

maxon DC motor

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 vierteiltem Kollektor
- Kurzzeitig hoch überlastbar
- Kompakte Bauweise – kleine Abmessungen
- Vielfältige Kombinationsmöglichkeiten mit Getrieben sowie DC-Tachos und Encodern

Eigenschaften des **maxon RE-Programms**:

- Hohe Leistungsdichte
- Hochwertiger DC-Motor mit NdFeB-Magnet
- Hohe Drehzahlen und Drehmomente
- Robustes Design (Metallflansch)

Eigenschaften des **maxon A-max-Programms**:

- Gutes Preis-Leistungs-Verhältnis
- DC-Motor mit AlNiCo-Magnet
- Torsionssteife Welle
- Automatisierter Herstellprozess

Eigenschaften des **maxon RE-max-Programms**:

- High-Performance zu niedrigen Kosten
- Kombiniert rationelle Fertigung und Konstruktion der A-max-Motoren mit der höheren Leistungsdichte der NdFeB-Magnete
- Automatisierter Herstellprozess

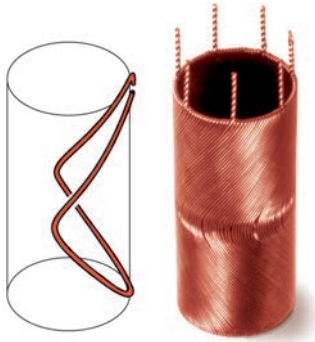
Drehzahl

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.

Programm

- **DCX-Programm**
- **RE-Programm**
- **A-max-Programm**
- **RE-max-Programm**



Die maxon Wicklung

Herzstück des maxon Motors ist die einzigartige eisenlose Wicklung, System maxon®. Dieses Motorprinzip hat seine ganz besonderen Vorteile: kein magnetisches Rastmoment und geringe elektromagnetische Störungen. 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 µm und 0.45 mm. So ergeben sich unterschiedliche Anschlusswiderstände der Motoren. Ebenfalls variieren jene Motorparameter, welche die Umwandlung von elektrischer und mechanischer Energie beschreiben (Drehmoment- und Drehzahl-Konstante). Sie erhalten dadurch die Möglichkeit, den für Ihren spezifischen Anwendungsfall am besten geeignete Motor auszuwählen.

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

Auswirkungen von Drahtquerschnitt und Windungszahl sind:

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)

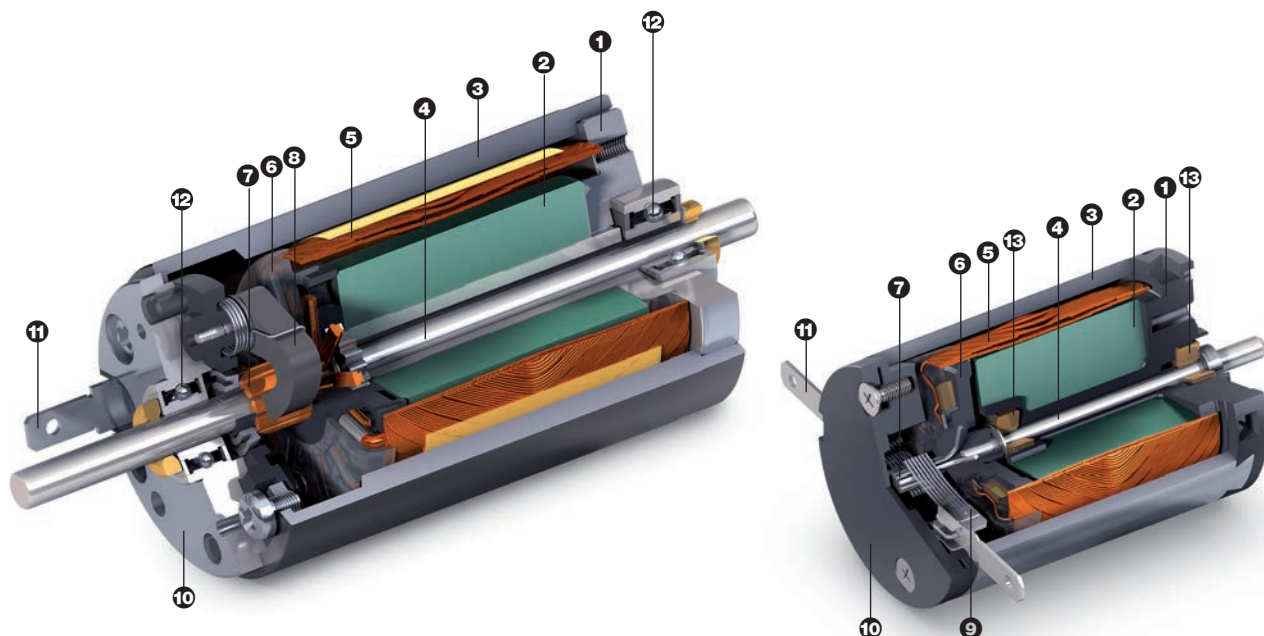
- 1 Flansch
- 2 Permanentmagnet
- 3 Gehäuse (magn. Rückschluss)
- 4 Welle
- 5 Wicklung
- 6 Kollektorplatte
- 7 Kollektor
- 8 Graphitbürsten
- 9 Edelmetallbürsten
- 10 Abschlussdeckel
- 11 Elektr. Anschluss
- 12 Kugellager
- 13 Sintergleitlager

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.



Mechanische Kommutierung

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.

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:

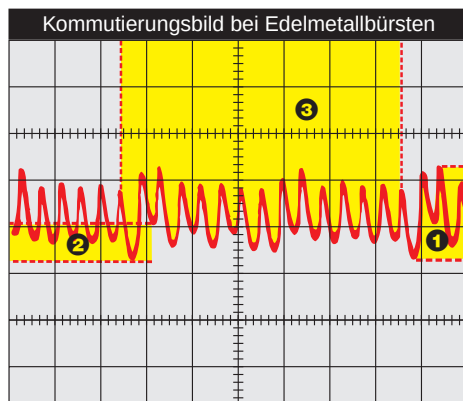
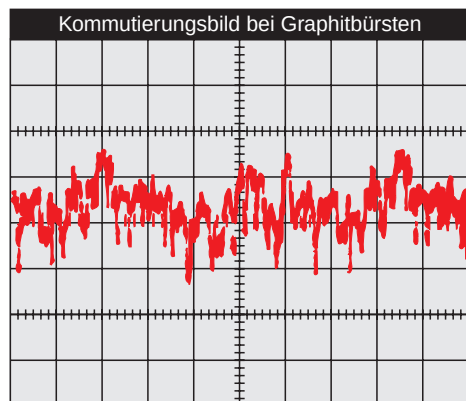
- In kleineren Motoren
- Im Dauerbetrieb
- Bei kleiner Strombelastung
- Bei Batteriebetrieb
- In DC-Tachos

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

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

Weitere Ergänzungen siehe Seite 79 oder im Buch «Auslegung von hochpräzisen Kleinstantrieben» von Dr. Urs Kafader.



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.

Legende

- ① Rippel, tatsächliche Welligkeit Spitze-Spitze
- ② Modulation, im Wesentlichen auf Asymmetrie im Magnetfeld und in der Wicklung zurückzuführen
- ③ Signalverlauf innerhalb einer Umdrehung (Anzahl Spitzen = doppelte Anzahl Kollektorsegmente)

maxon EC motor eisenlose Wicklung
Technik – kurz und bündig

Eigenschaften der maxon EC-Motoren:

- Bürstenloser Gleichstrommotor
- Hohe Lebensdauer
- Hoher Wirkungsgrad
- Lineare Kennlinien, hervorragende Regелеigenschaften
- Feststehende eisenlose Wicklung, System maxon® mit drei Phasen
- Kleinste elektrische Zeitkonstante und geringe Induktivität
- Ohne Rastmoment
- Gute Wärmeabfuhr, hohe Überlastbarkeit
- Rotierender Permanentmagnet aus Neodym mit ein oder zwei Polpaaren

Eigenschaften des **maxon EC**-Programms:

- Leistungsoptimiert, mit hohen Drehzahlen bis 100 000 min⁻¹
- Robustes Design
- Diverse Varianten: z.B. kurz/lang, sterilisierbar
- Geringste Restunwucht

Eigenschaften des **maxon EC-max**-Programms:

- Attraktives Preis-Leistungs-Verhältnis
- Robustes Stahlgehäuse
- Drehzahlen bis 20 000 min⁻¹
- Rotor mit einem Polpaar

Eigenschaften des **maxon EC-4pole**-Programms:

- Höchste Leistungsdichte dank Rotor mit zwei Polpaaren
- Gestrickte Wicklung, System maxon® mit optimierter Verschaltung der Teilwicklungen
- Drehzahlen bis 25 000 min⁻¹
- Hochwertiges Rückschlussmaterial zur Reduktion der Wirbelstromverluste
- Mechanische Zeitkonstanten unter drei Millisekunden

Lagerung und Lebensdauer

Die hohe Lebensdauer des bürstenlosen Designs kann nur mit vorgespannten Kugellagern echt genutzt werden.

- Lagerung auf mehrere 10000 Stunden ausgelegt
- Die Lebensdauer wird beeinflusst durch maximale Drehzahl, Restunwucht und Lagerbelastung

Legende

Der Kommutierungswinkel bezieht sich auf die Länge einer vollständigen Kommutierungssequenz (360°). Die Länge eines Kommutierungsintervalls ist demnach 60° .

Die Rotorlage bezogen auf die Motorwelle ist für Motoren mit einem Polpaar identisch. Für Motoren mit zwei Polpaaren halbieren sich die Werte.

Programm

- EC-Programm
- **EC**-max-Programm
- **EC**4pole-Programm
- mit Hall-Sensoren
- sensorlos
- mit integrierter Elektronik
- sterilisierbar
- Heavy Duty

Elektronische Kommutierung

Blockkommutierung mit Hall-Sensoren

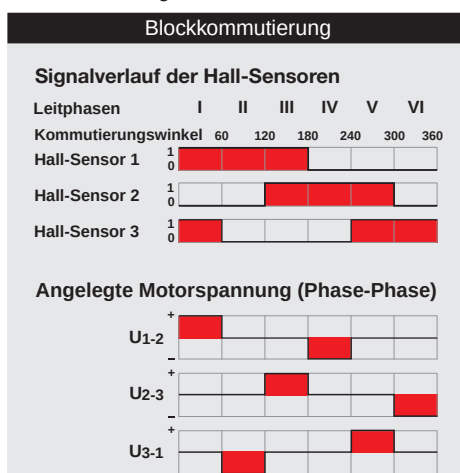
Die Rückmeldung der Rotorlage erfolgt durch drei im Motor eingebaute Hall-Sensoren. Die um 120° versetzt angeordneten Hall-Sensoren liefern pro Umdrehung sechs verschiedene Schaltkombinationen. Die drei Teilwicklungen werden nun entsprechend den Sensorinformationen in sechs verschiedenen Leitphasen bestromt. Strom- und Spannungsverlauf sind blockförmig. Die Schalltage jeder elektronischen Kommutierung liegt um 30° versetzt zum jeweiligen Drehmoment-Scheitelpunkt.

