

Versuch EA ..

(Theorie)

Betriebsverhalten des Schrittmotors

Versuchsziel:

Aufbau, Wirkungsweise und Inbetriebnahme eines Schrittmotorantriebes.
Untersuchung des Frequenzverhaltens und Aufnahme der Betriebsfrequenzkennlinie
und der Anlauffrequenzkennlinie.

1 Einführung

Schrittmotoren werden in der Antriebs- und Steuerungstechnik für das schnelle und exakte Positionieren von mechanischen Systemen eingesetzt. Dabei bewegen sich Schrittmotoren im Gegensatz zu herkömmlichen Motoren, die sich kontinuierlich bewegen, schrittweise. Sie entsprechen in ihrem grundsätzlichen Aufbau dem eines Synchronmotors, mit sehr kleiner mechanischer Zeitkonstante. Deshalb treten auch die von diesem Motor bekannten Probleme auf:

- Läufer fällt bei Überlast außer Tritt
- Läufer gerät bei Zustandsänderung in Schwingungen.

Schrittmotoren haben meist ausgeprägte Ständerpole, deren Wicklung durch Wechselrichter gespeist werden. Dabei werden die Wicklungen zyklisch mit Stromimpulsen beaufschlagt, wodurch ein sprungförmig umlaufendes Magnetfeld entsteht. Die Intervalldauer T_s eines Stromimpulses ist veränderbar. Aus der Intervalldauer T_s ergibt sich die Schrittfrequenz f_s nach der folgenden Gleichung:

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Um sehr hohe Schrittfrequenzen zu erreichen, haben Schrittmotoren eine sehr kleine mechanische sowie elektrische Zeitkonstante. Aufgrund dessen folgt der Läufer bei kleinen und mittleren Schrittfrequenzen f_s dem Ständerfeld mit geringer Verzögerung und verharrt die meiste Zeit der Intervalldauer T_s in seiner neuen Position. Da Schrittmotorenantriebe in einer offenen Steuerkette betrieben werden (Bild 1.1), muss jeder Steuerimpuls eine Fortschaltung des Ständerfeldes um einen konstanten Winkel α_s bewirken.

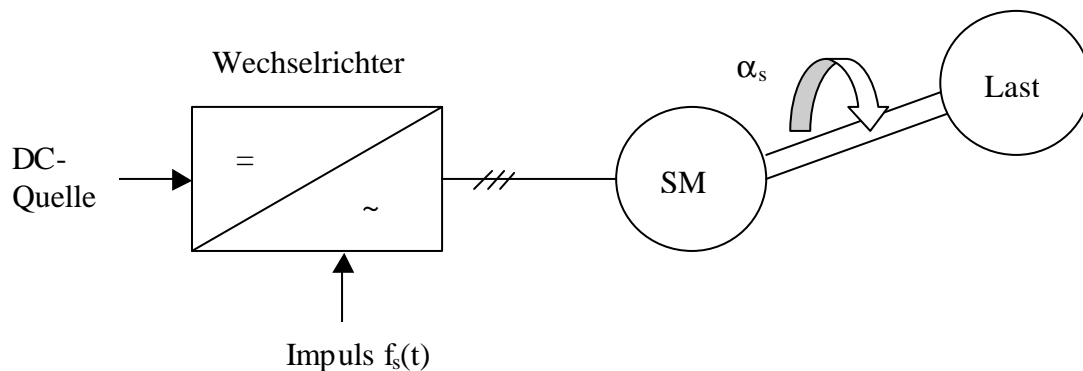


Bild 1.1 Schematische Darstellung eines Schrittmotorantriebes

Durch Aneinanderreihen einer bestimmten Anzahl von diskreten Einzelschritten bzw. Steuerimpulsen mit definierter Intervalldauer T_s , führt der Schrittmotor die gleiche Anzahl von Schritten um jeweils den Winkel α_s aus. Damit ist der zurückgelegte Gesamtwinkel ein Vielfaches des Schrittwinkels α_s . Dieses wird im folgenden Bild 1.2 schematisch dargestellt, wobei die Ausgleichsvorgänge am Intervallbeginn vernachlässigt wurden.

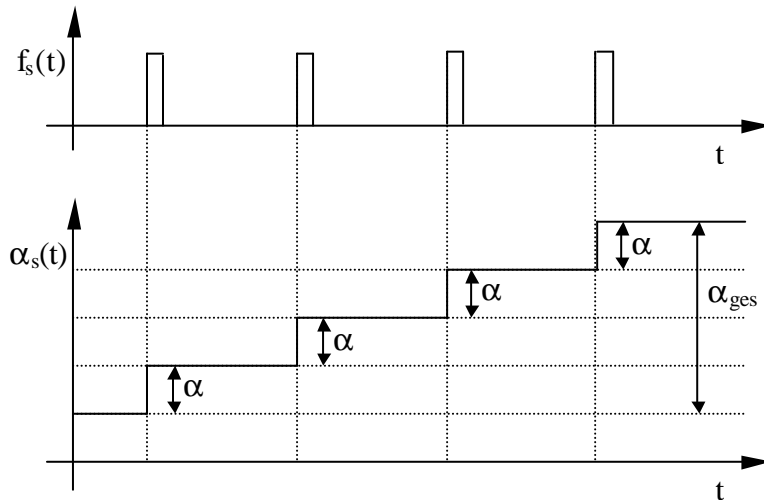


Bild 1.2 Zusammenhang zwischen Impuls und Winkel

Tatsächlich können aber infolge von Schrittwinkelfehlern, Abweichungen der Schrittwinkel untereinander auftreten. Diese Fehler können zum Beispiel durch Laständerungen, unterschiedliche Erregung und Reibung der Motorlager hervorgerufen werden. Der Rotor folgt dem sprungförmig umlaufenden Magnetfeld schrittweise. Er ist grundsätzlich unbewickelt und hat deshalb weder Kommutatoren noch Schleifringe.

2 Schrittfeld

Da Schrittmotoren nach dem Synchronprinzip funktionieren wird das Schrittfeld erzeugt, in dem man das Ständerfeld nach jedem Schrittpuls um einen bestimmten Winkel weiter schaltet. Der Läufer folgt dann dem Ständerfeld mit dem entsprechenden Schrittwinkel. Das sich schrittweise bewegendes Ständerfeld wird erzeugt durch eine geeignete Vorgabe der Strangströme des Ständers. Dabei sind die Strangströme einen großen Teil des Schrittingralls konstant und ändern sich nur beim Weiterschalten des Schrittfeldes, das heißt also beim Kommutierungsvorgang. In Abhängigkeit der Anzahl der zur gleichen Zeit mit Strom beaufschlagten Ständerwicklungen, gibt es zwei unterschiedliche Betriebsarten. Diese sollen im Folgenden erklärt werden.

