

Schrittmotoren (Einführung)

1. Grundlagen

Schrittmotoren (Abb. 1.1) haben einen mehrpoligen Stator und einen wicklungslosen Rotor (Abb. 1.2). Bei entsprechendem Erregen der Statorwindungen führt der Rotor (Anker) einen Schritt aus, mit anderen Worten: eine Drehbewegung um einen gewissen Drehwinkel. Der Stator ist eine Anordnung aus mehreren Wicklungen. Der Rotor ist entweder aus einem weichmagnetischen Werkstoff gefertigt oder als Dauermagnet ausgeführt (Abb. 1.3). Die Anzahl der magnetischen Pole des Rotors bestimmt den Drehwinkel des einzelnen Schrittes (Schrittwinkel, Auflösung). Ein typischer Schrittinkel: $1,8^\circ$ (200 Schritte/Umdrehung)¹. Die Rotoren derartiger Schrittmotoren haben 50 oder 100 Pole. Um die jeweils nächstgelegenen Pole des Rotors anzuziehen, werden die Wicklungen des Stators zyklisch nacheinander erregt.

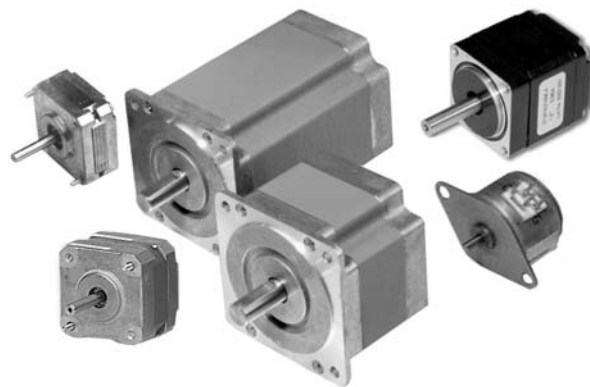


Abb. 1.1 Schrittmotoren (1). Eine kleine Auswahl

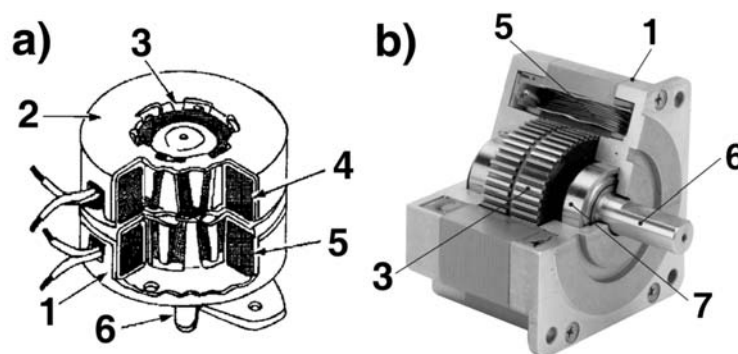


Abb. 1.2 Schrittmotoren (2). Der konstruktive Aufbau. a) Prinzip (ST Microelectronics); b) so sieht ein moderner Schrittmotor von innen aus (DanaherMotion). 1, 2 - Stator A; 3 - Rotor (Anker); 4, 5 - Wicklungen; 6 - Welle; 7 - Kugellager.

1: Weitere Beispiele: $7,5^\circ$ (48 Schritte/Umdrehung) und 15° (24 Schritte/Umdrehung).

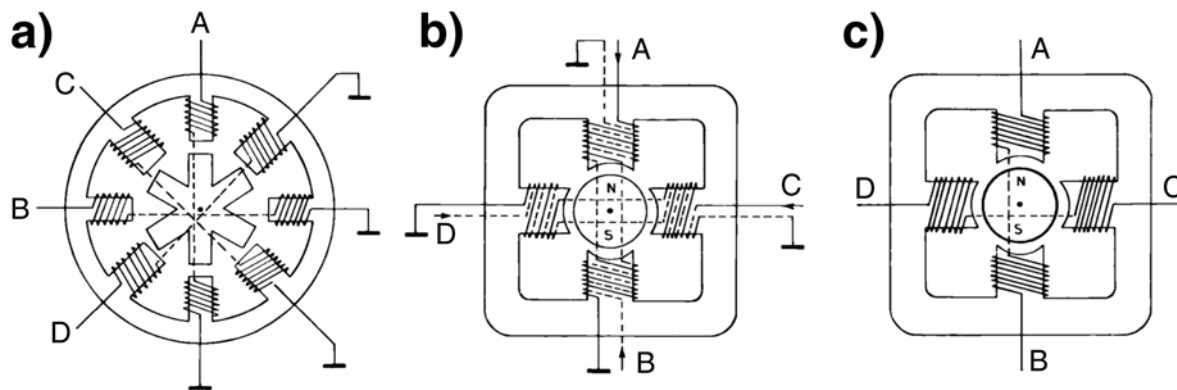


Abb. 1.3 Schrittmotoren (3). Die grundsätzlichen Ausführungen (nach ST Microelectronics). a) mit weichmagnetischem Roto (Reluktanzmotor); b) und c) mit Dauermagnetrotor. b) unipolar, c) bipolar.

Schrittmotoren mit Dauermagnet-Rotor haben einen Stator, der aus zwei Elektromagneten besteht, die gegeneinander in einem Winkel von 90° angeordnet sind (Abb. 1.4). Das eigentliche Problem besteht darin, diese Magnete zyklisch so umzupolen, daß der Anker gleichsam mitgezogen wird.

Um sich die Wirkungsweise klarzumachen, ist es ausreichend, nur 4 Schritte je Umdrehung bzw. einen Schrittwinkel von 90° anzunehmen (Abb. 1.5 und 1.6).

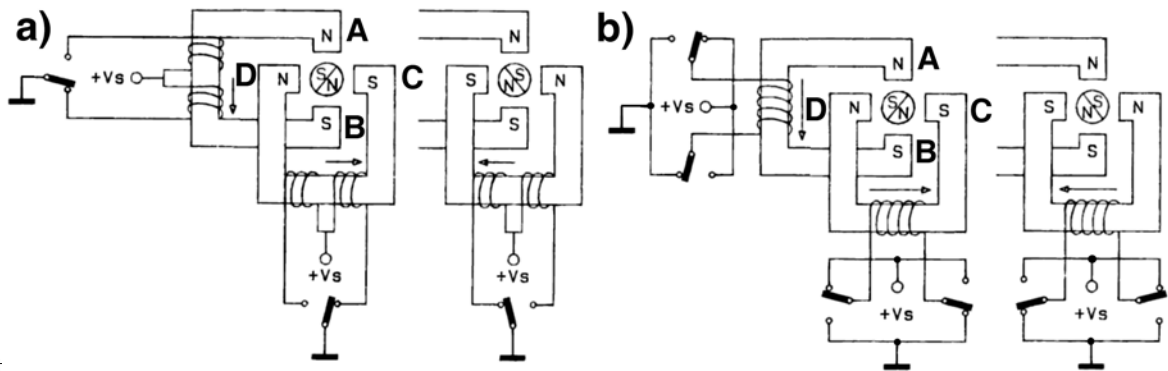
Vollschrittbetrieb (1). Einphasensteuerung. In der Ruhelage sind nur jene Pole des Stators aktiv, denen ein Pol des Rotors direkt gegenüberliegt. Die Anziehungskräfte halten den Rotor in seiner Lage. Soll der Rotor um einen Schritt weiterbewegt werden, ist die aktuelle Erregung auszuschalten (der Rotor wird so freigegeben), und die jeweils im gewünschten Drehsinne nachfolgenden Statorpole sind so zu erregen, daß die betreffenden Pole des Rotors angezogen werden. Durch zyklisches Aus- und Einschalten von Statorwicklungen kann so der Rotor Schritt für Schritt weiterbewegt werden. Erregungsschema (vgl. Abb. 1.5a): $AB - CD - BA - DC$ (AB und BA = Erregung des Elektromagneten mit den Polen A und B; CD und DC = Erregung des Elektromagneten mit den Polen C und D; dabei bedeuten AB / BA und CD / DC jeweils die entgegengesetzten Polungen).

Vollschrittbetrieb (2). Zweiphasensteuerung. Alternativ dazu kann man jeweils zwei benachbarte Pole des Stators so erregen, daß der Rotor durch die resultierenden Magnetkräfte in der Mitte zwischen beiden gehalten wird (das ist die bevorzugte Betriebsweise, die das höchste Drehmoment ergibt). Erregungsschema (vgl. Abb. 1.5b): $AB/CD - BA/CD - BA/DC - AB/DC$.

Zur Umkehrung der Drehrichtung ist die Erregungsreihenfolge jeweils umzukehren ($AB - DC - BA - CD$ bzw. $AB/CD - AB/CD - BA/DC - BA/CD$).

Der Halbschrittbetrieb (Abb. 1.6) ergibt sich als Kombination der beiden beschriebenen Betriebsweisen (sie wechseln sich zyklisch nacheinander ab). Damit kann der Schrittwinkel halbiert werden. Erregungsschema: $AB - AB/CD - CD - BA/CD - BA - BA/DC - DC - AB/DC$.

Phasen, Stränge, Wicklungen. Eine Phase (bzw. ein Strang) besteht aus zusammengeschalteten Statorwicklungen, die jeweils einen Elektromagneten bilden. Dem Prinzip nach (vgl. Abb. 1.4) haben unipolare Motoren vier, bipolare zwei Wicklungen. bzw. Phasen. Die einzelnen Phasen erregen reihum die aufeinanderfolgenden Statorpole. Die Wicklung im eigentlichen Sinne ist die einzelne Spule im Stator (vgl. Pos. 5 in Abb. 1.2b). Schrittmotoren haben vier bzw. (Reluktanzmotor) acht Wicklungen, die zu zwei bzw. vier Phasen (Strängen) zusammengeschaltet sind. Manche Motoren haben alle Wicklungen einzeln auf Anschlüsse geführt, so daß man verschiedene Betriebsarten wählen kann.



hat

Abb. 1.4 Schrittmotoren mit Dauermagnet-Rotor. a) unipolar; b) bipolar. Die Elektromagnete A – B und C – D sind gegeneinander in einem Winkel von 90° angeordnet.

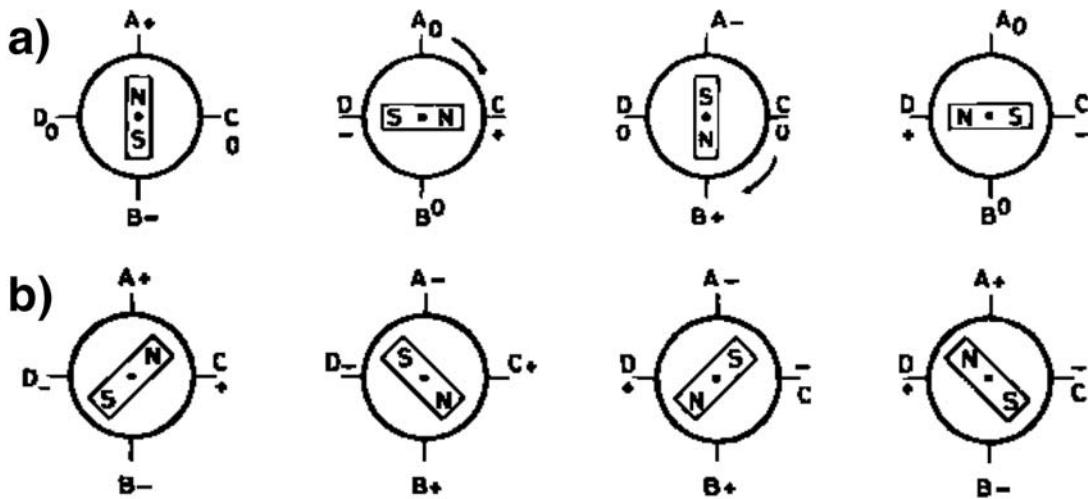


Abb. 1.5 Vollschrittbetrieb. a) Einphasensteuerung; b) Zweiphasensteuerung

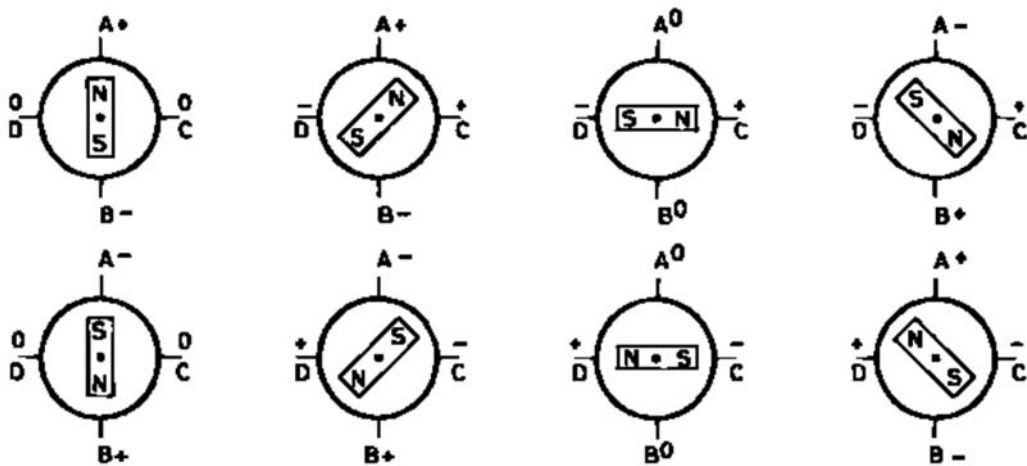


Abb. 1.6 Halbschrittbetrieb

Unipolare Schrittmotoren haben vier Phasen. Sie werden in nur einer Richtung vom Strom durchflossen. Jeder der beiden Elektromagnete besteht aus zwei Phasen, deren Wicklungen jeweils entgegengesetzten Wickelsinn haben. Wird die eine Phase erregt, hat der Elektromagnet beispielsweise die Polung N – S, wird die andere erregt, die Polung S – N (vgl. Abb. 1.4a). Die Ansteuerung ist vergleichsweise einfach, da der Stromfluß nur ein- und auszuschalten, nicht aber umzupolen ist. Man kommt deshalb mit einfachen Leistungsstufen aus (beispielsweise mit vier einzelnen Darlington-Transistoren oder einem Vierfach-Darlington-Array). Der Nachteil: bei gegebenen Abmessungen des Motors ist das Drehmoment geringer, da jeweils nur der halbe Wickelraum (also die Hälfte der insgesamt untergebrachten Windungen) zur Erregung genutzt werden kann (mit anderen Worten: die Wicklungen müssen mit dünnerem Draht ausgeführt werden, woraus sich eine entsprechende Beschränkung der maximalen Stromstärke ergibt).

