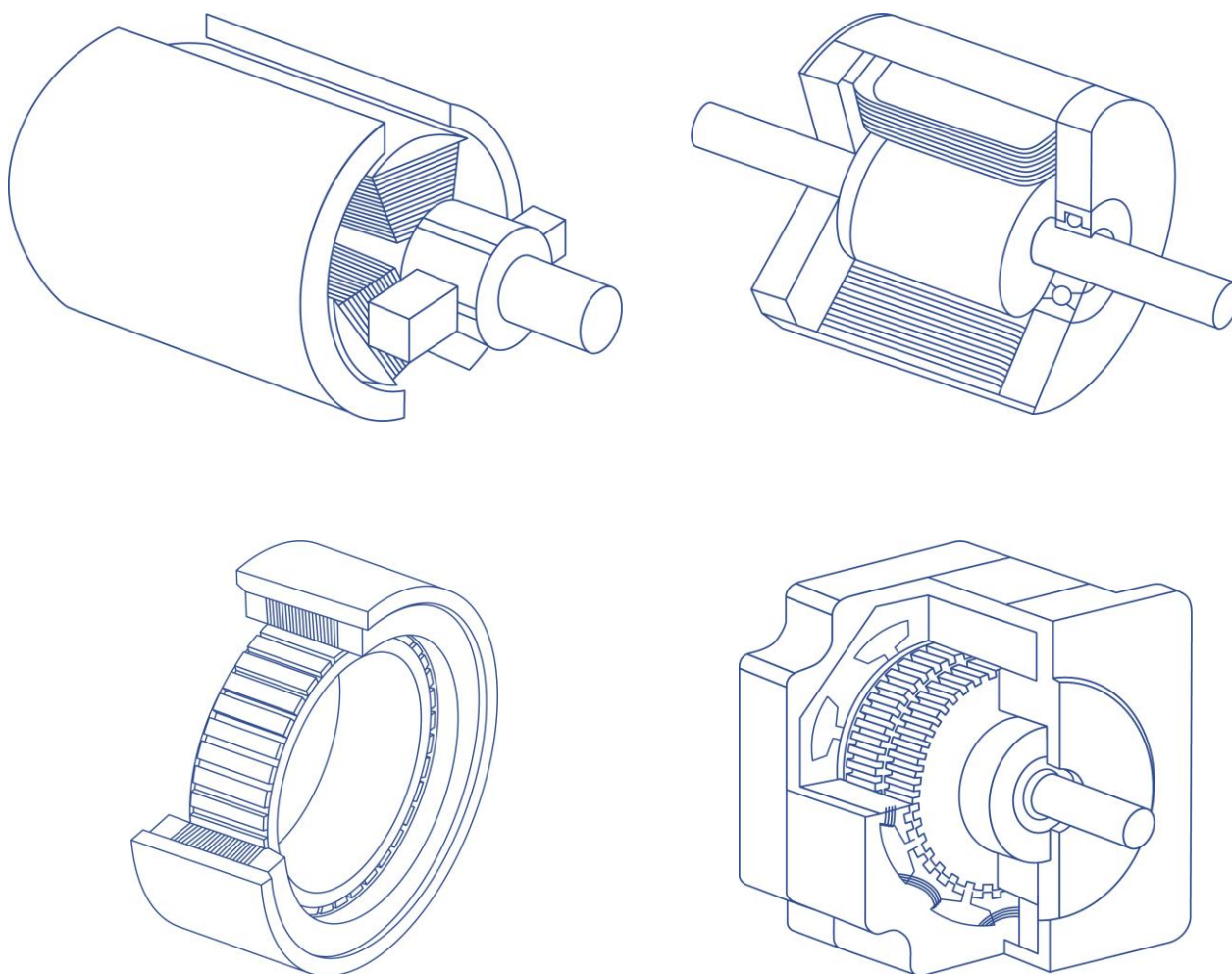


Drehende Elektromotoren für die Präzisionspositionierung

Ein anwendungsbezogener Vergleich unterschiedlicher Motortypen



Inhalt

1	Einleitung	4
2	DC-Motor (DC)	4
2.1	<i>Standardausführung</i>	4
2.2	<i>Betriebsverhalten</i>	4
2.2.1	Dauerbetrieb	5
2.2.2	Kurzzeitbetrieb	5
2.3	<i>Positionsregelung</i>	5
2.3.1	Dual-Loop-Controller	6
3	DC-Motor mit ActiveDrive (PWM)	6
4	Bürstenloser DC-Motor (BLDC) / Synchron-Servomotor (SSVM)	6
4.1	<i>Motoraufbau</i>	6
4.2	<i>Betriebsverhalten</i>	7
4.3	<i>Rotorlagenbestimmung</i>	7
4.3.1	Sensorgestützte Rotorlagenbestimmung	7
4.3.2	Sensorlose Rotorlagenbestimmung	7
4.4	<i>Blockkommutierung</i>	7
4.5	<i>Sinuskommutierung</i>	7
4.6	<i>Feldorientierte Regelung</i>	8
5	Torquemotor (TQM)	8
5.1	<i>Motoraufbau</i>	8
6	2-Phasen Schrittmotor (2SM)	9
6.1	<i>Reluktanzschrittmotor</i>	9
6.2	<i>Permanentmagnet-Schrittmotor</i>	9
6.3	<i>Hybridschrittmotor</i>	9
6.4	<i>Voll- und Halbschrittbetrieb</i>	9
6.5	<i>Mikroschrittbetrieb</i>	10

6.6	<i>Schrittverlust</i>	10
7	Getriebemotoren	10
7.1	<i>Schneckengetriebe</i>	10
7.2	<i>Kegelradgetriebe</i>	11
7.3	<i>Stirnradgetriebe</i>	11
7.4	<i>Planetengetriebe</i>	11
7.5	<i>Riemengetriebe</i>	11
7.6	<i>Harmonic Drive Getriebe</i>	12
8	Passende Motion Controller	12
9	Weitere Motortypen	12
10	Zusammenfassung	12
11	Autor	16
12	Über PI	16

1 Einleitung

Drehende Elektromotoren sind ein typischer Antrieb in der Präzisionspositionierung. In Positioniersystemen werden diese üblicherweise zusammen mit einer Gewinde- oder Kugelumlaufspindel betrieben, um die Drehbewegung des Motors in eine Linearbewegung zu übersetzen. Jeder Motortyp weist unterschiedliche Stärken und Schwächen auf. Dieses Whitepaper diskutiert einen anwendungsbezogenen Vergleich der von PI eingesetzten Motortypen und beschreibt darüber hinaus Details zu Aufbau und Funktionsweise der einzelnen Motoren.

2 DC-Motor (DC)

Gleichstrom- oder DC-Motoren (engl. Direct Current, DC) bieten eine **gute Dynamik** über einen **großen Drehzahlbereich**, eine **geringe Wärmeentwicklung** sowie einen **gleichmäßigen und schwingungsfreien Betrieb**. Für eine beispielhafte Positionierlösung ergeben sich mit einer Spindelsteigung von 1 mm/Umdrehung typische Verfahrensgeschwindigkeiten um 50 mm/s. Nachteilig sind die verschleißbehafteten Bürsten, die die **Lebensdauer auf 1000 - 5000 Stunden** begrenzen.

Ein Einsatz im **Vakuum** ist nur bis 10^{-6} mbar möglich, da sonst die Luftfeuchtigkeit fehlt, den die zur Kommutierung eingesetzten Kohlebürsten benötigen. Außerdem kommt es zum **Abrieb von Kohlestaub**, was problematisch für Einsätze im Vakuum, im Reinraum oder bei optischen Anwendungen ist.

