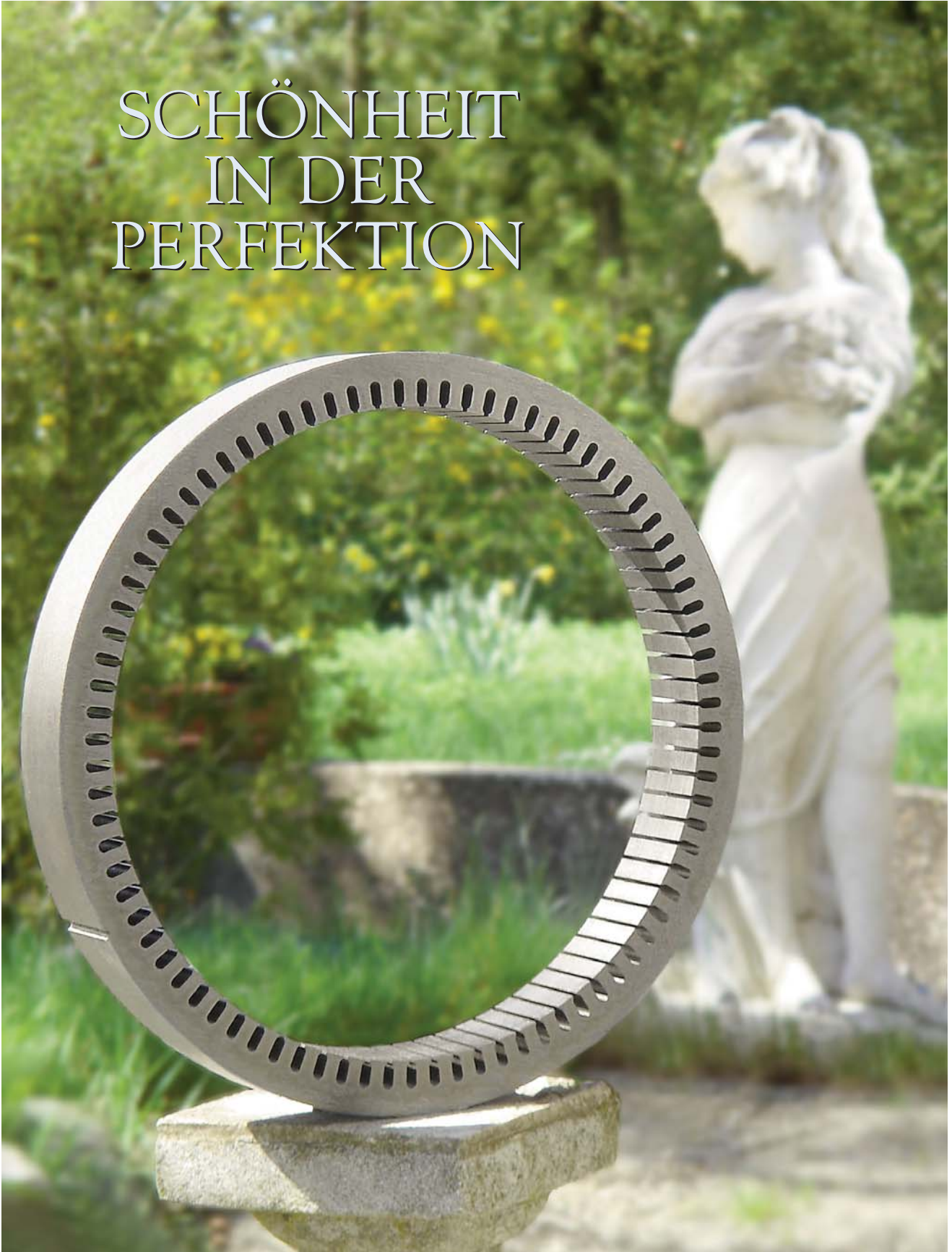


Bürstenlose-DC Direkt-Antriebe mit Torque-Motoren

SCHÖNHEIT
IN DER
PERFEKTION



Drehmomentmotoren sind gedacht für den spielfreien und steifen Direktantrieb der Last, ohne den Einsatz eines Getriebes. Sogenannte Pankakes oder Megatorquer bringen das Drehmoment über den großen Durchmesser. Zum Beispiel bis zu 9 m Durchmesser bei 200.000 Nm Drehmoment für die VL-Teleskope der ESO in Antofagasta Nordchile. Diese Motoren konnten durch eine optimale Auslegung die geforderten Eigenschaften wie Rastmoment und Drehmomentwelligkeit kleiner als 1% erreichen. Obiges Bild zeigt eine kundenspezifische Konstruktion für eine Bearbeitungsmaschine mit 84 Nuten, Blechpaket 40 mm und einem Außendurchmesser von 32 cm.

So wie für den Betrachter die Anmut einer Skulptur sich offenbart, so ist die Perfektion in der Technik der Höhepunkt in der kreativen Ingenieursschaffenskraft. Dies wird erreicht wenn das Produkt nicht nur gerecht entwickelt wurde, sondern sämtliche Anforderungen und Eigenschaften ein harmonisches Optimum finden.

Wie viele Aspekte man an einem bürstenlosen Motor berücksichtigen sollte, ist fast eine nicht endende Kette von Freiheitsgraden und Möglichkeiten, die genaugenommen eine fast unendliche Vielfalt von gelungenen Ausarbeitungen erlaubt. Hier "Kochrezepte" zu empfehlen ist nicht möglich, sondern erst die Übersicht aller Möglichkeiten steuert instinktiv den Fachmann in mehrere optimale Richtungen. Erst in Zusammenarbeit mit den Anwendern kann eine optimale Lösung gefunden werden.

