

maxon EC Motoren die bürstenlosen DC Motoren

- Das maxon EC Motor Programm
- Aufbau und Funktionsprinzip
- Elektronische Kommutierungssystem
- Vergleich mit DC-Motoren mit Bürsten



Diese Präsentation zeigt Aufbau und Funktionsweise der bürstenlosen maxon EC-Motoren. EC-Motoren werden auch bürstenlose DC-Motoren (BLDC) genannt.

In einem ersten Teil zeigen wir die Varianten im Aufbau von bürstenlosen maxon Motoren. Der zweite Teil behandelt einige Gemeinsamkeiten: Das Funktionsprinzip, das auf der Wechselwirkung der Magnetfelder von Permanentmagnet und Wicklung beruht. Weitere Themen sind die Beschaltung von dreiphasigen Motoren und die Eisenverluste.

Im dritten Teil betrachten wir die elektronischen Kommutierungssysteme genauer, d.h. wie schaltet die Elektronik den Strom auf die drei Phasen.

Zum Schluss vergleichen wir die bürstenlosen Motorkonstruktionen mit dem maxon DC motor mit mechanischer Kommutierung.

maxon EC Motor

Was Sie lernen...

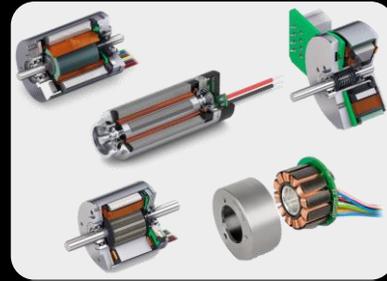
- Wo liegen die Hauptvorteile der EC-Motoren?
- Wie unterscheiden sich die verschiedenen EC-Motorenfamilien?
- Wie funktioniert die elektronische Kommutierung?
- Wie interpretiert man die Betriebsbereichsdiagramme und Motorverhalten?



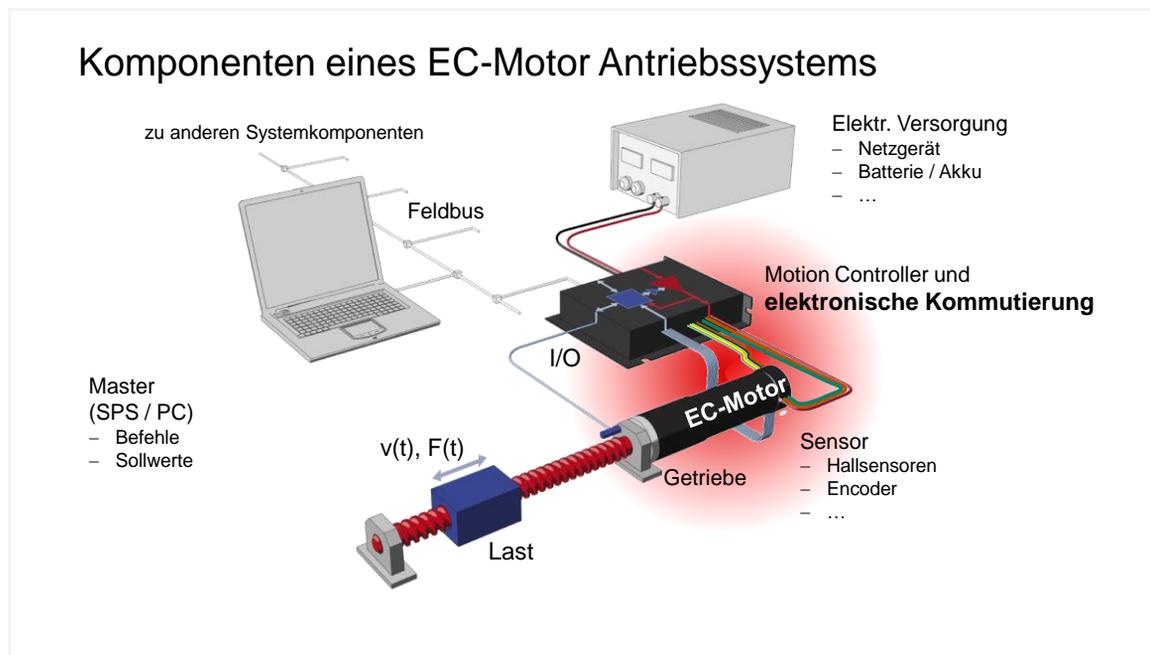
Aus dieser Präsentation können Sie unter anderem das Folgende mitnehmen.
Was sind die Vorteile von bürstenlosen DC Motoren verglichen mit bürstenbehafteten DC Motoren?
Bürstenlose Motoren kommen in verschiedenen Bauformen, jede mit speziellen Charakteristika.
Bürstenlose Motoren können auf verschiedene Arten betrieben werden, d.h. mit unterschiedlichen Kommutierungssystemen.
Wie sind die Betriebsbereiche zu interpretieren und wie verhält sich der EC Motor.

maxon EC motor Programm

- maxon EC motor Familien
 - Geschichtliches
- Aufbau und Eigenschaften
 - Motors mit eisenloser Wicklung:
ECX SPEED, EC-max, EC 4-pole
 - Motoren mit genuteter Wicklung:
ECX TORQUE, EC-I, EC flat, EC frameless



Der erste Abschnitt gibt einen Überblick über das maxon EC motor Programm. Er zeigt die verschiedenen Bauformen und ihre Eigenschaften.



Betrachten wir zuerst ein EC-Antriebssystem in der Übersicht.

Die drei Phasen des EC-Motors können nicht direkt an eine Gleichspannung angeschlossen werden. Die Spannung muss an den Anschlüssen reihum geschaltet werden. Dies erledigt die elektronische Kommutierung, welche in den meisten Fällen integraler Bestandteil der Endstufe des Reglers ist. Der Regler ist oft nicht nur für die Kommutierung zuständig sondern regelt gleichzeitig Position oder Drehzahl.

Für die korrekte Bestromung der Phasen benötigt die Elektronik Informationen über die Position des Rotors. Diese Information wird meist von Hall-Sensoren geliefert. Für eine höherwertige Kommutierung und präzise Motorregelung, z.B. bei niedrigen Drehzahlen, kann auch ein Encoder als Drehgeber nötig sein.

Ein EC-Motor dreht nicht von alleine: Nur zusammen mit einer elektronischen Kommutierung entsteht ein vollwertiger Antrieb.

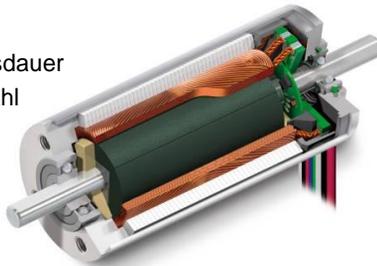
Bürstenloser DC-Motor

– Hauptvorteile:

- höhere Lebensdauer
- höhere Drehzahl

– Namen:

- EC-Motor
- BLDC-Motor



– Motorverhalten wie DC-Motor

- Aufbau ähnlich einem Synchronmotor (3-phasige Statorwicklung, rotierender Magnet)
- Bestromung der 3 Phasen abhängig von Rotorposition

Gemeinsamkeiten

3-phasige Wicklung im Stator
(3 Wicklungsanschlüsse)

rotierender Permanentmagnet
aus NdFeB

vorgespannte Kugellager

elektronische Kommutierung

maxon EC-Motoren sind bürstenlose DC-Motoren. EC steht für elektronische Kommutierung, was diese Motoren von DC-Motoren mit mechanischer Kommutierung oder Bürsten unterscheidet. Die Hauptvorteile eines bürstenlosen Aufbaus sind die höhere Lebensdauer und die höheren Drehzahlen. Sie sind nicht durch das mechanische Kommutierungssystem begrenzt.

Die Wicklung eines EC-Motors wird analog zum DC-Motor mit Bürsten angesteuert - die elektronische Kommutierung imitiert das Bürstensystem. Deshalb erhält man auch dasselbe Drehzahl-Drehmoment-Verhalten wie beim DC-Motor. Insbesondere resultiert ein grosses Anlaufmoment und eine hohe Dynamik.

(Die Anordnung von Rotor und Stator in bürstenlosen DC-Motoren erinnert stark an Synchron- oder Schrittmotoren. Allerdings gibt es einen bedeutenden Unterschied: Die Ansteuerung der 3 Phasen geschieht beim EC-Motor nach der Rotorposition (also von innen) und wird nicht von aussen eingepreßt.)

maxon EC-Motoren gibt es mit unterschiedlichem Aufbau. Alle diese Konstruktionen weisen aber auch Gemeinsamkeiten auf.

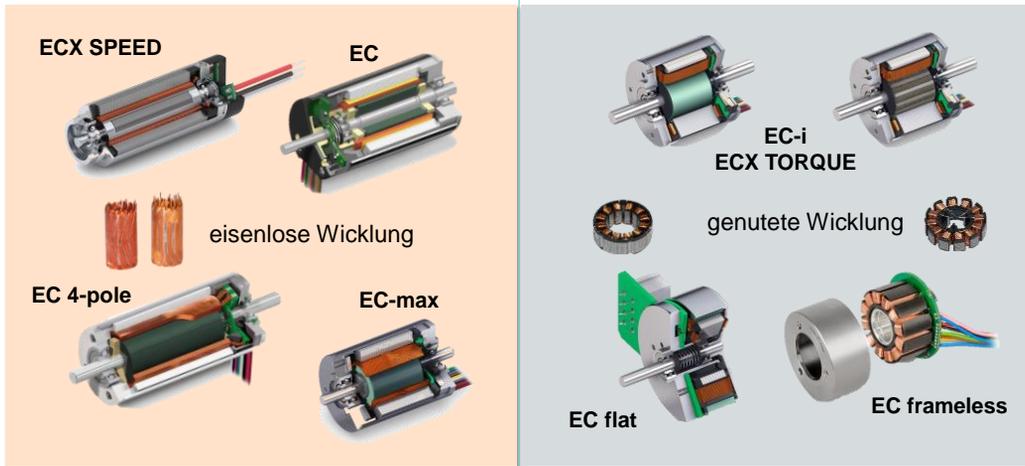
Die Wicklung hat 3 Phasen. Die Wicklung muss im Stator angeordnet sein, da kein Bürstensystem existiert, das den Strom auf eine rotierende Wicklung übertragen könnte. (Und die Motorzuleitungen sollen sich ja nicht mit 10'000 rpm aufwickeln!)

Als Konsequenz muss der Permanentmagnet drehen. Das Magnetmaterial ist üblicherweise aus NdFeB um eine hohe Leistungsdichte zu erreichen.

Bürstenlose Motoren von maxon sind mit vorgespannten Kugellagern ausgerüstet um eine hohe Lebensdauer zu erreichen.

Und natürlich benötigen alle EC-Motoren eine elektronische Kommutierung.