2.1 Standardausführung

Ein DC-Motor nutzt die Kraftwirkung des elektrischen Stroms durch eine drehbar gelagerte Leiterschleife in einem Magnetfeld. Ursache für die **Bewegung** ist die **Lorentzkraft**, die aus bewegten Ladungsträgern im Magnetfeld resultiert. Mithilfe der in Abb. 1 dargestellten „Drei-Finger-Regel“ lässt sich die Richtung der Kraftwirkung relativ zur Strom- und Magnetfeldrichtung bestimmen.

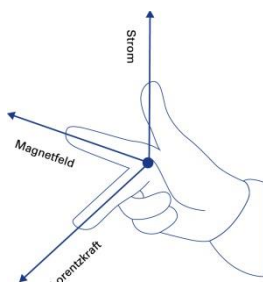


Abb. 1 Mithilfe der Drei-Finger-Regel lässt sich die Richtung des Stroms, des Magnetfelds sowie der Kraft feststellen.

Bei PI kommen hauptsächlich **permanentenerregte DC-Motoren** zum Einsatz. Dabei werden die Leiterschleifen zu einer Spule aufgewickelt und als Rotor innerhalb eines unbeweglichen Stators gelagert. Der Stator trägt die Pole aus Permanentmagneten.

Damit der Motor eine vollständige Drehbewegung ausführt, muss ein angelegter Gleichstrom in einen Wechselstrom gewandelt werden. Dazu wird ein sogenannter **Kommutator** eingesetzt. In der einfachsten Ausführung besteht dieser aus einem segmentierten Schleifring. Durch zusätzliche **Kohlebürsten** wird der Strom in der Rotorwicklung gewendet, woraus ein Wechselstrom resultiert, der bei weiterführender Bewegung die gleiche Krafrichtung aufrechterhält. Beispielhaft ist der Aufbau eines permanentenerregten DC-Motors in Abb. 2 gezeigt.

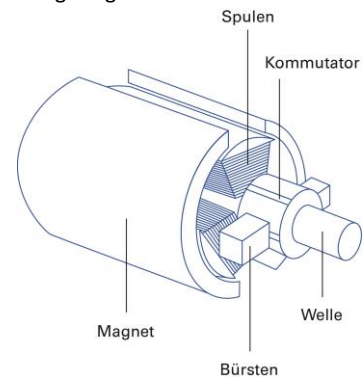


Abb. 2 Aufbau eines DC-Motors mit Statormagnet, Rotorwicklungen, Kommutator, Bürsten und Motorwelle.

2.2 Betriebsverhalten

Der Rotorkreis eines DC-Motors kann durch eine Induktivität, einen Widerstand und eine Spannungsquelle in einem elektrischen Ersatzschaltbild nach Abb. 3 vereinfacht modelliert werden.

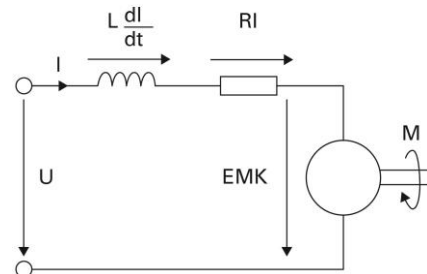


Abb. 3 Vereinfachtes Rotorkreis-Ersatzschaltbild für einen DC-Motor bestehend aus Induktivität und Widerstand der Rotorwicklung sowie der Rotorspannung.

Daraus resultiert die Motorspannung unter Anwendung des Induktionsgesetzes:

$$U = L \frac{dI}{dt} + RI + EMK$$

L ist die Wicklungsinduktivität, I der Motorstrom, R der Wicklungswiderstand und EMK ist die **induzierte Spannung, die der Bewegung entgegenwirkt**. Diese wird als **Gegen-EMK** bezeichnet, wobei EMK für elektromotorische Kraft steht. Diese ist **proportional** zur **Drehzahl**. Die maximale Drehzahl wird erreicht, wenn die Gegen-EMK der Motorspannung entspricht. Für DC-Motoren kann der Spannungsabfall über der Induktivität vernachlässigt werden, woraus eine **Proportionalität** zwischen **Spannung** und **Drehzahl** resultiert, bei der das **Vorzeichen** der Spannung die **Drehrichtung** vorgibt:

$$U = RI + k\phi 2\pi n$$

k ist die Motorkonstante, ϕ der magnetische Fluss im Luftspalt und n die Drehzahl. Das **Drehmoment** ist gemäß

$$M = k\phi I$$

proportional zum **Strom**. Werden beide Gleichungen kombiniert, folgt dass bei Belastung die Drehzahl proportional zum Drehmoment absinkt. Dies wird durch die beispielhafte **Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie** in Abb. 4 verdeutlicht.

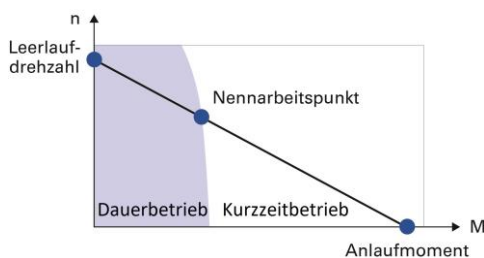


Abb. 4 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie eines DC-Motors mit Leerlaufdrehzahl, Nennarbeitspunkt, Anlaufmoment sowie Dauer- und Kurzzeitbereich.

2.2.1 Dauerbetrieb

Ein **starker Motor** ist durch eine **flache Kennlinie** gekennzeichnet, da die Drehzahl dann **unempfindlicher auf Laständerungen** reagiert. Eine Verschiebung der Kennlinie nach oben mit gleichbleibender Steigung, d.h. eine höhere **Leerlaufdrehzahl** und ein höheres **Anlaufmoment**, kann konstruktiv beispielsweise durch einen dickeren Kupferdraht in den Wicklungsreihen sowie im laufenden Betrieb durch eine höhere Spannung erreicht werden. Ein Dauerbetrieb ist grundsätzlich nur in einem eingeschränkten Drehzahl-Drehmoment-Bereich zulässig. Der **Schnittpunkt** zwischen den Bereichen **Dauerbetrieb** und **Kurzzeitbetrieb** mit der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie entspricht dem **Nennarbeitspunkt**.

2.2.2 Kurzzeitbetrieb

Die **maximal zulässige Überlastung** im Kurzzeitbereich ist durch die maximal zulässige Wicklungstemperatur begrenzt. Es kann aber auch durch sehr hohe Ströme zu einer

irreversiblen Entmagnetisierung der Permanentmagnete kommen. Weitere Limitierungen ergeben sich z.B. durch die Einbaulage sowie Konvektion, Umgebungsdruck (Vakuum) und ähnlichem. Die zulässige Verweildauer im Kurzzeitbereich beträgt üblicherweise **ein bis drei Sekunden**. Sie wird maßgeblich von der **thermischen Zeitkonstante der Wicklung** und dem **Ausmaß der Überlast** bestimmt. Typische Werte sind beispielhaft in Abb. 5 gezeigt.

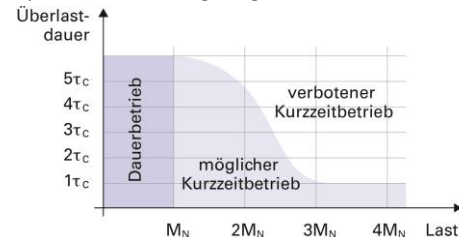


Abb. 5 Überlastdauer in Vielfachen der thermischen Zeitkonstante der Wicklung über der Überlast in Vielfachen des Nennmoments zur Darstellung des Dauer- und Kurzzeitbetriebs eines DC-Motors.