Gewünschte Daten:

- Drehzahlen, von schleichender Drehzahl bis über 100.000 U/min
- Dauerdrehmoment gewünscht bei welcher Drehzahl?
- Spitzen/Impulsdrehmoment für welche Zeit und wie oft?
- Beschleunigung definieren z.B. bis zu 1 Mio. rad/s² oder unwichtig

Besondere Eigenschaften:

- Hochkonstante Drehzahl bei wechselnder Last
- möglichst frei von Rastmoment
- Hochkonstantes Drehmoment über den Winkelverlauf
- auf kleinste Erwärmung der Wicklung oder des Eisens entworfen
- auf eine bestimmte, kleinste oder größte Induktivität hin ausgelegt
- Low-Cost Design

Aufbau und Bauformen:

- Anzahl der Phasen: 1, 2, 3, 4, 5, 6 oder sogar redundant viel mehr Phasen ?
- von schlank/stabförmig bis kurz und mit großem Durchmesser
- Innenläufer mit Außenstator oder Aussenläufer mit Innenstator
- Gehäuse aus einem Rohr oder aus geschweissten Eisenblechen aufgebaut
- Flanschkühlung, Luft- oder Wasserkühlung vorgesehen

Fertigungsverfahren:

- sehr einfach von Hand zusammenzubauen (z.B. auch in Heimarbeit)
- eine vollautomatische Fertigung ist vorgesehen

Magnete:

- Die richtige geometrische Auslegung der Magnet- und Eisenformen ist ganz entscheidend für die Eigenschaften des Motors
- gefertigt aus einzelnen Stabmagneten oder als Schalensegmenten
- fertiger Ringmagnet vorher schon aufmagnetisiert
- Aus SmCo, NdFeB oder Ferrit

Lagemelder:

- unzählige Lage- und Geschwindigkeitsregelsysteme stehen zur Verfügung je nach dem ob es ein Positionier-/Drehzahl- oder Drehmomentsystem werden soll

Bürstenlose Motoren erlauben heute durch Auswahl an Nuten-, Pol- und Phasenzahlen eine unendlich große Vielfalt an innovativen Lösungen.

Alle primären Eigenschaften eines BL-Antriebes lassen sich zu einem optimalen Design konfigurieren wie z.B. hohe Steifigkeit gegen Störmomente, kleines Rastmoment oder kleine Drehmomentwelligkeit, **EMK-Verlauf** als Sinus, π -Sinus, Trapez oder Rechteck, oder die gewünschte Wicklungs-Induktivität. Mechanische Abmessungen, als hohler Ring oder als Stab, geben nur den äusseren Rahmen vor, danach beginnt die eigentliche Entwicklungsarbeit.

Systemübersicht und Sachkenntnis bei der Umsetzung aller gewünschten Eigenschaften sind auch notwendig, wenn es um die Details geht, wie Montage, Klebung, Schränkung, Wicklung und Beschaltung. Wenn Sie kompetente und klare Antworten auf alle Fragen erwarten, dann sprechen Sie mich als Physiker und BL-Motor Spezialisten an.



Dipl. Phys. Armin H. Schmid
SERVOWATT Leistungselektronik GmbH



Dies sind Motoren, die ihr hohes Drehmoment vorzugsweise aus dem besonders großen Durchmesser ihres Luftspaltes erzeugen. Weiterhin typisch ist, daß sie innen hohl sind. Normalerweise ist der Stator aussen und der Magnetläufer innen, aber auch umgekehrt funktioniert dieser Motor genauso als Aussenläufer. Weiterhin typisch für diese Motoren ist, daß sie ohne Lagerung und Gehäuse geliefert werden, denn der Kunde stülpt den Läufer auf seine bereits für die Aufnahme vorbereitete Welle / Hohlwelle über. Der Stator wird dafür an das Gehäuse zentriert und befestigt. Die in den Statorspulen erzeugte Wärme wird so an das Gehäuse weitergeleitet.

Höhere Genauigkeit durch weniger mechanische Komponenten, wie Riemen, Getriebe und Kupplungen.

Alle diese Komponenten bringen unnötige Elastizität in ein idealerweise steifes Positioniersystem ein. Solche Torquemotoren sind üblicherweise sogenannte Langsamläufer, die die Welle ohne Getriebe, also direkt und daher völlig spielfrei antreiben. Wir erreichen mit solchen Systemen den kürzesten Weg zwischen Elektronik und Mechanik.

Torquer werden bürstenbehaftet und bürstenlos angeboten, wobei das Interesse sich immer mehr auf die letzteren konzentriert, weil sie völlig verschleißfrei arbeiten und keine Abriebsverschmutzung erzeugen. Die bisherigen BL-Torquer arbeiten üblicherweise mit 3 Phasen, es gibt hier und da aber auch welche mit 2 und noch seltener mit 4, 6 und 12 Phasen. Grundsätzlich lassen sich solche Ringmotoren natürlich mit allen Phasenzahlen realisieren, wobei manche Phasenzahlen singuläre, sehr geschickte Gesamtlösungen erlauben. Für Sicherheitsanwendungen werden redundante Motoren mit höheren Phasenzahlen eingesetzt.

