



Schrittmotor

Version: 0.0.2
Datum: 11.12.2011
Autor: Werner Dichler

Inhalt

Inhalt.....	2
Grundaufbau.....	3
Reluktanz-Schrittmotor	4
Permanentmagnet-Schrittmotor	5
Hybrid-Schrittmotor	6
Datenblatt Angaben.....	7
Ansteuerung von 2-Phasen-Schrittmotoren	8
Anschlüsse.....	8
Unipolar.....	8
Bipolar	9
Schrittmoden	11
Treiber IC	13
Beispiel.....	15
Verwendeter Motor	15
Simulation	15
Drehmoment-/Leistungs-Messung	19
Messung mit DC-Motor	19
Literatur.....	22

Grundaufbau

Der Rotor des Schrittmotors folgt dem außen anliegenden Feld, welches am Stator generiert wird. Der Stator ist grundsätzlich bei allen Typen gleich aufgebaut. Er besteht aus mehreren Spulen mit einem weichmagnetischen Eisenkern, welche für die Generierung des magnetischen Feldes zuständig sind. Die beweglichen Rotoren sind je nach Typ unterschiedlich aufgebaut.

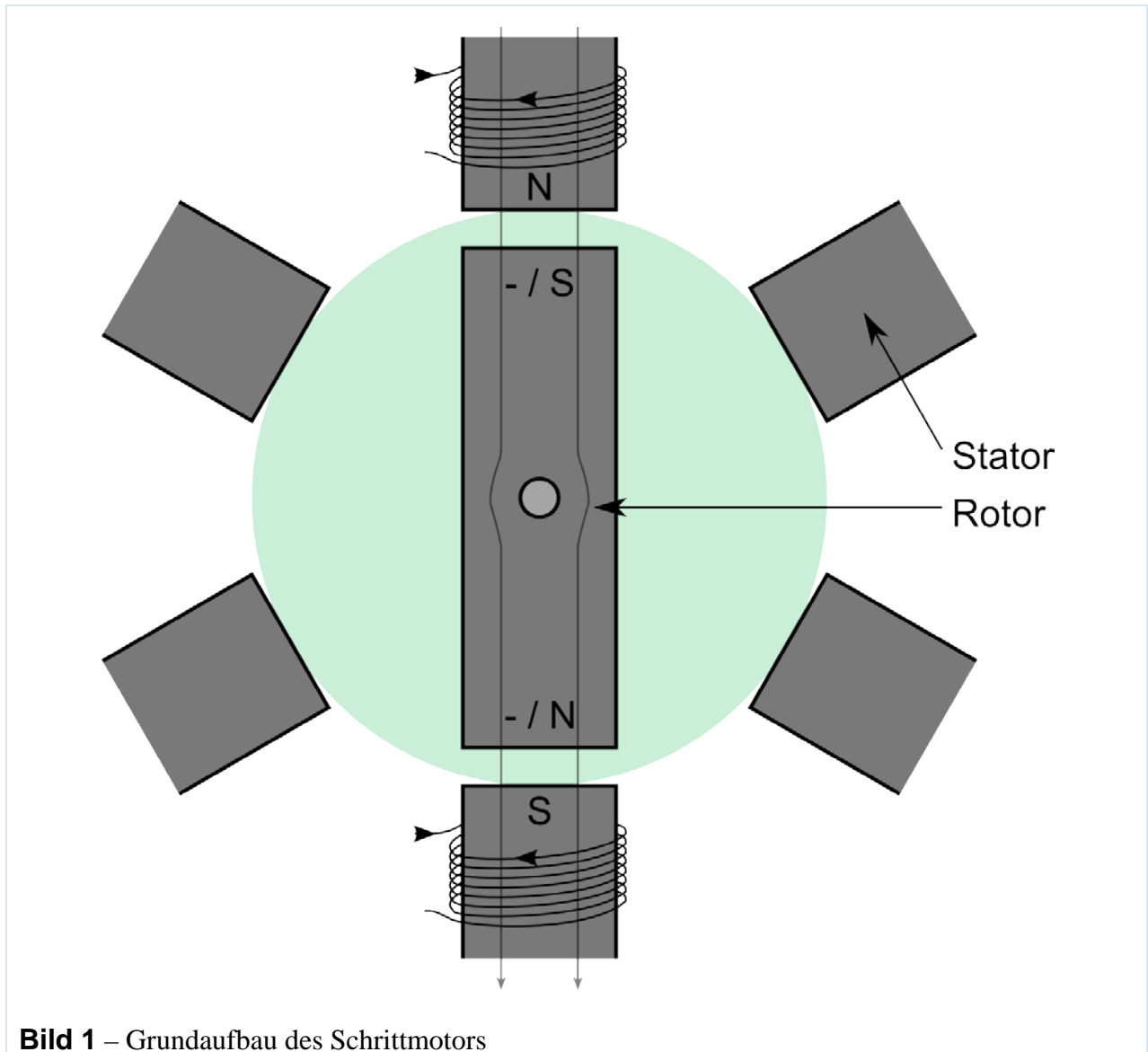


Bild 1 – Grundaufbau des Schrittmotors

Reluktanz-Schrittmotor

Beim Reluktanz-Schrittmotor besteht der Rotor auch aus einem weichmagnetischen Material und ist somit von sich aus nicht magnetisiert. Bei einem anliegenden magnetischen Feld dreht sich der Rotor in jene Richtung, damit der magnetische Widerstand ein Minimum erreicht.

Da der Stator bei ausgeschaltetem Strom kein Magnetfeld erzeugt und der Rotor auch nicht magnetisiert ist, besteht kein Haltemoment im ausgeschalteten Zustand. Der Rotor lässt sich einfach drehen.