Eigenschaften der Blockkommutierung

- Relativ einfache und kostengünstige Elektronik
- Drehmomenttrippl von 14%
- Kontrollierter Anlauf
- Hohe Anlaufmomente und Beschleunigungen möglich
- Die Daten der maxon EC-Motoren werden mit Blockkommutierung ermittelt

Mögliche Anwendungen

- Hochdynamische Servoantriebe
- Start-Stopp-Betrieb
- Positionieraufgaben



- 1 Flansch
- 2 Gehäuse
- 3 Statorpaket
- 4 Wicklung
- 5 Permanentmagnet
- 6 Welle
- 7 Auswuchtscheiben
- 8 Print mit Hall-Sensoren
- 9 Steuermagnet
- 10 Kugellager

Sensorlose Blockkommutierung

Die Rotorlage wird über den Verlauf der induzierten Spannung erschlossen. Die Elektronik wertet den Nulldurchgang der induzierten Spannung aus und kommutiert nach einer drehzahlabhängigen Pause den Motorstrom (30° nach dem Nulldurchgang).

Die Amplitude der induzierten Spannung ist drehzahlabhängig. Im Stillstand und bei kleinen Drehzahlen ist das Spannungssignal zu klein und der Nulldurchgang kann nicht oder nur ungenau detektiert werden. Deshalb werden spezielle Algorithmen für den Anlauf benötigt (analog zur Schrittmotoransteuerung).

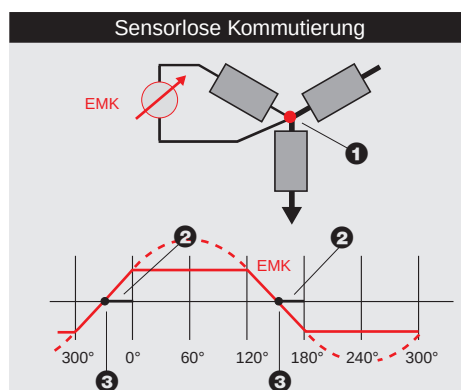
Damit auch EC-Motoren in Dreieckschaltung sensorlos kommutiert werden können, wird in der Elektronik meist ein virtueller Sternpunkt erzeugt.

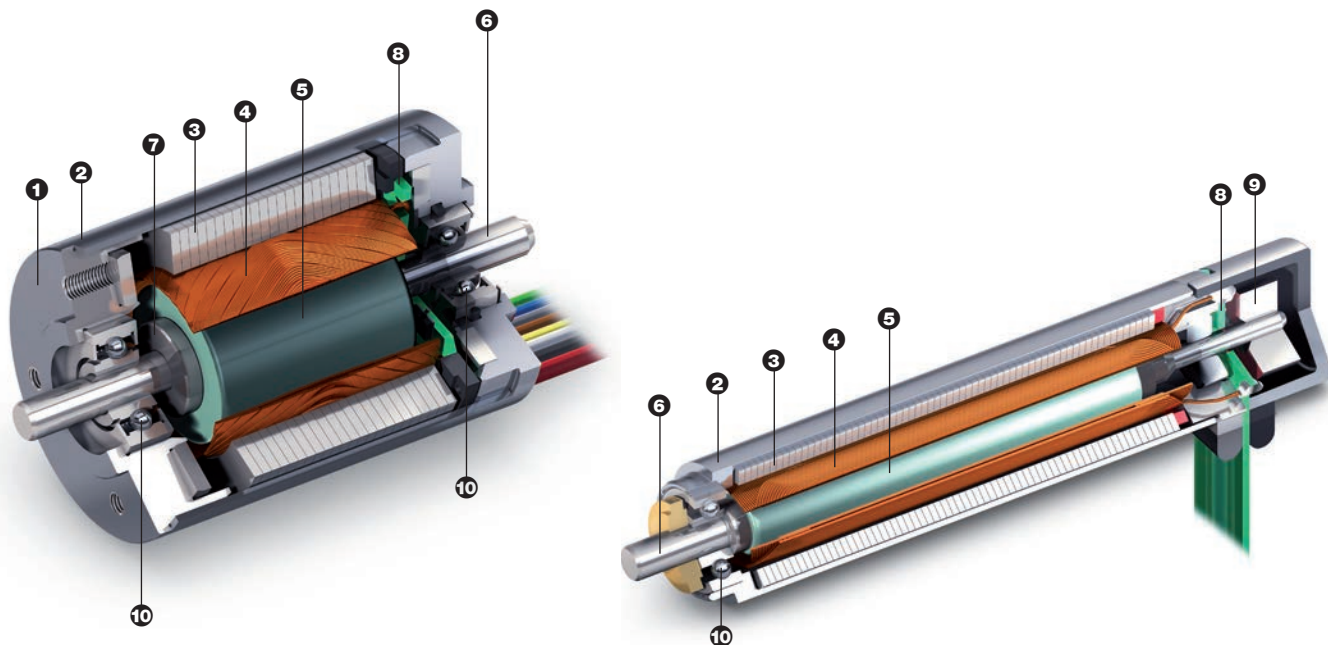
Eigenschaften der sensorlosen Kommutierung

- Drehmomenttrippl von 14% (Blockkommutierung)
- Kein definierter Anlauf
- Nicht geeignet für kleine Drehzahlen
- Nicht geeignet für dynamische Anwendungen

Mögliche Anwendungen

- Dauerbetrieb bei höheren Drehzahlen
- Ventilatoren





Sinuskommutierung

Die hochauflösenden Signale von Encoder oder Resolver werden in der Elektronik zur Erzeugung sinusförmiger Motor-Ströme verwendet. Die Ströme durch die drei Motorwicklungen sind abhängig von der Rotorlage und jeweils um 120° phasenverschoben (Sinuskommutierung). Dies ergibt den sehr weichen, präzisen Lauf des Motors und eine sehr genaue, hochwertige Regelung.

Eigenschaften der Sinuskommutierung

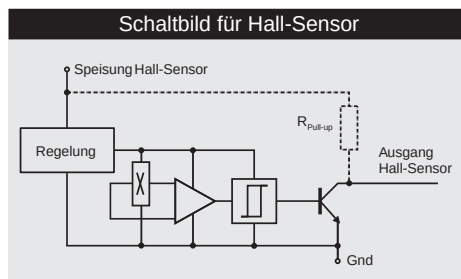
- Aufwendigere Elektronik
- Kein Drehmomenttrippel
- Sehr gute Gleichlaufeigenschaften auch bei kleinsten Drehzahlen
- Ca. 5% höheres Dauerdrehmoment als bei Blockkommutierung

Mögliche Anwendungen

- Hochdynamische Servoantriebe
- Positionieraufgaben

Beschaltung der Hall-Sensoren

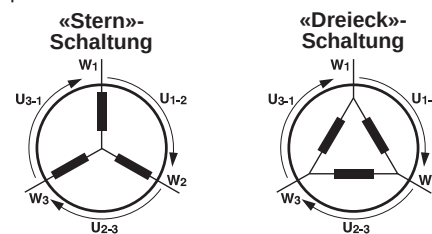
Der Open Collector Ausgang der Hall-Sensoren hat in der Regel keinen eigenen Pull-up-Widerstand, da dieser in den maxon Steuerungen integriert ist. Ausnahmen werden in den entsprechenden Motordatenblättern speziell erwähnt.



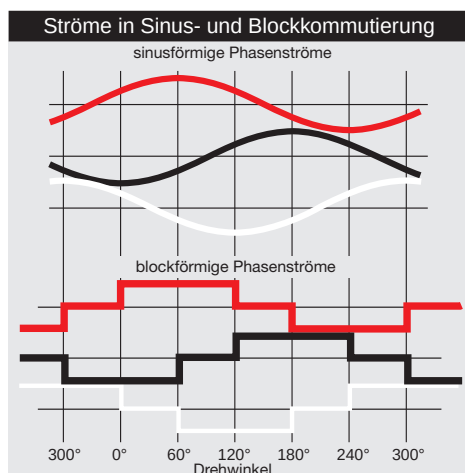
Der Stromverbrauch eines Hall-Sensors beträgt typ. 4 mA (bei Ausgang Hall-Sensor = «HI»).

Wicklungsbeschaltung

Die maxon Rautenwicklung ist in drei Teilwicklungen zu je 120° aufgeteilt. Die Teilwicklungen können auf zwei verschiedene Arten – «Stern» oder «Dreieck» – beschaltet werden. Dadurch verändern sich Drehzahl und Drehmoment umgekehrt proportional um den Faktor $\sqrt{3}$. Für die Auswahl des Motors spielt die Wicklungsbeschaltung keine ausschlaggebende Rolle. Wichtig ist, dass die motorspezifischen Parameter (Drehzahlkonstante und Drehmomentkonstante) den Anforderungen entsprechen.



Die maximal zulässige Wicklungstemperatur beträgt 125°C oder 155°C, je nach Motortyp.



Legende

- ① Sternpunkt
- ② Zeitverzögerung 30°
- ③ Nulldurchlauf EMK

maxon EC motor eisenbehaftete Wicklung
Technik – kurz und bündig

Eigenschaften der maxon EC-Flachmotoren und der EC-i-Motoren:

- Bürstenloser Gleichstrommotor
- Hohe Lebensdauer
- Flache Bauweise auch für gedrängte Platzverhältnisse
- Drehzahlen bis ca. 20000 min⁻¹
- Vergleichsweise hohes Drehmoment
- Vom streng linearen Verhalten abweichende Kennlinien
- Hallsensorsignale für einfache Drehzahl- und Positionsregelungen nutzbar
- Feststehende Wicklung mit Eisenkern und mehreren Zähnen pro Phase
- Leichtes Rastmoment
- Gute Wärmeabfuhr, hohe Überlastbarkeit
- Mehrpoliger Permanentmagnet aus Neodym
- Kleinere Kommutierungsschritte

Eigenschaften der maxon EC-Flachmotoren:

- Attraktives Preis-Leistungs-Verhältnis
- Hohe Drehmomente dank aussen liegendem, mehrpoligem Rotor
- Sehr gute Wärmedissipation bei höheren Drehzahlen dank offener Bauform

Eigenschaften des **maxon EC-i**-Programms:

- Höchste Dynamik dank innen liegendem, mehrpoligem Rotor
- Mechanische Zeitkonstanten unter drei Millisekunden
- Hohe Drehmomentdichte
- Drehzahlen bis $15\,000\text{ min}^{-1}$

Lagerung und Lebensdauer

Die hohe Lebensdauer des bürstenlosen Designs kann nur mit vorgespannten Kugellagern echt genutzt werden.