Solche Motoren werden in allen Größen hergestellt, von ca. **5cm bis zu 30m im Durchmesser** (Weltraummotor zum Positionieren von Großlaserkanonen im SDI-Programm der USA). Die gravierenden Probleme mit diesen Motoren sind die großen Kräfte, die von den starken Magneten herrühren: sie erzeugen störende Haltemomente an Zähnen und Nuten (engl. detent torque oder auch cogging), die sich sehr störend auf einen gewünschten, optimalen Rundlauf auswirken. Auch wenn die Elektronik solche Störungen ausregeln kann, so bleibt ein kleiner Fehler in der Einschwingzeit, der oft nicht toleriert werden kann. Darüber hinaus haben solche Motoren auch Schwankungen im Drehmoment, sog. Momentwelligkeit (engl. ripple-torque), die sich ebenfalls ungünstig auf den erwünschten, absolut ruhigen Lauf auswirken.

Es gibt eine ganze Reihe von Ansätzen, um sich des einen und anderen Effektes zu entledigen, doch beide gleichzeitig weitgehend zu eliminieren ist bis jetzt nicht gelungen. Dies liegt z. T. daran, weil die bisherigen Motoren sich sehr schlecht mit einem vollkommenen mathematischen System beschreiben lassen. Hinzu kommen durch die magnetischen Streufelder z. T. ungewöhnliche Effekte, die sich analytisch schlecht voll erfassen lassen: es wird immer ein Rest von Fehlern übrigbleiben.

Unser Ansatz zielt hierbei auf eine neue Konstruktion des Motors, die wenigstens eine 2-dimensionale mathematische Beschreibung erlaubt, die also wenigstens im idealisierten Modell Momentwelligkeit und Rastmoment zu Null optimieren kann. Die durch Streuungen dann noch entstehenden Fehler müssen durch Versuche beseitigt werden. Die Erstellung eines perfekten 3-dimensionalen Modells, das sämtliche Effekte behandeln könnte, scheint aufgrund des großen Aufwandes nicht sinnvoll zu sein. Unser Konzept liefert für die Praxis auch ohne solche Hilfsmittel nahezu perfekt zu nennende Modelle.

Vorteile auf einen Blick: Direkter Kraftaufbau + Keine mechanischen Übertragungselemente + Hohe statische und dynamische Laststeifigkeit + Hervorragende Regelgüte mit einem steif angekoppelten Lagesensor + minimale Geräuschentwicklung + Vereinfachte & unkritische Maschinenkonstruktion

Warum sind aber Torquer für uns interessant?

Es gibt viele Gründe, die beiden Wichtigsten sind folgende:

- Torquer arbeiten vollkommen spielfrei, und wenn sie richtig eingesetzt werden, sind sie in Maschinen und Robotern der kürzeste Weg zwischen Elektronik und Mechanik.
- Torquer greifen direkt an den Stellen, die üblicherweise in der Mechanik für die größte Stabilität zuständig sind, nämlich an der Peripherie von Übertragungselementen, wie Achsen, Roboterarmen usw. Die Übertragungssteifigkeit ist somit optimal.

Insofern wir also präzisere Maschinen und Roboter bauen möchten, kommen wir nicht an diesen Antrieben vorbei. Bemerkenswert ist der neue Trend der Japaner, sämtliche Gelenke an Manipulatoren und Robotern mit solchen Direktantriebsstationen zu bestücken.

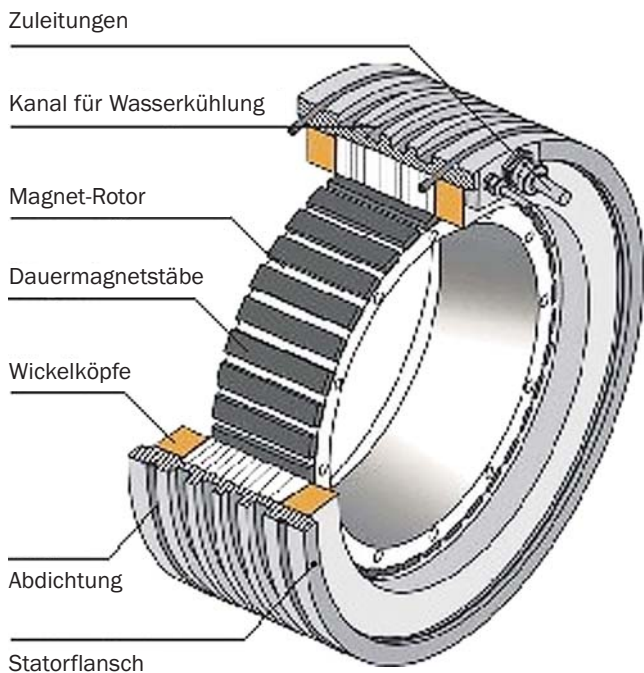
Wenn die Japaner an diesen Stellen ohne Getriebe arbeiten, so hat es sicher einen guten Grund: Japan hat es sich zur obersten Devise gemacht, in sämtlichen Bearbeitungsstufen noch eine Größenordnung genauer zu werden.

Das erklärte Ziel ist, die Fertigungstoleranzen soweit zu reduzieren, daß die Gesamtqualität aller gefertigten Produkte für andere praktisch unerreichbar wird!

Man sollte sich hüten, den Japanern alles nachzumachen, oder sie für intelligenter zu halten, denn häufig genug machen sie das Falsche richtig und das Richtige falsch.

