

Universität Stuttgart

APMB-Versuch

Schrittmotoren



**Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik**

APMB-Versuch

Schrittmotoren

Nachdruck nicht gestattet!

Ausgabe 01/2011

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Anschrift: Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Telefon: 0711 / 685-66402
Telefax: 0711 / 685-56402
Email: sekretar@ikff.uni-stuttgart.de
Internet: <http://www.uni-stuttgart.de/ikff/>

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	4
1 Einleitung.....	5
2 Grundlagen.....	6
2.1 Magnetischer Kreis.....	6
2.2 Konstruktionswerkstoffe für Schrittmotoren.....	7
2.2.1 Hysteresekurve	7
2.2.2 Hartmagnetische Werkstoffe	8
2.2.3 Weichmagnetische Werkstoffe	9
2.3 Elektromagnetisches Wirkprinzip	9
2.4 Elektromagnete	10
2.5 Elektrodynamisches Wirkprinzip.....	12
3 Schrittmotoren	13
3.1 Schrittmotor-Bauarten	15
3.1.1 Wechsepol-Schrittmotor	16
3.1.2 Reluktanzschrittmotor.....	19
3.1.3 Hybrid-Schrittmotor	21
3.1.4 Vergleich der Schrittmotorbauarten.....	22
3.2 Lagerung von Schrittmotoren	22
3.3 Ansteuerung von Schrittmotoren.....	23
3.3.1 Ansteuerung von Wechsepol-Schrittmotoren	23
3.3.2 Betriebsarten von Schrittmotoren	25
3.4 Positioniersystem und Geschwindigkeitsbestimmung	27
4 Begleitende Literatur.....	28

Formelzeichen

Formelzeichen	Benennung	Einheit
A	Fläche	m ²
B	magnetische Flussdichte	T $\left(1\text{T}=1\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}\right)$
B _R	Remanenzinduktion	T $\left(1\text{T}=1\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}\right)$
$(\mathbf{B} \cdot \mathbf{H})_{\text{max}}$	Energieprodukt	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$
F	Kraft	N
H	magnetische Feldstärke	$\frac{\text{A}}{\text{m}}$
H _C	Koerzitivfeldstärke	$\frac{\text{A}}{\text{m}}$
I	elektrische Stromstärke	A
L	Induktivität	H
P	elektrische Leistung	W
ϕ	thermische Leistung	W
R _M	magnetischer Widerstand	$\frac{\text{A}}{\text{Vs}}$
R	ohmscher Widerstand	Ω
S	Stromdichte	$\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$
U, u	elektrische Spannung	V
V	magnetische Spannung	A
w, n, N	Windungszahl	–
ρ	spezifischer Widerstand	Ωm
Θ	Durchflutung	A
Φ	magnetischer Fluss	Vs
γ	Korrekturfaktor	–
κ	Wicklungsdichte	–
θ	Temperatur	°C
μ ₀	absolute Permeabilität	–
μ _r	relative Permeabilität	–

1 Einleitung

Schrittmotoren werden auf Grund ihrer Vorteile wie beispielsweise einfacher Betrieb und kostengünstige Herstellung nicht nur in großen Stückzahlen, sondern auch für die unterschiedlichsten Aufgaben eingesetzt. Ihr spezieller Aufbau mit dem konstruktiv vorgegebenen Schrittwinkel bzw. der Schrittweite als interne Maßverkörperung ermöglicht die Nutzung dieser Antriebe auch für hochgenaue Positionieraufgaben, ohne dass hierfür zusätzliche Messsysteme benötigt werden. Zudem verfügen Schrittmotoren im Stillstand über ein Haltemoment, das in der Regel für eine Sicherung der angefahrenen Position ausreicht.

Der APMB-Versuch soll einen Überblick über diese Antriebstechnologie geben.

Inhaltlich besteht das Praktikum aus zwei Teilen. Zunächst werden in einem theoretischen Teil der Aufbau, die Funktionsweise, die Eigenschaften sowie die Betriebsarten der Schrittmotoren diskutiert.

Dieses Wissen gilt es anschließend im Versuchslabor praktisch anzuwenden und experimentell zu verifizieren. Unter anderem sind das Betriebsverhalten diverser rotatorischer und linearer Schrittmotoren zu untersuchen und mit diesen Antrieben kleinere Aufgaben zu lösen.

Das vorliegende Praktikumsskript soll Sie bei Ihrer Vorbereitung unterstützen. Weitere Informationen zu diesem Thema finden Sie in unserem Vorlesungsskript „Aktorik in der Feinwerktechnik“ sowie in der aufgeführten Literatur.

2 Grundlagen

2.1 Magnetischer Kreis

Magnetfelder werden von Permanentmagneten oder stromdurchflossenen Leitern bzw. Spulen erzeugt.

Ursache für die Entstehung elektromagnetischer Felder ist die Bewegung von elektrischen Ladungsträgern. Ein gerader stromdurchflossener Leiter wird – wie in Abbildung 2-1 dargestellt – von einem radialen Magnetfeld entlang seiner Längsachse umgeben. Bei der Anordnung des Leiters zu einer Spule entsteht durch Überlagerung der radialen Einzelfelder ein entsprechend stärkeres Gesamtmagnetfeld. Innerhalb der Spule bildet sich ein nahezu homogenes Feld aus.

Ein Permanentmagnet besitzt ein äußeres Feld, das sich ausgehend von seinem Nordpol über den Südpol schließt.

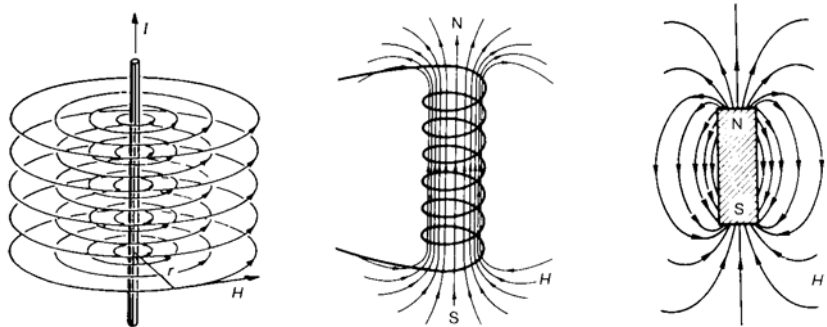


Abbildung 2-1 Magnetfelder eines geraden Leiters, einer langen Spule und eines Stabmagneten [1]

Für eine Spule mit w Windungen oder Summe von w Einzelleitern ergibt sich die magnetische Durchflutung als Summe der Einzelströme: $\Theta = I \cdot w = \sum I_i$

Das Umlaufintegral über $H \cdot ds$ stellt die magnetischen Spannungsabfälle über einen Umlauf entlang einer Feldlinie dar. Damit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen den elektrischen und magnetischen Größen: $\oint H \cdot ds = \Theta \quad (= I \cdot w = \sum I_i)$

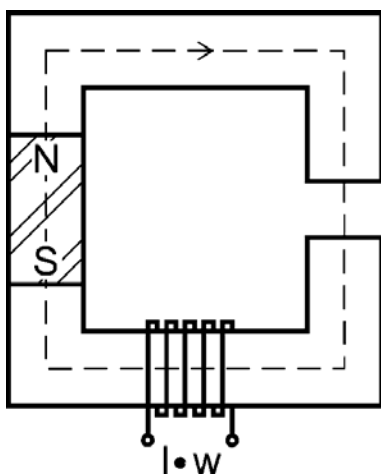


Abbildung 2-2 Magnetischer Kreis mit Permanentenerregung, elektrischer Erregung, Flussführungsteilen und Luftspalt [8]

Der Gesamtweg, über den sich ein Magnetfeld schließt, wird als magnetischer Kreis bezeichnet. Das Ringintegral $\oint H \cdot ds = \Theta$ lässt sich somit im realen Kreis in Teilstrecken zerlegen, die analog zum elektrischen Spannungsabfall an einem Widerstand hier einen magnetischen Spannungsabfall erzeugen: $\sum H_i \cdot l_i = \sum V_i = \Theta$

Die einzelnen Abschnitte des magnetischen Kreises (ferromagnetische Flussführungsteile, Magneten, Luftabschnitte) besitzen jeweils einen magnetischen Widerstand:

$$R_i = \frac{l_i}{\mu_0 \cdot \mu_r(H) \cdot A}$$

Beinhaltet der magnetische Kreis einen Dauermagneten, besitzt auch dieser einen magnetischen Widerstand, so dass gilt: $H_m \cdot l_m + \sum H_i \cdot l_i = V_m + \sum V_i = \Theta$

Für rein permanentmagnetisch erregte Kreise gilt somit: $H_m \cdot l_m = -\sum H_i \cdot l_i$

Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass in einem unverzweigten magnetischen Kreis der magnetische Fluss konstant ist: $\phi = B \cdot A = \text{konst.} \quad (B \perp A)$

2.2 Konstruktionswerkstoffe für Schrittmotoren

Bei der Konstruktion von kommerziellen Schrittmotoren bestehen zwei gegensätzliche Konstruktionswünsche. Zum einen soll der zu entwickelnde Schrittmotor hohe Kräfte entwickeln, hohe Leistung erzielen, geringe Zeitkonstanten sowie einen hohen Wirkungsgrad besitzen. Zum anderen steht meist die Realisierung eines sehr kostengünstigen Antriebs an vorderster Stelle des Pflichtenhefts.

2.2.1 Hysteresekurve

Die Hysteresekurve eines Werkstoffs stellt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen erregender Feldstärke H und der sich im magnetischen Kreis einstellenden Flussdichte B her: $B = \mu_0 \cdot \mu_r(H) \cdot H$

Nachfolgende Werte für μ_r stellen Anhaltspunkte für analytische Berechnungen dar. Es muss dabei immer berücksichtigt werden, in welchem Sättigungszustand sich der jeweilige flussführende Magnetkreisabschnitt befindet und der entsprechende Wert aus der Hysteresekurve entnommen werden.