- Lagerung auf mehrere 10000 Stunden ausgelegt
- Die Lebensdauer wird beeinflusst durch maximale Drehzahl, Restunwucht und Lagerbelastung

Legende

Der Kommutierungswinkel bezieht sich auf die Länge einer vollständigen Kommutierungssequenz (360°). Die Länge eines Kommutierungsintervalls ist demnach 60° .

Die Rotorlage bezogen auf die Motorwelle ergibt sich aus dem angegebenen Kommutierungswinkel geteilt durch die Polpaarzahl des Motors.

Programm

EC-Flachmotor

- mit Hall-Sensoren
- sensorlos
- mit integrierter Elektronik

Elektronische Kommutierung

Blockkommutierung mit Hall-Sensoren

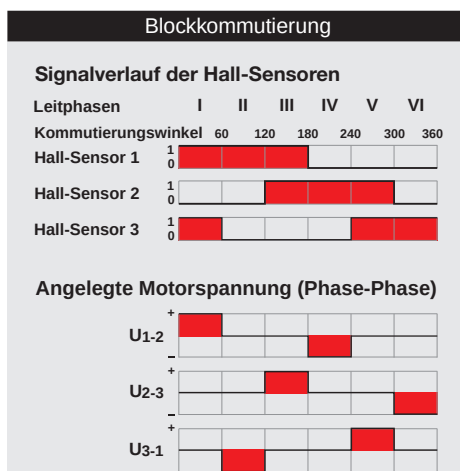
Die Rückmeidung der Rotorlage erfolgt durch drei im Motor eingebaute Hall-Sensoren, die pro Kommutierungssequenz sechs verschiedene Schaltkombinationen liefern. Die drei Phasen werden entsprechend dieser Sensorinformation in sechs verschiedenen Leitphasen bestromt. Strom- und Spannungsverlauf sind blockförmig. Die Schaltlage jeder elektronischen Kommutierung liegt symmetrisch um den jeweiligen Drehmoment-Scheitelpunkt.

Eigenschaften der Blockkommutierung

- Relativ einfache und kostengünstige Elektronik
- Kontrollierter Anlauf
- Hohe Anlaufmomente und Beschleunigungen möglich
- Die Daten der maxon EC-Motoren werden mit Blockkommutierung ermittelt

Mögliche Anwendungen

- Hochdynamische Servoantriebe
- Start-Stopp-Betrieb
- Positionieraufgaben



- 1 Flansch
- 2 Gehäuse
- 3 Statorpaket
- 4 Wicklung
- 5 Permanentmagnet
- 6 Welle
- 7 Print mit Hall-Sensoren
- 8 Vorgespannte Kugellager
- 9 Vorspannung

Sensorlose Blockkommutterung

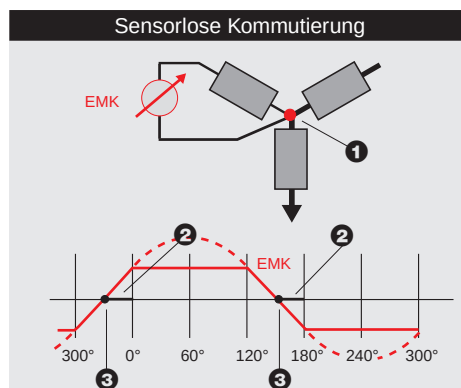
Die Rotorlage wird über den Verlauf der induzierten Spannung erschlossen. Die Elektronik wertet den Nulldurchgang der induzierten Spannung aus und kommutiert nach einer drehzahlabhängigen Pause den Motorstrom (30° nach dem Nulldurchgang). Die Amplitude der induzierten Spannung ist drehzahlabhängig. Im Stillstand und bei kleinen Drehzahlen ist das Spannungssignal zu klein und der Nulldurchgang kann nicht oder nur ungenau detektiert werden. Deshalb werden spezielle Algorithmen für den Anlauf benötigt (analog zur Schrittmotoransteuerung). Damit auch EC-Motoren in Dreieckschaltung sensorlos kommutiert werden können, wird in der Elektronik meist ein virtueller Sternpunkt erzeugt.

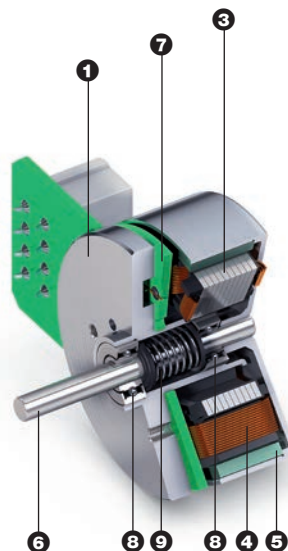
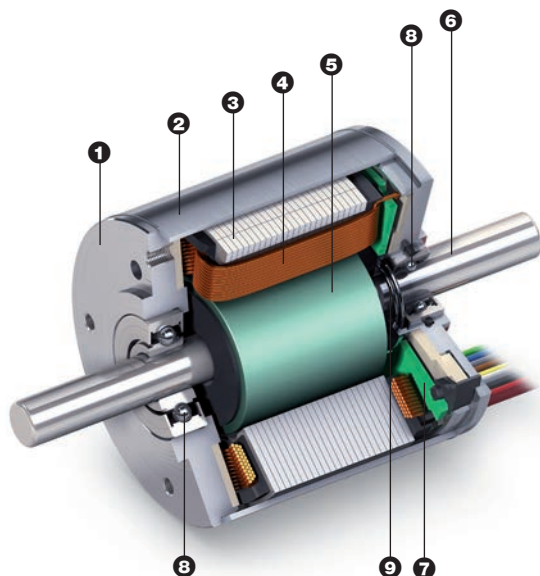
Eigenschaften der sensorlosen Kommutierung

- Kein definierter Anlauf
- Nicht geeignet für kleine Drehzahlen
- Nicht geeignet für dynamische Anwendungen

Mögliche Anwendungen

- Dauerbetrieb bei höheren Drehzahlen
- Ventilatoren, Pumpen





Beschaltung der Hall-Sensoren

Sinuskommutierung

Sinuskommutierung für EC-Motoren mit genuteter Wicklung ist prinzipiell möglich. Voraussetzung ist, dass ein Encoder montiert werden kann. Der Hauptvorteil der Sinuskommutierung – der hohe Gleichlauf – kommt aber aufgrund des Rastmoments nur bedingt zur Geltung.

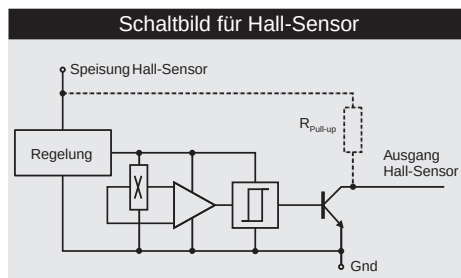
Integrierte Elektronik

Bei Motoren mit integrierter Elektronik wird die elektronische Kommutierung (meist Blockkommutierung mit Hall-Sensoren) eingebaut. Zusätzlich können auch eine Drehzahlregelung und weitere Funktionalitäten implementiert sein.

Eigenschaften

- Einfacher Betrieb mit einer Gleichstromspannung
- Weniger Anschlüsse als beim EC-Motor
- Keine zusätzliche Elektronik nötig
- Leistungseinbussen möglich aufgrund der reduzierten Platzverhältnisse für die Leistungselektronik

Der Open Collector Ausgang der Hall-Sensoren hat in der Regel keinen eigenen Pull-up-Widerstand, da dieser in den maxon Steuerungen integriert ist. Ausnahmen werden in den entsprechenden Motordatenblättern speziell erwähnt.

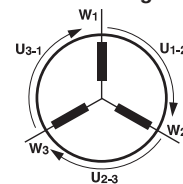


Der Stromverbrauch eines Hall-Sensors beträgt typ. 4 mA (bei Ausgang Hall-Sensor = «HI»).

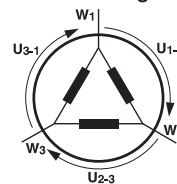
Wicklungsbeschaltung

Die Wicklung ist in drei Teilwicklungen mit je mehreren Statorzähnen unterteilt. Die Teilwicklungen können auf zwei verschiedene Arten – «Stern» oder «Dreieck» – beschaltet werden. Dadurch verändern sich Drehzahl und Drehmoment umgekehrt proportional um den Faktor $\sqrt{3}$. Für die Auswahl des Motors spielt die Wicklungsbeschaltung keine ausschlaggebende Rolle. Wichtig ist, dass die motorspezifischen Parameter (Drehzahlkonstante und Drehmomentkonstante) den Anforderungen entsprechen. Flachmotoren und EC-i sind in der Regel sternbeschaltet.

«Stern»-Schaltung



«Dreieck»-Schaltung



Die maximal zulässige Wicklungstemperatur beträgt 125°C (EC-i bis 155°C).

Legende

- ❶ Sternpunkt
- ❷ Zeitverzögerung 30°
- ❸ Nulldurchlauf EMK

Weitere Ergänzungen siehe Seite 169 oder im Buch «Auslegung von hochpräzisen Kleinstantrieben» von Dr. Urs Kafader.

maxon gear

Technik – kurz und bündig

Getriebe

Wenn die Leistung bei stark erhöhtem Drehmoment und entsprechend reduzierter Drehzahl erbracht werden soll, empfiehlt sich ein maxon Präzisionsgetriebe. Entsprechend der Getriebeuntersetzung reduziert sich die Abgangsdrehzahl, während sich das Abgangsdrehmoment erhöht. Zu dessen genauer Ermittlung ist der Wirkungsgrad zu berücksichtigen.