Immerhin haben nun mehrere Firmen wie Yokogawa Precision, Tamagawa Seiki, NSK und andere solche Direktantriebe im Programm.

Sie arbeiten angeblich alle nach dem Prinzip eines Reluktanz-Schrittmotors mit großem Durchmesser und feinen Schritten. Wieso preisen wir aber den bürstenlosen Motor und nicht diese Reluktanzantriebe an?



Weil Reluktanzantriebe bekanntermaßen von der hohen Induktivität und dem kleinen Spalt leben, nicht so der BL-Motor, der ganz bewußt große Magnete als Spalt einsetzt, damit die unerwünschte Induktivität so klein wie möglich wird.

Im Positions-Regelungssystem ist nämlich die Induktivität das Nadelöhr für die Steifigkeit, das sog. Gummi im Antrieb. Es genügt also nicht allein, daß statische Drehmoment des Antriebes zu erhöhen, sondern gleichzeitig muß die Steifigkeit verbessert werden. Hierzu hat SERVOWATT möglicherweise den besseren Weg:

Den BL-DC Torquemotor mit Permanentmagneten.

Foto Quelle: ETEL S.A. Switzerland www.etel.ch

Original Berechnungen vom 27.05.1989 für den 9m-Azimuthmotor des des VLT-Teleskop-Projekts ESO in Cerro Paranal/ Nordchile. Es wurden verschiedene Varianten berechnet von 100.000 bis 200.000 Nm wobei die Temperaturerhöhung ein wichtiges Kriterium war. Üblicherweise wäre die Auslegung des Drehmoments für Großmaschinen sogar bei 500.000 Nm gewesen.

BL - DC Motoren müssen grundsätzlich mit bipolaren geregelten Stromquellen angesteuert und mit Sinus-Sollwerten beaufschlagt werden. Die Frequenz und Phase der jeweiligen Wicklung A, B oder C ist die gleiche, jedoch ist der Phasenwinkel um 120° zueinander verschoben:

$$M_{A(\varphi)} = K_{MA(\varphi)} \times I_{A(\varphi)}$$

$$M_{A(\varphi)} = K_0 \times \sin(\omega t + \phi_A) \times I_0 \times \sin(\omega t + \phi_A) \quad \text{dann gilt}$$

$$M_{ABC} = K_0 \times I_0 \times \sin^2(\omega t + \phi_A) + K_0 \times I_0 \times \sin^2(\omega t + \phi_B) + K_0 \times I_0 \times \sin^2(\omega t + \phi_C) = 1,5 K_0 \times I_0$$

Das heißt das Drehmoment kann bei streng sinusförmigen Verläufen der EMK und des Phasenstroms zeitlich absolut konstant gehalten werden. Bei der Entwicklung von solchen DC-Antrieben verwendet man gerne gesteuerte Stromquellen mit linearen Endstufen, damit der Entwickler die Qualität aller Ströme und Spannungen ohne störende PWM-Zerhackung beurteilen kann.

In der Praxis ist es erfahrungsgemäß die größte Schwierigkeit, der EMK einen sauberen sinusförmigen Verlauf zu geben. Verschiedene Magnetformen und Längen, sowie verschiedene Pol- und Phasenzahlen sind untersucht worden, aber die perfekte Lösung ist bis heute nicht genannt worden. Es gibt Sie !

Weiterhin besteht die Möglichkeit eine abgewandelte EMK-Sinusform zu verwenden, den sog. π-Sinus. Dadurch erreicht man eine höhere Leistungsausbeute als mit einem reinen Sinus, ohne dabei unerwünschte Rastmomente zu erzeugen.

Folgende Eigenschaften sind kennzeichnend:

- Es ist ein mathematisches Durchflutungsmodell vorhanden, daß eine magnetische Sinusdurchflutung gewährleistet. Hierauf basierend ergibt sich durch diese Durchflutung:
- Der Motor ist im unbestromten Zustand rastmomentfrei.
- Konstant-Moment-Betrieb ist optimal gewährleistet, d. h. die Drehmomentwelligkeit ist im Idealfall gleich Null, oder sehr klein.

Ausführungen werden gezielt darauf gezüchtet, daß die Statorinduktivität so klein wie möglich wird. Daraus folgt die Umkehrung, daß di/dt so groß wie möglich sein soll. Der Motor kann gegen Störmomente nur so schnell gegenagieren, wie auch der Strom in die Wicklung hineinkommt. **Das BL-DC System ist von der Physik her anderen Antriebsprinzipien wie Reluktanz- und Asynchronmotor grundsätzlich überlegen, denn diese benötigen den kleinen Spalt und die große Induktivität.** Interessant ist, daß in den Beschreibungen überall nur Angaben über die statische Steifigkeit zu finden sind, während man keinerlei Angaben über die dynamische Steifigkeit macht. In der Dynamik ist der BL-DC Motor grundsätzlich allen anderen Motorarten überlegen.



Ausführungen mit sehr hohem Wirkungsgrad ergeben sich zwangsläufig aus der Konstruktion. Der hohe Kupferfüllfaktor sorgt ebenfalls für kleinste Verluste. Nicht selten erreicht man Wirkungsgrade von über 90%. Wie z.B. im 9 m Großmotor vom VLT-Teleskop der ESO in Chile mit 95%.

