



maxon DC motor
Permanentmagnet erregter
Gleichstrommotor mit eisenloser Wicklung

- **Aufbau, Eigenschaften**
- **Stator: Magnetischer Kreis**
- **Rotor: Wicklung und Stromverteilung**
- **Funktionsweise**
- **Kommutierung: Graphitbürsten, Edelmetallbürsten**
- **Lebensdauer, Lager**

© 2010 maxon motor ag, Sachseln, Schweiz

maxon motor
driven by precision

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.
- Der zweite Teil behandelt den permanent magnetischen Kreis des Stators und grundlegende Eigenschaften der verwendeten Magnetmaterialien
- Im dritten Teil wird die eisenlose Wicklung und der Stromfluss in der Wicklung näher angeschaut.
- Anschliessend betrachten wir die Wechselwirkung von Strom und Magnetfeld und die Einflussfaktoren.
- Im fünften Teil wird das Prinzip der Kommutierung vorgestellt und auf die Unterschiede zwischen Graphit- und Edelmetallbürsten eingegangen.
- Zum Schluss noch einige Bemerkungen zur Lebensdauer und einige wenige Ergänzungen zu Sinter- und Kugellager

Teil 1: DC-Motorbauformen

konventionell, genutet
z.B. Dunkermotoren

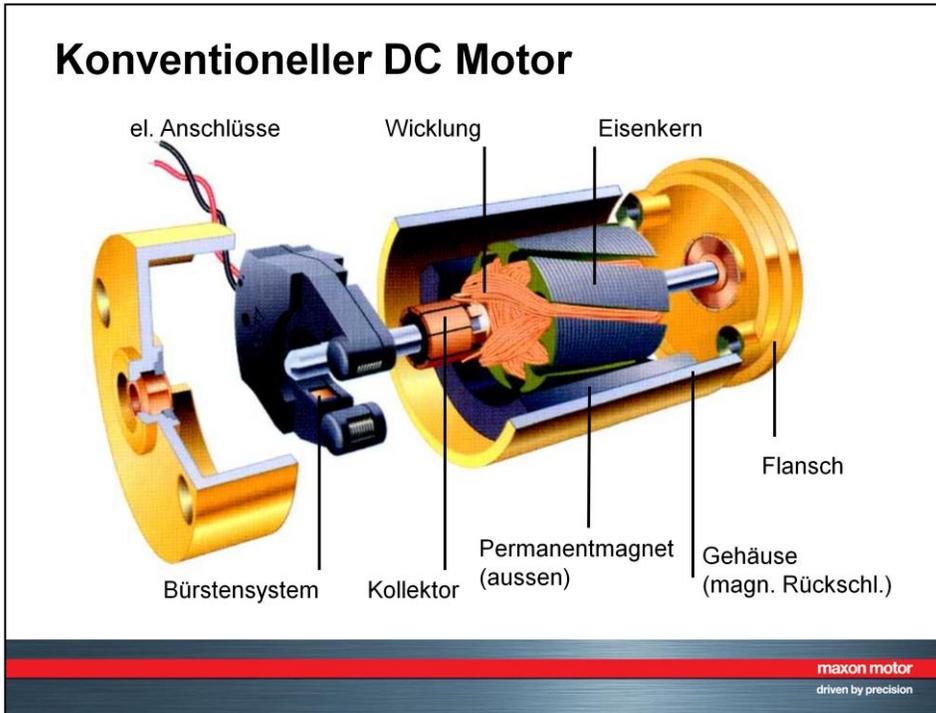


eisenlos
z.B. maxon

maxon motor
driven by precision

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.

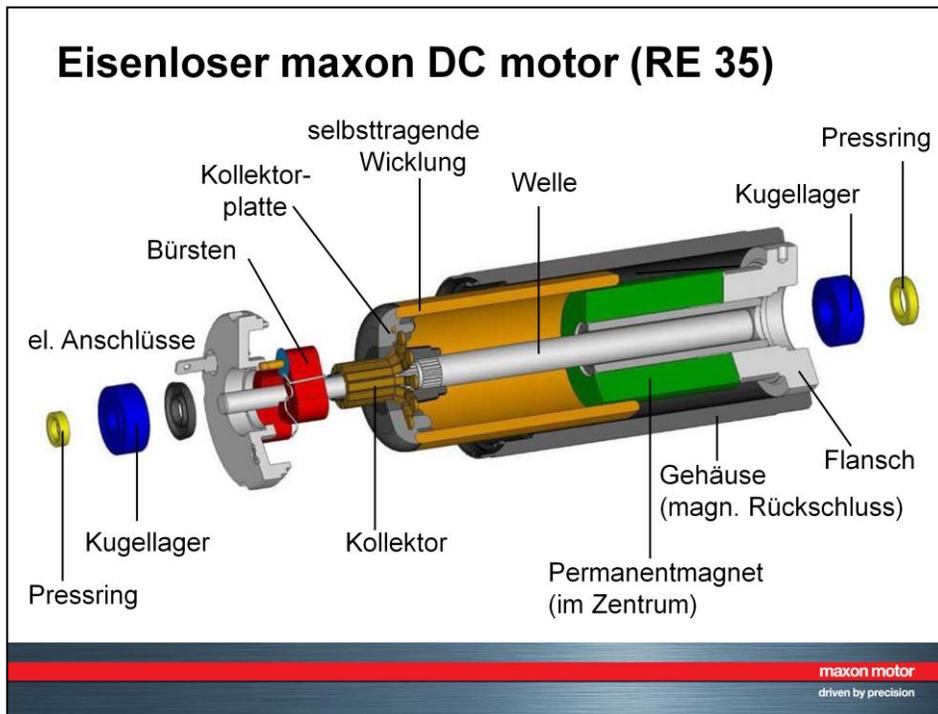


Betrachten wir einen konventionellen Gleichstrommotor, so erkennen wir folgende Hauptbestandteile

- Den **Stator** mit den aussen angeordneten Permanentmagnet-Schalen, mit dem Gehäuse, das gleichzeitig zur Führung des magnetischen Flusses dient, und mit dem Flansch zur Montage
- Den **Rotor** mit Wicklung und Eisenkern, die auf der Welle angebracht sind. Die Welle ist mit Kugel- oder Gleitlager im Stator gelagert. Ebenfalls zum Rotor gehört der Kollektor, auf dem die Bürsten laufen und welcher den elektrischen Kontakt zur Wicklung darstellt.
- Dem **Bürstensystem** mit den elektrischen Anschlüssen des Motors.

Ergänzungen zum konventionellen Motor:

- Konventionelle Motoren weisen ein Rastmoment auf. Das Rastmoment beschreibt die Eigenschaft, dass das Drehmoment eine Welligkeit aufweist, die daher kommt, dass die Zähne des Eisenkerns von den Magnetpolen magnetisiert und angezogen werden. Will man den Motor drehen, muss zuerst die Magnetisierung des Eisenkerns einen Zahn weitergeschaltet werden. Als Resultat möchte der Rotors nur an bestimmten Stellen anhalten, was eine präzise Positionsregelung erschweren kann. Das Rastmoment führt zu zusätzlichen Vibrationen und Geräuschen. Der Eisenkern kann zur Reduktion des Rastmoments schräg genutet sein, wie in diesem Bild.
- Der Permanentmagnet ist aussen angebracht, meist in Form von zwei entgegengesetzt magnetisierten Halbschalen. Typisches Magnetmaterial ist Ferrit oder seltener kunststoffgebundene Seltener-Erden-Magnete.
- Die Wicklung mit Eisenkern weist eine hohe Masse auf, was einerseits die Dynamik des Motors einschränkt, andererseits eine hohe thermische Belastbarkeit ermöglicht. Es dauert länger bis die Wicklung sich erwärmt und sie ist bei hohen Temperaturen mechanisch stabiler.



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 (hier grün dargestellt), aus 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 rot dargestellten Graphitbürsten und den elektrischen Anschlüssen des Motors.

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

Vorteil eisenlos: kein Rastmoment

- keine weichmagnetischen Zähne, die mit dem Permanentmagnet wechselwirken
- ruckfreier Lauf auch bei kleinen Drehzahlen
- weniger Vibrationen und Geräusche

- jede beliebige Rotorposition kann einfach geregelt werden
- keine Nichtlinearitäten im Regelverhalten

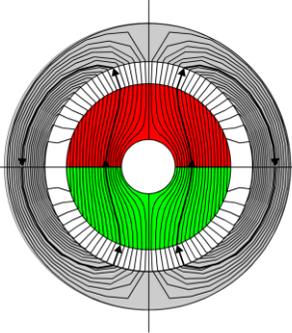
maxon motor
driven by precision

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.