Nachfolgend einige Werte für μ_r :

$\mu_r(\text{Luft/Vakuum})$	= 1
$\mu_r(\text{Buntmetalle})$	= 1-10
$\mu_r(\text{Eisenwerkstoffe})$	= 20-1000

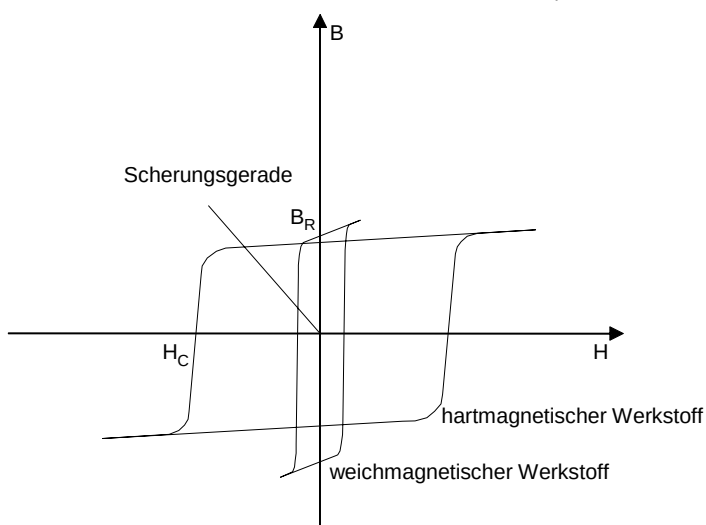


Abbildung 2-3 Hysteresekurven von Werkstoffgruppen

Nach dem Aufmagnetisieren eines Permanentmagneten stellt sich zunächst der Remanenzpunkt B_R bei $H = 0$ ein.

Wird der Magnet aus dem geschlossenen ferromagnetischen Joch der Magnetisierungseinrichtung herausgenommen, müssen sich die Feldlinien des Magneten nun über die ihn umgebende Luft schließen. Die Feldlinien treten am Nordpol aus und schließen sich über den Südpol. Es ergibt sich ein erheblich größerer magnetischer Widerstand durch die umgebende Luft. Dies hat eine entmagnetisierende Wirkung. Die Hystereseschleife wird im zweiten Quadranten weiter durchlaufen. Der Gleichgewichtspunkt wird durch die Scherungsgerade veranschaulicht. Der Schnittpunkt der Scherungsgerade mit der Hysteresekurve des Magneten ergibt den Arbeitspunkt.

Insbesondere beim Schrittmotor bedingt die permanente Änderung der Luft-Weglänge der Magnetfeldlinien (vgl. Abbildung 2-5) eine ständige Änderung der Steigung der Scherungsgeraden. Es wird dabei eine lanzettförmige innere Schleife im zweiten Quadranten durchlaufen.

2.2.2 Hartmagnetische Werkstoffe

Die hier betrachteten Schrittmotoren genügen feinwerktechnischen Anforderungen. Diese Baugrößen werden mit permanenterregten magnetischen Kreisen betrieben.

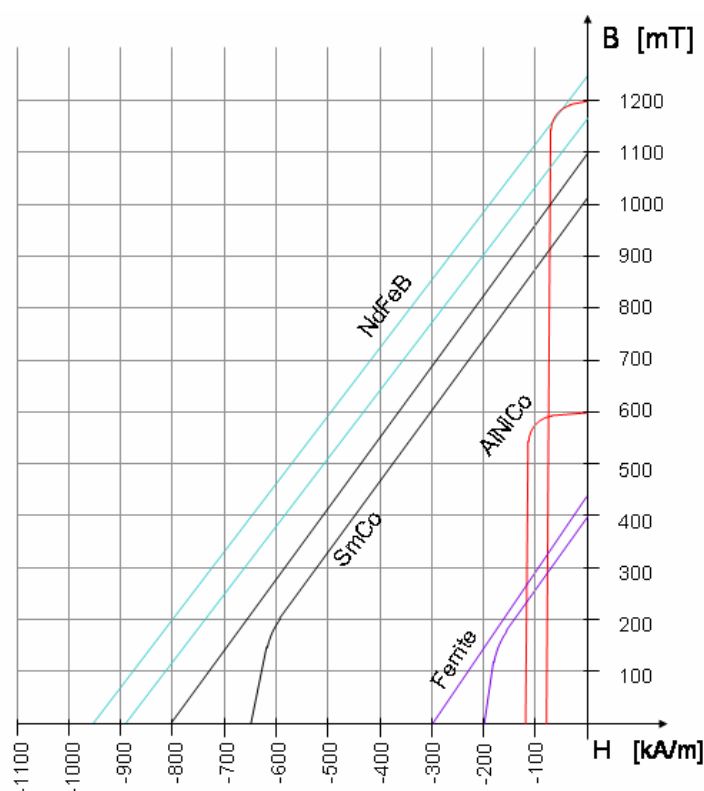


Abbildung 2-4 Charakteristische Remanenzinduktionen B_R und Koerzitivfeldstärken H_C von verschiedenen hartmagnetischen Werkstoffen

Als Werkstoffe werden Ferritmagnete für kostengünstige Antriebe eingesetzt, bei welchen der Bauraum eine untergeordnete Rolle spielt. Bei Antrieben mit hohen Kraftanforderungen bei gleichzeitig kleinem Bauvolumen werden Seltene-Erden-Magnete wie SmCo und NdFeB eingesetzt.

Die nebenstehende Abbildung zeigt charakteristische B-H-Kennlinien für hartmagnetische Magnetwerkstoffe. Die Leistungsfähigkeit eines Magnetwerkstoffes wird durch sein Energieprodukt $(B \cdot H)_{\max}$ gekennzeichnet.

Üblich sind auch kunststoffgebundene Magnete mit SmCo oder NdFeB bzw. Beimischungen von NdFeB in anderen Magnetwerkstoffen.

2.2.3 Weichmagnetische Werkstoffe

Die weichmagnetischen Werkstoffe dienen der Flussführung und Modellierung des magnetischen Kreises. Die ferromagnetischen Werkstoffe sollten hierzu eine hohe Sättigungsflussdichte aufweisen, bei gleichzeitig geringen Ummagnetisierungsverlusten, also geringen Koerzitivfeldstärken H_C . Daraus resultiert eine schmale Hysteresekurve. Somit ist wenig Energie nötig, um die enthaltenen Elementarmagnete umzuorientieren (Ummagnetisierungsverluste). Die eingeschlossene Fläche der Hysteresekurve gibt die benötigte Energie an.

Neben Reineisen und teuren Sonderwerkstoffen bietet sich Automatenstahl als gutes Konstruktionsmaterial an. Wegen der hohen Wechselfeldanteile werden Schrittmotoren häufig auch geblecht.

2.3 Elektromagnetisches Wirkprinzip

Magnetische Felder können mittels Permanent- oder Elektromagneten erzeugt werden. Am Nordpol der Felderzeugung treten die Magnetfeldlinien aus und schließen sich über den Südpol. Aus energetischen Gründen schließen sich die Feldlinien dabei auf dem Weg, der ihnen am wenigsten Widerstand entgegensetzt.

Magnetisch gut leitende Materialien sind ferromagnetische Werkstoffe. Luft ist ein sehr schlechter magnetischer Leiter. Dementsprechend verhalten sich die magnetischen Widerstände der Werkstoffe. Der magnetische Widerstand von Luft ist ca. 20–1000 mal größer als der magnetische Widerstand von ferromagnetischen Materialien (μ_r). Der variable Wert ergibt sich aus der vom Magnetfeld erzeugten Sättigung in der Flussführung.¹

Somit werden ferromagnetische Materialien zur Flussführung und -beeinflussung verwendet. In Abbildung 2-5 sind Ausschnitte aus magnetischen Kreisen dargestellt. Die linken Schemata weisen zwischen den Flussführungsteilen jeweils lange Luftweglängen auf (schraffiert dargestellt). Der Gesamtwiderstand dieser Kreise ist sehr groß. Die rechten Schemata besitzen hingegen kurze Luftweglängen. Der Gesamtwiderstand ist somit minimal.

Aus energetischen Gründen ergibt sich somit eine Anziehungskraft auf Grenzflächen im magnetischen Feld. Diese Kraft bewegt die Komponenten des magnetischen Kreises (Beweglichkeit vorausgesetzt) in die Lage des geringsten magnetischen Widerstands.

¹ Auf die physikalischen Grundlagen, die diesem Wirkprinzip zu Grunde liegen, wird in der Vorlesung „Aktorik in der Feinwerktechnik“ am IKFF eingegangen.

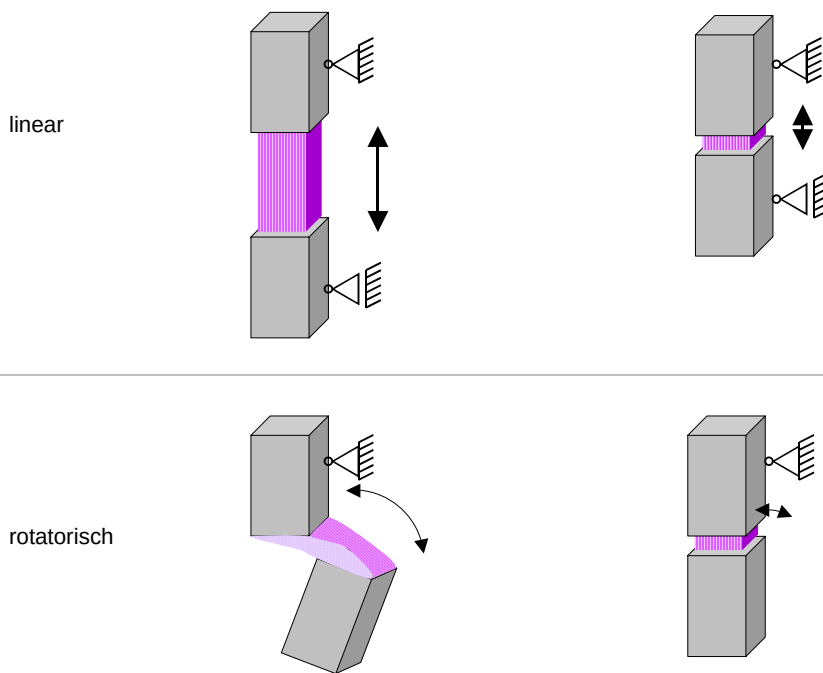


Abbildung 2-5 Ausschnitte magnetischer Kreise (Luftspalt schraffiert dargestellt)
links: ausgelenkter bzw. gescherter Kreis; rechts: verkürzter bzw. eingedrehter Kreis

2.4 Elektromagnete

Die Kraftwirkung auf Grenzflächen wird unter anderem bei Hubmagneten genutzt. Analytisch kann der Zusammenhang zwischen der Grenzfläche im Luftspalt einer magnetischen Anordnung, der vom Magnetfelderreger erzeugten Flussdichte B_L im Luftspalt und der Zugkraft F_z mit der maxwellschen Zugkraftformel beschrieben werden:

$$F_z = \frac{1}{2} \frac{A_L}{\mu_0} \cdot B_L^2$$

Nachfolgende Abbildung zeigt einen rein elektrisch erregten Magnetkreis. Der ortsfeste rechte Teil ist als U-förmiges Joch ausgeführt, das die Magnetfeldlinien bis zu den Stirnflächen leitet. Über den beweglichen linken Teil schließen sich die Feldlinien. Bei der Zugkraftformel muss berücksichtigt werden, dass es sich hier um zwei Grenzflächen handelt.