Mit zunehmender Belastung steigen durch die Proportionalität von Drehmoment und Strom die Motorverluste, was zu einer Erhöhung der Betriebstemperatur führt. Zur schnellen Abschätzung der **Temperaturänderung** können die **Stromwärmeverluste**

$$P_V = RI^2$$

mit den **Wärmewiderständen** aus dem entsprechenden **Motordatenblatt** multipliziert werden. Bei Betrieb an den thermischen Grenzen des Motors muss eine genauere Betrachtung durchgeführt werden. **Thermisch limitiert** sind die Motoren durch den Umgebungstemperaturbereich sowie durch die **maximale Wicklungstemperatur**.

2.3 Positionsregelung

Für **Positionieraufgaben** müssen DC-Motoren über einen Lagegeber, z.B. **Inkremental- oder Absolutencoder** verfügen. Durch Rückführung der Encodersignale an einen **Controller** lässt sich der Motor in einem **geschlossenen Regelkreis** betreiben. Damit kann eine hohe Positionsauflösung, ein gleichmäßiger Vorschub und ein weiter Dynamikbereich realisiert werden. Grundsätzlich lassen sich durch solche sogenannten **DC-Servomotoren** die **Position**, das **Drehmoment** und die **Drehzahl** regeln. Im Stillstand tritt aber aufgrund der Regelung ein leichter **Positions jitter** auf. Ein beispielhafter Regelkreis ist in Abb. 6 angedeutet. Für DC-Motoren wird in der Regel ein Rotationsencoder auf der Motorwelle zur Geschwindigkeitsregelung eingesetzt. Ein zusätzlicher Linearencoder an der Bewegungsplattform kann für die Positionsregelung eingesetzt werden.

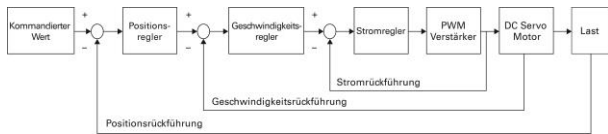


Abb. 6 Beispielhafter Regelkreis für DC-Servomotoren.

2.3.1 Dual-Loop-Controller

Bei sogenannten **Dual-Loop-Controllern**, wie sie **ACS Motion Control** anbietet, kann der **Linearencoder gleichzeitig zur Positions- und Geschwindigkeitsregelung** eingesetzt werden. Dies ist vorteilhaft, wenn der Rotationsencoder die minimale Schrittweite aufgrund geringerer Auflösung limitieren würde. Allerdings wird dadurch die Bandbreite des Geschwindigkeitsregelkreises reduziert, da der Linearencoder Schwingungen an der Bewegungsplattform stärker wahrnimmt als der Rotationsencoder auf der Motorwelle.

3 DC-Motor mit ActiveDrive (PWM)

PI hat zur Ansteuerung von Motoren, deren **Nennleistung über der Ausgangsleistung des Controllers** liegt, die **ActiveDrive-Technologie** entwickelt, um **höhere Geschwindigkeiten** zu erreichen. Dabei wird ein Verstärker zusammen mit dem Motor in einem abgeschirmten Gehäuse integriert. Der **integrierte Verstärker** wird vom Controller mit einer **Pulsweitenmodulation (PWM)** angesteuert. Über das Verhältnis der Ein- und Ausschaltdauer, wie in Abb. 7 dargestellt, wird die Motorleistung eingestellt. Dies erfordert ein separates Netzteil zur Verstärkerversorgung und eine optimierte Wärmeabfuhr zur Präzisionserhaltung.

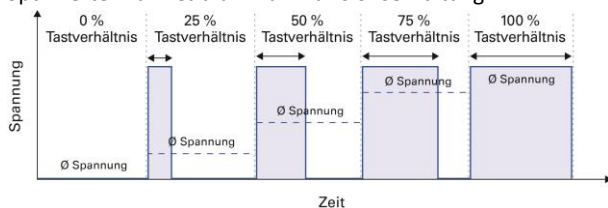


Abb. 7 Pulsweitenmodulation für verschiedene Verhältnisse der Ein- und Ausschaltdauer.

4 Bürstenloser DC-Motor (BLDC) / Synchron-Servomotor (SSVM)

Mit BLDC-Motoren (bürstenloser Gleichstrom, BrushLess Direct Current) bzw. SSVM (Synchron-Servomotoren) ergeben sich durch eine **bürstenlose Kommutierung** große Vorteile gegenüber bürstenbehafteten DC-Motoren:

- Die **Lebensdauer** wird hauptsächlich durch die Lager begrenzt und beträgt **mehrere zehntausend Stunden**. Die Motoren arbeiten also **zuverlässiger**.

- Bei gleicher Leistung kann ein **kleinerer und leichter** sowie **wartungsärmerer und effizienterer Motoraufbau** realisiert werden. Dadurch ergibt sich ein **großes Verhältnis von Drehmoment zu Motorgröße**.
- Die elektronische Kommutierung ermöglicht eine **hohe Dynamik bei geringer Wärme und wenig Vibrationen**.

BLDC- bzw. SSVM-Motoren finden deshalb gegenüber DC-Motoren vorwiegend auch im **industriellen Umfeld** Einsatz.

4.1 Motoraufbau

Entgegen des Namens entspricht der Motoraufbau nicht dem Aufbau eines DC-Motors ohne Bürsten, sondern vielmehr dem Aufbau einer **permanentenerregten Synchronmaschine**. Deshalb werden BLDC-Motoren, z.B. bei Industriemotoren im Niederspannungsbereich, als SSVM bezeichnet. Der Begriff BLDC betont eher die bürstenlose Kommutierung, während SSVM die zum rotierenden Magnetfeld synchrone Rotorbewegung hervorhebt. BLDC und SSVM werden meist synonym verwendet. Eine Unterscheidung wird manchmal aufgrund der **Ansteuerung (Block- oder Sinuskommutierung)** getroffen: Häufig wird bei Blockkommutierung von einem BLDC-Motor gesprochen, bei Sinuskommutierung von einem SSVM. Abb. 8 zeigt beispielhaft den Motoraufbau.

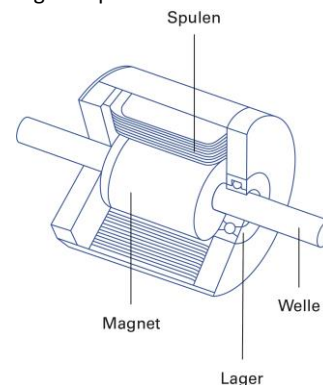


Abb. 8 Aufbau eines BLDC bzw. SSVM mit Rotormagnet, Statorwicklungen, Lager und Motorwelle.

Der Stator trägt die Wicklungen, die durch elektronische Ansteuerung ein magnetisches Drehfeld erzeugen, das den permanentenerregten Rotor antreibt. Das heißt, die **Kommutierung** erfolgt rein **elektronisch**. Deshalb wird oft auch von einem EC-Motor (elektronisch kommutiert, engl. Electronically Commutated) gesprochen. Der Rotor rotiert dabei synchron zur Wechselspannung, die an den Statorwicklungen angelegt wird, mit

$$n = \frac{f}{p}$$

Die **Drehzahl** kann nur durch die **Frequenz** f oder die Polpaarzahl p beeinflusst werden. Da die Polpaarzahl durch den Aufbau des Motors fest vorgegeben ist, kann im laufenden Betrieb eine **Drehzahlstellung** nur über die Frequenz erfolgen. Dies wird typischerweise in einem Servoverstärker durch eine **Spannungsänderung** realisiert.