Vorteil eisenlos: keine Eisenverluste

- kein Eisen – keine Eisenverluste
 - konstant eingeprägte Magnetisierung
 - hoher Wirkungsgrad, bis über 90%
 - tiefer Leerlaufstrom, typisch < 50 mA
 - gilt nicht für EC-Motoren
- 
- Keine Sättigungseffekte im Eisenkern
 - Selbst bei den grössten Strömen bleibt das erzeugte Drehmoment streng proportional zum Motorstrom.
 - Stärkere Magnete = stärkere Motoren

maxon motor
driven by precision

Eisenlose Gleichstrommotoren haben **keine Eisenverluste**.

Im konventionellen Design muss der Eisenkern ständig ummagnetisiert werden. Dies erfordert Energie, da die magnetische Hystereseurve bei jeder Motorumdrehung durchlaufen werden muss. Zusätzlich induziert diese zeitliche Änderung des Flusses Wirbelströme, die sich als quadratisch mit der Drehzahl wachsende Verluste manifestieren.

Im Gegensatz dazu ist im eisenlosen Motor die Magnetisierung im gesamten Magnetkreis fest eingeprägt. (Der Einfluss des Feldes der Wicklung darf in erster Näherung vernachlässigt werden.) Damit entfallen die Eisenverluste. Als Resultat ergibt sich eine kleinere Verlustleistung, was sich als **höherer Wirkungsgrad** oder als **tieferer Leerlaufstrom** niederschlägt.

In der eisenlosen Konstruktion kann auch **keine Sättigung** an den Engstellen des Eisenkerns (den Stegen der Zähne) auftreten. Somit bleibt einerseits das **Drehmoment streng proportional zum Strom** und es können die stärksten Permanentmagnete eingesetzt werden, ohne durch den Eisenkern im maximal möglichen Fluss eingeschränkt zu sein. Fortschritte in der Magnettechnologie führen damit zu **stärkeren Motoren**.

Vorteil eisenlos: kompakte Baugrösse

- effizienteres Design des Magnetkreises
(auch wenn Luftspalt tendenziell grösser)
 - kompakter Magnet im Zentrum
 - höheres Verhältnis Leistung zu Volumen

- kleine Massenträgheit des Rotors
 - Hohlzylinder gegenüber Vollzylinder
 - hohe Dynamik
 - typische Hochlaufzeiten: 5 – 50 ms

maxon motor
driven by precision

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.

Vorteil eisenlos: kleine Induktivität

- weniger Bürstenfeuer
 - Kommutierung: Schliessen und Öffnen eines Kontaktes über einer induktiven Last
- höhere Lebensdauer
- weniger elektromagnetische Störungen
- leichter zu entstören:
 - Kondensator an den Anschlüssen
 - Ferritkern an Zuleitungen

- schnelle Reaktionszeit des Stromes
 - problematisch bei getakteter Bestromung (Pulsweitenmodulation PWM)
 - Drossel ?

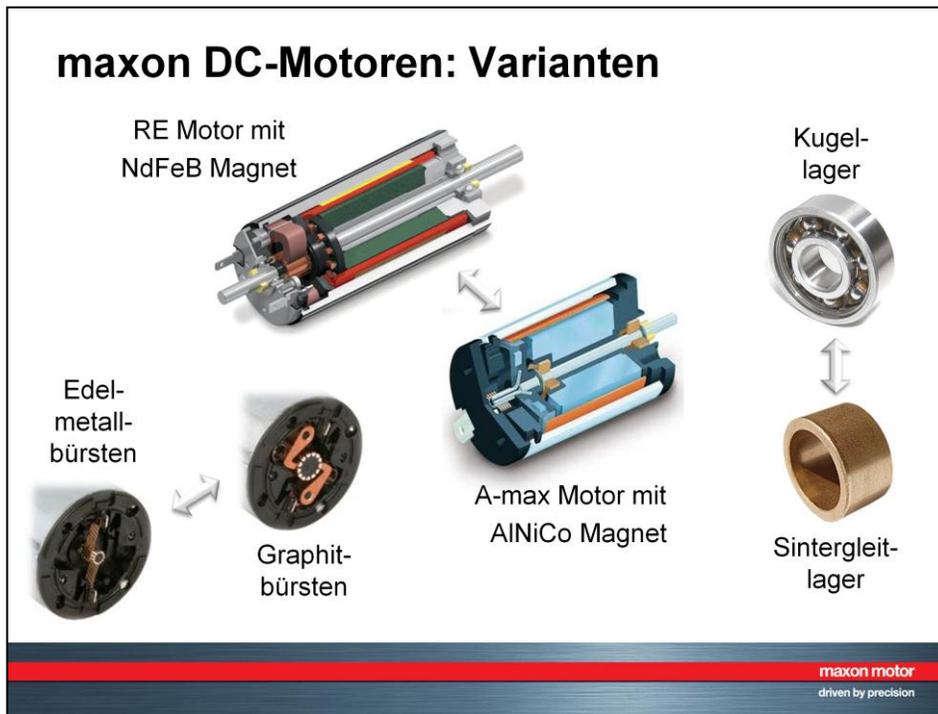
maxon motor
driven by precision

Elektrisch gesehen bedeutet das Fehlen des Eisenkerns, dass die **Induktivität der Wicklung** viel kleiner ist. In der Wicklung ist weniger magnetische Energie gespeichert, die beim Kommutierungsvorgang von einer Teilwicklung auf die nächste geschaltet werden muss. 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**.
- Die reduzierte Funkenbildung hat auch **weniger elektromagnetische Störfelder** zur Folge. 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 hat aber auch zur Folge, dass der Motorstrom extrem schnell reagiert. 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 für die tiefe Induktivität kann eine **Motordrossel** (eine Zusatzinduktivität in Serie zum Motor nötig sein). maxon Regler, die speziell für die niederinduktiven maxon Motoren konzipiert sind, haben diese Drossel meist schon eingebaut.



Wie **unterscheiden** sich die verschiedenen maxon Motoren?

Grundsätzliche Variationsmöglichkeiten

- Verschiedene **Magnetmaterialien**: AlNiCo, NdFeB, Ferrit, ...
- **Kommutierung**: Edelmetallbürsten oder Graphitbürsten
- **Lagerung**: Sintergleitlager oder Kugellager

Die Motorfamilie ergibt sich dabei aus dem verwendeten Magnetmaterial: z.B. RE-Motoren haben NdFeB-Magnete.

Je nach Verwendungszweck und Leistung kann jeder Motortyp aber grundsätzlich mit beiden Lagerungstypen oder Bürstenarten ausgestattet sein.

maxon DC Motorfamilien

■ RE Programm

- leistungsoptimiert
- hochwertiger DC-Motor mit NdFeB-Magnet
- hohe Drehzahlen und Drehmomente



■ A-max Programm

- gutes Preis-Leistungsverhältnis
- DC-Motor mit AlNiCo-Magnet



■ RE-max Programm

- Performance zwischen RE und A-max



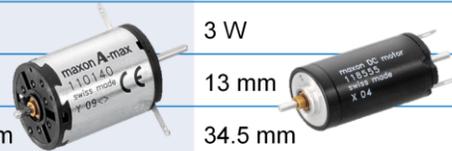
maxon motor
driven by precision

Diese Zusammenstellung zeigt eine Übersicht über die **maxon DC Motorfamilien**.

- Die **RE-Motoren** verwenden die Leistungsstärksten Neodym-Magnete. Die Konstruktion ist auf Leistungsoptimierung ausgerichtet. Es sind die DC-Motoren mit der höchsten Leistungsdichte (Kombination aus Drehmoment und Drehzahl) auf dem Markt. Robustes Design (Metallflansch), Zuverlässigkeit und für einen Bürstenmotor hohe Lebensdauer sind weitere Charakteristika.
- Die Philosophie der **A-max-Motoren** ist eine andere: Hier geht es um ein gutes Preis-Leistungsverhältnis. Die Motoren sind mit AlNiCo-Magneten ausgerüstet und haben eine kleinere Leistungsdichte. Der Flansch ist aus Kunststoff, die Produktion zu einem hohen Masse automatisiert. A-max-Motoren kommen typisch in OEM-Geräten zum Einsatz.
- Beim **RE-max-Motor** wird die rationelle Fertigung und Konstruktion der A-max-Motoren mit der höheren Leistungsdichte der Neodym-Magnete zu kombiniert. Das Resultat ist ein Motor, der von der Performance und dem Preis zwischen dem A-max- und dem RE-Programm liegt.
- Neben diesen drei aktuellen Motorfamilien gibt es noch ältere Designs, die sich **S-, A- oder F-Programm** nennen.

