

# B3 Ansteuerung von Schrittmotoren

## *Einführung*

Wird ein hoch präziser Antrieb benötigt, so werden gerne Schrittmotoren eingesetzt.

Gegenüber anderen Motoren bieten Schrittmotoren folgende Vorteile:

- Sehr exakte Positionierung und konstante Drehzahl (keine Schrittfehler falls sie nicht überlastet werden)
- Haltemoment in der Ruhelage
- Preiswert bei hoher Genauigkeit.
- Von einigen Milliwatt bis zu einem Kilowatt wirtschaftlich einsetzbar.
- Treiber können im Aufbau einfach gehalten werden. Dadurch ist die Ansteuerelektronik preiswert.
- Es ist eine direkte digitale Steuerung mittels Controller möglich.

Man findet heute Schrittmotoren in fast allen Geräten, wo eine präzise Positionierung nötig ist. Dies sind zum Beispiel Diskettenlaufwerke, alten Festplatten, Faxgeräte, Scanner, Drucker, CD-Playern, computergesteuerten Werkzeugmaschinen (CNC)<sup>6</sup>, Roboter und Kraftfahrzeuge. In heutigen Kraftfahrzeugen der mittleren und gehobenen Kategorie sind bis über 50 Schrittmotoren im Einsatz!

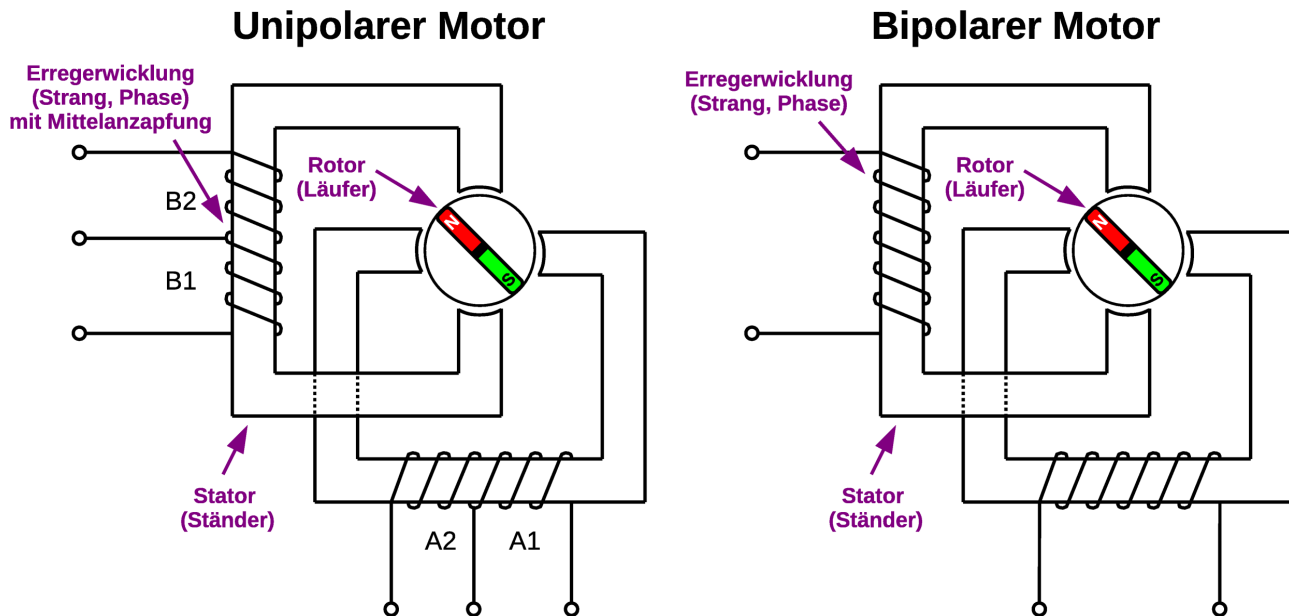
## *Aufbau des Motors*

Ein Schrittmotor besteht aus einem feststehenden Stator (Ständer) und einem darin drehenden Rotor (Läufer). Beim Schrittmotor befinden sich nur im Stator Spulen. Der Rotor besteht aus einem oder mehreren Permanentmagneten.

Da sich der Rotor immer so dreht, dass sich der größtmögliche magnetische Fluss ausbildet entsteht ein Drehmoment wenn die Magnetfelder im Stator und Rotor unterschiedlich ausgerichtet sind. Durch gezieltes Ein- und Ausschalten einzelner Wicklungen lässt sich so eine Drehbewegung erzeugen, wobei sich sehr einfach Drehsinn und Drehzahl des Motors steuern lassen.

---

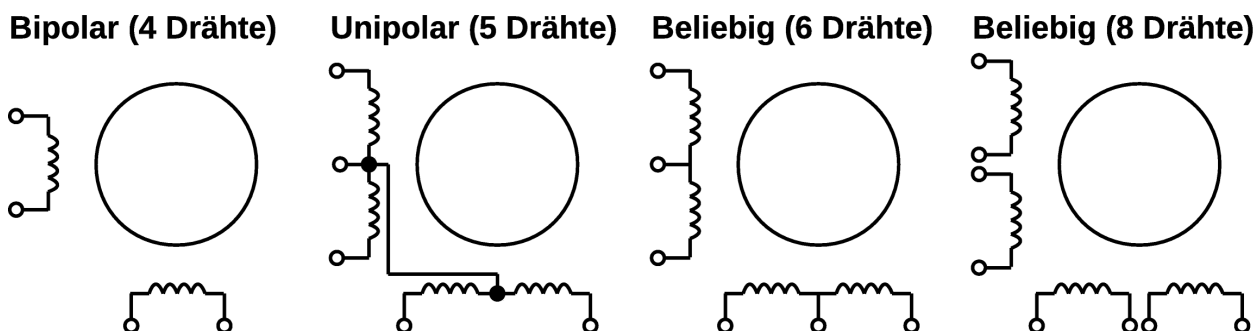
<sup>6</sup> aus Wikipedia: **CNC** (*Computerized Numerical Control*) ist eine elektronische Methode zur Steuerung und Regelung von Werkzeugmaschinen (CNC-Maschinen), bzw. die dafür eingesetzten Geräte (Controller, Computer).



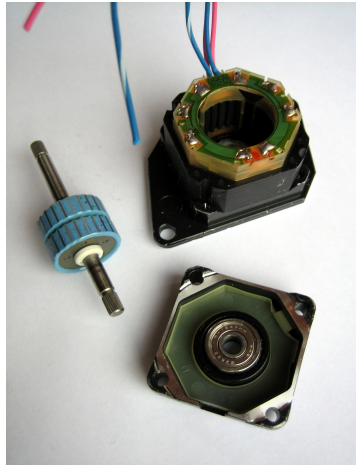
Es gibt zwei verschiedene Schrittmotormodelle.

Der **unipolare Schrittmotor** mit zwei Spulen mit Mittelanzapfung, der mit einer fest angelegten Spannung auskommt. Unipolare Motoren haben fünf oder sechs Anschlüsse. Mit einem Ohmmeter kann man schnell feststellen, wo sich die Mittenabgriffe befinden. Der Unipolarmotor mit 6 Anschlüssen kann auch bipolar angesteuert werden.

