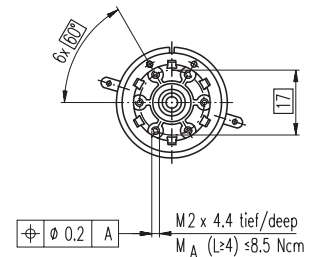
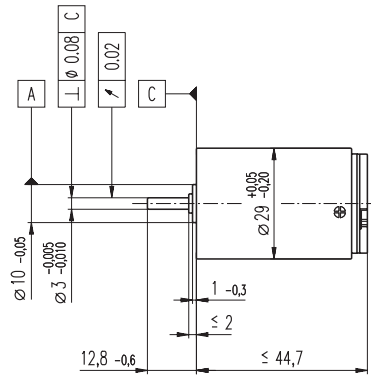
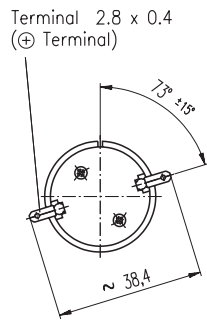


RE-max 29 Ø29 mm, Edelmetallbürsten CLL, 15 Watt



M 1:2

- Lagerprogramm
- Standardprogramm
- Sonderprogramm (auf Anfrage)

Bestellnummern

Motordaten

		226748	226749	226751	226752	226753	226754	226755	226756	226757	226759	226760	226761	226762	226763	226764
Werte bei Nennspannung																
1 Nennspannung	V	7.2	9.0	12.0	18.0	18.0	24.0	30.0	36.0	42.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
2 Leerlaufdrehzahl	min ⁻¹	6480	7190	6160	6820	5630	5960	6170	6640	6710	6280	5400	5000	4160	3350	2790
3 Leerlaufstrom	mA	45.1	43.6	24.7	19.8	14.0	11.6	9.90	9.43	8.25	6.39	4.87	4.26	3.08	2.13	1.57
4 Nenndrehzahl	min ⁻¹	6200	6850	5550	6160	4810	5110	5320	5790	5820	5410	4520	4130	3260	2440	1870
5 Nennmoment (max. Dauerdrehmoment)	mNm	8.44	9.51	15.1	20.7	25.2	26.1	25.8	25.7	24.3	25.2	25.4	25.5	25.2	25.2	24.9
6 Nennstrom (max. Dauerbelastungsstrom)	A	0.840	0.840	0.840	0.840	0.840	0.691	0.566	0.506	0.416	0.352	0.304	0.283	0.232	0.186	0.153
7 Anhaltmoment	mNm	195	200	152	214	173	185	188	201	183	182	157	146	117	93.3	75.6
8 Anlaufstrom	A	18.4	16.8	8.22	8.49	5.68	4.81	4.05	3.90	3.07	2.51	1.86	1.59	1.06	0.683	0.461
9 Max. Wirkungsgrad	%	91	90	90	91	90	91	91	91	90	90	90	90	90	89	89
Kenndaten																
10 Anschlusswiderstand	Ω	0.390	0.536	1.46	2.12	3.17	4.99	7.41	9.24	13.7	19.2	25.8	30.1	45.1	70.2	104
11 Anschlussinduktivität	mH	0.0353	0.0447	0.108	0.199	0.292	0.464	0.676	0.839	1.12	1.67	2.26	2.63	3.81	5.86	8.46
12 Drehmomentkonstante	mNm A ⁻¹	10.6	11.9	18.5	25.2	30.4	38.4	46.3	51.6	59.6	72.8	84.7	91.3	110	136	164
13 Drehzahlkonstante	min ⁻¹ V ⁻¹	902	802	515	380	314	249	206	185	160	131	113	105	86.8	70.0	58.2
14 Kennliniensteigung	min ⁻¹ mNm ⁻¹	33.2	36.1	40.6	32.0	32.7	32.3	32.9	33.1	36.8	34.5	34.4	34.5	35.6	36.0	37.0
15 Mechanische Anlaufzeitkonstante	ms	4.99	4.84	4.62	4.51	4.49	4.48	4.48	4.47	4.51	4.50	4.50	4.49	4.52	4.53	4.54
16 Rotorträgheitsmoment	gcm ²	14.3	12.8	10.9	13.5	13.1	13.2	13.0	12.9	11.7	12.5	12.5	12.4	12.1	12.0	11.7

Spezifikationen

Thermische Daten	
17 Therm. Widerstand Gehäuse-Luft	15.8 KW ⁻¹
18 Therm. Widerstand Wicklung-Gehäuse	4.0 KW ⁻¹
19 Therm. Zeitkonstante der Wicklung	15.8 s
20 Therm. Zeitkonstante des Motors	1260 s
21 Umgebungstemperatur	-30 ... +65°C
22 Max. Wicklungstemperatur	+85°C
Mechanische Daten (Sinterlager)	
23 Grenzdrehzahl	11000 min ⁻¹
24 Axialspiel	0.1 - 0.2 mm
25 Radialspiel	0.012 mm
26 Max. axiale Belastung (dynamisch)	1.7 N
27 Max. axiale Aufpresskraft (statisch)	80 N
28 Max. radiale Belastung, 5 mm ab Flansch	5.5 N

Mechanische Daten (Kugellager)	
23 Grenzdrehzahl	11000 min ⁻¹
24 Axialspiel	0.1 - 0.2 mm
25 Radialspiel	0.025 mm
26 Max. axiale Belastung (dynamisch)	5 N
27 Max. axiale Aufpresskraft (statisch)	75 N
28 Max. radiale Belastung, 5 mm ab Flansch	20.5 N

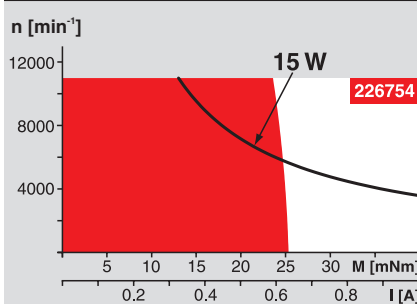
Weitere Spezifikationen	
29 Polpaarzahl	1
30 Anzahl Kollektorsegmente	13
31 Motorgewicht	159 g
CLL = Capacitor Long Life	

Motordaten gemäss Tabelle sind Nenndaten.
Erläuterungen zu den Ziffern Seite 49.

Option

- Kugellager anstelle Sinterlager
- Litzen anstelle Terminals
- Ohne CLL

Betriebsbereiche

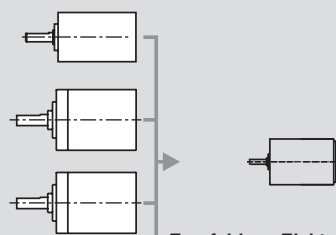


Legende

- Dauerbetriebsbereich**
Unter Berücksichtigung der angegebenen thermischen Widerstände (Ziffer 17 und 18) und einer Umgebungstemperatur von 25°C wird bei dauernder Belastung die maximal zulässige Rotortemperatur erreicht = thermische Grenze.
- Kurzzeitbetrieb**
Der Motor darf kurzzeitig und wiederkehrend überlastet werden.
- Typenleistung**

maxon-Baukastensystem

- Planetengetriebe**
Ø26 mm
0.5 - 2.0 Nm
Seite 224
- Planetengetriebe**
Ø32 mm
0.75 - 4.5 Nm
Seite 227
- Planetengetriebe**
Ø32 mm
1.0 - 6.0 Nm
Seite 230




Empfohlene Elektronik:
LSC 30/2 Seite 264
ADS 50/5 264
ADS_E 50/5 265
Hinweise 17

Übersicht Seite 17 - 21

Erklärungen zu den Seiten 50 - 146

Massbilder

Auf der CD-ROM stehen die Massbilder im DXF-Format für den Import in beliebige CAD-Systeme zur Verfügung.
Darstellung der Ansichten gemäss Projektionsmethode E (ISO). 
Alle Abmessungen in [mm].