Umrechnung

Die Umrechnung von Drehzahl und Drehmoment des Getriebeabgangs (n_L , M_L) auf die Motorwelle (n_{mot} , M_{mot}) gehorcht folgenden Gleichungen:

$$n_{mot} = i \cdot n_L$$

$$M_{mot} = \frac{M_L}{i \cdot \eta}$$

Dabei ist:

- i: Getriebeuntersetzung
 η : Getriebewirkungsgrad

Lebensdauer

In Dauerbetrieb bei maximal zulässiger Belastung und maximal empfohlener Eingangs-drehzahl erreichen die Getriebe in der Regel 1000 bis 3000 Betriebsstunden. Werden diese Grenzwerte nicht ausgereizt, verlängert sich die Lebensdauer beträchtlich. Unterschreitet man die Drehzahlgrenze, so kann das Getriebe ohne Lebensdauereinbusse mit höheren Drehmomenten belastet werden. Umgekehrt können höhere Drehzahlen und damit höhere Untersetzungen gewählt werden, falls die Drehmomentgrenzen nicht ausgenützt werden. Einflussfaktoren der Lebensdauer:

- Überschreiten der maximalen Drehmomente kann zu erhöhtem Verschleiss führen.
- Lokale Temperaturspitzen im Bereich des Zahneingriffs können das Schmiermittel zerstören.
- Massives Überschreiten der Getriebeeingangs-drehzahl reduziert die Lebensdauer.
- Radiale und axiale Belastung der Lager.

Temperatur/Schmierung

maxon Getriebe sind auf Lebensdauer geschmiert. Die verwendeten Schmiermittel sind im empfohlenen Temperaturbereich besonders effektiv. Bei höheren oder tieferen Betriebstemperaturen geben wir Empfehlungen für Spezial-Schmiermittel.

Programm

- Planetengetriebe
- Stirnradgetriebe
- Koaxdrive
- Spindelantriebe

- 1 Abgangswelle
- 2 Befestigungsflansch
- 3 Lagerung der Abgangswelle
- 4 Axialsicherung
- 5 Getriebezwischenplatte
- 6 Zahnrad
- 7 Planetenräder
- 8 Sonnenrad
- 9 Planetenträger
- 10 Hohlrad

Auswahl der Getriebe

Bei der Getriebeauswahl ist in erster Linie die maximal übertragbare Leistung, das Produkt aus Drehzahl und Drehmoment, ausschlaggebend. Man beachte, dass die übertragbare Leistung von der Anzahl der Getriebestufen abhängt. Das Lastdrehmoment sollte unterhalb des Nennmoments (max. Dauerdrehmoment) des Getriebes $M_{N,G}$ liegen.

$$M_{N,G} \geq M_L$$

Bei Kurzzeitbelastungen muss auch das Kurzzeitdrehmoment des Getriebes miteinbezogen werden. Die Eingangs-drehzahl des Getriebes $n_{max,G}$ sollte möglichst nicht überschritten werden. Damit ist bei gegebener Betriebsdrehzahl die maximal mögliche Untersetzung i_{max} beschränkt. Für die Auswahl der Untersetzung i gilt somit

$$i \leq i_{max} = \frac{n_{max,G}}{n_L}$$

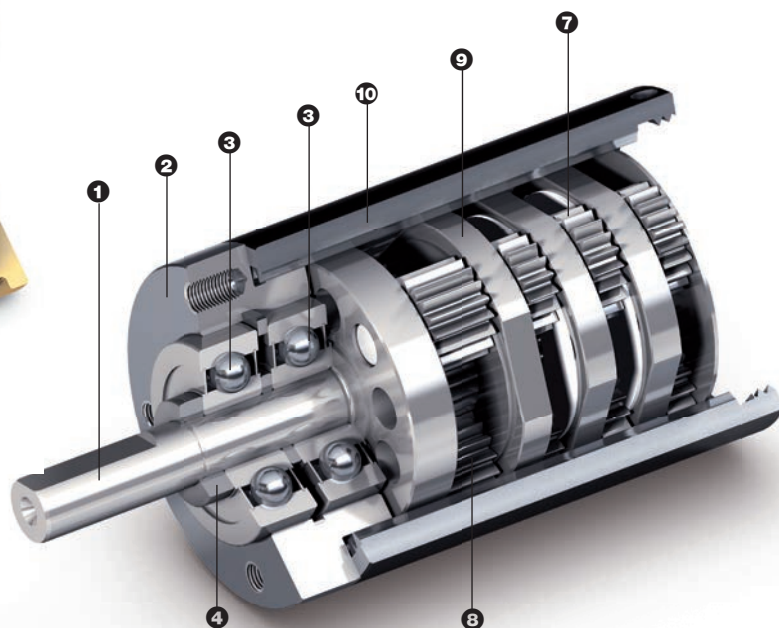
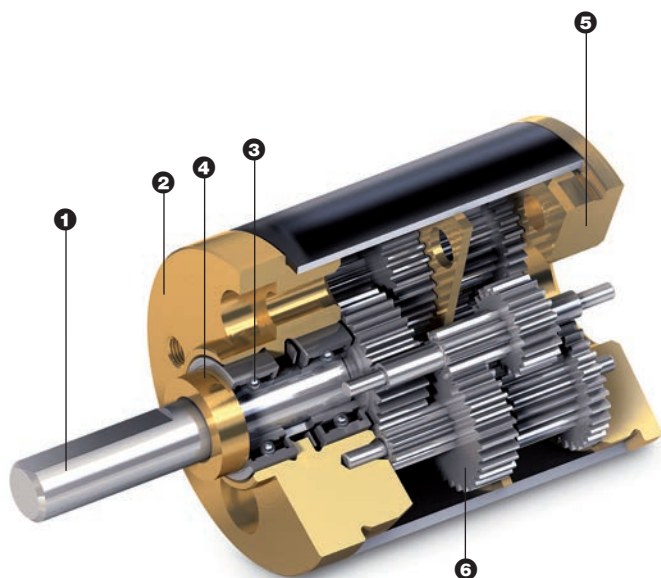
Ist das Getriebe ausgewählt, dienen die auf die Motorachse zurückgerechneten Daten (n_{mot} , M_{mot}) zur Motorauswahl. Das maxon Baukastensystem definiert die passenden Motor-Getriebe-Kombinationen.

Stirnradgetriebe

Das Getriebe besteht aus einer oder mehreren Stufen. Eine Stufe stellt die Paarung zweier Zahnräder dar. Das erste Zahnrad (Ritzel) ist direkt auf der Motorwelle montiert. Die Lagerung der Abgangswelle besteht im Normalfall aus Sintermaterial.

- Preisgünstig
- Für kleine Drehmomente
- Abgangsdrehmoment bis 2 Nm
- Untersetzungen von 6:1 bis 5752:1
- Aussendurchmesser 12–45 mm
- Geringe Geräuschentwicklung
- Hoher Wirkungsgrad





Planetengetriebe

Planetengetriebe eignen sich besonders zur Übertragung hoher Drehmomente. In der Regel sind die grösseren Getriebe mit Kugellager am Getriebeabgang ausgerüstet.

- Zur Übertragung hoher Drehmomente bis 180 Nm
- Untersetzungen von 4:1 bis 6285:1
- Aussendurchmesser 6–81 mm
- Hohe Leistung auf kleinstem Raum
- Hohe Untersetzung auf kleinstem Raum
- Konzentrischer Getriebeeingang und -ausgang

Kunststoff-Versionen

Kostengünstige und trotzdem kompakte Antriebe können mit Planetengetrieben aus Kunststoff realisiert werden. Die mechanische Belastbarkeit ist etwas kleiner als bei Metallausführungen, liegt aber deutlich höher als bei Stirnradgetrieben.

Keramik-Versionen

Durch Verwendung von Keramik-Bauteilen in Getrieben kann das Verschleissverhalten kritischer Komponenten deutlich verbessert werden. Als Resultat ergeben sich gegenüber reinen Metallgetrieben:

- Höhere Lebensdauer
- Höhere Dauerdrehmomente
- Höhere Kurzzeitdrehmomente
- Höhere Eingangsrehzahlen

High-Power-Getriebe

Speziell hohe Abgangsmomente in der Abgangsstufe von Planetengetrieben lassen sich durch folgende Massnahmen erreichen:

- Verwendung von Keramikbauteilen
- 4 statt nur 3 Planeten in der Abgangsstufe
- Zusätzliche motorseitige Abstützung der Abgangsstufe
- Verstärkung der Abgangslagerung

Heavy-Duty-Getriebe

Die HD-(Heavy-Duty-)Getriebe zeichnen sich durch ihre sehr robuste Bauweise aus. Die Verwendung von rostfreiem Stahl und optimierten Schweissverbindungen erlauben den Einsatz unter extremsten Bedingungen.

Spielreduzierte Getriebe

Die Spielreduktion wird durch eine patentierte Vorspannung der Planeten in der Abgangsstufe erreicht. Trotz des während des Betriebs auftretenden Verschleisses bleibt das Getriebespiel konstant klein; dies im Gegensatz zu Getrieben, bei denen die Spielreduktion durch toleranzarme Fertigung und Materialpaarung erreicht wird.

Sterilisierbare Getriebe

Sterilisierbare Getriebe zeichnen sich durch die Verwendung von rostfreiem Stahl und speziellen Schmiermitteln aus. Die Lagerung der Abgangswelle und die Verbindung zum Motor sind so gestaltet, dass der Eintritt von Flüssigkeit ins Getriebe gehemmt wird.

Koaxdrive

Geräuschreduktion

Geräusche entstehen hauptsächlich in der Eingangsstufe der Getriebe. Folgende Massnahmen helfen, Geräusche zu vermindern:

- Kleinere Eingangsrehzahlen und damit kleinere Relativgeschwindigkeit der Zahnflanken
- Eingangsstufe mit Kunststoffzahnradern
- Verwendung eines Koaxdrive-Getriebes

Das geräuscharme Koaxdrive ist eine Kombination aus Schnecken- und Planetengetriebe. In der ersten Stufe treibt eine separat gelagerte Schnecke die drei schräg gestellten Planetenräder an. Diese greifen wiederum in ein speziell verzahntes Hohlrad. Alle weiteren Stufen sind wie ein normales Planetengetriebe aufgebaut.

- Geräuscharm
- Hohe Untersetzung in der ersten Stufe
- Weitere Eigenschaften wie Planetengetriebe



maxon sensor

Technik – kurz und bündig

Istwertgeber

maxon bietet eine Reihe von Istwertgebern an. Ihre Hauptmerkmale sind:

Digitale Inkrementalencoder

- Relatives Positionssignal, geeignet für Positionieraufgaben
- Drehrichtungserkennung
- Drehzahl aus Anzahl Impulse pro Zeiteinheit
- Standardlösung für viele Anwendungen

DC-Tacho

- Analoges Drehzahlsignal
- Drehrichtungserkennung
- Ungeeignet für Positionieraufgaben

Resolver

- Analoge Rotorposition
- Analoges Drehzahlsignal
- Aufwendige Auswertelektronik in der Steuerung nötig
- Für spezielle Lösungen in Zusammenspiel mit Sinuskommutierung bei EC-Motoren

Digitale Inkrementalencoder

Encoder-Signale

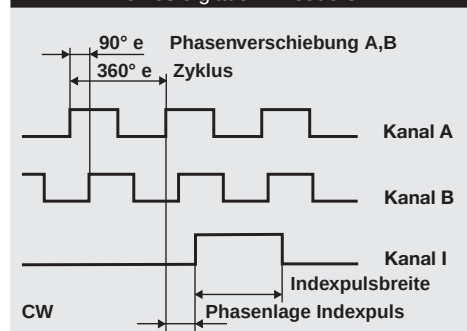
Für die Weiterverarbeitung in der Steuerung liefern die Encoder Rechtecksignale, deren Impulse für eine genaue Positionierung oder zur Drehzahlbestimmung ausgewertet werden können. Kanal A und B sind phasenverschobene Signale, die zur Drehrichtungserkennung miteinander verglichen werden. Dabei gilt die unten skizzierte Phasenlage der Kanäle A und B für den Motorbetrieb im Uhrzeigersinn (CW), wenn stirnseitig von aussen auf die Motorwelle gesehen wird.

