



maxon EC motor
Bürstenlose DC Motoren:
Eine Einführung

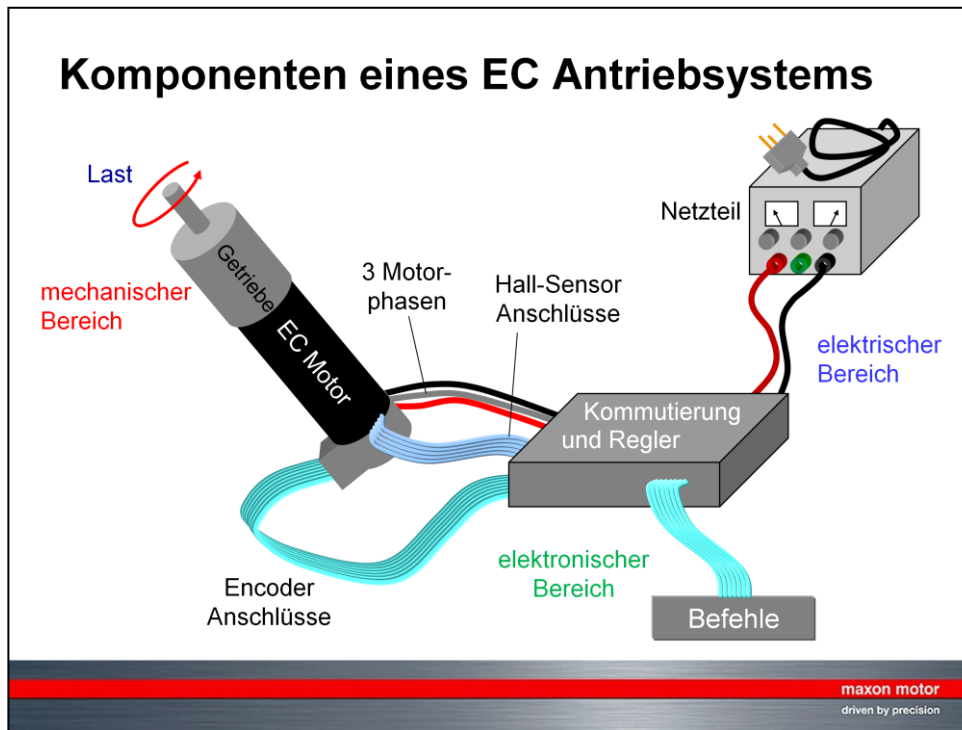
- **Varianten: maxon EC Motorfamilien**
- **Gemeinsamkeiten**
 - Funktionsprinzip
 - Wicklungsbeschaltung, Eisenverluste
- **Elektronische Kommutierungssysteme**
 - Blockkommutierung mit und ohne Hallsensoren
 - Sinuskommutierung
- **Vergleich mit DC-Motoren mit Bürsten**

© 2010, maxon motor ag, Sachseln, Schweiz

maxon motor
driven by precision

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.



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. Dazu benötigt die Elektronik Informationen über die Position des Rotors. Diese Information wird meist von Hall-Sensoren geliefert.

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

Für eine höherwertige Kommutierung und präzise Motorregelung, z.B. bei tiefen Drehzahlen, kann auch ein Encoder als Drehgeber nötig sein. Oftmals besteht die Aufgabe der Elektronik nicht nur in der Kommutierung, sondern auch in der Regelung von Drehzahl oder Position.

Bürstenloser DC-Motor

- 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
- Hauptvorteile: höhere Lebensdauer, höhere Drehzahl
- nutenlose Wicklungen
 - ähnliche Vorteile wie eisenlose DC-Motoren
 - kein magnetisches Rastmoment, weniger Vibration
- steigende Attraktivität: Kosten, Grösse, Magnete

maxon motor
driven by precision

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 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 geprägt.

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.

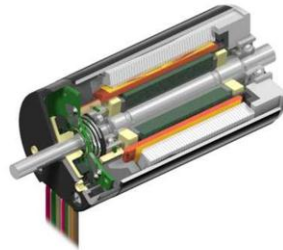
Die **Hauptvorteile** eines bürstenlosen Aufbaus sind die höhere Lebensdauer und die höheren Drehzahlen. Sie sind nicht durch das mechanische Kommutierungssystem begrenzt.

Die EC-Motoren von maxon gibt es mit genutetem und nutenlosem Aufbau. Ein nutenloser Aufbau mit dem traditionellen maxon Wicklungssystem hat ähnliche Vorteile wie der eisenlose maxon DC motor: Kein Rastmoment und deshalb weniger Vibrationen und Geräusche.

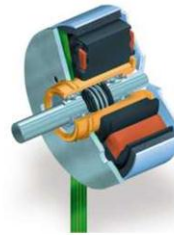
Bürstenlose Motoren sind in den letzten 2 Dekaden immer attraktiver geworden. Hauptsächlich weil die zum Betrieb nötige Elektronik preiswerter und kleiner geworden ist.

Weiter hat es die Entwicklung der Neodymmagnete von höchster Leistungsdichte ermöglicht, das Rotorträgheitsmoment zu verkleinern und damit die Dynamik zu vergrössern.

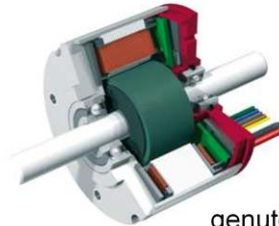
Teil 1: Aufbau der maxon EC-Motorfamilien



nutenlos



genuteter
Aussenläufer



genuteter
Innenläufer

■ Gemeinsamkeiten

- 3-phasige Wicklung im Stator (3 Wicklungsanschlüsse)
- rotierender Permanentmagnet aus NdFeB
- vorgespannte Kugellager
- elektronische Kommutierung

maxon motor
driven by precision

maxon EC-Motoren gibt es mit unterschiedlichem Aufbau.

Zuerst einmal gibt es die **nutenlosen Konstruktionen**, die auf der rhombischen maxon Wicklung basieren.

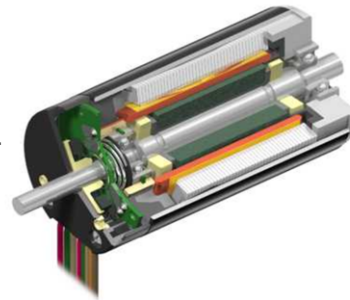
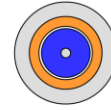
Dann gibt es aber auch Konstruktionen mit Wicklungen mit **genutetem Eisenkern**.

