

## maxon DC Motoren

- Vorteile eisenloser DC-Motoren
- Das maxon DC Motor Programm
- Aufbau und Funktionsprinzip
- Kommutierung: Graphitbürsten, Edelmetallbürsten
- Lebensdauer, Lager



Diese Präsentation zeigt Aufbau und Funktionsweise des maxon DC motor. Das sind kleine Gleichstrommotoren mit Permanentmagneten und Wicklung ohne Eisenkern. Im ersten Teil stellen wir die Unterschiede zum Gleichstrommotor mit Eisenkern dar und die sich daraus ergebenden Vorteile. Wir stellen das maxon Produktportfolio vor. Der zweite Teil behandelt den permanent magnetischen Kreis des Stators, den Stromfluss in der eisenlose Wicklung und die Wechselwirkung von Strom und Magnetfeld. Anschliessend wird das Prinzip der Kommutierung vorgestellt und auf die Unterschiede zwischen Graphit- und Edelmetallbürsten eingegangen. Zum Schluss noch einige Bemerkungen zur Lebensdauer und Ergänzungen zu Sinter- und Kugellager

## maxon DC Motor

Was Sie lernen...

- Was sind die wichtigsten Vorteile der eisenlosen Wicklung?
- Wie unterscheiden sich die verschiedenen DC-Motorenfamilien?
- Wozu dient die CLL-Scheibe?
- Welche Lager und welche Bürsten verwende ich in welchem Anwendungsfall?

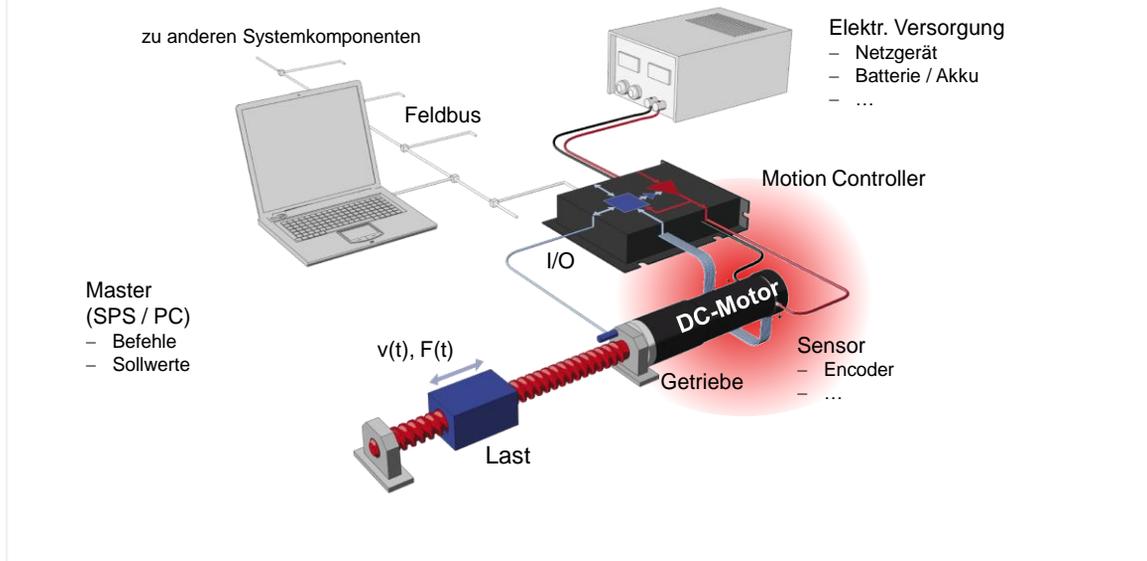


Was können Sie mitnehmen?

Natürlich die maxon-spezifischen Themen. Was sind die speziellen Charakteristika von eisenlosen maxon DC Motoren? Wie verbessert CLL die Motorlebensdauer?

Aber auch wann Graphit- oder Metallbürsten besser geeignet sind? Oder wann Sinter- oder Kugellager zu wählen sind?

### Komponenten eines DC-Motor Antriebssystems



DC Motoren sind nur Komponenten in kompletten Antriebssystemen. Sie wandeln elektrische in mechanische Energie.

In unserem Fall werden sie von einer Gleichspannungsquelle versorgt. Oft wird eine geregelte Bewegung benötigt, was einen zusätzlichen Drehzahl- oder Positionssensor und einen entsprechenden Controller erfordert.

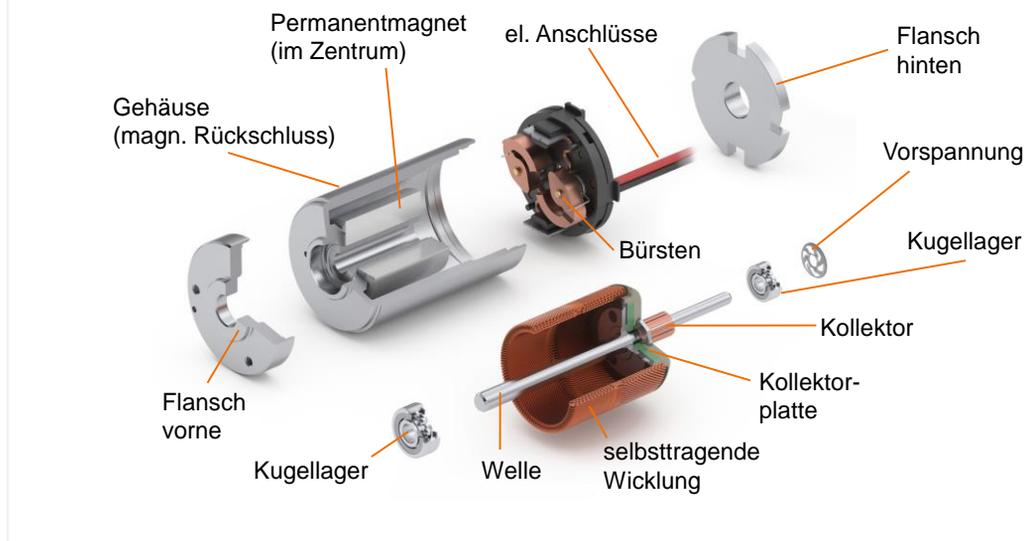
Bewegungsbefehle werden vom übergeordneten System generiert, oder auch ganz einfach als digitale oder analoge Signale dem Controller zugeführt.