2.1 Vollschrirrbetrieb

Beim Vollschrirrbetrieb ist die Anzahl und die relativen gegenseitigen Positionen der jeweils bestromten Ständerstränge konstant. Es wird nur die absolute Position von Schritt zu Schritt durch zyklisches Vertauschen der Bestromung geändert. Dabei ist man bemüht eine möglichst hohe Anzahl räumlich unmittelbar nebeneinander liegender Stränge so zu bestromen, dass durch Überlagerung der höchstmögliche Feldvektor bzw. daraus resultierend das höchstmögliche Moment entsteht. Das heißt also, dass man bei m strängigen Wicklungen entweder m oder $m - 1$ Stränge gleichzeitig bestromt. Aufgrund der beiden möglichen Stromrichtungen ergeben sich deshalb $2m$ Feldvektoren. Daher lässt sich der Schrittwinkel α_s bei Vollschrirrbetrieb durch die folgende Gleichung 2.1 berechnen.

$$\alpha_s = \frac{2p}{2m} \quad (\text{Gl. 2.1}).$$

Dieses soll anhand des folgenden Bildes 2.1 näher erläutert werden.

Im ersten Bildabschnitt ist zu erkennen, dass es sich um einen Schrittmotor mit einer Strangzahl $m = 4$ handelt. Im zweiten Bildabschnitt sind die darausfolgenden Feldvektoren, mit der Anzahl $2m = 8$, als Pfeile dargestellt. Aufgrund der Bestromung und der Stromrichtung stellen die roten Pfeile die Feldvektoren da, welche sich zum resultierenden Feldvektor des Schrittfeldes addieren. Es ist zu erkennen, dass $m - 1$ Stränge gleichzeitig bestromt werden. Auch ist anhand der Vorzeichen der Feldvektornummer ersichtlich, dass zwei Stränge positiv und ein Strang negativ vom Strom durchflossen werden. Würde sich das Schrittfeld entgegen dem Uhrzeigersinn drehen, so wären im nächsten Schritt die Feldvektoren $+1$, $+2$ und $+3$ aktiv und in der Darstellung als rote Pfeile gekennzeichnet.

An der Gleichung 2.1 ist ersichtlich, dass der Schrittwinkel α_s nur durch Vergrößerung der Strangzahl m verkleinert werden kann. Diesem ist aber aufgrund des Motoraufbaues Grenzen gesetzt. Eine weitere Möglichkeit den Schrittwinkel zu verkleinern wird im nächsten Abschnitt 2.2 erklärt.

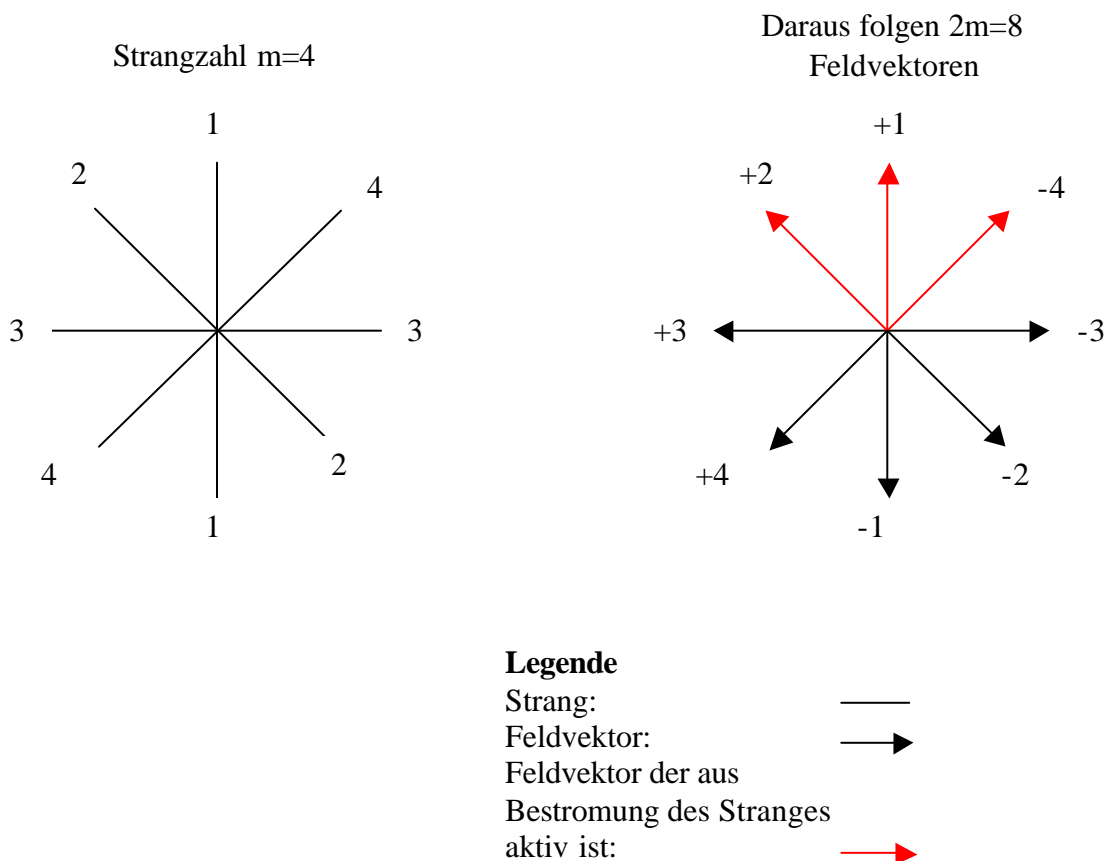


Bild 2.1 Winkel im Vollschrittbetrieb

2.2 Halbschrittbetrieb

Im Gegensatz zum Vollschrittbetrieb ist die Anzahl der jeweils bestromten Ständerstränge nicht konstant. Es wird zwischen Vollschrittbetrieb mit m gleichzeitig bestromten Strängen und $m - 1$ gleichzeitig bestromten Strängen periodisch gewechselt. Damit hat man die doppelte Anzahl an resultierenden Feldvektoren also $4m$ und es ergibt sich der Schrittwinkel α_s nach folgender Gleichung:

$$\alpha_s = \frac{p}{2m} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

An Hand dieser Gleichung 2.2 erkennt man, dass sich der Schrittwinkel α_s halbiert hat. Nachteil dieses Schrittbetriebes ist aber die ständig wechselnde Anzahl der Feldvektoren, die an der Bildung des resultierenden Feldvektors beteiligt sind, und somit ein schwankendes Drehmoment verursachen.