Bipolare Schrittmotoren haben nur zwei Phasen. Das Umpolen der Magnetfelder wird durch Umpolen der Stromrichtung erreicht. Da zwei Elektromagnete umzupolen sind, braucht man zwei Brückenschaltungen mit Leistungselementen. Der Vorteil: Man kann den verfügbaren Wickelraum voll ausnutzen, also hinreichend dicken Draht verwenden und so durch entsprechende Ströme ein hohes Drehmoment erreichen. Anders herum gesehen: für ein gefordertes Drehmoment kommt man mit einem kleineren Motor aus. Ein bipolarer Motor hat 30...40% mehr Drehmoment als ein gleich großer unipolarer (Abb. 1.7). Durch Einsatz integrierter Leistungsschaltungen wird der Aufwand erträglich. Deshalb werden bipolare Schrittmotoren in den meisten Einsatzfällen bevorzugt.

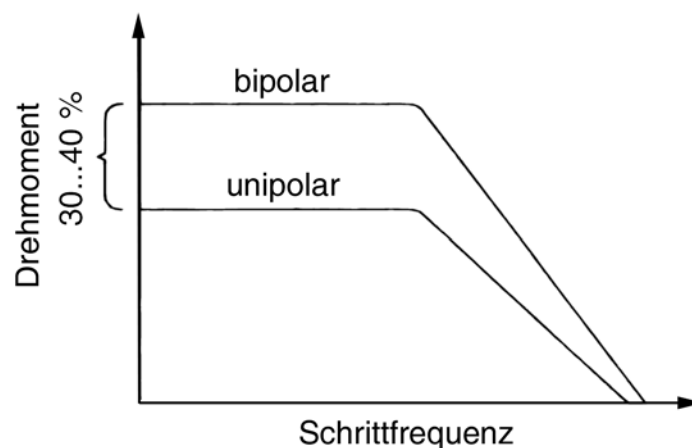


Abb. 1.7 Das Drehmoment in Abhängigkeit von Bauart und Schrittfrequenz (nach ST Microelectronics)

Schrittmotoren mit weichmagnetischem Rotor (Reluktanzmotoren) sind unipolar. Der Rotor hat weniger Pole als der Stator (vgl. Abb. 1.3a). Um einen Schritt auszuführen, wird eines der Polpaare des Stators erregt, so daß das jeweils nächstgelegene Polpaar des Rotors zu dem besagten Polpaar des Stators gezogen wird. Erregungsschemata:

- Einphasensteuerung: A – C – B – D,
- Zweiphasensteuerung: AC – CB – BD – DA,
- Halbschrittbetrieb: A – AC – C – BC – BD – D – A.

Hybridmotoren haben Rotoren mit Dauermagneten. Der Stator hat aber eine andere Polzahl als der Rotor (Beispiele: Rotor 50 Pole, Stator 48 oder 52 Pole).

Bauarten im Vergleich. Schrittmotoren mit Dauermagnetrotor liefern beim Drehen eine Gegen-EMK. Deshalb ist die Schrittfrequenz beschränkt. Schrittmotoren mit weichmagnetischem Rotor ermöglichen

höhere Schrittfrequenzen, haben aber ein geringeres Drehmoment. Hybridmotoren können mit höheren Schrittfrequenzen betrieben werden als die herkömmlichen Typen mit Dauermagnetrotor. Im Vergleich zum Reluktanzmotor weisen sie ein höheres Drehmoment auf. Zudem können sie ihre aktuelle Rotorposition auch im ausgeschalteten Zustand halten (Rastmoment).

2. Schrittmotorsteuerung

Die typische Schrittmotorsteuerung umfaßt drei Funktionseinheiten: den Mikrocontroller, die Steuerschaltung und die Treiberstufen. Einfachste Konfigurationen bestehen aus einem Mikrocontroller, der direkt mit den Treiberstufen verbunden ist. Hierbei sind alle Steuerfunktionen programmseitig realisiert. Das Angebot an integrierten Schrittmotorsteuerschaltkreisen ist vielfältig. Die Typenreihen unterscheiden sich hinsichtlich der Interfaces, der Steuerfunktionen und der Schaltungsintegration (Tabelle 2.1, Abb. 2.1).

Interfaces	Steuerfunktionen	Schaltungsintegration
<ul style="list-style-type: none"> • Einzelanschlüsse zur Steuerung der Betriebsart, zur Schrittauslösung usw. • einfache Busschnittstellen (z. B. 8-Bit-Bus). • typische Mikrocontroller-Schnittstellen, z. B. SPI oder RS-232. 	<ul style="list-style-type: none"> • einzelne Schritte. Die Betriebsart ist von außen einzustellen, die einzelnen Schritte sind von außen auszulösen. • mehr oder weniger komplexe Bewegungsabläufe (Motion Control Functions). 	<ul style="list-style-type: none"> • Steuerung und Treiberstufen sind getrennte Schaltkreise. • Steuerung und Treiberstufen sind in einem Schaltkreis zusammengefaßt.

Tabelle 2.1 Typische Auslegungen von Schrittmotorsteuerschaltkreisen

Die Erregung der Schrittmotoren mit Dauermagnetrotor kann mit acht Zuständen dargestellt werden, die zyklisch aufeinander folgen (Tabelle 2.2, Abb. 2.2).

Zustand	unipolar				bipolar		Halbschritt	Einphasensteuerung	Zweiphasensteuerung
	A	B	C	D	AB	CD			
1	0	1	0	1	-	-	ja	nein	ja
2	0	0	0	1	0	-	ja	ja	nein
3	1	0	0	1	+	-	ja	nein	ja
4	1	0	0	0	+	0	ja	ja	nein
5	1	0	1	0	+	+	ja	nein	ja
6	0	0	1	0	0	+	ja	ja	nein
7	0	1	1	0	-	+	ja	nein	ja
8	0	1	0	0	-	0	ja	ja	nein

Tabelle 2.2 Die Erregungszustände der Schrittmotoren mit Dauermagnetrotor. Bei umgekehrter Drehrichtung werden die Zustände in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen. Die drei rechten Spalten geben an, welche der acht Zustände in der jeweiligen Betriebsart genutzt ("ja") oder übergangen ("nein") werden.

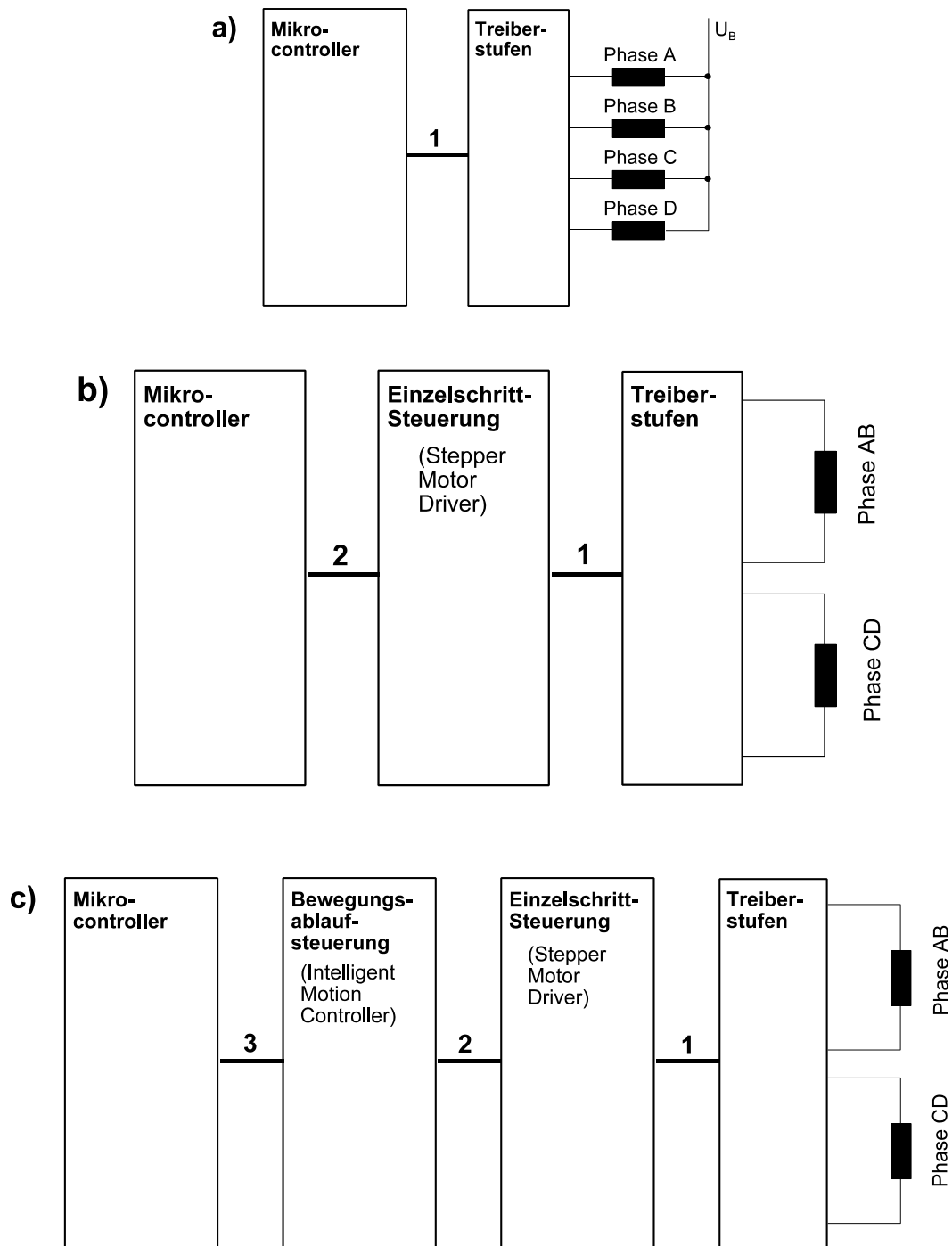


Abb. 2.1 Schrittmotorsteuerungen. a) Direktsteuerung durch Mikrocontroller; b) autonome Einzelschrittsteuerung; c) autonome ("intelligente") Steuerung von Bewegungsabläufen. 1 - Erregung der Treiberstufen; 2 - Schrittauslösung; 3 - Steuerkommandos.

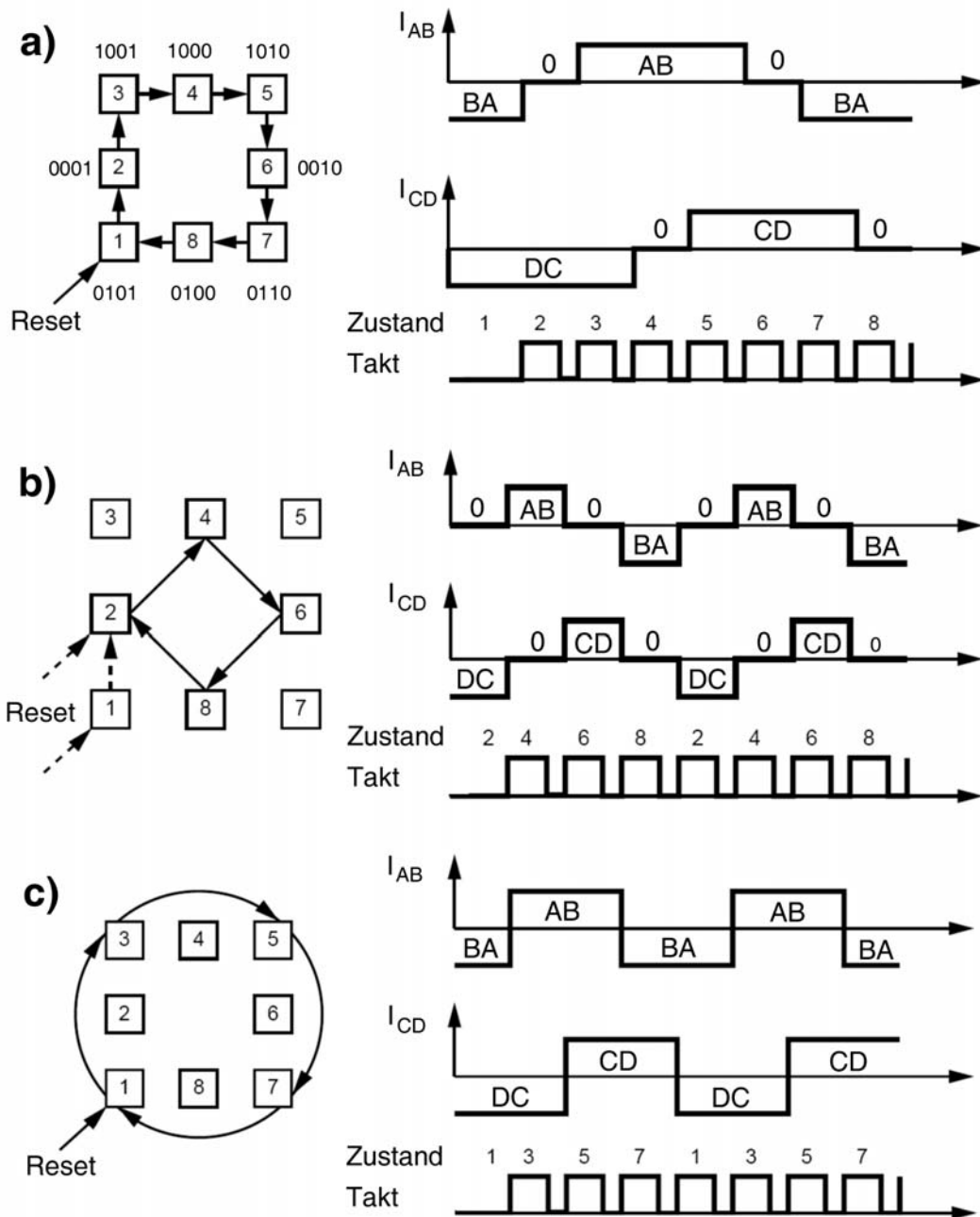


Abb. 2.2 Die Erregungszustände der Schrittmotoren mit Dauermagnetrotor (nach ST Microelectronics).
 a) Halbschrittbetrieb. Hier werden alle acht Zustände nacheinander durchlaufen. b) Einphasensteuerung. Es werden nur die Zustände mit geraden Nummern durchlaufen. Es ist jeweils nur einer der Elektromagnete AB, CD erregt. c) Zweiphasensteuerung. Es werden nur die Zustände mit ungeraden Nummern durchlaufen. Beide Elektromagnete AB, CD sind immer erregt. Drehrichtungsumkehr = Umkehr der Zustandsreihenfolge.