Der **bipolare Schrittmotor** mit zwei oder vier Spulen, bei dem die Spannung ständig umgepolt werden muss. Sind vier Spulen (2 Spulenpaare, acht Anschlüsse) vorhanden, so können je zwei Spulen parallel oder in Reihe geschaltet werden. Die Parallelschaltung erhöht das Drehmoment. Dadurch verdoppelt sich allerdings auch der zu liefernde Strom. Bipolare Motoren mit 8 Anschlüssen können natürlich auch unipolar angesteuert werden.



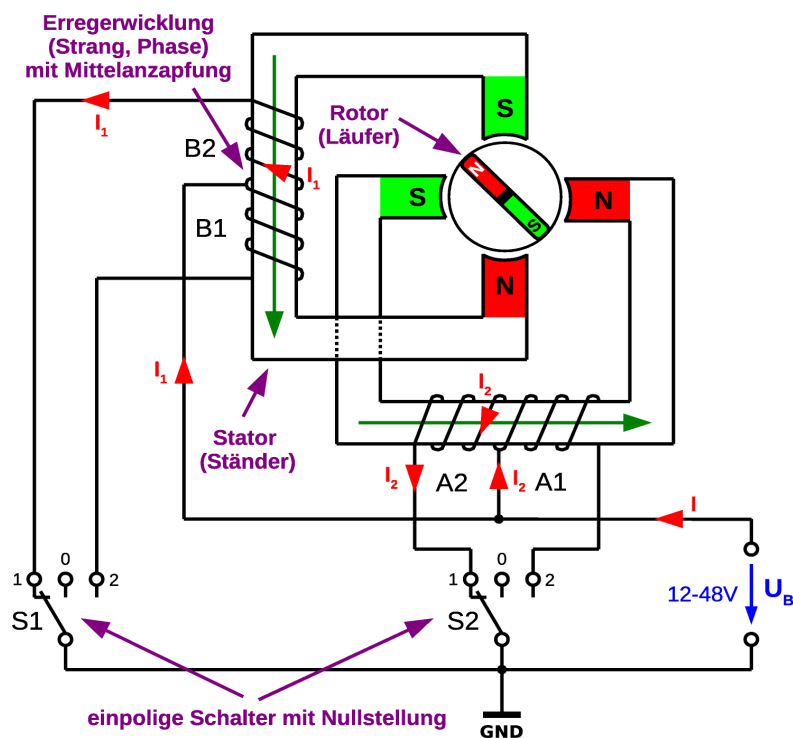
Heute werden vorwiegend Hybrid-Schrittmotor verwendet. Der Hybrid-Schrittmotor vereint die Vorzüge des Reluktanz-Schrittmotor mit dem des Permanentmagnet-Schrittmotors. Sein Rotor besteht aus einem axialen Permanentmagneten, an dessen Enden gezahnte Kappen befestigt sind. Diese sind um eine halbe Zahnbreite gegeneinander versetzt, so das sich Nord- und Südpole abwechseln. Der Vorteil des Hybrid-Schrittmotors ist das hohe Drehmoment und der genaue Schrittwinkel.



## Ansteuerungsarten und Betriebsarten

### Unipolarbetrieb (unipolare Ansteuerung)

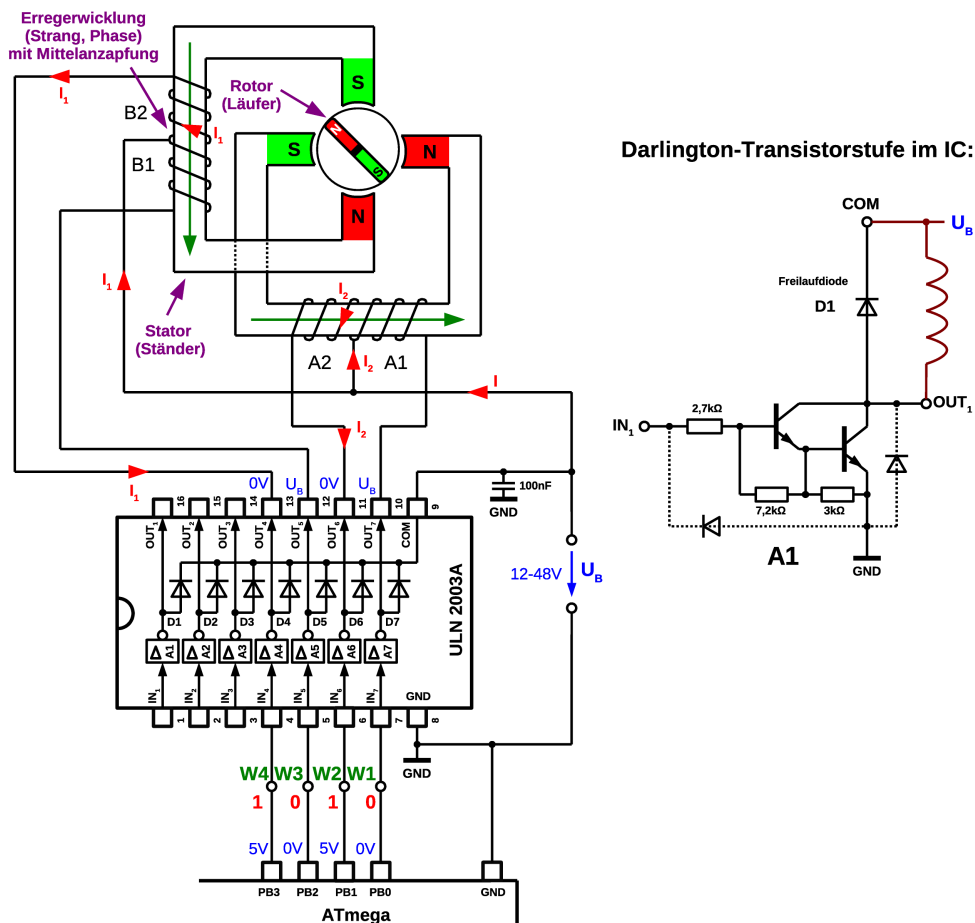
Die Bezeichnung Unipolarbetrieb kommt, von den bei dieser Ansteuerung eingesetzten, unipolaren (einpolgigen) Wechselschaltern. Der Unipolarbetrieb ist nur möglich wenn jede Erregerwicklung (Strang, Phase) eine Mittelanzapfung besitzt. Es wird immer nur eine der beiden Hälften der Erregerwicklung vom Strom durchflossen. Diese bestimmt dann die Polarität.



Schrittmotoren mit Mittelanzapfung werden als unipolare Schrittmotoren bezeichnet. Sie besitzen sechs bzw. mindestens fünf<sup>7</sup> Anschlussdrähte. Die Mittelanzapfung der Wicklungen wird fest mit der Betriebsspannung (meist zwischen 12 V und 48 V) verbunden. Die Wicklungsenden werden mittels Schalter mit Masse verbunden. Der Verlauf der Feldlinien (grün) bzw. die Pole lassen sich mit der Spulenregel<sup>8</sup> bestimmen.