Der Motor selber ist an das mechanische System gekoppelt und treibt dieses an.



Konventionelle Gleichstrommotoren kleiner Leistung (unter etwa 1 kW) verwenden meist Permanentmagnete um das Ständerfeld zu erzeugen. Die Wicklung ist im Rotor angeordnet und meist um einem Eisenkern zur Flussverstärkung und Flussbündelung gewickelt. Gleichstrommotoren mit eisenloser Wicklung verzichten auf den Eisenkern. Dies ist das Prinzip bei maxon, das im Folgenden näher vorgestellt werden soll.

## Eisenloser maxon DC Motor (DCX 22)



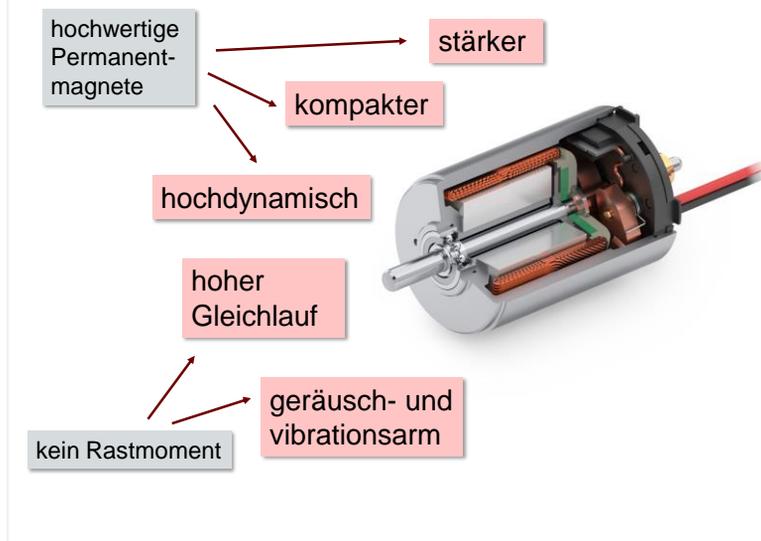
Diese Darstellung zeigt einen eisenlosen maxon DC Motor. Man erkennt dieselben drei Hauptbestandteile wie beim konventionellen Motor.

Den Stator bestehend aus dem innen liegenden Permanentmagneten, dem Gehäuse, das wiederum als magnetischer Rückschluss dient, und aus dem Flansch für die Montage. Den Rotor wiederum mit Wicklung und Kollektor. Die Wicklung ist über die sogenannte Kollektorplatte mit der Welle verbunden. In diesem Beispiel ist die Welle über ein Kugellager im Stator gelagert. Die Form des Rotors erinnert an ein Weihnachtsglöckchen, weshalb auch vom "Glockenankermotor" gesprochen wird. Die Wicklung bewegt sich im Luftspalt zwischen Magnet und Rückschluss.

Dem Bürstensystem hier mit Graphitbürsten und den elektrischen Anschlüssen des Motors.

Die folgenden Folien zeigen die Vorteile des "eisenlosen Motordesigns".

## Was macht eisenlose DC-Motoren speziell?



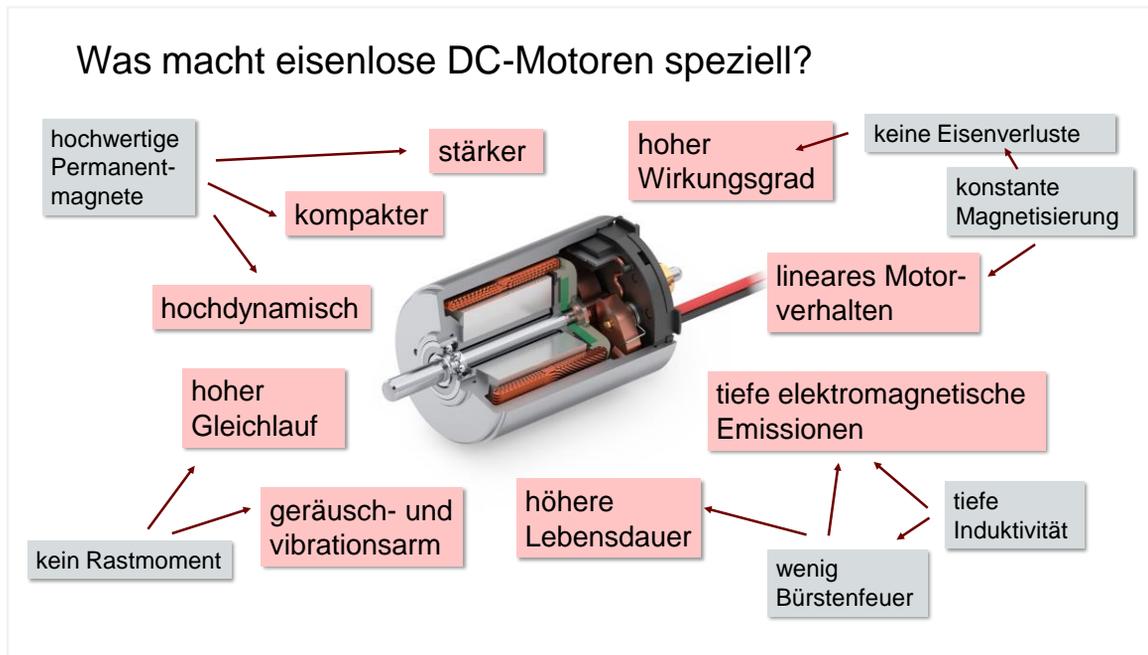
Die Verwendung von hochwertigeren Magnetmaterialien führt zu kompakteren Motoren mit hoher Leistungsdichte.

Die Anordnung des Magnets im Zentrum ermöglicht eine grössere permanentmagnetische Länge im gesamten Magnetkreis. Dies zusammen mit der möglichen Verwendung der stärksten Magnete erhöht die Flussdichte im Luftspalt, wo die Wicklung läuft. Damit steigt das erzeugte Drehmoment.

Ohne Eisenkern ist der Rotor ein Hohlzylinder mit einem deutlich kleineren Massenträgheitsmoment. Zusammen mit dem hohen Drehmoment ergibt dies sehr dynamische Antriebe mit mechanischen Zeitkonstanten von wenigen Millisekunden. Die stärksten maxon Motoren haben sogar Zeitkonstanten von nur 1 ms.