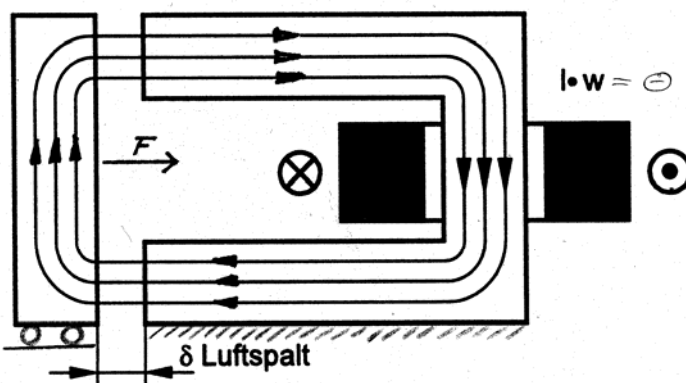


Abbildung 2-6 Kraftwirkung auf Grenzflächen im rein elektrisch erregten magnetischen Kreis [8]

Abbildung 2-7 zeigt einen Topfmagnet mit zugehörigen Kraft-Weg- und Kraft-Strom-Kennlinien. Es ist der quadratische Zusammenhang von $F_z \sim I^2$ sowie der hyperbolische Zusammenhang von $F_z \sim \frac{1}{\delta^2}$ zu erkennen.

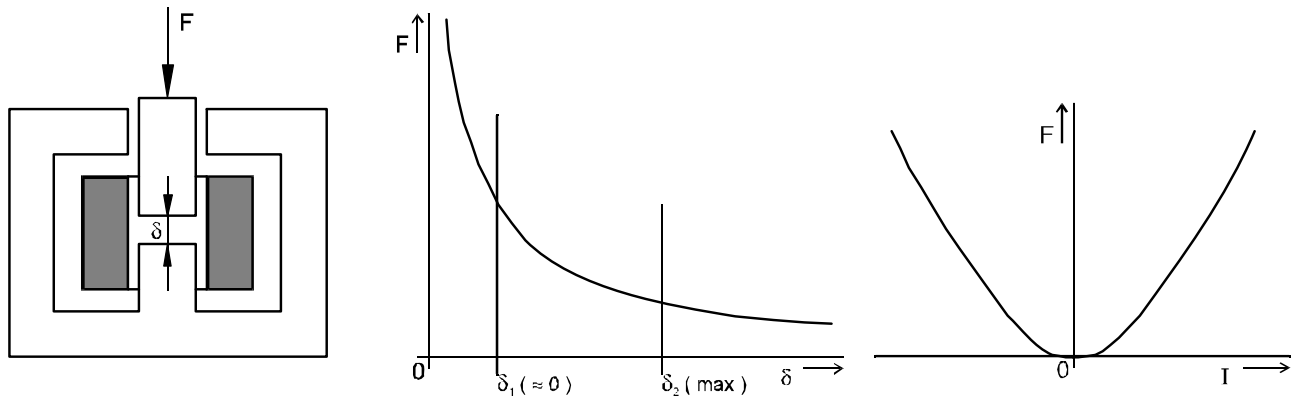


Abbildung 2-7 Topfmagnet mit zugehöriger, unbeeinflusster Kraft-Weg-Kennlinie [8]

Aus diesem Grund werden die Geometrien von Hubmagnetbauformen so angepasst, dass über die Verfahrwege linearisierte Kraftverläufe erzielt werden. Abbildung 2-8 b) zeigt ein Anker- und Ankergegenstück mit Kennlinienbeeinflussung sowie typische Magnetkraftkennlinien dazu. Oft beschränken mechanische Anschläge die nutzbaren Hublängen auf diese linearisierten Bereiche.

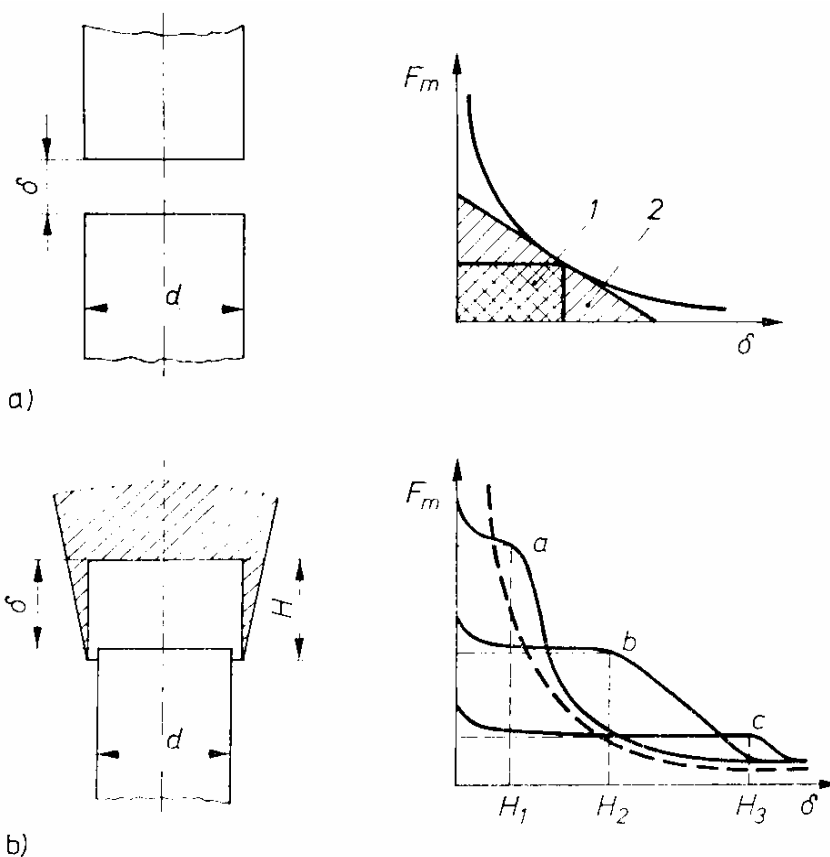


Abbildung 2-8 Kennlinienbeeinflussung bei Hubmagneten [11]

2.5 Elektrodynamisches Wirkprinzip

Das elektrodynamische Wirkprinzip beschreibt das Verhalten von bewegten Ladungen (stromdurchflossenen Leitern) in Magnetfeldern.

Die Stromrichtung im stromdurchflossenen Leiter sowie die Richtung des Permanentmagnetfeldes werden durch Vektorfelder beschrieben. In der Regel stehen bei technischen Anwendungen das Permanentmagnetfeld und der stromdurchflossene Leiter senkrecht aufeinander. Die beiden Einzelfelder überlagern sich zu einem resultierenden Feld. Die Störung der Feldsymmetrie bewirkt die resultierende Kraft auf den Leiter.

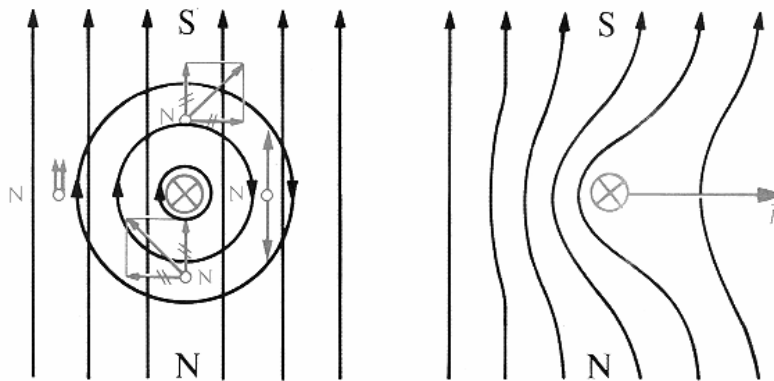


Abbildung 2-9 Überlagerung von radialem Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters und eines homogenen, geradlinigen Magnetfeldes [3]

Die Krafterzeugung beruht auf dem elektrodynamischen Prinzip: $\vec{F}_L = (\vec{l} \times \vec{B}) \cdot I$

Stromstärke I , magnetische Induktion B und Lorentz-Kraft F_L stehen in Motoren in Form eines Rechtsdreiecks senkrecht aufeinander. Zur Bestimmung der Kraftwirkungsrichtung kann die Dreifingerregel der rechten Hand verwendet werden. Dabei repräsentiert der Daumen die Ursache, also den Stromfluss durch den Leiter. Der Zeigefinger stellt als Vermittlung das Magnetfeld dar. Die Wirkungsrichtung der beschleunigenden Kraft wird durch den Mittelfinger angezeigt.

3 Schrittmotoren

Schrittmotoren beruhen auf dem elektromagnetischen Wirkprinzip. Die Antriebe wandeln aufeinander folgende Bestromungszyklen in schrittweise Bewegungen um. Der dabei zurückgelegte Weg bei linearen Systemen bzw. der dabei gedrehte Winkel ist proportional zur Anzahl der Bestromungsimpulse. Ebenso gilt für die Geschwindigkeit die Proportionalität zur Frequenz der Bestromungsimpulse.

Prinzipbedingt entwickeln Schrittmotoren hohe Drehmomente/Verformmomente bei kleinen Winkel-/Verfahrgeschwindigkeiten.