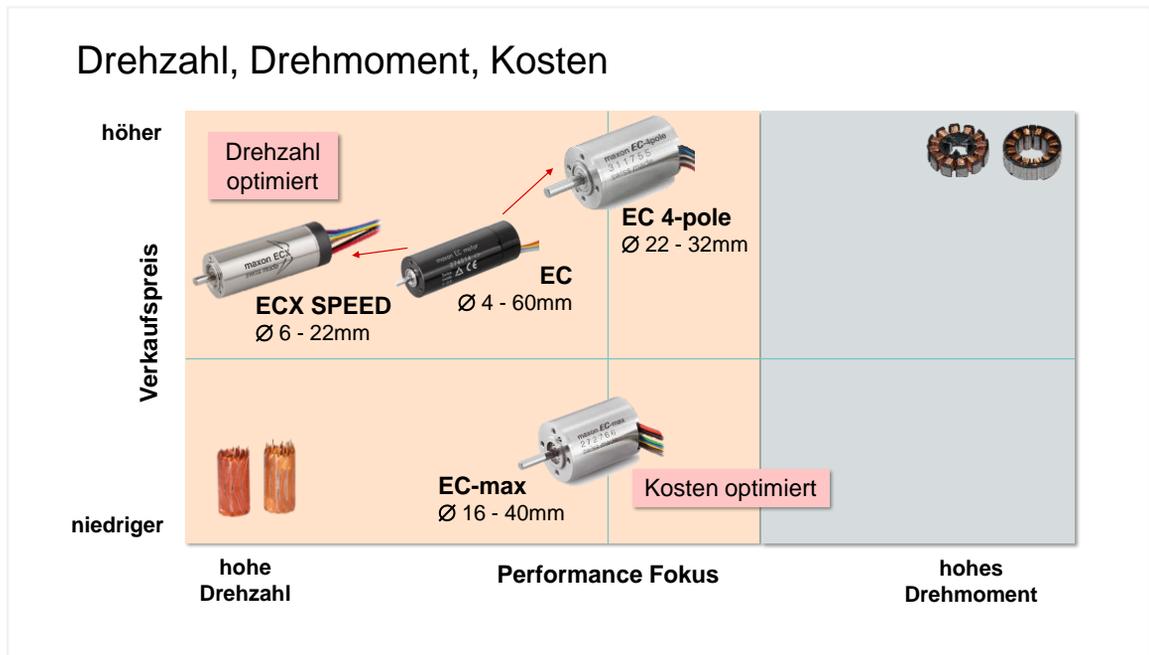
maxon EC motor Familien



Die verschiedenen maxon EC motor Designs basieren auf zwei Hauptprinzipien

Die nutenlosen Konstruktionen basieren auf der rhombischen maxon Wicklung und ergeben lange zylindrische Motoren mit 1 oder 2 magnetischen Polpaaren. Sie sind für schnell drehende Motoren geeignet, allerdings bei moderatem Drehmoment. Die eisenlose Wicklung erzeugt kein Rastmoment und ist damit vibrationsarm.

Die Konstruktionen mit Wicklungen mit genutetem Eisenkern weisen typisch mehrere Magnetpole auf, was eine höheres Drehmoment ergibt. Allerdings ist die Drehzahl beschränkt aufgrund der höheren Magnetisierungsfrequenzen und den daraus resultierenden Verlusten. Die Wechselwirkung der Permanentmagneten mit dem Eisenkern ist für das Rastmoment verantwortlich.



Je nach den Design-Zielen zeigen die verschiedenen EC Motorprogramme spezielle Eigenschaften.

maxon EC motor mit eisenloser Wicklung:

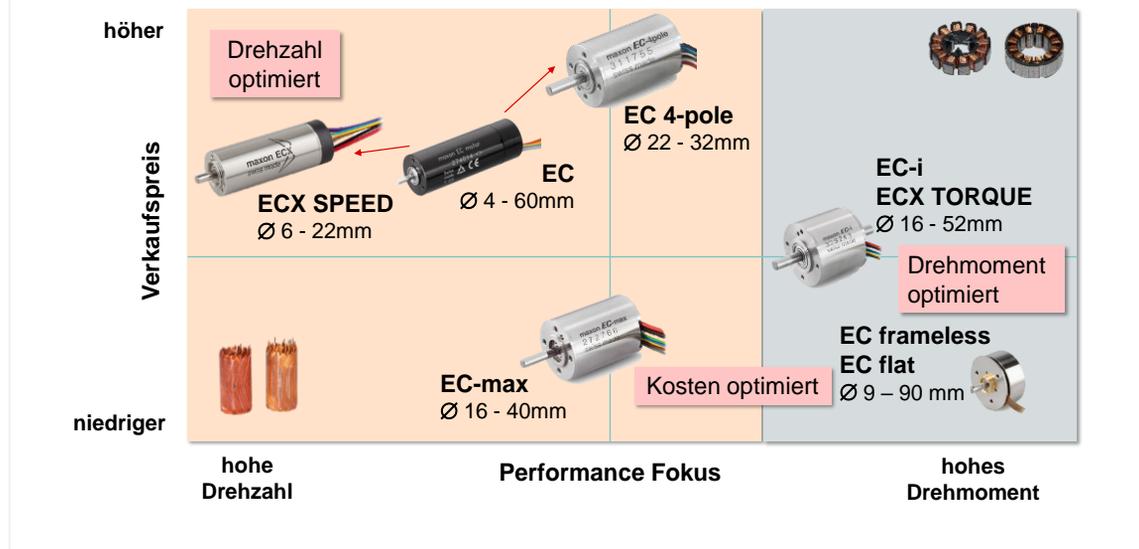
maxon EC motor: Diese Motoren der ersten Generation haben einen Permanentmagneten mit 1 Polpaar. Die Drehzahl ist mit einigen 10'000 UpM relative hoch. Die Motoren werden nun aber abgelöst durch....

maxon ECX SPEED Motoren sind speziell für Anwendungen mit hoher Drehzahl konzipiert. Der Aufbau mit 1 Polpaar ist an das ursprüngliche Design des maxon EC motor angelehnt. Der grosse Vorteil aus kommerzieller Sicht ist das "Configure to Order"-Konzept: die mechanischen und elektrischen Schnittstellen als auch die möglichen Kombinationen mit Getrieben und Encoder können online konfiguriert werden, was kürzeste Lieferzeiten ermöglicht.

maxon EC-max: Das "max" bedeutet maximales Verhältnis von Performance zu Preis. Dieser Motor ist nicht auf höchste Leistung optimiert – weder höchste Drehzahlen noch höchste Momente – sondern auf niedrige Kosten. Zur Kombination mit Keramik-Getrieben ist dieser zuverlässige Motor besonders geeignet.

maxon EC-4pole: Die Philosophie dieses Motors mit 2 magnetischen Polpaaren ist es, die höchstmögliche Leistung zu erzeugen. Neben dem 4-poligen Rotor wird dies durch eine spezielle Wicklungsverschaltung und hochwertige Magnete erreicht.

Drehzahl, Drehmoment, Kosten (Fortsetzung)



fortgesetzt

maxon EC motors mit genuteter Wicklung:

Der EC-i (ECX TORQUE) mit aussen liegender Wicklung und Multipol-Magnet im Zentrum erzeugt ein hohes Drehmoment bei kleinem Massenträgheitsmoment. Dies ergibt einen sehr dynamischen Motor mit hohem Beschleunigungsvermögen. Es sind verschiedene Versionen erhältlich : Standard, High Torque, Sterilisierbar.

Der externe Rotor der EC-flat erzeugt die Kraft im grossen Abstand von der Drehachse. Dies resultiert in einem hohen Drehmoment. Allerdings ist die Massenträgheit aufgrund des grossen Rotordurchmessers ebenfalls hoch, mit entsprechend beschränkter Dynamik. Die flache Bauform kann in Anwendungen mit beschränktem Bauraum von Vorteil sein.

Flachmotoren sind kostengünstig.

Die Idee der frameless EC motors ist, sie in die Anwendung zu integrieren. Sie bestehen aus getrenntem Stator und Rotor ohne Lagerung. Die frameless Motoren basieren auf den EC flat oder EC-i und erzeugen ein relative hohes Drehmoment.

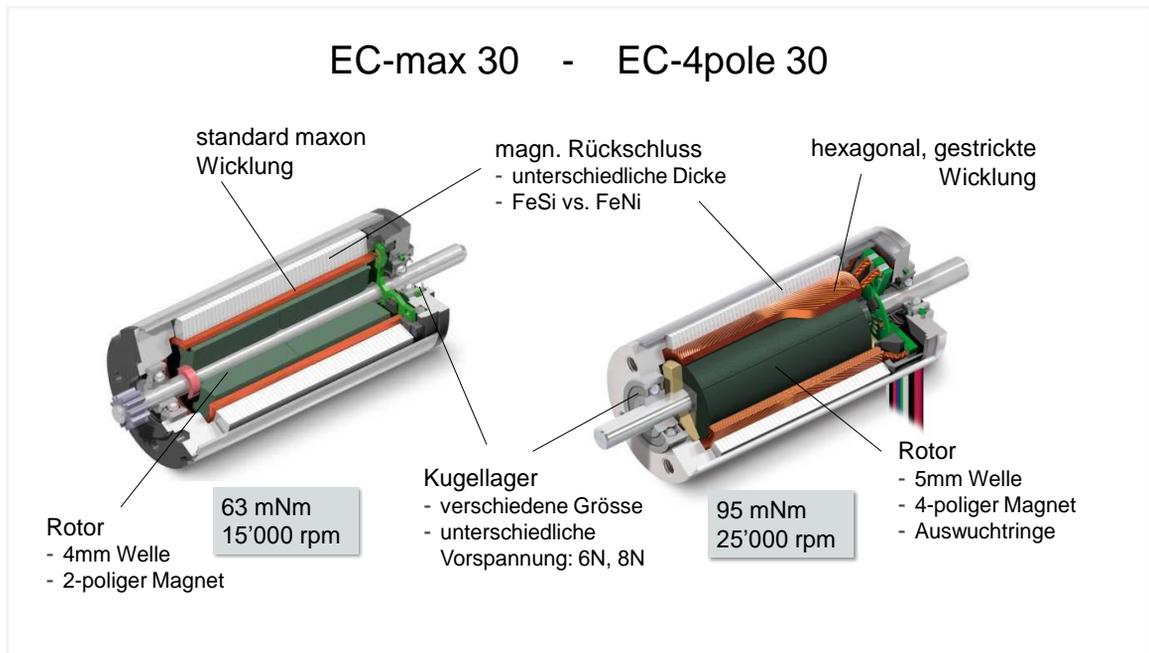
Eisenloser maxon ECX motor (ECX SPEED)



Beim maxon EC SPEED motor unterscheiden wir die folgenden Hauptbestandteile:
Den Rotor mit der Welle im Zentrum und dem darauf montierten Permanentmagneten. Der Rotor ist dynamisch ausgewuchtet, was die Vibrationen und Geräusche reduziert und die Lebensdauer der Lager verlängert, vor allem bei den hohen Drehzahlen, die mit bürstenlosen Motoren erreicht werden können.

Den Stator mit dem Gehäuse und dem magnetischen Rückschluss. Der Rückschluss besteht aus einem laminierten Eisenpaket, um die Eisenverluste zu verkleinern, die aufgrund des rotierenden Permanentmagneten auftreten. Innen am Rückschluss ist die maxon Wicklung angebracht; die drei Phasen sind über die Printplatte mit den elektrischen Anschlüssen verbunden.

Die Positionsrückmeldung des Rotors wird meist über ein System aus drei Hallsensoren, die auf der Printplatte angebracht sind, erreicht. Die Hallsensoren tasten das Magnetfeld des Steuermagneten auf der Welle ab. In einigen Fällen wird aber auch das Feld des Hauptmagneten direkt detektiert. Die Hallsensoren benötigen 5 weitere elektrische Anschlüsse, 2 für die Spannungsversorgung und 3 für die Hall-Sensor-Signale. Die Kugellager sind vorgespannt.



Wo liegen die Unterschiede zwischen einem auf Kosten optimierten EC-max und einem auf höchste Leistung getrimmten EC-4pole Motor?