Befestigungsgewinde in Kunststoff

Schraubverbindungen bei Motoren mit Kunststoffflansch bedürfen einer speziellen Beachtung.

M_A Maximales Anzugsdrehmoment [Ncm]

Auf diesen Wert darf ein Einschraubgerät (Elektroschrauber etc.) eingestellt werden.

L Aktive Einschraubtiefe [mm]

Das Verhältnis von Einschraubtiefe zu Gewindedurchmesser muss mindestens 2 : 1 betragen. Die Einschraubtiefe darf die nutzbare Gewindelänge nicht überschreiten!

Motordaten

Die Werte beziehen sich auf eine Motortemperatur von 25°C (sogenannte Kalt Daten).

Zeile 1 Nennspannung U_N [Volt]

ist jene Gleichspannung an den Motoranschlüssen, auf die sich alle Nenndaten (Zeilen 2 - 9) beziehen. Zulässig sind sowohl tiefere als auch höhere Spannungen, sofern die Grenzwerte nicht überschritten werden.

Zeile 2 Leerlaufdrehzahl n_0 [min^{-1}]

ist die Drehzahl, die sich bei unbelastetem Motor im Betrieb bei Nennspannung einstellt. Sie ist annähernd proportional zur angelegten Spannung.

Zeile 3 Leerlaufstrom I_0 [mA]

ist der Strom, der sich bei unbelastetem Motor im Betrieb bei Nennspannung einstellt. Er ist von der Bürstenreibung und der Reibung in den Lagern abhängig und nimmt mit steigender Drehzahl zu. Die Leerlaufreibung ist besonders bei Edelmetallkommutierung stark temperaturabhängig. Bei längerem Betrieb nimmt die Leerlaufreibung ab, bei tiefen Temperaturen nimmt sie zu.

Zeile 4 Nenndrehzahl n_N [min^{-1}]

ist die Drehzahl, die sich bei Betrieb bei Nennspannung und Nenndrehmoment bei einer Motortemperatur von 25°C einstellt.

Zeile 5 Nenndrehmoment M_N [mNm]

ist das Drehmoment, das bei Betrieb mit Nennspannung und Nennstrom bei einer Motortemperatur von 25°C erzeugt wird. Es liegt an der Grenze des Dauerbetriebsbereichs des Motors. Höhere Drehmomente führen zu einer unzulässigen Erwärmung der Wicklung.

Zeile 6 Nennstrom I_N [A]

ist der Strom, der bei 25°C Umgebungstemperatur im Dauerbetrieb die Wicklung bis zur maximal zulässigen Temperatur erwärmt (= max. zulässiger Dauerbelastungsstrom). Infolge zusätzlicher Reibverluste nimmt I_N bei steigender Drehzahl leicht ab.

Zeile 7 Anhaltmoment M_H [mNm]

ist das Lastmoment, das bei Nennspannung den Stillstand der Welle bewirkt. Ansteigende Motortemperaturen reduzieren das Anhaltmoment.

Zeile 8 Anlaufstrom I_A [A]

ist der Quotient aus Nennspannung und Anschlusswiderstand des Motors. Der Anlaufstrom ist dem Anhaltmoment äquivalent. Bei grösseren Motoren kann I_A aufgrund der Stromlimiten des Verstärkers häufig nicht erreicht werden.

Zeile 9 Maximaler Wirkungsgrad η_{max} [%]

ist das optimale Verhältnis zwischen aufgenommenem und abgegebener Leistung bei Nennspannung. Nicht immer kennzeichnet er auch den optimalen Arbeitspunkt.

Zeile 10 Anschlusswiderstand R [Ω]

ist der Widerstand der bei 25°C an den Anschlussklemmen gemessen wird. Er bestimmt bei gegebener Spannung U den Anlaufstrom. Bei Graphitbürsten ist zu beachten, dass der Widerstand belastungsabhängig ist und der Wert nur für grosse Ströme gilt.

Zeile 11 Anschlussinduktivität L [mH]

ist die Induktivität der Wicklung bei stillstehendem Rotor. Sie wird mit 1 kHz Sinusspannung gemessen.

Zeile 12 Drehmomentkonstante k_M [mNm A $^{-1}$]

oder auch spezifisches Drehmoment ist der Quotient aus erzeugtem Drehmoment und dem dazugehörenden Strom.

Zeile 13 Drehzahlkonstante k_n [$\text{min}^{-1} \text{V}^{-1}$]

zeigt die ideale Drehzahl pro 1 Volt angelegter Spannung. Reibungsverluste nicht berücksichtigt.

Zeile 14 Kennliniensteigung n / M [$\text{min}^{-1} \text{mNm}^{-1}$]

Sie gibt Auskunft über die Stärke des Motors. Je kleiner der Wert umso stärker der Motor und umso weniger ändert sich die Drehzahl bei Lastschwankungen. Sie berechnet sich aus dem Quotienten von ideeller Leerlaufdrehzahl und ideellem Anhaltmoment.

Zeile 15 Mechanische Anlaufzeitkonstante τ_m [ms]

ist die Zeit, die der unbelastete Rotor benötigt, um vom Stillstand auf 63 % seiner Enddrehzahl zu beschleunigen.

Zeile 16 Rotorträgheitsmoment J_R [gcm 2]

ist das Massenträgheitsmoment des Rotors bezogen auf die Drehachse.

Zeile 17 Thermischer Widerstand Gehäuse Luft R_{th2} [KW $^{-1}$]

Zeile 18 Thermischer Widerstand Wicklung-Gehäuse R_{th1} [KW $^{-1}$]

Charakteristische Werte des thermischen Übergangswiderstandes ohne zusätzliche Wärmeableitung. Zeile 17 und 18 addiert bestimmen die maximale Erwärmung bei gegebener Verlustleistung (Belastung). Bei Motoren mit Metallflansch kann sich der thermische Widerstand R_{th2} um bis zu 80% verringern, sofern der Motor statt an eine Kunststoffplatte direkt an eine Wärme leitende (metallische) Aufnahme angekoppelt wird.

Zeile 19 Therm. Zeitkonstante Wicklung τ_w [s]

Zeile 20 Therm. Zeitkonstante des Motors τ_m [s]

sind die typischen Reaktionszeiten für die Temperaturänderung von Wicklung und Motor. Man erkennt, dass der Motor thermisch viel träger reagiert als die Wicklung. Die Werte sind aus dem Produkt der thermischen Kapazität und den angegebenen Wärmewiderständen gerechnet.

Zeile 21 Umgebungstemperatur T_{amb} [°C]

Betriebstemperaturbereich. Er ergibt sich aus der Wärmebeständigkeit der verwendeten Werkstoffe und der Viskosität der Lagerschmierung.

Zeile 22 max. Wicklungstemperatur T_{max} [°C]

Maximal zulässige Wicklungstemperatur.