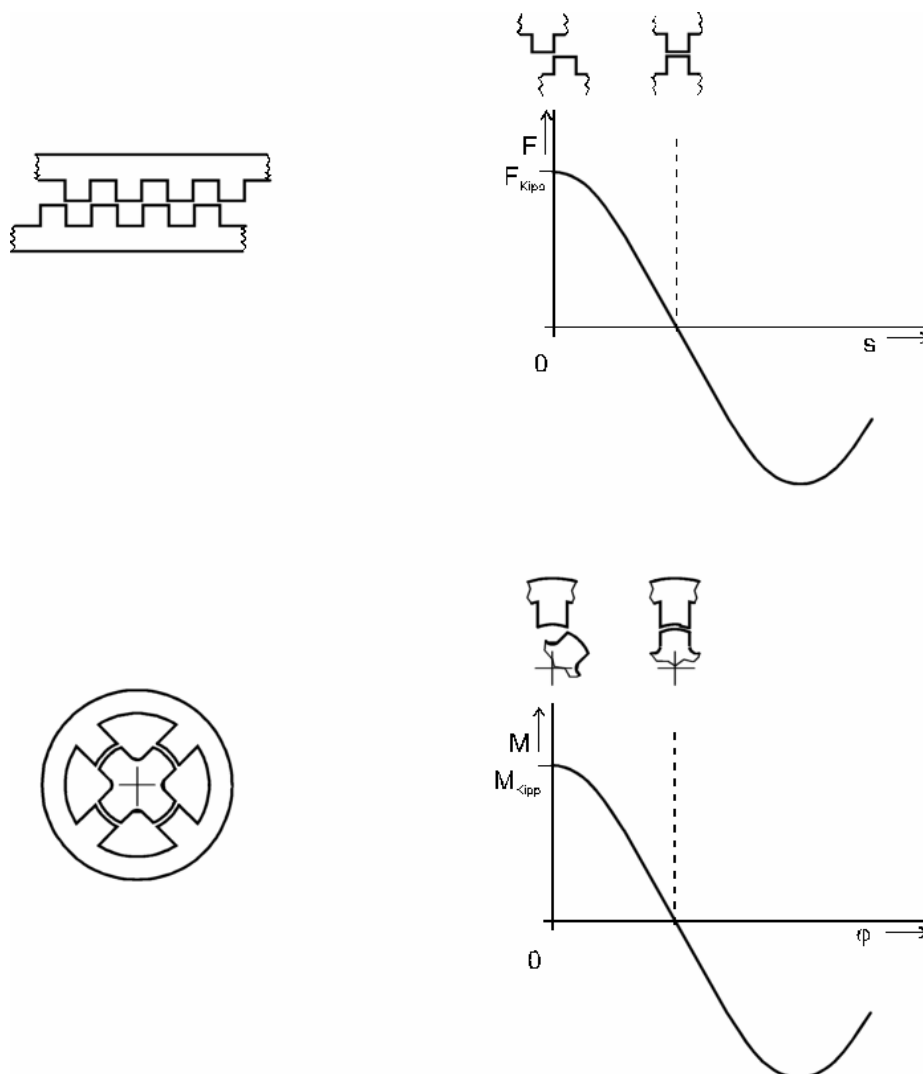


Abbildung 3-1 Kraft-Weg-Kennlinie eines linearen Schrittmotorsystems und Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie eines rotatorischen Schrittmotorsystems [8]

Das elektromagnetische Wirkprinzip (Reluktanzprinzip) besagt, dass ein System bestrebt ist, den Gesamtwiderstand seines magnetischen Kreises so klein wie möglich zu halten, um den energetisch günstigsten Zustand zu erreichen. Abbildung 3-1 veranschaulicht die daraus resultierenden Kräfte zwischen Stator und Läufer.

Vorteile von Schrittmotoren

- einfacher und kostengünstiger Aufbau
- hohes Drehmoment bei kleinen Winkelgeschwindigkeiten
- hohes Haltemoment (Kippmoment) bei Motorstillstand im erregten Zustand
- hohe Zuverlässigkeit
- einfache und schnelle Inbetriebnahme
- wartungsfrei, da bürstenloser Motor
- open-loop Betrieb (gesteuert)
- bekannte bzw. berechenbare Positioniergenauigkeit
- schrittgenaue Positionierung ohne Rückmeldung durch vorgegebene Steuerimpulse (Ansteuerung durch reine Steuerkette; open-loop)
- digitale Kontrolle von Position und Geschwindigkeit
- für niedrige Geschwindigkeiten bei gleichzeitig hohem Drehmomentbedarf ohne Getriebe geeignet
- schnelle Reaktion bei Start, Stopp und Reversieren

Nachteile von Schrittmotoren

- Resonanzschwingungen
- eingeschränkter Geschwindigkeitsbereich
- Positionsverlust bei Überlast möglich
- Strombedarf unabhängig von Last (Erwärmung auch im Stillstand)
- Die Gesamtdynamik des kompletten Systems (Schrittmotor, elektrische Ansteuerungsschaltung, antriebseitiges System) muss genau betrachtet werden, um Probleme beim Anfahren, Beschleunigen und Bremsen zu vermeiden.
- Ausschwingvorgänge beim Anhalten
- Resonanzschwingungen erfordern Dämpfung im Resonanzbereich

Einsatzgebiete von Schrittmotoren

- Kfz-Technik (Klimaanlage, Scheinwerfer, Spiegelverstellungen, ...)
- Positionieraufgaben (Handhabungsaufgaben, Pick-and-place-Anwendungen, Bohrautomaten)
- schnelle, kurzzeitige Verfahrbewegungen (Textilindustrie, Bonding)
- Präzisions-Gleichlaufbewegungen (Druckindustrie, Tintenstrahldrucker, Plotter)
- Stellvorgänge für Ventile, Schieber, Drucker, magnetische Verriegelungen
- Positioniersysteme, Positionieren und Montieren von Chips auf Platinen, Dispensing
- Montage- und Testvorgänge, Trimmen von SMD-Widerständen, Leiterkartenmess- und -bohrmaschinen
- industrielle Messtechnik, Antriebe für Messmaschinen und flexibles Messaufnahmesystem

- Ausrüstungen für die Halbleiterindustrie, Technologie der Wafer-, Chip- und Leiterkartenfertigung
- Teilefertigung und Montage in der Mikrosystemtechnik und im Reinraum
- Mikroskopische und Planartische für präzise und dynamische Bewegung in der Fläche, auch für mehrere Objekte unabhängig von einander

Aufbau von Schrittmotoren / Schrittwinkel

Schrittmotoren bestehen aus mehreren gleichartigen Teilsystemen. Diese sind periodisch linear oder rotativ versetzt angeordnet. Die Teilsysteme werden mittels elektronischer Schaltungen in zyklischer Folge ein- bzw. weitergeschaltet. Bei Fortschreiten der Ansteuerung um einen Schritt bewegt sich der Läufer/Rotor entsprechend der Teilungsverhältnisse des Schrittmotors um den definierten Schrittwinkel weiter. Der Läufer/Rotor folgt der Ansteuerung synchron.

Eine volle Umdrehung eines Rotationsschrittmotors ergibt sich aus der genau definierten Anzahl von Einzelschritten, welche vom Aufbau des Motors, also der Anzahl der Teilsysteme, abhängt. Die Schrittzahl pro Umdrehung bzw. die Größe des Schrittwinkels ist die charakterisierende Größe eines Schrittmotors.

Der Schrittwinkel ist somit konstruktiv vorgegeben. Mit der geometrischen Zahnteilung z und der Strangzahl s ergibt sich der Schrittwinkel α bzw. die Schrittauflösung:

$$\alpha = \frac{\pi}{p \cdot s}$$

p : Polpaarzahl des Rotors

s : Strangzahl der Erregerwicklungen

Der in den Datenblättern angegebene Schrittwinkel von Schrittmotoren bezieht sich immer auf den Vollschrittbetrieb des Motors. Der Schrittwinkel hängt von der mechanischen Fertigung und Montage der Komponenten ab. Mechanische Toleranzen verursachen somit Störungen in der Äquidistanz der (Winkel-) Schritte.

Maximalgeschwindigkeit von Schrittmotoren

Die Geschwindigkeit, mit welcher der Läufer dem Durchschalten der Teilsysteme maximal folgen kann, wird in Form der maximalen Betriebsfrequenz angegeben. Diese ist höher als die Startfrequenz mit der ein Motor aus dem Stillstand angefahren werden kann.

3.1 Schrittmotor-Bauarten

Nachfolgend werden die Bauformen von Schrittmotoren vorgestellt. Als konstruktive Ausführungen haben sich drei Bauformen durchgesetzt. Zunächst soll auf die Wechseipol-Schrittmotoren eingegangen werden, da hier der magnetische Kreis anschaulich dargelegt werden kann.

Anschließend werden Reluktanzschrittmotoren betrachtet, welche ohne das gerichtete Magnetfeld des Läufers/Rotors definiertere geometrische Teilungen benötigen. Die Hybrid-Schrittmotoren ergeben sich aus der sinnvollen Kombination der beiden zuvor benannten Bauformen, um die vorteilhaften Eigenschaften dieser Varianten zu vereinen.

3.1.1 Wechsepol-Schrittmotor

Der Wechsepol-Schrittmotor besitzt einen wechselnd polarisierten Dauermagnetläufer bzw. -rotor. Auf Grund der ständig vorhandenen Magnetisierung besteht somit auch im nicht bestromten Zustand ein Rastmoment. Dadurch werden Vorzugsstellungen eingenommen, so dass sich Läuferpole und Statorpolschuhe gegenüberstehen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch den einfachsten Aufbau eines Wechsepol-Schrittmotors. Das Magnetfeld des Dauermagnetrotors ist mit Nord- und Südpol eindeutig bestimmt. Durch Bestromung eines Spulensystems (Strang) entsteht ein eindeutig gerichtetes Spulenmagnetfeld. Mit der Rechten-Hand-Regel lässt sich der Richtungssinn des Spulenmagnetfeldes bestimmen. Die Wechselwirkung beider Magnetfelder ergibt somit eine eindeutige Lage des Rotors.

Mit der gerichteten Bestromung der Spulensysteme lässt sich eine definierte Drehbewegung realisieren.