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. Ohne die Bürsten ist es die Lagerung, welche die Lebensdauer des Motors begrenzt. Vorgespannte Kugellager ist eine der besten Möglichkeiten, eine hohe Lebensdauer zu erreichen.
- Und natürlich benötigen alle EC-Motoren eine **elektronische Kommutierung**.

maxon EC motor: Eisenloser Aufbau

- Design mit eisenloser maxon Wicklung
 - Innenläufer mit 1 oder 2 Polpaaren
- maxon EC motor
 - viele Typen: z.B. kurz - lang, sterilisierbar, integrierte Elektronik, ...
 - typisch für hohe Drehzahlen
- maxon EC-max
 - Philosophie: Zuverlässiger Motor zu moderaten Kosten
- maxon EC-4pole
 - Philosophie: Der stärkstmögliche Motor



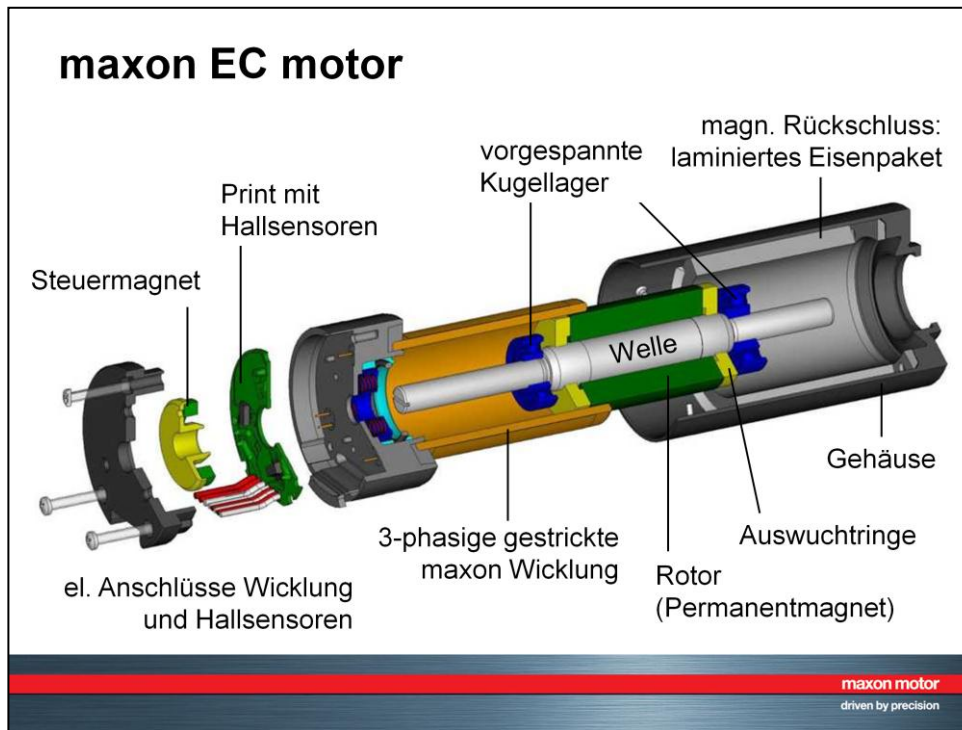
maxon motor
driven by precision

Die erste Konstruktionsvariante, die wir betrachten, ist der klassische maxon EC motor basierend auf der **eisenlosen maxon Wicklung**.

Im maxon Katalog gehören drei Motorfamilien in diese Kategorie.

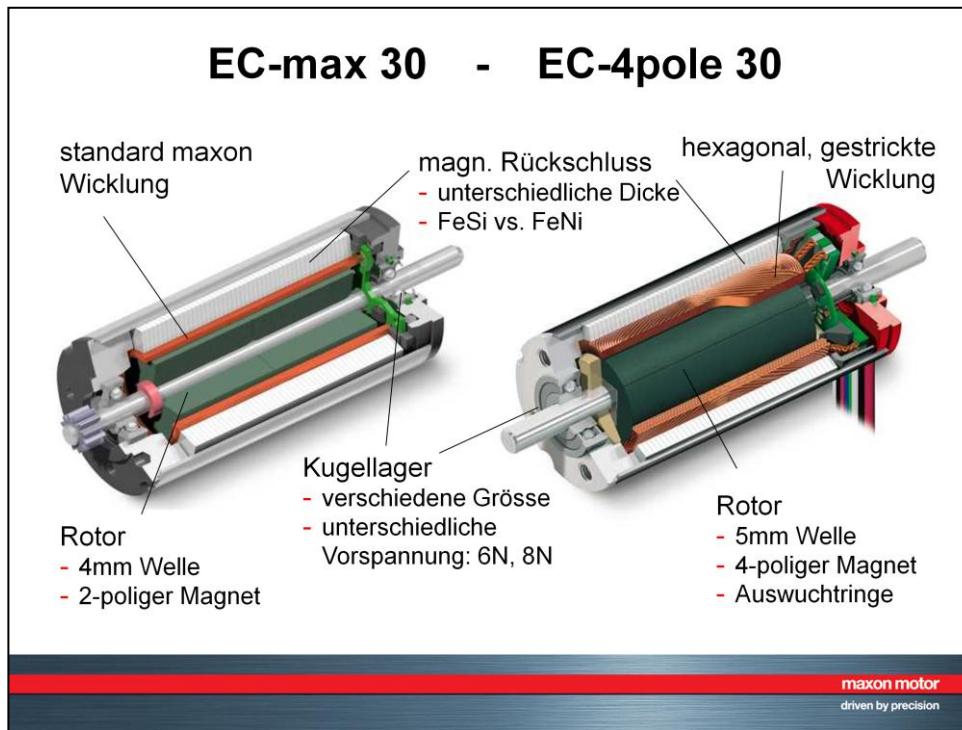
- **maxon EC motor:** Diese Motoren haben einen Permanentmagnet mit 1 Polpaar. Ihre Drehzahl ist mehrheitlich sehr hoch, bis zu 100'000 rpm. Den maxon EC motor gibt es in vielen verschiedenen Varianten mit Durchmesser von 6 bis 60 mm, oft mit kurzen und langen Versionen pro Durchmesser. Einige Motoren sind sterilisierbar, einige haben die elektronische Kommutierung integriert.
- **maxon EC-max:** "max" bezieht sich auf das Verhältnis von Leistung zu Preis. Dieser Motor ist nicht auf höchste Leistung (Drehzahl oder Drehmoment) optimiert, sondern auf Kosten. Dies ist der perfekte Motor in vielen Anwendungen, wo sehr hohe Drehzahlen oder hohe Drehmomente nicht nötig sind (z.B. in Kombinationen mit Getrieben). Der Durchmesserbereich geht von 16 bis 40 mm.
- **maxon EC-4pole:** Dieser Motor mit 2 magnetischen Polpaaren ist auf höchste Leistungsdichte getrimmt. Neben dem 4-poligen Rotor wird dies über eine spezielle Wicklungsbeschaltung und die Verwendung von hochwertigen magnetischen Materialien erreicht..

Im Folgenden wollen wir noch einige Details näher betrachten.



Beim maxon EC motor unterscheiden wir die folgenden Hauptbestandteile:

- Den **Rotor** mit der Welle im Zentrum und dem darauf montierten Permanentmagneten. Das dynamische Auswuchten wird erreicht, indem gezielt Material von den beiden Auswuchtringen aus Messing weggefräst wird. Das Auswuchten reduziert die Vibrationen und Geräusche und verlängert die Lebensdauer der Lager, 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 meist über eine Feder vorgespannt.



Wo liegen die Hauptunterschiede zwischen einem auf Kosten optimierten EC-max und einem auf höchste Leistung getrimmten EC-4pole Motor? Wir vergleichen hier die beiden Designs mit 30 mm Durchmesser.

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

- **4-poliger Permanentmagnet** statt 2-polig, d.h. 2 Polpaare 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**. Die Magnetisierungsfrequenz im Rückschluss ist doppelt so hoch wie beim Motor mit 1 Polpaar. Damit die Wirbelstromverluste klein bleiben, wird dieses Hochleistungsmaterial verwendet. Die maximale Flussdichte hingegen ist kleiner, sodass ein dünnerer Rückschluss verwendet werden kann. Somit bleibt mehr Platz für die Wicklung und der Rotordurchmesser kann grösser gewählt werden. Beide Faktoren haben einen positiven Einfluss auf das erzeugte Drehmoment.
- eine **hexagonale, gestrickte maxon Wicklung**. Eine hexagonale Wicklung kann ein höheres Drehmoment erzeugen. Das Drehmoment wird weiter gesteigert durch eine ausgeklügelte Verschaltung der Wicklungssegmente.