4.2 Betriebsverhalten

Das Betriebsverhalten entspricht dem einer Synchronmaschine, bei der die Stromsteuerung abhängig von der tatsächlichen Pollage relativ zum Rotor schaltet. Durch diesen Betrieb kann sich die **Drehzahl nichtlinear belastungsabhängig** ändern. Dies ist in der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie in Abb. 9 zu erkennen.

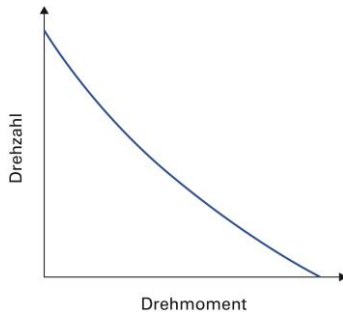


Abb. 9 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie eines BLDC- bzw. SSVM-Motors.

Abgesehen davon ähnelt das Betriebsverhalten dem eines DC-Motors. Dies erklärt trotz des abweichenden Motoraufbaus die Namensherkunft des bürstenlosen DC-Motors.

4.3 Rotorlagenbestimmung

Um den Motor synchron bei maximalem Drehmoment betreiben zu können, müssen Stator- und Rotormagnetfeld stets senkrecht zueinander stehen. Dazu muss die **Rotorlage** bekannt sein.

4.3.1 Sensorgestützte Rotorlagenbestimmung

Da kein mechanischer oder elektrischer Kontakt zwischen Stator und Rotor vorliegt, muss die relative Rotorlage z.B. durch **Hall-Sensoren** gemessen werden. Diese werden durch einen ausgerichteten Magneten genau dann umgeschaltet, wenn der Strom in der Wicklung gewendet wird.

4.3.2 Sensorlose Rotorlagenbestimmung

Alternativ kann die Rotorlagenbestimmung auch sensorlos durch **Messung der Gegen-EMK** bestimmt werden. Dies bedingt aber einen **speziellen Anlaufvorgang**, da die Gegen-EMK bei Stillstand vollständig verschwindet. Außerdem ist diese Methode **nur für den Dauerbetrieb bei hohen Drehzahlen** geeignet, da sonst die Amplitude der Gegen-EMK

zu klein ist. Typischerweise wird die Rotorlage daher sensorgestützt bestimmt.

4.4 Blockkommutierung

Erfolgt die Rotorlagenbestimmung für einen **3-Phasen-Motor** durch **drei** zueinander um 120° versetzte **Hallsensoren**, so sind die Signalkombinationen für jeweils 60° Rotorstellung eindeutig definiert. Bei der **Blockkommutierung** wird der **Strom** zwischen den Phasen für eine volle Umdrehung dann in sechs Schritten **zu je 60° blockartig umgeschaltet**. Nachteilig ist, dass das Statormagnetfeld nur über 60° konstant bleibt, während sich das Rotorfeld aufgrund des sich drehenden Permanentmagneten weiterdreht. Somit stehen die **Magnetfelder nicht zu jedem Zeitpunkt senkrecht aufeinander**. Bei Anordnung der Hallsensoren mittig zwischen zwei Umschaltunkten ergibt sich ein Fehlwinkel von je 30° , durch den das Drehmoment um etwa $13,4\%$ einbricht. Diese **Drehmomentrippel** treten mit der sechsfachen elektrischen Drehfrequenz des Motors auf, wodurch **Vibrationen** und **Geräusche** entstehen. Die Blockkommutierung und die daraus resultierenden Drehmomentrippel sind in Abb. 10 dargestellt.

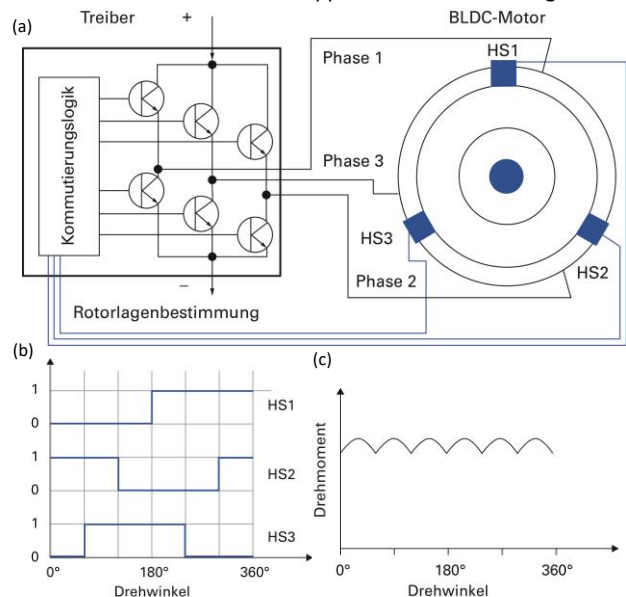


Abb. 10 (a) Prinzip der Blockkommutierung an einem BLDC-Motor. (b) Signale der Hallsensoren HS1, HS2 und HS3, (c) Drehmomentrippel.

4.5 Sinuskommutierung

Ein **ruhigerer Lauf** lässt sich durch **Sinuskommutierung** erzielen, bei der **in jeder Motorwicklung ein um 120° phasenverschobener Sinusstrom eingepreßt** wird. Sofern dabei nur Hallsensoren zur Erfassung der Rotorlage eingesetzt werden, können die Drehmomentrippel durch Interpolation

zwischen den Umschaltpunkten größtenteils vermieden werden. In der Regel wird aber ein zusätzlicher Encoder eingesetzt, der die Position des Rotors misst, wodurch die Ströme durch den Controller deutlich genauer geregelt werden können. In diesem Fall sind die Hallensensoren überflüssig bzw. werden nur zur Phasenfindung genutzt. Ein solcher Betrieb ist beispielsweise mit dem PI-Controller C-891 möglich sowie mit der SMC Hydra und Controllern von ACS Motion Control.

4.6 Feldorientierte Regelung

Bei Sinuskommutierung kann es bei hohen Rotordrehzahlen dazu kommen, dass die berechneten Ströme der tatsächlichen Rotorlage aufgrund begrenzter Regelbandbreite nacheilen, sodass **Stator- und Rotorfeld** nicht mehr **zu jedem Zeitpunkt exakt senkrecht aufeinander** stehen. Dies lässt sich durch **feldorientierte Regelung, auch Vektorregelung genannt**, vermeiden. Dies wird erreicht, indem der Stromvektor im rotierenden Koordinatensystem des Rotors geregelt wird. Dadurch lässt sich eine **erweiterte Drehzahl- und Positioniergenauigkeit** erreichen. Ein solcher Betrieb ist beispielsweise mit dem PI-Controller C-891 möglich sowie Controllern von ACS Motion Control.