Eisenlose Motoren haben kein Rastmoment, da keine weichmagnetischen Zähne vorhanden sind. Das erzeugte Drehmoment ist gleichförmig und ermöglicht einen ruckfreien Lauf. Dies wirkt sich besonders bei kleinen Drehzahlen aus. Bei höheren Drehzahlen regt der Motor weniger Vibrationen an, was die Laufruhe vergrössert.

Regelungstechnisch ergeben sich ebenfalls Vorteile. Das gleichförmigere Drehmoment ist einfacher zu Regeln und der Motor hat nicht die Tendenz an bevorzugten Positionen anzuhalten.



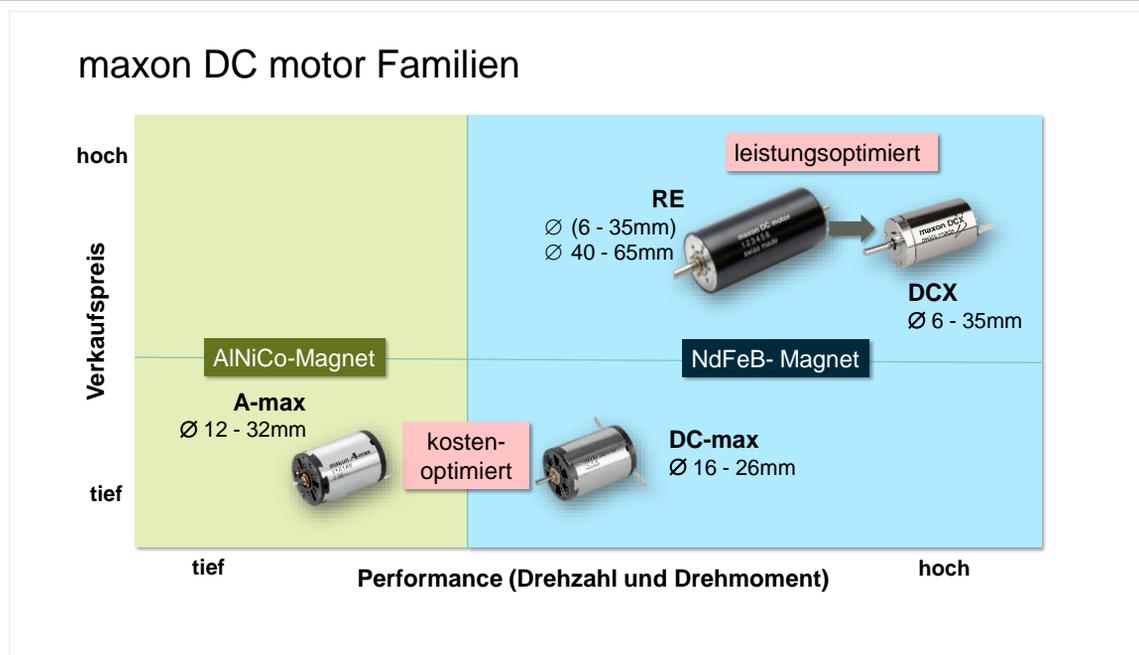
Elektrisch gesehen bedeutet das Fehlen des Eisenkerns, dass die Induktivität der Wicklung viel kleiner ist. Es muss weniger magnetische Energie beim Kommutieren geschaltet werden. Dies reduziert das Bürstenfeuer, die typischen Entladungen die beim Aufbrechen eines induktiven Stromkreises auftreten. Das Kollektor-Bürstensystem wird weniger stark angegriffen und hat eine höhere Lebensdauer.

Weniger Funken bedeutet auch weniger elektromagnetische Störfelder. Eisenlose Motoren sind leichter zu entstören – wenn dies überhaupt nötig ist. Zum Beispiel über einen einfachen Kondensator zwischen den Anschlüssen oder einen Ferritkern über den Zuleitungen.

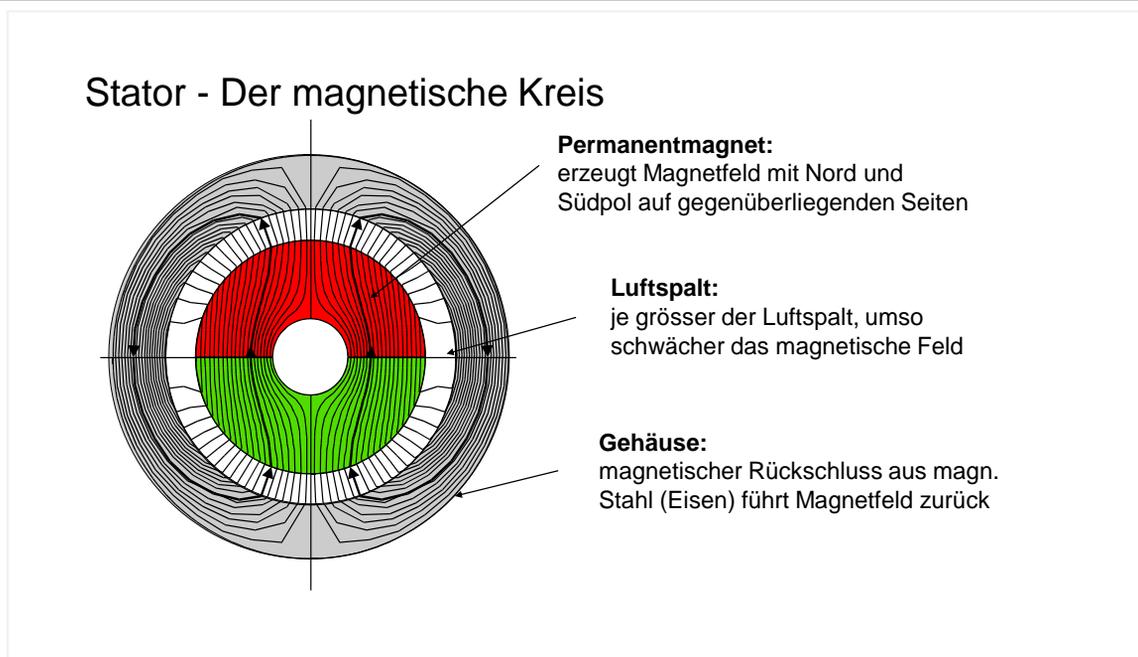
Die kleine Induktivität lässt aber auch den Motorstrom extrem schnell reagieren. Bei getakteter Ansteuerung (z.B. durch Pulsweitenmodulation PWM) kann sich ein Stromrippel ausbilden, das den Motor übermäßig erwärmt. Die schnelle Reaktion des Stromes kann sich auch die Stabilität einer Stromregelung ungünstig auswirken. Als Abhilfe kann eine Motordrossel (eine Zusatzinduktivität in Serie zum Motor) nötig sein. maxon Regler sind speziell für niederinduktive Motoren konzipiert und haben diese Drossel schon eingebaut.