- Der Kupferwicklungskontakt zum Stator ist optimal. Auf diese Weise ist der Motor von der guten Wärmekapazität her bestens gerüstet um hohe Impulsbelastungen zu vertragen.
- Die geometrischen Dimensionen sind durchweg kleiner als bei vergleichbaren Motoren. Bei gleichem Außendurchmesser ist die Länge beachtlich kürzer, so daß man damit wesentlich flachere Motoren als die sog. Scheibenläufer bauen kann.
- Ebenfalls lassen sich diese Motoren hohl aufbauen, mit Geber oder einem Getriebe im Mittelraum.

Ausführungen sind möglich mit 2, 3 oder beliebig vielen Phasen. Es ergeben sich einige singuläre Vorteile:

- 6-phasige Motoren können mit nur 4 Halbbrücken betrieben werden.
- In Motoren mit paarzahligen Phasen können besonders geschickt Kommutierungsresolver integriert werden.
- Motoren mit höheren Phasenzahlen haben den Vorteil, daß die verbleibende Momentwelligkeit stark fällt, wichtig bei **höchstpräzisen Antrieben** für hochgenaue Fräsmaschinen und Teleskope.

Als anzubauende Lagegeber kommen in Frage:

- mehrpolige Resolver
- hochauflösende Inkrementalgeber

Als Kommutierungsgeber kommen in Frage:

- integrierte HF-Resolver
- integrierte Hall-Resolver

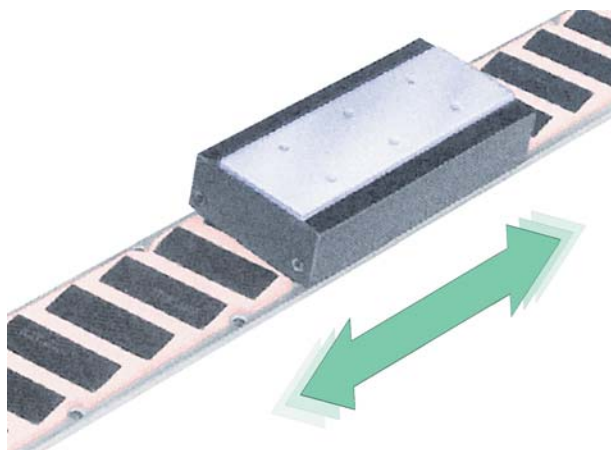
Aus der Konstruktion ergibt sich noch ein wichtiger Punkt: Die Motoren lassen sich komplett zerlegt transportieren. Ein wichtiges Detail z. B. beim großen Azimutmotor von 9 Metern Durchmesser und 200.000 Nm von ESO für das VLT-Spiegelteleskop oder dem 30 m - Weltraum Teleskop für das SDI-Projekt



Außenläufer - Vollautomatisch gewickelter Stator

LM Bürstenlose Linearmotoren

(1)



Der mögliche Verfahrweg ergibt sich aus der Längendifferenz zwischen Stator und Magneten, wobei sowohl die Magnete als auch der Stator bewegt werden können.

Beispiel 1: Stator 500 mm, Magnete 2.500 mm
Verfahrweg 2.000 mm, $K = 2.500 \text{ N}$

Beispiel 2: Stator 2.000 mm, Magnete 2.500 mm
Verfahrweg 500 mm, $K = 10.000 \text{ N}$

Weiterhin wird unterschieden zwischen kraftschlüssigen und kraftkompensierten Systemen. Im ersten ziehen sich Magnete und Stator an und müssen über eine entsprechende Führung auf Abstand gehalten werden, im zweiten wird der Stator entweder von 2 Magneten

oder der Magnet von 2 Statoren angezogen, wobei sich beide Kräfte völlig ausgleichen.

Diese Linearmotoren sind insbesondere gekennzeichnet durch:

Ein genau berechenbares mathematisches Durchflutungsmodell (sinus, π -sinus) garantiert einen sauberen 100%igen Sinusbetrieb. Hierauf basierend mit Sinusbestromung folgen:

- rastmomentfrei im unbestromten Zustand
- konstant-Kraft-Betrieb bei Sinusbestromung, d.h. die Kraftweiligkeit ist theoretisch Null
- Ausführungen mit beliebig vielen Phasen, also nicht nur 2 oder 3 Phasen, sondern auch mit 4,5,6,7,8 usw. Phasen.
- Wesentlich höhere Leistungsdichte und höherer Wirkungsgrad als andere z.Zt. marktüblichen Systeme kennzeichnen diese Linearmotoren. Die Werte in der Verlustleistung von vergleichbaren Einheiten von namhaften Adressen lagen um den Faktor 2 höher und teilweise darüber.
- Statoren können problemlos mit Wasser gekühlt werden.
- hohe Impulsbelastungen mit 3- bis 5-fachem Strom werden durch eine gute Wärmekopplung der Spulen mit dem Stator problemlos bewältigt.

Konstruktionen in allen möglichen Abmessungen sind problemlos möglich. Das System eignet sich sehr gut, um alle Komponenten zu standardisieren, die sowohl in der Breite, als auch in der Länge beliebig kombiniert werden können, um Linearmotoren nach Kundenwunsch schnell und kostengünstig sozusagen "von der Stange" anzufertigen.

- Es können je nach gestellter Priorität z.B. extrem reaktionsschnelle Motoren mit kleinster bewegter Masse konzipiert werden, mit Geschwindigkeiten bis zu 10 m/s.
- Diese Einheiten können u.U. gleichzeitig einen Wirkungsgrad von über 90% aufweisen.