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

Die Kostenreduktion beim EC-max 30 wird erreicht durch

- einen **einfacher konstruierten Rotor** ohne Auswuchtringe. Dies verlangt aber nach Magneten mit kleinen Toleranzen und präziser Montage. Ein bisschen Restunwucht wird bleiben, sodass sehr hohe Drehzahlen nicht möglich sind.
- eine **Standard maxon Wicklung** statt einer gestrickten Wicklung. Das verkleinert die Leistung.
- Hallsensoren, die direkt den Leistungsmagneten abtasten, d.h. ohne extra Steuermagnet.

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

EC-max: Aufbau, Eigenschaften

Philosophie: Zuverlässiger Motor zu moderaten Kosten

- standard maxon Wicklung
 - nur Sternschaltung möglich
 - nicht auf höchste Leistung optimiert
- Hallsensoren messen direkt den Leistungsmagnet
 - ohne Steuermagnet
 - spezieller Prozess zur Ausrichtung der Hallsensoren auf die Wicklung
- keine Auswuchtringe
 - sehr hohe Drehzahlen sind nicht möglich (bis etwa 12 - 20'000 rpm)
- vorgespannte Kugellager
- kurze und lange Version pro Durchmesser



maxon motor
driven by precision

Hier nochmals die wichtigsten Punkte zum Aufbau der **EC-max Motorenfamilie**.

EC-4pole: Aufbau, Eigenschaften

Philosophie: Der stärkstmögliche EC-Motor

- sehr hohes Drehmoment und Beschleunigung
 - gestrickte maxon Wicklung
 - hexagonale Wicklung für lange Versionen
 - 4-poliger Permanentmagnet
- moderate Drehzahl bis 25'000 rpm
 - höhere Kommutierungsfrequenz
 - höhere Eisenverluste
- spezieller Prozess zur Ausrichtung der Hallsensoren auf die Wicklung
- vorgespannte Kugellager

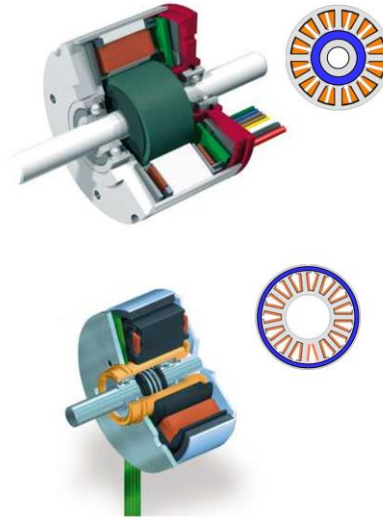


maxon motor
driven by precision

Und hier nochmals die wichtigsten Punkte zum Aufbau der **EC-4pole Motorenfamilie**.

maxon EC motor: Genutete Wicklungen

- maxon EC-i
 - Philosophie: Starker Motor zu attraktiven Kosten
 - dynamisch, aber mit Rastmoment
 - genutete Wicklung, Innenläufer
 - mehrere magnetische Polpaare
- maxon EC Flachmotor
 - Philosophie: Flacher Motor zu attraktiven Kosten
 - genutete Wicklung, Aussenläufer
 - mehr als 4 magnetische Polpaare
 - relativ hohes Drehmoment, aber beschränkte Drehzahl und Dynamik



maxon motor
driven by precision

Betrachten wir nun die **genuteten maxon EC-Motoren**.

Diese Motoren haben einige Gemeinsamkeiten, die sie **kommerziell interessant** machen.

- Die genuteten Wicklungen können kostengünstiger hergestellt werden als die eisenlosen maxon Wicklungen.
- Die mehrpoligen Magnete sind aus isotropem Neodym-Magnetmaterial anstelle der anisotropen Magnete, die in den nutenlosen Motoren Verwendung finden.

Auch einige **technische Eigenschaften** sind ähnlich bei beiden Designs.

- Die hohe Zahl der Magnetpole erzeugt ein **hohes Drehmoment**, **begrenzt** aber die maximal möglichen **Drehzahlen** aufgrund der höheren Magnetisierungsfrequenzen.
- Die genutete Wicklung ergibt ein geringes **Rastmoment**.

Das **Verhalten** aber ist ziemlich unterschiedlich, da Rotor und Wicklung verschieden angeordnet sind.

- Der **EC-i** mit aussen liegender Wicklung und Magnet nahe am Zentrum erzeugt ein ziemlich hohes Drehmoment pro Massenträgheit des Rotors. Dies ergibt einen **sehr dynamischen Motor**, mit hohem Beschleunigungsvermögen.
- Der aussen liegende Rotor der **EC-Flachmotoren** erzeugt die Kraft in grossem Abstand zur Drehachse. Dies ergibt ein **hohes Drehmoment**. Der grosse Rotordurchmesser resultiert aber auch in einem hohen Massenträgheitsmoment. Somit ist die Dynamik eingeschränkt. Die flache Bauform kann aber in gewissen Anwendungen mit begrenztem Einbauraum von Vorteil sein.

EC Flachmotor: Aufbau, Eigenschaften

Philosophie: Flacher Motor zu attraktiven Kosten

Rotor:

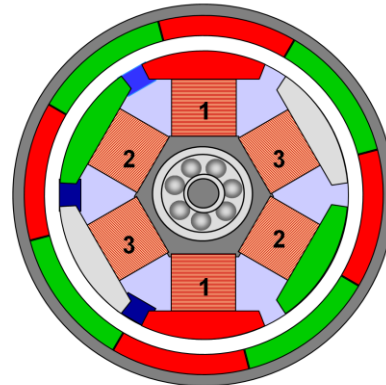
- Aussenläufer => hohes Drehmoment
- mehrpoliger Magnetring aus NdFeB
=> höhere Kommutierungsfrequenz,
=> nicht sehr hohe Drehzahlen

Stator:

- 3 Phasen, mehrere Zähne pro Phase

weitere Eigenschaften

- Hallsensoren detektieren den Magnetring
- oft aber auch sensorlos
- vorgespannte Kugellager



z.B. EC 32 flach:

- 8 Magnetpole
- 2 Zähne pro Phase

maxon motor
driven by precision

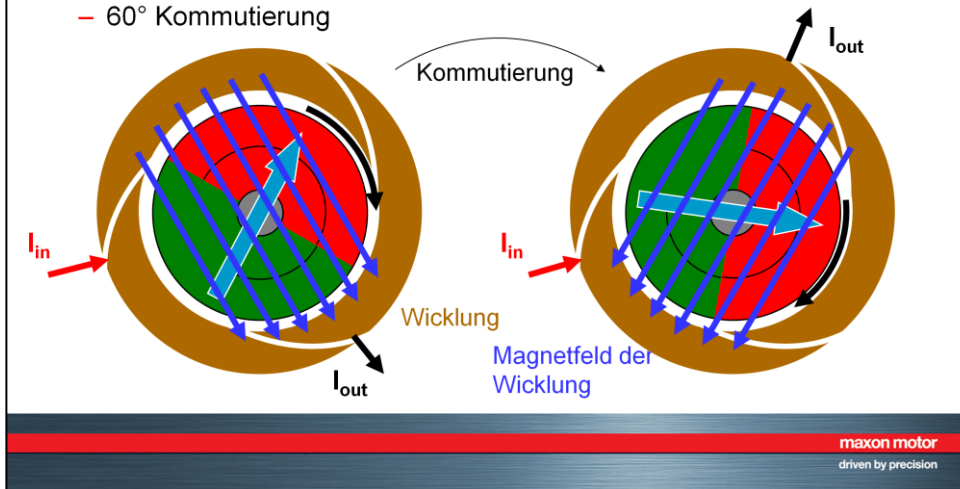
Diese Darstellung zeigt einen Querschnitt durch einen EC 32 Flachmotor.