Bei eisenlose Gleichstrommotoren ist die Magnetisierung im gesamten Magnetkreis fest eingepreßt. Damit entfallen die Eisenverluste. Die Verlustleistung ist klein, was sich im höheren Wirkungsgrad oder im tiefen Leerlaufstrom niederschlägt.

In der eisenlosen Konstruktion kann auch keine Sättigung an den Engstellen des Eisenkerns (den Stegen der Zähne) auftreten. Somit bleibt das Drehmoment streng proportional zum Strom und es können die stärksten Permanentmagnete eingesetzt werden. Weitere Fortschritte in der Magnettechnologie führen damit zu stärkeren Motoren.



Diese Folie gibt einen Überblick über das aktuelle maxon DC motor Programm. Die DCX und RE Motoren sind mit hochwertigen Neodymmagneten ausgestattet. Diese Motoren sind auf höchste Leistung getrimmt. Sie haben die höchste Leistungsdichte (Kombination von Drehzahl und Drehmoment) auf dem Markt. Weitere Eigenschaften sind: Einen robusten Aufbau (Metallflansch), Zuverlässigkeit und eine vergleichsweise hohe Lebensdauer für einen bürstenbehafteten Motor. Bei den DCX Motoren sind die mechanischen und elektrischen Schnittstellen als auch mögliche Kombination online konfiguriert werden. Die Philosophie beim A-max Motor ist ein gutes Preis-Performance-Verhältnis. Die Motoren haben AlNiCo-Magnete mit tieferer Leistungsdichte. Der Flansch besteht aus Kunststoff. A-max Motoren werden typisch in OEM-Anwendungen eingesetzt. Der DC-max Motor kombiniert die hohe Leistung der NdFeB-Magnete mit dem kosteneffizienten Aufbau der A-max Motoren. Das Resultat ist ein Motor mit Performance zwischen A-max und DCX.



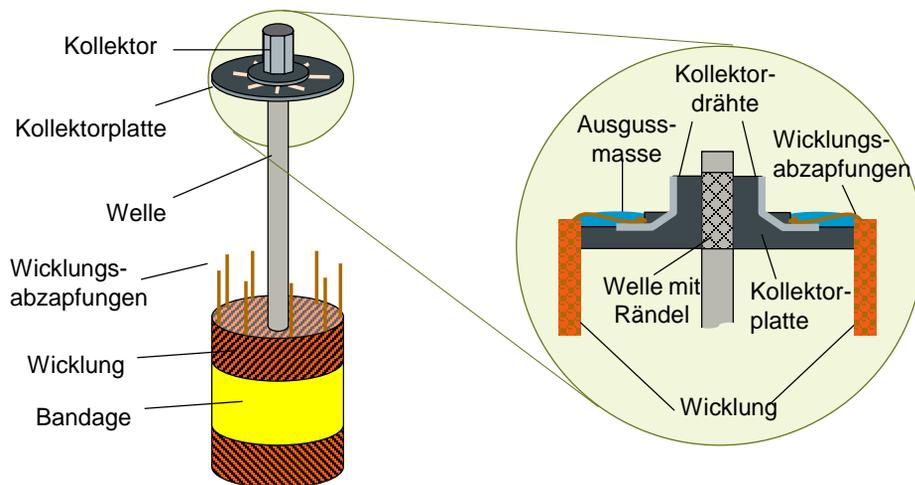
Dieses Bild zeigt einen Querschnitt durch einen Stator.

Wir erkennen im Zentrum den Permanentmagneten. Er ist diametral magnetisiert, der Nordpol sei hier rot eingefärbt, der Südpol grün. In der Mitte ist eine Bohrung, die Platz für die Welle schafft.

Die Feldlinien treten beim Nordpol aus dem Magneten aus und beim Südpol in den Magneten ein. Magnetische Feldlinien, genauer die uns interessierende Magnetische Induktion  $B$ , sind geschlossene Kurven und müssen aussen vom Nord- zum Südpol zurückgeführt werden. Dazu dient das Gehäuse, das aus einem magnetisch leitenden Material hergestellt ist. Man nennt das Gehäuse deshalb auch magnetischer Rückschluss. Zwischen Permanentmagnet und Rückschluss verlaufen die Feldlinien radial im Luftspalt. Ziel der ganzen Anordnung ist es, ein möglichst starkes Magnetfeld im Luftspalt zu erzeugen, damit die Wicklung die darin eingetaucht ist, möglichst viel Kraft erzeugen kann. Luft ist ein schlechter magnetische Leiter und je grösser der Luftspalt gewählt ist, umso kleiner wird sich der magnetische Fluss ausbilden. Deshalb versucht man den Luftspalt möglichst klein zu halten. Andererseits hat in einem kleinen Luftspalt nur noch eine dünnwandige Wicklung Platz. Die Stromdichte ist klein und damit die erzeugte Kraft. Die Dimensionierung des Luftspalts ist eine klassische Optimierungsaufgabe, die sehr stark von den Eigenschaften des Permanentmagneten abhängt.

Zusammengefasst haben wir eine Anordnung, die im Luftspalt ein Magnetfeld erzeugt, das in dieser Darstellung von unten nach oben gerichtet ist.