Unipolare und bipolare Schrittmotoren werden im Grunde gleichartig angesteuert (Tabelle 2.3). Es kommt lediglich darauf an, die Elektromagnete AB und CD abwechselnd umzupolen bzw. (Einphasensteuerung, Halbschrittbetrieb) zeitweise auszuschalten.

Die Codierung in Tabelle 2.2:

- 0 = ausgeschaltet,
- 1 = eingeschaltet,
- + = Polung AB oder CD,
- - = Polung BA oder DC.

unipolar		bipolar		
01	die eine Phase des jeweiligen Elektromagneten wird erregt (z. B. B oder D)	-	die Phase wird in einer Richtung vom Strom durchflossen	Erregung BA oder DC
10	die andere Phase des jeweiligen Elektromagneten wird erregt (z. B. A oder C)	+	die Phase wird in der entgegen-gesetzten Richtung vom Strom durchflossen	Erregung AB oder CD
00	beide Phasen werden nicht erregt	0	die Phase wird nicht erregt	-

Tabelle 2.3 Die Wirkungen der Zustände von Tabelle 2.2 in einer Phase

Die Betriebsarten unterscheiden sich darin, welche der acht Zustände jeweils ausgenutzt werden:

- Halbschrittbetrieb: alle acht Zustände,
- Einphasensteuerung: die Zustände mit gerader Nummer,
- Zweiphasensteuerung: die Zustände mit ungerader Nummer.

Übergänge zwischen den Betriebsarten:

- in den Einphasenbetrieb: Steuerung ggf. zunächst in den nächsten Zustand mit gerader Nummer überführen,
- in den Zweiphasenbetrieb: Steuerung ggf. zunächst in den nächsten Zustand mit ungerader Nummer überführen.

Die Steuerung muß die Zustandsübergänge korrekt ausführen. Wie die Elektromagnete im jeweils nächsten Schritt zu erregen sind, hängt von der aktuellen Erregung, der gewählten Drehrichtung und der Betriebsart ab. Die Schritte dürfen nicht zu schnell aufeinander folgen. Es sind also zwei Probleme zu lösen: die Zustandsübergänge und die Zeitvorgabe.

Vereinfachungen. Die Entwurfsaufgabe vereinfacht sich, wenn bestimmte Anforderungen entfallen. Typische Vereinfachungen bestehen darin, daß nur eine Betriebsart und/oder nur eine Drehrichtung zu unterstützen ist.

Reine Softwarelösungen. Die Zustandsübergänge werden z. B. durch zyklisches Adressieren einer Wertetabelle oder durch zyklisches Rotieren von Registerinhalten (Abb. 2.7) erzeugt. Die Zeit zwischen den Schritten kann mittels einer Programmschleife abgezählt oder über eine Zähler-Zeitgeber-Einheit dargestellt werden. Letzteres ist die Vorzugslösung, da sie dem Prozessor Zeit läßt, weitere Aufgaben auszuführen. Sie läuft darauf hinaus, die Schrittmotorsteuerung als Unterbrechungsbehandlung zu implementieren (die Zeitgeberunterbrechung veranlaßt das Ausgeben des jeweils nächsten Schrittes).

Reine Hardwarelösungen. Die Hardware führt das Weiterschalten um eine vorgegebene Anzahl von Schritten autonom aus. Hierzu sind ein Zustandsautomat, ein Zeitzähler und ein Schrittzähler erforderlich.

Verbundlösungen. Der Zustandsautomat wird schaltungstechnisch realisiert, Schrittauslösung, Zeitvorgabe, Schrittzählung usw. hingegen programmseitig.

Der Zustandsautomat (Sequencer, Translator). Sind nur Vollschritte auszuführen, genügen vier Zustände. Die Steuersignale der Zweiphasensteuerung (Abb. 2.3 und 2.4) können beispielsweise mit einem 2-Bit-Johnsonzähler dargestellt werden (Abb. 2.5). Die Steuersignale für die Einphasensteuerung (Abb. 2.6) ergeben sich durch eine einfache Decodierung.

Lösungsmöglichkeiten für alle acht Zustände:

- eine Zehlschaltung mit vier Flipflops und entsprechenden Zuordnungsnetzwerken,
- eine als Ring geschaltete Schieberegisteranordnung, die beim Rücksetzen mit einem entsprechenden Bitmuster geladen wird (vgl. Abb. 2.7),
- eine Anordnung aus vier 8-zu-1-Multiplexern mit gemeinsamem Abfragezähler (universelle Auslegung: als Addierwerk für die Festwerte +1, +2, -1, -2).

Eine entsprechende Zehlschaltung wird anhand der Tabellen 2.4 bis 2.6 und der Abbildungen 2.8 bis 2.12 dargestellt. Es handelt sich um einen gleichsam naiven Entwurf, bei dem auf Optimierungen verzichtet wird¹. Um die Entwurfsarbeit zu erleichtern, wird der Zähler mit T-Flipflops aufgebaut. Ein solches Flipflop ist dann umzuschalten, wenn sich die Belegung der betreffenden Bitposition beim Übergang vom aktuellen zum nächsten Zustand ändert. In jeder Bitposition gibt es nur zwei Änderungen (Tabellen 2.4 bis 2.6). Somit ergeben sich vergleichsweise einfache, überschaubare Ansteuernetzwerke.

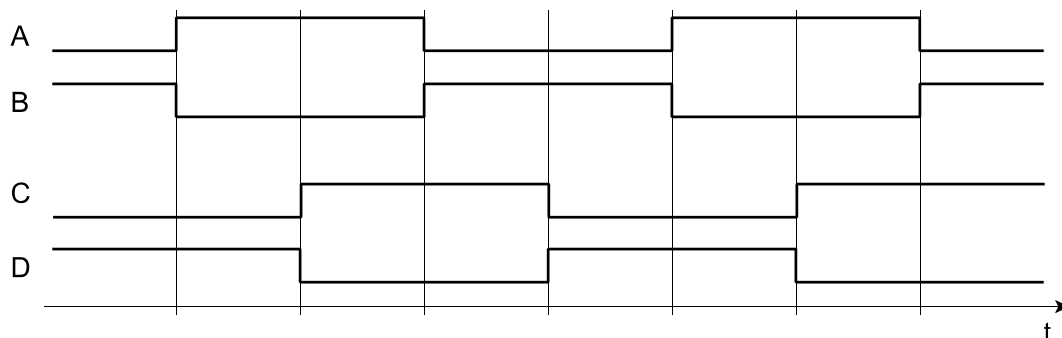


Abb. 2.3 Zweiphasensteuerung des unipolaren Schrittmotors

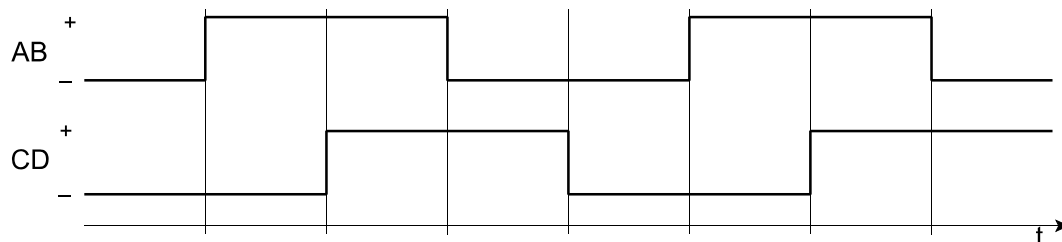


Abb. 2.4 Zweiphasensteuerung des bipolaren Schrittmotors

1: Bei Eingabe in ein CPLD-Entwicklungssystem erledigt das ohnehin die Software (mit anderen Worten, wir entwerfen naiv aus der Problemauffassung heraus und überlassen dem Programm die Kleinarbeit).

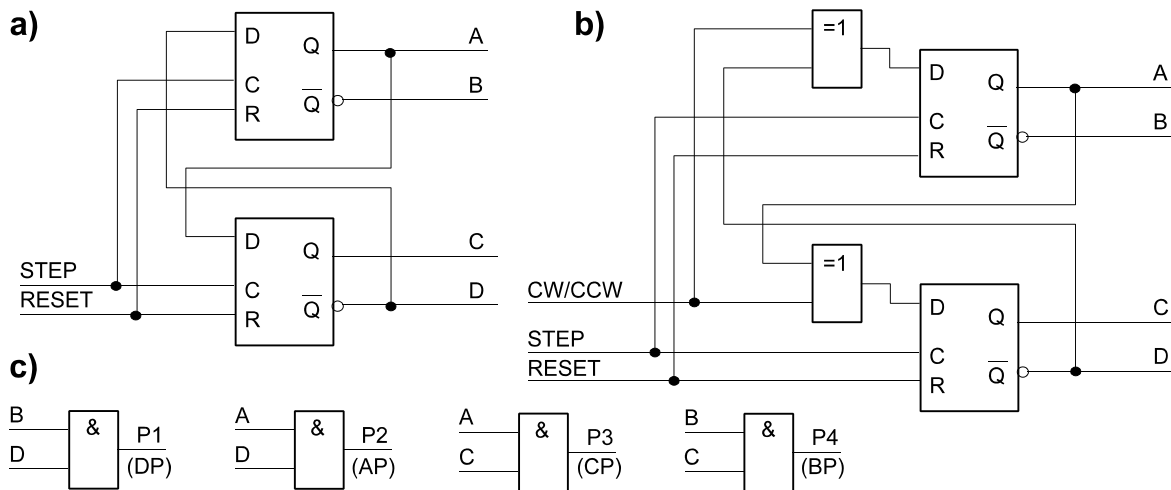


Abb. 2.5 Schrittmotorsteuerung mit Johnsonzähler. a) für eine Drehrichtung, b) umschaltbar; c) Decodierung der vier Steuersignale für die Einphasensteuerung (vgl. Abb. 2.6).

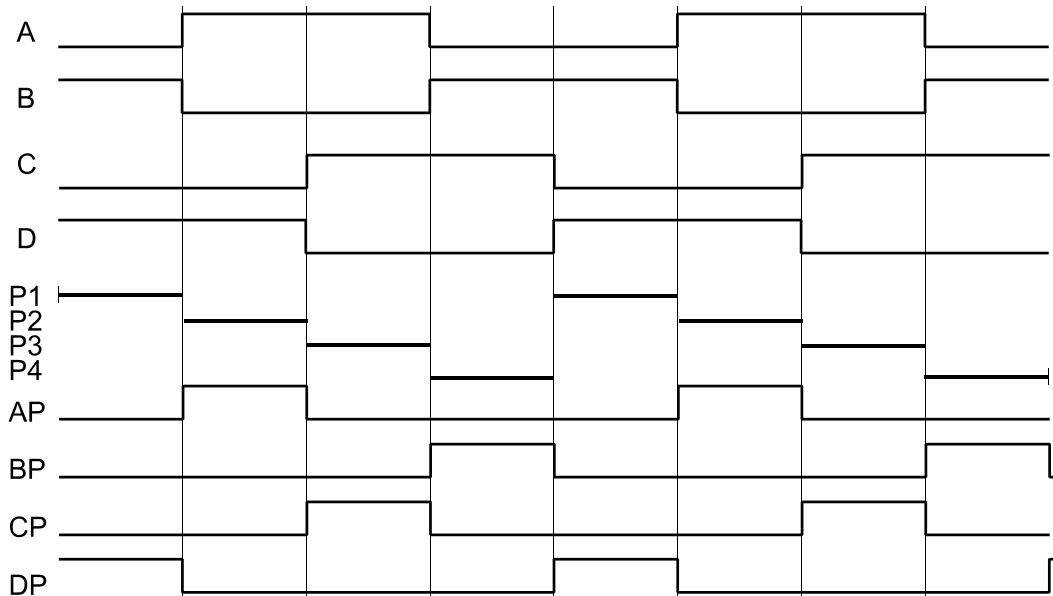


Abb. 2.6 Einphasensteuerung. A...D – die Ausgangssignale des Johnsonzählers; P1...P4 - die vier Phasen; AP...DP die Steuersignale für die Leistungsstufen. Beim unipolaren Schrittmotor erregen AP...DP direkt die jeweilige Phase. Beim bipolaren Schrittmotor bewirken: AP eine Erregung AB; BP eine Erregung BA; CP eine Erregung CD; DP eine Erregung DC.

												A	B	C	D
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1

Abb. 2.7 Registerinhalt für die Zustandsübergänge der Zweiphasensteuerung. Ein zyklisches Rotieren um vier Bits ergibt den Zustand des jeweils nächsten Schrittes. Sind alle acht Zustände zu unterstützen, ist ein 32-Bit-Register z. B. gemäß Tabelle 2.2 zu laden. Bei Halbschrittbetrieb wird um vier Bits, bei Vollschrittbetrieb um acht Bits verschoben.

Zustand	Zählfolge				Änderung, wenn nach rechts				Änderung, wenn nach links			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	0	1	0	1								1
2	0	0	0	1	1					1		
3	1	0	0	1				1	1			
4	1	0	0	0			1					1
5	1	0	1	0	1						1	
6	0	0	1	0					1			
7	0	1	1	0			1			1		
8	0	1	0	0				1			1	

Tabelle 2.4 Die Zählfolgen bei Halbschrittbetrieb (alle acht Zustände). Die Einsen in den Änderungsspalten geben an, daß die betreffenden Bitpositionen im jeweiligen Folgezustand ihren Wert ändern.

Zustand	Zählfolge				Änderung, wenn nach rechts				Änderung, wenn nach links			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
2	0	0	0	1	1			1		1		1
4	1	0	0	0	1		1		1			1
6	0	0	1	0		1	1		1		1	
8	0	1	0	0		1		1		1	1	

Tabelle 2.5 Einphasensteuerung. Die Zählfolgen der vier geraden Zustände.