- Der **aussen liegende Rotor** hat 8 magnetische Pole (4 Polpaare in rot und grün).
- Jede **Wicklungsphase** besteht aus zwei entgegengesetzt liegenden Statorzähnen.
- Die **Hallsensoren** (Dunkel- und Hellblau) sind zwischen den Statorzähnen angeordnet und detektieren direkt die Pole des Magnetrings.

Teil 2: Wechselwirkung Rotor-Stator

■ Stromverteilung in Phasen

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



In diesem zweiten Teil betrachten wir drei spezielle Eigenschaften etwas genauer.

Der erste Punkt betrifft die 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:

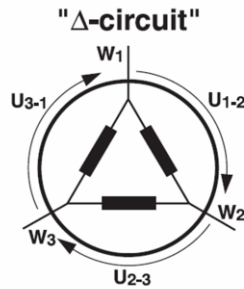
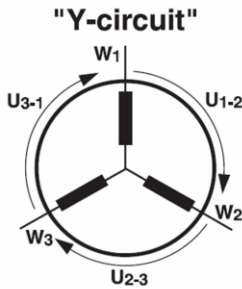
Der Permanentmagnet des Rotors versucht sich nach dem Feld der Wicklung auszurichten. Dies lassen wir aber nicht zu. Das Drehmoment hat ein **Maximum**, wenn die beiden **Felder senkrecht** aufeinander stehen. Wir schalten den Strom 30° vor und nach der senkrechten Position. Somit ist das erzeugte Drehmoment 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. Dies werden wir im Teil 3 dieser Präsentation genauer erläutern.

Wicklungsbeschaltung



- hoher Widerstand
- tiefe Ströme
- hohe Drehmomentkonstante

$$R_Y = 3 \cdot R_{\Delta}$$

$$k_{M,Y} = \sqrt{3} \cdot k_{M,\Delta}$$

$$k_{n,Y} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot k_{n,\Delta}$$

- tiefer Widerstand
- tiefe Spannungen
- hohe Drehzahlkonstante
- Gefahr von induzierten Kreisströmen

Interne Beschaltung der 3 Phasen: keine praktischen Konsequenzen

maxon motor
driven by precision

Eine zweite Eigenschaft, die wir kurz diskutieren möchten, ist die **interne Wicklungsbeschaltung**.

Grundsätzlich kann man sich die 3-phasige Wicklung aus drei Teilwicklungen aufgebaut denken, die hier als Widerstände R dargestellt sind. Es gibt zwei Möglichkeiten diese Widerstände auf eine symmetrische Weise anzuordnen: Die bekannten **Stern-** und **Dreieck-Schaltungen**.

Wie unterscheiden sich die beiden Anordnungen?

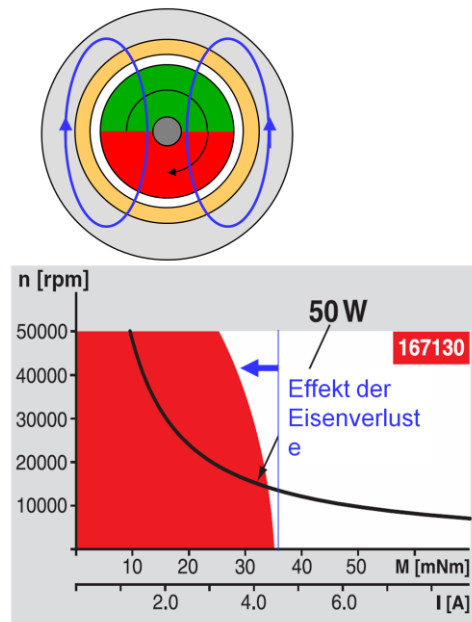
- Obwohl die Sternschaltung einen um einen Faktor 3 höheren Anschlusswiderstand aufweist, ist die **Verlustleistung gleich** für einen gegebenen Arbeitspunkt (Drehmoment, Drehzahl).
- Die **Sternschaltung** weist eine **höhere Drehmomentkonstante** auf. Das bedeutet, dass mit demselben Strom mehr Drehmoment erzeugt wird als in der Dreieckschaltung.
- Die **Dreieckschaltung** hat eine **höhere Drehzahlkonstante**. Somit wird weniger Spannung benötigt, um dieselbe Drehzahl zu erreichen, oder mit einer vorgegebenen Spannung kann eine höhere Drehzahl erreicht werden.

Diese Aussagen kann man auch so zusammenfassen: Zwei Motoren mit derselben Wicklung - einmal in Dreieckschaltung, einmal in Sternschaltung - verhalten sich wie zwei Motoren, deren Wicklung aus unterschiedlichem Drahtdurchmesser gemacht wurde. Die eine Wicklung braucht eine höhere Spannung aber einen kleineren Strom als die andere, um dieselbe Drehzahl und dasselbe Drehmoment zu erreichen.

Bei maxon Motoren ist die Anordnung Stern oder Dreieck fest. Um die Motoren zu betreiben und zu kommutieren wird diese Information nicht benötigt. Die einzige praktische Auswirkung einer Dreieckbeschaltung besteht in der Möglichkeit, dass bei gewissen Bedingungen unerwünschte Kreisströme in der Wicklung induziert werden können.

Eisenverluste

- Ursprung: rotierender Permanentmagnet
- Hystereseverluste
 - Ummagnetisieren kostet Energie
- Wirbelstromverluste
 - das rotierende Magnetfeld erzeugt Wirbelströme
- Effekt: zusätzl. Erwärmung
 - bei hohen Drehzahlen ist weniger Strom zulässig
 - vgl. Betriebsbereiche



Eisenverluste treten in den meisten Motortypen auf. Das sind Leistungsverluste in den Eisenteilen, die den magnetischen Fluss führen; insbesondere im magnetischen Rückschluss und in den Eisenkernen der genutzten Wicklungen. Eisenverluste verursachen eine zusätzliche Erwärmung des Motors.

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

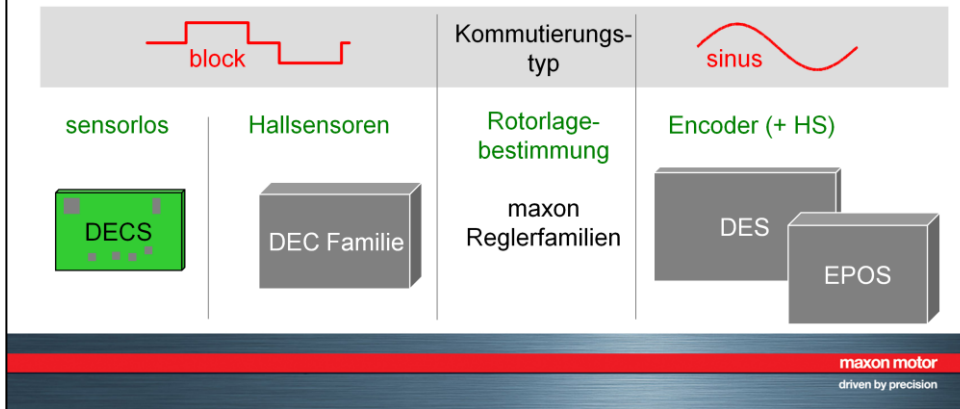
- **Hystereseverluste** sind darauf zurückzuführen, dass für eine Magnetisierungsänderung Energie aufgewendet werden muss. Dies entspricht einem Durchlaufen der Magnetisierungskurve (Hysteresis) des Materials. Hystereseverluste können minimiert werden, indem man geeignete Materialien wählt, die einfach magnetisierbar sind (mit einer engen Hysteresis), und indem man die Flussdichte tief 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 verkleinert werden, indem man ihre Bildung unterdrückt, z.B. durch eine laminierte Ausführung mit dünnen, elektrisch voneinander isolierten Eisenblechen. Man kann zeigen, dass je stärker die Wirbelströme räumlich eingeschränkt werden, umso kleiner sind die Verluste.