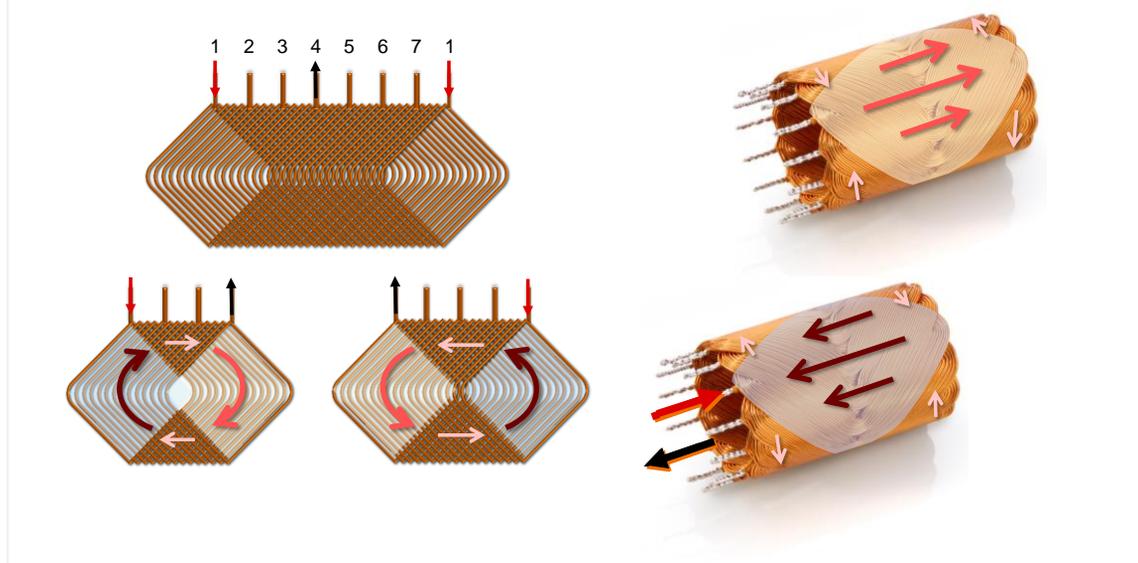
### Rotor und Wicklung



Betrachten wir nun genauer wie der Rotor aufgebaut ist.

Im Zentrum ist die Welle aus gehärtetem Stahl. Darauf wird die Kollektorplatte mittels Kunststoffspritzguss aufgebracht. In die Kollektorplatte sind die Kollektordrähte eingebettet. An der Aussenkante der Kollektorplatte ist die freitragende Wicklung angebracht. Die Kontakte der Wicklung – die Abzapfungen – werden auf die Kollektordrähte geschweisst. Zum Schluss wird die Kollektorplatte mit einem Kleber ausgegossen. Das Ausgiessen schützt die Kontakte und Schweisstellen und dient der mechanischen Verbindung zwischen Wicklung und Kollektorplatte. Das in der Wicklung erzeugte Drehmoment wird über diese Klebverbindung und die Kollektorplatte auf die Welle übertragen.

### Stromfluss durch die maxon Wicklung



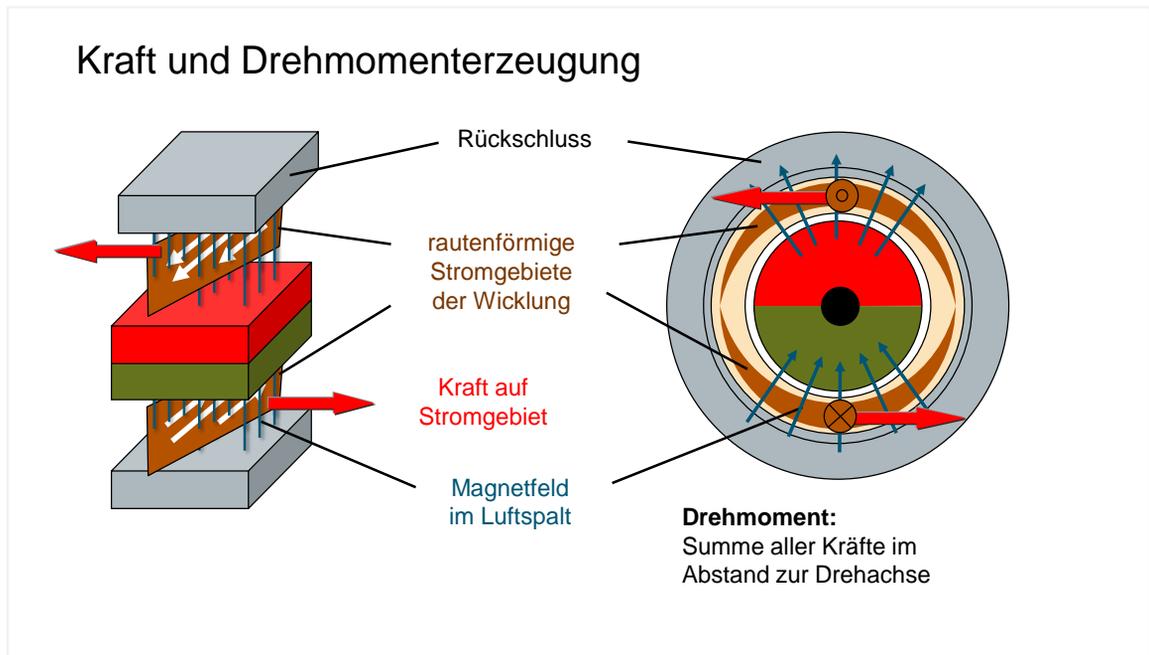
Diese Folie zeigt die Stromverteilung in der maxon Wicklung.

Um den Stromfluss genauer zu analysieren, beginnen wir mit der Darstellungen links oben. Wir können uns die Wicklung als abgerolltes Band vorstellen, wo der Strom beim ersten und letzten Kontakt in die Wicklung fließt und in der Mitte wieder aus der Wicklung tritt.

Betrachten wir die beiden Wicklungshälften separat, so erkennen wir, dass der Strom kreisförmig fließt, und zwar entgegengesetzt in den beiden Hälften. Eine genauere Analyse des Mittelwerts des Stroms ergibt in jeder Wicklungshälfte zwei dreieckförmige Gebiete oben und unten, in denen der mittlere Strom nach links oder rechts fließt. (Im aufgerollten Zustand zeigen diese Ströme in tangentialer Richtung und tragen nichts zum Motor-Drehmoment bei.)

Daneben haben wir links und rechts jeweils ein rautenförmiges Gebiet, wo der Strom im Wesentlichen nach oben oder unten zeigt. Im Motor fließen diese Ströme in axialer Richtung. Überlappt man die beiden Wicklungshälften wieder, so ergibt sich sogar ein genau axialer Stromverlauf.

Zusammengefasst erhält man zwei rautenförmige Stromgebiete auf gegenüberliegenden Seiten der Wicklung. Die Stromrichtung ist axial und gegensinnig. Die Spitzen der Rauten liegen gerade bei den Strom führenden Abzapfungen.