maxon DC Motorfamilien im Vergleich

Permanentmagnet	AlNiCo	NdFeB
Motorprogramm	A-max, S, A	RE, RE-max
Motorbeispiel	A-max 19 GB	RE 13 GB
Kennliniensteigung	1150 min ⁻¹ /mNm	1250 min ⁻¹ /mNm
Typenleistung	2.5 W	3 W
Durchmesser	19 mm	13 mm
Länge	31.5 mm	34.5 mm
Motorgrösse	8.9 cm ³	4.6 cm ³
Dauerdrehmoment	3.8 mNm	2.4 mNm
Umgefährer Preis	≈ 50.- CHF	≈ 100.- CHF



DC Motoren - Varianten

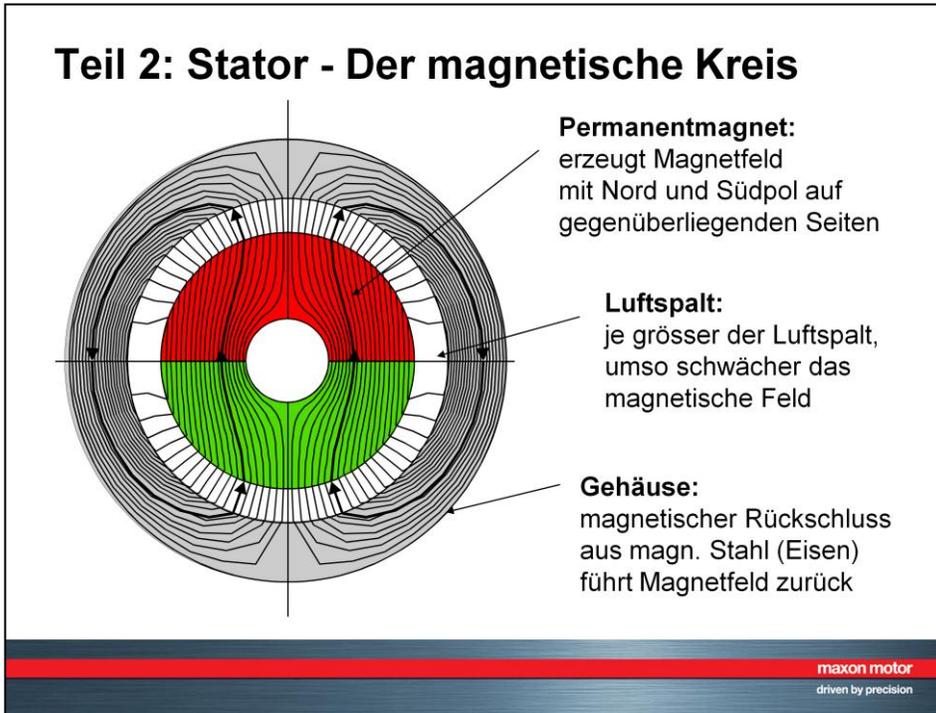
maxon motor
driven by precision

Wie wirkt sich die Wahl des Permanentmagneten auf die Motorgrösse aus?

Zu diesem Zweck vergleichen wir zwei ungefähr gleichstarke Motoren (ähnliche Leistung und ähnliche Kennliniensteigung) aus den verschiedenen maxon Motorprogrammen.

- **A-max-Motor.** AlNiCo-Magnete waren die ursprünglichen Magnete, die in eisenlosen Motoren eingesetzt wurden. Sie werden nun mehr und mehr durch die stärkeren Neodym-Magnete verdrängt. Die A-max-Philosophie beruht auf einem kostengünstigen Design, unter anderem durch den Einsatz von Kunststoff. Man erhält die Leistung hier auf einem Durchmesser von 19mm.
- **RE-Motor.** Hier werden die leistungsstärksten Neodym-Magnete verwendet. Entsprechend ist der Durchmesser mit 13mm kleiner. Allerdings zu höheren Kosten.

Die eisenlose Technologie hat gegenüber einem konventionellen, eisenbehafteten Motor eine deutlich höheren Aufwand für Magnetmaterial und Herstellung zur Folge. Eisenlose Motoren sind daher meist teurer. Typische Einsatzgebiete für eisenlose Motoren sind Anwendungen mit beschränktem Platzbedarf (Kleingerätebau), mit kleinem Gewicht (z.B. Luft- und Raumfahrt) und mit hohen Lebensdaueranforderungen (Produktionsmittel, Medizintechnik).

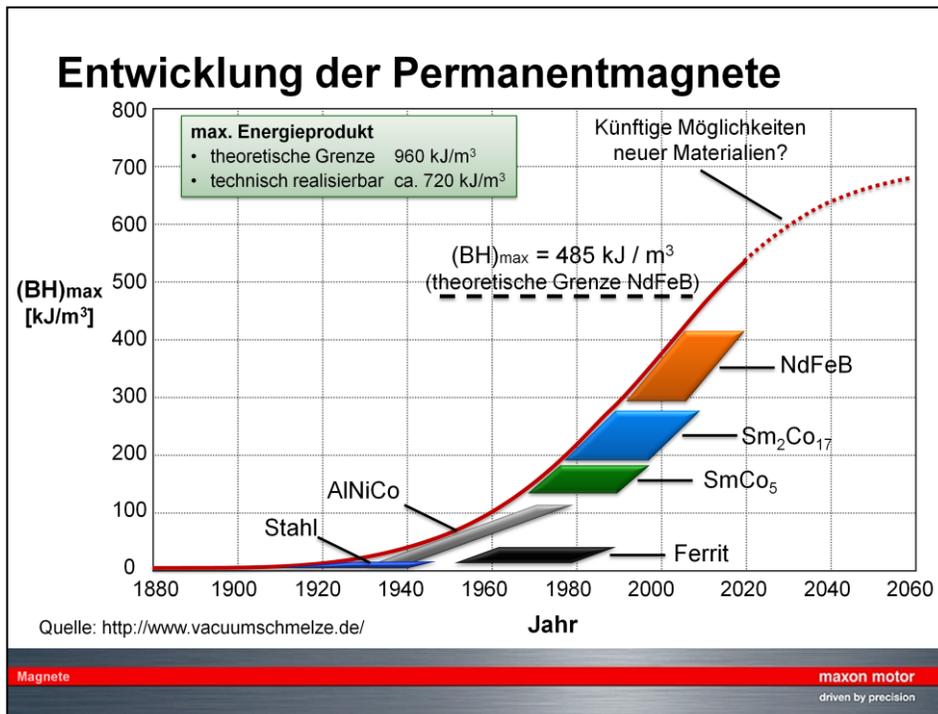


Nach dieser grundlegenden Einleitung, wollen wir nun die magnetischen Kreis im Stator etwas genauer betrachten.

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. Man sieht, 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.



Ein Wort zu den **Magnetmaterialien**.

Was wir in dieser Darstellung sehen ist die **Entwicklung der Energiedichte** von Permanentmagneten im letzten Jahrhundert.

- Das ganze begann mit magnetischen Stählen, aus denen sich die um die Mitte des Jahrhunderts AlNiCo als stärkster Magnet entwickelte. Durch verbesserte Herstellverfahren konnte in den 60er Jahren eine interne magnetische Struktur, eine Vorzugsrichtung erzeugt werden. Was das Energieprodukt weiter steigerte. Dieses Material war zusammen mit den Ferriten die Grundlage für die Entwicklung kleiner Permanentmagnet erregter Gleichstrommotoren. Die höhere Energiedichte des anisotropen AlNiCo gegenüber den Ferriten spiegelte sich in der grösseren Leistungsdichte der eisenlosen Motoren verglichen mit konventionellen DC-Motoren wider.
- In den 70er Jahren erschienen die ersten Selten-Erde-Magnete auf der Basis von Samarium und Cobalt. Sie waren bedeutend Leistungsstärker als die AlNiCo. In den 80er Jahren kamen dann die noch kräftigeren Neodym-Eisen-Bor-Magnete auf den Markt. Nur eisenlose DC-Motordesigns können diese extrem starken Magnete wirklich ausnützen und ergeben die hohen Leistungsdichten der eisenlosen Motoren.

Um Magnete wirksam einsetzen zu können, ist die Leistungsdichte aber nur ein Parameter.