Durch die Einfachheit der Ansteuerung wurde die unipolare Steuerung früher bevorzugt. Da aber jeweils nur eine Hälfte der Wicklung genutzt wird ist das Drehmoment geringer als bei der bipolaren Ansteuerung.

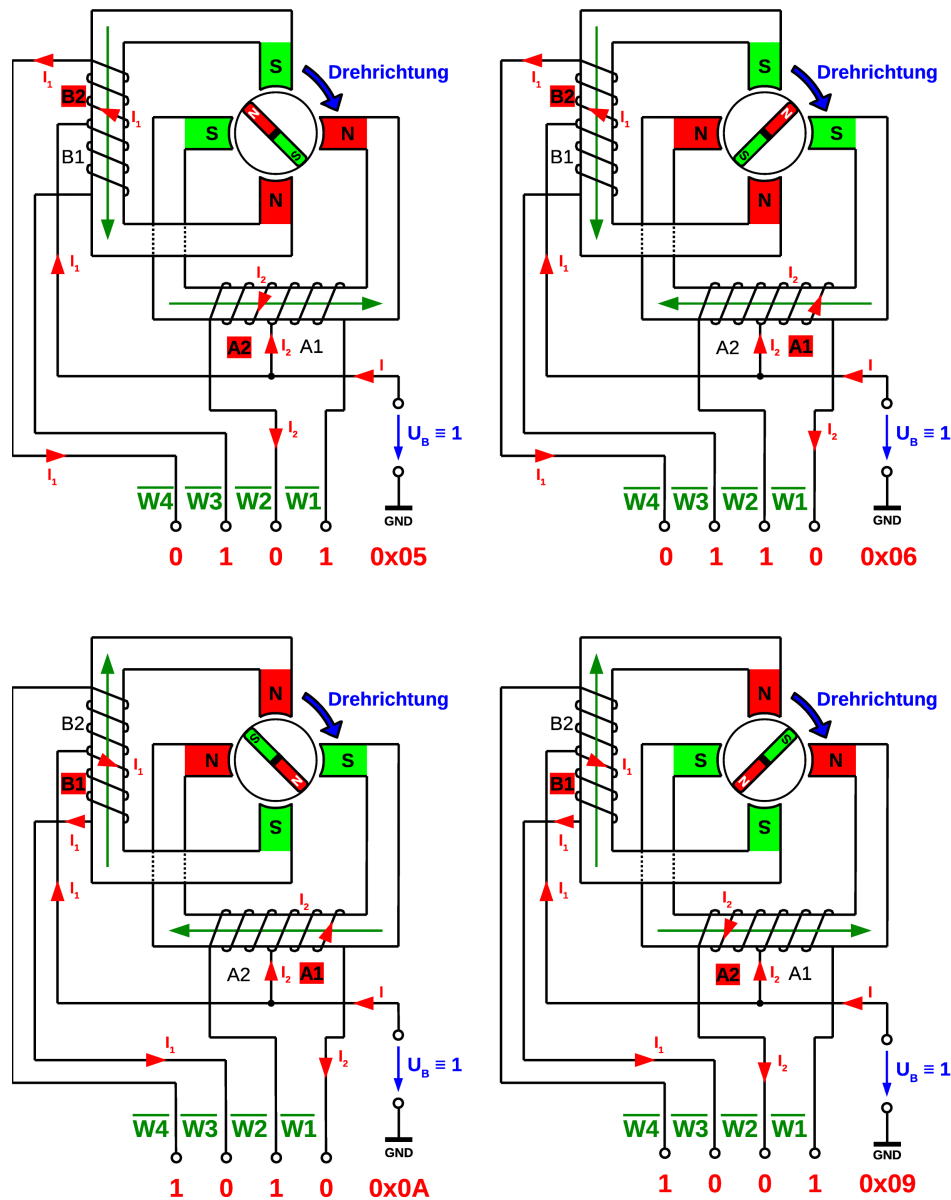
Bei der Ansteuerung mit dem Mikrocontroller werden elektronische Schalter (Transistoren) verwendet. Für Motoren bis 0,5 A kann die Ansteuerung sehr leicht mit dem IC ULN 2003A erfolgen. In ihm sind sieben invertierende Darlington-Transistorstufen (Emitterschaltung) inklusive der nötigen Freilaufdiode<sup>9</sup> integriert. Die Widerstände sind so gewählt, dass die Stufe mit 5 V angesteuert werden kann.



7 Wenn beide Mittelanzapfungen bereits im Motor miteinander verbunden sind!

8 Legt man die rechte Hand so um eine Spule, dass die Finger in Stromrichtung zeigen, so zeigt der abgespreizte Daumen zum Nordpol der Spule.

9 Die Freilaufdiode (catch diode) dient zum Schutz der Transistoren vor zu hohen induzierten Spannungen beim Abschalten einer induktiven Last.



Damit der Motor nach rechts dreht muss der Controller die im folgenden Bild erarbeitete Sequenz senden. Um die Übersichtlichkeit zu steigern wurde die invertierende Stufe weggelassen. Da ja alle Anschlüsse invertiert werden, ändert sich nichts an der Drehrichtung, wenn wir die invertierten Werte senden würden. Die Sequenz ist nur verschoben. Um die Drehrichtung zu ändern muss die Sequenz rückwärts durchlaufen werden.

|         |                 |                 |                 |                 | Steuerbyte | Buchsenbezeichnung |    |    |    | Steuerbyte |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|--------------------|----|----|----|------------|
| Schritt | $\overline{W4}$ | $\overline{W3}$ | $\overline{W2}$ | $\overline{W1}$ |            | W4                 | W3 | W2 | W1 |            |
| 1       | 0               | 1               | 0               | 1               | 0x05       | 1                  | 0  | 1  | 0  | 0x0A       |
| 2       | 0               | 1               | 1               | 0               | 0x06       | 1                  | 0  | 0  | 1  | 0x09       |
| 3       | 1               | 0               | 1               | 0               | 0x0A       | 0                  | 1  | 0  | 1  | 0x05       |
| 4       | 1               | 0               | 0               | 1               | 0x09       | 0                  | 1  | 1  | 0  | 0x06       |