Zustand	Zählfolge				Änderung, wenn nach rechts				Änderung, wenn nach links			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	0	1	0	1	1	1					1	1
3	1	0	0	1			1	1	1	1		
5	1	0	1	0	1	1					1	1
7	0	1	1	0			1	1	1	1		

Tabelle 2.6 Zweiphasensteuerung. Die Zählfolgen der vier ungeraden Zustände.

Hinweis: Die Drehrichtungen "rechtsherum (clockwise, CW) und "linksherum" (counterclockwise, CCW) sind hier bloße Vereinbarungen, die lediglich dazu dienen, beide Drehrichtungen auf anschauliche Weise voneinander zu unterscheiden.

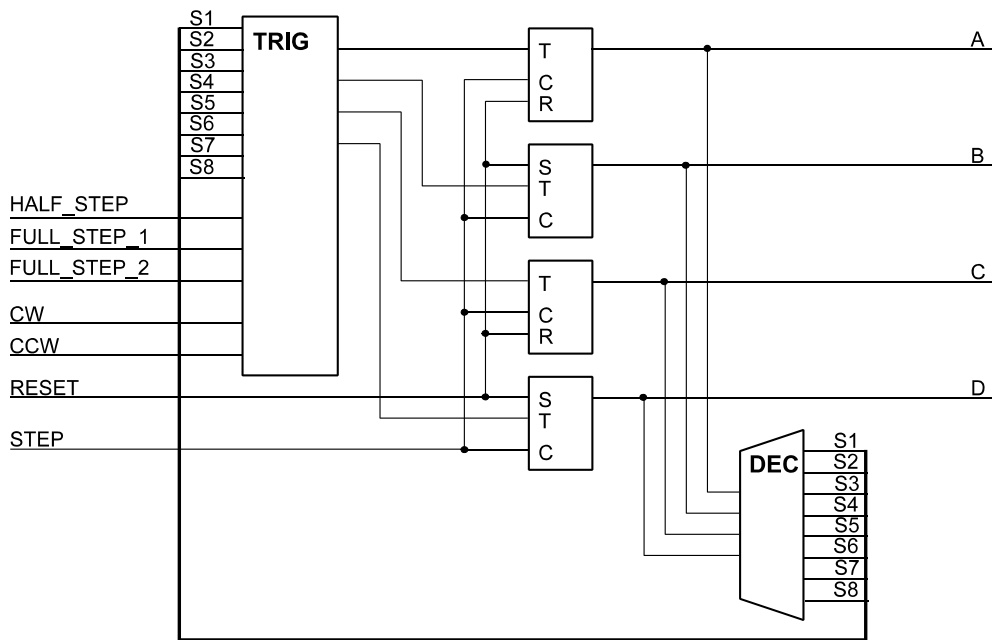


Abb. 2.8 Universeller Zustandsautomat (Sequencer, Translator) für die Schrittmotorsteuerung

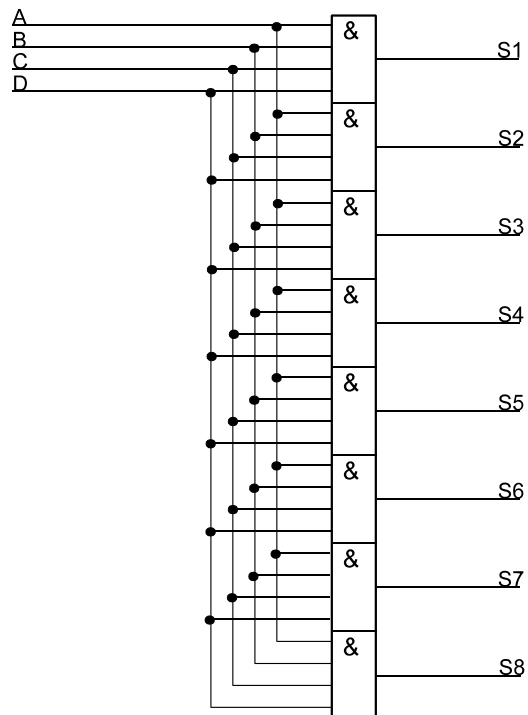


Abb. 2.9 Die 1-aus-n-Decodierung der acht Zustände

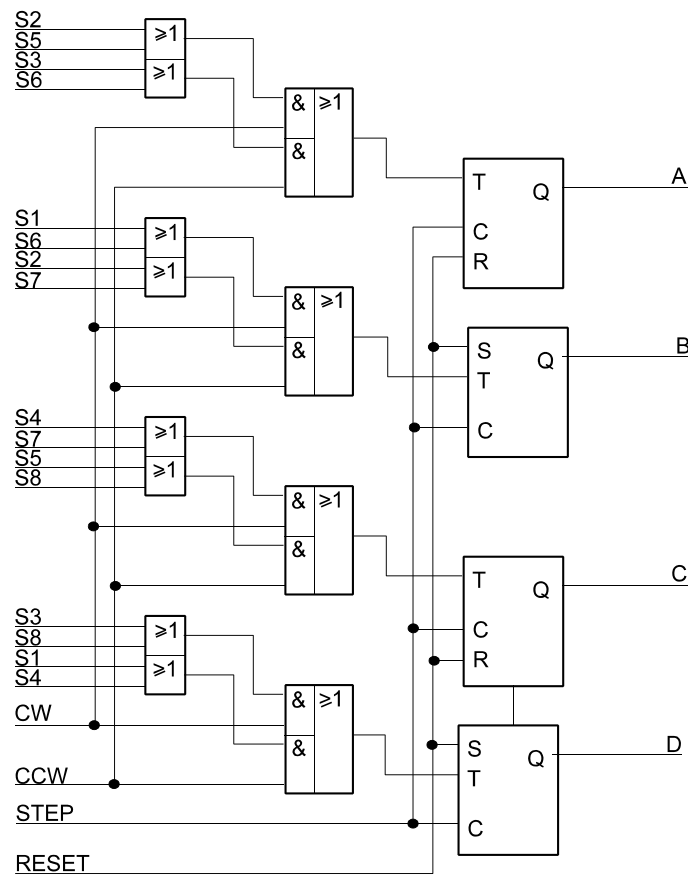


Abb. 2.10 Ein vereinfachter Zustandszähler (nur Halbschrittbetrieb) mit umschaltbarer Zählrichtung

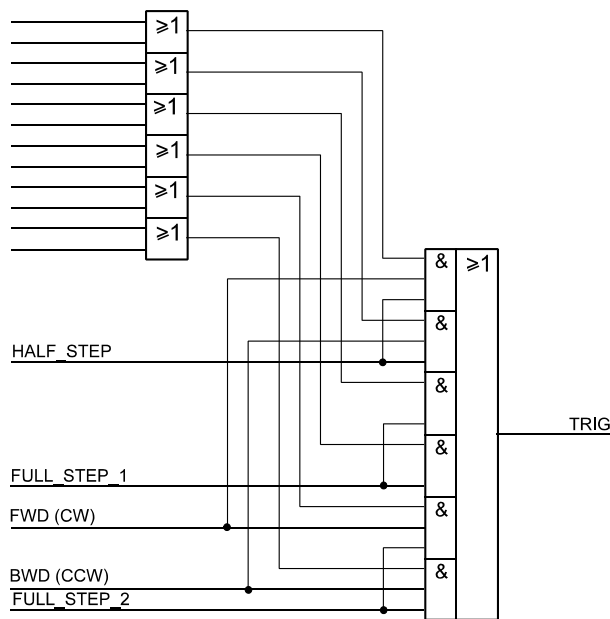


Abb. 2.11 Ein Ansteuernetzwerk für die Flipflops des universellen Zustandszählers

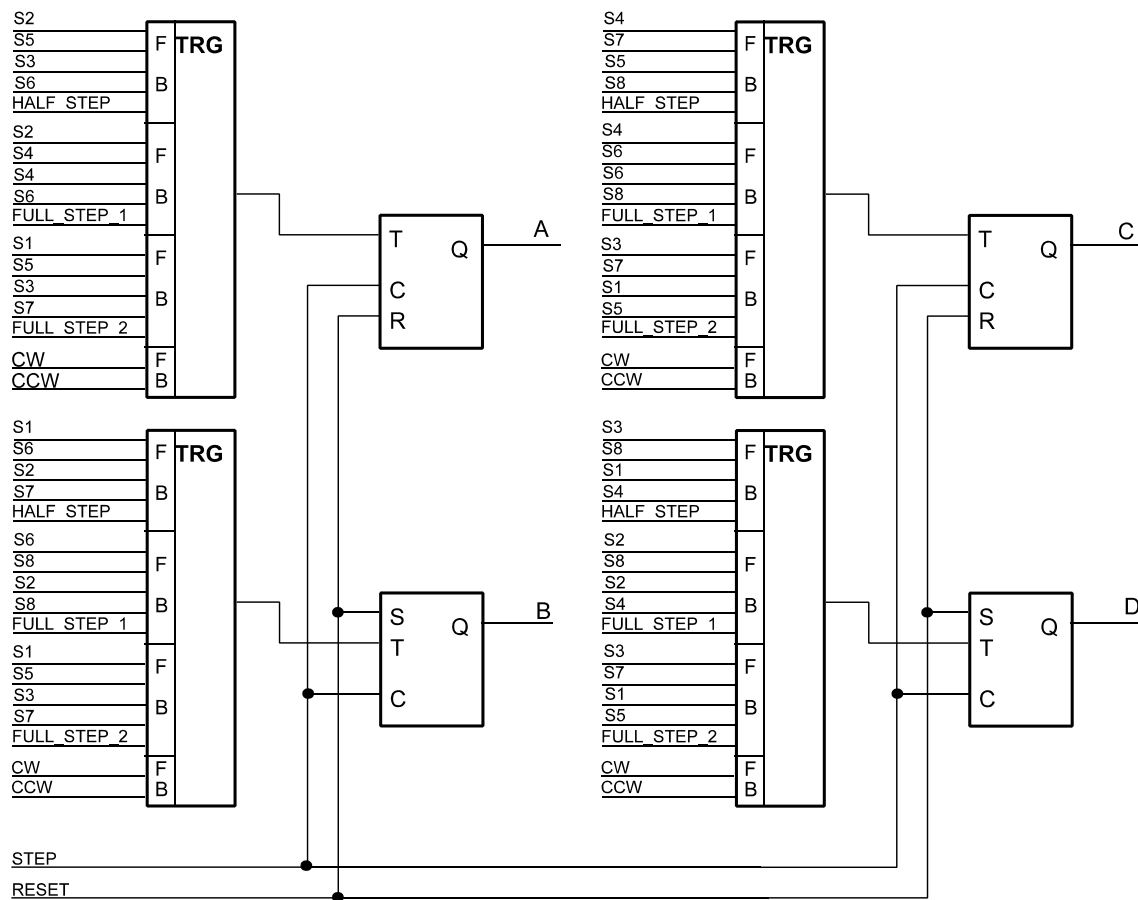


Abb. 2.12 Der universelle Zustandszähler

3. Treiberstufen und Steuerschaltkreise

Unipolare Schrittmotoren können mit einfachen Leistungsstufen angesteuert werden (Abb. 3.1). Ist die Schrittfrequenz nicht allzu hoch und sind keine Sonderfunktionen¹ vorzusehen, können diskrete Transistoren, Transistor-Arrays oder universelle Leistungsschaltkreise eingesetzt werden. Da vergleichsweise hohe Ströme (Richtwert: einige hundert mA) zu schalten sind, kommen vor allem Darlingtons-Transistoren, Darlingtons-Arrays² oder Leistungs-FETs in Betracht³.

Bipolare Schrittmotoren erfordern ein Umpolen des Betriebsstroms. Hierzu ist für jede der beiden Wicklungen eine H-Brückenschaltung mit je vier Leistungsbau-elementen erforderlich (Abb. 3.2). Sind die Anforderungen nicht allzu hoch, kann man die Anordnung mit diskreten Transistoren⁴ aufbauen und direkt vom Mikrocontroller aus steuern.

1: Z. B. Kurzschlußerkennung.

2: Beispiel: ULN 2803.

3: *Hinweis:* Auf den zum sicheren Schalten erforderlichen Spannungshub achten. Kann der Mikrocontroller mit 5 V betrieben werden, läßt es sich typischerweise ohne weiteres einrichten (sonst Pegelwandlung erforderlich).

4: Typischerweise mit Darlingtons oder FETs; oben PNP oder P-Kanal, unten NPN oder N-Kanal. Voraussetzung: Spannungshub der Ansteuerung wenigsten 5 V. Zum Aufbau von diskreten H-Brücken gibt es eigens Transistor-Arrays.

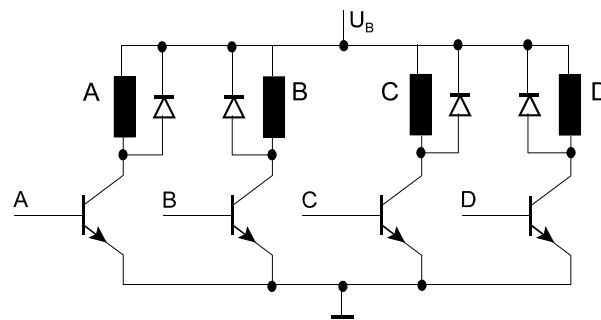


Abb. 3.1 Ansteuerung eines unipolaren Schrittmotors über einfache Leistungsstufen (Direktsteuerung).

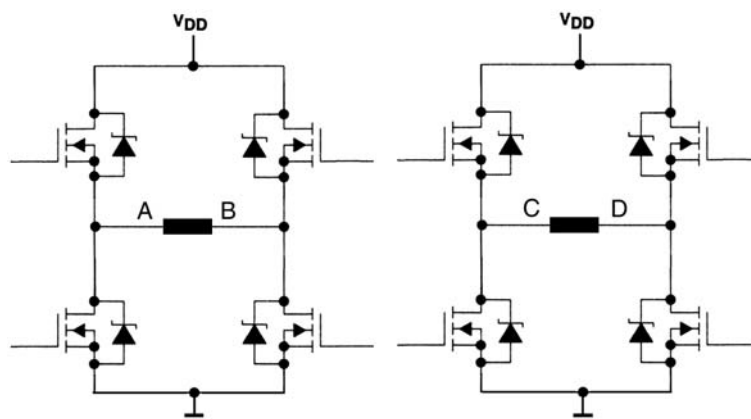


Abb. 3.2 Ansteuerung eines bipolaren Schrittmotors mit zwei H-Brückenschaltungen. Hier mit Leistungs-FETs, deren parasitäre Dioden als Freilaufdioden genutzt werden.