5 Torquemotor (TQM)

Torquemotoren sind **spielfreie Antriebe** mit oftmals großen radialen Abmessungen. Sie können **sehr flach gebaut** werden. Die großen radialen Abmessungen ermöglichen Hohlwellen bzw. **große Aperturen**, z.B. zum Durchführen von Laserstrahlen und Kabeln. Die Spielfreiheit ermöglicht eine **hohe Positioniergenauigkeit** und eine hohe Antriebssteifigkeit, die zu einer **hohen Wiederholgenauigkeit** führt. Das **große Antriebsmoment** lässt **große Beschleunigungen** zu und führt somit zu einer **hohen Dynamik**. Weitere Eigenschaften sind **hohe Drehsteifigkeit, hohe Spitzenmomente, hoher Wirkungsgrad und hohe Laufruhe**.

Aufgrund der kompakten Bauweise in Bezug auf das Drehmoment bzw. der vorliegenden Rotationssymmetrie eignet sich der Torquemotor unter anderem für **Hochlastanwendungen auf Mehrachs- oder Rundtischen**.

5.1 Motoraufbau

Torquemotoren sind **permanentenerregte Synchronmotoren**, bei denen die Last direkt, d.h. spielfrei, mit dem Rotor verbunden ist. Man kann sich einen Torquemotor auch als **aufgerollten Linearmotor oder als kurz bauenden BLDC-Motor mit großem Durchmesser** vorstellen. Im Gegensatz zu den anderen diskutierten Motortypen wird er meist als

Direktantrieb für Rotationstische verwendet. Der Motoraufbau ist in Abb. 11 gezeigt.

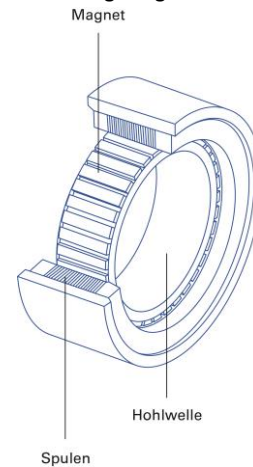


Abb. 11 Aufbau eines Torquemotors, den man sich wie einen aufgerollten Linearmotor oder als kurz bauenden BLDC-Motor vorstellen kann.

Aufgrund der zentralen Hohlwelle wird auch oft von einem **Hohlwellenmotor** gesprochen. In diesem Zusammenhang sind meist Kombinationen mit einer Spindel gemeint, womit besonders kompakte Antriebe für Lineartische realisiert werden können. Dabei handelt es sich dann nicht mehr um Direktantriebe, da die Last nicht direkt mit dem Motor verbunden ist.

Im Vergleich mit einem BLDC-Motor unterscheidet sich der Aufbau eines Torquemotors durch eine **hohe Polpaarzahl**, wodurch sich bei mittleren bis niedrigen Drehzahlen **hohe Drehmomente** bereitstellen lassen. Das Drehmoment folgt dem sogenannten Wachstumsgesetz für Drehfeldmaschinen und damit folgender Proportionalität:

$$M \sim A \cdot B \cdot l \cdot D^2$$

A ist der Strombelag in der Statorwicklung, B ist die Flussdichte im Luftspalt, l ist die aktive Motorlänge und D ist der Rotordurchmesser. Deshalb weisen Torquemotoren mit **zunehmendem Drehmoment** einen **großen Durchmesser** auf. Bei Torquemotoren trägt typischerweise der Rotor die Magnete und der Stator die Spulen, die in eine Eisenmatrix eingebettet sind. Die Spulen werden häufig 3-phasig in **Sternschaltung** betrieben. Grundsätzlich ist auch ein Betrieb in Dreieckschaltung möglich.

- Die Sternschaltung weist eine **höhere Drehmomentkonstante** auf, d.h. dass mit demselben Strom mehr Drehmoment erzeugt wird.
- Die **Dreieckschaltung** ermöglicht eine **höhere Drehzahlkonstante**, sodass mit weniger Spannung dieselbe Drehzahl erreicht werden kann.

6 2-Phasen Schrittmotor (2SM)

Schrittmotoren nehmen nur **diskrete Positionen** innerhalb einer Umdrehung ein. Aufgrund der quantisierten Schritte bieten Schrittmotoren eine **geringere Dynamik als DC-Motoren**. Hohe Drehzahlen lassen sich nur über eine hohe Schrittzahl auf Kosten des Drehmoments realisieren, da für die Einstellung der Zwischenschritte Wicklungen teilweise gegeneinander bestromt werden müssen.

Schrittmotoren können **vakuumtauglich** realisiert werden, besitzen eine **hohe Lebensdauer** und können **auch ohne Encoder zur Positionierung** eingesetzt werden. Durch einen Betrieb im offenen Regelkreis entsteht außerdem **kein Positions jitter** durch die sonst vorliegende Regelung. Zur **Erhöhung der Laufruhe** bzw. zur **Resonanzunterdrückung** wird oft ein **mechanischer Dämpfer** eingesetzt, der als **Handrad** verwendet werden kann.

Schrittmotoren gibt es in unterschiedlichsten Bauformen.

6.1 Reluktanzschrittmotor

Ein typisches Beispiel ist der **Reluktanzschrittmotor**, bei dem der Stator aus bestrombaren Wicklungen und der Rotor aus gezahntem weichmagnetischem Eisen, z.B. Elektroblech, bestehen. Bei Bestromung einer Wicklung ziehen die gerade magnetisierten Pole, die ihnen am nächsten liegenden Rotorzähne an. Dadurch wird der Rotor ausgerichtet. Durch eine feine Zahnteilung ergibt sich eine hohe Schrittauflösung. Bei ausgeschaltetem Statorstrom verschwindet das Magnetfeld des weichmagnetischen Eisens im Rotor, d.h. es liegt dann kein Rastmoment vor. Deshalb muss dieser Motortyp **zum Halten einer Position** stets **bestromt** werden.

6.2 Permanentmagnet-Schrittmotor

Bei einem **Permanentmagnet-Schrittmotor** bestehen der Stator aus Weicheisen und der Rotor aus Permanentmagneten. Bei diesem Aufbau wird **mehr Drehmoment** erreicht, jedoch ist die **Auflösung geringer**, weil ein Rotor mit vielen Polen schwer zu realisieren ist.

6.3 Hybridschrittmotor

Heutzutage werden meist beide Varianten als sogenannter **Hybridschrittmotor** kombiniert, um einen möglichst guten **Kompromiss zwischen Schrittauflösung und Drehmoment** zu erreichen. Ein typischer Aufbau ist in Abb. 12 dargestellt.

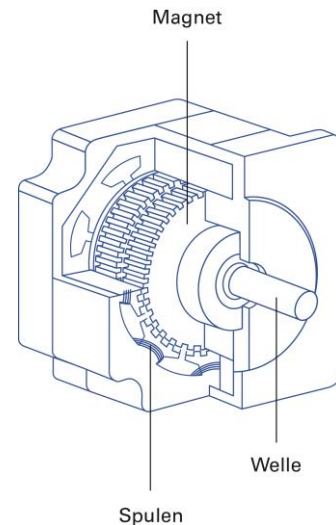


Abb. 12 Aufbau eines Hybridschrittmotors mit einem Stator aus Weicheisen und gezahntem Rotor mit Permanentmagneten.

6.4 Voll- und Halbschrittbetrieb

Die Schrittweite der bei PI eingesetzten 2-Phasen-Schrittmotoren beträgt im **Vollschrittbetrieb** in der Regel $1,8^\circ$. Dies entspricht 200 Vollschritten. Vollschrittbetrieb liegt vor, wenn **nur eine Phase oder jeweils zwei Phasen voll bestromt** werden. Bei gleichzeitiger Bestromung zweier Phasen ist das Drehmoment um 30 bis 40% höher, allerdings ist auch der Energieverbrauch doppelt so hoch. Kombiniert man die beiden Bestromungsvarianten, lässt sich der **Schrittwinkel auf die Hälfte reduzieren (Halbschrittbetrieb)**. Durch die höhere Schrittauflösung läuft der Motor dann **ruhiger**, kann aber gegenüber dem Vollschrittbetrieb mit zwei Phasen **nicht mehr das volle Drehmoment** aufbringen. Dieses reduziert sich um etwa 15%, was ggf. durch eine Erhöhung des Motorstroms ausgeglichen werden kann, während nur eine Phase unter Spannung gesetzt ist.