Aus dem konstruktiven Konzept heraus lassen sich weitere besondere Vorteile ableiten, wie z.B.

- Großmotoren lassen sich problemlos zerlegt versenden
- Kleinst- und Miniaturmotoren lassen sich mit vorgewickelten Spulen sehr einfach zusammenbauen

LM Bürstenlose Linearmotoren (2)

Angebaute Lagegeber sind möglich als:

- Linearresolver (linear Inductosyn)
- Linearmaßstab
- Linearpotentiometer in Leitplastik mit bis zu 50.000.000 Hübe!
- Eingebauter linearer Kommutierungsresolver kann verwirklicht werden. Für weniger genaue Anwendungen könnte dieser auch zum Positionieren verwendet werden.
- Bestimmte Stator-/Magnetkonfigurationen erlauben einfachste geometrische Formen, die eine kostengünstige Fertigung ermöglichen.

Eine der herausragendsten Eigenschaften dieser Motoren ist die extrem kleine Induktivität, die hohes di/dt ermöglicht. In Position ist er in der Lage, sehr schnell den Strom gegen Störkräfte aufzubauen und gegenzuregulieren. Die Positioniersteifigkeit dieses BL-Linearmotors ist daher um Größenordnungen besser als bei solchen mit Asynchronprinzip (Orig. Syst. Krauss Maffei) und solchen mit Reluktanzprinzip (z.B. Linear-Schrittmotoren), die beide mit kleinem Spalt arbeiten müssen.

Sehr zu denken gibt, daß bei anderen Systemen durchweg nur die statische Steifigkeit gelobt wird, dagegen keine Angaben über die dynamische Steifigkeit gemacht wird. Dies sicher nicht ohne Grund, denn es ist sicher die schwächste Stelle an einem Direktantrieb, da dieser gegen große Kräfte ohne Getriebe/Spindel auskommen muß.

Zusammenfassend: ein Positioniermotor kann nur so gut sein, wie seine Induktivität klein ist. Bei dieser Gelegenheit sollte man den Begriff elektrische Zeitkonstante ganz vergessen, denn bei einer gesteuerten Stromquelle mit unendlichem Innenwiderstand als Speisung spielt der ohmsche Wicklungswiderstand im Regelungsverhalten überhaupt keine Rolle mehr.

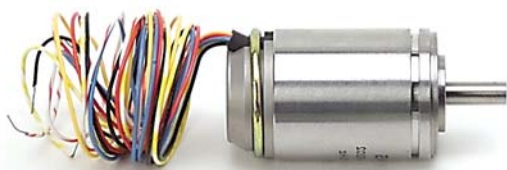


Tubular Linear Motor von California Devices

Diese Variante eines Linearmotors besteht aus einem Stator als Eisentubus mit konzentrisch einglegten Spulen in Reihenfolge der 3 Phasen. Der Rotor dagegen besteht aus ringförmigen radialmagnetisierten Nord-Süd- Magnetreihen mit einem nichtmagnetischen Edelmantel als Schutz und Gleitführung.

HD Hochdynamische bürstenlose Motoren

(1)



Durch geometrisch gezielte Konstruktion lassen sich bürstenlose Motoren mit sehr kleinem Trägheitsmoment realisieren. Ziel der Entwicklung ist eine Reihe von 0,1 Nm bis 2 Nm, oder vielleicht bis 3 Nm, die die bisherigen "moving coil" - Motoren von vormals Honeywell / heute Pacific Scientific ersetzen kann.

Bisherige Typen der VM/NM-Reihe beschleunigten bei Nennmoment im Leerlauf zwischen 30.000 und 70.000 rad/sec² und mit 3-fachem Spitzenmoment im Leerlauf zwischen 100.000 und 200.000 rad/sec².

Es ist uns nunmehr gelungen, diese Beschleunigungs-Schallmauer zu durchbrechen: Die Berechnungen zeigen, daß ein kleiner Motor mit 28 x 28 mm, mit ca. 0,1 Nm Nennmoment, im Leerlauf mit über 200.000 rad/sec² und bei 5-fachem Spitzenstrom mit ca. 1.000.000 rad/sec² beschleunigen kann! Weniger sensationelle Werte gelten für größere Modelle, jedoch ist dies nicht weiter tragisch, weil solche Beschleunigungen selten verwertbar sind. Viel wichtiger ist, daß überhaupt ein bürstenloser Motor in der Lage ist, diese bisherigen hochdynamischen Typen zu ersetzen. Sämtliche Vorteile, die für unsere neuartigen BL-Motoren bereits aufgelistet wurden, gelten auch hier, insbesondere:

- Ein genau berechenbares mathematisches Durchflutungsmodell garantiert einen einwandfreien Sinusbetrieb. Hierauf basierend, mit Sinusbestromung folgen:
- Rastmomentfreier Lauf im unbestromten Zustand
- Konstanz-Moment-Betrieb ist möglich, d. h. die Momentwelligkeit ist im Optimalfall Null, oder sehr klein.
- Ausführungen mit beliebig vielen Phasen sind möglich, wobei Ausführungen mit 2, 3 und 6 Phasen eher die wichtigsten sein dürften.
- Wesentlich höhere Leistungsdichte und höheren Wirkungsgrad als die bisherigen bürstenbehafteten Motoren kennzeichnen diese HD-Motoren.