Spannungssteuerung L/R. Um eine Wicklung zu erregen, wird ein entsprechender Stromweg geschaltet. Der Strom wird lediglich durch den Gleichstromwiderstand der Wicklung begrenzt. Dies ist die einfachste Form der Steuerung (Abb. 3.3a). Der Nachteil: da der Strom gemäß der Zeitkonstanten L / R_{DC} hochläuft und abfällt, kann bei höheren Schrittfrequenzen nicht die maximale Stromstärke U_B / R_{DC} wirksam werden. Hierdurch verringert sich das Drehmoment.

Spannungssteuerung L/nR. Es wird eine höhere Speisespannung verwendet. Durch einen zusätzlichen Vorwiderstand R_V wird der Strom auf den Nennwert des Schrittmotors begrenzt (Abb. 3.3b). Hierdurch ergibt sich eine verringerte Zeitkonstante. Typische Auslegungen: $L/4R$ und $L/5R$ (vierfacher bzw. fünffacher Gleichstromwiderstand; dementsprechend vierfache bzw. fünffache Speisespannung; Vorwiderstand $R_V = 3$ bzw. $4 R_{DC}$). Hierdurch verringert sich die Zeitkonstante des Stromanstiegs auf $1/4$ bzw. $1/5$. Diese Einfachlösung hat den Nachteil eines beträchtlich schlechteren Wirkungsgrades infolge der im Vorwiderstand umgesetzten Verlustleistung.

Der Betriebsstrom im Ruhezustand. Wird der Schrittmotor im Ruhezustand vom vollen Betriebsstrom (Nennwert) durchflossen, so wird eine beträchtliche Verlustleistung umgesetzt, und der Motor wird ziemlich warm. Es ist somit zweckmäßig, den Ruhestrom auf einen Wert herabzusetzen, der zum Aufbringen des jeweils erforderlichen Haltemoments¹ ausreicht (Stromabsenkung).

1: Das heißt, um zu verhindern, daß von außen einwirkenden mechanischen Kräfte die Welle weiter- oder zurückdrehen.

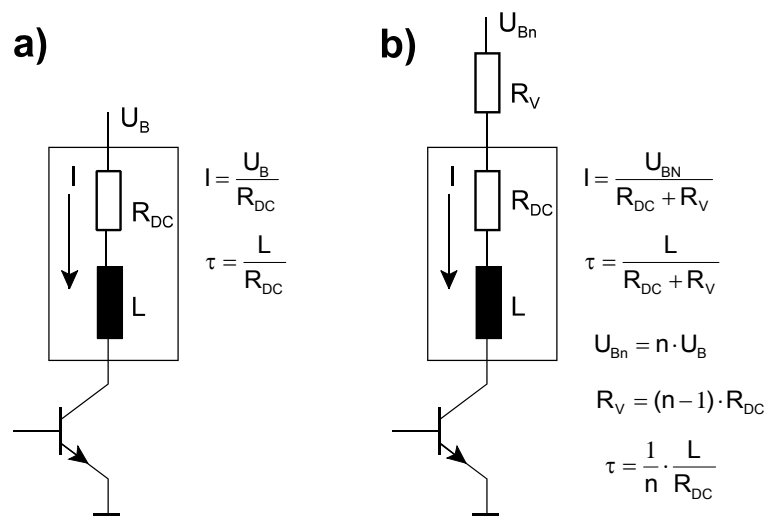


Abb. 3.3 Spannungssteuerung. a) L/R . Speisespannung gemäß Nennwert ergibt Strom gemäß Nennwert. Langsamer Stromanstieg gemäß Zeitkonstante τ . b) L/nR . Auslegungbeispiel: $L/5R$ mit $R_V = 4 R_{DC}$ und Speisespannung $U_{Bn} = 5 \cdot$ Nennwert. Hierdurch verringert sich die Zeitkonstante auf $1/5$.

Spannungsumschaltung. Es werden zwei Speisespannungen vorgesehen, eine höhere und eine niedrigere (Abb. 3.4). Wird ein Schritt eingeleitet (Steuersignal START), so wird kurzzeitig die höhere Speisespannung zugeschaltet. Hierdurch ergibt sich ein steilerer Anstieg des Stroms. Nach Ausführung des Schrittes kann der Strom auf einen niedrigeren Wert zurückgenommen werden (Ruhestrom). Das Prinzip kann sowohl dazu ausgenutzt werden, das Drehmoment bei hohen Schrittfolgen zu erhöhen ($U_H >$ Nennspannung), als auch dazu, den Ruhestrom abzusenken ($U_B <$ Nennspannung).

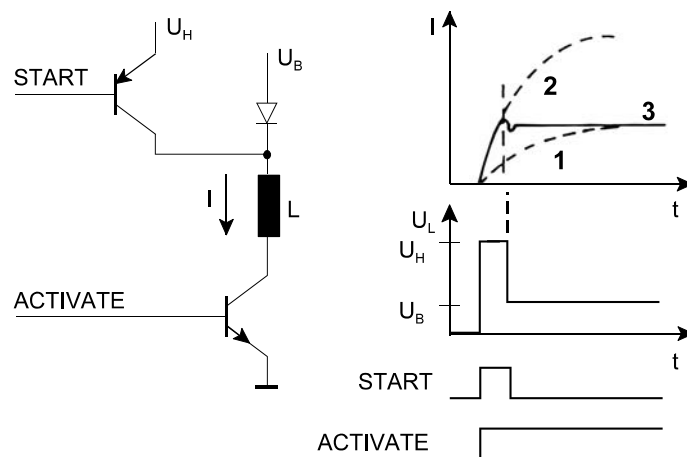


Abb. 3.4 Spannungsumschaltung. U_H ist die höhere, U_B die niedrigere Betriebsspannung. ACITVATE ist das normale Steuersignal (vgl. A...D in Abb. 3.1), START ist ein zu Beginn des Schrittes abgegebener Impuls. 1 - Stromanstieg mit Speisespannung U_B ; 2 - Stromanstieg mit Speisespannung; 3 - resultierender Stromverlauf.

Stromsteuerung. Um einen steilen Stromanstieg zu gewährleisten, liegt es nahe, die Leistungsstufen als geschaltete Konstantstromquellen auszuführen. Solche Leistungsstufen haben aber einen schlechten Wirkungsgrad – vor allem dann, wenn sich der Motor in Ruhe befindet bzw. wenn die Schrittfolgen

niedrig ist¹. Die Alternative: Stromsteuerung durch Pulsweitenmodulation (Abb. 3.5 und 3.6). Auch hier verwendet man eine überhöhte Betriebsspannung (z. B. 5 • Nennwert). Die Schaltung wirkt aber als Regler, der versucht, den Mittelwert der Stromstärke auf einem Sollwert zu halten, der durch die Referenzspannung vorgegeben wird. Somit ist es nicht erforderlich, die Betriebsspannung zu stabilisieren.

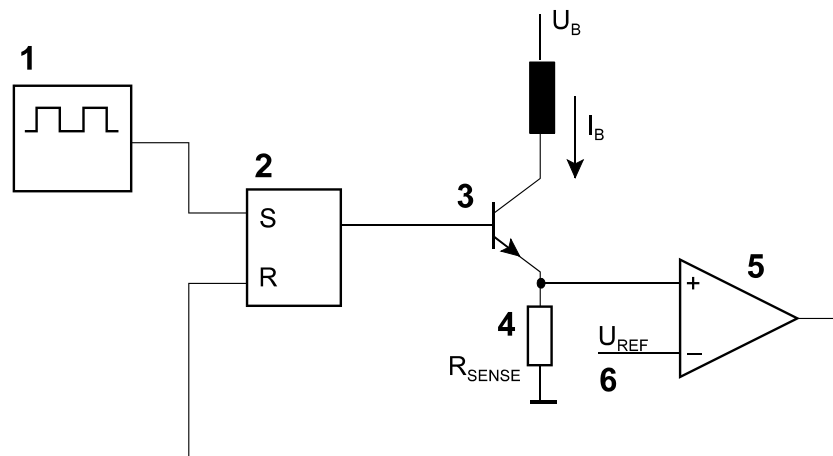


Abb. 3.5 Stromsteuerung durch Pulsweitenmodulation (Chopping Drive; Prinzip). 1 - Taktgenerator; 2 - Flipflop; 3 - Leistungsstufe; 4 - Strommeßwiderstand; 5 - Komparator; 6 - Referenzspannung. Jeder Taktimpuls setzt das Flipflop 2. Hierdurch wird die Leistungsstufe 3 aktiviert, und der Betriebsstrom I_B beginnt zu fließen. Hat die Stromstärke einen vorgegebenen Endwert erreicht, so wird über den Komparator 5 das Flipflop 2 zurückgesetzt und somit der Strom abgeschaltet. Mit dem nächsten Taktimpuls beginnt das Spiel von neuem. Die Referenzspannung U_{REF} bestimmt den Endwert der Stromstärke.

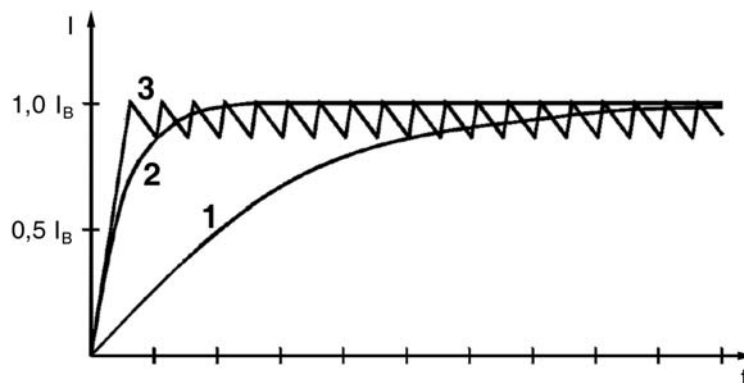


Abb. 3.6 Stromverläufe in verschiedenen Betriebsarten (nach ST Microelectronics). I_B = Betriebsstrom (Nennwert) 1 - einfache Spannungssteuerung (L/R). Betriebsspannung = Nennwert. 2 - Spannungssteuerung mit überhöhter Betriebsspannung ($L/5R$). Betriebsspannung = 5 • Nennwert. 3 - Pulsweitenmodulation (Chopped Drive). Betriebsspannung = 5 • Nennwert (unstabilisiert).

Die Referenzspannung als Sollwertvorgabe. Der Stromverlauf folgt der Referenzspannung nach. Durch entsprechendes Ändern der Referenzspannung kann man somit den Phasenstrom gemäß dem jeweiligen Betriebszustand des Schrittmotors einstellen (Abb. 3.7).

1: Die Schaltung gemäß Abb. 3.3b ist im Grunde auch nicht anderes als eine einfache Stromquelle (hohe Speisespannung, vergleichsweise hochohmiger Vorwiderstand).

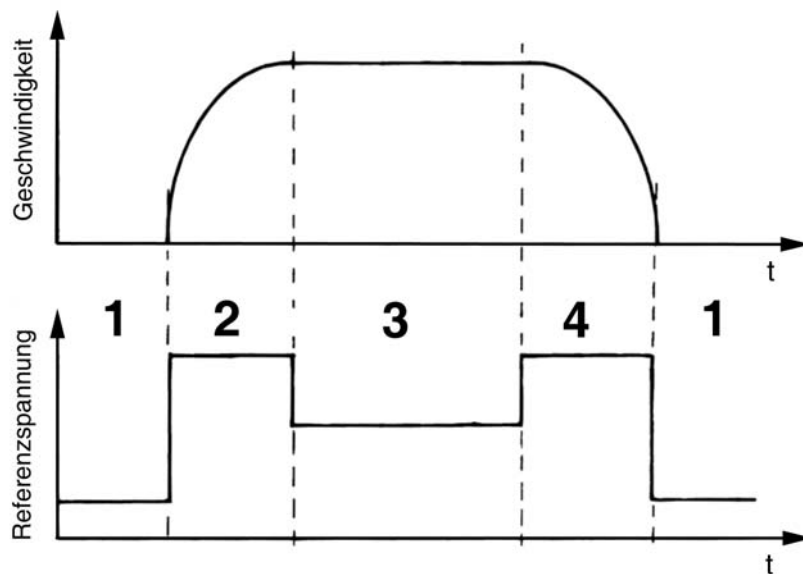


Abb. 3.7 Stromsteuerung für verschiedene Bewegungsphasen (nach ST Microelectronics). 1 - Ruhe (Stromabsenkung); 2 - Beschleunigung (Stromüberhöhung); 2 - gleichmäßige Geschwindigkeit (Nennstrom); 3 - Verzögerung. Die Referenzspannung bestimmt den jeweiligen Phasenstrom.

Einzelschrittsteuerung und Brückentreiber als Industriestandards. Im Laufe der Zeit sind bestimmte Auslegungen der Schnittstellen der Steuerschaltungen und der eigentlichen Treiberstufen zu Vorzugslösungen geworden (Abb. 3.8 bis 3.10).