Zeile 23 Grenzdrehzahl n_{max} [min^{-1}]

ist die aufgrund der Kommutierung maximal empfohlene Drehzahl. Bei höheren Drehzahlen ist mit einer Reduktion der Lebensdauer zu rechnen.

Zeile 24 Axialspiel [mm]

Bei nicht vorgespannten Motoren sind dies die Toleranzgrenzen des werkseitig eingestellten Lagerspiels. Das Lagerspiel ist bei den Toleranzen der Wellenlänge eingerechnet. Eine Vorspannung hebt das Axialspiel bis zur angegebenen axialen Belastung auf.

Zeile 25 Radialspiel [mm]

Das Radialspiel ergibt sich aus der Radialluft der Lager. Eine Vorspannung hebt das Radialspiel bis zur angegebenen axialen Belastung auf.

Zeile 26 / 27 Max. axiale Belastung [N]
dynamisch: im Betrieb zulässige Axialbelastung. Falls für Zug und Druck unterschiedliche Werte gelten, ist der kleinere Wert angegeben.
statisch: maximale axiale auf die Welle wirkende Kraft im Stillstand, bei der keine bleibenden Schäden auftreten.
Welle abgestützt: maximale axiale auf die Welle wirkende Kraft im Stillstand, wenn die Kraft nicht am Stator, sondern am anderen Wellenende aufgenommen wird. Bei Motoren mit nur einem Wellenende besteht diese Möglichkeit nicht.

Zeile 28 Max. radiale Belastung [N]

Der Wert wird für einen typischen Abstand vom Flansch angegeben. Bei grösserem Abstand reduziert sich dieser Wert.

Zeile 29 Polpaarzahl

Anzahl Nordpole des Permanentmagneten. Da DC-Motoren intern kommutiert werden, hat die Polpaarzahl keine von aussen sichtbaren Auswirkungen auf das Betriebsverhalten.

Zeile 30 Anzahl Kollektorsegmente

Zeile 31 Motorgewicht [g]

maxon Standardspezifikation

Mit unserer Standardspezifikation geben wir Ihnen ein Hilfsmittel in die Hand, wonach Sie die maxon-Motoren in den wesentlichen Punkten beurteilen können. Die Standardspezifikation deckt nach unseren Erkenntnissen den Normalfall ab. Sie ist Bestandteil unserer «allgemeinen Lieferbedingungen».

Elektrische Geräte, die nach dem 1.1.96 im Europäischen Raum in den Verkehr gebracht werden, müssen gewissen Mindestanforderungen genügen. Kleinmotoren werden als Komponenten bezeichnet und stellen daher keine eigenständigen elektrischen Geräte im Sinne der Richtlinien dar. Trotzdem ist ein Grossteil des maxon motor Programmes CE zertifiziert.

Die Zertifizierung der Motoren erfolgt bei Betrieb im Leerlauf und im Neuzustand.



Das CE-Zeichen signalisiert, dass das Produkt die in den jeweiligen EG-Richtlinien definierten Anforderungen erfüllt, und die vorgesehenen Verfahren zur Erlangung der Konformität durchgeführt wurden.

Für zusätzliche Bedürfnisse erarbeiten wir zusammen mit Ihnen weitere Spezifikationen.

Hinweis zum Katalog 2006 / 07:

maxon motor ag übernimmt keine Haftung für die Fehlerfreiheit dieser Dokumentation.

maxon motor ag haftet nicht für mittelbare oder unmittelbare Schäden, die durch den Gebrauch dieser Dokumentation entstehen.

Dieser Haftungsausschluss gilt nicht bei Vorsatz oder Fahrlässigkeit sowie bei einer Haftung nach dem Produkthaftungsgesetz.

Die Standardspezifikation Nr. 100 für maxon DC motor, maxon -max und maxon RE-max

1. Grundlagen

Die **Standardspezifikation** beschreibt Prüfungen, die am **fertigen Motor und im Herstellprozess** durchgeführt werden. Um den von uns festgelegten hohen Qualitätsstandard zu sichern, prüfen wir Materialien, Einzelteile und Baugruppen und den fertigen Motor auf Einhaltung der spezifizierten Masse und Eigenschaften. Die Messwerte werden statistisch erfasst und können auf Wunsch vom Kunden eingesehen werden. Zur Anwendung gelangen Stichprobenpläne nach ISO 2859, MIL STD 105E und DIN/ISO 3951 (Attributprüfung, Folgeprüfung und Variablenprüfung) sowie Selbstkontrollen der Fertigung. Diese Standardspezifikation gilt immer, wenn nicht eine andere Spezifikation zwischen dem Kunden und maxon vereinbart wurde.

2. Daten

2.1 **Elektrische Daten** gelten bei 22° bis 25°C. Datenkontrolle innerhalb einer Minute Laufzeit.

Messspannung	+/- 0.5 % (für Spannungen 3 V)
Leerlaufdrehzahl	+/- 10 %
Leerlaufstrom	Maximalwert
Drehrichtung	cw = Rechtslauf
Motorlage	waagrecht

Bei Anschluss der roten Litze oder mit + bezeichnetem Terminal am Pluspol dreht die Welle (auf die Stirnseite gesehen) im Uhrzeigersinn. Für Linkslauf (ccw) können die spezifizierten Toleranzgrenzwerte geringfügig überschritten werden.

Anschlusswiderstand: Stellvertretend wird der Wicklungswiderstand in Stichproben überprüft. Dabei ist zu beachten, dass der Anschlusswiderstand von der Rotorstellung abhängt. Es wird der Maximalwert erfasst. Bei Graphitbürsten liefert durch den stromdichteabhängigen Übergangswiderstand eine Widerstandsmessung mit einem Ohmmeter keine sinnvollen Ergebnisse. Bei den Edelmetallbürsten zeigt die Widerstandsmessung dann einen zu kleinen Wert an, wenn die Bürste zwei Kollektorlamellen überbrückt und damit eine Teilschleife kurzschließt.

Kommutierung auf neutrale Einstellung und elektrische Fehler, wie z.B. Wicklungsunterbruch und Windungsschluss, mittels Oszilloskop. Die Kommutierungsbilder von Edelmetall- und Graphitbürsten sind nicht direkt vergleichbar. Edelmetallbürsten zeigen ein klarer gezeichnetes Kommutierungsbild, das bis etwa zur Grenzdrehzahl störungsfrei bleibt. Bei Graphitbürsten ist dies nur bis etwa 1/3 Grenzdrehzahl zu erwarten. Mit zunehmender Betriebsdauer verändern sich beim Graphitbürstenmotor der Bürstenübergangswiderstand und wegen der Lammellenüberdeckung auch die Drehmomentkonstante. Als Folge davon ändern sich Leerlaufstrom und Drehzahl geringfügig. Ein ähnlicher Effekt ist auch festzustellen, wenn der Motor längere Zeit im Leerlauf betrieben wurde. Obwohl jeder Motor im Produktionsprozess 100%-ig eingestellt und geprüft wird, überprüft die Qualitätssicherung zusätzlich diese Werte im Stichprobenverfahren.

2.2 **Mechanische Daten** entsprechend Massbild:

Dabei werden unsere Standardmessgeräte (elektrische Längenmessung DIN 32876, Messschrauben DIN 863, Messuhren DIN 878, Messschieber DIN 862, Grenzlehrdorne DIN 2245, Gewinde-Grenzlehrdorne DIN 2280 u.a.) eingesetzt.