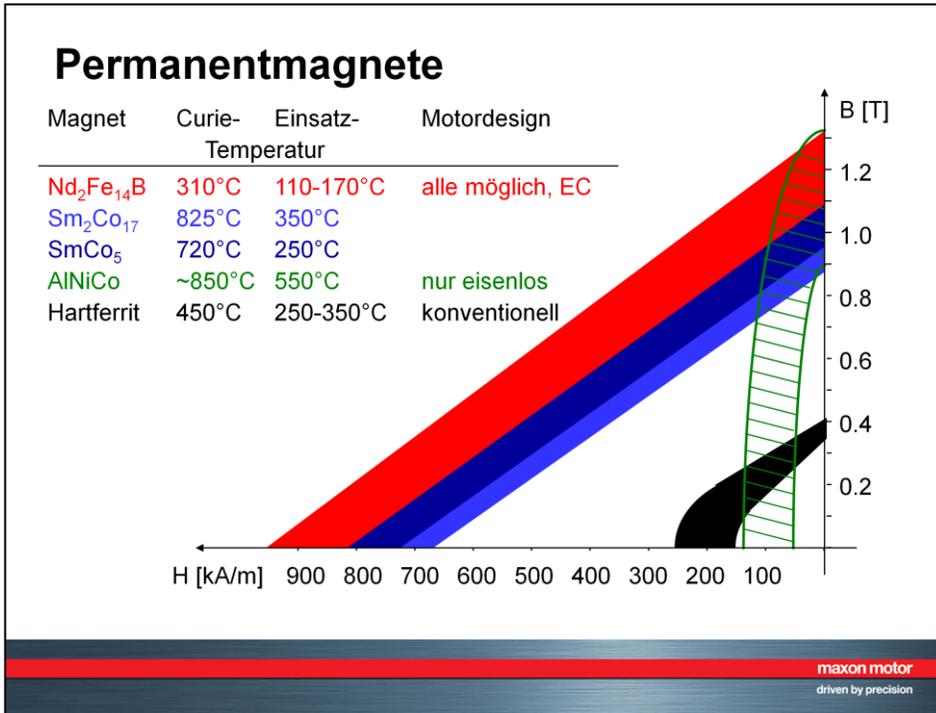
- Die Magnete müssen auch ohne allzu grossen Aufwand magnetisiert werden können.
- In Motoren müssen die Magnete die Wärme ertragen, ohne an Leistung einzubüssen oder sich gar irreversibel zu verändern.
- Mechanische Stabilität, Verarbeitbarkeit und Korrosionsbeständigkeit sind weitere wichtige Parameter.
- Und natürlich die Kosten. In Gleichstrommotoren können die Kosten für den

maxon DC motor

Gleichstrommotor mit eisenloser Wicklung
Magneten bis 40% betragen.



Neue, stärkere Materialien, die sich vernünftig herstellen und verarbeiten lassen, sind gegenwärtig nicht auszumachen. Die Entwicklungen laufen in die Richtung der Verbesserung der thermischen und chemischen Stabilität der bestehenden Magnete und der Optimierung der Remanenz.



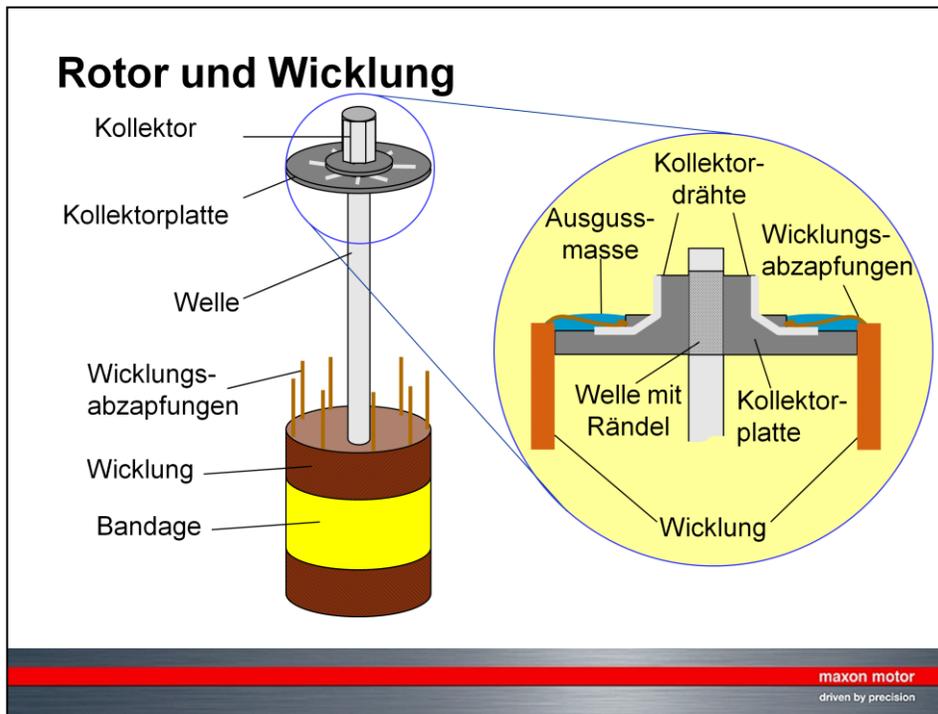
Diese Darstellung zeigt die Gebiete, in denen die typischen **Entmagnetisierungskennlinien der Magnetmaterialien** verlaufen.

Nach oben ist die **Magnetisierung** (genauer die magnetische Induktion B) aufgetragen, nach links das äussere entgegen gerichtete **Entmagnetisierungsfeld H**. Grundsätzlich nimmt die Magnetisierung mit steigendem H-Feld ab.

- Die Magnetisierung ohne äusseres H-Feld heisst Remanenz. Sie gibt Auskunft, wie stark sich ein Material magnetisieren lässt. Man erkennt, dass AlNiCo und NdFeB eine sehr hohe Remanenz von über 1.2 Tesla haben können.
- Das Feld, bei dem die Magnetisierung oder die magnetische Induktion verschwindet, heisst Koerzitivfeld. Man erkennt, dass die Seltenerde-Magnete ein sehr hohes Koerzitivfeld haben, also sehr schwer zu entmagnetisieren sind.

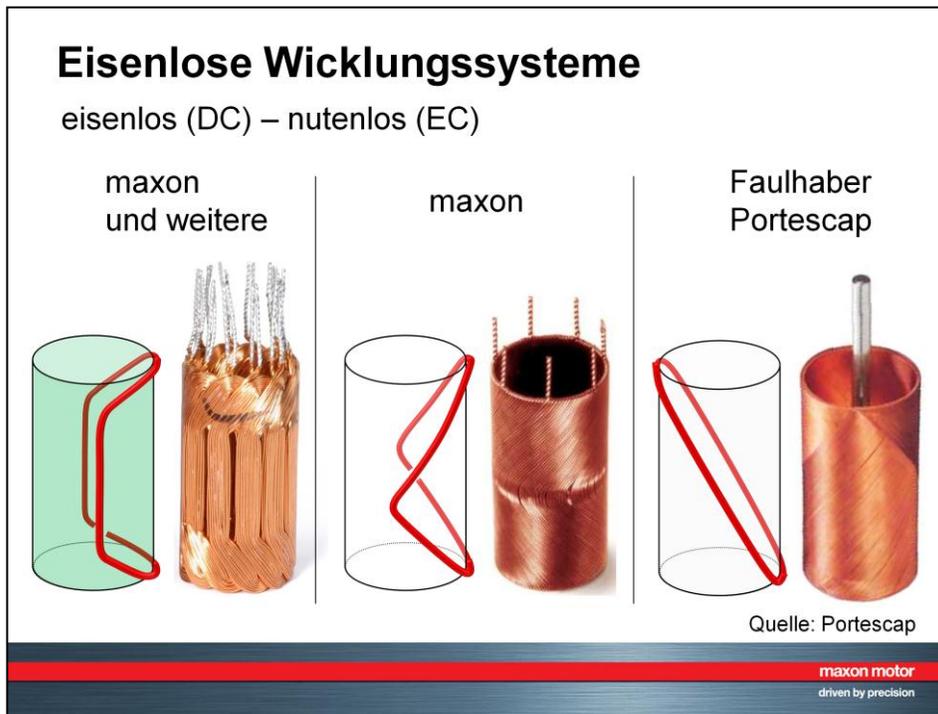
Eine Vergrößerung des Luftspalts im Motor hat einen ähnlichen Einfluss wie ein steigendes Entmagnetisierungsfeld. In AlNiCo-Motoren mit der extrem steilen Entmagnetisierungskennlinie sind deshalb nur schmale Luftspalte zulässig, will man eine vernünftige magnetische Induktion im Luftspalt beibehalten. Entsprechend muss die eisenlose Wicklung eine dünne Wandstärke haben.

Bei RE-Motoren kann man den Luftspalt bedeutend grösser wählen. Die Wicklung ist dann auch dicker und der Motor als ganzes wird stärker. (Diese Effekte illustrieren sehr schön, was hinter dem Begriff Energieprodukt der Permanentmagnete steckt)



Verlassen wir nun den Stator und betrachten wir wie der Rotor aufgebaut ist.