Die Durchmesser dieser neuen Motoren sind bei gleichen Werten durchweg kleiner als bei den bisherigen VM/NM-Typen, so daß nun die Flansche sichtbar größer als die Motoren sind. Auf jeden Fall sollten diese Typen flansch- und wellenkompatibel zu den bisherigen Honeywell-Typen sein, damit ein direkter Austausch/Ersatz problemlos wird. In USA sind ganze Industrien auf diese Motoren eingeschworen. Auch darf man nicht vergessen, daß die bereits eingesetzten Motoren durch Verschleiß den Kunden z.T. erhebliche Probleme und Kosten verursachen. Einem Austausch dieser Systeme würden daher viele Kunden zustimmen, allerdings nur, wenn wirkliche Kompatibilität garantiert werden könnte. Und dies ist wohl zu machen.

Zum Beschleunigen und Bremsen benötigen diese Einheiten höhere Ströme als die Nennströme. Die bisherigen freitragenden Korbwinderspulen haben eine sehr kleine Wärmekapazität und dies führt immer wieder zu Ausfällen wegen Überlastung. Die neuen Motoren kennen diese Probleme nicht, denn die Spulen sind thermisch mit dem Stator so gut gekoppelt, daß bei Impulsbetrieb kein Schaden entstehen kann. Die Impulsbelastbarkeit steigt somit von 5 bis 20 ms auf nunmehr das Zehnfache, also ca. auf 50 bis 200 ms. Und das ist schon für so superdynamische Motoren eine neue Dimension!

HD Hochdynamische bürstenlose Motoren

(2)

Somit kann man sagen, daß diese Motörchen nunmehr fast verschleißfrei arbeiten, wenn die Kugellager nicht wären. Diesem Punkt besondere Sorgfalt zu widmen dürfte wichtig sein, denn es ist der 2. Schwachpunkt bei den bisherigen Motoren: Jede 2. Reparatur wird notwendig durch Lagerschaden!

Wenn man bedenkt, daß viele Abtriebe mit einem Zahnriemen gelöst werden, der oft viel zu stramm sitzt, so wundert man sich nicht mehr hierüber.

Abgesehen von der normalen HD-Reihe ließen sich diese Motoren auch für hohe Drehzahlen bis zu 100.000 U/min züchten, womit wiederum ein neues Gebiet in High-Tech-Sonderantriebstechnik eröffnet wird. Besondere Geber gehören ebenfalls dazu, wie z.B. ein neuer sog. Hall-Resolver, sowie ein neuartiges Eisenmaterial, das bis höchste Betriebsfrequenzen fast ohne Verluste arbeiten kann. Jede Menge Patente....!

Die anzubauenden Lagegeber sind möglich als:

- Resolver mit 10-20 kHz Betriebsfrequenz als Hohlwellen Typen, sog. mini-pancakes
- Inkrementalgeber mit Sonderspur für Kommutierung
- Leitplastik-Potentiometer, für begrenzte Drehung
- Auch besteht die Möglichkeit, im Motor selbst einen sog. integrierten Resolver einzubauen, der außer zur Kommutierung auch zum Positionieren mit geringerer Genauigkeit reichen würde. Patent !



Prüfaufbau an einem HF-Lagegeber für einen hochdynamischen BL-DC-Motor

Diese Motoren lassen sich mit getakteten oder mit linearen Endstufen betreiben, wobei immer angestrebt werden sollte, daß der durch die Motorinduktivität verursachte Tiefpass nicht die Regelstrecke unnötig verlangsamt. Wenn also eine Induktivität von z.B. 0,1 mH getaktet versorgt wird, so ist entsprechend die Taktfrequenz auf höhere Frequenzen als bisher zu verlagern, z.B. von ca. 50 bis max. 200 kHz. Solche Endstufen wurden bereits mit vielversprechendem Erfolg im Labor realisiert. Solche Details sind kaum patentfähig.

Diese hochdynamischen Motoren zeichnen sich aus durch höchste Wellensteifigkeit gegen Störmomente. Hierzu ist es notwendig, nicht nur die Induktivität so klein wie möglich zu machen, sondern auch Wellenresonanzen zu vermeiden. Probleme? Wenn man nur will, kann man vieles erreichen.

LA Bürstenlose Linear-Aktuatoren

(1)



Dies sind Linearmotoren mit begrenztem Hub, z.B. +/- 1mm, oder +/- 10mm, je nach Wunsch. Sämtliche Vorteile, die bei linearen BL-Motoren aufzulisten sind, gelten auch hier, jedoch insbesondere:

- Kraftvektor genau proportional dem Strom erlaubt eine einfache und genaue +/- Kraftregelung
 - Einfache Ansteuerung mit nur einer Phase aus linearen oder getakteten Reglern
 - Hoher Kraftvektor bei kleinstem Volumen (Entwurf LA300 für ESO / Garching)
 - Kann als Linearservo motor mit hoher Steifigkeit und Dämpfung ausgelegt werden
 - Extrem reaktionsschnell, da kleinste bewegte Masse
 - unendliche Auflösung bis in den sub- μ -Bereich
- Kleinste Induktivität, hohes dl/dt , bewiesenermaßen um Größenordnungen dynamischer als sogenannte eisenbehaftete Linearaktuatoren bei vergleichbaren Werten und Volumen
 - Hohe Strom-Impulsbelastung mit Faktor 3-6 möglich

Konstruktionen für besondere Anforderungen sind möglich:

- je nach Abmessungen
- je nachdem, ob z.B. die bewegte Masse, die Induktivität, oder die Verlustleistung optimiert werden soll
- mit integrierter Linearführung oder flexibler Aufhängung
- Kann zusätzlich Luftgekühlt werden
- z.B. als Leistungsvibrator hoher Leistung. Billiger als alle Vibratoren z. Zt. auf dem Markt
- Extrem robust: bewegte Teile und Stöße können z.B. aus Titan gefertigt werden und somit sehr hohe Kräfte und Beschleunigungen ohne Schaden überstehen bis in den Resonanz-Frequenzbereich (je nach Dimensionierung bis in den kHz-Bereich).