2.3 Sonstige Daten

Unwucht: Rotoren werden entsprechend Standard- oder kundenspezifischer Daten im Fertigungsprozess ausgewuchtet. Am fertigen Motor ist nur eine subjektive Beurteilung möglich, die als Stichprobe erfolgt.

Induktivität: Diese wird bei der Erstmusterprüfung ermittelt. Messfrequenz 1 kHz.

Korrosionsschutz: Unsere Produkte werden bei der Erstmusterprüfung gemäss DIN 50015 (Prüfclimate 23/83-1) geprüft.

Beschichtung: Zur Anwendung kommende Oberflächen- und Beschichtungsverfahren sind nach korrosionsschützenden Gesichtspunkten ausgewählt. Die Prüfung solcher Schichten wird nach der jeweils anwendbaren Norm, z.B. ISO 2082 bzw. DIN 50017 KK, durchgeführt.

2.4 **Geräusch:** Die im Motor stattfindenden Bewegungsabläufe verursachen drehzahlabhängige Geräusche und Vibrationen. Diese können, von unterschiedlicher Frequenz und mehr oder weniger starker Intensität sein. Eine objektive Beurteilung ist nur unter beachtlichem Kostenaufwand und genauer Spezifizierung möglich. Daher prüfen wir zwar standardmässig, aber nur subjektiv auf Ausreisser innerhalb einer Charge. Der Geräuschpegel eines Einzelmusters erlaubt keinen eindeutigen Schluss auf das Geräusch- oder Vibrationsniveau einer zukünftigen Lieferung.

2.5 Die **Lebensdauer** eines Motors hängt im wesentlichen von den Betriebsdaten- und den Umgebungsbedingungen ab. Die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten erlaubt uns daher keine allgemeine Lebensdaueraussage. Darum werden bei uns Lebensdauertests im Rahmen der Erstmusterprüfungen nach internen, einheitlichen Kriterien durchgeführt.

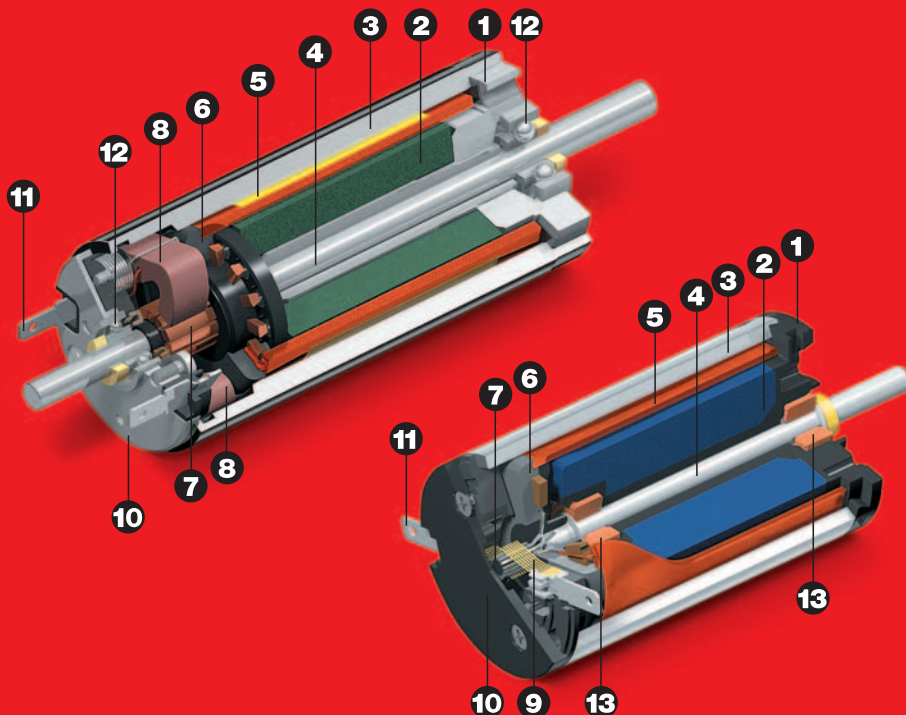
3. Vom Datenblatt abweichende bzw. ergänzende Parameter können festgelegt werden und sind dann als Kundenspezifikation Bestandteil der systematisch durchgeführten Prüfung. Prüfzertifikate werden nach vorausgehender Vereinbarung mitgeliefert.

Ausgabe April 2005 / Änderungen vorbehalten

Technik – kurz und bündig

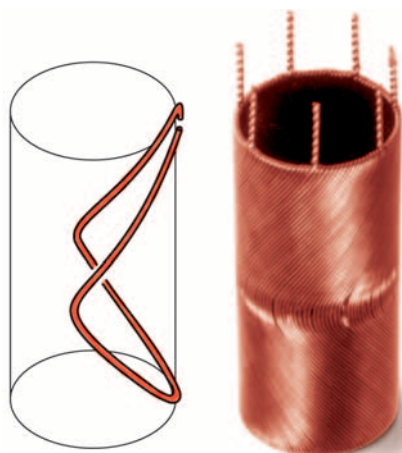
Herausragende technische Merkmale der **maxon DC-Motoren:**

- Kein magnetisches Rastmoment
- Hohe Beschleunigung dank kleinem Massenträgheitsmoment
- Geringe elektromagnetische Störungen
- Kleine Induktivität
- Hoher Wirkungsgrad
- Linearität zwischen Spannung und Drehzahl
- Linearität zwischen Belastung und Drehzahl
- Linearität zwischen Belastung und Strom
- Kleine Drehmomentschwankung dank vielteiligem Kollektor
- Kurzzeitig hoch überlastbar
- Kompakte Bauweise - kleine Abmessungen
- Vielfältige Kombinationsmöglichkeiten mit Getrieben sowie DC Tachos und Encodern.



Die maxon Wicklung

Herzstück des maxon-Motors ist die weltweit patentierte eisenlose Wicklung, System maxon®. Dieses Motorprinzip hat seine ganz besonderen Vorteile. Das magnetische Rastmoment fehlt völlig und die elektromagnetischen Störungen sind vernachlässigbar gering. Der Wirkungsgrad übertrifft mit bis zu 90% andere Motorsysteme bei weitem.



Zu jedem Motortyp gibt es zahlreiche Wicklungsvarianten (siehe Motordatenblätter). Sie unterscheiden sich durch den Drahtquerschnitt und die Windungszahl. Die verwendeten Drahtdurchmesser liegen zwischen 32 μ m und 0.45 mm. So ergeben sich unterschiedliche Anschlusswiderstände der Motoren.

Ebenfalls variieren jene Motorparameter, die die Umwandlung von elektrischer und mechanischer Energie beschreiben (Drehmoment- und Drehzahl-Konstante). Sie erhalten dadurch die Möglichkeit, einen für Ihren spezifischen Anwendungsfall am besten geeigneten Motor auszuwählen.

Die maximal zulässige Wicklungstemperatur beträgt bei hochtemperaturfester Ausführung 125°C (in Ausnahmefällen 155°C), ansonsten 85°C.

