gelten muss:

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

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 Spitzenstrom 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 wiederholt bewegen.



Die zu beschleunigende Trägheit der Last J_L betrage $140\,000 \text{ gcm}^2$. Das konstante Reibmoment sei etwa 300 mNm . Der Motor soll mit dem 4-Q-Servoverstärker ESCON 36/2 DC für DC-Motoren mit Bürsten angetrieben werden. Vom Netzgerät stehen maximal 3 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):

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

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

– Beschleunigungsphase	(Dauer 0.5 s)	476 mNm
– Konstante Geschwindigkeit	(Dauer 2 s)	300 mNm
– Abbremsen (die Reibung bremst mit 300 mNm)	(Dauer 0.5 s)	124 mNm
– Stillstand	(Dauer 0.7 s)	0 mNm

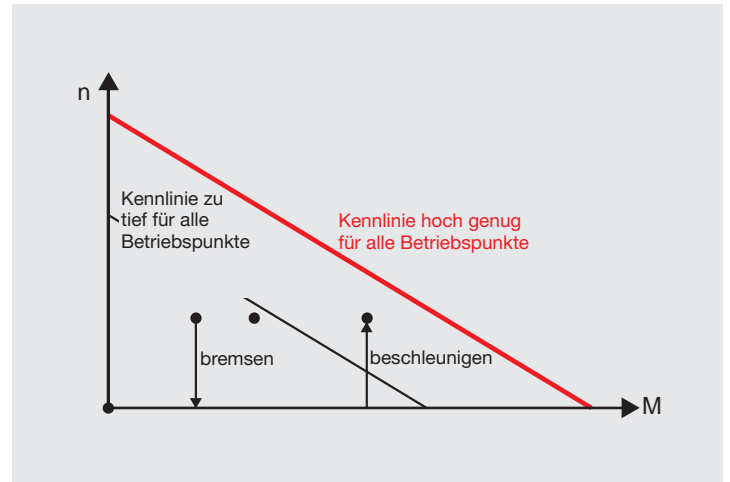
Das Spitzendrehmoment tritt beim Beschleunigen auf. Das RMS-gemittelte Drehmoment des gesamten Arbeitszyklus ist

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

$$= \sqrt{\frac{0.5 \cdot 476^2 + 2 \cdot 300^2 + 0.5 \cdot 124^2 + 0.7 \cdot 0}{3.7}} \approx 285 \text{ mNm}$$

Die maximale Drehzahl (60 min^{-1}) tritt am Ende der Beschleunigungsphase beim maximalen Drehmoment (476 mNm) auf. Die mechanische Spitzenleistung ist somit

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



Physikalische Grössen

und ihre Einheiten

		SI	Katalog
i	Getriebeuntersetzung*		
I_{mot}	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_L	Lastdrehmoment	Nm	mNm
M_H	Anhalte(dreh)moment*	Nm	mNm
M_{mot}	Motordrehmoment	Nm	mNm
M_R	Reibdrehmoment	Nm	mNm
M_{RMS}	RMS-gemittelt Drehmoment	Nm	mNm
M_N	Nennmoment (= max. Dauerdrehmoment)*	Nm	mNm
$M_{N,G}$	Max. Drehmoment des Getriebes*	Nm	Nm
n	Drehzahl		min^{-1}
n_L	Betriebsdrehzahl der Last		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	Joulesche 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_{mot}	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		= 0.0039
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 Motors*	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 0.47 Nm. Diese Anforderung erfüllt beispielsweise das Planetengetriebe mit Durchmesser 22 mm (Metallversion GB 22 A).

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 nächstkleineren Untersetzung von 84:1 (Lagerprogramm). Der Wirkungsgrad beträgt maximal 59%.