Bei allen maxon Positioniersystemen werden die Signalfanken ausgewertet. Dadurch ergibt sich in Bezug zur Impulsanzahl des Encoders eine vierfach höhere Positionieraufklärung. Man spricht in diesem Fall von sogenannten Quadcounts.

Die Flanken des Indexkanals I können zur präzisen Bestimmung einer Referenzposition («home») herangezogen werden.

Der Line Driver erzeugt Komplementärsignale $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{I}$, mit deren Hilfe die bei langen Signalleitungen auftretenden Störungen eliminiert werden können. Daneben verbessert dieser im Encoder eingebaute elektronische Treiber die Signalqualität durch steilere Flanken.

Darstellung der Ausgangssignale eines digitalen Encoders



Programm

- Digitale MILE-Encoder
- Digitale EASY-Encoder
- Digitale MR-Encoder
- Digitale Hall-Effekt Encoder
- Digitale optische Encoder
- Analoges DC-Tacho
- Analoges Resolver

Magnetische Prinzipien

Beim magnetischen Encoder sitzt ein kleiner, mehrpoliger Dauermagnet auf der Motorwelle. Die Änderungen des Magnetflusses werden von Sensoren erfasst und aufbereitet als Kanal A und B der Elektronik zugeführt. Magnetische Encoder benötigen einen minimalen Platzbedarf.

MR-Encoder

- Sensor mit magnetoresistivem Prinzip
- Dank Interpolator hohe Impulszahl möglich
- Diverse Impulszahlen wählbar
- Mit/ohne Index
- Mit/ohne Line Driver

MEnc

- Digitale Hall-Sensoren
- 2 Kanäle A und B
- Line Driver nicht möglich
- Tiefe Impulszahl

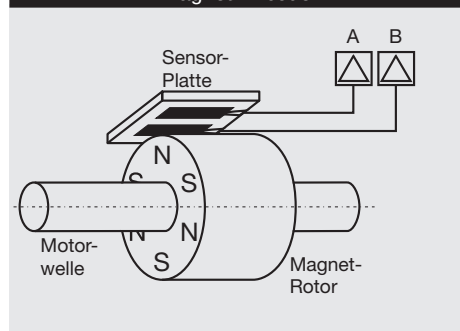
EASY-Encoder

- Integrierte Schaltung mit Hall-Sensor und Interpolator
- Impulszahl programmierbar 1 bis 1024
- Mit Indexkanal und Line Driver RS422

QUAD-Encoder

- Digitale Hall-Sensoren
- 4 Zustände pro Umdrehung
- Line Driver nicht möglich

Schematischer Aufbau der Magnet-Encoder



- 1 Abschlussdeckel
- 2 Elektrische Anschlüsse Motor und Encoder
- 3 Leiterplatte
- 4 MR-Sensor
- 5 Teilscheibe
- 6 Polrad
- 7 Encoder-Gehäuse
- 8 Massverkörperung
- 9 Flansch
- 10 Sensor mit Gehäuse
- 11 Encoder-Gabel

Optisches Prinzip

Beim optischen Prinzip der Gabellichtschranke (Beispiel: HEDL, HEDS, SCH16F, 2RMHF, Enc22) sendet eine LED Licht durch eine fein gerasterte Impulsscheibe, die auf der Motorwelle befestigt ist. Der Empfänger wandelt die Hell-Dunkel-Signale in entsprechende elektrische Ströme um, die in der dazugehörigen Elektronik verstärkt und zu Impulsen aufbereitet werden.

Eigenschaften

- Hohe Impulszahl
- Indexkanal und Line Driver möglich
- Sehr hohe Genauigkeit

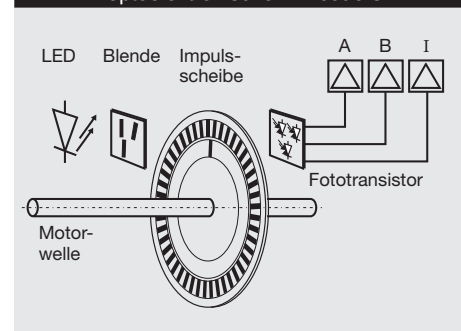
Induktives Prinzip

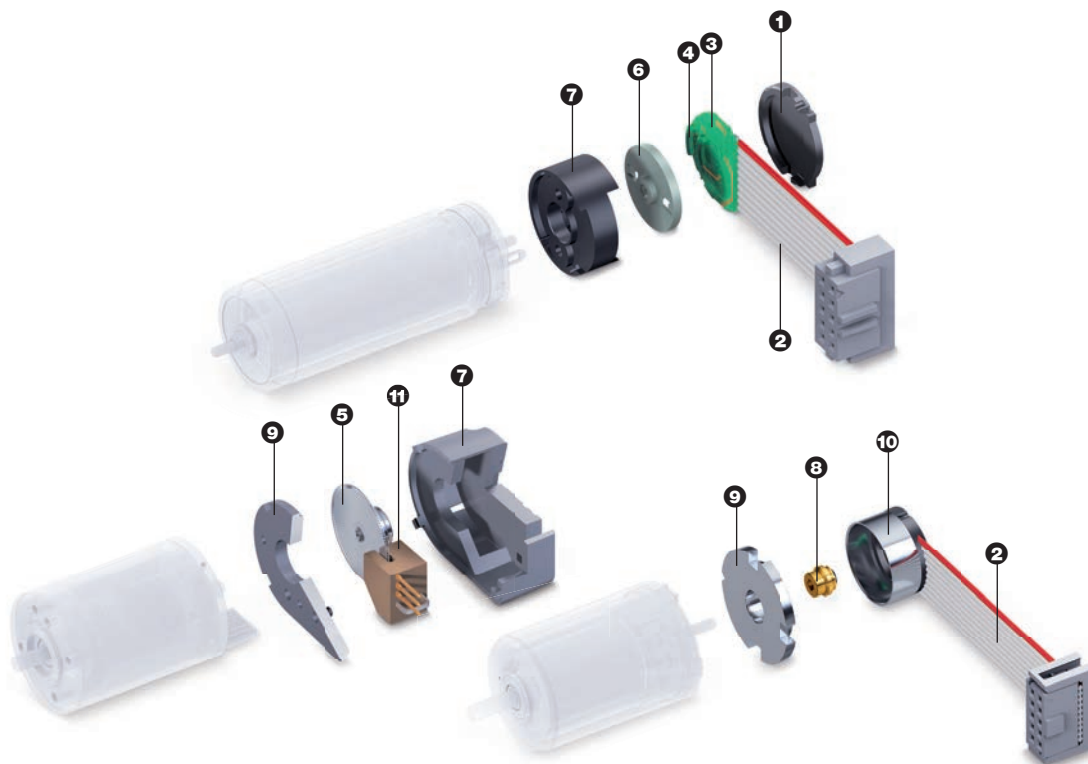
Beim induktiven MILE-Encoder wird ein hochfrequentes Wechselfeld transformatorisch übertragen und dabei mittels einer strukturierten Kupferscheibe winkellabhängig moduliert.

Eigenschaften

- Sehr robust gegen magnetische und elektrische Felder sowie gegen Verschmutzung
- Sehr hohe Drehzahlen möglich
- Hohe Genauigkeit, Interpolationsfehler werden mit einer Wertetabelle weitgehend kompensiert
- Indexkanal und Line Driver vorhanden
- Absolutinterface (SSI) auf Anfrage

Schematischer Aufbau eines optoelektronischen Encoders





Merkpunkte Encoderauswahl

Hauptmerkmale der maxon Inkrementalencoder sind:

- Die Anzahl Impulse pro Umdrehung (Inkremente)
- Die Genauigkeit
- Die Verwendung eines Indexkanals
- Die Verwendung eines Line Drivers
- Die maximale unterstützte Drehzahl
- Die Eignung für spezielle Umgebungsbedingungen (Staub, Öl, Magnetfelder, ionisierende Strahlung)

Encoder und maxon Regler

- Standardmässig sind die maxon Regler auf Encoder mit 500 Inkrementen voreingestellt.
- Die Eingangsfrequenz der Regelelektronik kann die maximal mögliche Impulszahl des Encoders beschränken.
- Je höher die Impulszahl und je höher die Genauigkeit, umso besser lässt sich ein ruhiger, ruckfreier Betrieb auch bei kleinen Drehzahlen erreichen.
- Die maxon Regler lassen sich für den Betrieb bei kleinen oder grossen Drehzahlen sowie für Encoder mit tiefer oder hoher Impulszahl einstellen.

Speziell für Positioniersysteme gilt:

- Je höher die Impulszahl, umso genauer kann eine Position erreicht werden. Bei 500 Impulsen (2000 Quadcounts) wird eine Winkelauflösung von 0.18° mechanisch erreicht, was meistens viel besser ist als die Genauigkeit der mechanischen Antriebskomponenten (z.B. aufgrund des Getriebeispiels oder Elastizitäten von Antriebsriemen).
- In Positioniersteuerungen sollten nur Encoder mit integriertem Line Driver (z.B. RS422) verwendet werden. Damit wird verhindert, dass elektromagnetische Störsignale zu Signalverlusten und aufkumulierten Positionsfehlern führen.
- Positionieranwendungen benötigen oft den Indexkanal des Encoders zur genauen Referenzpunktermittlung.

DC-Tacho

Grundsätzlich ist jeder maxon DC-Motor als DC-Tacho verwendbar. Für Motor-Tacho-Kombinationen bieten wir einen DC-Tacho an, bei dem der Tacho-Rotor direkt auf der Motorwelle montiert ist.