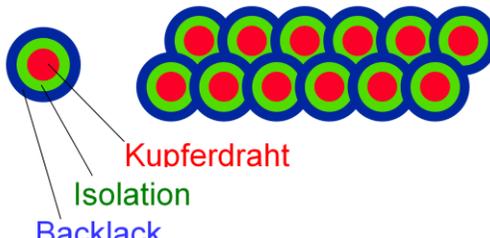
- Im Zentrum ist die **Welle** aus gehärtetem Stahl. Darauf wird die **Kollektorplatte** mittels Kunststoffspritzguss aufgebracht. In die Kollektorplatte sind die Kollektordrähte eingebettet.
- An der Aussenkante der Kollektorplatte ist die **freitragende Wicklung** angebracht. Die Kontakte der Wicklung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



Maxon ist nicht der einzige Hersteller von eisenlosen, freitragenden Wicklungen.

- Beim **System maxon** (hier in der Mitte dargestellt) verläuft die einzelne Drahtschleife in Form einer Raute.
- Beim **System Faulhaber** (rechts) wird der Draht diagonal auf einen Zylinder gewickelt.
- Für ganz lange Wicklungen kann es Sinn machen, einen **hexagonalen Drahtverlauf** zu wählen (links)

Wicklung: Backlackdraht



Kupferdraht
Isolation
Backlack

Kupferkern:

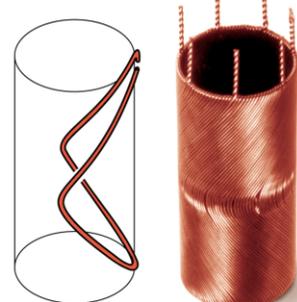
- guter elektrischer Leiter

Isolation:

- keine Kurzschlüsse

Backlack: Kunststoff mit Lösungsmittel

- bei höheren Temperaturen (130-150°C):
 - Kunststoff benachbarter Drähte verschmilzt.
 - Pressen formt die Wicklung in engen Toleranzen.
 - Lösungsmittel gast aus: Lack wird hart.
 - Ausbacken der Wicklung.

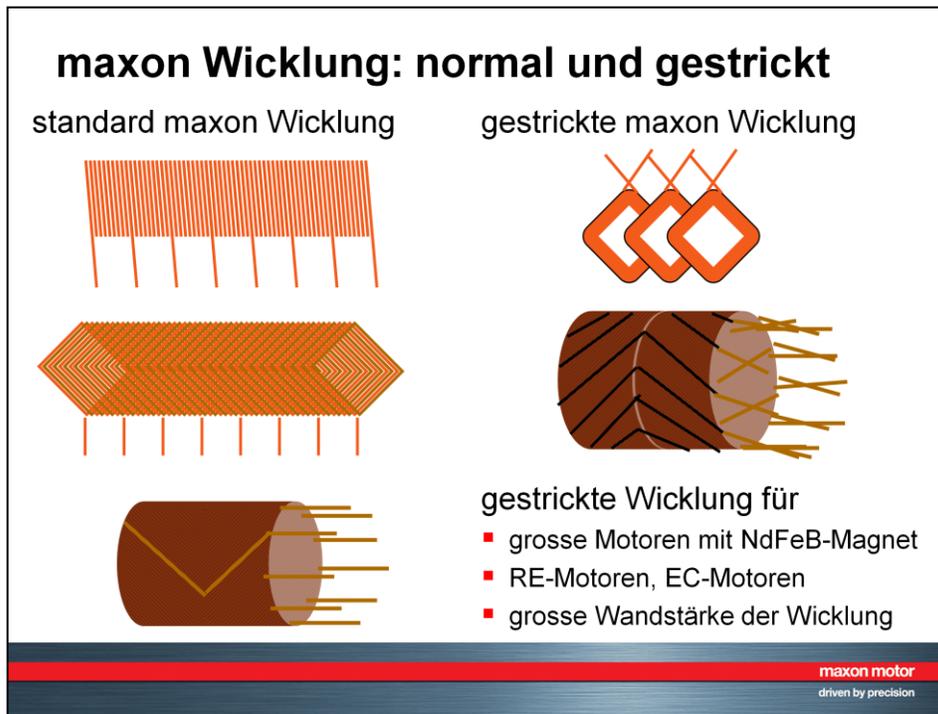


maxon motor
driven by precision

Frei tragende Wicklungen ohne Eisenkern werden aus einem so genannten **Backlackdraht** hergestellt. Der isolierte Kupferdraht ist aussen mit einer Backlackschicht überzogen. Während der Herstellung wird der Backlack benachbarter Drähte durch Temperatur und Druck miteinander verschmolzen.

Der Backlack ist ein Kunststoff, der ein Lösungsmittel enthält, sodass er im Anfangszustand weich und formbar ist. Im Verlauf des Herstellungsprozesses verflüchtigt sich das Lösungsmittel bei höheren Temperaturen und der Backlack wird hart. Daraus ergibt sich die nötige Stabilität und Festigkeit der Wicklung.

Formstabilität und Festigkeit der Wicklung werden durch eine **geeignete Bandage** (Klebeband oder Glasgarn) weiter erhöht. Dies ist vor allem bei höherer Strombelastung wichtig, wenn sich die Wicklung erwärmt und der thermoplastische Backlack weicher wird.

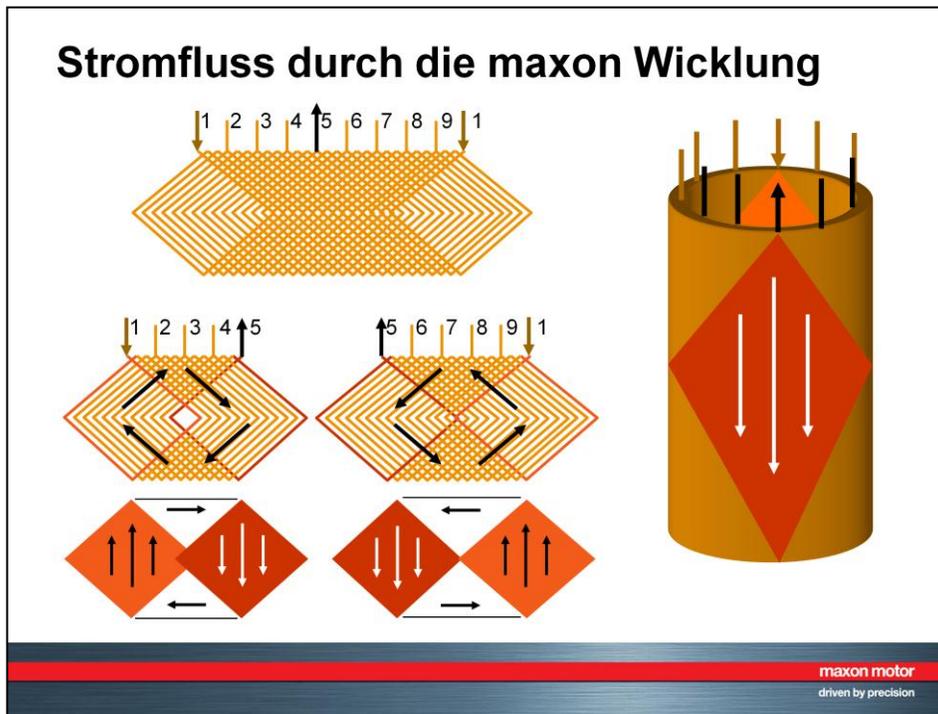


Bei maxon kommen zwei Herstellverfahren zur Anwendung:

Dünnwandige Wicklungen (z.B. für die schmalen Luftspalte in A-max-Motoren) werden in einem Stück produziert.

- Der Draht wird gewickelt und in regelmässigen Abständen werden die Abzapfungen nach aussen geführt.
- Dann wird die typische Rautenform erzeugt und das Band zum Zylinder gerollt.

Dickwandige Wicklungen (z.B. für die grossen Luftspalte in RE-Motoren) werden aus einzelnen Segmenten zusammengesetzt (oder "zusammengestrickt"). Dieses Verfahren ist viel aufwändiger.



Egal ob standard oder gestrickte maxon Wicklung: Die **Verteilung des Stromflusses** ist grundsätzlich dieselbe.

Darstellung rechts.