Kleiner Anschlusswiderstand

Niederohmige Wicklung
Dicker Draht, wenig Windungen
Hohe Anlaufströme
Spezifisch schnell drehender Motor (Drehzahl pro Volt)

Hoher Anschlusswiderstand

Hochohmige Wicklung
Dünner Draht, viele Windungen
Niedrige Anlaufströme
Spezifisch langsam drehender Motor (Drehzahl pro Volt)

Mechanische Kommutierung

Edelmetallbürsten und -kollektor

Unsere Edelmetallkombination garantiert hohe Konstanz des niedrigen Übergangswiderstandes auch nach längerem Stillstand. Die Motoren arbeiten mit kleinsten Anlaufspannungen und sehr geringen elektrischen Störungen.

Edelmetallbürsten werden typisch eingesetzt:

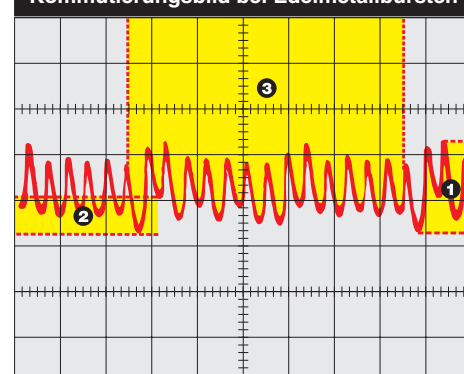
- In kleineren Motoren
- Im Dauerbetrieb
- Bei kleiner Strombelastung
- Bei Batteriebetrieb
- In DC Tachos

Das Kommutierungsbild ist im Gegensatz zu anderen Motoren abrissfrei und gleichmässig. Die Verbindung von Edelmetallbürsten und maxon Rotorsystem ergibt minimale hochfrequente Störungen, die sonst in den Schaltungen zu grossen Problemen führen. Die Motoren benötigen praktisch keine elektrischen Entstörungen.

CLL-Konzept

Der Verschleiss von Kollektoren und Bürsten wird vorwiegend durch Funken verursacht. Das CLL-Konzept unterdrückt weitgehend die Funkenbildung, was die Lebensdauer deutlich erhöht. Bei Austeuerungen mit getakteter Endstufe (PWM) treten höhere Leerlaufströme auf, und es kann sich eine unerwünschte Erwärmung des Motors ergeben.

Kommutierungsbild bei Edelmetallbürsten



Legende:

- Rippel, tatsächliche Welligkeit Spitze-Spitze
- Modulation, im Wesentlichen auf Asymmetrie im Magnetfeld und in der Wicklung zurückzuführen
- Signalverlauf innerhalb einer Umdrehung (Anzahl Spitzen = doppelte Anzahl Kollektorsegmente)

- 1 Flansch
- 2 Permanentmagnet
- 3 Gehäuse (magn. Rückschluss)
- 4 Welle
- 5 Wicklung
- 6 Kollektorplatte
- 7 Kollektor
- 8 Graphitbürsten
- 9 Edelmetallbürsten
- 10 Abschlussdeckel
- 11 Elektr. Anschluss
- 12 Kugellager
- 13 Sintergleitlager

Programm

maxon DC motor

-max-Programm

RE-max-Programm

RE-Programm

S-Programm

A-Programm

F-Programm

maxon DC motor

Graphitbürsten

In Verbindung mit Kupferkollektoren für den härtesten Einsatz. Wiederholt wurden mehrere 10 Mio. Zyklen in den verschiedensten Anwendungen erreicht.

Graphitbürsten werden typisch eingesetzt:

- In grösseren Motoren
- Bei hoher Strombelastung
- Bei Start-Stopp-Betrieb
- Im Umkehrbetrieb
- Bei Ansteuerung mit getakteter Endstufe (PWM)

Die speziellen Eigenschaften von **Graphitbürsten** können sogenannte Abrisse (Spikes) bewirken. Diese sind auf dem Kommutierungsbild sichtbar. Trotz der durch die Spikes bedingten hochfrequenten Störungen haben sich diese Motoren in Anwendung mit elektronischen Steuerungen weitgehend durchgesetzt. Zu beachten ist, dass sich der Übergangswiderstand der Graphitbürsten belastungsabhängig verändert.

Drehzahl

Die optimalen Betriebsdrehzahlen liegen je nach Motorgrösse zwischen 4000 und 9000 Umdrehungen pro Minute. Mit einigen Spezialausführungen sind Drehzahlen von über 20 000 min⁻¹ realisierbar.

Es ist eine physikalisch bedingte Eigenschaft des Gleichstrommotors, dass sich bei konstanter Spannung die Drehzahl bei zunehmender Belastung reduziert. Durch die Vielzahl der Wicklungsvarianten ist eine gute Anpassung an die gewünschten Bedingungen möglich. Bei kleineren Drehzahlen ist oft eine Getriebekombination günstiger als ein langsam laufender Motor.

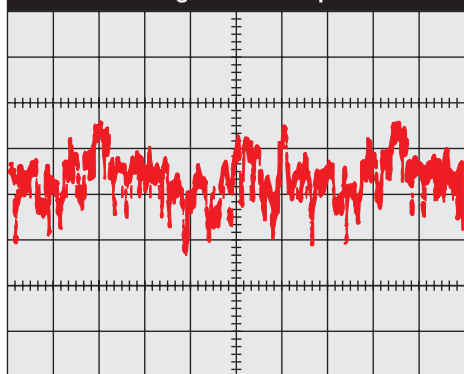
Lebensdauer

Eine generelle Aussage über die Lebensdauer kann wegen der vielen Einflussfaktoren nicht gemacht werden. Die Lebensdauer schwankt von über 20 000 Stunden bei günstigen Bedingungen, bis zu weniger als 100 Stunden unter Extrembedingungen (hier handelt es sich um Sonderfälle). Bei durchschnittlichen Anforderungen werden in etwa 1000 bis 3000 Stunden erreicht.

Beeinflussend sind:

1. **Die elektrische Belastung:** Höhere Strombelastung ergibt einen grösseren elektrischen Verschleiss des Kommutierungssystems. Es kann daher unter Umständen geboten sein, für eine gegebene Aufgabenstellung einen etwas stärkeren Motor auszuwählen. Wir beraten Sie gerne.
2. **Drehzahl:** Je höher die Drehzahl, desto grösser der mechanische Verschleiss.
3. **Art des Betriebes:** Extremer Start-Stopp-, Links-Rechts-Betrieb führt immer zu einer Reduktion der Lebensdauer.
4. **Umwelteinflüsse:** Temperatur, Feuchtigkeit, Vibration, Art des Einbaues etc.
5. Bei Edelmetallbürsten erhöht das **CLL-Konzept** die Lebensdauer bei höheren Belastungen, wobei die Vorteile der Edelmetallbürsten voll erhalten bleiben.
6. Die Kombination von **Graphitbürsten** mit Kugellagern ergibt auch bei Extrembedingungen eine hohe Lebensdauer.

Kommutierungsbild bei Graphitbürsten



Kommutierungsbild

Das Kommutierungsbild stellt den Stromverlauf eines maxon DC-Motors über eine Motorumdrehung dar. Bitte schalten Sie einen niederohmigen Vorwiderstand (ca. 50 mal kleiner als der Motorwiderstand) in Serie zum Motor. Betrachten Sie den darüber abfallenden Spannungsverlauf auf dem Kathodenstrahloszilloskop.