Die hohe Leistungsdichte des EC-4pole wird erreicht durch ...

4-poliger Permanentmagnet, d.h. 2 statt 1 Polpaar. Dies ergibt einen höheren totalen magnetischen Fluss im Luftspalt. Der Rotor ist aber aufwändiger zusammen zu bauen; es müssen 4 magnetisierte Segmente auf die Welle montiert werden.

einen hochwertigen Rückschluss aus Eisen-Nickel-Blechen, damit die Wirbelstromverluste klein bleiben. Die Magnetisierungsfrequenz im Rückschluss ist doppelt so hoch wie beim Motor mit 1 Polpaar. Die maximale Flussdichte ist kleiner, es kann ein dünnerer Rückschluss verwendet werden. Somit bleibt mehr Platz für die Wicklung und der Rotordurchmesser kann grösser gewählt werden, was das erzeugte Drehmoment erhöht.

eine hexagonale, gestrickte maxon Wicklung, die ein höheres Drehmoment erzeugt, weiter gesteigert durch eine ausgeklügelte Verschaltung der Wicklungssegmente.

Die hohe Leistung verlangt nach einer dickeren Welle und grösseren Kugellagern.

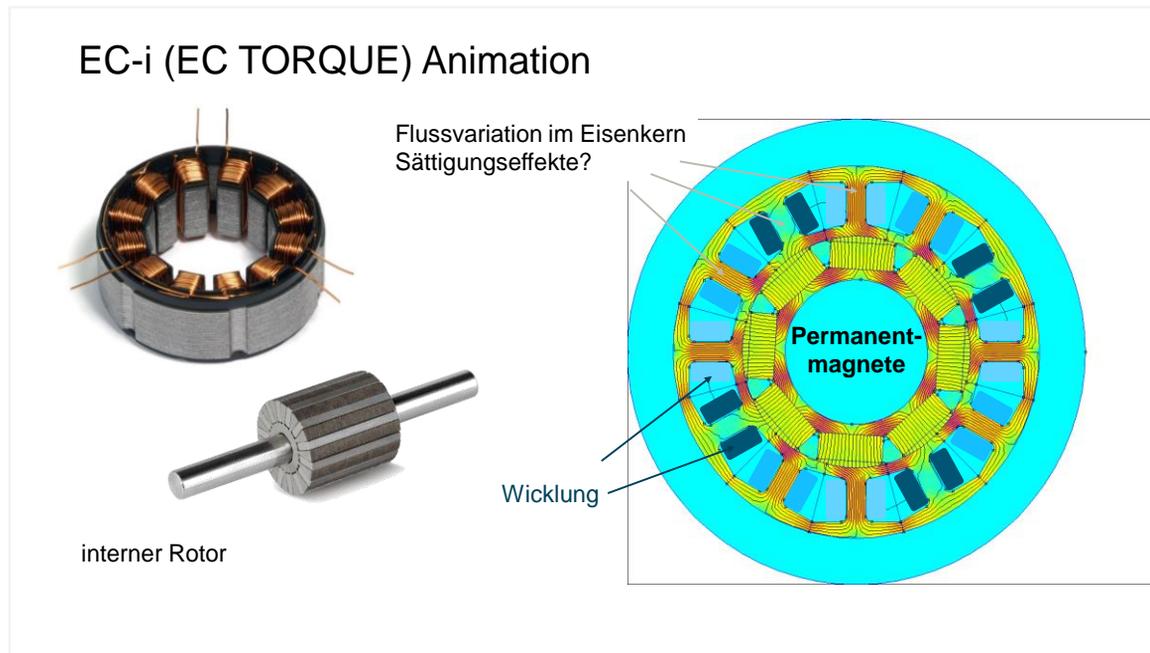
Die Kostenreduktion beim EC-max 30 wird erreicht durch ...

einen einfacher konstruierten Rotor ohne Auswuchtringe. Sehr hohe Drehzahlen sind deshalb nicht möglich.

eine standard maxon statt einer gestrickten Wicklung. Das verkleinert die Leistung.

Hallsensoren, die direkt den Leistungsmagneten abtasten, d.h. ohne extra Steuermagnet.

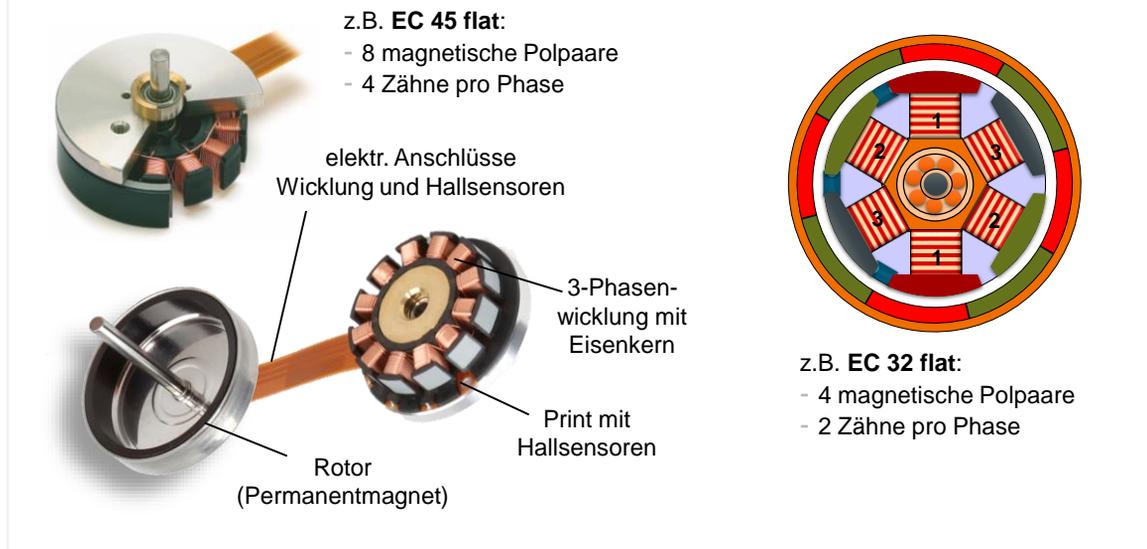
Das Weglassen von Steuermagnet und Auswuchtringen ermöglicht eine grössere magnetisch aktive Länge. Obwohl dieser Motor nicht auf Leistung optimiert ist, erzeugt er erstaunlich viel Drehmoment.



EC-i und ECX TORQUE Motoren sind maxon EC Motorprogramme mit genuteter Wicklung. Wie bei den eisenlosen Versionen ist der Permanentmagnet im zentralen Rotor, während die Wicklung aussen liegt und einen Eisenkern enthält. Der mehrpolige Aufbau ergibt ein höheres Drehmoment verglichen mit den eisenlosen EC-Motoren. In Kombination mit der kleinen Massenträgheit resultiert eine kleine mechanische Zeitkonstante, d.h. ein sehr dynamischer Motor.

Die Nachteile des genuteten Aufbaus sind höhere Eisenverluste und damit stärkere Erwärmung. niedrigere Grenzdrehzahl aufgrund der höheren Kommutationsfrequenz und den wachsenden Eisenverlusten. Sättigungseffekte im Eisenkern und damit Abweichung vom einfachen linearen Motorverhalten sowie ein niedrigeres maximales Drehmoment. Rastmoment wegen der magnetischen Wechselwirkung zwischen Eisenzähnen und Permanentmagnet.

EC flat: Viel Drehmoment zu günstigem Preis

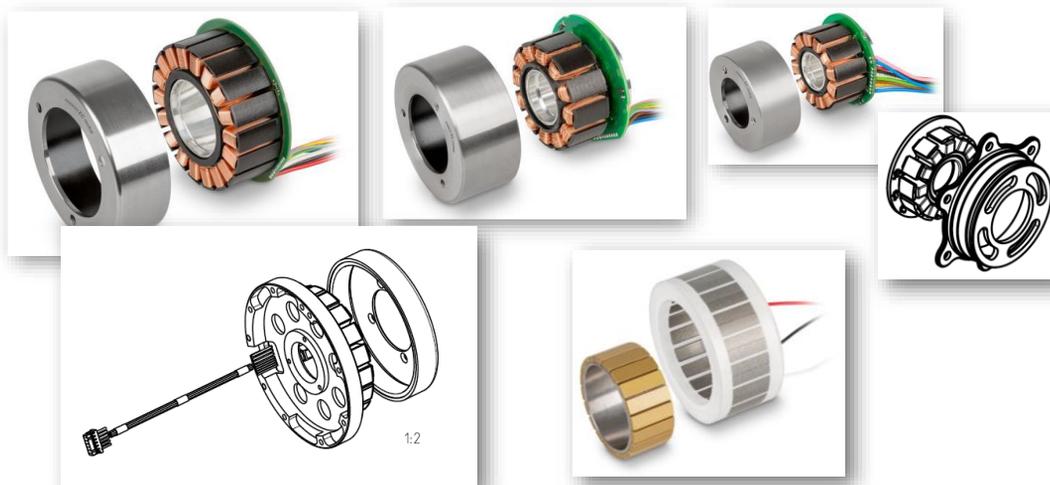


Die Philosophie der Flachmotoren: Eine flache Bauform zu attraktivem Preis. Der aussen liegende Rotor erzeugt ein hohes Drehmoment. Allerdings ergibt sich aufgrund des mehrpoligen Magneten eine hohe Kommutierungsfrequenz und deshalb ein begrenzter Drehzahlbereich.

Diese Folie zeigt links einen Blick in einen EC 45 Flachmotor

Rechts ein schematischer Querschnitt durch einen EC 32 Flachmotor. Wir erkennen den externen Rotorring mit 8 Magnetpolen (4 Polpaare in grün und rot). Jede Wicklungsphase enthält zwei gegenüberliegende Statorzähne. Die Hallsensoren (dunkel- und Hellblau) liegen zwischen den Statorzähnen und detektieren direkt die Pole des Magnetrings.

EC flat frameless



Im Moment (2019) bietet maxon frameless Motoren in drei Durchmessern an (obere Reihe), welche auf den grösseren Flachmotoren basieren

45 mm (3 verschiedene Längen)

60 mm

90 mm (2 verschiedene Längen)

Weitere Versionen mit innenliegendem Rotor sind in Vorbereitung.

Bei den frameless Motoren geht es darum, Platz zu sparen, indem der Motor mechanisch in die Anwendung integriert wird. Man denke an Robotergelenke, Pumpmechanismen, Ventile oder Räder. Die Motoren werden als separate Statoren und Rotoren ohne Lagerbaugruppe geliefert. Das grosse Loch im Zentrum kann dazu dienen, grosse Kugellager aufzunehmen, Kabel und Vakuumschläuche durchzuführen oder spezielle Wellenmaterialien zu montieren.