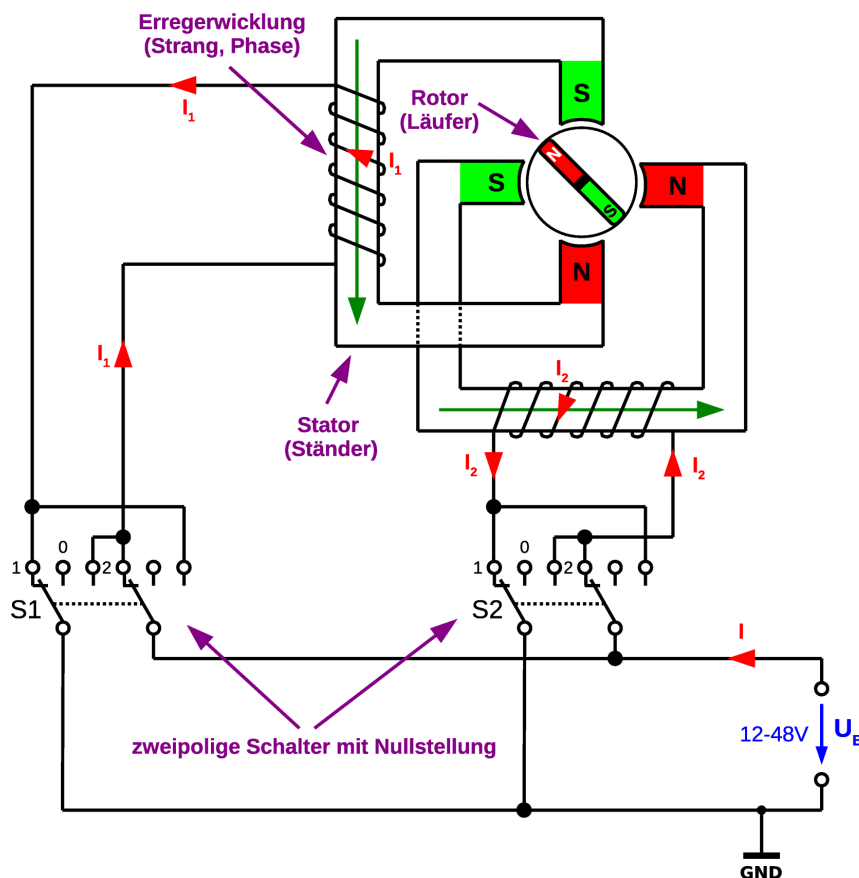
Der Schrittmotor dreht bei jeder Umpolung der Spulen um einen bestimmten Winkel weiter. Dieser Winkel wird auch als "Schritt" bezeichnet, was dem Motor seinen Namen verlieh.

Erfolgt die Umschaltung schnell genug, dann geht der Rotor in eine Drehbewegung über. Die Ansteuerung darf allerdings dabei nicht zu schnell erfolgen, so dass die maximale Drehgeschwindigkeit des Motors nicht überschritten wird. Tritt dieser Fall auf, so stottert der Motor.

## **Bipolarbetrieb (bipolare Ansteuerung)**

Werden beide Spulen vollständig umgepolt um die Stromrichtung in der Phase zu verändern, so spricht man vom Bipolarbetrieb. Die Spulen für diesen Betrieb brauchen keine Mittelanzapfung.

Für den Bipolarbetrieb sind zweipolige Umschalter erforderlich! Der Schaltungsaufwand ist größer. **Die Bezeichnung Bipolarbetrieb kommt von den bei dieser Ansteuerung eingesetzten bipolaren (zweipoligen) Wechselschaltern.**

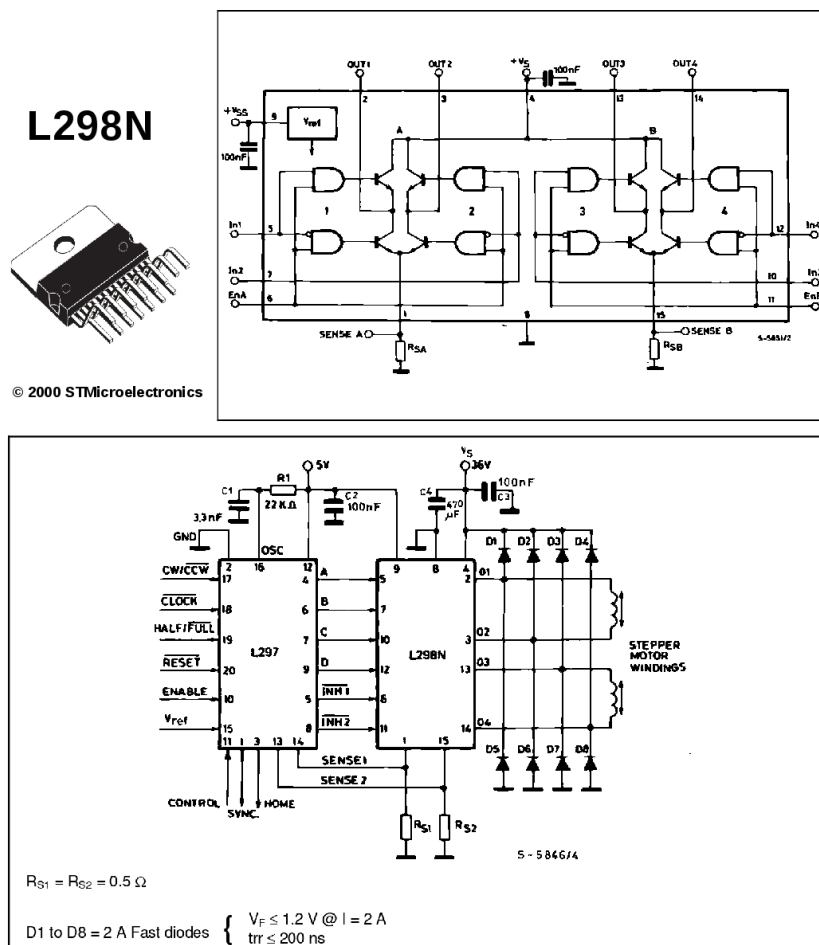


Mit dem Aufkommen preiswerter, integrierter Schaltungen begann sich die bipolare Ansteuertechnik mehr und mehr durchzusetzen. Für die Ansteuerung des bipolaren Motors sind je zwei Vollbrücken mit 4 Transistoren erforderlich.

Die einfachste und preiswerteste Ansteuerung eines Schrittmotors ist die Ansteuerung mit konstanter Spannung (L/R-Drive, siehe Unipolarbetrieb). Die Spannung wird so gewählt, dass bei Motorstillstand gerade der erlaubte Nennstrom fließt (Gleichstrombetrieb, der Strom errechnet sich aus dem Spulenwiderstand). Damit ist allerdings das Drehmoment und die maximale Drehzahl begrenzt. Außerdem treten beim Stillstand hohe Verluste auf. Für Motoren bis 0,6 A kann diese Ansteuerung leicht mit dem IC L293D erfolgen. Die Leerlaufdioden sind schon mit integriert.

Durch die Induktivität der Ständerspulen wird eine Gegeninduktivität erzeugt, die umso höher ist, desto größer die Drehzahl (Umschaltgeschwindigkeit, Frequenz). Die Gegeninduktivität bewirkt, dass der Strom nicht mehr auf seinen Maximalwert ansteigen kann. Das maximale Drehmoment und die maximale Drehzahl werden nicht erreicht. Eine stromgeregelte Steuerung (sogenannter Chopperbetrieb) kann diesen Effekt vermeiden. Dazu wird eine viel höhere Spannung angelegt und mittels Shuntwiderständen (*sense*) der Strom gemessen. Je nach Stromstärke wird die Spannung dann zu oder abgeschaltet.

Heute werden alle Schrittmotoren, die etwas Leistung bringen müssen so angesteuert. Zwei integrierte Schaltkreise L298N und L297 erleichtern diese Ansteuerung ungemein.