3 Schrittmotoren

3.1 Allgemeiner Aufbau

Wie im vorhergehenden Abschnitt 2.1 bereits genannt, sind beim Verkleinern des Schrittwinkels α_s konstruktive Grenzen im Motoraufbau gesetzt, z.B. können Nuten für Strangwicklungen nicht unendlich klein gemacht werden. Bisher wurde davon ausgegangen, dass wie bei herkömmlichen Synchronmotoren die Ständerwicklungen in einer Ebene angeordnet sind. Es ist aber auch möglich, die Ständerwicklungen in einer Achse hintereinander anzuordnen. Damit würde man dem Problem der kleinen Nutenteilung aus dem Wege gehen. Trotzdem ist die Anzahl der Ständerwicklungen durch den wirtschaftlichen Aufwand im Wechselrichter begrenzt, denn eine Erhöhung der Anzahl der Ständerwicklungen hat eine Erhöhung der Phasenzahl des Wechselrichters zur Folge. Sind die Wicklungen in einer Ebene angeordnet, so sind sie gegeneinander verdreht. Im Gegensatz dazu sind die Läufer gegeneinander verdreht wenn die Wicklungen in einer Achse hintereinander angeordnet sind. Die jeweils anderen Motorteile fluchten miteinander. Beide Aufbaumöglichkeiten eines Schrittmotors sind im folgenden Bild 3.1 dargestellt. Dabei entspricht ein System jeweils einen Ständerpol.

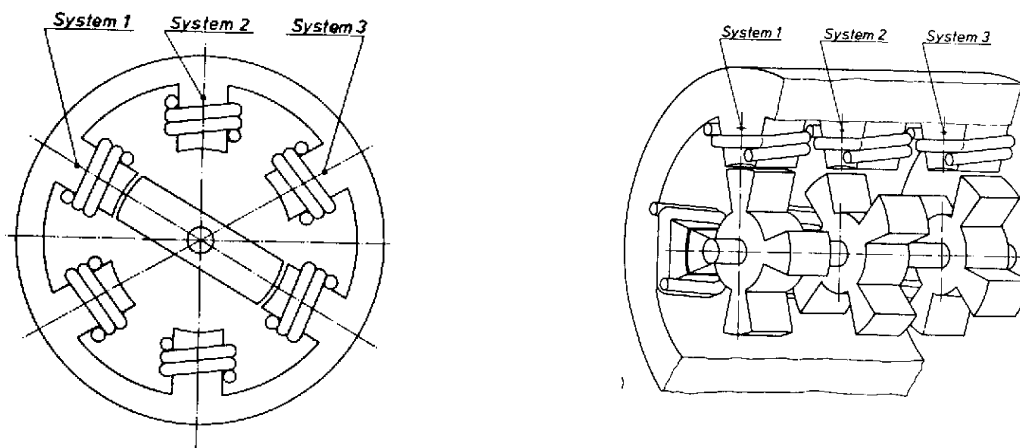


Bild 3.1 Prinzipieller Schrittmotoraufbau

Während die Ständer bei allen Schrittmotortypen vom grundsätzlichen Aufbau gleich sind, unterscheiden sie sich im Läufer erheblich. Es gibt daher drei Grundtypen von Schrittmotoren. Zu diesen zählt der permanentmagnetisch erregte Schrittmotor, der Schrittmotor mit variabler Reluktanz und der Hybridschrittmotor. Diese Grundtypen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.2 Permanentmagnetisch erregter Schrittmotor

Permanentmagnetisch erregte Schrittmotoren (PM – Schrittmotor) entsprechen in ihrem Aufbau grundsätzlich dem einer Synchronmaschine mit permanentmagnetisch erregten Vollpolläufer. Somit ist der Läufer eines PM – Motors mehrpolig (heteropolar) am Umfang magnetisiert. Aufgrund dessen wird er auch als Wechselläufer bezeichnet. Der grundsätzliche Aufbau ist im folgenden Bild 3.2 dargestellt.

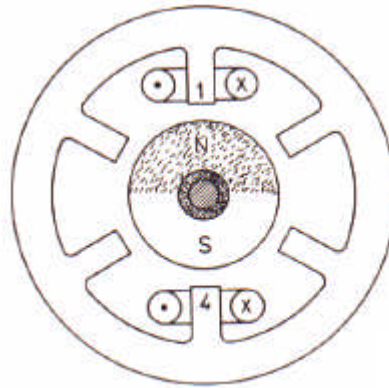


Bild 3.2 Prinzipieller Aufbau eines PM – Schrittmotors

Das Funktionsprinzip ist bereits von der Synchronmaschine bekannt. Der Läufer richtet sich immer polaritätsrichtig in dem vom Ständer vorgegeben Magnetfeld aus, ebenso wie eine Kompassnadel im Erdmagnetfeld. In unserem Fall handelt es sich bei diesem Magnetfeld um ein Schrittfeld, wie es im Kapitel 2 bereits erläutert wurde. Aufgrund dessen bewegt sich der Läufer schrittweise mit dem vorgegeben Winkel und der vorgegebenen Schrittfrequenz. Auch wenn kein Ständerfeld anliegt entwickelt der Läufer ein Selbsthaltemoment. Bei diesem Moment handelt es sich um das maximal mögliche Drehmoment, mit dem ein nicht erregter Schrittmotor statisch belastet werden kann. Einer der am häufigsten gebauten PM – Schrittmotoren ist der Klauenpol-Schrittmotor.