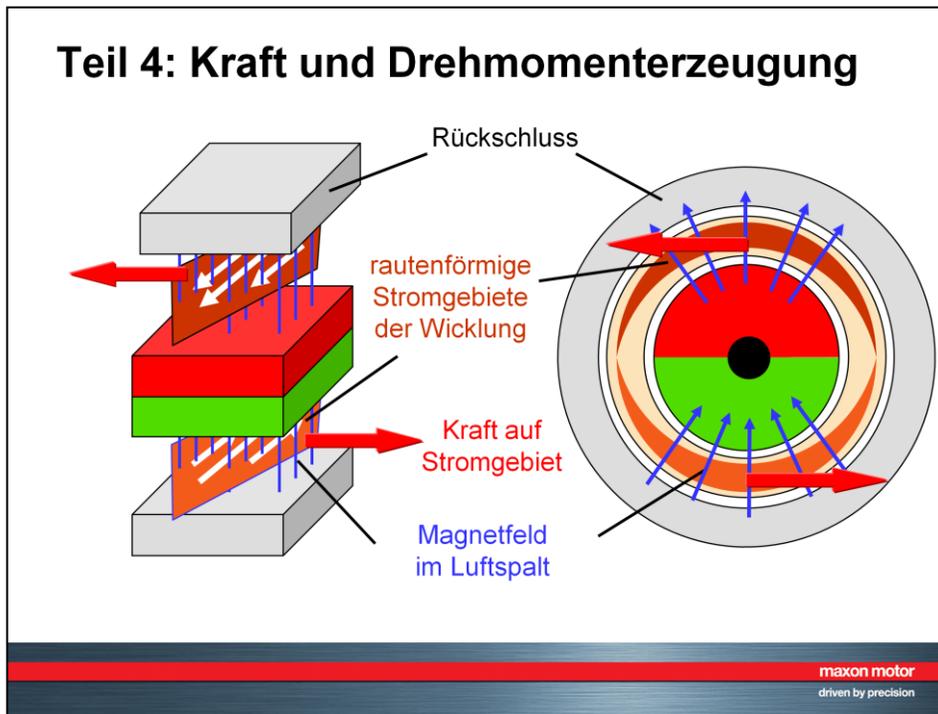
- Der Strom wird über die Bürste auf einer Seite in die Wicklung eingespeist. Dort teilt er sich auf; eine Hälfte des Strom fließt in der linken Seite der Wicklung, die andere Hälfte des Stroms auf der rechten Seite. Am gegenüberliegenden Kontakt vereinigen sich die beiden Teilströme und verlassen die Wicklung über die andere Bürste

Um den Stromfluss genauer zu analysieren betrachten wir die Darstellungen links.

- Wir können uns die Wicklung wieder 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.

Übrigens: Analysiert man den Stromfluss einer Faulhaber-Wicklung erhält man genau dieselben rautenförmigen Stromgebiete. Rein physikalisch gesehen sind die beiden Wicklungssysteme äquivalent.



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)

Drehmoment und Strom: k_M

Kräfte:
Kraft auf stromführende Leiter im Magnetfeld

Drehmoment:
Summe aller Kräfte im Abstand zu Drehachse

Einflussgrößen:
Geometrie
Flussdichte
Windungszahl
=> k_M = Drehmomentkonstante

$M = k_M \cdot I$

I = Strom

Konstruktion
Anwendung

maxon motor
driven by precision

Wir wollen hier kurz überlegen, von welchen **Faktoren** die Stärke des erzeugten Drehmoments abhängt.

- Das Drehmoment setzt sich aus der Summe aller Kräfte und dem Abstand zur Drehachse zusammen.
- Die Gesamtkraft ihrerseits ist proportional ...
 - zur Stärke des **magnetischen Induktion** B im Luftspalt
 - zur Länge der Wicklung und zur **Geometrie** der Strombelegung
 - zum **Strom** durch den einzelnen Draht
 - zur Anzahl der Drähte, d.h. zur **Anzahl der Windungen**
- Um ein möglichst grosses Drehmoment zu erhalten, müssen die rautenförmigen Stromgebiete möglichst bei den Polen des Permanentmagneten liegen.

Beim fertigen Motor ist die Geometrie, die Flussdichte und die Windungszahl der Wicklung vorgegeben. Der Anwender hat nur noch auf den Motorstrom einen Einfluss. Aus Anwendersicht gilt deshalb: Das erzeugte Drehmoment ist proportional zum Strom. Die Proportionalitätskonstante fasst alle konstruktiven Parameter zusammen. Sie heisst **Drehmomentkonstante k_M** .

Die Proportionalität zwischen Strom und Drehmoment beschreibt einen Teil der Leistungsumwandlung im Motor und bedeutet, dass **Strom und Drehmoment äquivalent** sind.

Drehzahl und Spannung: Drehzahlkonstante

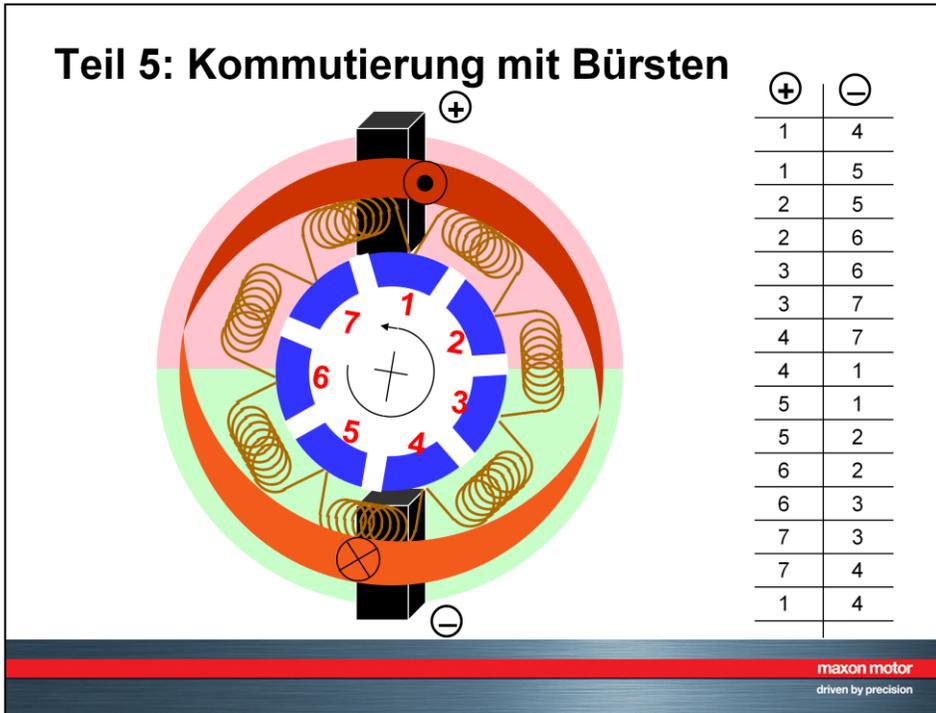
- rotierende Wicklung im Luftspalt
 - mit inhomogenem Magnetfeld
 - induzierte Spannung U_{ind} (EMK) hängt ab von
 - Geometrie
 - magnetischer Flussdichte
 - Anzahl Windungen
 - Drehzahl n
- } **Konstruktion**
- } **Anwendung**
- $n = k_n \cdot U_{\text{ind}}$
- Drehzahlkonstante k_n
 - umgekehrt proportional zu k_M
 - umgekehrt proportional zur Generatorkonstante (V/1000 rpm)

Der Vollständigkeit halber wollen wir hier noch eine zweite Motorkonstante kennenlernen. Die **Drehzahlkonstante** beschreibt den Zusammenhang zwischen Drehzahl und Spannung.

Physikalischer Hintergrund ist das **Induktionsgesetz**, das besagt: Wenn sich der magnetische Fluss durch eine Leiterschleife zeitlich ändert, wird eine der Flussänderung proportionale Spannung induziert. Im Motor bewegt sich die Wicklung im Luftspalt. Der magnetische Fluss ändert in jeder Umdrehung zweimal das Vorzeichen (er ist im Wesentlichen sinusförmig). Die gesamte Flussänderung hängt somit von der Anzahl und geometrischen Anordnung der Leiterschleifen, sowie von der Amplitude der Flussdichte ab. All dies ist konstruktiv vorgegeben und konstant.

Somit gilt am Ende: je schneller der Motor dreht umso grösser die zeitliche Flussänderung und umso grösser die induzierte Spannung. Die Proportionalität zwischen Drehzahl n und induzierter Spannung wird mit Hilfe der **Drehzahlkonstante** k_n ausgedrückt.

Eine tiefere Analyse würde zeigen, dass die Drehzahlkonstante der Kehrwert der Drehmomentkonstanten ist, ausgedrückt in anderen Einheiten.