Frameless Motoren werden meist als Direktantriebe eingesetzt und benötigen deshalb viel Drehmoment. Flache und mehrpolige Konstruktionen sind am besten geeignet. Der hohe Integrationsgrad verlangt oft nach speziellen Flanschkonstruktionen, wie aus den Bildern der unteren Reihe ersichtlich ist.

maxon EC motor Programmübersicht

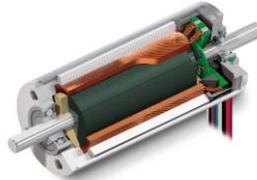
– ECX SPEED

- für hohe Drehzahlen
- lang, kleiner Durchmesser



– EC-4pole

- höheres Drehmoment
- mittlere Drehzahl



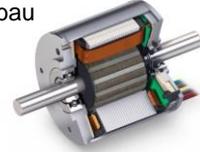
– EC-max

- günstiger Preis, begrenzte Drehzahlen und Drehmomente
- perfekt in Kombination mit Keramik-Getriebeversion



– EC-i, ECX TORQUE

- hohes Drehmoment, hohe Dynamik
- mehrpoliger Aufbau
- Rastmoment
- mittlere Länge



– EC flat

- hohes Drehmoment, niedrige Dynamik
- mehrpoliger «offener» Aufbau
- kostengünstig
- kurze Länge

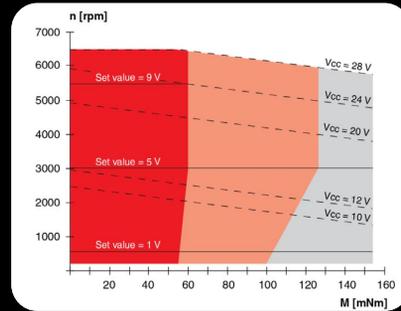


– EC frameless

Und hier als Zusammenfassung die Charakteristika der maxon EC motor Familien im Überblick.

EC Motordaten

- Eisenverluste
- Betriebsbereiche
- Motor und Elektronik
- Sättigungseffekte



Dieser zweite Abschnitt beleuchtet zwei Besonderheiten der bürstenlosen Motoren und ihre Auswirkungen auf die Motordaten.

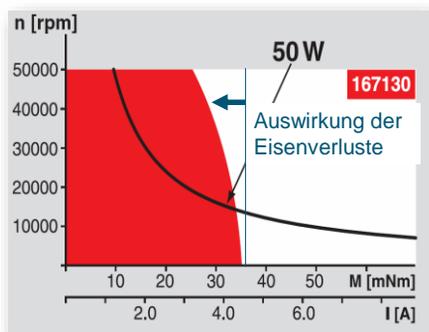
The first are iron losses, that occur in most motor types. These are power losses in the iron parts that guide the magnetic flux, namely the magnetic return path and the iron core of slotted windings. Iron losses provide an additional heating of the motor.

The second effect is also related to the iron. It's the saturation in the iron core of the windings.

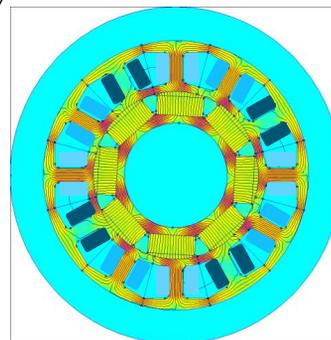
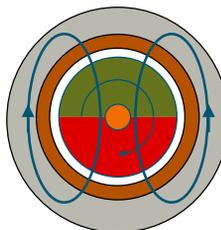
Eisenverluste

Wechselnde Magnetisierung

- Hystereseverluste
- induzierte Wirbelströme



Effekt: Zusätzliche Erwärmung bei hohen Drehzahlen
(weniger Strom zur Drehmomenterzeugung zulässig)



Eisenverluste werden durch zwei Mechanismen verursacht, die beide darauf beruhen, dass der magnetische Fluss im Eisen seine Richtung oder seine Intensität ändert.

Hystereseverluste sind darauf zurückzuführen, dass für ein Durchlaufen der Magnetisierungskurve (Hysterese) des Materials Energie aufgewendet werden muss.

Hystereseverluste können minimiert werden, indem man geeignete Materialien mit einer engen Hysterese wählt und indem man die Flussdichte niedrig hält (z.B. durch die Wahl einer grossen Materialdicke).

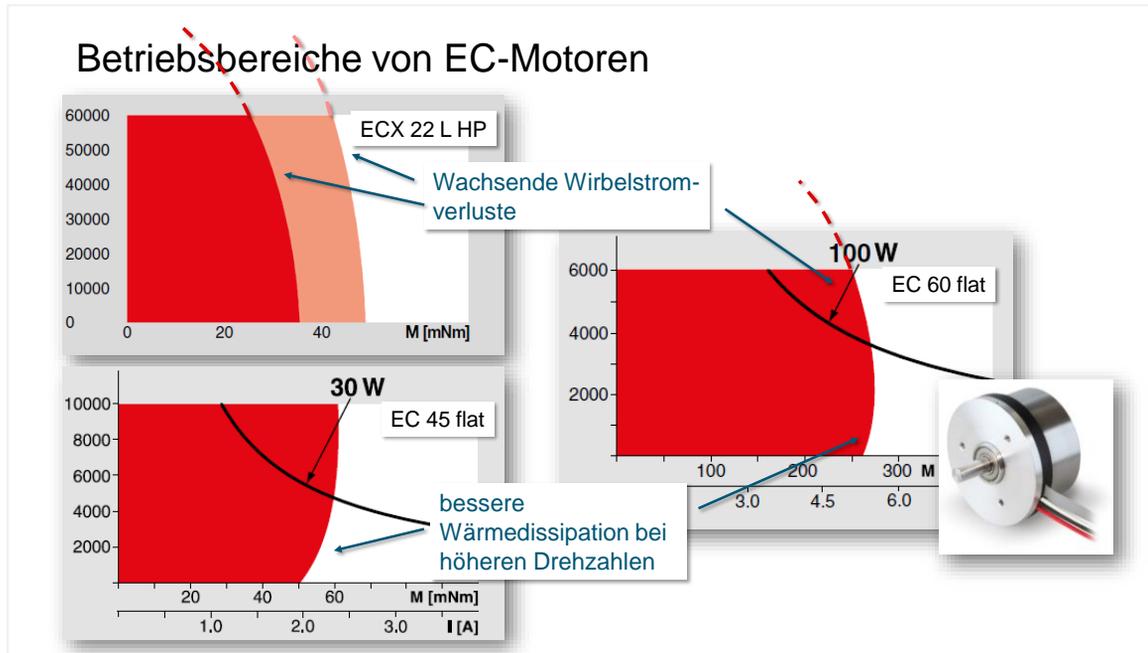
Ein sich zeitlich ändernder magnetischer Fluss induziert im Eisen elektrische Spannungen, die Wirbelströme verursachen. Dadurch erwärmt sich das Eisen. Wirbelströme können durch eine laminierte Ausführung mit dünnen, elektrisch voneinander isolierten Eisenblechen verkleinert werden.

Eisenverluste und Drehzahl

Hystereseverluste wachsen proportional mit der Drehzahl. Jedes Durchlaufen der Hystereseschleife verbraucht eine bestimmte Menge Energie: Je höher die Drehzahl, umso grösser die Anzahl Ummagnetisierungen pro Zeiteinheit, und umso grösser die Verlustleistung. Hystereseverluste kann man deshalb wie ein zusätzliches konstantes Reibmoment betrachten.

Wirbelstromverluste wachsen mit dem Quadrat der Drehzahl. Dies kann man aus einem einfachen Argument verstehen: Je höher die Drehzahl, desto höher die induzierte Spannung und umso grösser die Wirbelströme. Die Stromverluste gehen aber mit dem Quadrat des Stroms, und somit mit dem Quadrat der Drehzahl. Wirbelstromverluste können wie eine drehzahlabhängige zusätzliche Reibung behandelt werden.

Wenn die Drehzahl genügend hoch ist, dominieren die Wirbelstromverluste.



Diese zusätzliche Erwärmung kommt auch im Betriebsbereichsdiagramm zum Ausdruck. Bei hohen Drehzahlen bewegt sich die Grenze des Dauerbetriebsbereichs nach niedrigeren Drehmomenten. Die zusätzliche Erwärmung durch die Wirbelströme lässt weniger Strom in der Wicklung zu, und damit weniger Drehmoment.

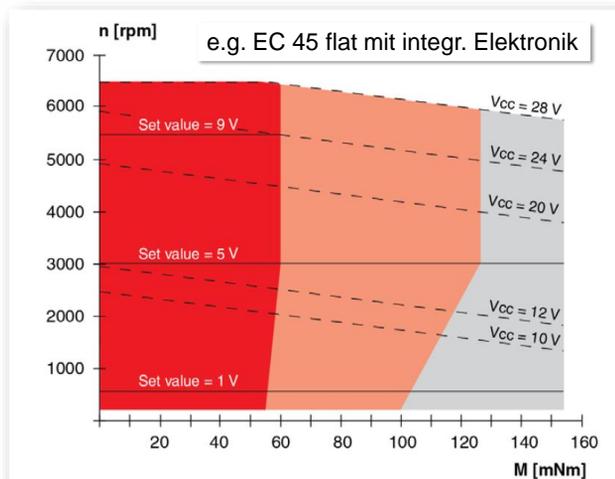
Bei den meisten EC-Motoren ist deshalb die Grenze des Dauerbetriebsbereichs gekrümmt. Extrapolierte man diesen Effekt gegen höhere Drehzahlen, würde sich der Motor rein aufgrund der Drehzahl überhitzen, ohne ein nennenswertes Drehmoment abzuliefern.

Bei einigen Flachmotoren verhält sich die Grenze des Dauerbetriebsbereichs gerade umgekehrt. Bei höheren Drehzahlen ist mehr Strom zulässig, welcher mehr Drehmoment erzeugt. Der Grund liegt in der offenen Bauweise des Motors, wo mit zunehmender Drehzahl der Luftstrom durch den Motor zunimmt und damit die Wärmedissipation erhöht.

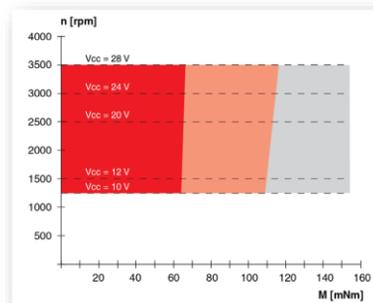
Ein schönes Beispiel, dass diese beiden konkurrierenden Effekte zeigt ist das Betriebsbereichsdiagramm des EC 60 Flachmotors. Nähert man sich den niedrigen Drehzahlen, ist die Wärmedissipation kleiner, weniger Erwärmung ist zulässig, d.h. weniger Strom und deshalb weniger Drehmoment.

Bei höheren Drehzahlen werden die Wirbelstromverluste aber dominant und der maximal zulässige Strom wird kleiner und damit das maximal zulässige Drehmoment.

Motor und Elektronik: Betriebsbereich



- begrenzte Versorgungsspannung
→ begrenzter Drehzahlbereich
- begrenzter Strom der Elektronik
→ begrenzter Drehmomentbereich



Wie schon erwähnt, brauchen EC-Motoren Elektronik zum Betrieb und sollten deshalb immer zusammen mit der Steuerung betrachtet werden.

Diese Folie zeigt als ein Beispiel einen EC flat 45 mit integrierter Elektronik. Die folgenden Bemerkungen gelten aber für alle Steuerungen, ob integriert oder extern. (Und übrigens für alle Motoren in Kombination mit Motioncontrollern)

Elektronik hat eine begrenzte Versorgungsspannung.

Entsprechend ist die maximale Drehzahl durch die maximale Spannung gegeben, welche die Steuerung an den Motor anlegen kann. Im Diagramm oben ist dies durch die gestrichelten Drehzahl-Drehmoment-Linien für verschiedene Versorgungsspannungen dargestellt. Bei gegebener Spannung ist nur die Fläche unterhalb dieser Linien erreichbar. Elektronik hat Stromgrenzen.