Das Wichtigste über – maxon DC motor und maxon EC motor

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

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 motor 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

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

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:

$$n = k_n U_{ind}$$

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

$$M = k_M I$$

Die Kernaussage dieser Proportionalität ist, dass für den maxon Motor die Grössen Drehmoment und Strom äquivalent sind. In den Motordigrammen wird die Stromachse deshalb auch parallel zur Drehmomentachse gezeichnet.

Einheiten

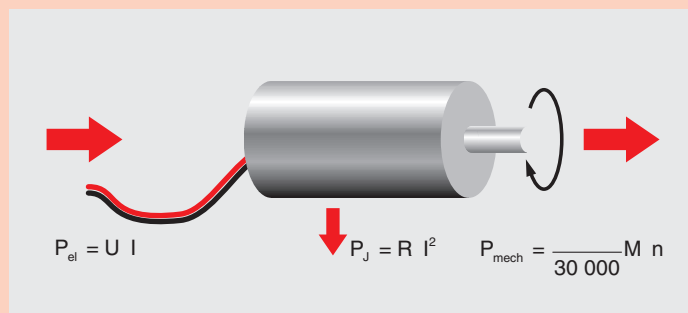
In allen Formeln sind die Grössen in den Einheiten gemäss Katalog (vgl. Physikalische Grössen und ihre Einheiten Seite 40) einzusetzen.

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

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

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 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 Anhaltmoment M_H , lässt sich die Kennlinie beschreiben (vgl. Zeilen 2 und 7 in den Motordaten).

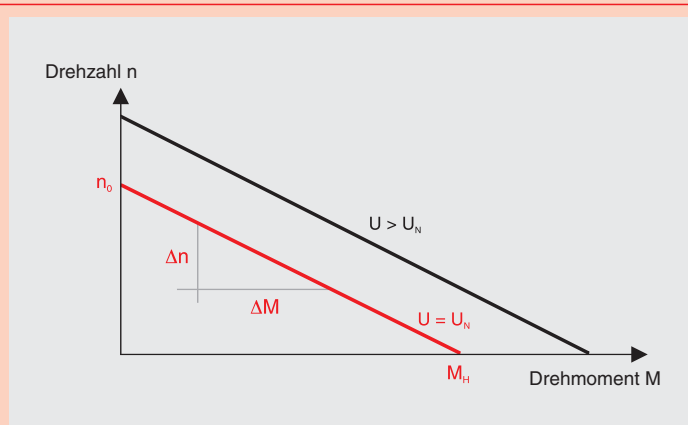
DC Motoren können bei beliebigen Spannungen betrieben werden. Leerlaufdrehzahl und Anhaltmoment verändern sich proportional zur angelegten Spannung, was einer Parallelverschiebung der Drehzahl-Kennlinie im Diagramm gleich kommt. Zwischen Leerlaufdrehzahl und Spannung gilt in guter Näherung die wichtige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

$$n_0 = k_n U$$

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

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

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



Herleitung der Drehzahlkennlinie

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

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

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 .

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

oder mit der Kennliniensteigung $-\frac{n}{M}$ und der Leerlaufdrehzahl n_0

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

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.

$$M_R = k_M I_0$$

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:

$$M_H = k_M I_A$$

Wirkungsgrad-Kennlinie

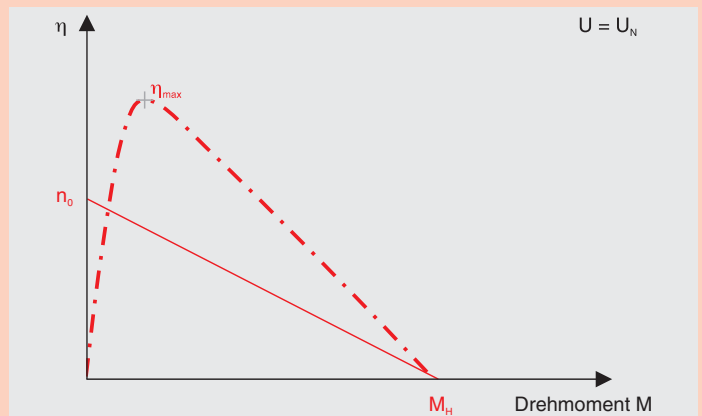
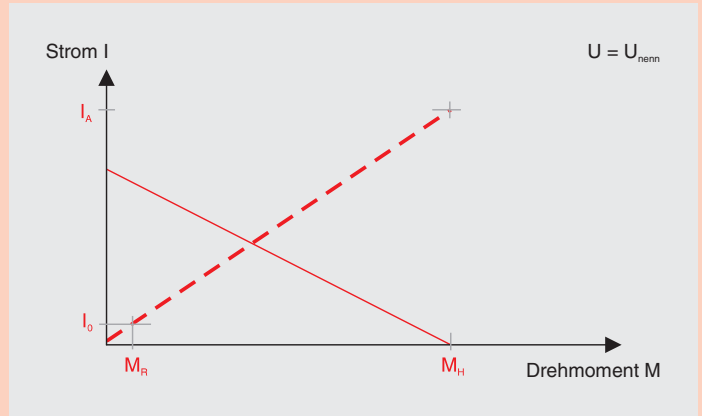
Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von abgegebener mechanischer Leistung zu aufgenommener elektrischer Leistung

$$\eta = \frac{n}{30000} \frac{M}{U I} \frac{M_R}{I}$$

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

$$\eta_{\max} = 1 - \sqrt{\frac{I_0}{I_A}}$$

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



Nennarbeitspunkt

Der Nennarbeitspunkt ist ein ausgezeichnete 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.

Motordigramme, 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 (10 bis 13 mm Durchmesser) bis zu etwa einer Minute für die grössten Motoren (60 mm, 75 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 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)

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

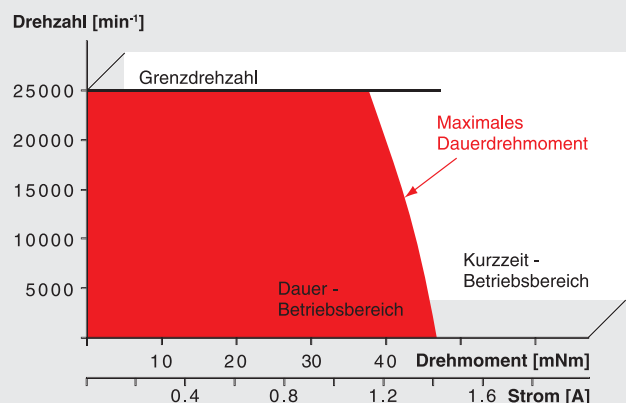
- Erhöhter mechanischer Verschleiss durch den grossen zurückgelegten Weg des Kollektors