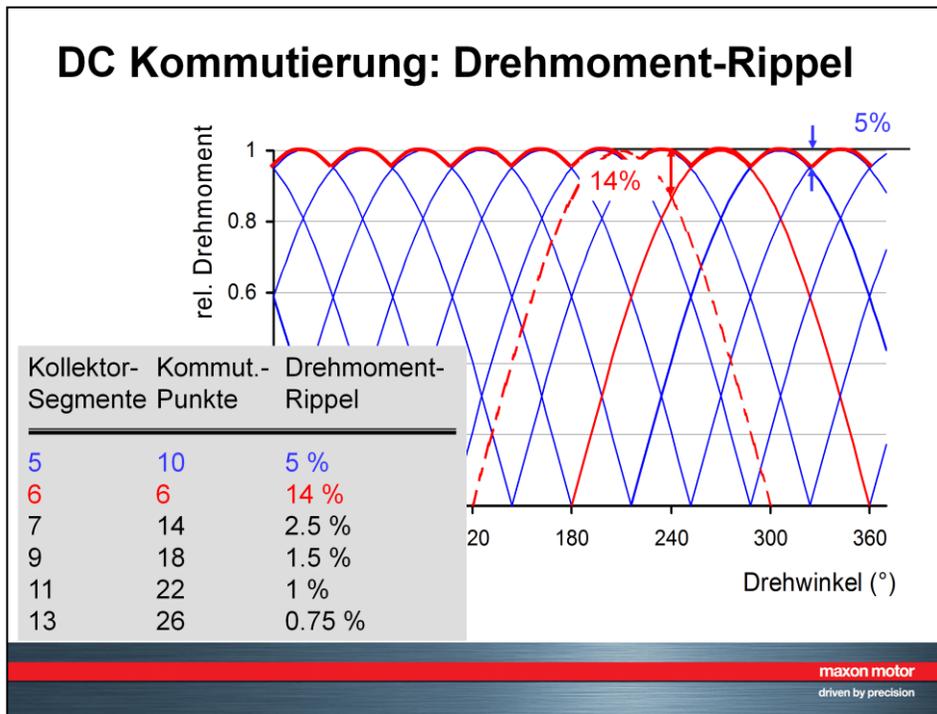
Nachdem wir nun wissen, wie das Drehmoment erzeugt wird, geht es jetzt darum eine kontinuierliche Drehbewegung zu erzeugen. Dazu benötigen wir das **Kommutierungssystem**.

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

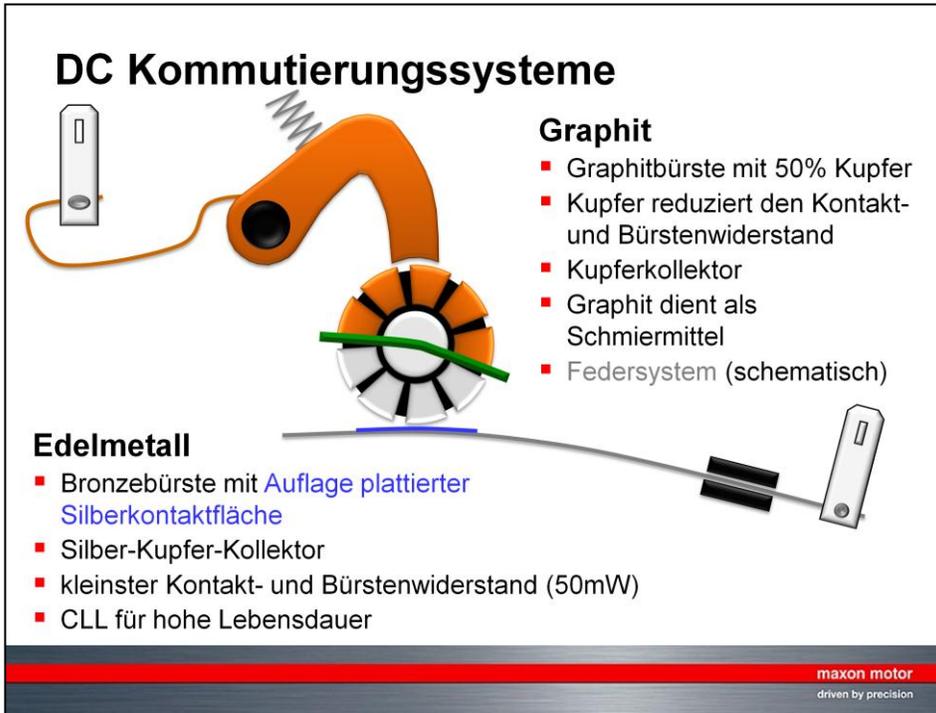


Theoretisch kann man den **Drehmomentrippel** aus der Anzahl Kollektorsegmente und Kommutierungspunkte ausrechnen.

In guter Näherung verläuft das Drehmoment für eine Kontaktsituation sinusförmig. Je mehr Kommutierungspunkte der Motor hat, umso mehr Sinuskurven müssen auf eine Motorumdrehung verteilt werden (für jede Kontaktierung eine) und umso weniger stark kann das Drehmoment abfallen.

Speziell günstig ist eine ungerade Anzahl Kollektorsegmente, da dies die Kommutierungspunkte verdoppelt. So sind 5 Kollektorsegmente bedeutend besser als 6.

Eine extreme Erhöhung der Anzahl Kollektorsegmente bringt aber nur noch einen kleinen technischen Gewinn und verteuert nur die Herstellung. Ausserdem bewirken die Toleranzen und Inhomogenitäten in der Wicklung meist Drehmomentvariationen von mehr als 1%.



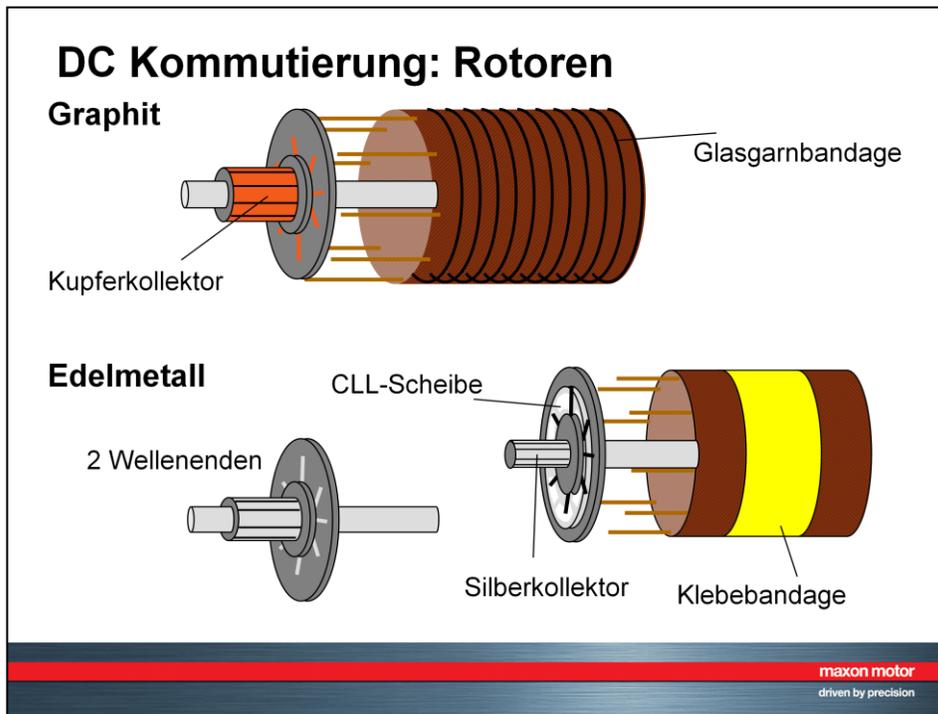
Bei kleinen Gleichstrommotoren kommen zwei Bürstensysteme zur Anwendung, die hier zur Gegenüberstellung zusammen gezeigt werden. (Im jeweiligen Motor kommt aber nur jeweils eine Bürstenart vor! Nur damit diese Darstellung nicht missverstanden wird.)

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 Kupferkolektor 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.