3.3 Reluktanzschrittmotor

Im Gegensatz zum PM – Schrittmotor hat der Reluktanzschrittmotor (VR – Schrittmotor) einen unerregten, aus weichmagnetischen Material bestehenden Läufer. Der konstruktive Aufbau entspricht dem einer Synchronschenkelpolmaschine mit unerregtem Rotor und ist im Bild 3.3 dargestellt. Der Läufer bietet aufgrund seines Aufbaus dem Magnetfeld einen veränderlichen magnetischen Luftspaltwiderstand (engl. Variable reluctance). Dieses ist der Grund warum der VR – Schrittmotor ein Moment aufbaut. Der Läufer ist bestrebt sich im Ständerfeld so auszurichten, das die magnetische Energie im Luftspalt minimal wird. Damit steht fest, dass der Läufer dem Schrittfeld folgt. Um bei VR – Schrittmotoren eine definierte Drehbewegung zu erreichen braucht der Motor mindestens 3 Ständerwicklungen. Bei nur zwei Ständerwicklungen könnte sich der Läufer, da er unerregt ist, in oder auch entgegen dem Uhrzeigersinn bewegen und somit wäre die Drehrichtung nicht eindeutig bestimmbar.

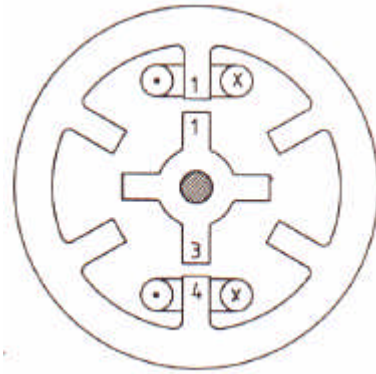


Bild 3.3 Prinzipieller Aufbau eines VR – Schrittmotors

Um sehr kleine Winkel zu ermöglichen werden VR – Schrittmotoren oft in Mehrständerausführung, wobei die einzelnen Stränge axial hintereinander angeordnet sind, gefertigt. Diese Aufbaumöglichkeit ist bereits im Abschnitt 3.1 erläutert. Dabei wird der Schrittwinkel vor allem von der Anzahl der Rotorzähne bestimmt. In dem Bild 3.3 hat der Rotor 4 Zähne. Da die Zähne des Rotors relativ einfach zu fertigen sind, erreicht man auf dem Prinzip des VR – Schrittmotors kleinere Winkel als beim PM – Schrittmotor. Aber ein Nachteil des VR – Schrittmotors gegenüber dem PM – Schrittmotor ist, dass er kein Selbsthaltemoment besitzt.

3.4 Hybridschrittmotor

Der Hybridschrittmotor vereinigt in sich die Vorteile des PM – Schrittmotors und des VR – Schrittmotors. Somit sind mit diesem Motor sehr kleine Schrittwinkel möglich und er besitzt ein Selbsthaltemoment. Der Aufbau des Motors ist im folgenden Bild 3.4 dargestellt.

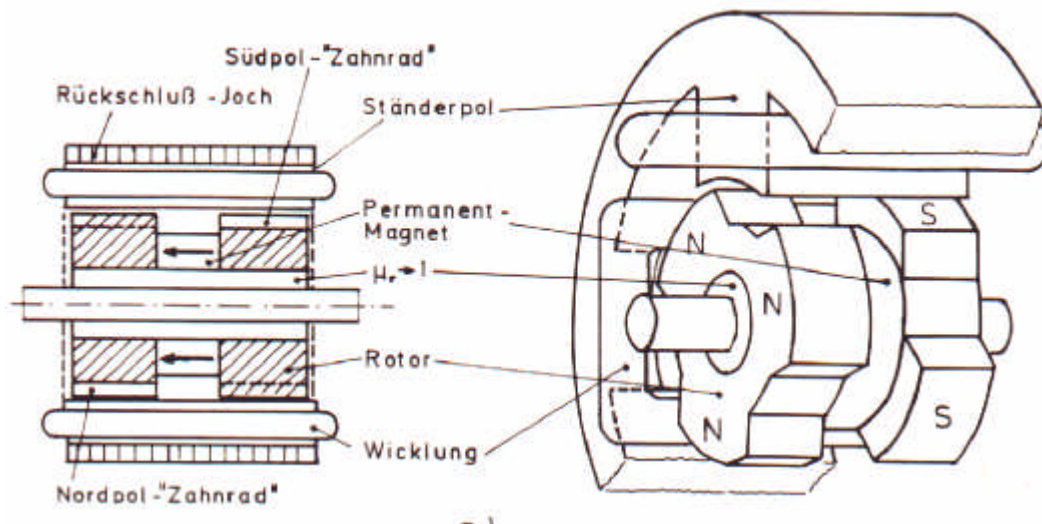


Bild 3.4 Prinzipieller Aufbau eines Hybridschrittmotors

Wie in dem Bild 3.4 zu erkennen ist, besteht der Rotor des Hybridmotors aus einem Permanentmagneten und zwei gezahnten Rotorscheiben. Diese Rotorscheiben bestehen aus weichmagnetischen Material und werden somit vom Permanentmagneten vormagnetisiert. Da sich der Permanentmagnet zwischen den beiden Rotorscheiben befindet, bildet jeweils eine Rotorscheibe einen Pol. Betrachtet man eine Rotorscheibe als eigenständigen Läufer, so ist dieser im Gegensatz zum Läufer des PM – Schrittmotors einpolig (homopolar). Aufgrund dessen bezeichnet man diesen Läufer auch als Gleichpolläufer. Durch die Zahnung der beiden Rotorscheiben wird der Vorteil des VR – Schrittmotors, sehr kleine Winkel zu ermöglichen, auf dem Hybridmotor übertragen. Das Selbsthaltemoment welches den PM – Schrittmotor auszeichnet, ist auch im Hybridmotor aufgrund des Permanentmagneten zu finden. Dieser Schrittmotor arbeitet mit einer Kombination aus Permanentmagnetischer Erregung und dem Reluktanzeffekt. Das bedeutet, dass der Rotor sich so im Schrittfeld bewegt, das die magnetische Energie im Luftspalt minimal wird.

4 Ansteuerschaltungen

Wie bereits in der Einführung erwähnt, werden Schrittmotoren mittels Wechselrichter angesteuert. Die Ansteuereinheit besteht neben dem Wechselrichter, der als Leistungsteil arbeitet, auch noch aus einem Logikteil. Der Logikteil ist ein integriertes Bauelement oder ein Mikroprozessor, der die Eingaben des Bedieners, wie Drehrichtung, Impulsfolge und Betriebsart, verarbeitet. Mit diesen Informationen schaltet der Logikteil den Leistungsteil, also den Wechselrichter. Der Wechselrichter macht dann aus einer Gleichspannung eine Wechselspannung, nach den Vorgaben des Logikteils. Dabei ist aber keine ideale Wechselspannung in Sinusform erwünscht, sondern eine Rechteckspannung die einen konstanten Strom durch die Wicklungen treibt. So das für die Ansteuerung Block- bzw. Schwenksteuerung im einfachsten Fall von Nöten ist. Die Ansteuereinheit ist im folgenden Bild 4.1 schematisch dargestellt.