Somit haben wir nun alle Zutaten, um zu verstehen, wie das Drehmoment erzeugt wird. Dazu erinnern wir uns an die Lorentz-Kraft aus dem Physikunterricht. Sie beschreibt, dass ein Strom führender Leiter im äusseren Magnetfeld eine Kraft spürt. Dabei gilt die "rechte Hand Regel" und dass die Kraft senkrecht auf die Stromrichtung und die Richtung der magnetischen Induktion steht.

In unserer Anordnung mit dem Magnetfeld von unten nach oben und der Stromrichtung nach hinten oder vorn ergibt dies Kräfte nach rechts oder links.

Im Motor addieren sich diese Kräfte zu einem Drehmoment in dieselbe Richtung.

Zusammenfassend sehen wir, dass das Drehmoment aus der Wechselwirkung des elektrischen Stroms mit dem Feld des Permanentmagneten entsteht.

(Eine alternative Betrachtung fasst den mittleren Strom der Wicklung als Kreisstrom auf, der wie eine Spule ein Magnetfeld erzeugt. Das Feld der Spule steht senkrecht auf dem Feld des Permanentmagneten. Das Drehmoment entsteht dadurch, dass sich die beiden Felder ausrichten möchten)

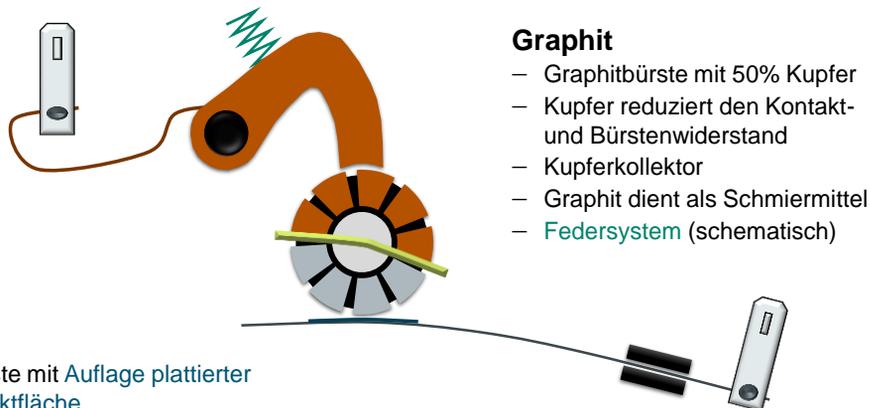


Das erzeugte Drehmoment verursacht die Drehung des Rotors und damit entfernen sich die Stromrauten von den Magnetpolen. Das Drehmoment wird schwächer, ja nach einer Vierteldrehung verschwindet es und zeigt dann in die andere Richtung.

Glücklicherweise hat eine Wicklung aber mehrere Anschlüsse, die alle auf den Kollektor geführt sind. Dreht sich nun der Rotor, so kontaktieren die Bürsten automatisch eine neue Kollektorlamelle und damit springt die Stromraute eine Wicklungsteilung zurück und befindet sich wieder beim Pol des Permanentmagneten, wo das Drehmoment maximal wird. Bei genügend feiner Unterteilung kann man damit ein fast konstantes Drehmoment erreichen.

maxon Motoren haben eine ungerade Anzahl Kollektorlamellen, sodass der Kommutierungsvorgang nur jeweils bei einer Bürste stattfindet und der Strom nur jeweils in einem Teilsegment gewendet werden muss. Eine relativ hohe und ungerade Anzahl Lamellen hat zwei Vorteile  
 einerseits muss beim Kommutieren weniger Energie geschaltet werden, was die Funkenbildung am Kollektor verkleinert. Dies hat positive Auswirkungen auf die Lebensdauer und der Motor zeigt weniger störende elektromagnetische Interferenzen (EMV).  
 andererseits wird der Drehmomentrippel aufgrund des endlichen Kommutierungswinkels klein, wie man auf der nächsten Folie sieht

### DC Kommutierungssysteme



#### Graphit

- Graphitbürste mit 50% Kupfer
- Kupfer reduziert den Kontakt- und Bürstenwiderstand
- Kupferkollektor
- Graphit dient als Schmiermittel
- Federsystem (schematisch)

#### Edelmetall

- Bronzebürste mit Auflage plattierter Silberkontaktfläche
- Silber-Kupfer-Kollektor
- kleinster Kontakt- und Bürstenwiderstand (50mΩ)
- CLL für hohe Lebensdauer

Bei kleinen Gleichstrommotoren kommen zwei Bürstensysteme zur Anwendung, die hier zur Gegenüberstellung zusammen gezeigt werden. (Im jeweiligen Motor kommt aber nur jeweils eine Bürstenart vor! Nur damit diese Darstellung nicht missverstanden wird.)

#### Graphitbürsten:

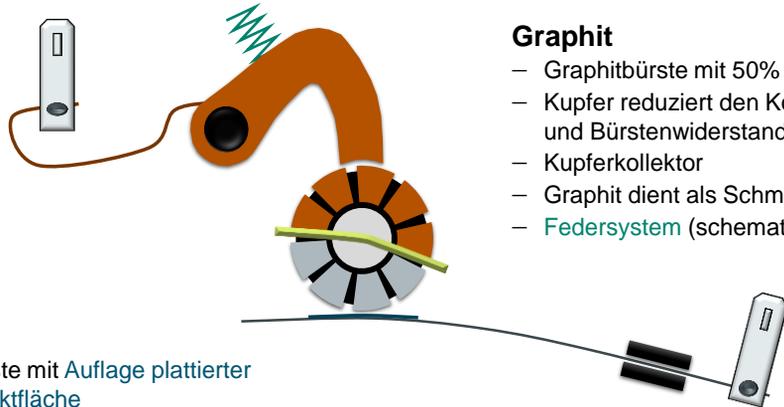
Graphitbürsten werden meist als Hebelbürsten ausgeführt, d.h. sie sind drehbar gelagert und werden mit einer Feder gegen den Kollektor gedrückt. Das System mit Bürste, Lagerung, Feder und Litze ist ziemlich aufwändig in der Fertigung.

Die Bürste selber besteht bei den kleinen DC-Motoren nur zu etwa 50% aus Graphit. Die andere Hälfte ist Kupfer, um die Leitfähigkeit der Bürste zu erhöhen. Sonst würde ein grosser Teil der Motorspannung über der Bürste abfallen und nicht über der Wicklung.