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 tieferen Drehmomenten. Die zusätzliche Erwärmung durch die Wirbelströme lässt weniger Strom in der Wicklung zu, und damit weniger Drehmoment.

Teil 3: Elektronische Kommutierung

- Gemeinsames Ziel: Strom so anlegen damit maximales Drehmoment entsteht
- senkrechte Orientierung der Magnetfelder
 - Rotor (Permanentmagnet)
 - und Stator (Wicklung)
- Kenntnis der Rotorposition relativ zur Wicklung



In diesem dritten Teil der Präsentation stellen wir die **elektronische Kommutierung** vor.

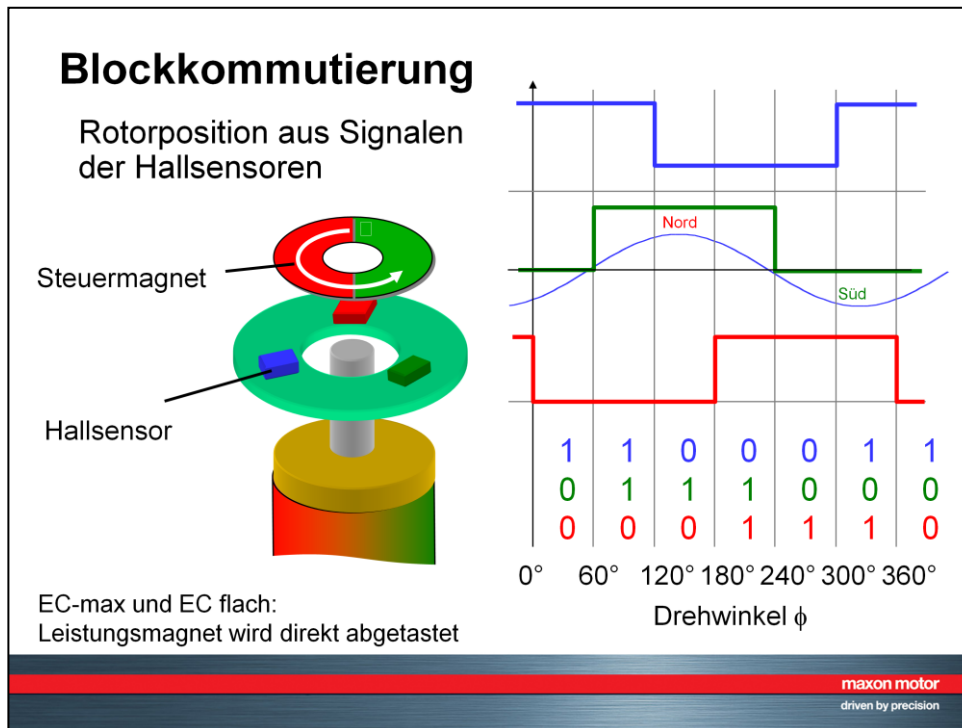
Es gibt verschiedene Arten. maxon verwendet die drei folgenden:

- **Blockkommutierung mit oder ohne Hallsensoren**
- **Sinuskommutierung.**

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.



Zuerst müssen wir die **Signale der Hallsensoren** genauer anschauen. Wir tun dies 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 Steuermagneten auf der Welle ab. Der Steuermagnet hat dieselben beiden Magnetpole in der gleichen Orientierung wie der Leistungsmagnet. (Grundsätzlich könnten die Hallsensoren auch den Leistungsmagneten direkt abtasten, aber der Steuermagnet 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.)

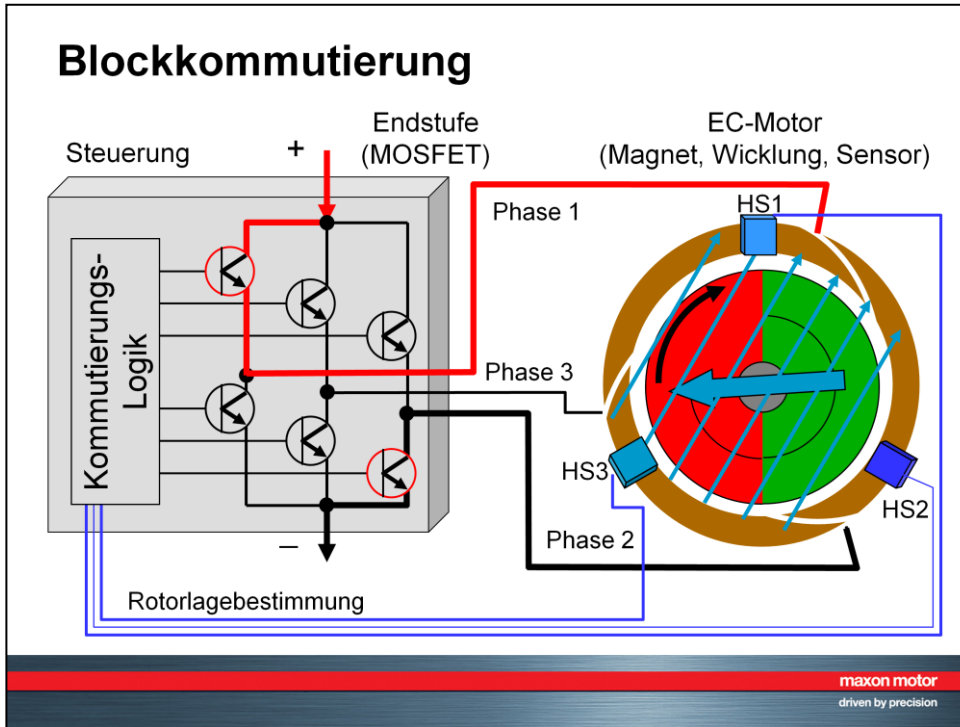
Die verwendeten Hallsensoren detektieren nur die Richtung des Magnetfeldes. Sie erzeugen eine hohe Spannung am Ausgang (5V) wenn ein Nordpol in der Nähe ist. Ein Südpol ergibt ein tiefes Signal (Gnd).

Die aktuelle Position des Steuermagneten 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 120°.
- Der **grüne Hallsensor** sieht den Südpol. Der Ausgang ist auf tiefem 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 tief 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 ist genau was wir für die Kommutierung brauchen. Erinnern wir uns, dass es 6 Möglichkeiten gibt den Strom durch den Motor zu schicken bei einem Kommutierungswinkel von 60°.

Die nächste Folie zeigt wie das gesamte System der Blockkommutierung funktioniert.