Eigenschaften

- Abgegebene Gleichspannung proportional zur Drehzahl dank Edelmetallbürsten
- AlNiCo-Magnet für hohe Signalstabilität bei Temperaturschwankungen
- Ohne zusätzliche Tacho-Lagerung, kein zusätzliches Reibmoment
- Keine Kupplungen, hohe mechanische Resonanzfrequenz

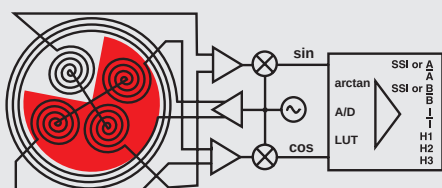
Resolver

Der Resolver ist auf die durchgehende Welle des Motors aufgebaut und in exaktem Bezug zum Magnetfeld des Motor-Rotors ausgerichtet. Der Resolver hat eine drehbare Primärwicklung (Rotor) und zwei räumlich um 90° versetzte Sekundärwicklungen (Stator). Eine an die Primärwicklung angeschlossene Wechselspannung wird transformatorisch auf die zwei Sekundärwicklungen übertragen. Die Amplituden der Sekundärspannungen sind $\sin \varphi$ und $\cos \varphi$, wobei φ der Drehwinkel ist.

Eigenschaften

- Robust, für den industriellen Einsatz
- Hohe Lebensdauer
- Kein mechanischer Verschleiss
- Störungssichere Signalübertragung über weite Distanz
- Keine empfindliche Elektronik
- Spezielle Signalauswertung nötig
- Nur ein Geber für Positions- und Geschwindigkeitsinformation
- EC-Motoren mit Resolver werden ohne Hall-Sensoren geliefert

Schematischer Aufbau des induktiven MILE-Encoders



Empfehlungen zur Encoderauswahl

(✓) bedingt zutreffend		QUAD	MEnc	MR	EASY	MILE	Optisch
1	Sehr hohe Drehzahl	✓	✓	✓	✓	✓	
2	Sehr tiefe Drehzahl			(✓)	(✓)	✓	✓
3	Präzise Position			(✓)	(✓)	(✓)	✓
4	Line Driver möglich			✓	✓	✓	✓
5	Indexkanal möglich			✓	✓	✓	✓
6	Kompakte Bauform	✓	(✓)	✓	✓	✓	
7	Staub, Schmutz, Öl	✓	✓	✓	✓	✓	
8	Externe Magnetfelder	(✓)	(✓)		(✓)	✓	✓
9	Ionisierende Strahlung		✓				

maxon motor control

Technik – kurz und bündig

Das **maxon motor control**-Programm beinhaltet Servoverstärker zur Ansteuerung der reaktionsschnellen maxon DC- und EC-Motoren.

Programm

- **ESCON: 4-Q Drehzahl- und Stromregler für DC- und EC-Motoren**
- **EPOS: Positionsregler für DC- und EC-Motoren**

Motorart

- maxon DC motor
- maxon EC motor mit oder ohne Sensoren

Regelart

- Drehzahl
- Position
- Strom

Sensoren/Feedback

- Encoder
- DC-Tacho
- IxR-Kompensation
- Hall-Sensoren

Sollwertvorgabe

- Analoge Spannung
- Digital über Feldbus

Regelgrößen

Drehzahl

Die Aufgabe der Drehzahl-Servoverstärker besteht darin, eine vorgegebene Drehzahl möglichst konstant und unabhängig von Belastungswechseln am Motor einzuhalten. Um dies zu erreichen, wird in der Regelelektronik des Servoverstärkers fortlaufend der Sollwert (vorgegebene, gewünschte Drehzahl) mit dem Istwert (tatsächliche Drehzahl) verglichen. Mit der daraus ermittelten Reglerdifferenz steuert der Regler die Endstufe des Servoverstärkers so an, dass der Motor die Reglerdifferenz verkleinert. Wir haben also einen geschlossenen Geschwindigkeits-Regelkreis.

Position

Der Positionsregler sorgt für die Übereinstimmung der momentan gemessenen Position mit einer Sollposition, in dem er – genau wie beim Drehzahlregler – entsprechende Korrekturwerte an den Motor gibt. Die dazu benötigte Positionsinformation stammt meist von einem Digital-Encoder.

Strom

Der Stromregler führt dem Motor einen zum Sollwert proportionalen Strom zu. Somit verhält sich auch das Motordrehmoment proportional zum Sollwert.

Der Stromregler verbessert auch die Dynamik eines übergeordneten Positions- oder Drehzahl-Regelkreises.

Digital-Encoderregelung

Der Motor ist mit einem Digital-Encoder ausgerüstet, der pro Umdrehung eine bestimmte Anzahl Impulse liefert. Mit den um 90 elektrische Grad verschobenen Rechteckimpulsen wird die Drehrichtung erkannt.

- Digital-Encoder sind häufig bei Positionierregelungen vorhanden, um Weg oder Winkel abzuleiten und zu messen.
- Digital-Encoder sind keinem mechanischen Verschleiss unterworfen.
- Im Zusammenspiel mit einem digital arbeitenden Regler gibt es keine Drifteffekte.
- Werden die Hall-Sensor-Signale eines EC-Motors zur Regelung herangezogen, entspricht dies einem Encoder mit tiefer Auflösung.

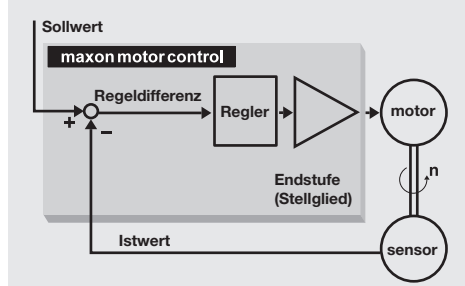
IxR-Kompensation

Dem Motor wird eine Spannung zugeführt, die dem angelegten Drehzahlsollwert proportional ist. Bei zunehmender Belastung des Motors würde die Drehzahl absinken. Die Kompensationsschaltung erhöht die Ausgangsspannung mit steigendem Motorstrom. Die Kompensation wird auf den Anschlusswiderstand des Motors eingestellt. Die Grösse dieses Widerstandes ist temperatur- und belastungsabhängig.

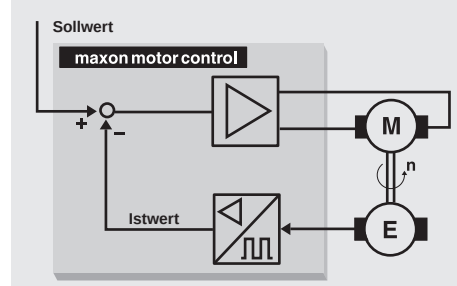
Der erreichbaren Drehzahlgenauigkeit eines solchen Systems sind Grenzen im Prozentbereich gesetzt.

- Preiswert und platzsparend
- Kein Tachogenerator oder Encoder erforderlich
- Weniger präzise Ausregelung bei Laständerung
- Nur Regelung der Drehzahl
- Ideal für Low-Cost-Anwendungen ohne hohe Ansprüche an Drehzahlkonstanz

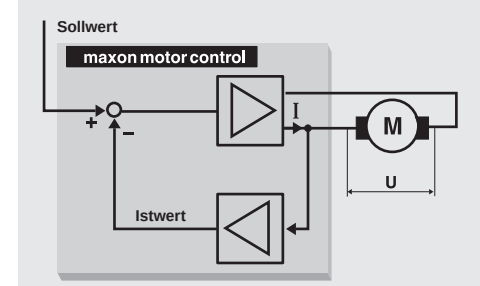
Prinzip eines Regelkreises



Prinzip: Encoderregelung



Prinzip: IxR-Kompensation





DC-Tacho-Regelung

Der Motor muss mit einem DC-Tacho ausgerüstet sein, der ein drehzahlproportionales Signal liefert. Im maxon Baukastensystem ist der Tacho-Rotor direkt auf der Motorwelle montiert, wodurch eine hohe Resonanzfrequenz erreicht wird.

- Klassische Lösung einer sehr präzisen Regelung
- Begrenzte Lebensdauer des DC-Tacho-Generators
- Nicht für Positionieraufgaben geeignet
- Analoges Feedbacksignal
- Ideal für hohe Ansprüche an Drehzahldynamik

Sollwertvorgabe

Servokontroller (Drehzahl- und Stromregler) sind meist für eine analoge Sollwertvorgabe ausgelegt. Alternativ sind auch PWM-Signale oder fixe Sollwerte möglich.

Bei Positionsreglern (Motion Controller) erfolgt die Sollwertvorgabe in der Regel über digitale Befehle, die über ein Feldbus-Telegramm (z.B. RS232, USB, CANopen, EtherCAT) der Steuerung zugeführt werden.

Betriebsquadranten

4-Q-Betrieb

- Kontrollierter Motorbetrieb und Bremsbetrieb in beiden Drehrichtungen (alle 4 Quadranten)
- Ein Muss für Positionieraufgaben

1-Q-Betrieb

- Nur Motorbetrieb (Quadrant I oder Quadrant III)
- Drehrichtungsumkehr durch digitales Signal
- Typisch: Verstärker für EC-Motoren

Getaktete 4-Q-Endstufen

Zur Ansteuerung der Endstufentransistoren verwenden die maxon Regler eine 3-Niveau-Pulsweitenmodulation (PWM). Die am Motor liegende Spannung wird in kurzen Intervallen (50 kHz und mehr) zwischen der Versorgungsspannung und 0V geschaltet. Wird das Aus-Intervall auf Kosten des Ein-Intervalls länger, verkleinert sich der massgebliche Mittelwert der Spannung (Pulsweitenmodulation) und die Motordrehzahl nimmt ab. Soll die Motorspannung negativ sein, wird die Versorgungsspannung mit umgekehrter Polarität angelegt.

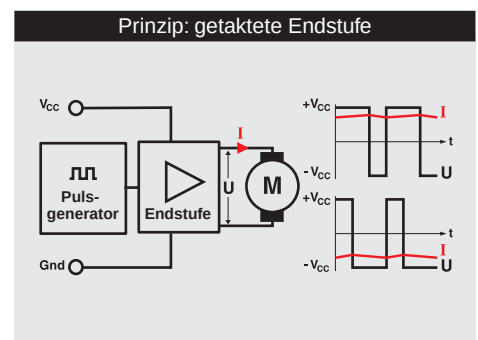
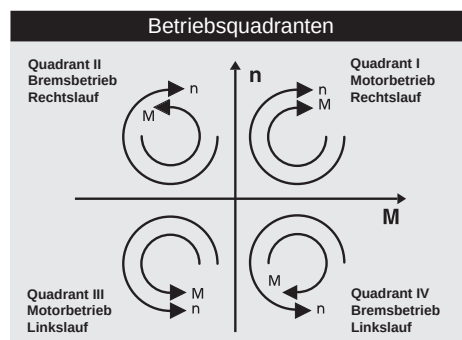
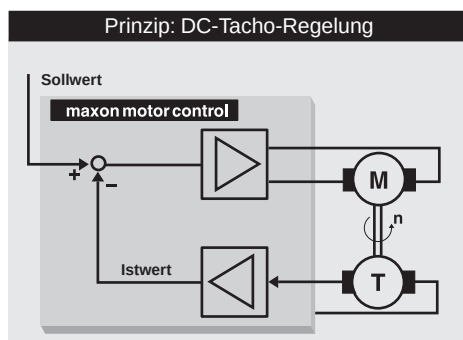
Eigenschaften der 3-Niveau-PWM-Endstufe im Gegensatz zur linearen Ansteuerung

- Aufwendigere Endstufe
- Glättung des Stromrippels durch Zusatzdrosseln (in maxon Regler integriert)
- Nur wenig Energie wird in Wärme umgesetzt
- Hoher Wirkungsgrad

Der 4-Quadranten-Betrieb ermöglicht den kontrollierten und dynamischen Motorbetrieb und Bremsbetrieb in beiden Drehrichtungen (alle 4 Quadranten).