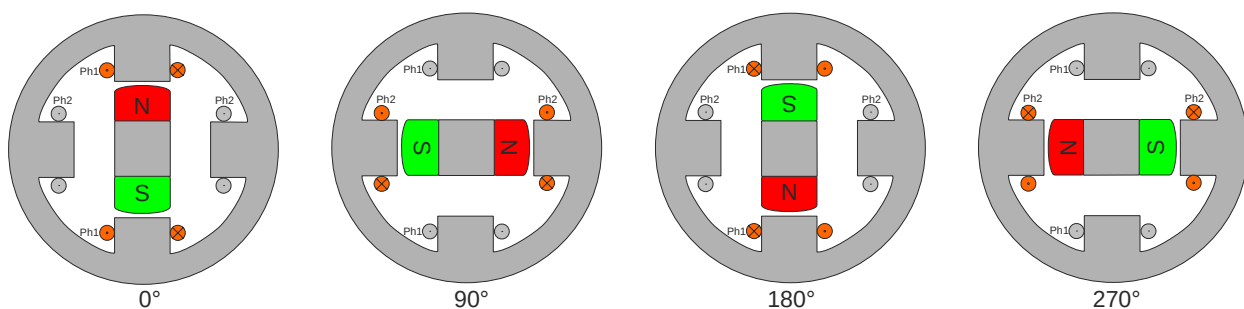


Abbildung 3-2 Wechsepol-Schrittmotor mit jeweils einem bestromten Strang

Obiges Bild zeigt anschaulich die vier Vorzugstellungen pro Umdrehung, wenn jeweils nur eine Spule bestromt ist. In diesen Ruhestellungen wirkt kein Drehmoment mehr auf den Rotor. Ein Haltemoment ist vorhanden.

Neben diesen vier Positionen, bei denen immer genau ein Wicklungsstrang bestromt wird, können durch zeitgleiche Bestromung beider Stränge vier zusätzliche Positionen realisiert werden.

Die Betriebsart, bei der die beiden Stränge in den vier verschiedenen Polungskombinationen der Spulen zeitgleich bestromt werden, wird nach allgemeiner Konvention als Vollschrittbetrieb genutzt. Da beide Erregerwicklungen das Permanentmagnetfeld verstärken, besitzt der Motor in diesen Positionen ein entsprechend größeres Haltemoment.

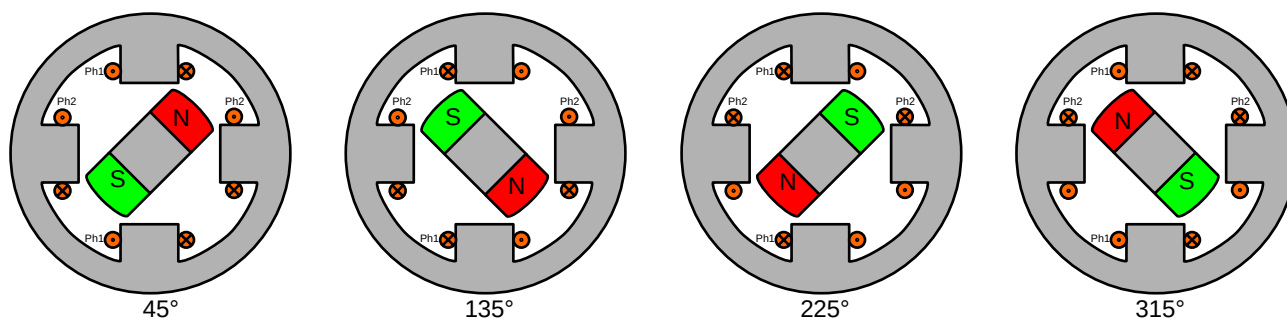
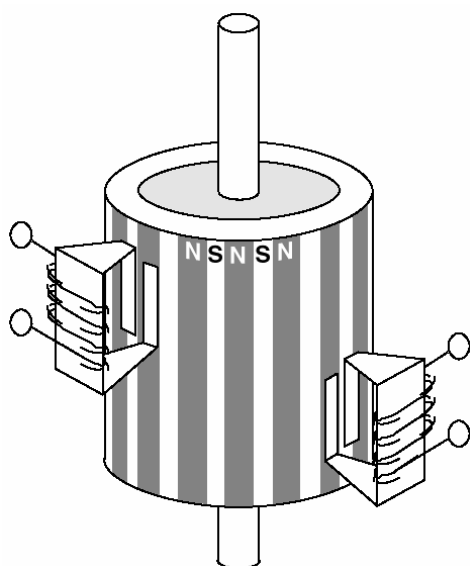


Abbildung 3-3 Vollschrittbetrieb eines Wechselpol-Schrittmotors

(Denkbar wäre auch, die vier Positionen aus Abbildung 3-2 als Vollschrittbetrieb zu verwenden.)

Als Halbschrittbetrieb wird die Kombination der Rotorpositionen aus Abbildung 3-3 und Abbildung 3-2 bezeichnet. Es wird nacheinander eine unterschiedliche Anzahl an Spulensträngen bestromt. Dadurch ergibt sich eine Verdopplung der Auflösung bzw. Halbierung des Schrittwinkels.

Klauenpolmotor oder „tin can motor“ als technische Ausführung des Wechselpol-Schrittmotors



Der Läufer wird als ferromagnetischer Zylinder ausgeführt, auf welchem ein über den Umfang wechselnd polarisierter Magnethohlzylinder sitzt. Die wechselnde Polarisierung wird durch einen Aufmagnetisierungsvorgang über Polschuhe realisiert. Zur Aufbringung der dauerhaften Magnetisierung sind hohe Feldstärken und Flussdichten nötig. Um diese in das Magnetmaterial einbringen zu können, sind gewisse minimale geometrische Abmaße nötig. Aus diesem Grund können nur eine bestimmte Anzahl wechselnder Polarisierungen mit begrenzter Genauigkeit aufgebracht werden. Dieser Umstand begrenzt den Schrittwinkel.

Abbildung 3-4 Rotor eines permanent-erregten Schrittmotors mit über den Umfang wechselnd polarisierter Magnetisierung

Der Stator besteht aus zwei Strängen, die sich jeweils aus nur zwei Komponenten zusammensetzen. Zum einen erzeugt eine kurze Zylinderspule ein Magnetfeld um ihren Umfang. Zum anderen wird dieses Feld durch mehrere zusammengesetzte Blechteile oder durch ein um die Spule gebogenes Blechbiegeteil geführt. Durch die abwechselnd herausgeführten Endlaschen entstehen abwechselnd Nord- und Südpole, wie dies in Abbildung 3-5 zu sehen ist.

Wegen dieser Blechstreifen wird diese Konstruktionsform auch Klauenpolschrittmotor oder Tincan-Motor genannt.

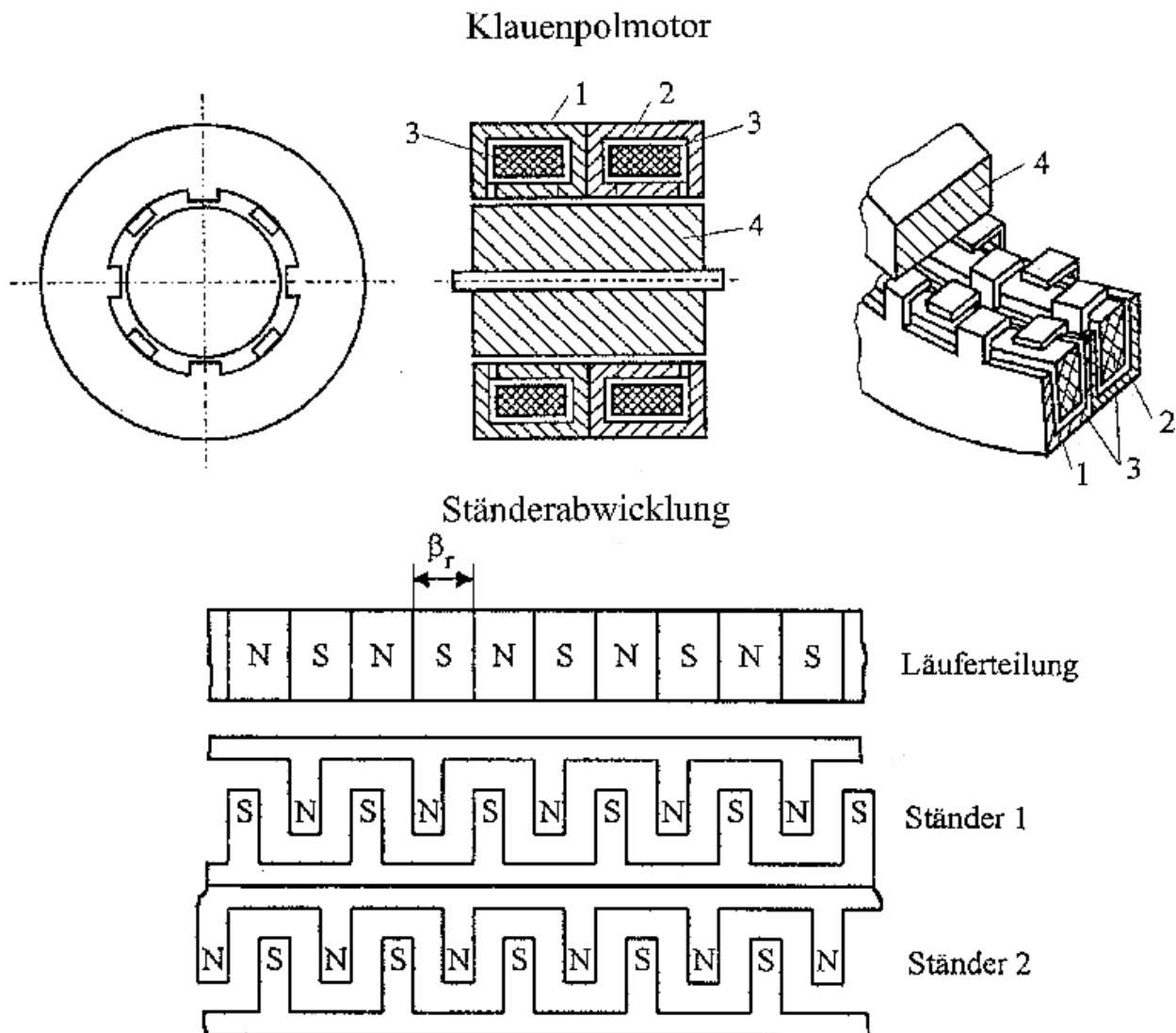


Abbildung 3-5 Klauenpolschrittmotor – technische Ausführung eines Wechseipol-Schrittmotors
 1,2: Blechbiegeteil; 3: Erregerspule; 4: Rotor

Parameter von Wechseipol-Schrittmotoren

- typische Schrittwinkel zwischen $7,5^\circ$ ($3,75^\circ$) und 45°
- typischer Drehmomentbereich von 0,7 bis 25,5 Ncm
- Betriebsfrequenz bis ca. 5 kHz
- Stückzahl jährlich: ca. 120-150 Mio. Stück

3.1.2 Reluktanzschrittmotor

Der Reluktanzschrittmotor stellt in der Entwicklungsreihe der Schrittmotoren die früheste Ausführungsform dar.