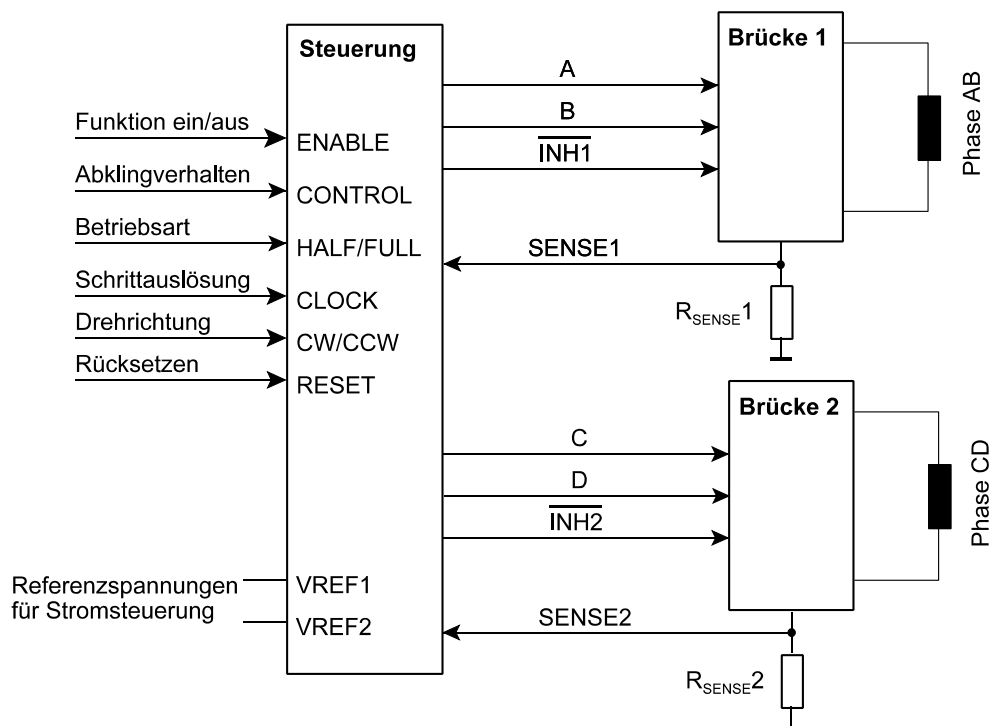


Abb. 3.8 Typische Schnittstellen der Schrittmotorsteuerung. Durch Beschaltung der Referenzspannungseingänge können verschiedene Formen der Stromsteuerung realisiert werden.

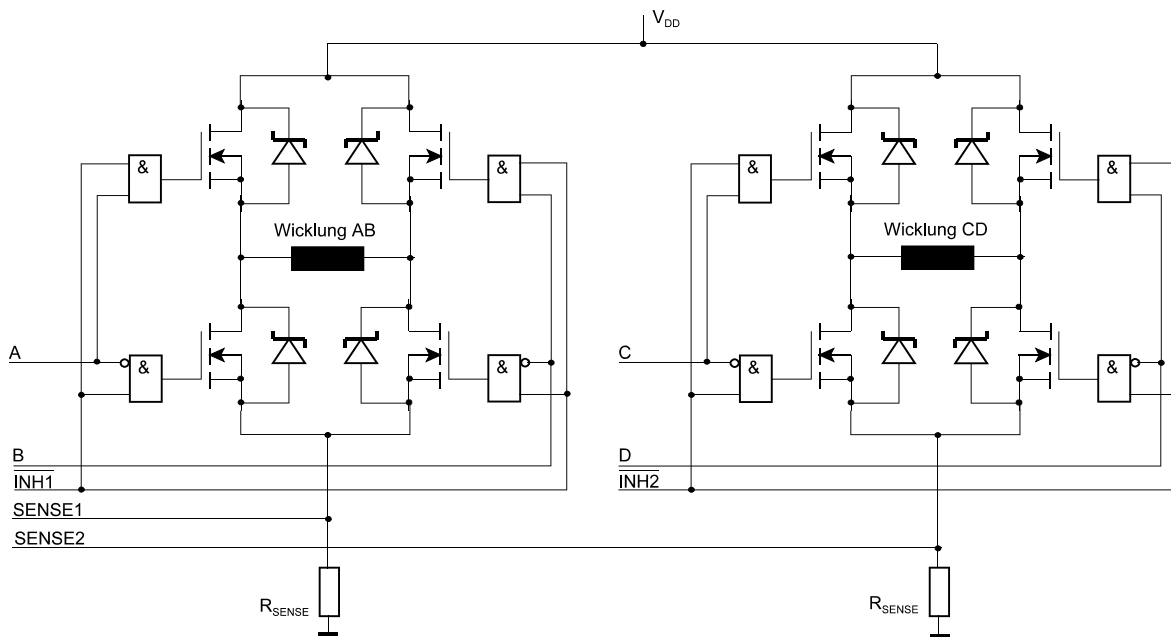


Abb. 3.9 Die Brückenstufen eines Schrittmotortreibers. Die Strommeßwiderstände (R_{SENSE}) sind außen anzuschließen (bei Spannungsteuerung (L/R) sind sie nicht erforderlich).

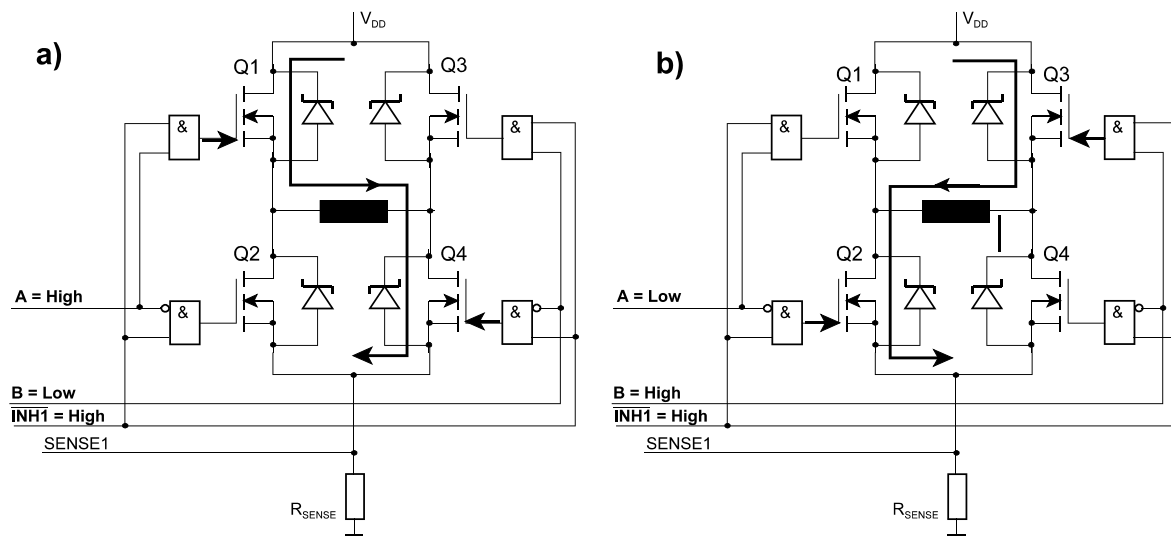


Abb. 3.10 Steuerung einer Brücke am Beispiel der Wicklung AB. a) Polung AB; b) Polung BA.

Die Phase wird von Strom durchflossen, wenn die Steuersignale A und B bzw. C und D entgegengesetzt erregt sind und wenn das jeweilige Sperrsignal INH1 bzw. INH2 High-Pegel führt.

Zweiphasensteuerung: die Steuersignale (A, B bzw. C, D) schalten jeweils gegensinnig gemäß der Codierung der ungeraden Zustände (vgl. Tabelle 2.6).

Einphasensteuerung und Halbschrittbetrieb: soll durch eine Phase kein Strom fließen, so führen gemäß der Codierung der ungeraden Zustände (vgl. Tabelle 2.5) beide Steuersignale (A, B bzw. C, D) Low-Pegel. Hierdurch werden die beiden unteren Transistoren Q2, Q4 angesteuert. Somit kann eigentlich gar kein Strom durch die Phase fließen. Im jeweils vorhergehenden (geraden) Zustand ist aber Strom

geflossen. Das Abstellen des Stromflusses ruft eine Gegen-EMK hervor, die versucht, den Stromfluß aufrecht zu erhalten. Da die beiden Transistoren Q2, Q4 aufgesteuert sind, ergibt sich ein geschlossener Stromkreis, und der durch die Wicklung fließende Strom kann nur langsam abklingen (vgl. auch Abb. 3.13b¹). Der Ausweg: über das Sperrsignal (INH1 oder INH2) werden alle Transistoren abgeschaltet, so daß der Stromfluß über die Freilaufdioden schneller abklingen kann (vgl. Abb. 3.13a). Viele Steuerschaltkreise erregen die Sperrsignale auf diese Weise (Abb. 3.11).

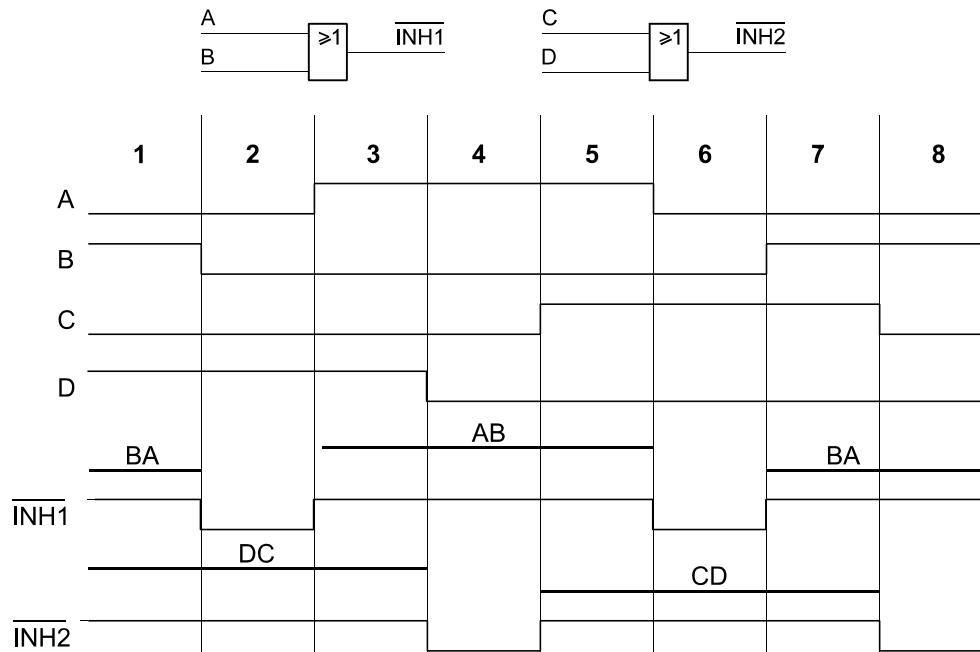


Abb. 3.11 Erregung der Sperrsignale im Halbschrittbetrieb (bzw. bei Einphasensteuerung). Führen beide Steuersignale Low-Pegel, wird das jeweilige Sperrsignal auch Low, um alle Transistoren der Brücke abzuschalten.

Zwei Arten der Pulsweitenmodulation. Die Steuerschaltkreise unterscheiden sich u. a. darin, auf welche Weise die Pulsweitenmodulation realisiert wird:

- mit konstanter Frequenz. Das Prinzip entspricht Abb. 3.5. Der Oszillator bestimmt die Frequenz (und damit die Periodendauer), der Komparator die Impulsdauer. Dieses Prinzip ermöglicht es, mehrere entsprechend ausgelegte Schrittmotorsteuerungen miteinander zu synchronisieren. Der typische Nachteil besteht darin, daß der Oszillator auch die Mindestimpulsdauer bestimmt (minimaler Duty Cycle = Duty Cycle des Oszillators), da (vgl. Abb. 3.5) das Setzen des Flipflops (durch den Oszillator) über das Rücksetzen (durch den Komparator) dominiert. Somit kann der Mindeststrom (s. weiter unten) nicht beliebig abgesenkt werden.
- mit konstanter Pausenzeit (Off Time). An die Stelle des Oszillators tritt ein monostabiler Multivibrator, der die Pause zwischen den Impulsen vorgibt. Die Impulsfrequenz ist somit veränderlich.

Impulsfrequenz bzw. Pausenzeit werden typischerweise durch Außenbeschaltung mit RC-Netzwerken festgelegt. Richtwerte: Oszillatorfrequenz > 20 kHz, Pausendauer einige μ s...einige ms.

1: Nur führt hier der Stromweg nicht über Q1 und D3, sondern – bei gleicher ursprünglicher Stromrichtung – über D2 und Q4.

Wo greift die Pulsweitenmodulation ein? Die Pulsweitenmodulation ist im Grunde ein der Schrittsteuerung überlagertes schnelles Ein- und Ausschalten. Beim Ausschalten ergibt sich – infolge der Gegen-EMK – das Problem, den Stromfluß abklingen zu lassen. Es gibt zwei Verfahrensweisen:

- a) schnelles Abklingen (Fast Decay). Die Impulsmodulation wirkt auf das Sperrsignal (Inhibit Chopping). Wird der Impuls inaktiv, so werden alle vier Transistoren abgeschaltet (Abb. 3.12). Infolge der Polung der Gegen-EMK liegt je eine Freilaufdiode im oberen und im unteren Teil der Brücke in Flußrichtung (D1 und D3 oder D2 und D4). Somit sind Stromwege in Richtung Masse und Betriebsspannung geschaltet, über die die in der Phase gespeicherte Energie schnell abfließen kann.
- b) langsames Abklingen (Slow Decay). Die Impulsmodulation wirkt so, daß bei inaktivem Impuls beide Steuersignale auf High-Pegel geschaltet werden (Phase Chopping) und somit beide oberen Transistoren Q1, Q3 aufsteuern (Abb. 3.13). Infolge der Polung der Gegen-EMK liegt eine der beiden oberen Freilaufdioden in Flußrichtung, und es ergibt sich ein Stromweg über diese Freilaufdiode und den jeweils gegenüberliegenden Transistor (D3, Q1 oder D1, Q3). Die Spannung über der Phase ist nur gering (Flußspannung der Freilaufdiode + Spannungsabfall über dem aufgesteuerten Transistor). Deshalb dauert es längere Zeit, bis der Stromfluß abgeklungen ist. Das langsame Abklingen kommt nur bei bipolaren Motoren in Betracht.

Das schnelle Abklingen hat höhere Brummströme und Verluste zur Folge.

Die Stärke des Brummstroms (Ripple Current) wird vor allem durch die Impulsfrequenz und die Spannung über der Phase bestimmt. Sie ist deshalb beim schnellen Abklingen deutlich höher als beim langsamen (das gilt vor allem bei höheren Betriebsspannungen).

Motorverluste ergeben sich infolge des Gleichstromwiderstandes der Wicklungen ($I^2 \cdot R_{DC}$) und infolge parasitärer Effekte (Wirbelströme usw.). Je höher Brummstrom und Impulsfrequenz, desto höher die parasitären Verluste. Deshalb ruft das schnelle Abklingen höhere Motorverluste hervor; der Motor wird wärmer.