Edelmetallbürsten

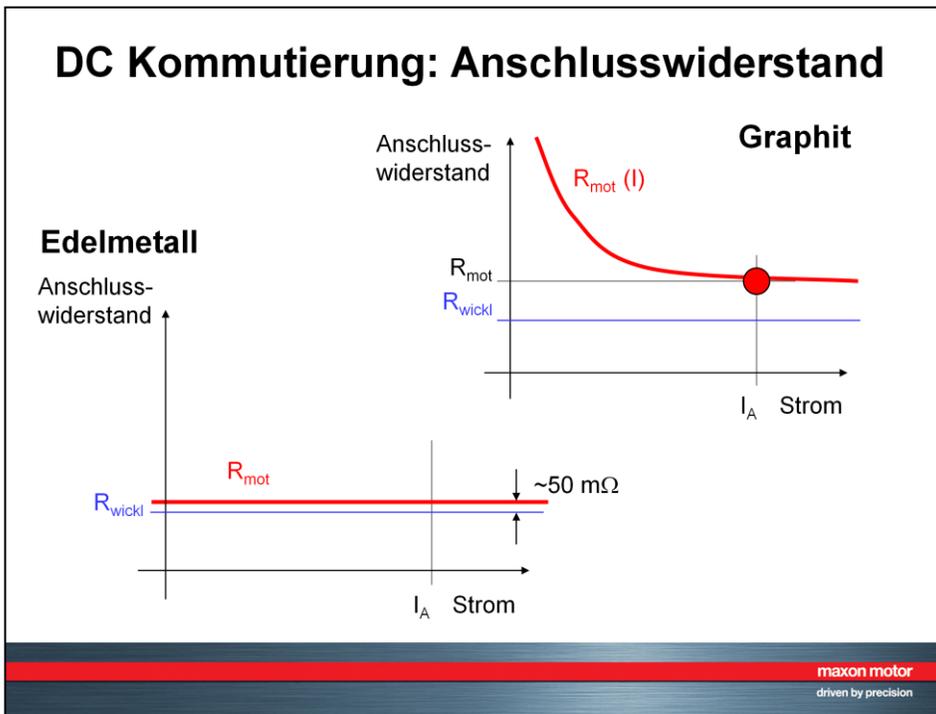
- Für **kleine Ströme** und Spannungen sind Edelmetallbürsten besser geeignet. Der Gleitkontakt ist direkt zwischen Metall und Metall und weist einen extrem kleinen Kontaktwiderstand auf. Edelmetalle (meist Silber, selten Gold) werden verwendet um die Oxidation zu vermeiden.
- Die Bürste besteht meist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



Die Kommutierungsart hat auch Auswirkungen auf die Rotoren.

Kupferkollektoren für Graphitbürsten haben einen relativ grossen Durchmesser. Es ist kein Problem eine Welle durch den Kollektor zu führen. Motoren mit einem oder zwei Wellenenden haben denselben Kollektordurchmesser und als Folge identische maximale Drehzahlen. (Die Grenzdrehzahl hängt von der maximal zulässigen Relativgeschwindigkeit zwischen Bürste und Kollektoroberfläche ab). Graphitkommutierung ist besser für höhere Ströme geeignet, sodass die Wicklung tendenziell wärmer werden kann und deshalb meist mit einer **Glasgarnbandage** zusätzlich stabilisiert wird.

Bei **Edelmetallkommutierung** sind die erlaubten Ströme kleiner, die Wicklung wird weniger warm und es reicht eine einfache **Klebebandage**. Um die Lebensdauer der Edelmetallbürsten zu steigern, wird der **Kollektordurchmesser so klein wie möglich** dimensioniert und die Welle wird nicht in den Kollektor geführt. Bei durchgehender Welle muss man den Kollektordurchmesser grösser wählen, sodass die Grenzdrehzahl kleiner wird.



Hier noch eine Folie zur Illustration des **Anschlusswiderstands** der beiden Kommutierungssysteme.

Bei **Edelmetallbürsten** widerspiegelt der Anschlusswiderstand im Wesentlichen die Wicklung, der Anteil des Bürstensystems ist vernachlässigbar. Der Widerstand zeigt ohmsches Verhalten, d.h. er ist unabhängig vom Strom.

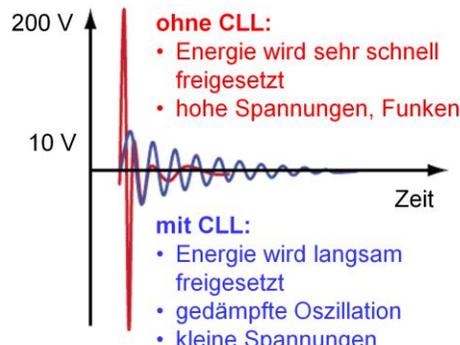
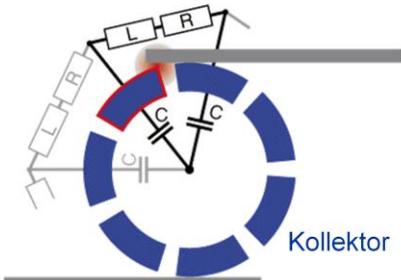
Bei **Graphitbürsten** ist der **Widerstand stromabhängig**. Bei hohen Strömen leitet Graphit besser und der Kontakt zum Kollektor ebenfalls. Bei kleinen Strömen steigt der am Motor gemessene Anschlusswiderstand stark an (etwa mit der vierten Potenz des Stroms). Es ist somit nicht empfehlenswert den Anschlusswiderstand mit einem gängigen Ohmmeter zu bestimmen (diese funktionieren mit sehr kleinen Messströmen). Da der Zustand der Kollektorpatina einen grossen Einfluss hat können die Messungen zudem stark variieren. Besser ist es, den Motorstrom bei blockierter Welle und fester Spannung zu messen und daraus den Widerstand zu berechnen.

Edelmetall-Kommutierung: CLL

Problem

- Bürstenfeuer verkürzt Lebensd.

Spannung zwischen den Kollektorsegmenten



Lösung

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

maxon motor
driven by precision

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.

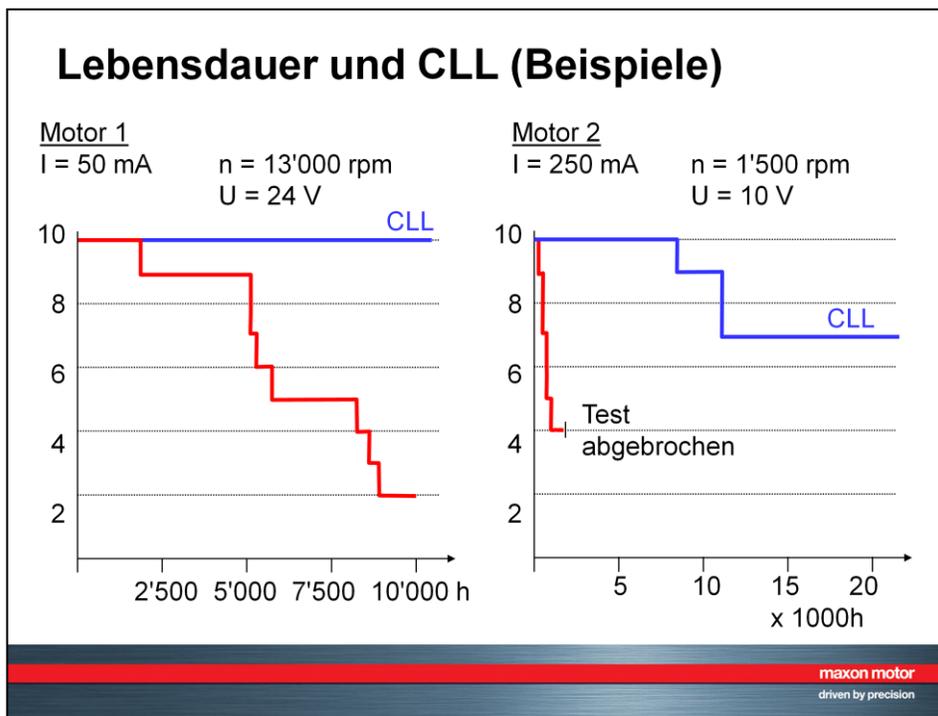
Eine Lösung für das Problem ist die **kapazitive Funkenlöschung**. Über dem zu öffnenden Kontakt wird parallel ein Kondensator aufgebracht, der die Energie zwischenspeichert. Später kann die Schaltenergie in den Widerständen abgebaut werden.

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.



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

- geeignet für hohe Ströme und Stromspitzen
- geeignet für Start-Stopp- und Reversierbetrieb
- grössere Motoren (ab ca. 10W)

- höhere Reibung, höherer Leerlaufstrom
- ungeeignet für kleine Ströme
- mehr Geräusch
- höhere elektromagnetische Emissionen
- aufwändiger, teurer

Edelmetall

- geeignet für kleinste Ströme und Spannungen
- geeignet für Dauerbetrieb
- kleinere Motoren
- kleinere Reibung
- weniger Geräusch
- tiefe elektromagnetische Emission
- günstiger Preis

- ungeeignet für grosse Ströme und Stromspitzen
- ungeeignet für Start-Stopp-Betrieb

maxon motor
driven by precision

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.

Teil 6: Lebensdauer und Lager

Lebensdauer

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

beeinflussende Faktoren

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

Graphitbürsten und Kugellager für extreme Anforderungen

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.

Kugel- und Sinterlager: Vor- und Nachteile

Kugellager

- geeignet für höhere Radial- und Axiallasten
- geeignet für alle Betriebsarten, auch für Start-Stopp- und Reversierbetrieb
- grössere Motoren
- 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 **Kugellager und Graphitbürsten**.