Wahl des Motortyps

Drehzahl und Drehmoment werden auf die Motorwelle umgerechnet

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

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

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

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

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 450 min⁻¹/mNm. Allerdings ist zu beachten, dass die beiden niederohmigen Wicklungen eine etwas steilere Kennlinie aufweisen. Die gewünschte Leerlaufdrehzahl errechnet sich wie folgt

$$n_{0,theor} = n_{mot} + \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M_{max} = 5040 + 450 \cdot 9.6 = 9360 \text{ min}^{-1}$$

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 (ESCON 36/2) abgegebenen Spannung $U = 24 \text{ V}$ erreicht werden, was die minimale Drehzahlkonstante $k_{n,theor}$ des Motors definiert

$$k_{n,theor} = \frac{n_{0,theor}}{U_{mot}} = \frac{9360}{24} = 390 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}$$

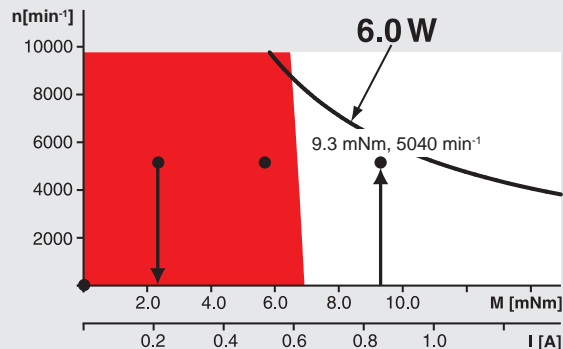
Den Berechnungen folgend fällt die Wahl auf den Motor 110163, der mit der Drehzahlkonstanten von 558 min⁻¹ V⁻¹ eine Drehzahl-Regelreserve von über 20% aufweist. Damit sind auch ungünstige Toleranzen kein Problem. Die höhere Drehzahlkonstante der Wicklung gegenüber dem berechneten Wert bedeutet, dass der Motor bei 24 V schneller läuft als verlangt, was sich aber mit dem Regler ausgleichen lässt. Dieser Motor weist auch ein zweites Wellenende zur Montage eines Encoders auf.

Die Drehmomentkonstante dieser Wicklung beträgt 17.1 mNm/A. Das maximale Drehmoment entspricht somit einem Spitzenstrom von

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

Dieser Strom ist kleiner als der Maximalstrom (4 A) des Reglers und des Netzgeräts (3 A).

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
EC 16, 30 W	≈ 8.5 mNm	gut
EC 16, 60 W	≈ 17 mNm	zu stark
EC 20 flat, 3 W	≈ 3-4 mNm	zu schwach
EC 20 flat, 5 W	≈ 7.5 mNm	gut
EC 20 flat, 5 W, iE.	≈ 7.5 mNm	gut, mögliche Alternative mit integriertem Drehzahlregler, keine ESCON-Steuerung nötig

maxon Umrechnungstabellen

Hinweise

Basisgrößen und Basiseinheiten im Internationalen Masssystem (SI)

Basisgrösse	Basis-einheit	Einheiten-zeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Elektrische Stromstärke	Ampère	A
Thermodynamische Temperatur	Kelvin	K

Umrechnungsbeispiel

A vorhandene Einheit (geg.)
B gesuchte Einheit (ges.)

gegeben: Multiplizieren mit gesucht:
oz-in 7.06 mNm

Basisgrösse für ...

... Umrechnungen:
1 oz = 2.834952313 · 10⁻² kg
1 in = 2.54 · 10⁻² m

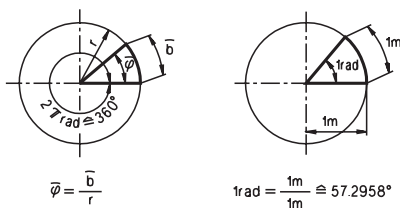
... Erdbeschleunigung:
g = 9.80665 m s⁻²
= 386.08858 in s⁻²

... Ableitungen:
1 yd = 3 ft = 36 in
1 lb = 16 oz = 7000 gr (grains)
1 kp = 1 kg · 9.80665 ms⁻²
1 N = 1 kgms⁻²
1 W = 1 Nms⁻¹ = 1 kgm²s⁻³
1 J = 1 Nm = 1 Ws