Beim Bipolarbetrieb sind die Steuersequenzen die gleichen wie beim Unipolarbetrieb!

## Vorteile und Nachteile des Bipolarbetriebes:

Weil im Bipolarbetrieb die gesamte Wicklung eines Stranges ausgenutzt wird, ist das Drehmoment höher als im Unipolarbetrieb. Der Bipolarmotor ist preiswerter als der Unipolarmotor, jedoch erfordert der Antrieb eine aufwendigere Ansteuerelektronik, weil zwei Umschalter (Vollbrücke mit 4 Transistoren) je Strang benötigt werden.

## Betriebsarten (Schrittarten)

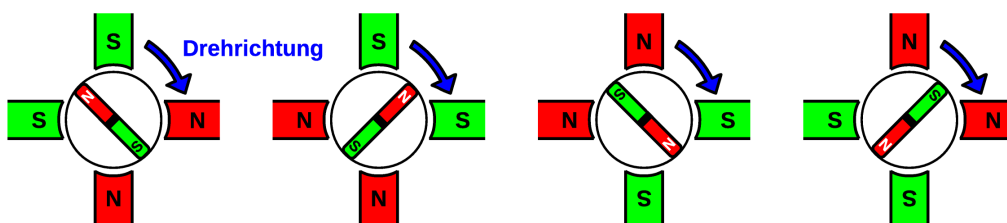
Es gibt 4 sinnvolle Möglichkeiten das Drehfeld in einem Schrittmotor zu erzeugen:

- **Wave Drive:** Ansteuern von jeweils einer Spule (*one phase on*)
- **Normal Mode:** Ansteuern von zwei Spulen gleichzeitig (*full step drive, two phase on*)
- **Half Stepping:** Halbschrittbetrieb, eine Kombination der beiden oberen Möglichkeiten.
- **Microstepping:** Mikro-Schritte können erzeugt werden, wenn man den Strom in den zwei Wicklungen entsprechend einer Sinus- und Kosinus-Funktionen fließen lässt. Dieser Modus wird nur verwendet, wenn eine sehr kleine Schrittweite, sehr wenig Vibrationen oder sehr geringer Lärm erfordert sind.

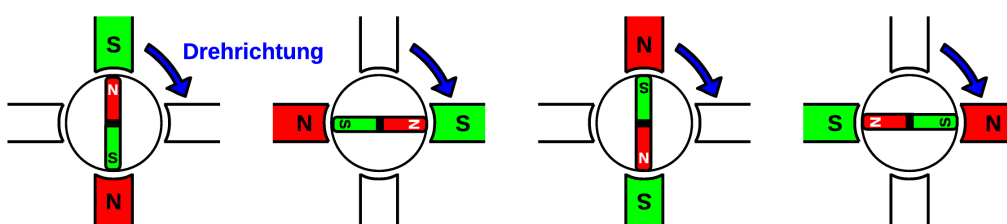
## Vollschrittbetrieb.

Bei einem Schrittmotor mit 90° Schrittwinkel sind 4 Vollschritte für eine Umdrehung erforderlich. Hierzu kann entweder nur eine Phase (*Wave Drive*) angesteuert werden, oder es können 2 Phasen gleichzeitig aktiv sein (*Normal Mode*).

### Normal Mode



### Wave Drive



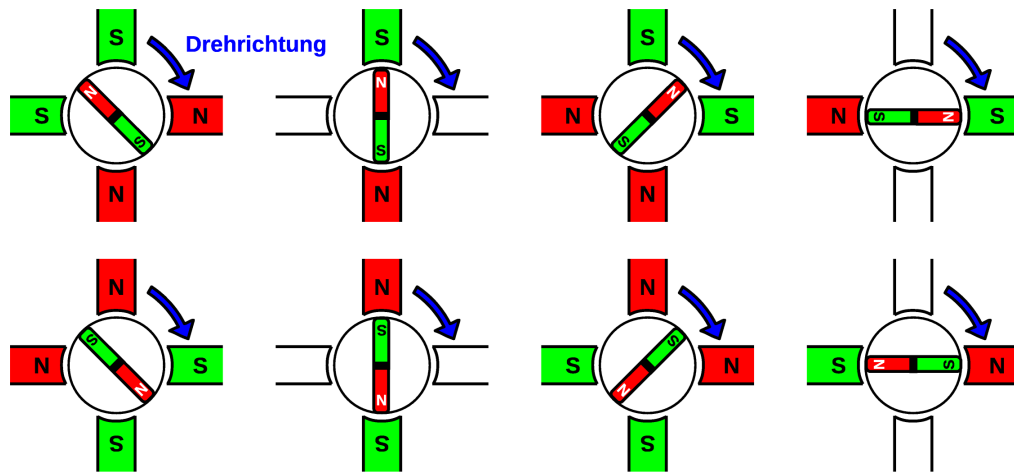


Die Bezeichnung Normal Mode deutet darauf hin, dass diese Methode die gebräuchlichste Art der Ansteuerung ist. Sie erlaubt ein höheres Drehmoment bei gleich großen Phasenströmen oder dasselbe Drehmoment bei kleineren Phasenströmen!

## Halbschrittbetrieb

Die Kombination von beiden zuvor genannten Möglichkeiten führt zum Halbschrittbetrieb. Die Motorphasen werden so geschaltet, dass der Rotor abwechselnd eine Vollschriftstellung und danach eine Zwischenstellung oder Halbschrittstellung annimmt. Damit hat man auf einfache Weise die Auflösung eines gegebenen Motors verdoppelt. Für eine volle Umdrehung sind also acht Schritte erforderlich.

### Half Stepping



Hält man die Phasenströme unabhängig von der momentanen Position konstant, wird in einer Stellung, in der beide Phasen bestromt sind, das Drehmoment höher sein. Ohne weitere Maßnahmen wird der Motor einen harten und danach einen weichen Schritt ausführen, also fühlbar unrund laufen.

Die Steuersequenzen zur Ansteuerung von Bipolar- und Unipolarmotor unterscheiden sich nicht!

## *Wichtige Kenngrößen beim Schrittmotor*

**Phasenzahl:** Schrittmotoren mit ein bis fünf Phasen (Spulen) sind gebräuchlich. Üblich ist der der 2-Phasenmotor.

**Schrittwinkel:** Je Steuerimpuls dreht sich der Rotor um den Schrittwinkel. Sind die **Ständerphasenzahl m** und die **Polpaarzahl p** des Läufers bekannt, so lässt sich der Schrittwinkel errechnen mit:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2pm}$$

m = Strangzahl (Phasenz.) des Ständers

p = Polpaarzahl des Läufers

Mit zwei Spulen (m = 2, 2-Phasenmotoren) im Ständer und einer heute üblichen Polpaarzahl von p = 50 erreicht man Auflösungen im Vollschrittbetrieb von 1,8° und 0,9° im Halbschrittbetrieb (200 bzw. 400 Vollschritte pro Umdrehung). Mit geringem Schrittwinkel kann eine Position genauer anfahren werden. Der Motor läuft ruhiger und leiser. Mit großem Schrittwinkel können höhere Drehzahlen erreicht werden. Es ist darauf zu achten ob die Herstellerangaben sich auf Vollschritt oder Halbschrittbetrieb beziehen!