Der Kollektor ist eine Legierung, die grösstenteils aus Kupfer besteht. Die Kollektoroberfläche wird überdreht, um den Rundlauf sicherzustellen und andererseits eine gewisse Rauigkeit zu erzeugen. Die Oberflächenrauigkeit ist wichtig zur Bildung der Patina, der bräunlichen Oberflächenschicht aus Kupferoxid, Graphit, Wasser, ...

Graphitbürsten auf Kupferkollektor ist ein bewährter Gleitkontakt, der in vielen Gebieten und bei vielen Motoren eingesetzt wird. Er eignet sich besonders für grosse Stromdichten, weil damit die Oxidschicht an der Kollektoroberfläche leicht durchbrochen werden kann. Der Kontaktwiderstand ist in diesen Fällen klein. Da zwischen Bürste und Kollektor sowieso eine Entladung aufbauen sollte, sind Graphitbürsten nicht sehr empfindlich auf Funkenbildung.

## DC Kommutierungssysteme



### Graphit

- Graphitbürste mit 50% Kupfer
- Kupfer reduziert den Kontakt- und Bürstenwiderstand
- Kupferkollektor
- Graphit dient als Schmiermittel
- Federsystem (schematisch)

### Edelmetall

- Bronzebürste mit Auflage plattierter Silberkontaktfläche
- Silber-Kupfer-Kollektor
- kleinster Kontakt- und Bürstenwiderstand (50m $\Omega$ )
- CLL für hohe Lebensdauer

fortgesetzt

### Edelmetallbürsten

Für kleine Ströme und Spannungen sind Edelmetallbürsten besser geeignet. Der Gleitkontakt ist direkt zwischen Metall und Metall und weist einen extrem kleinen Kontaktwiderstand auf. Edelmetalle (meist Silber, selten Gold) werden verwendet um die Oxidation zu vermeiden.

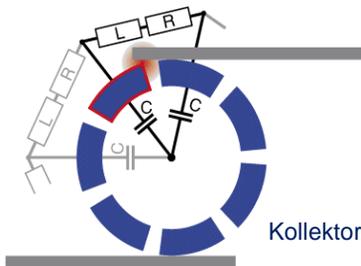
Die Bürste besteht meist aus einer Federbronze mit einem auflageplattierten Kontaktbereich aus Silber. Der Bürstenkörper dient gleichzeitig als Feder, was die Konstruktion sehr stark vereinfacht und verbilligt.

Der Kollektor ist eine Silberlegierung. Die Oberfläche wird überschleifen und poliert. Edelmetallbürsten sind nicht geeignet für hohe Spannungen und Ströme. Funkenbildung verkleinert die Lebensdauer sehr stark. (Dies hat mit der relativ tiefen Schmelztemperatur der Silberlegierungen und den kleinen Abmessungen und Schichtdicken zu tun). Die Funkenbildung wird deshalb durch eine kapazitive Funkenlöschung mittels CLL-Scheibe unterdrückt (siehe unten). Als zusätzliche, die Lebensdauer verlängernde Massnahme werden Edelmetallbürsten geschmiert.

### Edelmetall-Kommutierung: CLL

#### Problem

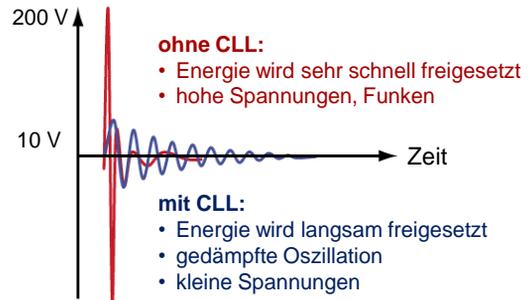
- Bürstenfeuer verkürzt Lebensdauer



#### Lösung

- Kapazität zwischen benachbarten Kollektorsegmenten
- Energie wird in Kondensator umgeleitet: keine Funken

Spannung zwischen den Kollektorsegmenten

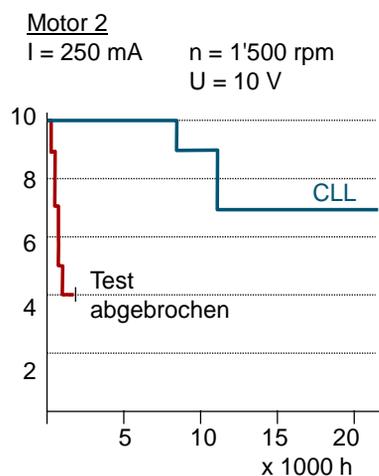
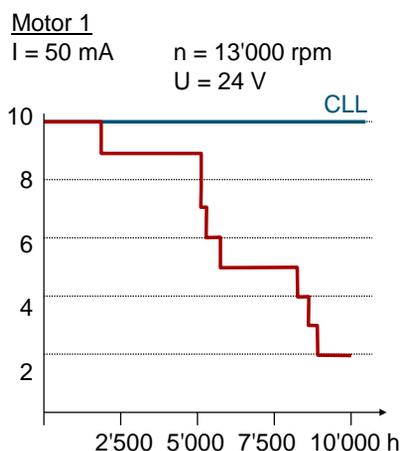


Wie wir schon gehört haben ist die Edelmetallkommutierung sehr empfindlich auf Bürstenfeuer. Diese Funken können beim Kommutierungsvorgang entstehen, wenn der Kontakt zwischen Kollektorlamelle und Bürste gelöst wird. Die Wicklung ist eine induktive Last und der Strom möchte weiterfließen. Funken entstehen aber auch, wenn bei höheren Drehzahlen die Bürste zu Schwingungen angeregt wird und die Bürste kurzzeitig abhebt.

Eine Lösung für das Problem ist die kapazitive Funkenlöschung. Über dem zu öffnenden Kontakt wird parallel ein Kondensator aufgebracht, der die Energie zwischenspeichert. Später kann die Schaltenergie in den Widerständen abgebaut werden. Dies ist im Wesentlichen die Aufgabe des CLL-Konzepts, das meist als Scheibe zusätzlich auf den Kollektor aufgebracht und mit den Wicklungsabzapfungen kontaktiert wird.