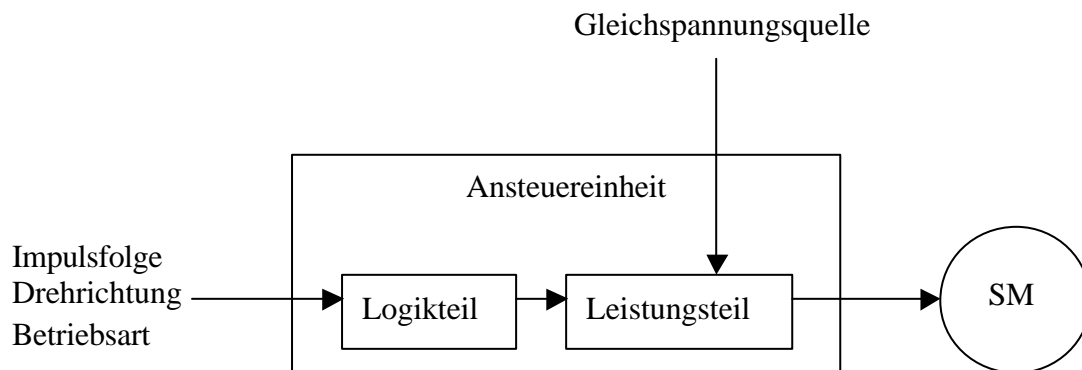


Bild 4.1 Prinzipieller Aufbau der Ansteuereinheit eines Schrittmotors

Neben der Ansteuereinheit wird der Verlauf des Stromes \underline{I} in den Wicklungen von dem ohmschen Ständerwiderstand R und der Ständerinduktivität L beeinflusst. Auch die Drehung des Läufers, welche eine Spannung \underline{E} im Ständer induziert, die in guter Näherung einen sinusförmigen Verlauf hat, verändert die Form des Stromes in den Wicklungen. Der Strom hat deshalb nicht den gewünschten rechteckförmigen Verlauf. Er unterliegt immer einem Ausgleichvorgang, das heißt er nähert sich exponentiell seinem Endwert an. Um es zu veranschaulichen, ist im folgenden Bild 4.2 das einphasige Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb eines PM – Schrittmotors und im Bild 4.3 der Verlauf des Stromes $i(t)$ und der Spannung $u(t)$ bei niedriger Schrittfrequenz in den Wicklungen dargestellt.

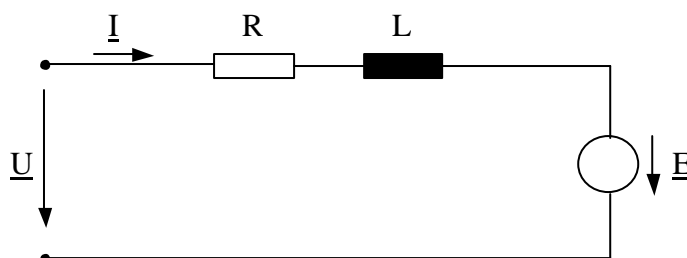


Bild 4.2 Ersatzschaltbild für PM – Schrittmotor

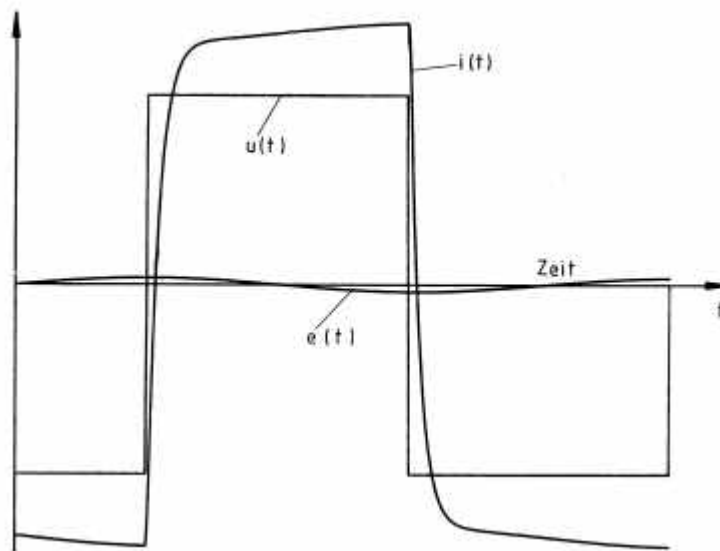


Bild 4.3 Darstellung von Strom- und Spannungsverlauf bei niedriger Schrittfrequenz

In dem oberen Bild 4.3 ist zu erkennen, dass der Strom $i(t)$ nahezu seinen Endwert erreicht. Er hat den schon bereits auf der vorhergehenden Seite erläuterten Verlauf. Allerdings stellt dieses Bild 4.3, Spannung und Strom nur für kleine Schrittfrequenzen da. Mit Erhöhen der Schrittfrequenz wird die induzierte Spannung $e(t)$ im Verhältnis zur angelegten Motorspannung $u(t)$ größer. Der Einfluss auf den Strom $i(t)$ nimmt zu, so dass der Strom beim Ausgleichvorgang aufgrund der elektrischen Zeitkonstante nicht mehr seinen Endwert erreicht. Dieses ist im folgenden Bild 4.4 dargestellt.