**Nennstrom:** (Phasenstrom) Der maximal zulässige Strom im Dauerbetrieb pro Wicklung (Phase). Bei Motorstillstand soll eine Stromabsenkung vorgenommen werden, um den Motor nicht unnötig thermisch zu belasten.

**Nennspannung:** Spannung, welche im Stillstand angelegt werden muss, damit der Nennstrom fließt. Wird mit konstantem Strom angesteuert, so ist die angelegte Spannung wesentlich höher als die Nennspannung.

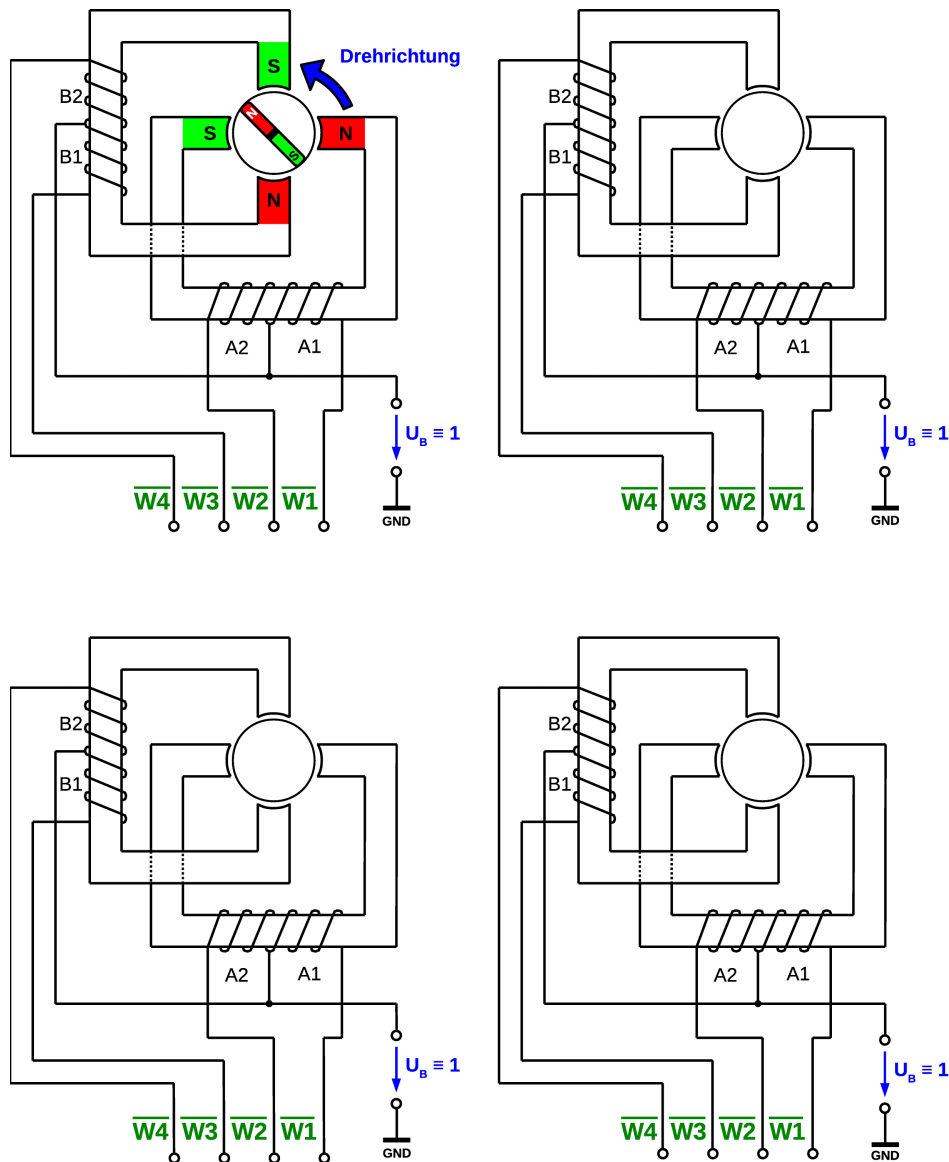
**Haltemoment:** Bis zu diesem Drehmoment kann ein Schrittmotor im Stillstand (volle Betriebsspannung) belastet werden, ohne dass er sich durch die Belastung dreht.

**Drehmoment:** Maximales Moment bei einer bestimmten Drehzahl. Meist aus einer Kennlinie ablesbar.

# Aufgaben

- B300** Der dargestellte Schrittmotor soll im Normal Mode (Linkslauf) angesteuert werden. Trage für jeden Schritt den Strom  $I$  sowie die Polarität des Magnetfeldes im Stator und im Rotor ein. Ergänze die beigegefügte Tabelle.

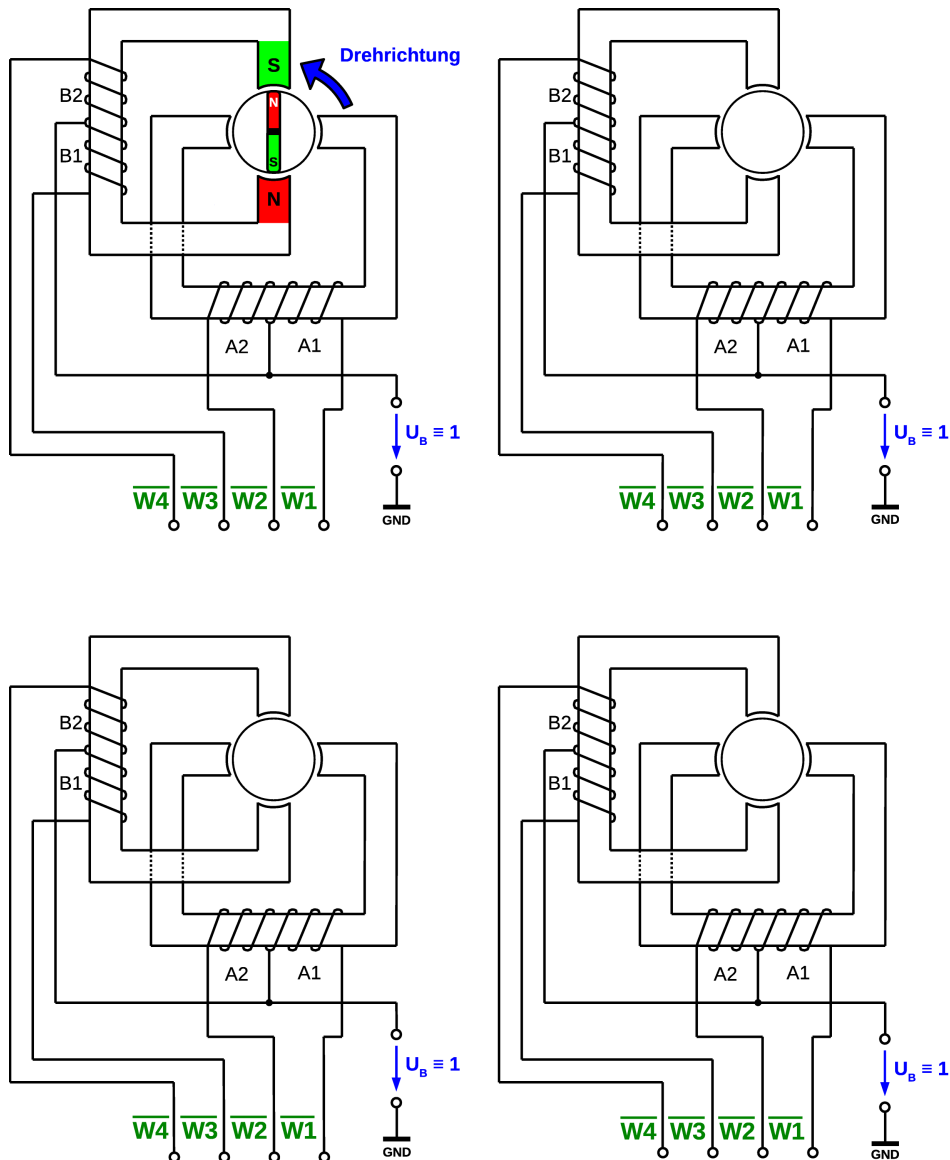
## Vollschrittbetrieb (Normal Mode)