Vollschritt- und Halbschrittbetrieb sind in Abb. 13 dargestellt.

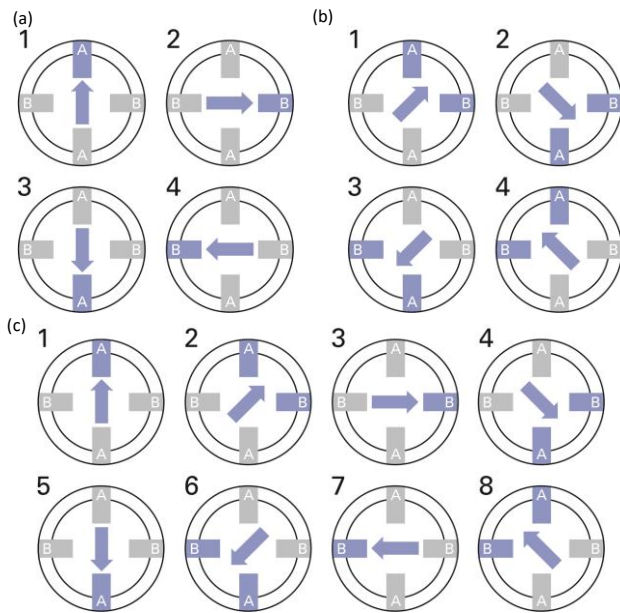


Abb. 13 (a) Vollschrittbetrieb mit einer bestromten Phase, (b) Vollschrittbetrieb mit zwei bestromten Phasen und (c) Halbschrittbetrieb.

6.5 Mikroschrittbetrieb

Im sogenannten **Mikroschrittbetrieb** können durch **elektronische Interpolation** mithilfe zweier um 90° phasenversetzter Sinus-Stromwellen sogar bis zu mehrere tausend Mikroschritte zwischen den Vollschritten realisiert werden. Das Prinzip des Mikroschrittbetriebs ist in Abb. 14 angedeutet. Durch die hohe **Schrittauflösung bei sinusförmiger Bestromung** wird ein **noch ruhigerer und vibrationsärmerer Lauf** ermöglicht.

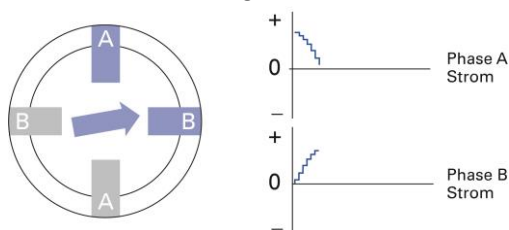


Abb. 14 Mikroschrittbetrieb bei einem 2-Phasen-Schrittmotor mit quasi sinusförmigen Stromverläufen.

6.6 Schrittverlust

Encoder sind aufgrund der zählbaren diskreten Schritte nicht zwingend erforderlich, weshalb **Schrittmotoren in einem offenen Regelkreis betrieben** werden können. In diesem Fall führt ein **möglicher Schrittverlust** zu einem **Positionierungsfehler**. Dieser kann insbesondere **bei zu hoher Last, zu hoher Beschleunigung oder bei Resonanzeffekten** auftreten. Die Ursache ist, dass der Rotor dem angelegten

Drehfeld nicht mehr folgen kann. Fehler durch Schrittverlust lassen sich nur durch einen Betrieb im geschlossenen Regelkreis, d.h. **mit zusätzlichem Encoder, vermeiden**.

Ausführliche Informationen zur Positionierung mit Schrittmotoren sind im Whitepaper „[Performance von Schrittmotorachsen](#)“ zu finden.

7 Getriebemotoren

In der Präzisionspositionierung finden Getriebe vorwiegend Einsatz, um eine **geringere Drehzahl bei größerem Drehmoment und höherer Auflösung** bereitzustellen. Bei solchen Langsamfahrten dreht sich der Rotor durch die Getriebeübersetzung vergleichsweise schnell. Ohne Getriebe könnten aufgrund der geringen Rotordrehzahl unerwünschte Rastmomente, sogenanntes Cogging, auftreten. Zudem unterstützt ein Getriebe bei **vertikalen Anwendungen die Selbsthemmung**. Eine weitere Eigenschaft ist ein häufig geringerer Regelungsaufwand, da der Motor die Last auf der Bewegungsplattform aufgrund des Getriebes nur noch um das Quadrat des Übersetzungsverhältnisses reduziert erfährt.

Eine Ausführung mit Getriebe ist aber **spielbehaftet** und zusätzliche **Reibung** verringert die Effizienz. Getriebehersteller bieten deshalb oft eine **geeignete Schmierung** an, um eine vorgesehene Lebensdauer zu garantieren. Die Lebensdauer hängt dabei maßgeblich von der Eingangsrehzahl, dem Abtriebsdrehmoment und den Betriebs-, Umgebungs-, und Einbaubedingungen ab. In Sonderlösungen erhöhen spezielle Sinter-, Kugel-, oder Keramiklager sowie Metallzahnräder und Sonderfette die Lebensdauer.

In spindelgetriebenen Positioniersystemen wirkt streng genommen auch die Antriebsspindel als Getriebe, da abhängig von der Spindelsteigung eine Geschwindigkeitsanpassung – auf Kosten des Drehmoments – erfolgt. So bewegt sich eine Bewegungsplattform bei einer Spindelsteigung von 2 mm/Umdrehung gegenüber einer Spindelsteigung von 1 mm/Umdrehung doppelt so schnell bei halbem Drehmoment. Für einige Anwendungen ist aber ein eigenes Getriebe zwischen Motor und Antriebsspindel erforderlich. Dafür setzt PI unterschiedliche Getriebetypen ein.

7.1 Schneckengetriebe

Schneckengetriebe wie in Abb. 15 bestehen aus einer Welle mit Schneckenkäfigen und einem Schneckenrad. Die Kraft wird im rechten Winkel mit **Gleitreibung** übertragen. Deshalb hat die Schneckenwelle eine **hohe Selbsthemmung**, sodass für bestimmte Anwendungen keine zusätzliche Bremse erforderlich ist. Die Gleitreibung verursacht aber einen

niedrigen Wirkungsgrad, hohen Verschleiß und unter Umständen eine **hohe Temperatur**. Typischerweise kann mit Schneckengetrieben bereits mit einer Stufe eine hohe Übersetzung erreicht werden, was sie vergleichsweise günstig macht. Für **Drehtische** setzt PI oft Schneckengetriebe aufgrund der im rechten Winkel übertragenen Bewegung ein, sodass der Motor seitlich zum Drehtisch angeordnet werden kann.