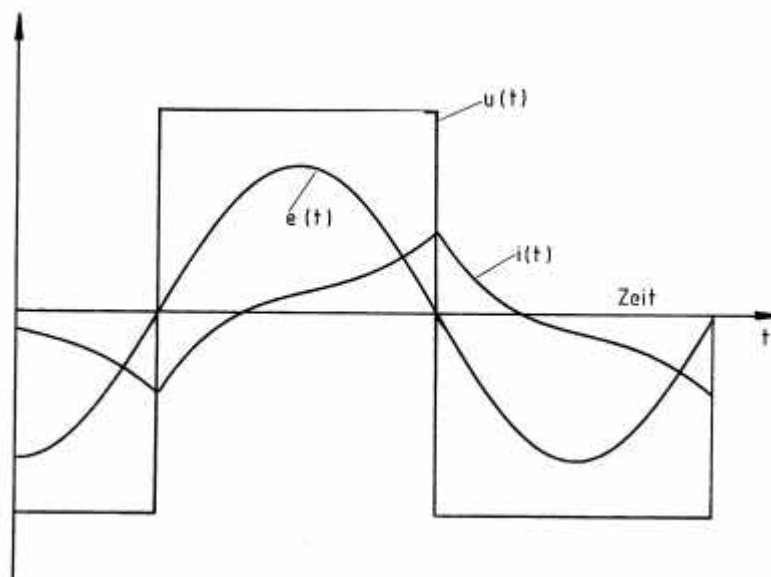


Bild 4.4 Darstellung von Strom- und Spannungsverlauf bei hoher Schrittfrequenz

Aufgrund dessen, dass der Strom nicht mehr seinen Endwert erreicht sinkt das Motormoment. Dieser Effekt wird mit zunehmender Schrittfrequenz immer stärker. Man kann mit einem Vorwiderstand in jeden Strang, so dass die elektrische Zeitkonstante sinkt, die Anstiegsgeschwindigkeit des Stromes wieder erhöhen. Dabei muss natürlich auch die Spannung um den zusätzlichen Spannungsabfall über den Vorwiderstand erhöht werden, damit auch weiterhin Nennstrom fließen kann. Nachteil dieser Variante ist der zusätzliche Verlust über den Vorwiderstand und deshalb kann diese Variante nur bei kleinen Schrittmotoren eingesetzt werden. Bei größeren Schrittmotoren bedient man sich nicht wie bisher erläutert dem Konstantspannungsbetrieb sondern dem Konstantstrombetrieb. Hierbei wird eine viel höhere Spannung, als zur Erreichung des Nennstromes nötig wäre, von einem Regler ständig zu- bzw. abgeschaltet, so dass der Strom konstant auf Nennstrom gehalten wird. Vorteil dieser Variante ist die schnelle Anstiegszeit des Stromes, bedingt durch die sehr hohe Spannung.

In Abhängigkeit von der Stromrichtung in den Wicklungen unterscheidet man zwei Ansteuerungsarten. Während die unipolare Ansteuerung den Strom nur in eine Richtung durch die Wicklungen des Ständers fließen lässt, ermöglicht die Bipolare Ansteuerung den Stromfluss auch in beide Richtungen. Die Ansteuerungen sind in den beiden folgenden Abschnitten näher erläutert.

4.1 Bipolare Ansteuerung

Wie schon im vorhergehenden Kapitel 2. Schrittfeld erläutert, benötigt man in einen Ständerstrang zwei Stromrichtungen um einen Polaritätswechsel des Magnetfeldes zu bewirken. Dieses wird bei der bipolaren Ansteuerung durch einen einphasigen Wechselrichter pro Strang erreicht. Im folgenden Bild ist eine solche Ansteuerung für einen Zweisträngigen Motor dargestellt.

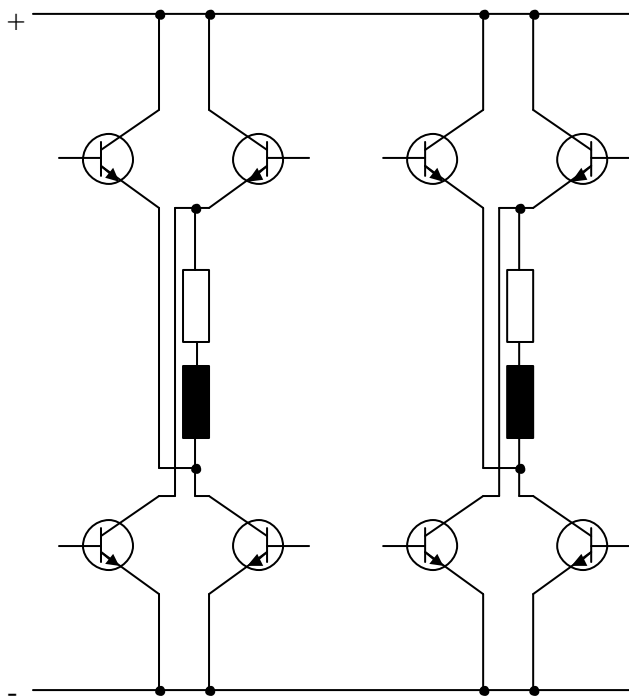


Bild 4.5 Bipolare Anschaltung eines Zweisträngigen Motors

Aufgrund der vier Transistoren pro Strang ist es möglich die Anschlüsse der Wicklung umzupolen und damit den Strom abwechselnd in beide Richtungen fließen zu lassen. Dies bedeutet für eine Stromrichtung, dass immer zwei gegenüberliegende Transistoren zur gleichen Zeit durchgeschaltet sein müssen. Dadurch entsteht ein hoher Schaltungs-
aufwand für Motoren mit vielen Polen. Eine Möglichkeit diesen Schaltungs-
aufwand zu reduzieren wird im folgenden Abschnitt 4.2 unipolare Ansteuerung erläutert.

4.2 Unipolare Ansteuerung

Der Polaritätswechsel des Stromes wird im Gegensatz zur bipolaren Ansteuerung durch zwei getrennte Wicklungen pro Phase erreicht. Sie sind im Ständerstrang so angeordnet bzw. werden so an den Plus und Minus Pol angeschlossen, dass sie eine entgegengesetzte Stromrichtung im Strang ermöglichen. Dabei ist jeweils immer nur eine Wicklung zur selben Zeit bestromt. Will man nun das Magnetfeld eines Stranges umkehren, so muss nur von der einen Wicklung auf die andere Wicklung umgeschaltet werden. Im folgenden Bild 4.5 ist für einen Zweisträngigen Motor ein mögliches Anschaltungsbeispiel dargestellt.