Für Positionieraufgaben ist der 4-Quadranten-Betrieb eine Voraussetzung.

Weitere Ergänzungen ab Seite 365.



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).

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

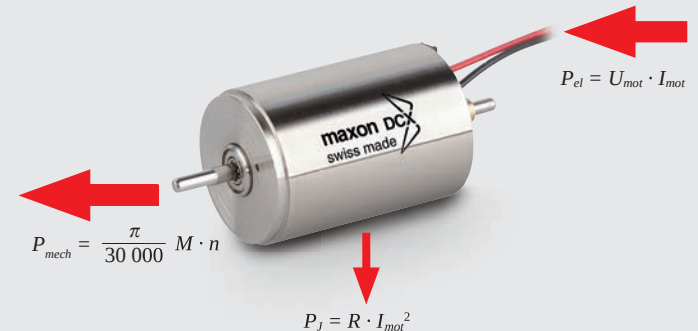
Siehe auch: Technik – kurz und bündig, Erklärungen zu den Motordaten

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)

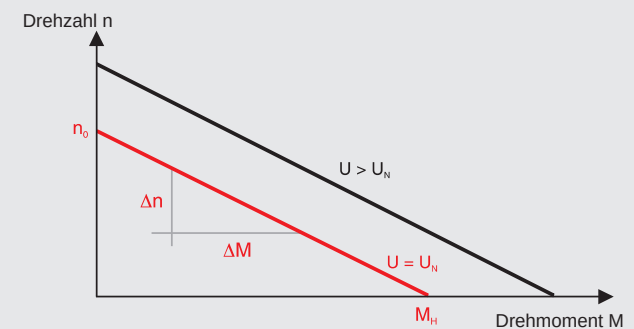


Motorkonstanten

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

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

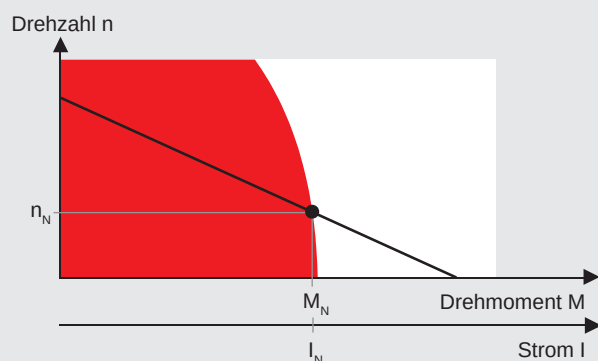
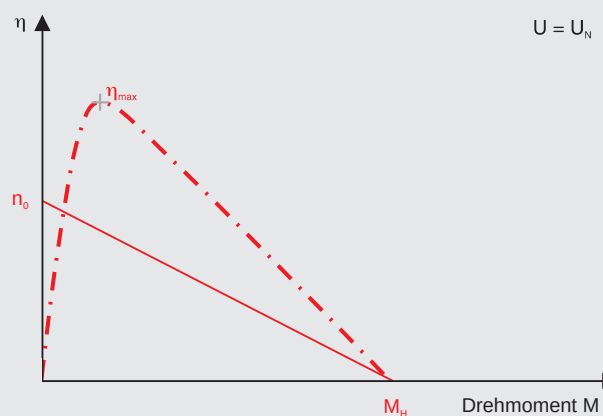
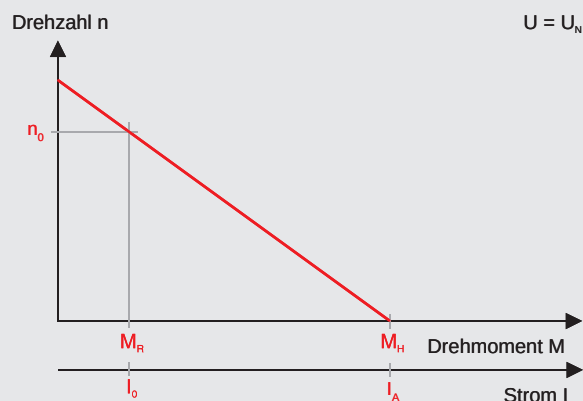
Maximaler Wirkungsgrad und maximale Abgabeleistung treten nicht bei gleichem Drehmoment auf.

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.

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

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.



Motordigramme, Betriebsbereiche

Im Katalog findet man zu jedem maxon DC- und EC-Motortyp ein Diagramm, das anhand eines typischen Motors die Betriebsbereiche der Wirkungsreihe 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 Wirkungsreihe eines Motortyps praktisch konstant und stellt eine charakteristische Grösse des Motortyps dar.

Die maximale Drehzahl (Grenzdrehzahl)

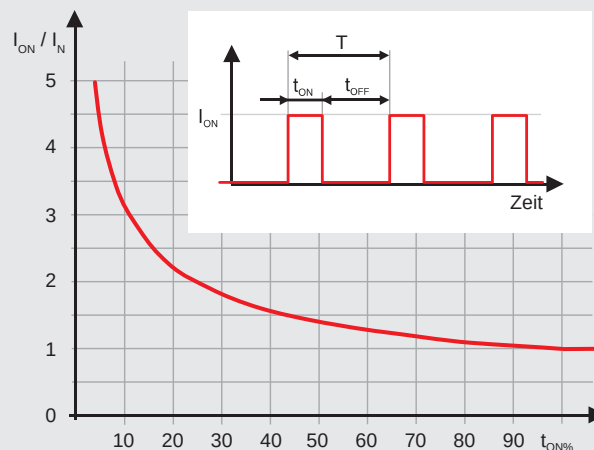
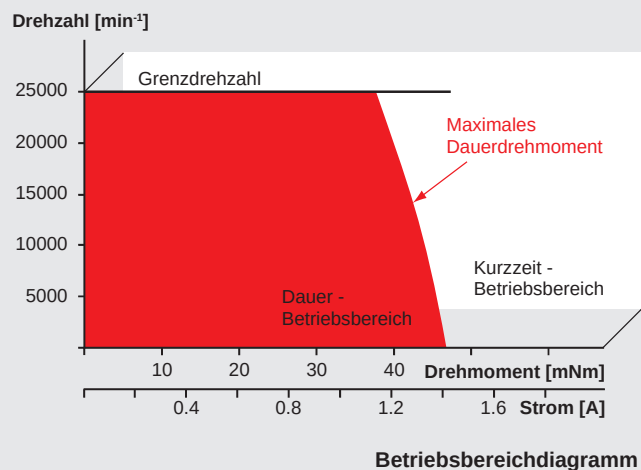
Diese wird beim DC-Motor primär durch das Kommutierungssystem begrenzt. Bei sehr hohen Drehzahlen werden Kollektor und Bürsten stärker abgenutzt. Die Gründe sind:

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

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

I_{ON}

I_N

t_{ON}

T

$t_{ON\%}$

Motor in Betrieb

Motor steht still

Max. Spitzenstrom

Max. Dauerbelastungsstrom (Zeile 6)

Einschaltzeit [s], sollte t_w (Zeile 19)

nicht überschreiten

Zykluszeit $t_{ON} + t_{OFF}$ [s]

Einschaltdauer in Prozenten der Zykluszeit.

Bei der Einschaltdauer von X % darf der Motor um das Verhältnis I_{ON} / I_N überlastet werden.

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

maxon flat motor

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

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

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

Die Beschleunigung

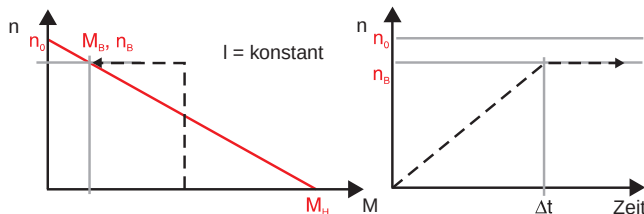
Gemäss den elektrischen Randbedingungen (Netzgerät, Steuerung, Batterie) sind prinzipiell zwei verschiedene Anlaufvorgänge zu unterscheiden:

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

Anlauf bei konstantem Strom

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

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



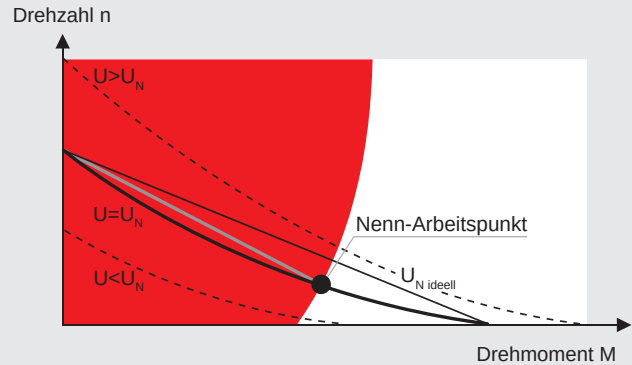
- Winkelbeschleunigung α (in rad / s²) bei konstantem Strom I oder konstantem Drehmoment M beim Antrieb einer zusätzlichen Massenträgheit J_L :

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

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

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

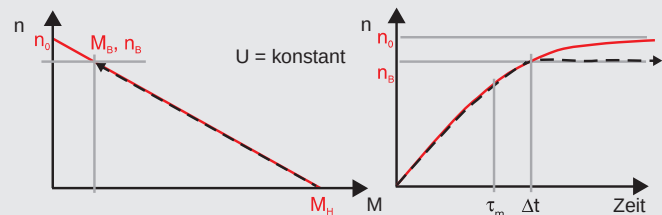
(alle Grössen in Einheiten gemäss Katalog)



maxon motor

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 / s²) des unbelasteten Motors:

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

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

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

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

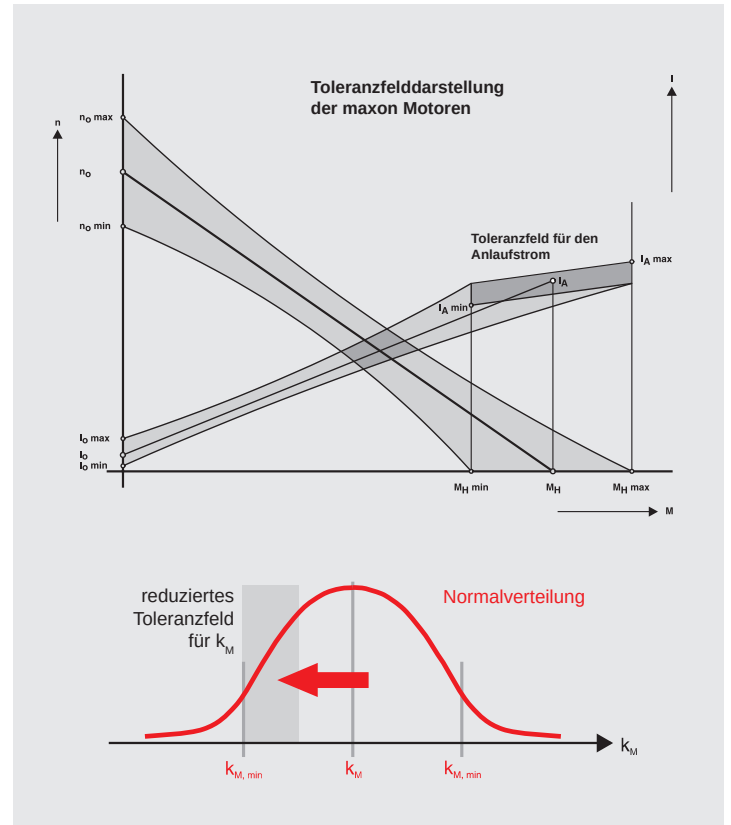
$$\Delta t = \tau_m' \cdot \ln \left(\frac{\left(1 - \frac{M_L + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0}{\left(1 - \frac{M_L + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0 - n_L} \right)$$

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

$$M_H > M_{max}$$

Auswahl der Wicklung: Elektrische Anforderungen

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

Ungeregelter Antrieb

Bei Anwendungen mit nur einem Betriebspunkt soll dieser oft mit einer festen Spannung U erreicht werden. Gesucht ist somit diejenige Wicklung, deren Kennlinie bei vorgegebener Spannung durch den Betriebspunkt geht. Die Berechnung nutzt die Tatsache, dass alle Motoren eines Typs praktisch dieselbe Kennliniensteigung aufweisen. Vom Betriebspunkt (n_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:

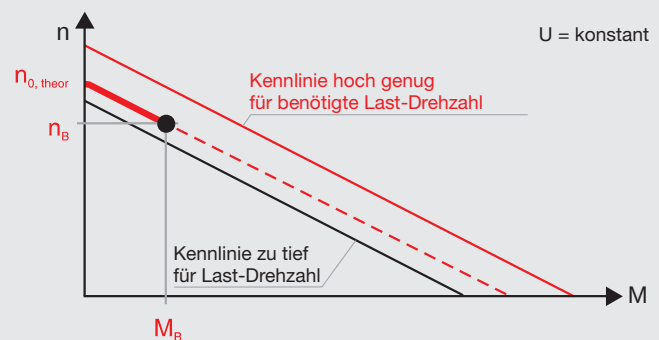
Vielfach sind die Lastpunkte (insbesondere die Drehmomente) noch unbestimmt oder lassen sich nur schwer ermitteln. In solchen Fällen hilft ein Kniff: Betreiben Sie Ihr Gerät mit einem nach Baugrösse und Leistung grob abgeschätzten Messmotor. Variieren Sie die Spannung, bis die gewünschten Betriebspunkte 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 Kommunikationssystem soll verwendet werden?
- Edelmetallkommutierung für Dauerbetrieb bei kleinen Strömen (Faustregel für höchste Lebensdauer: bis ca. 50% von I_N).
- Graphitkommutierung für hohe Dauerströme (Faustregel: 50% bis ca. 75% von I_N) und häufige Stromspitzen (Start-Stopp-Betrieb, Reversierbetrieb).
- Elektronische Kommutierung für höchste Drehzahlen und Lebensdauer.
- Wie gross sind die Kräfte auf die Welle, müssen Kugellager verwendet werden oder reichen preisgünstigere Sinterlager?



Geregelte Servoantriebe

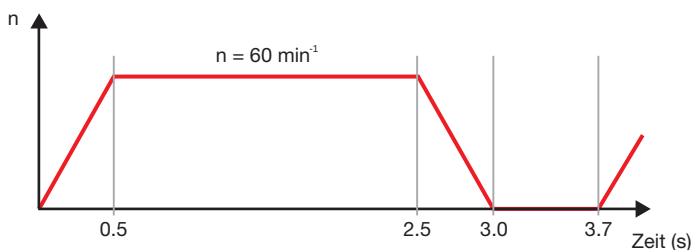
Bei Arbeitszyklen müssen alle Betriebspunkte unterhalb der Kennlinie bei maximaler Spannung U_{max} liegen. Mathematisch heisst dies, dass für alle Betriebspunkte (n_L , M_L) gelten muss:

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

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 gcm². 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.

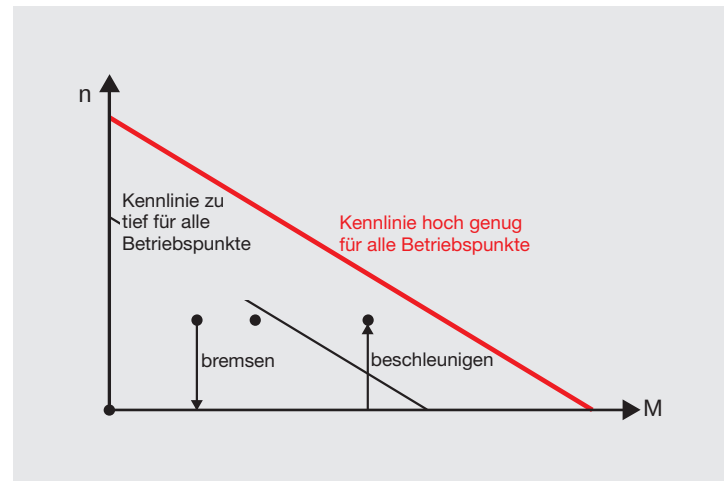
Das RMS-gemittelte Drehmoment des gesamten Arbeitszyklus ist

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

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

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	Getriebeübersetzung*		
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	°C
T_{max}	Max. zul. Wicklungstemperatur*	K	°C
T_U	Umgebungstemperatur	K	°C
T_W	Wicklungstemperatur	K	°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*		min ⁻¹ /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 Kurzzeiddrehmoment 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

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

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

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

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

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

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 $k_{n, \text{theor}}$ des Motors definiert

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

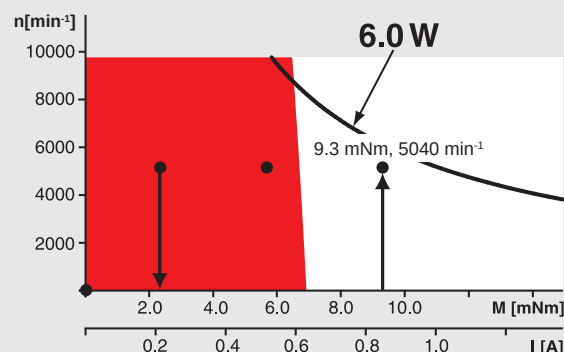
Den Berechnungen folgend fällt die Wahl auf den Motor 110163, der mit der Drehzahlkonstanten von 558 min⁻¹ V⁻¹ eine Drehzahl-Regelreserve von über 20% aufweist. Damit sind auch ungünstige Toleranzen kein Problem. Die höhere Drehzahlkonstante der Wicklung gegenüber dem berechneten Wert bedeutet, dass 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

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

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	$\approx 6.9 \text{ mNm}$	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
EC 16, 30 W	$\approx 8.5 \text{ mNm}$	gut
EC 16, 60 W	$\approx 17 \text{ mNm}$	zu stark
EC 20 flat, 3 W	$\approx 3-4 \text{ mNm}$	zu schwach
EC 20 flat, 5 W	$\approx 7.5 \text{ mNm}$	gut
EC 20 flat, 5 W, iE.	$\approx 7.5 \text{ mNm}$	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
oz-in 7.06 gesucht: mNm

Basisgrösse für ...

... Umrechnungen:

1 oz = $2.834952313 \cdot 10^{-2}$ kg

1 in = $2.54 \cdot 10^{-2}$ m

... Erdbeschleunigung:

g = 9.80665 m s^{-2}

= $386.08858 \text{ in s}^{-2}$

... 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

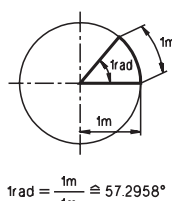
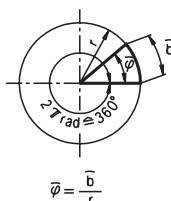
1 W = 1 Nms⁻¹ = 1 kgm²s⁻³

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



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	$\frac{2\pi}{60000}$
mW	7.06	0.117	112.9	1.356 · 10 ³	1 · 10 ³	1	9.807 · 10 ³	$\frac{2\pi}{60}$
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	$\frac{1}{192}$	$\frac{1}{11520}$	$\frac{1}{12}$	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	$\frac{1}{192}$	1	0.737	0.737 · 10 ⁻²	0.737 · 10 ⁻³	7.233	7.233 · 10 ⁻⁵	

Massenträgheitsmoment

J [kg m²]

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	$\frac{1}{16}$	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	$\frac{1}{16}$	1	$\frac{1}{7000}$	2.205	2.205 · 10 ³	lbf	$\frac{1}{16}$	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	$\frac{1}{12}$	1	3	$\frac{1}{12}$ · 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	$\frac{\pi}{30}$	1	s ⁻²	$\frac{1}{3600}$	1	$\frac{1}{2\pi}$	$\frac{1}{60}$
min ⁻¹	$\frac{1}{60}$	1	$\frac{30}{\pi}$	rad s ⁻²	$\frac{\pi}{1800}$	2π	1	$\frac{\pi}{30}$

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	$\frac{1}{60}$
in-s ⁻¹	1	60	12	720	39.37	39.37 · 10 ⁻²	39.37 · 10 ⁻³	0.656
ft-s ⁻¹	$\frac{1}{12}$	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

In diesem Katalog
verwendete Einheiten