Der Läufer des Reluktanzschrittmotor besteht aus weichmagnetischem Material. Durch Grenzflächenkräfte bewegt sich der Läufer zu der aktuell bestromten Statorwicklung. Bei der Weiterschaltung zum nächsten Wicklungsstrang müssen konstruktive Maßnahmen getroffen werden, um einen eindeutigen Drehrichtungssinn gewährleisten zu können.

Die Abbildung 3-6 zeigt den gleichen schematischen Aufbau wie der Wechseelpol-Schrittmotor. Im Ausgangszustand, links zu sehen, besteht ein stabiler Zustand in vertikal dargestellter Richtung. Durch Weiterschalten der Bestromung zum zweiten Strang entstehen Reluktanzkräfte, die den Läufer aus der Vertikallage in eine horizontale Lage drehen. Die Richtung, in welche der symmetrische Läufer gelenkt wird, ist nicht vorhersehbar, da im Weicheisen keine ausgeprägten magnetischen Vorzugsrichtungen vorhanden sind. Somit ist auch die Bestromungsrichtung der Spulen unerheblich.

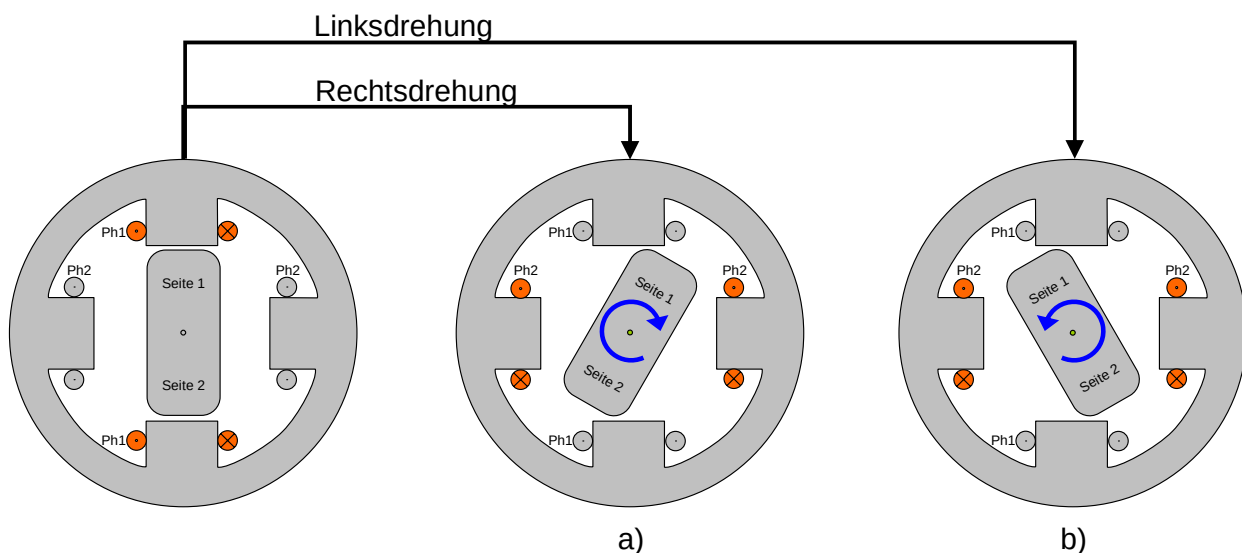


Abbildung 3-6 Schema eines Reluktanzschrittmotors ohne definierte Drehrichtung

Um eine definierte Drehrichtung zu erzielen, müssen geeignete konstruktive Maßnahmen vorgesehen werden. In Abbildung 3-7 a) ist ein dreisträngiges Wicklungssystem bei gleichem Rotoraufbau wie in Abbildung 3-6 dargestellt. Durch zyklische Beschaltung der Stränge nach dem Muster 1-2-3 ist eine eindeutige Rechtsdrehung und durch die Beschaltungsfolge 1-3-2 eine eindeutige Linksdrehung realisierbar.

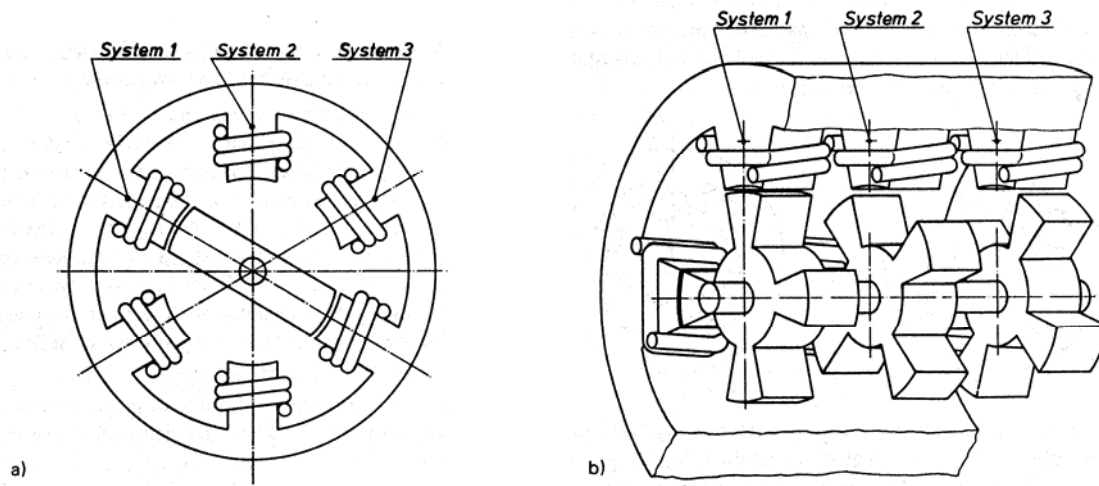


Abbildung 3-7 Maßnahmen zur eindeutigen Richtungsvorgabe bei Reluktanzschrittmotoren [4]:
 a) mehrsträngiger Motor b) Mehrstatormotor

Auch durch axiale Aneinanderreihung von winklig zueinander verdrehten Systemen können Anordnungen, welche allein stehend keinen eindeutigen Richtungssinn aufweisen, zu einem definierten System kombiniert werden (siehe Abbildung 3-7 b).

Im stromlosen Zustand sind auf Grund der fehlenden permanentmagnetischen Komponenten keine magnetischen Rastmomente bei der Bewegung des Motors zu spüren. Dies kann für Systeme, die zeitweise frei beweglich sein sollen, von Vorteil sein. Für Anwendungen, bei denen im stromlosen Zustand die Position gehalten werden soll, sind Reluktanzschrittmotoren nur bedingt geeignet. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass viele rotatorische Motoren mit nachgeschalteten Getrieben verwendet werden, die durch entsprechende Übersetzungsverhältnisse eine Selbsthemmung der Gesamtsysteme im nicht erregten Zustand bewirken können.

Die einfache Bearbeitbarkeit der ferromagnetischen Motorkomponenten eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit, feine Verzahnungen auf den Polschuhen des Läufers und Stators aufbringen und so sehr kleine Schrittwinkel realisieren zu können.

Parameter von Reluktanzschrittmotoren

- typische Schrittwinkel zwischen $1,8^\circ$ und 30°
- typischer Drehmomentbereich von 0,7 bis 50 Ncm
- Betriebsfrequenz bis ca. 20 kHz
- geringe Stückzahlen

3.1.3 Hybrid-Schrittmotor

Hybridschrittmotoren wurden aus den in den vorangegangenen Kapiteln diskutierten Reluktanzschrittmotoren und Wechseelpol-Schrittmotoren entwickelt. Sie vereinen die Vorteile beider Konstruktionsformen.

Der Rotor ist als permanentmagneterregtes Bauteil konzipiert. Ein axial polarisierter Zylindermagnet erzeugt das Magnetfeld. Für Hybridschrittmotoren werden vorwiegend hochenergetische Magnetmaterialien eingesetzt. Auf den Magneten werden stirnseitig weichmagnetische Flussführungsteile aufgesetzt, oft auch als geblechte Kappen. Diese werden wie beim Reluktanzschrittmotor durch spanende Bearbeitung hergestellt und können aus diesem Grund sehr fein gezahnt ausgeführt werden. Dadurch lässt sich das Rastmoment im Stillstand, wie beim Wechseelpol-Schrittmotor, aufrechterhalten und die Fertigungsmöglichkeiten und -genauigkeiten der spanenden Bearbeitung nutzen.

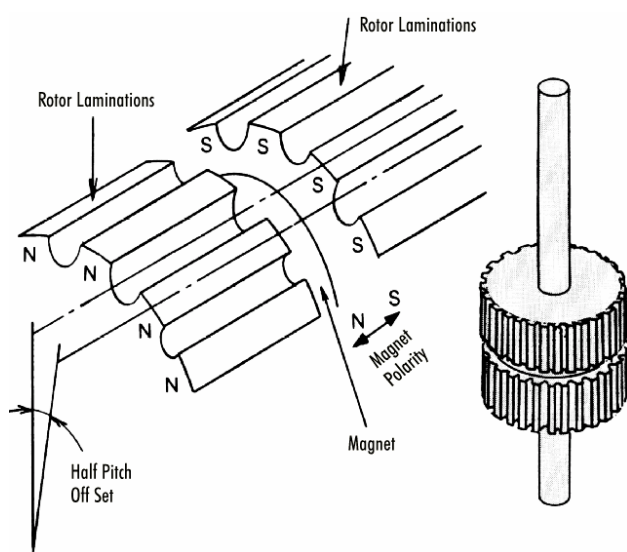


Abbildung 3-8 Schematischer Aufbau eines Hybridschrittmotor-Rotors

Der Stator beinhaltet die Spulenwicklungen des Antriebs auf fein verzahnten Statorpolen. Dadurch kann pro Schritt um eine Zahnteilung weitergeschaltet werden, was die Winkelauflösung steigert.