- Erhöhte Elektroerosion durch Bürstenvibration und Funkenbildung

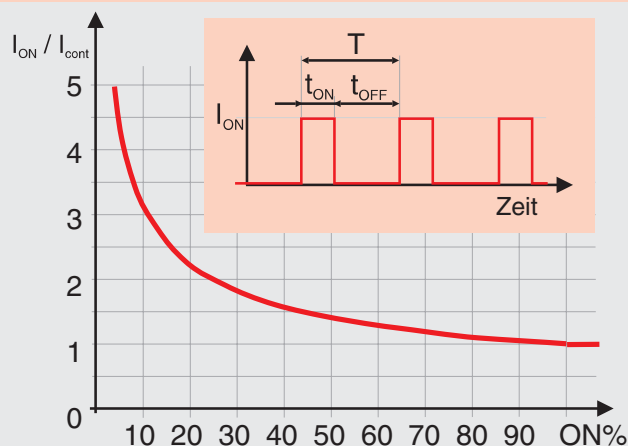
Ein weiterer Grund, die Drehzahl zu beschränken, ist die mechanische Restunwucht des Rotors, die die Lebensdauer der Lager beeinträchtigt. Höhere Drehzahlen als die Grenzdrehzahl n_{\max} (Zeile 23) sind durchaus möglich, werden aber meist mit einer reduzierten Lebenserwartung «erkauft». Die Grenzdrehzahl 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
OFF
 \hat{I}_{ON}
 I_N
 t_{ON}

T
 $t_{ON\%}$
das

Motor in Betrieb
Motor steht still
Max. Spitzenstrom
Max. Dauerbelastungsstrom (Zeile 6)
Einschaltzeit [s], sollte ω (Zeile 19) nicht überschreiten
Zykluszeit $t_{ON} + t_{OFF}$ [s]
Einschaltzeit in Prozenten der Zykluszeit.
Bei der Einschaltzeit von X % darf der Motor um

Verhältnis I_{ON} / I_{cont} 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 zurückgespielen. 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. Im für die Flachmotoren interessierenden Dauerbetriebsbereich kann die erreichbare Kennlinie durch eine Gerade zwischen der Leerlaufdrehzahl und dem Nennarbeitspunkt angenähert werden. Für diese erreichbare Kennliniensteigung gilt angenähert:

$$\frac{n}{M} = \frac{n_0}{M_N} \frac{n_N}{n_0}$$

Die Beschleunigung

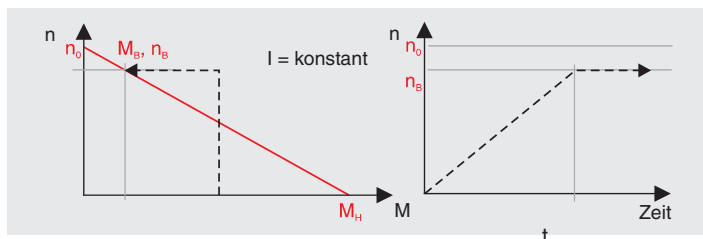
Gemäss den elektrischen Randbedingungen (Netzgerät, Steuerung, Batterie) sind prinzipiell zwei verschiedene Anlaufvorgänge zu unterscheiden:

- 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.



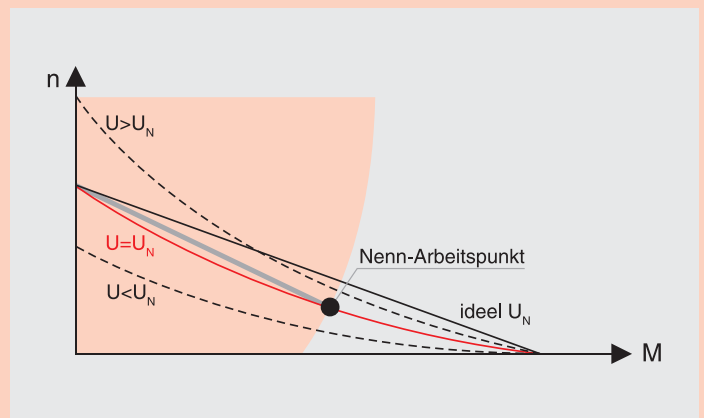
Winkelbeschleunigung (in rad / s²) bei konstantem Strom I oder konstantem Drehmoment M beim Antrieb einer zusätzlichen Massenträgheit J_L:

$$10^4 \frac{k_M I}{J_R + J_L} \quad 10^4 \frac{M}{J_R + J_L}$$

Hochlaufzeit t (in ms) bei einer Drehzahländerung n beim Antrieb einer zusätzlichen Massenträgheit J_L:

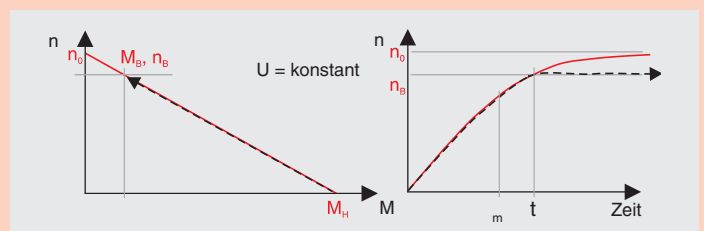
$$t = \frac{300}{n} \frac{J_R + J_L}{k_M I}$$

(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:

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

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

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

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

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

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

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

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

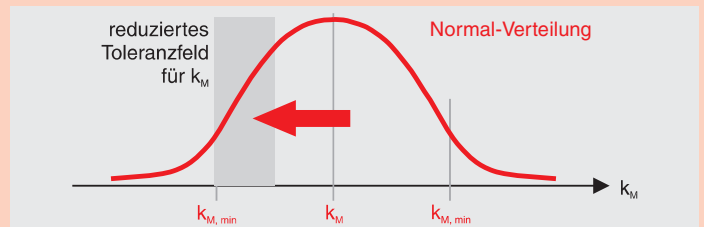
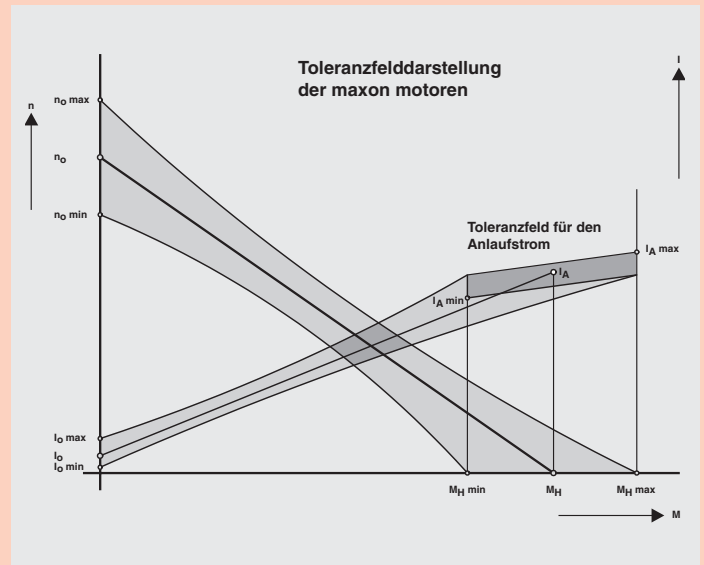
$$t = \tau_m' \ln \frac{1 + \frac{M_B M_R}{M_H} \frac{n_0}{n_B}}{1 + \frac{M_B M_R}{M_H} \frac{n_0}{n_B}}$$

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 T_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} .

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

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 50%, 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.

$$T_W = \frac{(R_{th1} + R_{th2}) R I^2}{1 + \frac{R_{th1} + R_{th2}}{R} I^2}$$

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 Widerstandskoeffizient für Kupfer linear an $\alpha_{Cu} = 0.0039 \frac{1}{K}$:

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

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

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

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.

$$M_N > M_{\text{RMS}}$$

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.