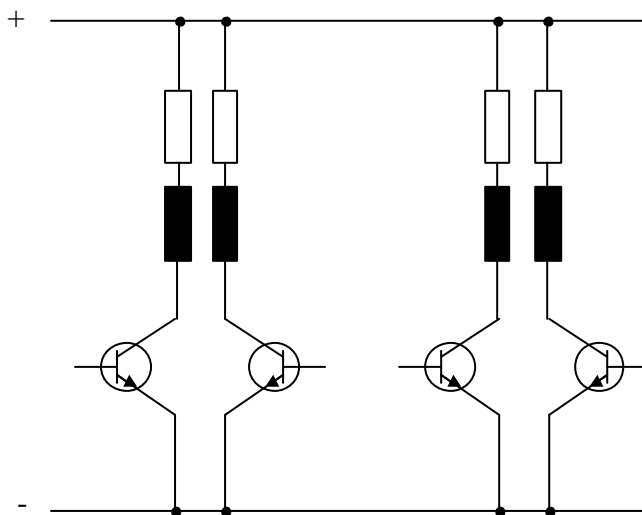


Bild 4.6 Unipolare Anschaltung eines Zweisträngigen Motors

In dem Bild 4.6 ist zu erkennen, dass pro Strang zwei Transistoren benötigt werden um die jeweilige Wicklung, welche an der Bildung des Magnetfeldes beteiligt sein soll, zu bestromen. Somit wird der Schaltungs-
aufwand durch einen erhöhten Wicklungsaufwand im Gegensatz zur bipolaren Ansteuerschaltung vermindert. Nachteil einer solchen Ansteuerung ist es aber, dass bei gleichen Wickelraum eine kleinere Durchflutung bei gleicher thermischer Beanspruchung gegenüber der bipolaren Ansteuerung erreicht wird. Somit ist das Drehmoment bei unipolarer Ansteuerung um ca. 30% kleiner als bei einer bipolaren Ansteuerung.

5 Statisches Drehmoment

Das statische Drehmoment M_S ist das Moment, welches sich im Ruhezustand des Motors in Abhängigkeit vom Lastmoment M_L einstellt. Das heißt, dass die Größe des ständererregten Feldes zeitlich konstant ist und das Feldmaximum sich ebenfalls zeitlich konstant an einer Position y_s befindet. Im unbelasteten Zustand ist der Rotor in positioneller Übereinstimmung mit dem Maximum des ständererregten Feldes, also in der Position y_s . Wird dieser nun durch ein äußeres Lastmoment M_L aus diese Position y_s in eine neue Position y verdreht, so bildet sich das inneres statische Moment M_S . In der Position y sind dann Lastmoment M_L und statisches Moment M_S gleich groß. Man spricht hierbei von einer stabilen Gleichgewichtslage. Da Schrittmotoren in ihrem Aufbau und in ihrer Funktionsweise der Synchronmaschine entsprechen, ändert sich das statische Moment M_S sinusförmig. Die bisher genannten Fakten sind im folgenden Bild 5.1 anschaulich dargestellt.

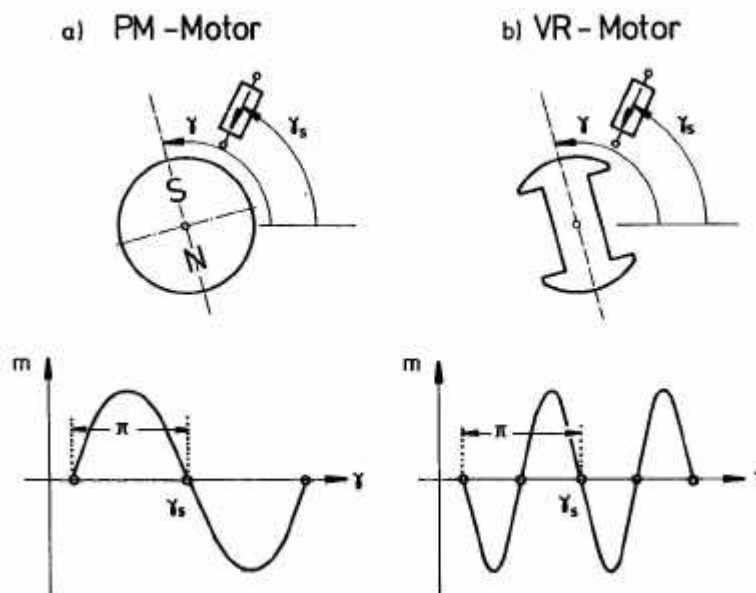


Bild 5.1 Statisches Drehmoment bei Schrittmotoren

Dabei hängt dieses Moment genauso wie bei der Synchronmaschine vom Polradwinkel δ , also von der Winkeldifferenz $\delta = y - y_s$, ab. Weiterhin wird dieses Moment vom Haltemoment M_H und von einem Faktor K beeinflusst. Das Haltemoment M_H des Schrittmotors ist das maximale statische aufbringbare Lastmoment M_L , dem der Rotor des bestromten Schrittmotors ohne Übergang in eine dauernde Drehbewegung standhält. Es ist selber eine Funktion der Ständererregung und wird bei kleiner werdender Erregung auch kleiner. Der Faktor K verändert die Periodizität der Sinusfunktion und gibt damit Aufschluss über die Motorart (PM-Motor bzw. VR-Motor).

Wie bereits im Abschnitt 3.2 erläutert, entspricht der PM-Motoren einer Vollpolmaschine. Bei diesem Motor stellen sich erst nach einen vollen Umlauf des Rotors wieder die ursprünglichen Feldverhältnisse ein. Im Gegensatz dazu ist der VR-Schrittmotoren identisch mit dem unerregten Schenkelpolmotor und somit sind die Feldverhältnisse schon nach einer halben Umdrehung wieder übereinstimmend zur Ausgangssituation. Daraufhin ist K bei PM-Motoren aufgrund der Periodizität von $2p$ gleich 1 und bei VR-Motoren mit einer Periodizität von p gleich 2. Dieses ist ebenfalls im Bild 5.1 dargestellt. Es ergibt sich somit für das Statische Moment folgende Funktion (5.1).

$$M_s = -M_H \cdot \sin(k \cdot (y - y_s)) \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Im folgenden Bild 5.2 ist die Abhängigkeit des statischen Verdrehungswinkels β vom Lastmoment M_L dargestellt. Es ist zu erkennen das der Motor, auf ein Lastmoment dessen Betrag kleiner als das Haltemoment M_H sein muss, mit einer statischen Verdrehung des Rotors um den Winkel β reagiert. Ist das Lastmoment größer als das Haltemoment, so kommt es zu einer dauernden Drehbewegung, welche einen Funktionsausfall im Sinne des Schrittmotors zur Folge hat. Diesem kann dann nur durch ein Vermindern des Lastmomentes oder ein Erhöhen der Ständererregung entgegengewirkt werden.