|         |                 |                 |                 |                 | Steuerbyte | Buchsenbezeichnung |    |    |    | Steuerbyte |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|--------------------|----|----|----|------------|
| Schritt | $\overline{W4}$ | $\overline{W3}$ | $\overline{W2}$ | $\overline{W1}$ |            | W4                 | W3 | W2 | W1 |            |
| 1       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 2       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 3       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 4       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |

- B301** Der dargestellte Schrittmotor soll im Wave Drive (Linkslauf) angesteuert werden. Trage für jeden Schritt den Strom  $I$  sowie die Polarität des Magnetfeldes im Stator und im Rotor ein. Ergänze die beigeefügte Tabelle.

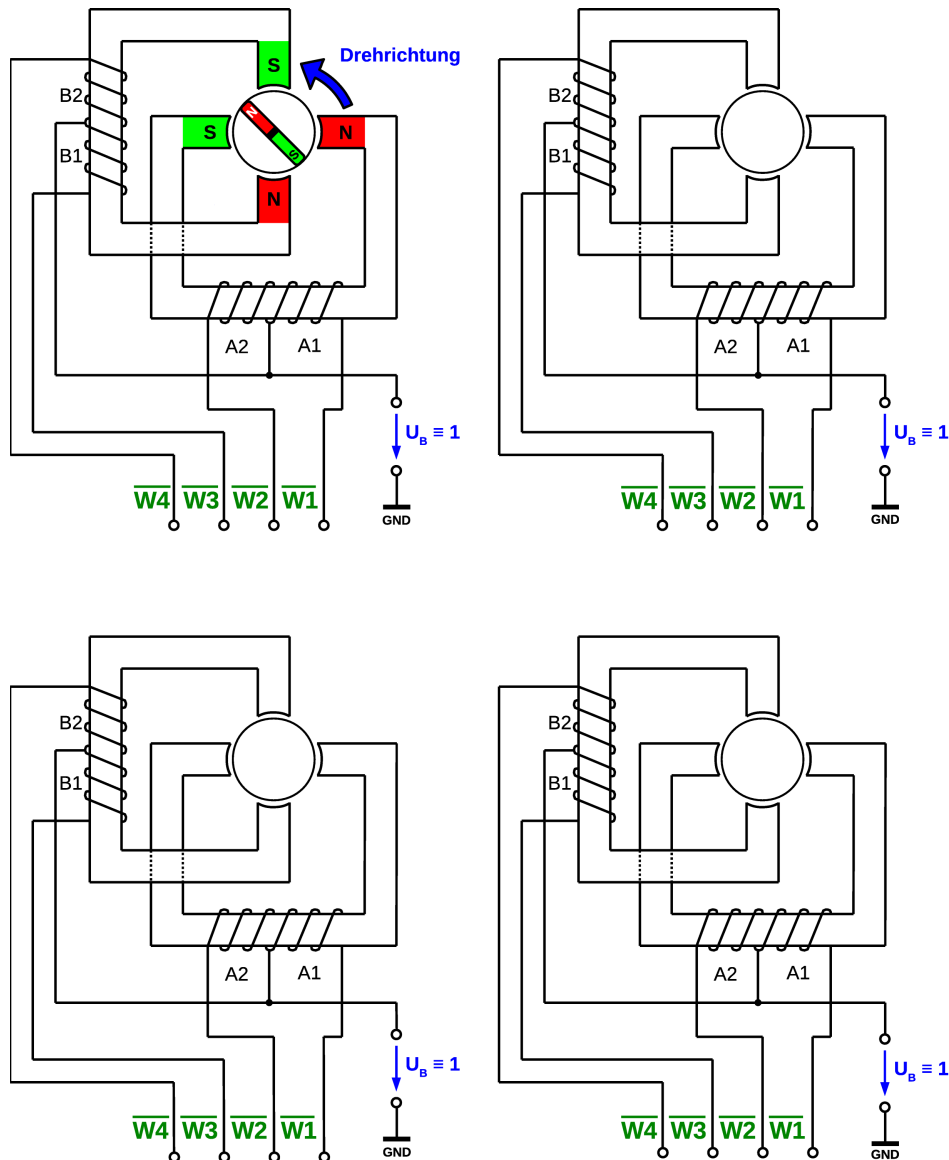
## Vollschrittbetrieb (Wave Drive)