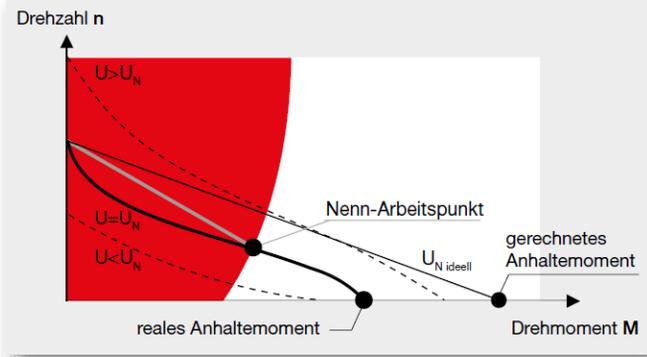
Begrenzter Strom resultiert in begrenztem Drehmoment. Oft sind die Angaben zu Anhaltmoment und Anlaufstrom nur Rechenwerte und können praktisch nicht erreicht werden, da das Netzgerät soviel Strom gar nicht liefern kann oder der Regler diesen Strom gar nicht zulässt.

Daneben kann aber auch die Funktionalität bei einfacheren Reglern eingeschränkt sein, wie limitierte Sollwertbereiche oder Betrieb nur in einer Drehrichtung.

EC Motordaten bei genuteter Wicklung

- Motordaten gelten für
 - Blockkommutierung
 - unendlich leistungsfähiger Endstufe (Strom und Spannung nicht begrenzt)
 - ohne Sättigungseffekte im Eisenpaket

Motorverhalten von Motoren mit genuteter Wicklung (mit Eisenkern)



maxon gibt die Daten der EC-Motoren für Blockkommutierung an unter der Annahme eines unendlich leistungsstarken Verstärkers ohne Strombegrenzung. Dies ist meist nicht der Fall. Zusätzlich werden Sättigungseffekte im Eisenkern nicht berücksichtigt (Stand 2018).

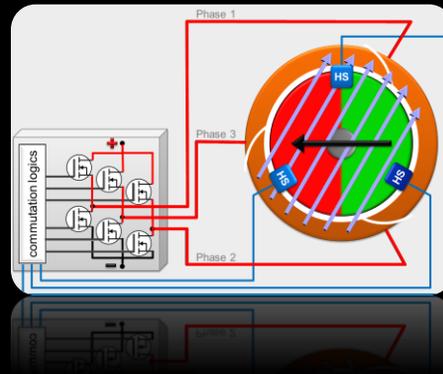
Das einfache und im Wesentlichen lineare Motorverhalten eisenloser Motoren gilt nicht mehr bei genuteter Wicklung und insbesondere bei mehrpoligem Aufbau. Zwei Effekte treten auf:

Als erstes steigt die Kommutierungsfrequenz bei hohen Drehzahlen aufgrund der vielen Magnetpole stark an. Entsprechend hat der Strom Schwierigkeiten sich in den kurzen Kommutierungsintervallen voll auszubilden, zusätzlich erschwert durch die hohe Induktivität der Wicklung mit Eisenkern. Der Strom wird in die Endstufe zurückgetrieben. Der Motor wird bei höheren Drehzahlen schwächer, wie man anhand der steileren Kennlinien ersehen kann (gestrichelte Linien im Diagramm). Die lineare Kennlinie (schwarze gerade Linie), die als Grundlage zur Darstellung der Motordaten im maxon Katalog dient, ist nicht mehr realistisch. Im Dauerbetriebsbereich kann eine lineare Interpolation zwischen Leerlauf- und Nennarbeitspunkt eine mögliche gute Näherung an das reale Motorverhalten sein (graue Linie im Diagramm).

Zum zweiten sättigt der magnetische Fluss im Eisenkern bei höheren Strömen: Das erzeugte Drehmoment pro Strom (die Drehmomentkonstante) wird kleiner. Entsprechend kann das erreichbare Anhaltmoment beim angegebenen Anlaufstrom bedeutend kleiner sein als spezifiziert. Glücklicherweise tritt dieses Phänomen nicht sehr häufig auf, da meist bei grösseren Motoren, der Strom durch die Steuerung sowieso schon eingeschränkt ist.

Elektronische Kommutierung

- Wechselwirkung zwischen Rotor- und Stator-Feld
 - 1 Polpaar
 - mehrpolige Motoren
- Blockkommutierung
 - Sensorlose Blockkommutierung
- Feldorientierte Regelung
 - FOC: field oriented control
 - Sinuskommutierung



Dieser Teil der Präsentation behandelt die Wechselwirkung zwischen Rotor und Stator, was die Grundlage ist für das Verständnis der elektronischen Kommutierung.

Elektronische Kommutierungssysteme

Art der Kommutierung	Block 		Sinus Field oriented control 	
maxon Kontrollerfamilie				
Bestimmung der Rotolage	Sensorlos	Hallsensoren	Encoder + Hallsensoren	Sensorlos
	Blockförmige Phasenströme → Drehmomentrippel		Sinusförmige Phasenströme → Gleichlauf	
Anwendungen	Dauerbetrieb bei hohen Drehzahlen → Lüfter, Fräser, ...	Drehzahlregelung Positionsregelung	Drehzahlregelung Positionsregelung	Kundenspezifische sensorlose Drehzahlregelung ab Drehzahl Null. → grössere Verkaufsvolumen
Remarks	Aufstarten ähnlich einem Schrittmotor	maxon Standard-Kommutierung		

In diesem Teil der Präsentation stellen wir die vor.

Es gibt verschiedene Arten von elektronischer Kommutierung . maxon verwendet die drei folgenden:

Blockkommutierung mit oder ohne Hallsensoren

Sinuskommutierung mit Encoderfeedback.

Die HPSC (High performance sensorless control) ist eine extrem anwendungsspezifische Version einer sensorlosen Regelung mittels FOC. Sie sprengt den Rahmen dieser Präsentation und wird hier nicht weiter behandelt.

Wie man erkennt, sind die verschiedenen maxon Reglerfamilien für verschiedene Kommutierungsarten ausgelegt.

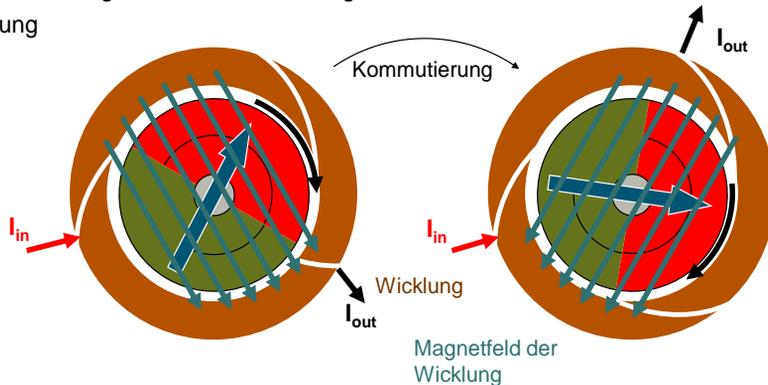
Allen Systemen gemeinsam ist, dass sie den Strom so anlegen, dass ein möglichst grosses Drehmoment entsteht. Wie wir gelernt haben wird dies durch die senkrechte Orientierung der Magnetfelder von Permanentmagnet und Wicklung erreicht. Wir haben auch gesehen, dass wir dazu die Orientierung des Permanentmagneten benötigen.

Wir beginnen mit der Blockkommutierung mit Hallsensoren. Das ist quasi die Standardkommutierung. Haben wir diese verstanden, können wir die anderen beiden Arten davon ableiten.

Wechselwirkung Rotor-Stator

– Stromverteilung in Phasen

- 3 Phasen: 6 mögliche Stromverteilungen
- 6 Orientierungen des Magnetfeldes der Wicklung, um 60° verdreht
- 60° Kommutierung



Wir beginnen mit der Wechselwirkung zwischen den Magnetfeldern von Rotor und Stator, d.h. es geht um das Funktionsprinzip zur Drehmomenterzeugung. Unsere Betrachtungsweise vereinfacht die tatsächlichen Verhältnisse etwas und wir tun dies am maxon EC-Motor mit einem Polpaar. Später sehen wir, was sich bei Motoren mit mehreren Polpaaren ändert.

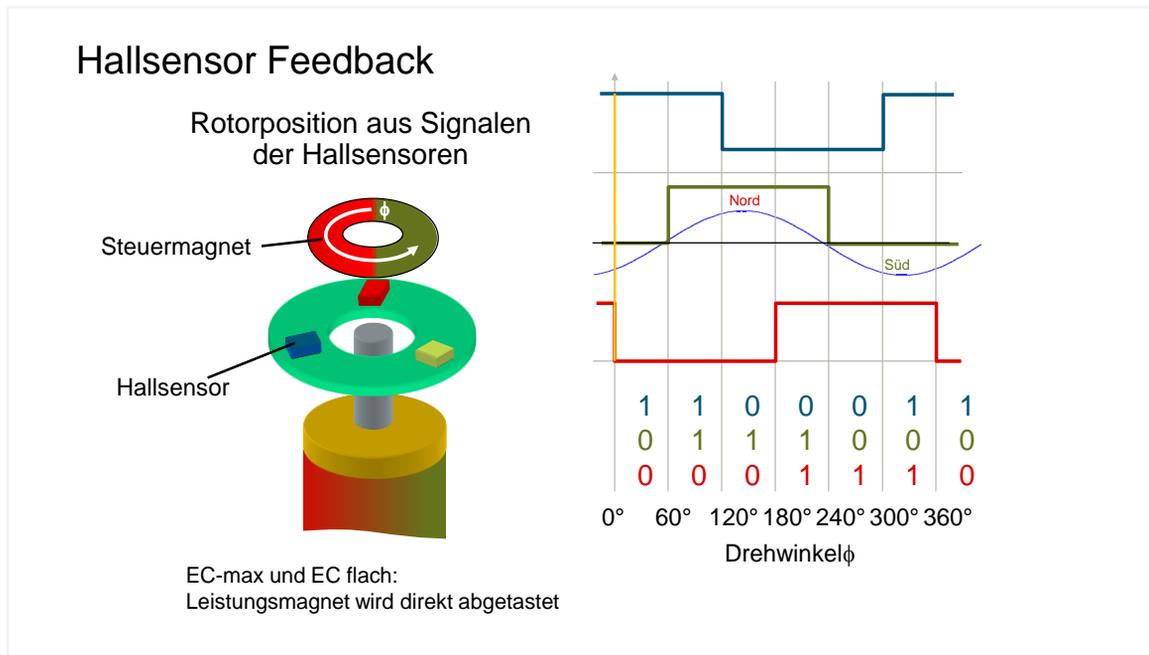
Zuerst erkennen wir, dass drei Phasen 6 verschiedene Möglichkeiten ergeben, wie der Strom durch den Motor fließen kann. (Wir treffen hier die Annahme, dass nur zwei der Phasen aufs Mal kontaktiert werden.)

Für eine bestimmte Stromverteilung erzeugt die Wicklung ein Magnetfeld, das diagonal durch den Motor gerichtet ist. Die 6 möglichen Stromflüsse ergeben 6 Richtungen des Magnetfeldes, die jeweils um 60° gedreht sind.

Bemerkungen zur Animation:

Der Permanentmagnet des Rotors versucht sich nach dem Feld der Wicklung auszurichten. Dies lassen wir aber nicht zu. Das Drehmoment hat ein Maximum, wenn die beiden Felder senkrecht aufeinander stehen. Wir schalten den Strom 30° vor und nach der senkrechten Position. Somit ist das erzeugte Drehmoment immer in der Nähe des Maximums. Der Winkel zwischen zwei aufeinander folgenden Schaltzuständen ist 60° .