Der Winkel β ist die Differenz zwischen dem Winkel y_s , der sich im unbelasteten Zustand ($M_L=0$) einstellt, und dem belastungsabhängigen Winkel y ($M_L \neq 0$). Er wird auch als statischer Schrittwinkelfehler bezeichnet.

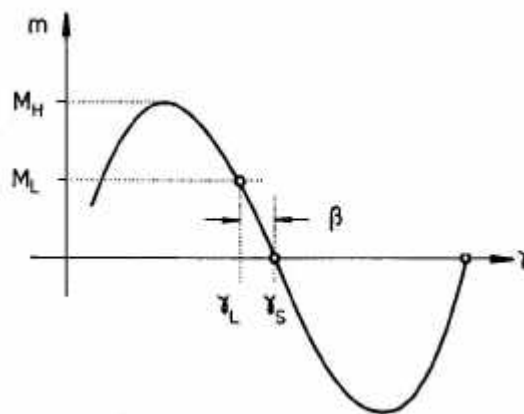


Bild 5.2 Winkel in Abhängigkeit vom Lastmoment

Erfolgt nun eine Schrittfortschaltung von Schritt $n-1$ auf den Schritt n unter der Voraussetzung, dass alle Ausgleichsvorgänge vor Beendigung des jeweiligen Schrittes abgeklungen sind, so läuft die statische Schrittfortschaltung wie im Bild 5.3 ab. Es ist eindeutig erkennbar, dass das Haltemoment M_H konstant bleibt und sich die Position y_s für den unbelasteten Zustand um einen Fortschaltwinkel β_s verschiebt. Vor der Schrittfortschaltung befand sich der Rotor aufgrund des Lastmomentes M_L in der Position 1. Durch die Schrittfortschaltung wird das statische Moment des Schrittes n wirksam. Es ist im Bild 5.3 durch die Position 2 gekennzeichnet.

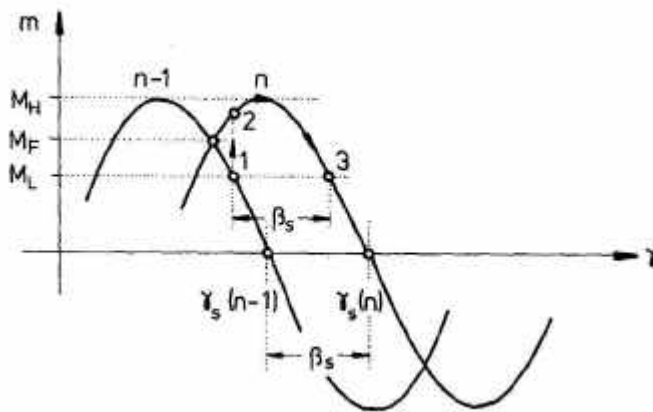


Bild 5.3 Statisches Moment bei Schrittfortschaltung

Aufgrund des positiven Differenzmomentes zwischen Position 1 und Position 2 ($M_S > M_L$) kommt es zur Bewegung des Rotors. Dieser bleibt dann nach Abklingen der Ausgleichsvorgänge an der Position 3 stehen. Wurde das Lastmoment während des Schrittes wie im Bild 5.3 nicht verändert, stimmen Fortschaltwinkel des Läufers zwischen Position 1 und 3 und Fortschaltwinkel β_s des Ständerfeldes überein.

Weiterhin ist im Bild 5.3 zu erkennen, dass das Lastmoment M_L kleiner als das Fortschaltmoment M_F sein muss, damit bei Schrittfortschaltung ein positives Differenzmoment zwischen Position 1 und Position 2 entsteht. Ist dies nicht der Fall kommt es zu Schrittfehlern.

6 Sonderbauformen und Anwendungen von Schrittmotoren

Schrittmotoren werden, wie in der Einführung bereits erwähnt, hauptsächlich für Positionieraufgaben eingesetzt. Um Schrittmotoren innerhalb dieses Aufgabenbereiches für alle möglichen Anwendungen zu benutzen, gibt es eine Reihe von Sonderbauformen, die im folgenden kurz genannt und erläutert werden sollen.

Eine Sonderbauform bei Reluktanzmotoren ist der Schrittmotor mit Kurzschlussläufer. Bei dieser Bauweise wird neben dem Reluktanzeffekt auch das asynchrone Moment eines Kurzschlussläufers ausgenutzt. Dieses ermöglicht ein besseres Anlaufen und Abbremsen und erhöht zusätzlich die Stabilität des Schrittmotors. Weiterhin werden Schrittmotoren als Kombination eines herkömmlichen Schrittmotors und eines hydraulischen Verstärkers gefertigt. Dieses ist notwendig um Schrittmotoren einzusetzen für Positionieraufgaben die große Leistungen benötigen. Dabei wird das vom Schrittmotor erzeugte Moment durch die Hydraulik verstärkt. Um Schrittmotoren für lineare Stellaufgaben benutzen zu können, werden sie mittels eines geeigneten mechanischen Übertragungssystem, wie z.B. Schneckengetriebe oder mittels Riemen dazu in die Länge versetzt. Eine weitere Sonderbauform ist der Schrittmotor mit Taumelläufer. Dieser Läufer ermöglicht eine mechanische Übersetzung zwischen dem magnetischen Drehfeld und dem Läufer selber. Dieses ist möglich, da der Läufer aus zwei verzahnten Ringen besteht, wobei die Zahnung unterschiedlich groß gewählt wird und am inneren Ring außen sowie am äußeren Ring innen angebracht ist. Das Magnetfeld verformt den inneren Läufer zu einer Ellipse und verursacht dadurch ein in einander greifen der beiden Ringe. Durch die unterschiedliche Zahnung ist damit ein Übersetzungsverhältnis gegeben, welches sehr kleine Schritte ermöglicht.

Aufgrund dieser Modifizierungen und alleine schon auf Basis der Grundtypen von Schrittmotoren gibt es eine Reihe von Anwendungen wobei im folgenden nur eine Auswahl genannt werden sollen. So werden Schrittmotoren eingesetzt z.B. bei Werkzeugmaschinen als Schlittenantrieb oder bei der Zuführung von Werkzeugen bzw. Werkstücken, in der Computertechnik bei Plottern zum Antrieb der X-Y-Achsen oder bei normalen Druckern zum Papiertransport, auch werden Schrittmotoren zum stellen von Ventilen oder Schiebern eingesetzt.