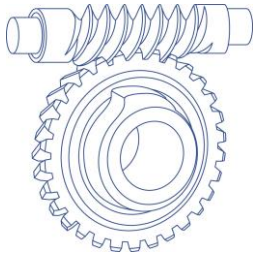


Abb. 15 Schneckengetriebe

7.2 Kegelradgetriebe

Kegelradgetriebe wie in Abb. 16 sind aus einem Kegelritzel und einem Zahnrad mit jeweils gewinkelten Zähnen aufgebaut. Ähnlich wie beim Schneckengetriebe wird die Kraft im rechten Winkel übertragen, aber erreicht eine **höhere Drehmomentkapazität**. Hohe Übersetzungen lassen sich nur durch zusätzliche Stirnradstufen erreichen. Vorteilhaft ist der auftretende **Rollkontakt**. Dadurch sind Kegelradgetriebe **verschleißärmer und effizienter** als Schneckengetriebe. Allerdings sind sie meist auch **teurer**. PI setzt Kegelradgetriebe **bei Sonderlösungen für Drehtische** ein.

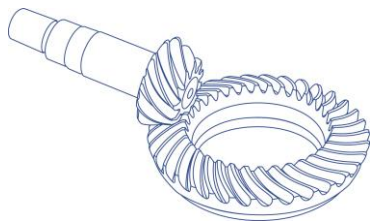


Abb. 16 Kegelradgetriebe

7.3 Stirnradgetriebe

Stirnradgetriebe wie in Abb. 17 sind aus zwei parallel zueinander liegenden, unterschiedlich großen Zahnrädern aufgebaut. Aufgrund des einfachen Aufbaus lassen sich Stirnradgetriebe besonders **einfach und robust** herstellen. **Ganzmetall-Ausführungen** erfüllen hohe Anforderungen an einen **gleichmäßigen und ruhigen Lauf**. Für **hohe Präzision bei geringem Drehmoment** können besonders **spielarme** Ausführungen realisiert werden. Dazu wird durch gegensinniges Verdrehen der Getriebestränge und deren Verspannung auf dem Motorritzel die **Vorspannung**

entsprechend eingestellt. Neben Planetengetrieben werden Stirnradgetriebe für die meisten Getriebemotoren in **Lineartischen** bei PI eingesetzt.

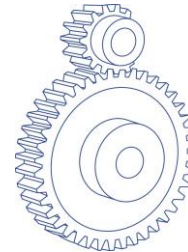


Abb. 17 Stirnradgetriebe

7.4 Planetengetriebe

Planetengetriebe wie in Abb. 18 bestehen aus einem zentralen Sonnenrad, das mit einer Welle verbunden ist, und weiteren Planetenrädern, die innerhalb eines Hohlrads liegen. Sie eignen sich für die **Übertragung höchster Drehmomente**, da die auftretende **Last auf mehrere Zahnräder verteilt** wird. Somit lassen sich **hohe Übersetzungsverhältnisse auf sehr kompakten Bauraum** realisieren. Oft sind die Zahnräder der Eingangsstufe in Kunststoff ausgeführt, um Geräusche bei höheren Drehzahlen zu reduzieren. Für Vakuumanwendungen, hohe Temperaturen oder besonders hohe Drehmomente sollte allerdings auf eine Eingangsstufe aus Stahl zurückgegriffen werden. Neben Stirnradgetrieben werden Planetengetriebe für die meisten Getriebemotoren in **Lineartischen** bei PI eingesetzt.

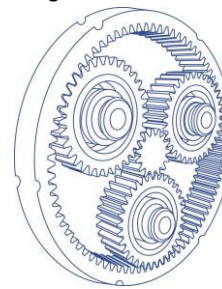


Abb. 18 Planetengetriebe

7.5 Riemengetriebe

Riemengetriebe wie in Abb. 19 bestehen aus zwei Zahnrädern, die über einen Riemen miteinander verbunden sind. Dadurch lassen sich **größere Wellenabstände überbrücken** und **hohe Umfangsgeschwindigkeiten** realisieren. Wartungsaufwand fällt hauptsächlich durch einen **Riemenwechsel oder -nachspannen** an. Der Riemen **begrenzt den Temperaturbereich**. Aufgrund auftretender **Zug- und Druckkräfte** kommt es typischerweise zu einer **größeren Wellenbelastung**. Riemengetriebe finden sich bei PI oft in besonders **kompakten Positioniertischen**, z.B. **Hub-**

oder **Lineartischen**, bei denen der **Antrieb seitlich „gefaltet“** angeordnet ist. Riemen eignen sich im Vakuum **bis 10^{-6} mbar**.

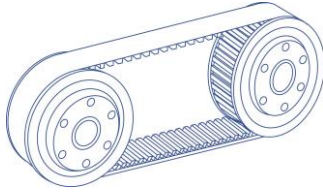


Abb. 19 Riemengetriebe

7.6 Harmonic Drive Getriebe

Harmonic Drive Getriebe wie in Abb. 20 zeichnen sich durch ein elastisches Übertragungselement aus, das für **hohe Übersetzungsverhältnisse, hohe Drehmomentkapazität, hohe lineare Torsionssteifigkeit, hohe Wirkungsgrade und Spielfreiheit** sorgt. Das elastische Übertragungselement ist eine elliptische Scheibe, die eine dünnwandige Stahlbuchse mit Außenverzahnung verformt. Die Stahlbuchse sitzt innerhalb eines Außenrings mit Kugellager und Innenverzahnung. Somit greifen bei Verformung im Bereich der größeren Ellipsenachse Innen- und Außenverzahnung spielfrei ineinander. Zusätzlich bieten Harmonic Drive Getriebe die Möglichkeit einer **zentralen Hohlwelle**, z.B. für Kabel, Wellen oder Laserstrahlen. Der komplexe und gleichzeitig **kompakte sowie wartungsfreie Aufbau** machen diese Getriebe allerdings vergleichsweise **teuer**. Für **Sonderlösungen** setzt PI manchmal Harmonic Drive Getriebe ein, um aufgrund der Spielfreiheit besonders **hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeiten** zu erreichen.

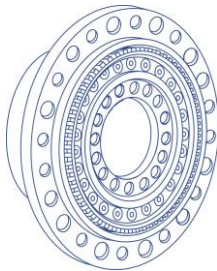


Abb. 20 Harmonic Drive Getriebe

8 Passende Motion Controller

Die Motoren können mit **verschiedenen Controllern** von PI betrieben werden, beispielsweise C-863 und C-884 für DC-Motoren, C-663 für Schrittmotoren, C-891 für BLDC-Motoren, sowie SMC Hydra, ACS-Controller oder C-885 mit entsprechenden Modulkarten für alle Motortypen.

9 Weitere Motortypen

PI setzt weitere Motortypen wie **magnetische Linearmotoren und Voice Coil Motoren** sowie weitere Torquemotoren ein. Diese Motoren werden unter der eingetragenen Handelsmarke **PIMag®** bei PI selbst entwickelt und werden deshalb in einem separaten Whitepaper diskutiert.

10 Zusammenfassung

Im Bereich der Präzisionspositionierung stehen eine Vielzahl an Motorisierungen zur Auswahl.

Die unterschiedlichen Motortypen eignen sich für bestimmte Anwendungen:

- **Schrittmotoren** als kostengünstige Lösung sowie für Vakuum-Anwendungen, kleine Geschwindigkeiten, geringe Dynamik und hohe Auflösung;
- **DC-Motoren** für kostengünstige dynamische Anwendungen;
- **ActiveDrive DC-Motoren** für eine Motorleistung, die oberhalb der Controllerleistung liegt, und somit für höhere Geschwindigkeiten;
- **Getriebemotoren** für langsame Geschwindigkeiten, hohe Drehmomente, hohe Auflösung sowie zusätzliche Selbsthemmung bei vertikalen Anwendungen;
- **Bürstenlose DC-Motoren** bzw. **Synchron-Servomotoren** für industrielle Anwendungen, hohe Dynamik und Dauerbetrieb;
- **Torquemotoren** als Direktantrieb für industrielle Anwendungen mit hohen Drehmomenten und Spielfreiheit, hoher Dynamik und Dauerbetrieb; vorwiegend für Drehtische.