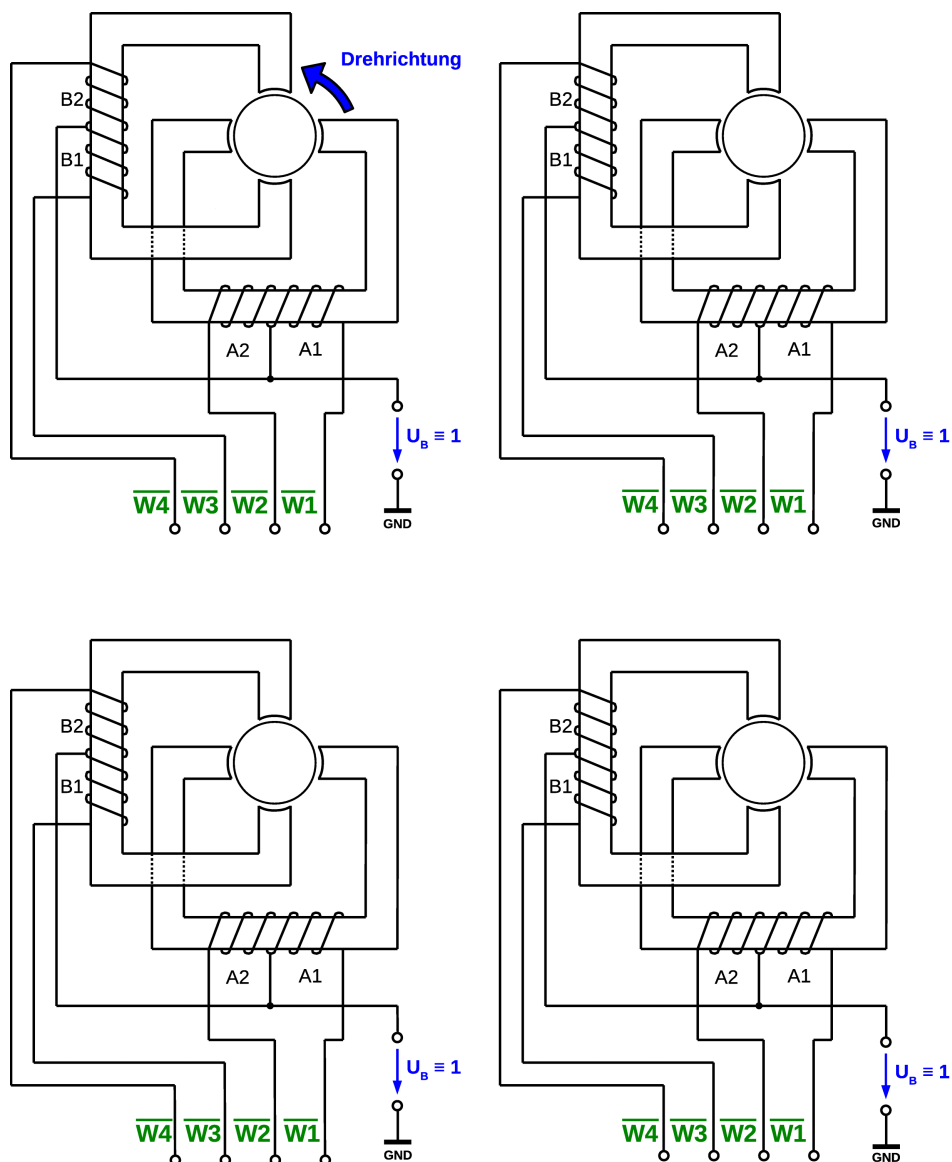
|         |                 |                 |                 |                 | Steuerbyte | Buchsenbezeichnung |    |    |    | Steuerbyte |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|--------------------|----|----|----|------------|
| Schritt | $\overline{W4}$ | $\overline{W3}$ | $\overline{W2}$ | $\overline{W1}$ |            | W4                 | W3 | W2 | W1 |            |
| 1       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 2       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 3       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 4       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |

- B302** Der dargestellte Schrittmotor soll im Halbschrittbetrieb (Linkslauf) angesteuert werden. Trage für jeden Schritt den Strom  $I$  sowie die Polarität des Magnetfeldes im Stator und im Rotor ein. Ergänze die beigeefügte Tabelle.


## Halbschrittbetrieb (Half Stepping)



|         |                 |                 |                 |                 | Steuerbyte | Buchsenbezeichnung |    |    |    | Steuerbyte |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|--------------------|----|----|----|------------|
| Schritt | $\overline{W4}$ | $\overline{W3}$ | $\overline{W2}$ | $\overline{W1}$ |            | W4                 | W3 | W2 | W1 |            |
| 1       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 2       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 3       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 4       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |



|         |                 |                 |                 |                 | Steuerbyte | Buchsenbezeichnung |    |    |    | Steuerbyte |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|--------------------|----|----|----|------------|
| Schritt | $\overline{W4}$ | $\overline{W3}$ | $\overline{W2}$ | $\overline{W1}$ |            | W4                 | W3 | W2 | W1 |            |
| 5       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 6       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 7       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |
| 8       |                 |                 |                 |                 |            |                    |    |    |    |            |

-  **B303** Die erstellten Tabellen sollen jetzt getestet werden. Dazu werden drei Schalter verwendet. Schalter S0 dient als Ein/Ausschalter. **Im Aus-Zustand muss der Motor stromlos sein.** Mit den Schalter S1 und S2 kann zwischen den vier folgenden Tabellen ausgewählt werden:

**FTab1** Normal Mode Rechtslauf

**FTab2** Normal Mode Linkslauf

**FTab3** Wave Drive Linkslauf


**FTab4** Half Stepping Linkslauf

Die jeweilige Tabelle wird einmal ganz durchlaufen bevor die Schalter wieder überprüft werden. Zwischen jedem Schritt ist eine Wartezeit 20 ms vorzusehen.


- Zeichne ein Flussdiagramm.
- Schreibe das zum Flussdiagramm passende kommentierte Assembler-Programm und nenne es "**B303\_stepper\_motor\_1.asm**".
- Verkleinere schrittweise die Zeitschleife und ermittle so die maximale Drehzahl des Motors.

### Hinweis:


Steht kein Schrittmotor zur Verfügung, oder soll die Lösung optisch kontrolliert werden, so erhöht man einfach die Zeitschleife (1 s) und gibt die Signale an den LEDs aus.

-  **B304** Die vorige Aufgabe soll nun mit nur einziger Tabelle (Half Stepping) realisiert werden. Dazu wird beim für Vollschrittbetrieb einfach immer nur der zweite Wert gewählt. Zum Ändern der Drehrichtung wird die Tabelle rückwärts abgefragt.

- Zeichne ein Flussdiagramm.
- Schreibe das zum Flussdiagramm passende kommentierte Assembler-Programm und nenne es "**B304\_stepper\_motor\_2.asm**".

-  **B305** Verändere die vorige Aufgabe, so dass das Stoppen des Motors nach jedem beliebigen Schritt möglich ist.

- Zeichne ein Flussdiagramm.
- Schreibe das zum Flussdiagramm passende kommentierte Assembler-Programm und nenne es "**B305\_stepper\_motor\_3.asm**".

-  **B306** Mit Hilfe von zwei Schaltern S0 (Bitstelle  $2^0$ ) und S1 (Bitstelle  $2^1$ ) muss das folgende Betriebsverhalten eines Schrittmotors (Vollschrittbetrieb, Rechtslauf) eingestellt werden können:

Der Schalter S0 ist der Einschalter . S0 = 0 schaltet den Motor vollständig aus. Der Motor muss dann stromlos sein .

Mit S1 kann man zwischen zwei verschiedenen Geschwindigkeiten umschalten.

S1 = 0 Normale Geschwindigkeit (Wartezeit zwischen den Schritten 200ms)

S1 = 1 Schnelle Geschwindigkeit (Wartezeit zwischen den Schritten 100ms)

**Das Stoppen des Motors darf nur bei der niedrigen Drehgeschwindigkeit möglich sein, d.h. zuerst muss S1 auf 0 gesetzt werden; ein erneutes Starten kann dann auch nur mit der niedrigen Drehgeschwindigkeit erfolgen.**

Änderungen der Betriebsbedingungen brauchen erst an einem Zyklusende erfasst und ausgewertet zu werden.

- a) Erstelle ein detailliertes Flussdiagramm.
- b) Schreibe den zum Flussdiagramm passenden Quellcode in AVR-Assembler und kommentiere ihn sinnvoll.  
Nenne das Programm "B306\_stepper\_motor\_4.asm".