Die grosse Frage ist: Wie wissen wir, wenn diese Kommutierungspunkte erreicht sind? Wir müssen die Winkelposition des Rotors kennen. Der übliche Weg führt über die Auswertung der Hallsensor-Signale.



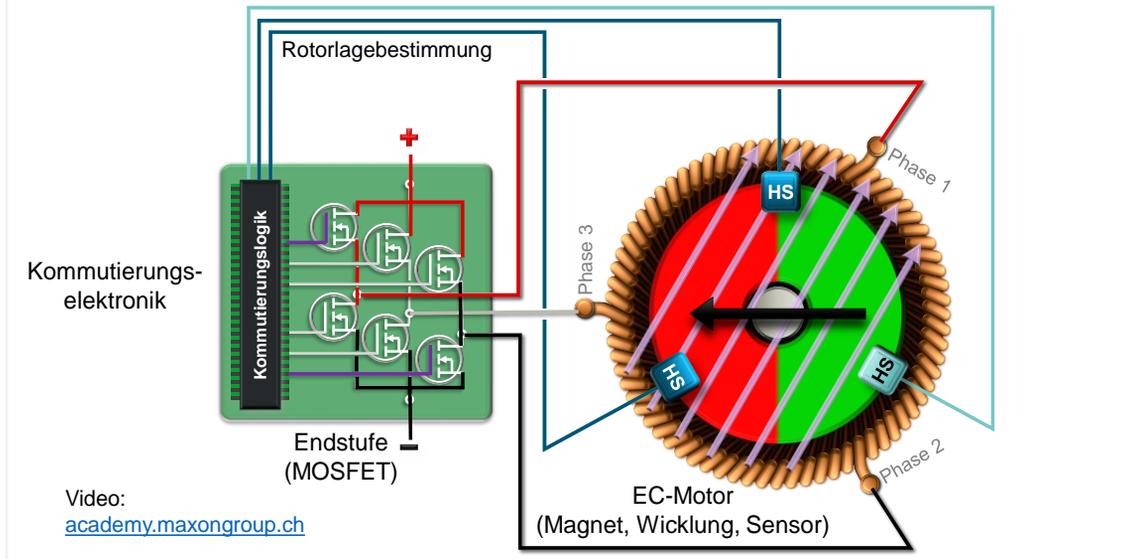
Wir betrachten die Signale der Hallsensoren am einfachsten Beispiel eines maxon EC motor mit 1 Polpaar.

Hinten im Motor sind drei Hallsensoren im Abstand von 120° auf einer Printplatte angeordnet. Die Hallsensoren tasten die Magnetpole des Steermagneten auf der Welle ab. Der Steermagnet hat dieselben beiden Magnetpole in der gleichen Orientierung wie der Leistungsmagnet. (Grundsätzlich könnten die Hallsensoren auch den Leistungsmagneten direkt abtasten, aber der Steermagnet hat zwei Vorteile: Die magnetischen Übergänge zwischen Nord- und Südpol sind schärfer. Und Winkelfehler sowie Winkeltoleranzen zwischen den Positionen von Hallsensoren und Wicklung können korrigiert werden.) Die digitalen Hallsensoren erzeugen eine hohe Spannung am Ausgang (5V) wenn ein Nordpol in der Nähe ist. Ein Südpol ergibt ein niedriges Signal (Gnd).

Die aktuelle Position des Steermagneten im Diagramm ergibt folgende Signale: Der blaue Hallsensor erkennt einen Nordpol. Entsprechend ist das Signal am Ausgang hoch und bleibt dies auch während der nächsten 180° . Der grüne Hallsensor sieht den Südpol. Der Ausgang ist auf niedrigem Pegel während der nächsten 60° . Dann kommt der Nordpol und das Signal wird auf den hohen Pegel schalten. Der rote Hallsensor hat gerade von hoch nach niedrig geschaltet, wo der Signalpegel während der nächsten halben Umdrehung bleiben wird.

Die Signalkombination der drei Hallsensoren ist spezifisch für jeweils 60° Rotorstellung. Sie ermöglicht es, die Stellung des Rotors auf 60° genau zu kennen. Dies entspricht genau den 6 Möglichkeiten, den Strom durch den Motor zu schicken. Die nächste Folie zeigt wie das gesamte System der Blockkommutierung funktioniert.

Blockkommütierung - Schritte



Rechts sieht man einen schematischen Querschnitt durch einen maxon EC motor mit 2-poligem Permanentmagnet in der Mitte, einer dreiphasigen Wicklung und drei Hallsensoren (HS), die um 120° versetzt angeordnet sind. Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass die Hallsensoren direkt den Leistungsmagnet abtasten.

Links ist die Endstufe der Kommutierungselektronik dargestellt. Sie wird mit einer Gleichspannung versorgt. Die Leistungsendstufe besteht aus 6 MOSFETs.. Drei davon werden benötigt, um die Motorphasen mit der positiven Spannung zu kontaktieren. Die unteren drei verbinden die Phasen mit der negativen Spannung (Masse). Die Kommutierungslogik evaluiert die Hallsensor-Signale und bestromt entsprechend die drei Motorphasen.

Bemerkungen zur Animation:

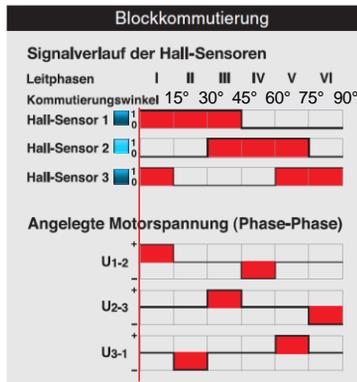
In dieser Startposition erzeugen die Hallsensoren das folgende Signal: HS1 hat eben auf den hohen Pegel geschaltet, HS2 ist auf niedrigem Pegel und HS3 auf hohem. Die Kommutierungs-logik weiss, dass für diese Signalkombination und Motorbetrieb im Uhrzeigersinn der Strom von Phase 1 nach Phase 2 fließen muss und schaltet die entsprechenden MOSFETs durch.

Die Wicklung erzeugt ein Magnetfeld, auf das sich der Rotor auszurichten versucht. Nach 60° beginnt HS3 den Südpol zu sehen. Sein Ausgang schaltet auf den niedrigen Pegel und die Kommutierungslogik schaltet den Strom von Phase 1 auf 3. Das Feld der Wicklung dreht um 60° und der Rotor dreht weiter.

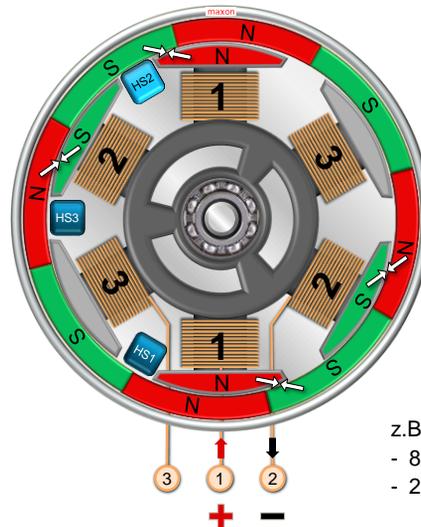
Wiederum nach 60° ändert das Muster der Hallsensoren, HS2 schaltet auf den hohen Pegel. Die Elektronik schaltet entsprechend den Strom, der nun von Phase 2 nach 3 fließt. Das Feld der Wicklung springt um weitere 60° und der Rotor dreht weiter.

Und so weiter Nach 6 Kommutierungsintervallen haben wir wieder die ursprüngliche Konfiguration erreicht und der Rotor hat eine Umdrehung absolviert.

Mehrpoliger EC-Motor: Kommutierungsschritte



Video:
academy.maxongroup.ch



z.B. EC 32 flach:
 - 8 Magnetpole
 - 2 Zähne pro Phase

Betrachten wir nun dieselbe Abfolge der Blockkommutierung für einen mehrpoligen Motor. Die magnetische Wechselwirkung wird vereinfacht als Anziehung und Abstossung von Magnetpolen dargestellt.

Wir nehmen als Beispiel den EC 32 flach. Dieser Motor hat 4 Polpaare im Rotor, die Wicklung hat 3 Phasen, jede mit 2 gegenüber liegenden Statorzähnen. Die Hallsensoren sind zwischen den Zähnen angeordnet. (Ein hoher Signalpegel wird durch ein helles Blau dargestellt.)

Links ist das Diagramm zur Blockkommutierung, wie es im maxon Katalog dargestellt ist. Die Winkelskala der Rotorposition ist auf das aktuelle Beispiel angepasst.

In dieser Startposition erzeugen die Hallsensoren das folgende Signal: HS1 hat eben auf den hohen Pegel geschaltet, HS2 ist auf niedrigem Pegel und HS3 auf hohem. Die Kommutierungslogik weiss, dass für diese Signalkombination und Motorbetrieb im Uhrzeigersinn der Strom von Phase 1 nach Phase 2 fließen muss und schaltet die entsprechenden MOSFETs durch. Die Statorzähne der Phase 1 werden zu Nordpolen, diejenigen der Phase 2 zu Südpolen und ziehen die ungleichnamigen Pole des permanentmagnetischen Rotors an (und stossen die gleichnamigen ab). Der Rotor beginnt sich zu drehen. Nach 15° beginnt HS3 den Südpol zu sehen, sein Ausgang schaltet auf den niedrigen Pegel und die Kommutierungslogik schaltet den Strom von Phase 1 auf 3. Die Südpole der Wicklung sind nun an Phase 3. Der Rotor dreht weiter. Nach 15° ändert das Muster der Hallsensoren, die Elektronik kommutiert den Strom, der Rotor dreht weiter, und so fort ...

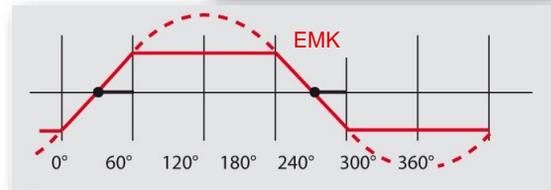
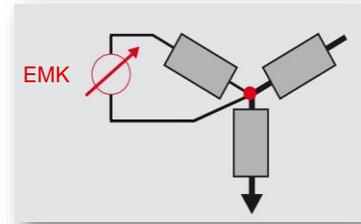
Nach 6 Kommutierungsintervallen haben wir wiederum die Anfangskonfiguration erreicht, aber diesmal hat der Rotor erst $6 \cdot 15^\circ = 90^\circ$ zurückgelegt. Beim mehrpoligen Motor entspricht der Kommutierungswinkel 60° geteilt durch die Anzahl Polpaare (P) des Rotors.

Sensorlose Blockkommutierung

- Rotorlageerkennung ohne (Hall-) Sensoren
- EMK messen
 - Sternpunkt
 - Nulldurchgang der EMK
 - Zeitverzögerung 30°
- schwierig bei niedrigen Drehzahlen
 - Spezieller Anlaufvorgang analog zu Schrittmotor



Sensorlose Kommutierung
nur geeignet für Dauerbetrieb
bei hohen Drehzahlen



Bis jetzt haben wir "Blockkommutierung mit Hallsensoren" betrachtet.

Im maxon Katalog findet man aber auch sensorlose Motoren, die nur gerade drei Anschlüsse für die Wicklung und keine Hallsensoren aufweisen. Wie kann man diese Motoren betreiben, wenn die Positionsinformation der Hallsensoren fehlt?

Es gibt eine zweite Möglichkeit, die benötigte Information zur Rotorlage zu erhalten.