Neben der Auswahl des richtigen Motors gibt es noch eine ganze Reihe weiterer Elemente, die einen Einfluss auf die Merkmale und Spezifikationen eines Positioniersystems haben. Diese müssen beim Design einer Lösung für die Präzisionspositionierung ebenfalls betrachtet werden:

- Spindel
- Führung
- Encoderart
- Encodertyp
- Encoderschnittstelle
- End- und Referenzschaltartyp
- Kabelmanagement
- Umgebungsbedingungen
- ...

Nachfolgend sind in Tab. 1 die wichtigsten Motoreigenschaften gegenübergestellt. Eine **Übersicht über die Motorisierung der Standardprodukte** bietet Tab. 2.

Tab. 1 Motortypvergleich

Eigenschaft	2SM	DC/PWM	BLDC/SSVM	TQM
Geschwindigkeit	Abhängig von Schaltfrequenz. Typisch 20 bis 30 Umdrehungen/Sekunde	Proportional zur Spannung, höher als mit 2SM. Höhere Geschwindigkeiten mit ActiveDrive. Typisch 50 Umdrehungen/Sekunde (begrenzt durch Spindel und Lautstärke)	Proportional zur Spannung, höher als mit DC. Typisch 60 Umdrehungen/Sekunde (begrenzt durch Spindel)	Hohe Geschwindigkeitsstabilität
Laufruhe	Ggf. Vibrationen bei hohen Geschwindigkeiten, Laufruhe durch mechanischen Dämpfer und Sinuskommutierung	Ruhiger als 2SM	Sinuskommutierung für sehr ruhigen Lauf (standardmäßig in ACS-Controllern und im PI-Controller C-891 sowie in der SMC Hydra)	
Auflösung / Genauigkeit	Positionsinformation auch ohne Encoder, hohe Stabilität im Stillstand ohne Regelung, sehr hohe Auflösung im Mikroschrittbetrieb	Benötigt Encoder für Positionsinformation, Auflösung ist Encoder-abhängig, Positions jitter durch Regelung		
Drehmoment	Klein bei Mikroschrittbetrieb, hoch bei kleiner Geschwindigkeit	Proportional zum Strom		Hoch, durch Anzahl der Polpaare bestimmt
Selbsthemmung	Hoch, Selbsthalten nur an einem Vollschritt (lastabhängig)	Gering, kann durch Getriebe und Präzisions-Gewindespindel erhöht werden		Praktisch nicht vorhanden
Lebensdauer	Höher als DC, vergleichbar mit BLDC/SSVM	Begrenzt durch Bürsten, typisch 1000-5000 Stunden	Begrenzt durch Lager, typischerweise mehrere 10000 Stunden, vergleichbar mit magnetischen Linearmotoren	
Sonstiges	Günstiger als DC, langlebig, zuverlässig, Positionsfehler bei Schrittverlust	Günstiger als BLDC/SSVM, geringer Regelungsaufwand, hohe Dynamik und Laufruhe, geringe Wärme	Wartungsarm, effizient und geräuscharm, geringes Gewicht, hohe Zuverlässigkeit und Dynamik, geringe Wärme und Vibrationen, Industrietauglich	Direktantrieb, hohe Antriebssteifigkeit, hohe Wiederholgenauigkeit, hohe Drehmomente, spielfrei, Hohlwelle, flach, Industrietauglich

Tab. 2 Übersicht über Standardprodukte Übersicht über Standardprodukte

Art	Produktfamilie	DC	DC-G	PWM	BLDC	SSVM	TQM	2SM	2SM-G	Manuell
Lineartische (niedrige Präzision)	L-402	x						x		
	M-110 / M-111 / M-112		x						x	
	L-406	x	x					x		
	L-408	x	x					x		
	VT-80	x						x		
	M-406		x	x						
	M-403		x	x						
	M-404		x	x						
	M-413		x	x						
	M-414		x	x						
	L-412					x				
	L-417					x				
	LS-180	x						x		
Lineartische (hohe Präzision)	L-505	x	x					x	x	
	M-122.2DD1	x								
	MTS-65							x		
	M-105 / M-106									x
	L-509	x	x	x	x			x		
	L-511	x	x	x	x			x		
	M-511 / M-521 / M-531		x	x	x					
	HPS-170	x						x		
Hubtische	L-306	x						x		
	L-310	x		x	x			x		
	M-501		x	x						
	UPL-120	x						x		
Kreuztische	L-731	x						x		
	L-738	x						x		
	L-741	x						x		
Rotationstische	M-116		x							
	RS-40	x						x		
	DT-34		x						x	
	DT-80		x						x	
	M-060 / M-061 / M-062		x	x						
	L-611	x		x	x			x		

Art	Produktfamilie	DC	DC-G	PWM	BLDC	SSVM	TQM	2SM	2SM-G	Manuell
	PRS-200		x						x	
	UPR-100						x			
	UPR-120						x			
Goniometer	WT-85	x						x		
	WT-100	x						x		
	WT-90	x						x		
	WT-120	x						x		
Linearaktoren (niedrige Last)	L-220		x						x	
	M-227		x							
	M-228 / M-229							x	x	
	M-230		x							
	M-232		x							
Linearaktoren (hohe Last)	M-235	x	x							
	L-239	x		x	x			x		
	M-238			x						

11 Autor



Dr. Nico Bolse, Produktmanager für PIMag® Magnetantriebe und Motorized Positioners bei Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG in Karlsruhe, Deutschland.

12 Über PI

Das Unternehmen Physik Instrumente (PI) ist für die hohe Qualität seiner Produkte bekannt und nimmt seit vielen Jahren eine Spitzenstellung auf dem Weltmarkt für präzise Positioniertechnik ein. Seit über 40 Jahren entwickelt und fertigt PI Standard- und OEM-Produkte mit Piezo- oder Motorantrieben.

Eine kontinuierliche Entwicklung neuartiger Antriebskonzepte, Produkte und Systemlösungen und über 200 Technologiepatente kennzeichnen heute die Unternehmensgeschichte. Dabei entwickelt, fertigt und qualifiziert PI alle Kerntechnologien selbst: Von Piezokomponenten, -aktoren und -motoren und magnetischen Direktantrieben über Luftlager, Magnet- und Festkörperführungen bis hin zu Nanometrologie-Sensoren, Regeltechnik und Software. PI ist dadurch von den am Markt verfügbaren Komponenten unabhängig, um seinen Kunden die fortschrittlichsten Lösungen anzubieten. Die hohe Fertigungstiefe ermöglicht dabei eine vollständige Prozesskontrolle, um flexibel auf die Marktentwicklungen und neue Anforderungen zu reagieren.

Durch die Übernahme der Mehrheitsanteile an ACS Motion Control, einem weltweit führenden Entwickler und Hersteller modularer Motion Controller für mehrachsige Antriebssysteme, kann PI außerdem maßgeschneiderte Komplettsysteme für industrielle Anwendungen liefern, die höchste Präzision und Dynamik fordern. Mit vier Standorten in Deutschland und fünfzehn ausländischen Vertriebs- und Serviceneiederlassungen ist die PI Gruppe international vertreten.