Brückenverluste ergeben sich vor allem infolge des Stromflusses durch die Freilaufdioden. Der Spannungsabfall über einem aufgesteuerten Transistor¹ ist typischerweise geringer als die Flußspannung einer Freilaufdiode. Beim schnellen Abklingen fließt der Strom nacheinander durch zwei Freilaufdioden, beim langsamen Abklingen durch eine Freilaufdiode und einen Transistor. Deshalb sind die Brückenverluste beim schnellen Abklingen höher.

Um Verluste zu vermindern, die sich infolge des Stromflusses durch die Freilaufdioden ergeben, aktivieren manche Steuerschaltungen kurzzeitig Transistoren, die mit einer der jeweils stromleitenden Freilaufdioden verbunden sind. Beispiel (vgl. Abb. 3.12b): nach dem Abschalten aller Transistoren wird z. B. $1 \mu\text{s}$ abgewartet (Totzeit). In dieser Zeit fließt der Strom über die Freilaufdioden D2 und D3. Dann wird für die Dauer der weiteren Pausenzeit Transistor Q2 aktiviert, so daß Freilaufdiode D2 umgangen wird. Nach einer weiteren Totzeit wird Transistor Q4 aktiviert, so daß erneut Strom durch die Phase fließt (vgl. Abb. 3.12a). Sinngemäß werden beim langsamen Abklingen in der Pausenzeit beide Transistoren Q1, Q3 aktiviert (vgl. Abb. 3.13b).

1: U_{CEsat} oder $I \cdot R_{DSon}$.

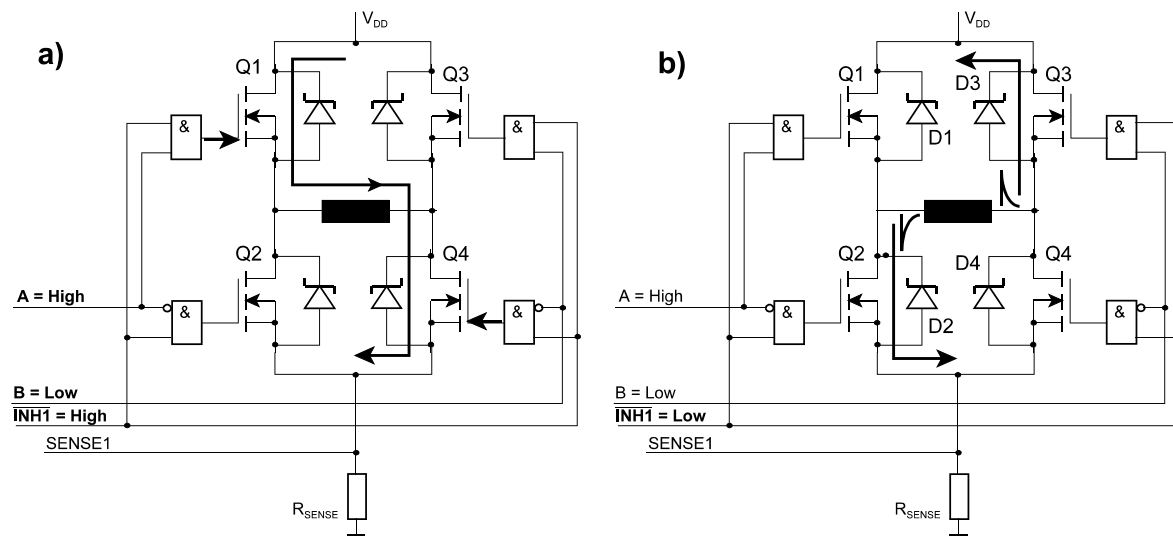


Abb. 3.12 Schnelles Abklingen des Stromflusses (Fast Decay). a) Brücke mit fließendem Strom (Beispiel). b) durch INHIB1 = Low werden alle Transistoren Q1 bis Q4 inaktiv. Die in der Wicklung gespeicherte Energie kann über die Freilaufdioden D1 und D4 schnell abfließen.

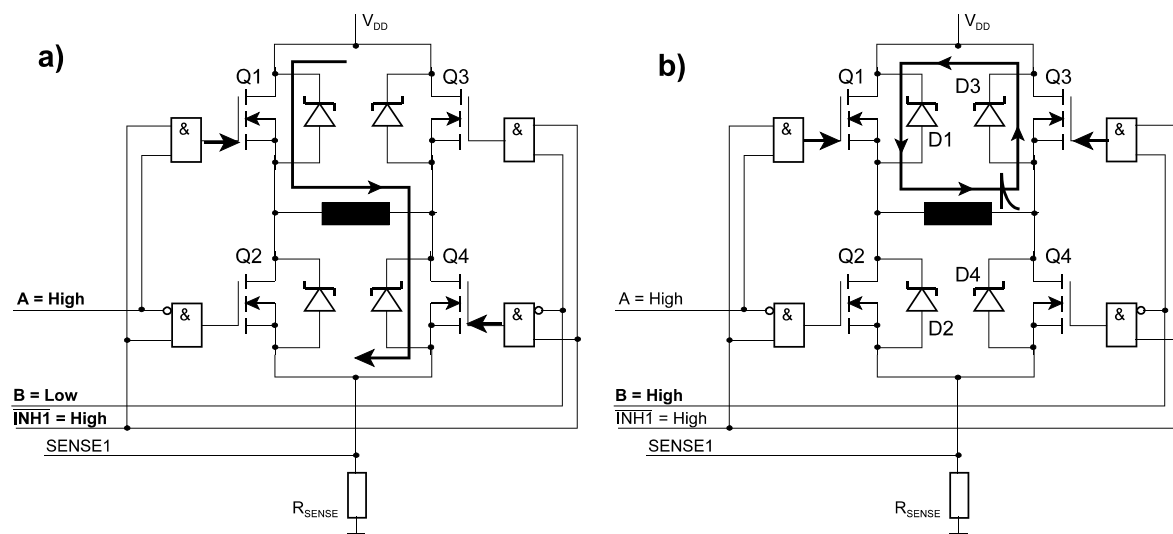


Abb. 3.13 Langsames Abklingen des Stromflusses (Slow Decay). a) Brücke mit fließendem Strom (Beispiel). b) durch A = High und B = High Low werden die oberen Transistoren Q1 und Q3 aktiv. Die in der Wicklung gespeicherte Energie führt zu einem Stromfluß über die Freilaufdiode D3 und den Transistor Q1 kann über die Freilaufdioden D1 und D4 schnell abfließen.

Beim schnellen Abklingen ist es gelegentlich ein Problem, daß der abklingende Strom über den Strommeßwiderstand (R_{SENSE}) fließt. Er führt dort zu einer Spannungsspitze (die von der Steuerung ausgeblendet werden muß). Zudem steigt dadurch die im Widerstand umgesetzte Verlustleistung¹.

Das langsame Abklingen ist mit deutlich geringeren Verlusten verbunden. Zudem treten an den Anschlüssen der Wicklungen keine negativen Spannungsspitzen auf (vgl. demgegenüber Abb. 3.12b).

1: Deshalb läßt man beim langsamen Abklingen den Strom nicht im unteren, sondern im oberen Teil der Brücke fließen.

Es kommt vor allem dann in Betracht, wenn die Schrittfrequenz vergleichsweise niedrig ist und der Motor nur wenig Energie in seinen Wicklungen speichern kann. Klingt dann der Stromfluß zu schnell ab, kann es ein, daß der Mittelwert der Stromstärke für das jeweils gewünschte Drehmoment zu gering ist¹.

Da die zweckmäßige Entscheidung von der Art des Motors und von den jeweiligen Betriebsbedingungen abhängt, bieten die Steuerschaltkreise typischerweise eine Wahlmöglichkeit (vgl. den Eingang CONTROL in Abb. 3.8).

Der Mindeststrom ist der Strom, der durch die Phase fließt, wenn die Brücke mit dem geringsten Tastverhältnis (Duty Cycle) angesteuert wird². Beim schnellen Abklingen ist er typischerweise geringer als beim langsamen (er kann bis auf Null zurückgehen; Abb. 3.14). Der Wert ist vor allem dann von Bedeutung, wenn Mikroschritte oder andere Formen der abgestuften Stromsteuerung implementiert werden sollen.

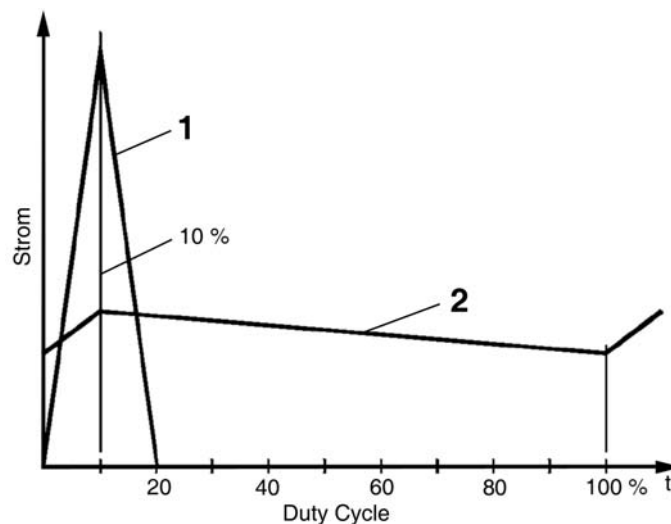


Abb. 3.14 Der Mindeststrom in verschiedenen Betriebsarten (nach ST Microelectronics). Hier bei einem Duty Cycle von 10 %. 1 - schnelles, 2 - langsames Abklingen.

Der Halbschrittbetrieb ergibt gegenüber dem Vollschrittbetrieb eine Halbierung des Schrittwinkels, mit anderen Worten, eine verdoppelte Auflösung. Ein weiterer Grund, den Halbschrittbetrieb zu wählen, besteht darin, Einbrüche im Drehmoment zu vermeiden, die aufgrund von Resonanzerscheinungen bei höheren Schrittfrequenzen auftreten können (Abb. 3.15).

Die Einbrüche des Drehmoments sind Folgen von Resonanzerscheinungen. Ob sie tatsächlich vorkommen oder nicht, hängt vom Motor und den jeweiligen Betriebsbedingungen der Mechanik (Reibung usw.) ab. Der Halbschrittbetrieb hilft gelegentlich (Versuchssache). Man braucht aber für eine bestimmte Drehgeschwindigkeit die doppelte Schrittfrequenz, und in jedem zweiten Halbschritt hat der Motor nur das halbe Drehmoment.

-
- 1: Vgl. auch Abb. 3.14. Hier ist die Fläche unter dem Stromverlauf des langsamen Abklingens offensichtlich um einiges größer als die unter dem Stromverlauf des schnellen Abklingens.
 - 2: Ist ein ausgesprochen niedriger Mindeststrom gefordert, kann es sein, daß Steuerschaltkreise mit Konstantfrequenz-PWM nicht geeignet sind, da der minimale Duty Cycle zu hoch ist.

Ein Ausweg: der Halbschrittbetrieb wird nur dann aufgenommen, wenn die Schrittfrequenz in einem kritischen Bereich liegt (vgl. die Einbrüche in Abb. 3.15a). Viele Steuerschaltkreise haben entsprechende Umschaltvorkehrungen (vgl. das Signal HALF/FULL in Abb. 3.8).

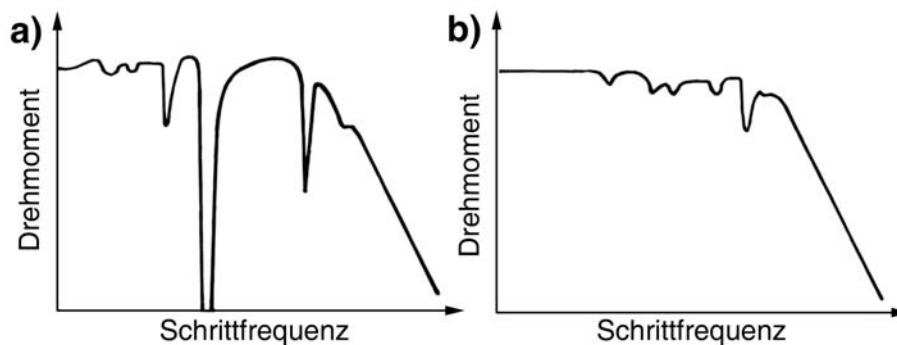


Abb. 3.15 Das Drehmoment in Abhängigkeit von der Schrittfrequenz (nach ST Microelectronics). a) Vollschrittbetrieb; b) Halbschrittbetrieb.

Stromsteuerung beim Halbschrittbetrieb. Das geringere Drehmoment bei nur einer erregten Phase kann praktisch ausgeglichen werden, wenn man die Stromstärke entsprechend (genauer: um $\sqrt{2}$) erhöht. Hierdurch wird es möglich, im Halbschrittbetrieb bis zu 95 % des Vollschritt-Drehmoments bereitzustellen (Abb. 3.16). Die Stromerhöhung kann beispielsweise über die gemäß Abb. 3.11 erregten Sperrsignale INH1, INH2 gesteuert werden. INH1 beeinflusst die Phase CD, INH2 die Phase AB (Abb. 3.17 und 3.18).

Achtung: In diesen Halbschritten den Motor nicht anhalten, sonst wird die die betreffende Phase überlastet. Ein naheliegender Ausweg: Ein zusätzliches STOP-Signal, das z. B. vom Mikrocontroller geliefert wird und die Stromerhöhung wieder aufhebt (vgl. Abb. 3.18c).