Ungeeregelter 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 $n_{0, \text{theor}}$ berechnen.

$$n_{0, \text{theor}} = n_B + \frac{n}{M} M_B$$

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

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

Diejenige Wicklung, deren k_n möglichst nahe bei $k_{n, \text{theor}}$ 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 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)
- Betriebsart (kontinuierlich, intermittierend, reversierend)
- Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Medium)
- 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?

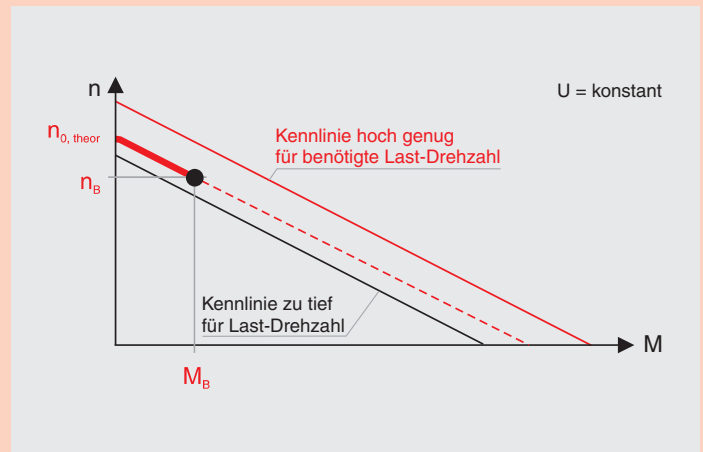
Welcher Durchmesser?

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?

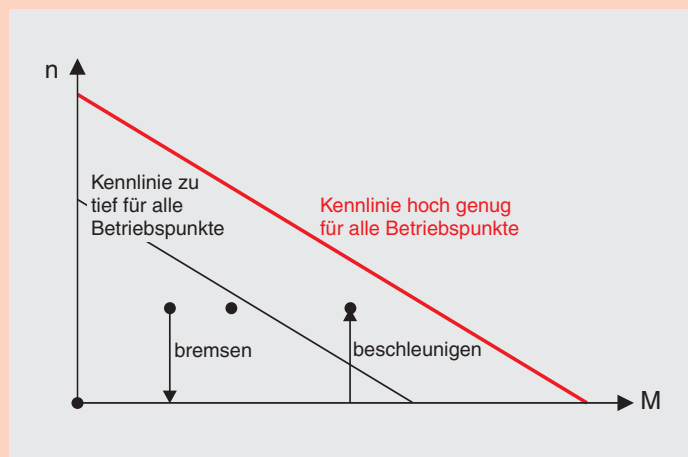


Geregelte Servoantriebe

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

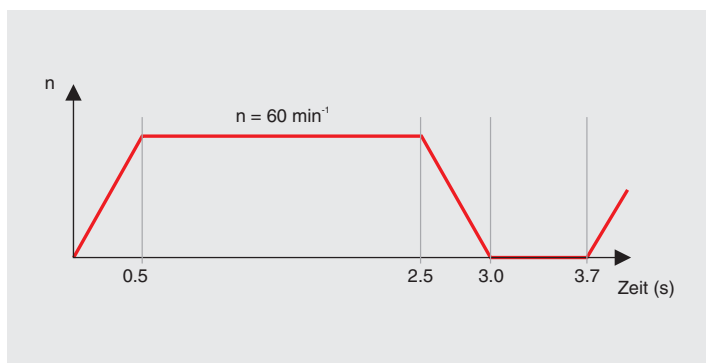
$$k_n U_{\max} n_0 n_B \frac{n}{M} M_B$$

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 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 bewegen.



Die zu beschleunigende Trägheit der Last J_L betrage 130 000 gcm². 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):

$$M \quad J_L \quad J_L \frac{n}{30} \frac{1}{t} \quad 0.013 \quad \frac{60}{0.5} \quad 0.163 \text{ Nm} \quad 163 \text{ mNm}$$

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		
bremsst 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

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

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

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

$$P_{\text{max}} = M_{\text{max}} n_{\text{max}} \frac{1}{30} = 0.46 \cdot 60 \cdot \frac{1}{30} = 2.9 \text{ W}$$

Physikalische Grössen

und ihre Einheiten

		SI	Katalog
i	Getriebeübersetzung*		
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-gemittelttes 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	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 T	Ω	Ω
R _{th1}	Wärmewiderstand Wicklung-Gehäuse		K / W
R _{th2}	Wärmewiderstand Gehäuse-Luft*		K / W
t	Zeit	s	s
T	Temperatur	K	°C
T _{max}	Max. zul. Wicklungstemperatur*	K	°C
T _U	Umgebungstemperatur	K	°C
T _W	Wicklungstemperatur	K	°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
n / M	Kennliniensteigung*		min ⁻¹ / mNm
T _W	Temperaturdiff. Wickl.-Umgeb.	K	K
t	Hochlaufzeit	s	ms
	(Motor-)Wirkungsgrad		%
g	(Getriebe-)Wirkungsgrad*		%
g _{max}	Maximaler Wirkungsgrad*		%
m	Mechanische Zeitkonstante*	s	ms
s	Therm. Zeitkonstante des Stators	s	s
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

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

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

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

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 Graphitkommutierung, 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 $480 \text{ min}^{-1} / \text{mNm}$. Allerdings ist zu beachten, dass die beiden niederohmigsten Wicklungen eine etwas steilere Kennlinie aufweisen. Die gewünschte Leerlaufdrehzahl errechnet sich wie folgt:

$$n_{0, \text{theor}} = n_{\max} - \frac{n}{M} M_{\max} = 5040 - 440 \cdot 9.3 = 9100 \text{ min}^{-1}$$

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.

$$k_{n, \text{theor}} = \frac{n_{0, \text{theor}}}{U} = \frac{9100}{19} = 480 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}$$

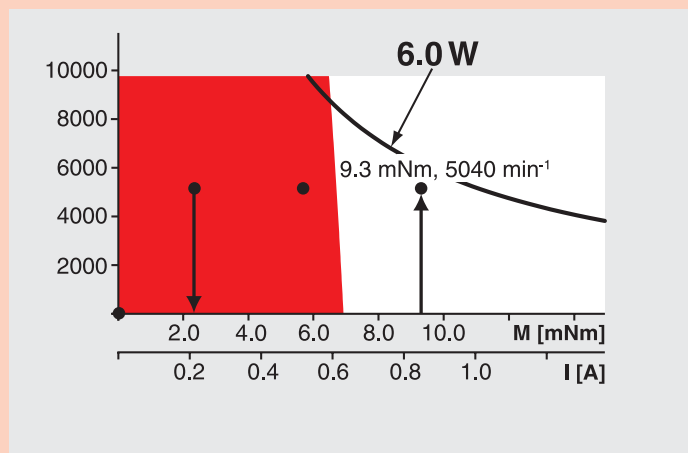
Den Berechnungen folgend, fällt die Wahl auf den Motor 110162, der mit genügend hohen Drehzahlkonstanten ($689 \text{ min}^{-1}/\text{V}$), und der ein zweites Wellenende zur Montage eines Encoders hat. Die höhere Drehzahlkonstante der Wicklung gegenüber dem Sollwert bedeutet, dass der Motor bei 19 V 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

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

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	$\approx 6.9 \text{ mNm}$	gut
A-max 19, 2.5 W	$\approx 3.8 \text{ mNm}$	zu schwach
RE-max 21, 6 W	$\approx 6.8 \text{ mNm}$	gut