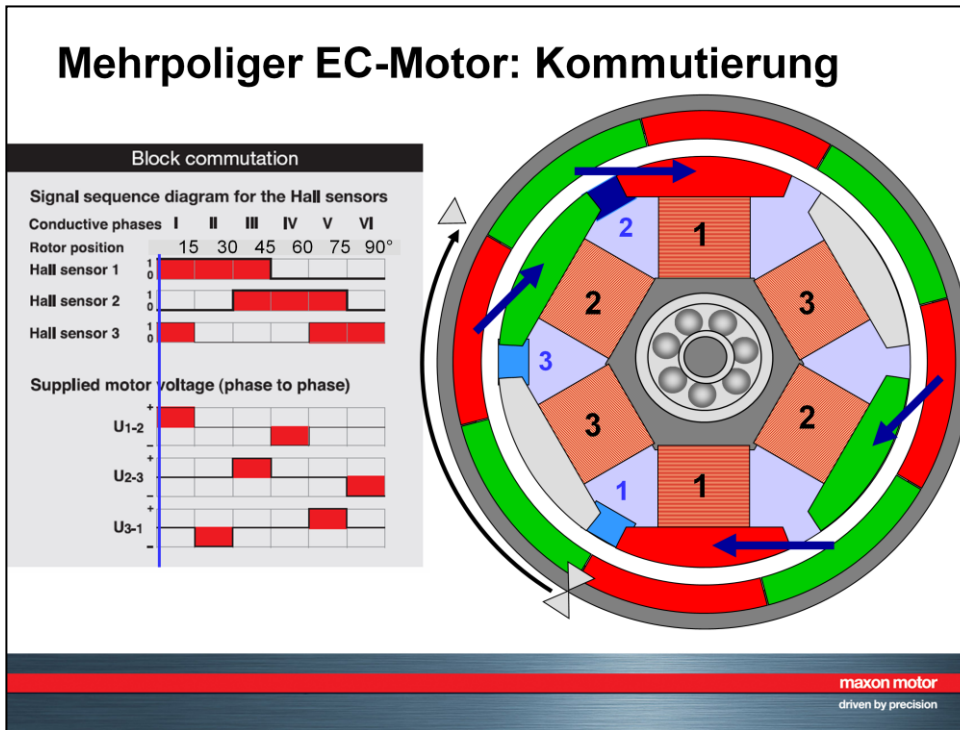


Rechts sieht man einen schematischen **Querschnitt durch einen maxon EC motor** mit 2-poligem Permanentmagnet in der Mitte, einer dreiphasigen Wicklung und drei Hallsensoren, die um 120° versetzt angeordnet sind. Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass die Hallensoren direkt den Leistungsmagnet abtasten.

Links ist die **Kommütierungselektronik** 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 Endstufenbrücke wird durch die Kommütierungslogik geschaltet; die Logik evaluiert die Hallsensor-Signale und bestromt entsprechend die drei Motorphasen.

Bemerkungen zur Animation:

- In dieser Startposition erzeugen die Hallensoren das folgende Signal: HS1 hat eben auf den hohen Pegel geschaltet, HS2 ist auf tiefem Pegel und HS3 auf hohem.
- Die Kommütierungslogik 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 tiefen Pegel und die Kommütierungslogik 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 Hallensoren, 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 Kommütierungsintervallen haben wir wieder die ursprüngliche Konfiguration erreicht und der Rotor hat eine Umdrehung absolviert.



Betrachten wir nun dieselbe Abfolge der **Blockkommutierung für einen mehrpoligen Motor**.

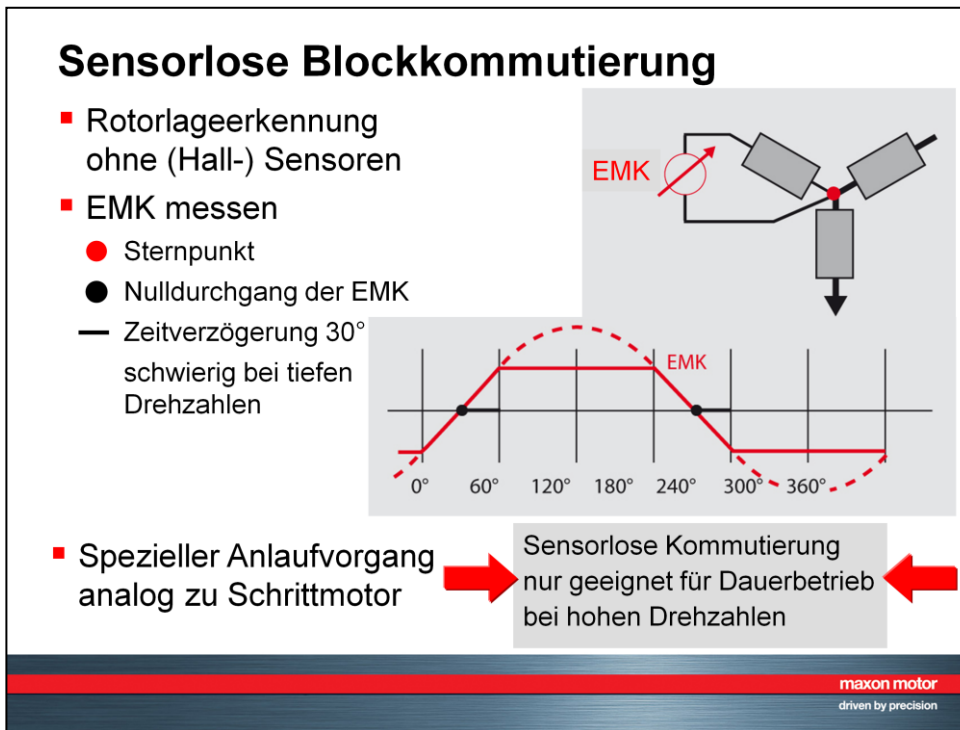
Die magnetische Wechselwirkung wird vereinfacht als Anziehung und Abstossung von Magnetpolen dargestellt.

Wiederum nehmen wir als **Beispiel den EC 32 flach**. Wir erinnern uns, dass dieser Motor 4 Polpaare im Rotor hat. 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 gefunden werden kann. Die Winkelskala der Rotorposition ist auf das aktuelle Beispiel angepasst.

Bemerkungen zur Animation:

- In dieser Startposition erzeugen die Hallsensoren das folgende Signal: HS1 hat eben auf den hohen Pegel geschaltet, HS2 ist auf tiefem 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. Diese Pole 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 tiefen Pegel und die Kommutierungslogik schaltet den Strom von Phase 1 auf 3. Die Südpole der Wicklung sind nun an Phase 3.
- Bemerkung: Um ein hohes Drehmoment zu erhalten, dürfen sich die ungleichnamigen Pole von Rotor und Stator nicht zu stark annähern. Sonst hat man Anziehungskräfte, die durch die Rotationsachse gehen und nicht mehr tangential gerichtet sind. Das Drehmoment wird kleiner.
- Der Rotor dreht weiter. Wiederum nach 15° ändert das Muster der Hallsensoren, HS2 schaltet auf den hohen Pegel. Die Elektronik lässt den Strom von Phase 2 nach 3 fließen. Die Phase 1 wird ausgeschaltet und der Nordpol befindet sich nun bei den Zähnen der Phase 2.
- Der Rotor dreht weiter, und so weiter ... Nach 6 Kommutierungsintervallen haben wir wiederum die Anfangskonfiguration erreicht, aber diesmal hat der Rotor erst $6 \times 15^\circ = 90^\circ$ zurückgelegt. Dies ist der hauptsächlich Unterschied beim mehrpoligen Motor: Der Kommutierungswinkel entspricht 60° geteilt durch die Anzahl Polpaare (P) des Rotors. Oder anders ausgedrückt: Um dieselbe Drehzahl zu erreichen, muss die Kommutierungsfrequenz P mal höher sein.