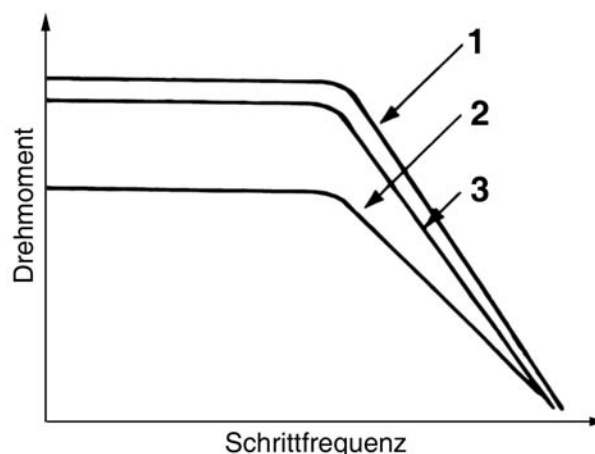


Abb. 3.16 Drehmoment und Schrittfrequenz in verschiedenen Betriebsarten (nach ST Microelectronics). 1 - Vollschrittbetrieb; 2 - Halbschrittbetrieb; 3 - Halbschrittbetrieb mit Stromsteuerung

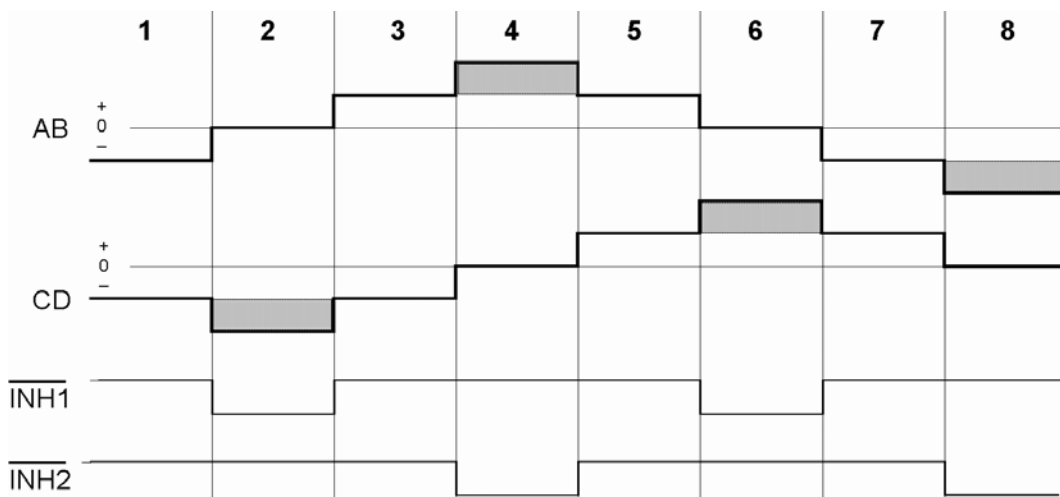


Abb. 3.17 Stromsteuerung beim Halbschrittbetrieb. Oben die Stromflüsse durch beide Phasen, darunter die Sperrsignale. Ist die Phase AB stromlos, wird die Stromstärke in der Phase CD erhöht und umgekehrt. Mit INH1 kann die Stromerhöhung in der Phase CD gesteuert werden, mit INH2 die Stromerhöhung in der Phase AB.

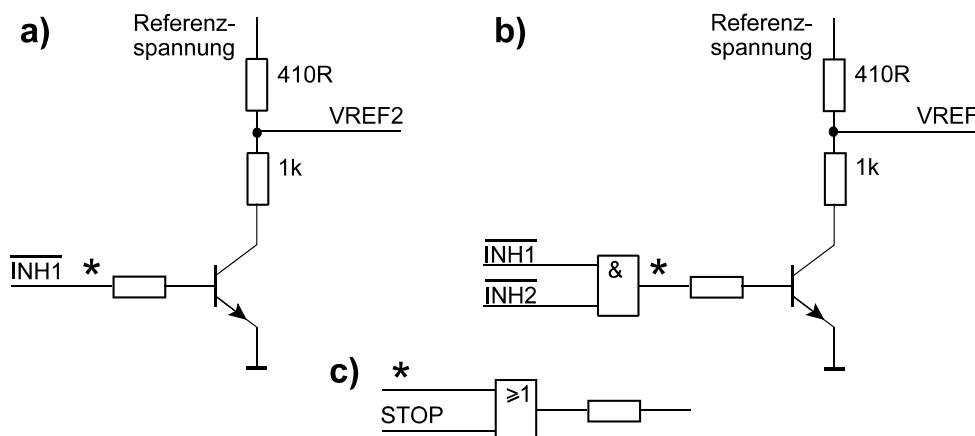


Abb. 3.18 Stromsteuerung durch Umschalten der Referenzspannung (nach ST Microelectronic). a) Schaltungsbeispiel für VREF2 (Phase CD; vgl. Abb. 3.8); b) Ausführung für Steuerschaltkreis mit gemeinsamem Referenzspannungseingang; c) Ergänzung zum Absenken des Stroms beim Anhalten des Motors. Die Referenzspannung muß das 1,41fache des VREF-Wertes haben, der der normalen Stromstärke entspricht. Ist der Transistor durchgesteuert (INH-Signal auf High), so wird der Spannungsteiler wirksam. Mit dem Teilverhältnis $1 : 1,41 = 0,71$ ergibt sich aus einer Referenzspannung von 1,41 VREF der gewünschte VREF-Pegel für die normale Stromstärke. Wird das INH-Signal Low, so wird der Transistor gesperrt, und die das 1,41fache höhere Referenzspannung liegt direkt am VREF-Anschluß des Steuerschaltkreises an (Stromerhöhung). Schaltung b) wirkt so, daß ein INH-Signal mit Low-Pegel genügt, die Stromerhöhung auszulösen (da die jeweils andere Wicklung ohnehin stromlos ist, schadet es dort nicht).

Mikroschritte. Ein Schrittmotor führt Mikroschritte aus, wenn man die durch die Phasen fließenden Ströme nicht nur ein- oder ausschaltet, sondern in definierter Weise anwachsen und abnehmen läßt. Die Genauigkeit des Mikroschritts hängt davon ab, wieviele verschiedene Stromstärken vorgesehen sind und wie genau diese eingehalten werden. Die Theorie zeigt, daß eine sinusförmige Erregung am

zweckmäßigsten ist¹. Es handelt sich dann eher um ein kontinuierliches Weiterdrehen als um ein ruckweises Weiterschalten. Diese Betriebsweise hat einige Vorteile:

- ruhigerer Lauf,
- keine Resonanzeffekte,
- Geräuschkürzung,
- Schonung der Lager und ggf. nachgeordneter Antriebsteile (z. B. Zahnräder),
- bessere Auflösung bzw. Positioniergenauigkeit.

Die sinusförmige Erregung erreicht man durch Stromsteuerung, genauer durch Beeinflussung der Referenzspannung. Für jede Wicklung wird eine Referenzspannung gebildet, deren Zeitverlauf aufeinanderfolgenden Sinushalbwellen² entspricht. Beide Referenzspannungen sind gegeneinander um 90° phasenverschoben. Für die richtige Polung sorgen die Schrittpulse (A, B, C, D), für den sinusförmigen Stromverlauf sorgt die Referenzspannung (Abb. 3.19 und 3.20).

Die Referenzspannungsverläufe werden typischerweise vom Mikrocontroller mittels Digital-Analog-Wandler erzeugt. Zumeist genügt eine Einfachlösung – die Wandlung nach dem Prinzip der Pulsweitenmodulation (1-Bit-Wandler). Hierzu braucht man zwei Zähler-Zeitgeber-Kanäle bzw. PWM-Funktionen (Abb. 3.21). Typische Praxiswerte: 32 Abtastwerte je Sinushalbwellen, 5 bis 8 Amplitudenauflosung (mehr nützt nichts). Bei höheren Schrittfrequenzen wird die Auflösung oft zurückgenommen. Soll der Motor ganz schnell drehen, ist die Ansteuerung im Vollschrittbetrieb zweckmäßiger (die Wicklungsströme haben dann ohnehin einen dreieckförmigen Verlauf, so daß die Sinus-Ansteuerung keinen Vorteil mehr bringt).

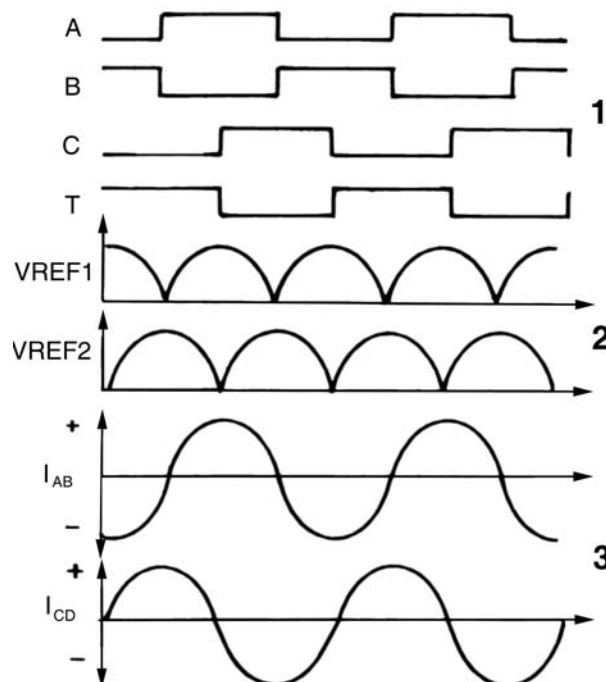


Abb. 3.19 Mikroschrittbetrieb (1). 1 - Schrittpulse; 2 - Referenzspannungen; 3 - Wicklungsströme (nach ST Microelectronics).

-
- 1: Auch die Stromerhöhung beim Halbschrittbetrieb ist eine – allerdings recht grobe – Annäherung an den sinusförmigen Verlauf.
 2: Vgl. Zweiweggleichrichtung.

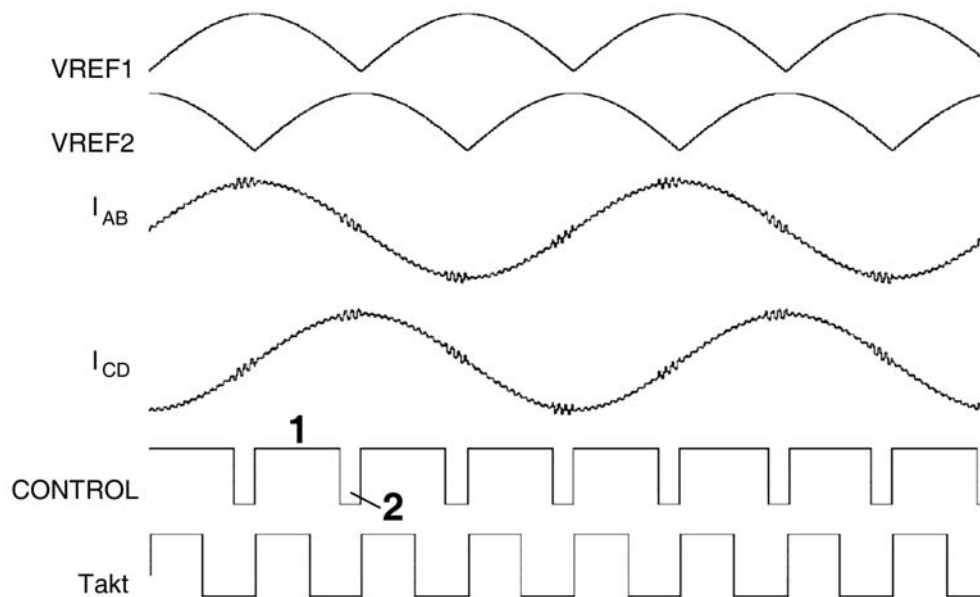


Abb. 3.20 Mikroschrittbetrieb (2). Eine Variante mit Steuerung des Abklingverhaltens (nach ST Microelectronics). 1 - langsames Abklingen (um die Verluste gering zu halten. 2 - schnelles Abklingen. Wenn der Wicklungstrom ausgeschaltet wird (fallende Flanke einer positiven oder steigende Flanke einer negativen Sinushalbwellen) dauert das Abklingen jedoch zu lange. Deshalb wird in diesen Zeitabschnitten auf schnelles Abklingen umgeschaltet.

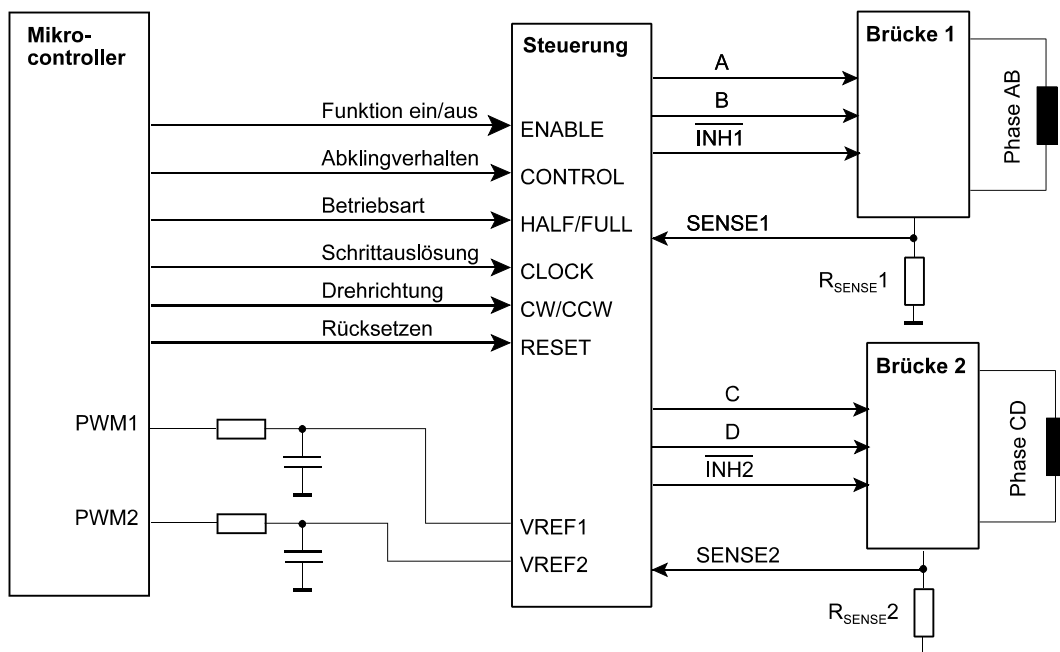


Abb. 3.21 Referenzspannungserzeugung für Mikroschrittbetrieb durch Pulsweitenmodulation (Prinzip). Die Einzelheiten hängen vom Steuerschaltkreis ab. So erfordern manche Steuerschaltkreise die Zwischenschaltung von Pufferstufen (Operationsverstärker mit direkter Rückkopplung), andere hingegen einen Spannungsteiler (um die Referenzspannung auf die jeweils spezifizierte Größenordnung zu bekommen).