Betrachten wir einen Motor mit einem Polpaar und einer Wicklung in Sternschaltung.

Dabei ist immer eine der Phasen nicht bestromt. Allerdings induziert der rotierende Permanentmagnet eine sinusförmige Spannung, die EMK, welche genau in der Mitte des 60° Kommutierungsintervalls den Nulldurchgang hat. Dieser Nulldurchgang kann ermittelt werden, wenn der Sternpunkt der Wicklung ebenfalls zugänglich ist. Dann wartet man 30° und löst den nächsten Schaltvorgang der Blockkommutierung aus. (Der Trick dabei ist, dass man die Geschwindigkeit ebenfalls kennt, damit man weiss wann die 30° vorbei sind.)

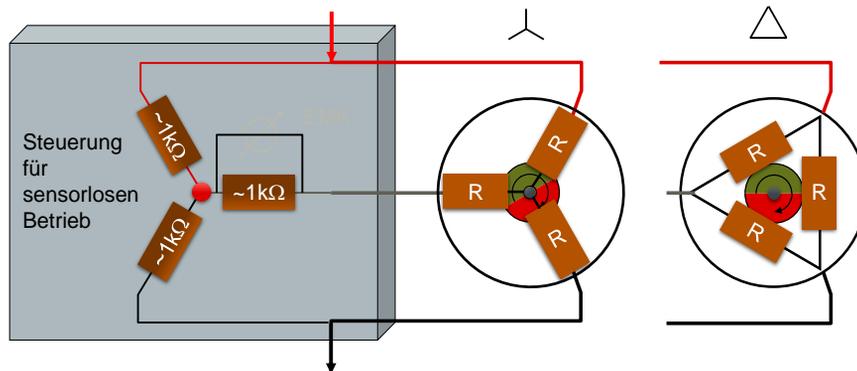
Während des nächsten Kommutierungsintervalls betrachtet man wiederum die Phase, die nicht bestromt ist, usw.

Problematisch sind kleine Drehzahlen. Die Amplitude der EMK wird dann ebenfalls sehr klein und es ist schwierig den Nulldurchgang präzise zu ermitteln. Im Stillstand (z.B. beim Start) verschwindet die EMK vollständig. Dies bedeutet, dass die sensorlose Kommutierung bei niedrigen Drehzahlen (typisch unterhalb 1000 rpm für einen Motor mit 1 Polpaar) nicht gut funktioniert und es eine spezielle Anlaufprozedur braucht. Analog zur

Schrittmotorsteuerung werden die Phasen der Reihe nach wie bei Blockkommutierung bestromt, ohne auf die EMK zu achten. Die Kommutierungsfrequenz wird erhöht, der Rotor beschleunigt. Ist eine Mindestdrehzahl erreicht, wird die EMK berücksichtigt und die eigentliche sensorlose Blockkommutierung eingeschaltet. Für einen verlässlichen Anlaufvorgang müssen dessen Parameter sorgfältig je nach Last- und Motoreigenschaften (Reibung, Massenträgheit, ...) gewählt werden.

Sensorlose Kommutierung: Virtueller Sternpunkt

- Virtueller Sternpunkt in der Elektronik
 - Stern- oder Dreieckschaltung



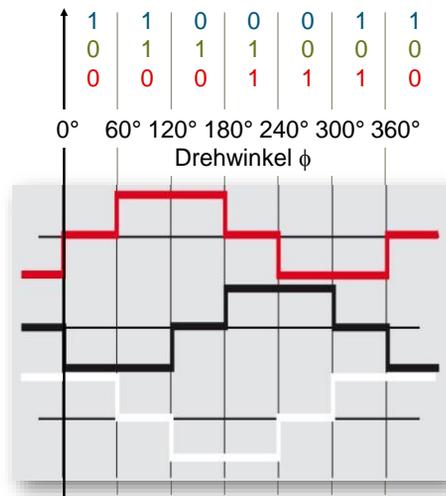
Wir haben gesehen, dass die sensorlose Blockkommutierung den Sternpunkt der Wicklung benötigt. Bei vielen sensorlosen Motoren ist dieser Punkt von aussen nicht zugänglich, es hat nur Anschlüsse für die drei Phasen.

Es gibt aber eine Möglichkeit, das Potential des Sternpunktes trotzdem zu erhalten. In der Elektronik werden dazu drei Widerstände in Sternschaltung und parallel zur Motorwicklung angeordnet. Die Widerstände in der Elektronik haben viel höhere Werte, sodass der Strom noch immer durch den Motor fließt. Aber die Spannungspegel sind dieselben. Und damit ist es einfach die EMK in jeder Wicklung mit Hilfe dieses virtuellen Sternpunktes in der Elektronik zu bestimmen.

Das schöne daran ist: Es funktioniert auch für Motoren mit Dreieckschaltung, wo es ja gar keinen Sternpunkt gibt. (Einmal mehr zeigt dies, dass es nicht nötig ist zu wissen, ob der Motor eine Stern- oder Dreieckschaltung hat.)

Blockkommutierung: Phasenströme

- Motor mit 1 Polpaar
 - Position auf 60° genau bekannt
 - Kommutierung alle 60°
- Motor mit P Polpaaren
 - Position auf $60^\circ / P$ genau bekannt
 - Kommutierung alle $60^\circ / P$
- blockförmige Phasenströme
 - Drehmomentrippel, theoretisch 14%
 - Vibrationen, Summen



Blockkommutierung mit oder ohne Hallsensoren ist dadurch charakterisiert, dass der Motorstrom immer nach 60° (oder nach $60^\circ / P$) abrupt geschaltet wird. Der Ausdruck "Blockkommutierung" kommt von diesen blockförmigen Phasenströmen.

Das Drehmoment ist innerhalb eines Kommutierungsintervalls nicht konstant, es variiert leicht. Dies kann zu Anregungen führen, die sich als Vibrationen oder hörbares Geräusch manifestieren. Bei sehr niedrigen Drehzahlen dreht der Motor eventuell nicht gleichmässig.

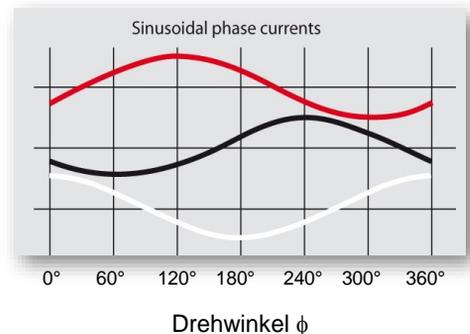
Die Motordaten im maxon Katalog gelten für Blockkommutierung mit Hallsensoren.

Feldorientierte Regelung (FOC)

– Sinusförmige Phaseströme

- 120° phase shifted
- Rotorlage muss sehr genau bekannt sein
→ Encoder-Feedback
- Hallsensoren für absolute Rotorposition beim Start

- theoretisch ohne Drehmomentrippel
- kleinere Verluste, weniger Aufheizen



Sinuskommutierung für hohen Gleichlauf auch bei kleinen Drehzahlen

Ein hoher Gleichlauf kann erreicht werden, indem die Phasenströme graduell angeglichen werden. Man kann zeigen, dass die beste Lösung durch einen sinusförmigen Stromverlauf gegeben ist. Das erzeugte Drehmoment ist dann konstant.

Einen sinusförmigen Strom nachzubilden verlangt aber eine höhere Positionsaufösung als von den Hallsensoren erhalten werden kann. Der Strom in den 3 Phasen muss viel häufiger angepasst werden. Darum verwendet die Sinuskommutierung meist Encoder zur präzisen Rotorlagebestimmung.

Sinuskommutierung ermöglicht einen gleichmässigen Motorbetrieb und ergibt sogar eine bessere Performance. Man erhält etwa 5% mehr Drehmoment bei vorgegebenen Motorverlusten (Erwärmung).

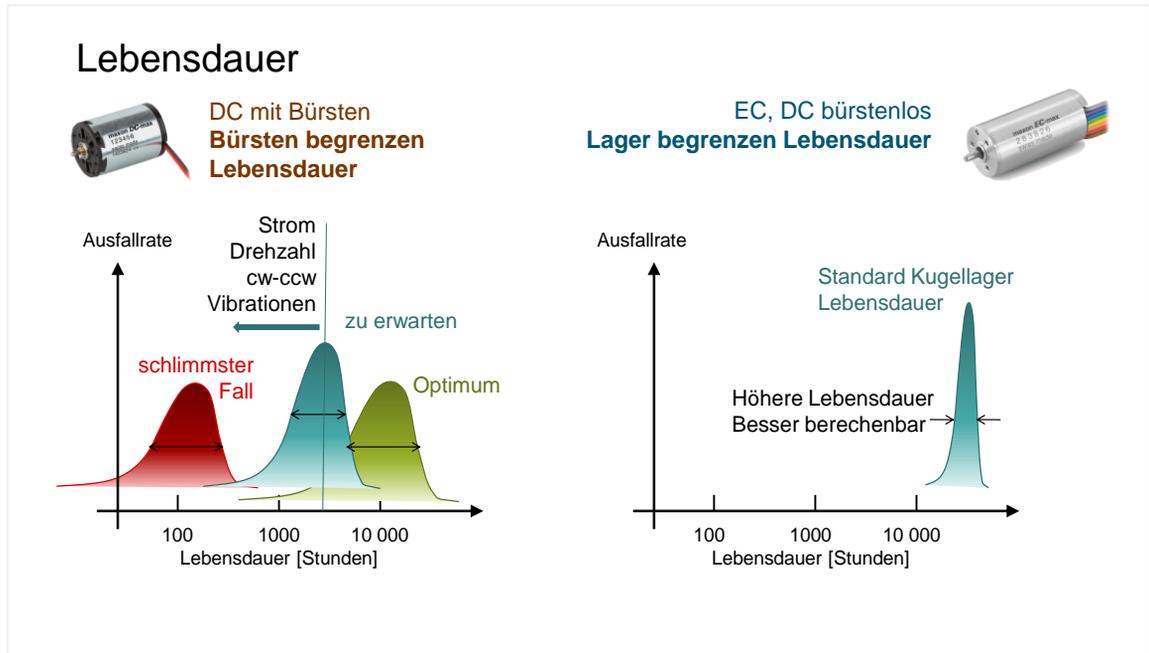
Bemerkung: Sinuskommutierung erinnert stark an einen dreiphasigen Synchronmotor, aber mit einem entscheidenden Unterschied. Beim Synchronmotor wird die Frequenz von aussen durch die Wechselfspannung vorgegeben. Die relative Feldposition zwischen Rotor und Stator (Schlupf) richtet sich nach der Last und ist kleiner als 90°. Daraus folgt das bekannte Verhalten und Kennlinie dieser Motoren. Beim EC-Motor kommt die Information zur Bestromung aus dem Motor selber. Die relative Feldposition ist immer senkrecht und erzeugt das grösstmögliche Drehmoment. Dies ist genau, was das Bürstensystem im mechanisch kommutierten Gleichstrommotor macht: Den Strom so durch die Wicklung schicken, sodass zu jedem Zeitpunkt das Drehmoment maximal wird. Darum zeigen die EC-Motoren auch dasselbe Verhalten wie Gleichstrommotoren mit Bürsten.

DC Motor mit oder ohne Bürsten?

- Auswahlkriterien für bürstenbehaftete oder bürstenlose Motoren



Um diese Frage zu beantworten, muss man alle Aspekte der Anwendung betrachten. Die Wahl zwischen einem Motor mit oder ohne Bürsten wird durch technische Überlegungen aber auch durch Umweltbedingungen und Lebensdauer und im Endeffekt kommerzielle Aspekte bestimmt.