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. Diese Phase sieht aber den rotierenden Permanentmagnet, der eine sinusförmige Spannung induziert, die EMK. Man kann zeigen, dass die **induzierte Spannung** genau in der Mitte des 60° Kommutierungsintervalls (wenn diese Phase nicht bestromt ist) den **Nulldurchgang** hat. Dieser Nulldurchgang kann ermittelt werden, wenn der Sternpunkt der Wicklung ebenfalls zugänglich ist.

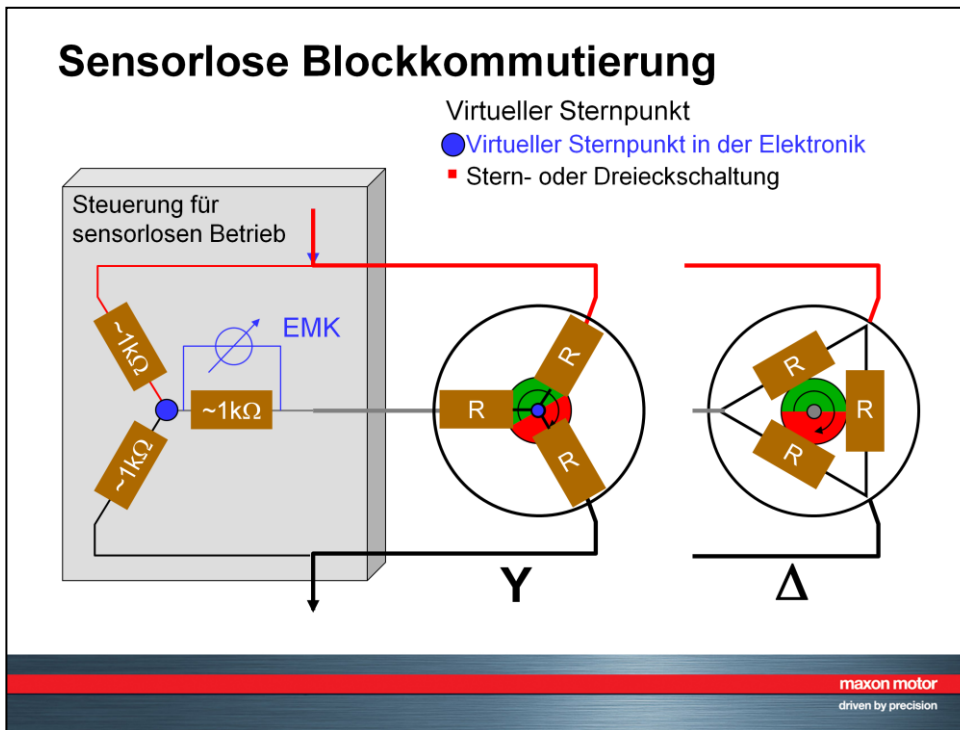
Dann muss man **30° warten** und dann den nächsten Schaltvorgang der Blockkommutierung auslösen. (Der Trick dabei ist, dass man die Geschwindigkeit ebenfalls kennt, damit man weiss wann die 30° vorbei sind. Aber dies kann man z.B. aus dem zeitlichen Abstand der vorausgehenden Nulldurchgänge mehr oder weniger genau erschliessen).

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

Es gibt ein Problem. Wenn die **Drehzahl klein** ist wird die Amplitude der EMK ebenfalls sehr klein. Die Kurve wird flacher und flacher und es ist schwierig den Nulldurchgang präzise zu ermitteln. Noch schlimmer, im Stillstand (z.B. **beim Start**) verschwindet die EMK vollständig.

Dies bedeutet, dass die sensorlose Kommutierung bei tiefen Drehzahlen (typisch unterhalb 1000 rpm für einen Motor mit 1 Polpaar) nicht gut funktioniert und es eine **spezielle Anlaufprozedur** braucht. Diese läuft **analog zur Schrittmotorsteuerung** ab. Die Phasen werden der Reihe nach, gemäss der Folge bei Blockkommutierung, bestromt, ohne auf die EMK zu achten. Die Kommutierungsfrequenz wird erhöht und der Rotor beschleunigt, falls alles gut läuft. Ist eine Mindestdrehzahl erreicht, wird die EMK berücksichtigt und die wirkliche sensorlose Blockkommutierung eingeschaltet.

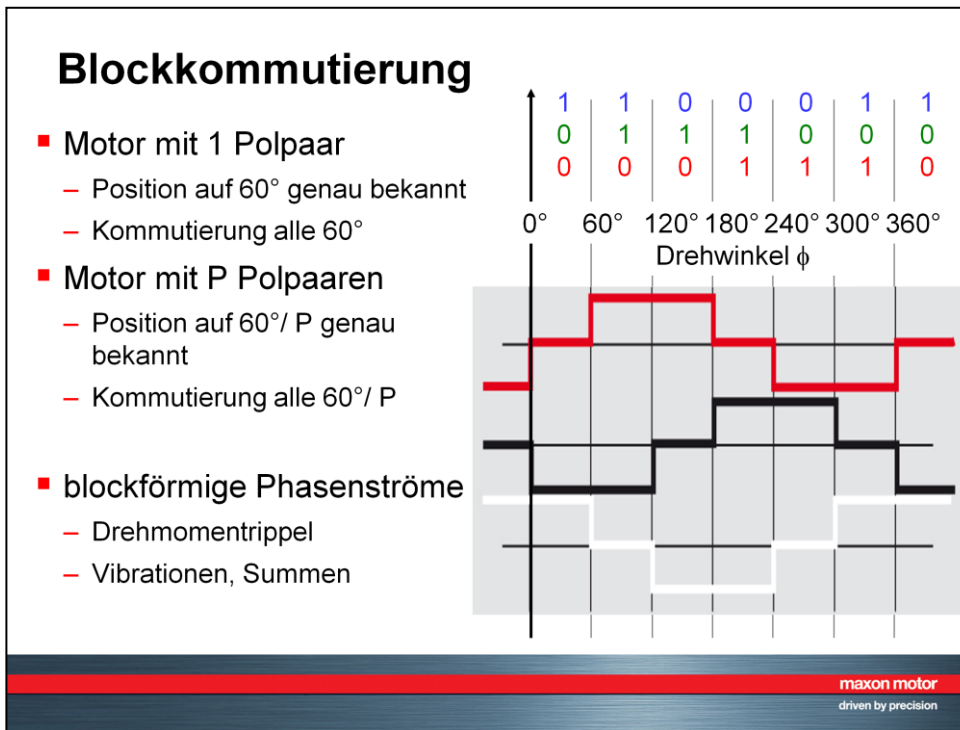
Um einen verlässlichen Anlaufvorgang zu erhalten, müssen dessen Parameter sorgfältig gewählt werden je nach Last- und Motoreigenschaften (Reibung, Massenträgheit, ...).



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 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.

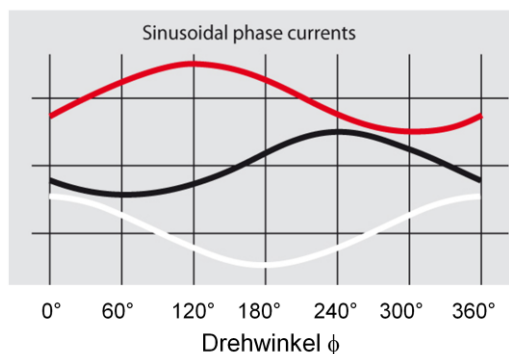
Das Drehmoment ist innerhalb eines Kommutierungsintervalls nicht konstant, es variiert leicht. Dies kann zu Anregungen führen, die sich als Vibrationen oder hörbares Geräusch manifestieren. Bei sehr tiefen Drehzahlen dreht der Motor eventuell nicht gleichmässig.