Angebaute Lagegeber sind möglich als:

- Linearresolver (Linear Inductosyn)
- Linearmaßstab
- als Linearpotentiometer in Leitplastik: 500x10 Hübe

Besondere Anwendungen:

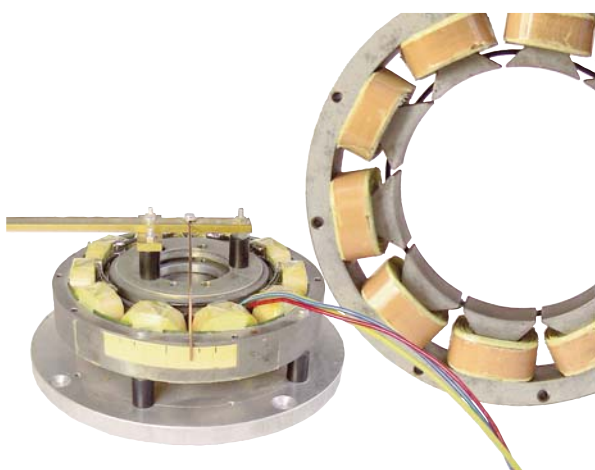
- integrierter Lagegeber möglich als HF-LDT
- Kann als Hochleistungs-Reibahle, Linearfräser und Säge-Antrieb eingesetzt werden für
- neuartige Bearbeitungsmaschinen, auch mit diamantbestückten Werkzeugen etc.
- Vergleichsweise billig herzustellen
- Unzählige innovative / High-Tech Anwendungsmöglichkeiten
- Unzählige Patente möglich auf allen Gebieten der Technik
- auch mit doppelter Aufhängung zum Aufnehmen von stärkeren Radialkräften

RA Bürstenlose RotationsAktuatoren

Dies sind Motoren mit eingeschränktem Rotationswinkel. Sie werden überall dort benötigt, wo der Motor ständig zwischen 2 Winkellagen hin und her pendelt oder positioniert, z.B. um ± 45 Grad, um eine Klappe oder ein Ventil zu verstellen und hierbei kein Bürstenverschleiß hingenommen werden kann. Größter Verfahrwinkel ist $180^\circ \pm$ abzüglich Restwinkel.

Sämtliche Vorteile, die für rotatorische Motoren aufgelistet wurden, gelten ebenso für diese Aktuatoren, jedoch insbesondere:

- Moment ist genau proportional dem Strom, dies erlaubt eine einfache und genaue Momentregelung. Die Ansteuerung geschieht mit nur einer Phase aus einer linearen oder getakteten bipolaren Stromquelle.
- Großes Moment bei kleinstem Volumen kennzeichnen diese Aktuatoren, die bisherige Modelle von weltbekannten Anbietern zur 2. Wahl machen.
- Sie sind extrem reaktionsschnell, da sehr kleine Rotormasse.
- Über den Nennstrom hinaus sind diese Aktuatoren mit einem 1,5 - 2-fachen Impulsstrom kurzzeitig belastbar.



Besondere Konstruktionen sind möglich, wenn

- fertige Spulen zum Einsatz kommen
- Der Stator geblecht werden soll
- es ein preiswertes Massenprodukt werden soll

Die geringe Eisenpakethöhe sowie die kurzen Wickelköpfe machen diese Aktuatoren zu einem flachen Ring.

Die Abbildung zeigt einen Laborprototyp eines "Limited-Angle-Torquer" für eine Digitalkamera montiert auf einer stabilisierten Plattform in einem Tornado.

Der Wirkungsgrad ist beachtlich: im gleichen Volumen konnte für MBB bei 6 Nm und 136 mm Durchmesser eine Verlustleistung von 80 W genügen, statt bisher 340 W.

Angebaute Winkelgeber sind möglich als:

- Resolver oder Linearesolver
- Inkrementalgeber
- Potentiometer in Leitplastik: 500 Mio. Zyklen minimum
- integrierter Lagegeber, möglich als Linearresolver
- Einsatz als Rotationsvibrator hoher Leistung - der vollkommen verschleißfrei arbeitet.
- Kann mit einer einphasigen Ansteuerung als Robotik-Wendestation mit hoher Positioniergenauigkeit und Dynamik arbeiten.
- Unzählige innovative / High-Tech- Anwendungsmöglichkeiten



Bild links zeigt einen einphasigen Stellmotor mit einem Winkelverstellbereich von ca. $\pm 160^\circ$. Ähnliche Systeme können mit kleineren Verstellwinkeln und dafür mit höherem Drehmoment ausgelegt werden.



Bild rechts. Der zugehörige Eisenring wird auf den magnetischen AL-Wert vermessen um die Sättigungsgrenze zu bestimmen.