Rechts eine schematische Darstellung der am Kollektor auftretenden Spannungen. Sie beruht auf Simulationsrechnungen. Grau hinterlegt ist die Phase, wenn zwei benachbarte Kollektorlamellen durch die Bürste kurzgeschlossen sind. Meist kann in dieser Zeit der Strom nicht vollständig abklingen und beim Öffnen des Kontakts entsteht ein hoher Spannungspuls, der durchaus mehrere 100 V betragen kann (rote Kurve) und zu einer Entladung führt. Mit CLL-Scheibe wird die Energie in den Kondensator umgeleitet und danach langsam als gedämpfte Schwingung vernichtet (blaue Kurve). Die auftretenden Spannungen überschreiten im Idealfall die Grenze von 12V nicht, sodass keine Entladung auftreten kann.

## Lebensdauer und CLL (Beispiele)



CLL steht für "Capacitor Long Life", also Langes Leben dank einer Kapazität. Dass dem tatsächlich so ist, zeigen diese beiden schon älteren Vergleichstests zur Lebensdauer.

Rot ist jeweils die Anzahl "überlebender" Motoren ohne CLL dargestellt  
 Blau die Anzahl der Motoren mit CLL

Links für den Fall einer eher kleinen Strombelastung

Viele Motoren ohne CLL sind nach ca. 5000 Stunden Betrieb ausgefallen. Einer sogar bedeutend früher.

Mit CLL haben alle 10 Motoren nach 10'000 Stunden noch funktioniert

Rechts für den Fall einer höheren Strombelastung

Generell sieht man, dass der Motorstrom ein wichtiger Einflussfaktor auf die Lebensdauer von Edelmetallbürsten ist.

ohne CLL war die Lebensdauer sehr kurz, im Bereich von weniger als 1000 Stunden.

mit CLL dauerte es doch ca. 8000 Stunden bis der erste Motor ausgefallen ist.

### DC-Kommutierung: Eigenschaften

#### Graphit

- + hohe Ströme und Stromspitzen
- + Dauerbetrieb, Start-Stopp- und Reversierbetrieb
- + grössere Motoren (ab ca. 10W)



- ungeeignet für kleine Ströme
- höhere Reibung, höherer Leerlaufstrom

#### Edelmetall

- + kleinste Ströme und Spannungen
- + Dauerbetrieb
- + kleinere Motoren
- + sehr kleine Reibung



- + weniger Geräusch und tiefe elektromagnetische Emission
- + günstiger Preis
- ungeeignet für grosse Ströme, Stromspitzen, Start-Stopp-Betrieb

Fassen wir die Eigenschaften der beiden Bürstensysteme zusammen.

Graphitkommutierung ist besser geeignet für hohe Ströme und Stromspitzen, wie sie im Start-Stopp-Betrieb auftreten. Grosse Motoren haben in der Regel höhere Ströme, weshalb Motoren ab ca. 10 Watt Leistung nur mit Graphitbürsten erhältlich sind.

Edelmetallbürsten finden sich bei den kleinsten Motoren. Sie sind speziell gut geeignet für kleinste Ströme und Spannungen. Edelmetallbürsten haben eine sehr kleine Reibung, erzeugen wenig Geräusch und sind dank der CLL-Technologie sehr gut entstört.

Die Auswahl zwischen Graphit- und Edelmetallbürsten hat man im Durchmesserbereich von 13 bis 26mm. Grössere Motoren haben nur Graphitbürsten, kleinere nur Edelmetallbürsten.

## Lager: Vor- und Nachteile

### Kugellager

- + geeignet für höhere Radial- und Axiallasten
  - + geeignet für alle Betriebsarten, auch für Start-Stopp- und Reversierbetrieb
  - + grössere Motoren
  - + Keramiklager für höchste Drehzahlen
- 
- mehr Geräusche, speziell wenn nicht vorgespannt
  - bei Vorspannung höhere Reibung, Verluste
  - teurer

### Sintergleitlager

- + geeignet für kleine Radial- und Axiallasten
  - + geeignet für Dauerbetrieb bei hohen Drehzahlen
  - + kleinere Motoren
  - + sehr wenig Reibung und Geräusch
  - + günstiger Preis
- 
- weniger geeignet für Start-Stopp-Betrieb

Zum Abschluss noch einige Hinweise zur Lagerung.

Häufig kann man neben der Kommutierungsart auch den Lagertyp wählen.

Grundsätzlich gilt, dass bei höheren Belastungen und Anforderung die teureren Kugellager besser geeignet sind.

Häufig findet man Sinterlager in Anwendungen, in denen auch Edelmetallbürsten besser geeignet sind. Dasselbe gilt für die Kombination von Kugellager und Graphitbürsten.

### Lebensdauer DC Motoren

#### Lebensdauer

- keine allgemeingültige Aussage möglich
- mittlere Anforderungen
  - 1'000 - 3'000 Stunden
- Extrembedingungen
  - weniger als 100 Stunden
- günstige Bedingungen
  - mehr als 20'000 Stunden



Graphitbürsten und Kugellager für extreme Anforderungen

#### beeinflussende Faktoren

- elektrische Last:
  - höhere Ströme = höhere Elektroerosion (Bürstenfeuer)
- Drehzahl:
  - höhere Drehzahl = höhere mechanische Abnutzung
- Betriebsart:
  - Dauerbetrieb vs. Start-Stopp-Betrieb
  - Umkehrbetrieb = reduzierte Lebenserwartung
- Temperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Belastung der Welle (Lagerung)

Zur Lebensdauer des maxon DC Motor:

Das Bürstensystem ist in den allermeisten Fällen die Komponente, welche die Lebensdauer einschränkt. Selten die Lagerung.

Jeder Anwendungsfall ist anders und die Lebensdauer kann sehr stark streuen. Deshalb lässt sich keine verlässliche Lebensdauerangabe machen und schon gar nicht garantieren. Unsere Erfahrung zeigt, dass bei durchschnittlichen Anforderungen einige 1000 Stunden erreicht werden können.

Bei günstigen Bedingungen (z.B. Dauerbetrieb bei geeigneter Last) sind aber auch schon 20'000 Stunden und mehr erreicht worden.

Bei extremen Bedingungen (z.B. hohe Vibration, extremer Überlast- und Reversierbetrieb) kann der Motor aber auch schon nach weniger als 100 Stunden ausfallen.

Entscheidend ist, dass man sich überlegt, wie gross die Lebensdauer in der Anwendung sein soll, ausgedrückt in Stunden oder manchmal auch in Arbeitszyklen. Dazu der Hinweis, dass mit Graphitbürsten in verschiedenen Anwendungen mehrere Millionen Arbeitszyklen erreicht wurden.