Dezimale Vielfache und Teile der Einheiten

Vor-silbe	Kurz-zeichen	Zehner-potenz	Vor-silbe	Kurz-zeichen	Zehner-potenz
Deka ..	da	10 ¹	Dezi ..	d	10 ⁻¹
Hekto ..	h	10 ²	Zenti ..	c	10 ⁻²
Kilo ..	k	10 ³	Milli ..	m	10 ⁻³
Mega ..	M	10 ⁶	Mikro ..	μ	10 ⁻⁶
Giga ..	G	10 ⁹	Nano ..	n	10 ⁻⁹
Tera ..	T	10 ¹²	Piko ..	p	10 ⁻¹²

Bogenmass



In diesem Katalog verwendete Einheiten

Leistung		P [W]						
B \ A	oz-in-s ⁻¹	oz-in-min ⁻¹	in-lbf-s ⁻¹	ft-lbf-s ⁻¹	W = N · ms ⁻¹	mW	kpm s ⁻¹	mNm min ⁻¹
W = N · ms ⁻¹	7.06 · 10 ³	1.17 · 10 ⁻⁴	0.113	1.356	1	1 · 10 ⁻³	9.807	² / ₆₀₀₀₀
mW	7.06	0.117	112.9	1.356 · 10 ³	1 · 10 ³	1	9.807 · 10 ³	² / ₆₀
oz-in-s ⁻¹	1	1/60	16	192	141.6	0.142	1.39 · 10 ³	2.36 · 10 ⁻³
ft-lbf-s ⁻¹	¹ / ₁₉₂	¹ / ₁₁₅₂₀	¹ / ₁₂	1	0.737	0.737 · 10 ⁻³	7.233	1.23 · 10 ⁻⁵
kpm s ⁻¹	7.20 · 10 ⁻⁴	1.2 · 10 ⁻⁵	1.15 · 10 ⁻²	0.138	0.102	0.102 · 10 ⁻³	1	1.70 · 10 ⁻⁶

Drehmoment		M [Nm]						
B \ A	oz-in	ft-lbf	Nm = Ws	Ncm	mNm	kpm	pcm	
Nm	7.06 · 10 ⁻³	1.356	1	1 · 10 ⁻²	1 · 10 ⁻³	9.807	9.807 · 10 ⁻⁵	
mNm	7.06	1.356 · 10 ³	1 · 10 ³	10	1	9.807 · 10 ³	9.807 · 10 ⁻²	
kpm	7.20 · 10 ⁻⁴	0.138	0.102	0.102 · 10 ⁻²	0.102 · 10 ⁻³	1	1 · 10 ⁻⁵	
oz-in	1	192	141.6	1.416	0.142	1.39 · 10 ³	1.39 · 10 ⁻²	
ft-lbf	¹ / ₁₉₂	1	0.737	0.737 · 10 ⁻²	0.737 · 10 ⁻³	7.233	7.233 · 10 ⁻⁵	

Massenträgheitsmoment		J [kg m ²]						
B \ A	oz-in ²	oz-in-s ²	lb-in ²	lb-in-s ²	Nms ² =kgm ²	mNm s ²	gcm ²	kpm s ²
g cm ²	182.9	7.06 · 10 ⁴	2.93 · 10 ³	1.13 · 10 ⁶	1 · 10 ⁷	1 · 10 ⁴	1	9.807 · 10 ⁷
kgm ² =Nms ²	1.83 · 10 ⁻⁵	7.06 · 10 ⁻³	2.93 · 10 ⁻⁴	0.113	1	1 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻⁷	9.807
oz-in ²	1	386.08	16	6.18 · 10 ³	5.46 · 10 ⁴	54.6	5.46 · 10 ⁻³	5.35 · 10 ⁵
lb-in ²	¹ / ₁₆	24.130	1	386.08	3.41 · 10 ³	3.41	3.41 · 10 ⁻⁴	3.35 · 10 ⁴