Der wichtigste Unterschied zwischen bürstenbehafteten und bürstenlosen Motoren ist die Lebensdauer.

Das Kommutierungssystem mit Bürsten limitiert die Lebensdauer.

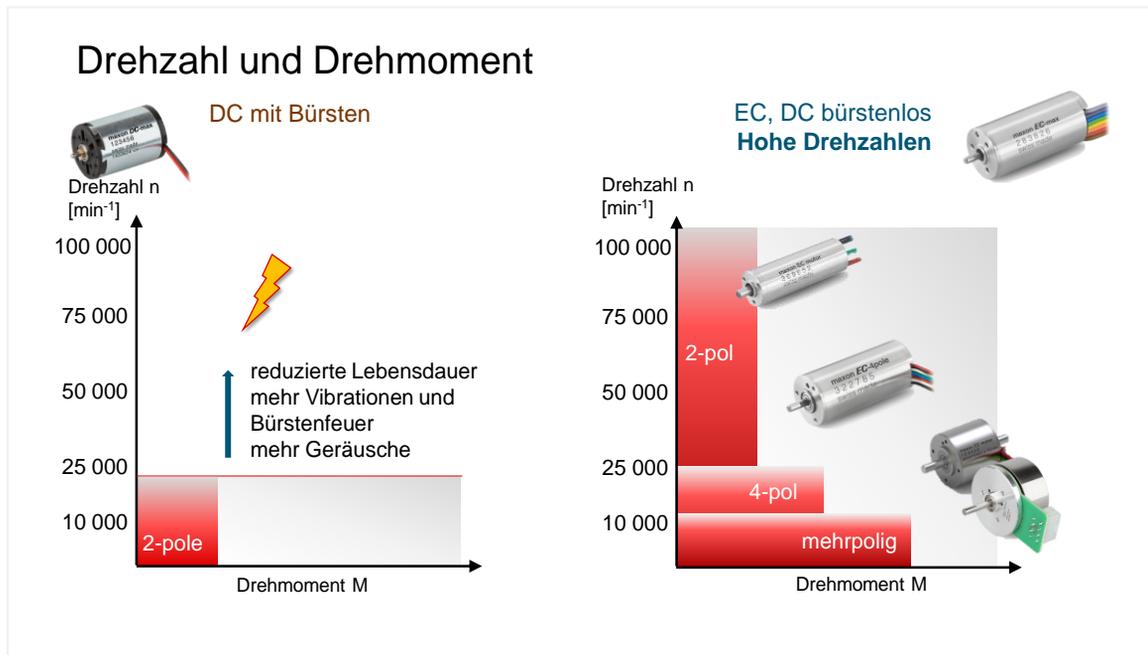
Typisch kann man einige Tausend Stunden erreichen, im besten Fall vielleicht 10'000 Stunden. Die Lebensdauer kann aber auch schon nach weniger als 100 Stunden vorbei sein. Die Lebensdauer von Bürsten ist schwierig vorauszusagen und es gibt keinen sicheren Weg sie zu berechnen.

Viel hängt von der Belastung ab: Hoher Strom, hohe Drehzahl, Umkehrbetrieb und hohe Vibrationen verringern die Lebensdauer. Man kann sie nur durch Vergleich mit ähnlich gelagerten Anwendungen und Betriebsbedingungen abschätzen.

Einige 1000 Stunden Lebensdauer sind ausreichend für viele Anwendungen. Allerdings gibt es auch Anwendungen mit lang andauerndem Betrieb, die einige 10.000 Stunden halten sollten und die Verwendung von Bürsten nicht zweckmässig ist.

Bei bürstenlosen Motoren ist es die Lebenserwartung der Kugellager, welche die Lebensdauer des Motors begrenzt. Die Abnutzung der Kugellager ist viel besser verstanden als diejenige der Bürsten und kann ziemlich präzise abgeschätzt werden. Kugellager sind typisch für mehrere 10 000 Stunden ausgelegt.

Aber noch immer gilt: Viele Anwendungen benötigen die hohe Lebensdauer der bürstenlosen Motoren nicht.



Wo liegen die Unterschiede zwischen den Motoren mit und ohne Bürsten wenn man Drehzahl und Drehmoment betrachtet.

Als Ausgangspunkt nehmen wir einen bürstenbehafteten DC motor mit gegebener Baugröße. Typischerweise kann man Drehzahlen bis maximal 20'000 UpM erreichen, aber in den meisten Fällen liegt die Grenzdrehzahl unter 10'000 UpM. Bei höheren Drehzahlen nimmt die Lebensdauer massiv ab aufgrund steigender elektrischer und mechanischer Abnutzung.

Ein von der Baugröße und magnetischem Aufbau vergleichbarer bürstenloser EC Motor kann bei viel höheren Drehzahlen betrieben werden, in Einzelfällen bis 100'000 UpM. Sie sind somit perfekt geeignet in Anwendungen, die solche hohen Drehzahlen benötigen: Schneider, Fräser und gewisse Lüfter.

Interessant festzustellen ist, dass bürstenlose Motoren oft mehrpolig ausgeführt werden. Dies vergrößert das Drehmoment, allerdings auf Kosten der Drehzahl. Viele Anwendungen benötigen die extreme hohen Drehzahlen nicht; aber etwas mehr Drehmoment ist sehr willkommen.

Aber um es klar zu sagen: Einer der Hauptvorteile der bürstenlosen Motoren sind die höheren Drehzahlen. Mehrpolige Ausführungen haben die Vorteile eher auf Seiten des Drehmoments.

Beachten Sie: Diese Ausführungen sind nur Trends. Welche Drehzahlen und Drehmomente möglich sind, muss spezifisch beim jeweiligen Motortyp abgeklärt werden.

Spezielle Umgebungsbedingungen



DC mit Bürsten
Komplikationen



EC, DC bürstenlos
Leichter zu adaptieren



Bürstenfeuer

- elektromagnetische Störung
- explosive Umgebung



Graphitbürsten

- Reinraumanwendungen
- optische Anwendungen
- Hoch- und Ultrahoch-Vakuum



Schmierung Metallbürsten

- Hoch- und Ultrahoch-Vakuum



Sterilisierbare (autoklavierbare) Motoren

Sterilization with steam	
Temperature	+134°C ± 4°C
Compression pressure up to	2.3 bar
Rel. humidity	100 %
Cycle length	18 minutes

Vakuum, Reinraum

- wenig Ausgasen
- hohe Temperatur
- kein Graphitstaub

Mercury	167°C
Venus	464°C
Earth	15°C
Mars	-63°C
Jupiter	-108°C
Saturn	-138°C
Uranus	-197°C
Neptune	-200°C
Pluto	-229°C

Tiefenbohrung:

Heavy-Duty Motoren

- hohe Temperatur / Druck
- starke Vibration / Schocks

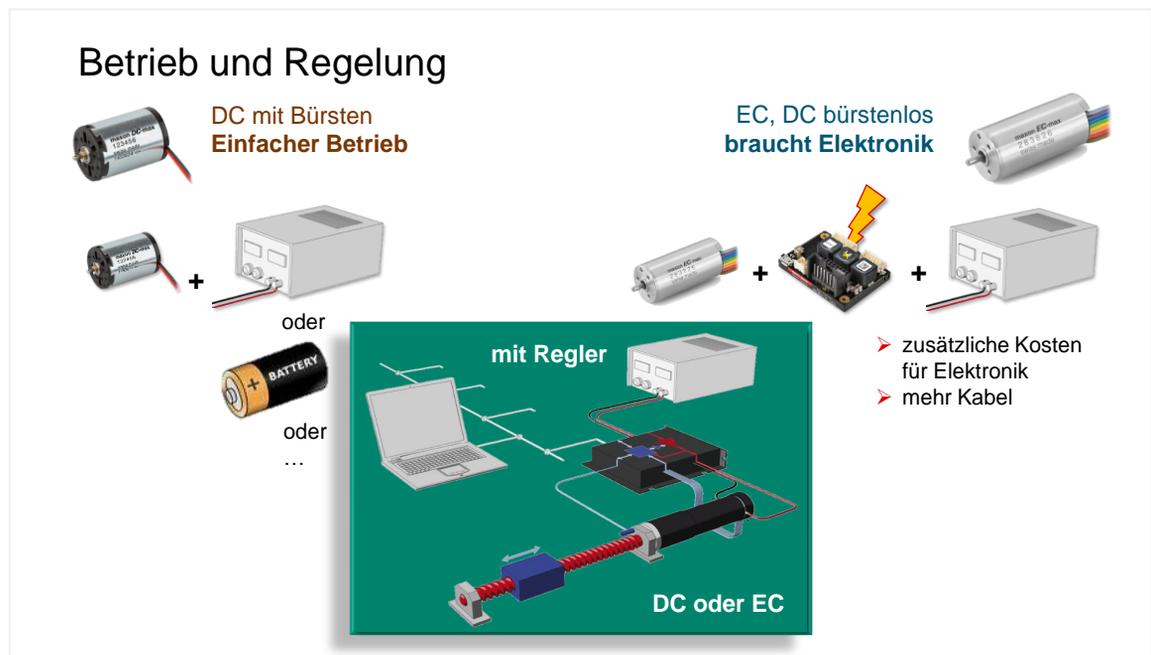
Das Bürstensystem kann bei speziellen Umgebungsbedingungen zu Komplikationen führen. Das Bürstenfeuer verursacht elektromagnetische Störungen, die eventuell gedämpft werden müssen. In explosive Gasen sind die Funken auch nicht gerade willkommen. Es sei hier aber angemerkt, dass ein bürstenloser Motor nicht von sich aus ohne Modifikationen explosionsgeschützt ist.

Graphitbürsten erzeugen Graphitstaub, der Reinräume, Vakuum oder optische Anwendungen verunreinigen kann.

Graphitbürsten brauchen auch eine gewisse Feuchtigkeit und etwas Sauerstoff in der Atmosphäre um gut zu funktionieren.

Edelmetallbürsten werden geschmiert. Daraus ergibt sich, dass beide Bürstensystem nicht wirklich gut für Hochvakuum-Anwendungen geeignet sind.

Aus diesen Gründen sind die meisten Motoren für spezielle Umgebungsbedingungen bürstenlos. Man denke etwa an sterilisierbare Motoren oder an Motoren für Ultrahoch-Vakuum Anwendungen, die davor ausgeheizt werden müssen oder für Anwendungen im Weltall. Oder an Motors für Tiefenbohrungen, die hohe Vibrationen und Temperaturen aushalten müssen.



Wenn es um den Betrieb geht, gibt es keinen anderen Motor der so einfach zu betreiben ist wie der Gleichstrommotor mit Bürsten. Man muss nur eine Spannung anlegen und der Motor dreht.

Zum Betrieb des bürstenlosen Motors ist eine zusätzliche Kommutierungselektronik nötig. Die Verkabelung ist aufwändiger, bis zu 8 Anschlüsse sind nötig, nur um den Motor drehen zu lassen. Im Vergleich dazu hat der Bürstenmotor nur deren 2.

Die Situation ändert sich allerdings bei geregelten Antrieben: Meist können die Regler für Drehzahl, Position oder Drehmoment mit beiden Motortypen verwendet werden, mit und ohne Bürsten. In diesen Fällen sind die Kosten für die Elektronik und den Feedbacksensor sowie der Verkabelungsaufwand sehr ähnlich.