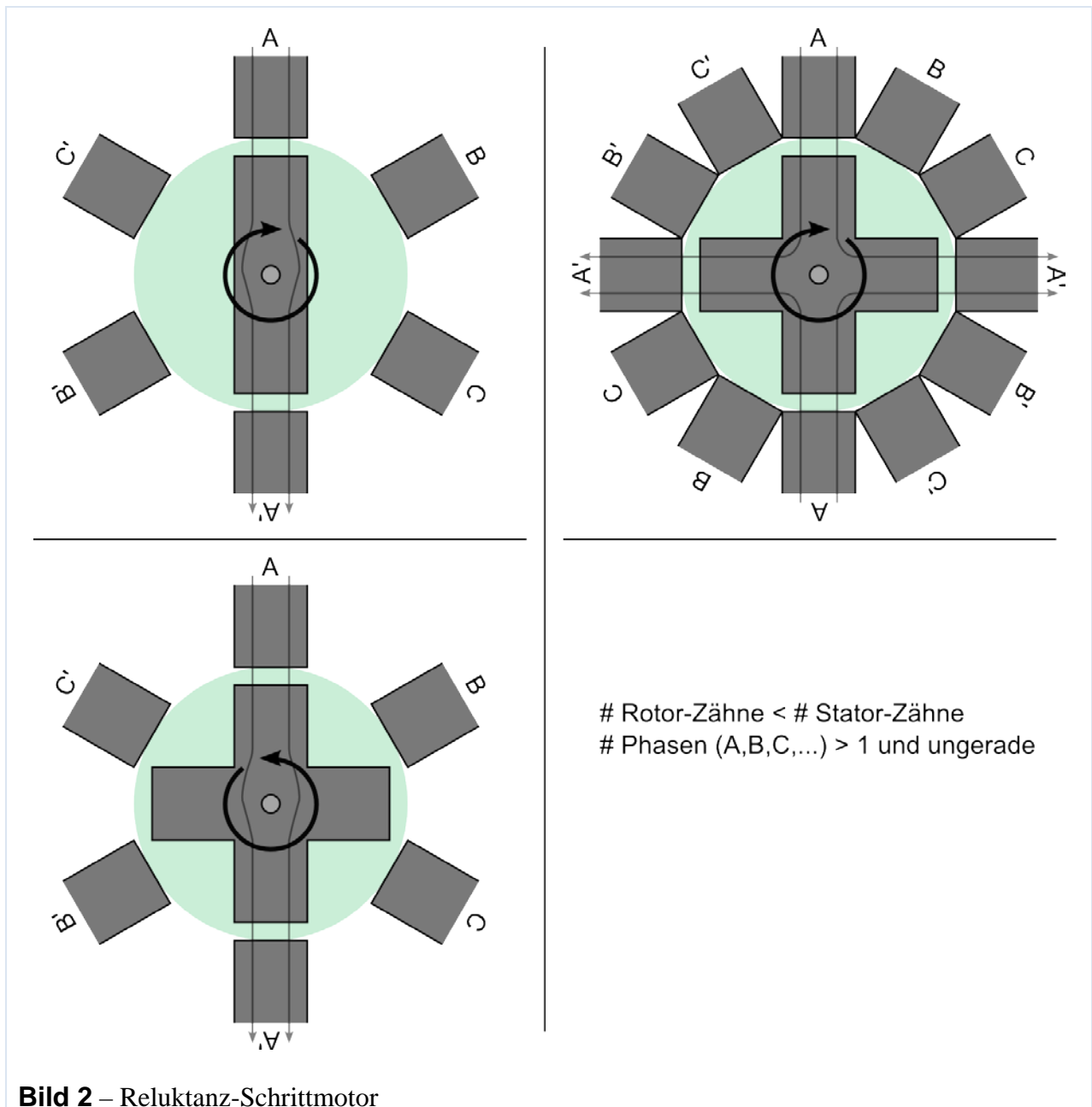


Bild 2 – Reluktanz-Schrittmotor

Die dargestellte Drehrichtung gilt für die Kommutierung-Folge $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A' \rightarrow \dots$. Je größer die Anzahl der Stator- bzw. Rotor-Zähne ist, desto größer ist das Drehmoment und desto kleiner sind die Schrittwinkel.

Permanentmagnet-Schrittmotor

Der Rotor des Permanentmagnet-Schrittmotors besteht aus einem Permanentmagneten. Somit entsteht die Drehung aufgrund der Anziehung von unterschiedlichen magnetischen Polen. Ein Pol wird