Die Motordaten im maxon Katalog gelten für Blockkommutierung mit Hallsensoren.

Sinuskommutierung

Rotorlage

- muss sehr genau bekannt sein
- typisch 2'000 punkte pro Umdrehung
- Encoder mit 500 Impulsen (Hallsensoren für Start: absolute Rotorposition)
- Resolver als Alternative



Phasenströme

- sinusförmig
- 120° phasenverschoben
- ähnlich zu Synchronmotor mit variabler Frequenz

Sinuskommutierung für hohen Gleichlauf auch bei tiefsten Drehzahlen

maxon motor
driven by precision

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 Positionsauflösung** 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 Wechselspannung 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.

Teil 4: DC und EC Motoren im Vergleich

DC-Motor

- einfacher Betrieb und Ansteuerung, auch ohne Elektronik
- keine elektronischen Teile im Motor
- Lebensdauer durch Bürstensystem beschränkt
- Drehzahlen durch Bürstensystem begrenzt

EC-Motor

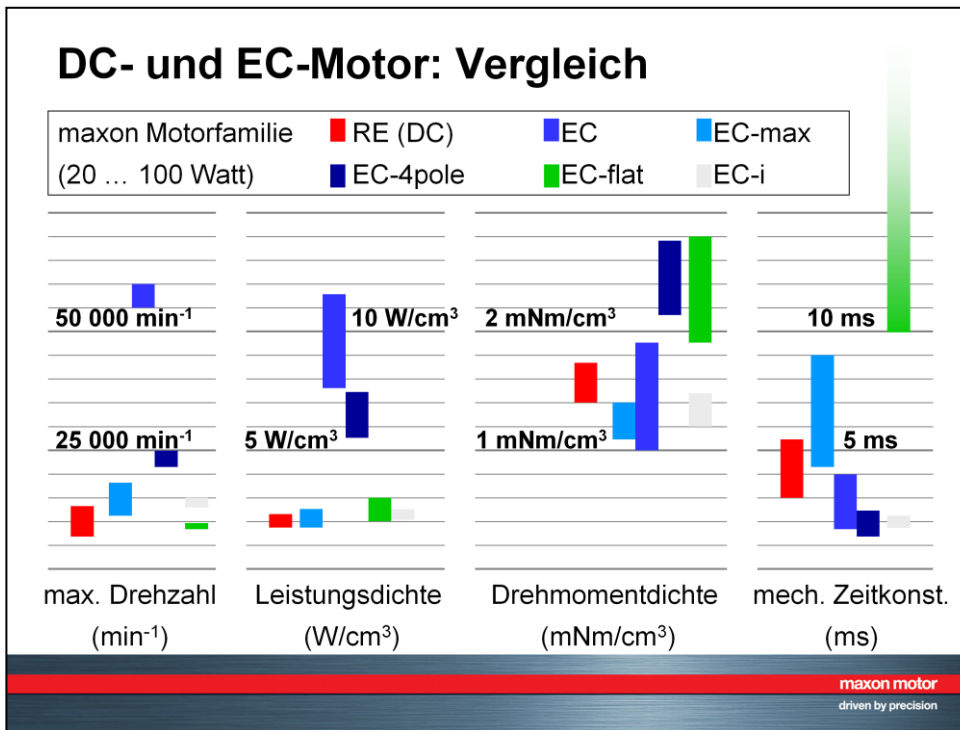
- hohe Lebensdauer, hohe Drehzahlen
 - vorgespannte Kugellager
- kein Bürstenfeuer
- Eisenverluste im Rückschluss
- braucht Elektronik für Betrieb
 - mehr Kabel
 - höhere Kosten
- elektronische Teile im Motor (Hallsensoren)

maxon motor
driven by precision

In diesem letzten Teil wollen wir die Eigenschaften der maxon EC-Motoren zusammenfassen. Diese erste Übersicht zeigt die wichtigsten Vor- und Nachteile der bürstenlosen EC-Motoren verglichen mit den bürstenbehafteten DC-Motoren.

DC-Motoren sind einfach zu betreiben. Alles was man dazu braucht ist eine Gleichspannung, und der Motor dreht. In einfachen Anwendungen ist keine Steuerelektronik nötig. Im Motor sind keine Hallsensoren, was bei speziellen Anwendungsbedingungen (z.B. bei Strahlung oder aggressiver Atmosphäre) ein Vorteil sein kann. Allerdings limitiert das Bürstensystem die Lebensdauer und die maximale Motordrehzahl.

Die höhere Lebensdauer - begrenzt durch die Lagerung - ist der grosse Trumpf der bürstenlosen EC-Motoren. Sehr hohe Drehzahlen können erreicht werden, falls der Rotor entsprechend ausgewuchtet und die Lager entsprechend dimensioniert sind, sowie die Eisenverluste tief gehalten werden können. In bürstenlosen Motoren gibt es kein Bürstenfeuer, was weniger elektromagnetische Störfelder zur Folge hat. EC-Motoren brauchen eine Elektronik für den Betrieb. In Anwendungen, wo sowieso ein Regler eingesetzt werden muss, ist dies aber kein Nachteil. Man muss einfach einen Drehzahl- oder Positionsregler wählen, der zusätzlich elektronisch kommutiert.



Diese Darstellung fasst spezielle Eigenschaften der verschiedenen **maxon EC-Motorfamilien** zusammen und vergleicht sie mit **RE-Motoren**. dem maxon DC Motor mit demselben Neodym-Magnet wie die EC-Motoren. Um einen relativ fairen Vergleich zu haben, wurden nur Motoren mit der gleichen Magneten ausgewählt und mit ähnlichen Leistungsbereich (20 ... 100 W)

- Bei der Drehzahl fällt die **hohe Grenzdrehzahl** des **maxon EC Motor** auf. Diese Familie hat einen Magneten mit 1 Polpaar und eine eisenlose maxon Wicklung. Die mehrpoligen EC-Motorfamilien haben hier keinen Vorteil gegenüber dem RE-Motor. Die Ursache dafür liegt in den höheren Eisenverlusten aufgrund der höheren Schaltfrequenzen bei mehrpoligem Aufbau.
- Die hohe Drehzahl des maxon EC Motor ergibt eine hohe Leistungsdichte. Die **höchste Leistungsdichte** wird aber von den **4-poligen EC-Motoren** erreicht. Diese sind auch speziell dafür "gezüchtet". Insbesondere haben diese Motoren die höchste Drehmomentdichte, was eine **hohe Dynamik** ergibt (oder eine sehr kleine mechanische Zeitkonstante).
- Ebenfalls sehr dynamisch sind die **EC-i Motoren**.
- Die **EC-Flachmotoren** erzeugen ein ziemlich hohes Drehmoment, aber die Dynamik ist aufgrund des hohen Massenträgheitsmoments bescheiden.
- Zum Schluss stellen wir fest, dass die kostengünstigen **EC-max Motoren** ganz ähnliche Eigenschaften wie die RE-Motoren aufweisen, allerdings kann ein viel höhere Lebensdauer erwartet werden.

Kurz gesagt: Aufbau und Eigenschaften der EC-Motoren sind unterschiedlich und sie müssen aufgrund der speziellen Anforderungen der jeweiligen Anwendung ausgewählt werden.