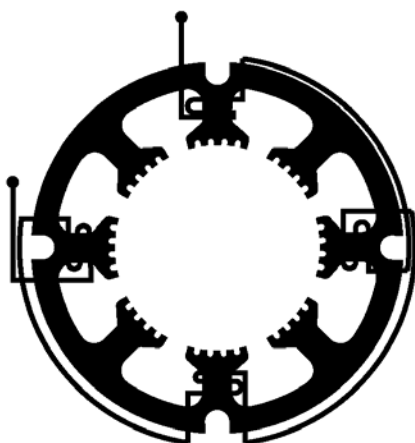


Abbildung 3-9 Querschnitt durch den Stator eines Hybridschrittmotors mit gezahnten Statorpolen

Durch diese Konstruktion ist der Hybridschrittmotor der energetisch günstigste Motor mit den höchsten Leistungsparametern. Er zeigt zudem eine nur geringe Schwingungsneigung.

Den Vorteilen stehen jedoch die hohen Herstellungskosten gegenüber.

Hybridschrittmotoren werden vor allem in der Datenverarbeitungstechnik eingesetzt.

Parameter von Hybridschrittmotoren

- typische Schrittwinkel zwischen $0,36^\circ$ und 15°
- typischer Drehmomentbereich von 3 bis 1000 Ncm
- Betriebsfrequenz bis ca. 40 kHz
- Stückzahl jährlich: ca. 100 Mio. Stück

3.1.4 Vergleich der Schrittmotorbauarten

	Wechselpol-SM	Reluktanz-SM	Hybrid-SM
Dämpfung	gut	schlecht	gut
Selbthaltemoment	ja	nein	ja
Ständersysteme	≥ 2	≥ 3	≥ 2
Kosten	i.a. niedrig	hoch	hoch

Tabelle 3-1

3.2 Lagerung von Schrittmotoren

Bei rotatorischen Antrieben wird die Läuferwelle mittels Gleit- oder Kugellagern gelagert. Gleitlagerungen werden durch eingepresste Sinterbuchsen realisiert. Der poröse Bronze-Sinterwerkstoff wird vor der Montage mit Öl durchtränkt, so dass eine Dauerschmierung vorliegt.

Kugellager weisen einen geringeren Verschleiß als Gleitlagerungen auf. Zudem kann der Stick-Slip-Effekt vermieden werden, so dass ein besseres Laufverhalten insbesondere bei kleineren Drehzahlen und im Start-Stopp-Betrieb erzielt wird. Die Schmierung ist ebenfalls für die Lebensdauer gewährleistet. Aufgrund des Preisunterschiedes werden jedoch überwiegend Gleitlagerungen verwendet.

Bei linearen Antriebssystemen kommen Gleitführungen dagegen kaum zum Einsatz. Wälzkörper-Führungen werden im Allgemeinen als Kugelumlauf Führungen ausgeführt. Den Vorteilen der hohen Tragzahlen sowie des fehlenden Stick-Slip-Effekts steht allerdings der Nachteil des ruckbehafteten Kugelumlaufs gegenüber.

3.3 Ansteuerung von Schrittmotoren

Stellvertretend für alle Bauformen wird nachfolgend die Ansteuerung eines Wechselpol-Schrittmotors vorgestellt.

3.3.1 Ansteuerung von Wechselpol-Schrittmotoren

Unipolare Ansteuerung

Die unipolare Ansteuerung erfordert zwei Wicklungen pro Statorpol, um Nord- und Südpol erzeugen zu können. Dadurch ergibt sich eine einfache elektronische Ansteuerung. Es muss keine Umsteuerung des Spulenstroms realisiert werden; reine Einschaltvorgänge können nacheinander ausgeführt werden. Es tragen aber lediglich 50% der Spulenwicklungen zur Erzeugung des Drehmoments bei.

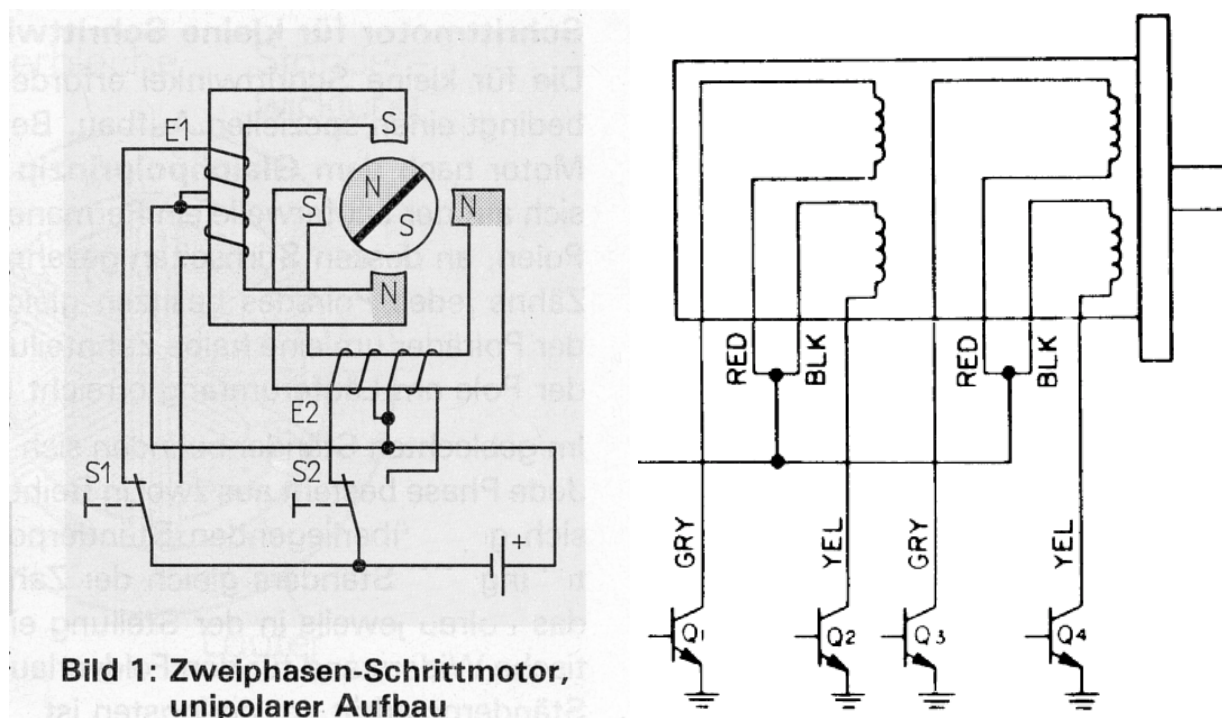


Abbildung 3-10 Unipolare Ansteuerung von Schrittmotoren
links: Schema mit Schaltersymbolen
rechts: Schema mit Transistoransteuerung

Bipolare Ansteuerung

Bei einer bipolaren Ansteuerung kann die Motorwicklung in beide Richtungen bestromt werden. Dadurch kann der Statorpol entweder Nord- oder Südpol sein. Das Drehmoment ist infolge der ständigen Bestromung der gesamten Spule um ca. 30% größer als bei der unipolaren Ansteuerung. Nachteilig ist die relativ aufwändige Steuerelektronik mit Brückenschaltungen. Es werden mehr Leistungsbaulemente benötigt.

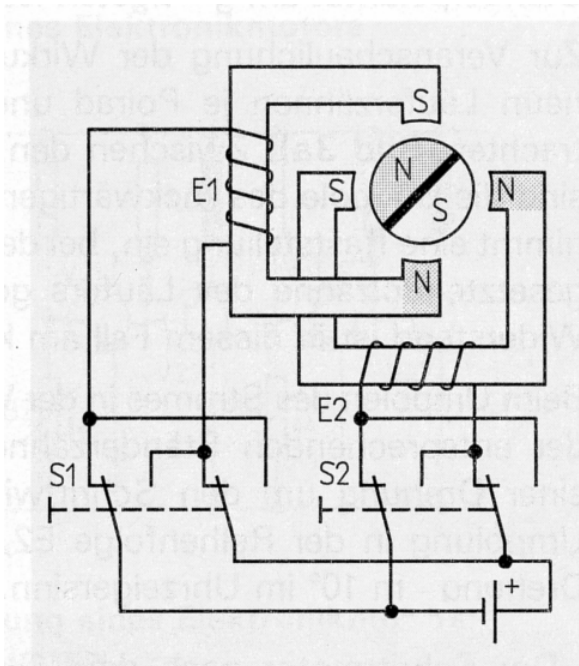


Bild 2: Zweiphasen-Schrittmotor, bipolarer Aufbau

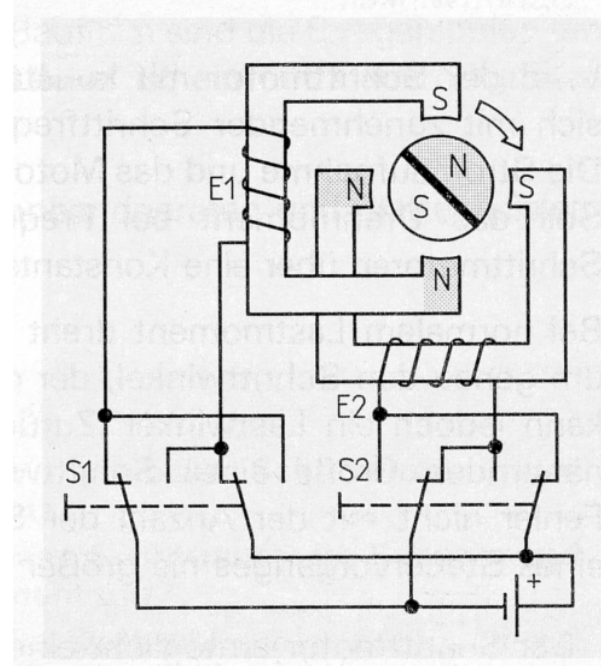


Bild 3: Schrittmotor (Bild 2) nach Betätigung von S2

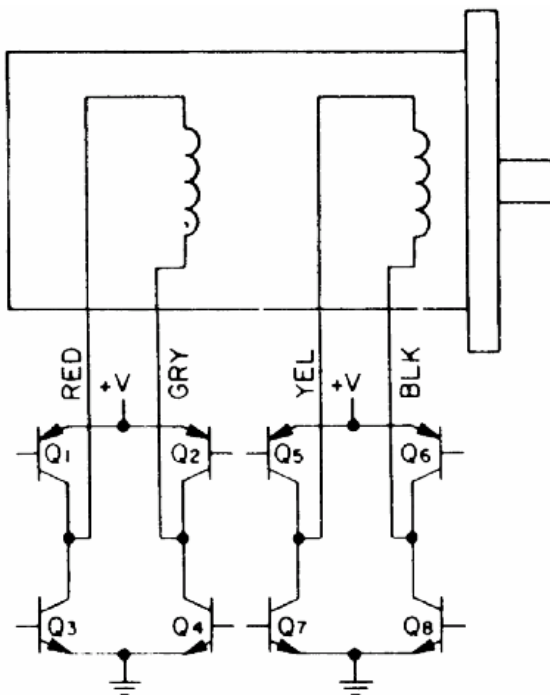


Abbildung 3-11 Bipolare Ansteuerung von Schrittmotoren
 oben: Schema mit Schaltersymbolen
 unten: Schema mit Vierquadranten-Transistor-Endstufen

3.3.2 Betriebsarten von Schrittmotoren

Vollschritt- und Halbschrittbetrieb

Wenn in zyklischer Abfolge jeweils nur ein System erregt wird bzw. wenn mehrere Systeme gleichzeitig aktiv sind und abwechselnd immer nur ein System umgepolt wird, spricht man von Vollschrittbetrieb. Dabei ist das verfügbare Drehmoment bei jedem Schritt gleich groß.