Masse		m [kg]			Kraft					F [N]	
B \ A	oz	lb	gr (grain)	kg	g	B \ A	oz	lbf	N	kp	p
kg	28.35 · 10 ⁻³	0.454	64.79 · 10 ⁻⁶	1	1 · 10 ⁻³	N	0.278	4.448	1	9.807	9.807 · 10 ⁻³
g	28.35	0.454 · 10 ³	64.79 · 10 ⁻³	1 · 10 ³	1	kp	0.028	0.454	0.102	1	1 · 10 ⁻³
oz	1	16	2.28 · 10 ⁻³	35.27	35.27 · 10 ³	oz	1	16	3.600	35.27	35.27 · 10 ⁻³
lb	¹ / ₁₆	1	¹ / ₇₀₀₀	2.205	2.205 · 10 ³	lbf	¹ / ₁₆	1	0.225	2.205	2.205 · 10 ⁻³
gr (grain)	437.5	7000	1	15.43 · 10 ³	15.43 · 10 ⁶	pdl	2.011	32.17	7.233	70.93	70.93 · 10 ⁻³

Länge		l [m]						
B \ A	in	ft	yd	Mil	m	cm	mm	μ
m	25.4 · 10 ⁻³	0.305	0.914	25.4 · 10 ⁻⁶	1	0.01	1 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻⁶
cm	2.54	30.5	91.4	25.4 · 10 ⁻⁴	1 · 10 ²	1	0.1	1 · 10 ⁻⁴
mm	25.4	305	914	25.4 · 10 ⁻³	1 · 10 ³	10	1	1 · 10 ⁻³
in	1	12	36	1 · 10 ⁻³	39.37	0.394	3.94 · 10 ⁻²	3.94 · 10 ⁻⁵
ft	¹ / ₁₂	1	3	¹ / ₁₂ · 10 ⁻³	3.281	3.281 · 10 ⁻²	3.281 · 10 ⁻³	3.281 · 10 ⁻⁶

Winkelgeschwindigkeit		ω [s ⁻¹]		Winkelbeschleunigung		α [s ⁻²]		
B \ A	s ⁻¹ = Hz	min ⁻¹	rad s ⁻¹	B \ A	min ⁻²	s ⁻²	rad s ⁻²	min ⁻¹ s ⁻¹
rad s ⁻¹	2π	^π / ₃₀	1	s ⁻²	¹ / ₃₆₀₀	1	¹ / _{2π}	¹ / ₆₀
min ⁻¹	¹ / ₆₀	1	³⁰ / _π	rad s ⁻²	^π / ₁₈₀₀	2π	1	^π / ₃₀

Lineare Geschwindigkeit		v [m s ⁻¹]						
B \ A	in-s ⁻¹	in-min ⁻¹	ft-s ⁻¹	ft-min ⁻¹	m s ⁻¹	cm s ⁻¹	mm s ⁻¹	m min ⁻¹
m s ⁻¹	2.54 · 10 ⁻²	4.23 · 10 ⁻⁴	0.305	5.08 · 10 ⁻³	1	1 · 10 ⁻²	1 · 10 ⁻³	¹ / ₆₀
in-s ⁻¹	1	60	12	720	39.37	39.37 · 10 ²	39.37 · 10 ⁻³	0.656
ft-s ⁻¹	¹ / ₁₂	5	1	60	3.281	3.281 · 10 ²	3.281 · 10 ⁻³	5.46 · 10 ⁻²

Temperatur		T [K]		
B \ A	° Fahrenheit	° Celsius	Kelvin	
Kelvin	(°F - 305.15) / 1.8	+ 273.15	1	
° Celsius	(°F - 32) / 1.8	1	-273.15	
° Fahrenheit	1	1.8°C + 32	1.8 K + 305.15	