Den so genannten Halbschrittbetrieb verwendet man, um die Schrittweite zu halbieren (doppelte Auflösung). Erzielt wird dies dadurch, dass man nicht nur die Stromflussrichtung verändert, sondern in jedem Zwischenschritt auch einen Strang ausschaltet. Nachteilig ist der sich dadurch ergebende, diskontinuierliche Momentenverlauf.

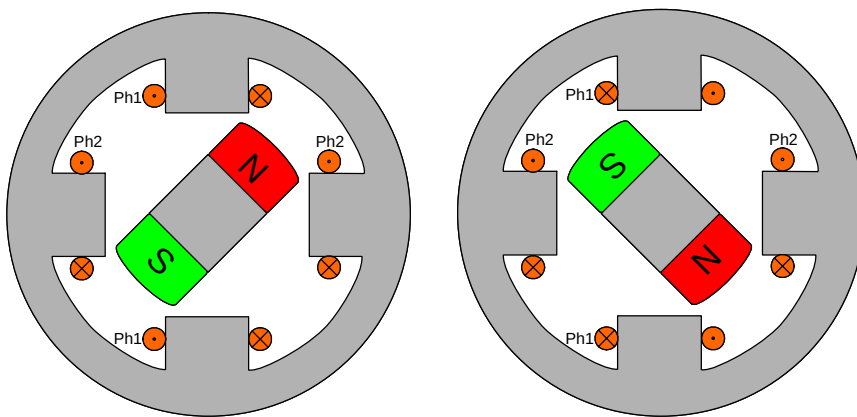


Abbildung 3-12 Vollschrittbetrieb

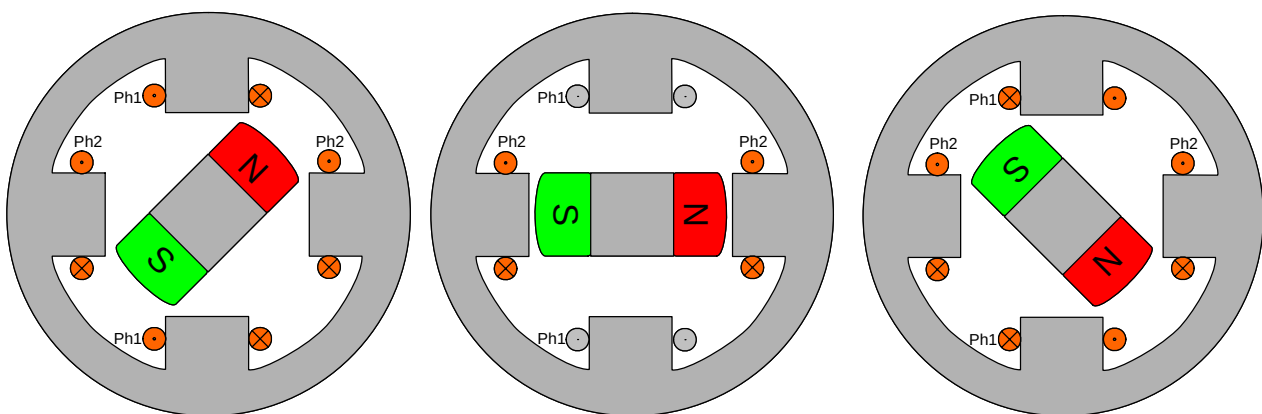


Abbildung 3-13 Halbschrittbetrieb

Mikroschrittbetrieb

Für sehr kleine Schrittwinkel und hochpräzise Anwendungen ist der Mikroschrittbetrieb geeignet. Durch stufenweise Anpassung der Bestromungsstärke der Motorspulen stellen sich zusätzliche Zwischenpositionen zu den Halbschritten ein.

Die Stromwerte können in (für alle Stränge gleichen) Stufen geschaltet werden. Dadurch ergibt sich die Rotorstellung aus dem Verhältnis des von der Spule aufgebauten magnetischen Flusses der (benachbarten) Stränge bzw. magnetischen Teilsysteme.

Die Anzahl der Stromstufen richtet sich nach der Motoransteuerung bzw. der Auflösung der Impuls-Wandlerstufen. Meist handelt es sich um Stufen der Form 2^n . Dann können pro Vollschritt 2^n Mikroschritte realisiert werden, was einer Winkelauflösung von $\frac{\text{Vollschrittwinkel}}{2^n}$ entspricht.

Da es sich hierbei um eine elektronische Ansteuerung mit den Fertigungstoleranzen der elektronischen Bauteile und den Diskretisierungsfehlern der Stufensteuerung handelt, sind nicht alle Mikroschritte äquidistant. Somit kann nicht auf eine absolute Winkelgenauigkeit der Mikroschritte zurückgerechnet werden. Die Positioniergenauigkeit des Systems ist die gleiche, wie im Vollschrittbetrieb. In der nachfolgenden Abbildung ist ein dreisträngiges System zu sehen.

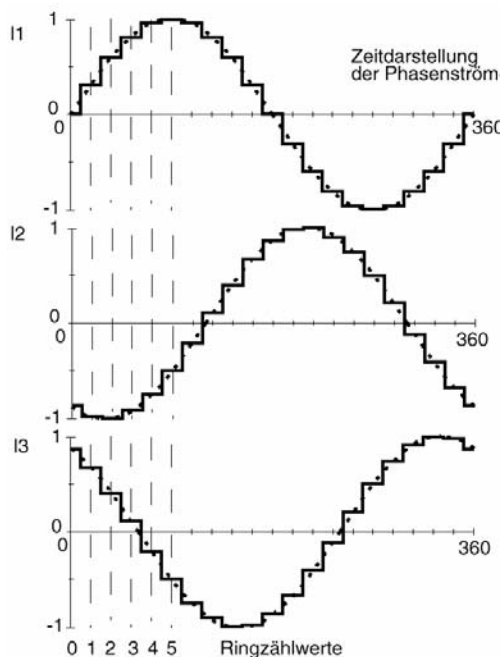


Abbildung 3-14 Mikroschrittbetrieb

Vorteile des Mikroschrittbetriebs:

- kleinerer Schrittwinkel und damit höhere Auflösung
- verbessertes Resonanzverhalten
- verbesserte Laufruhe und Laufgeräusche
- beliebige Auflösung über die Elektronik erreichbar

3.4 Positioniersystem und Geschwindigkeitsbestimmung

Schrittmotoren werden auf Grund ihrer definierten Schrittweite ohne Messsysteme eingesetzt, also nur gesteuert betrieben.

Kennzeichen der Steuerungstechnik ist die offene Steuerkette, wobei die Eingangsgröße die Ausgangsgröße beeinflusst (open-loop). Die Ausgangsgröße wirkt im Gegensatz zur Regelungstechnik (closed-loop) nicht auf die Eingangsgröße zurück.

Das ermöglicht Einsparungen bei den Wegmesssystemen und der Elektronik, die nicht mehr so aufwändig zu gestalten ist. Allerdings darf das Antriebssystem nicht über seine Auslegungsparameter hinaus belastet werden, sonst treten Schrittfehler auf.

Die erzielbaren Genauigkeiten werden durch die Teilung des Stators und der Art der Ansteuerung (Vollschritt / Halbschritt) bestimmt.

4 Begleitende Literatur

- [1] Boll, R.: Weichmagnetische Werkstoffe. Hanau: Vacuumschmelze GmbH, 1990.
- [2] Schwörer, D.: Grundlagen Schrittmotoren (Präsentation). Fa. SIG positec, 2001.
- [3] Dorn; Bader: Physik Oberstufe E. Hannover: Herrmann Schroedel Verlag, 1976.
- [4] Stölting, H.-D.; Beisse, A.: Elektrische Kleinmaschinen – Eine Einführung. Stuttgart: B. G. Teubner, 1987.
- [5] Harpain, S.: Ein Schrittmotorantrieb mit feldorientierter Regelung ohne externe Messgeber. Berlin, Dissertation, 1996.
- [6] Moczala, H.: Elektrische Kleinmotoren. Ehningen: expert Verlag, 1999.
- [7] Riefenstahl, U.: Elektrische Antriebstechnik: Grundlagen, Komponenten, Regelverfahren, Bewegungssteuerung. Stuttgart, Leipzig: B. G. Teubner, 2006.
- [8] Schinköthe, W.: Aktorik in der Feinwerktechnik (Skript zur gleichnamigen Vorlesung). Stuttgart: Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Universität Stuttgart, 2008.
- [9] Schörlin, F.: Mit Schrittmotoren steuern, regeln und antreiben – Schrittmotoren, Betriebsverhalten, Auswahlrichtlinien. Poing: Franzis Verlag GmbH, 1996.
- [10] Stölting, H.-D.; Kallenbach, E.: Handbuch elektrische Kleinantriebe. München: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [11] Kallenbach, E.; Bögelsack, G.: Gerätetechnische Antriebe. München: Carl Hanser Verlag, 1991.