durch den Permanentmagnet des Rotors dargestellt und der zweite, sich ändernde Pol, wird durch den Stator gebildet.

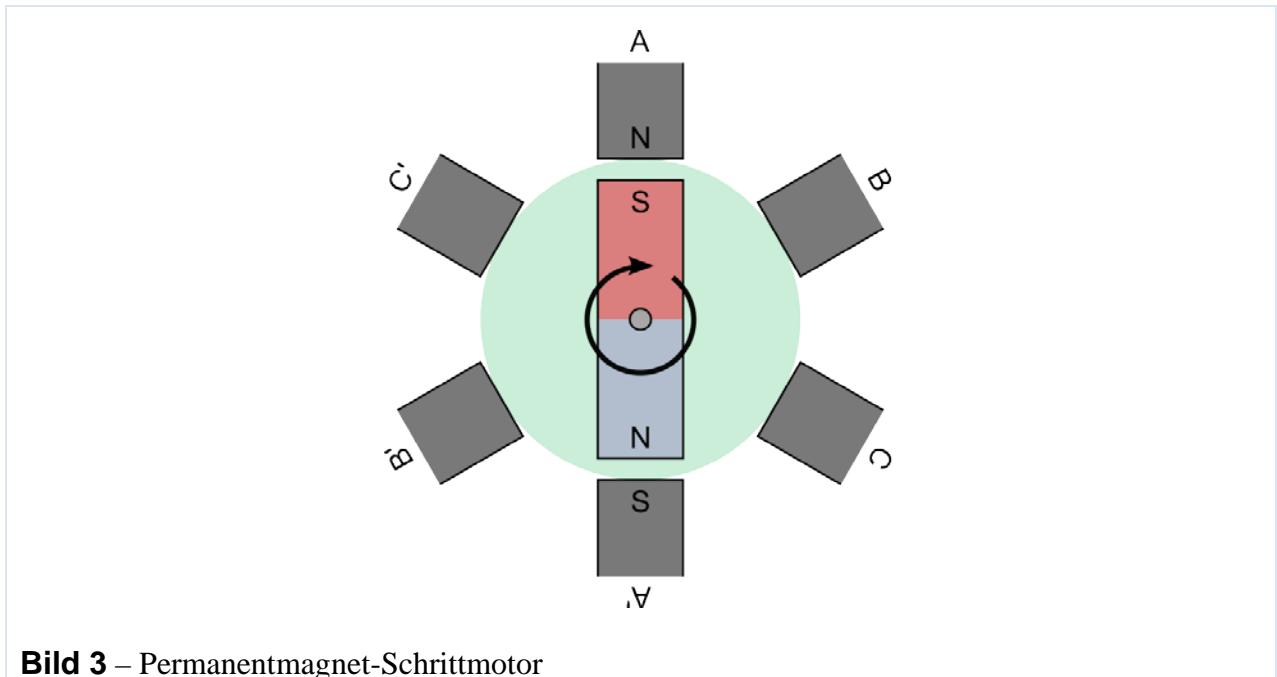


Bild 3 – Permanentmagnet-Schrittmotor

Hybrid-Schrittmotor

Da die Anzahl der Rotor-Zähne mit einem Permanentmagnet-Rotor nicht beliebig erweitert werden kann, wird beim Rotor des Hybrid-Schrittmotors eine Kombination aus einem Permanentmagnet und einem weichmagnetischem Material verwendet. Mit dieser Kombination erhält man einen Schrittmotor, welcher wie der Permanentmagnet-Schrittmotor arbeitet.

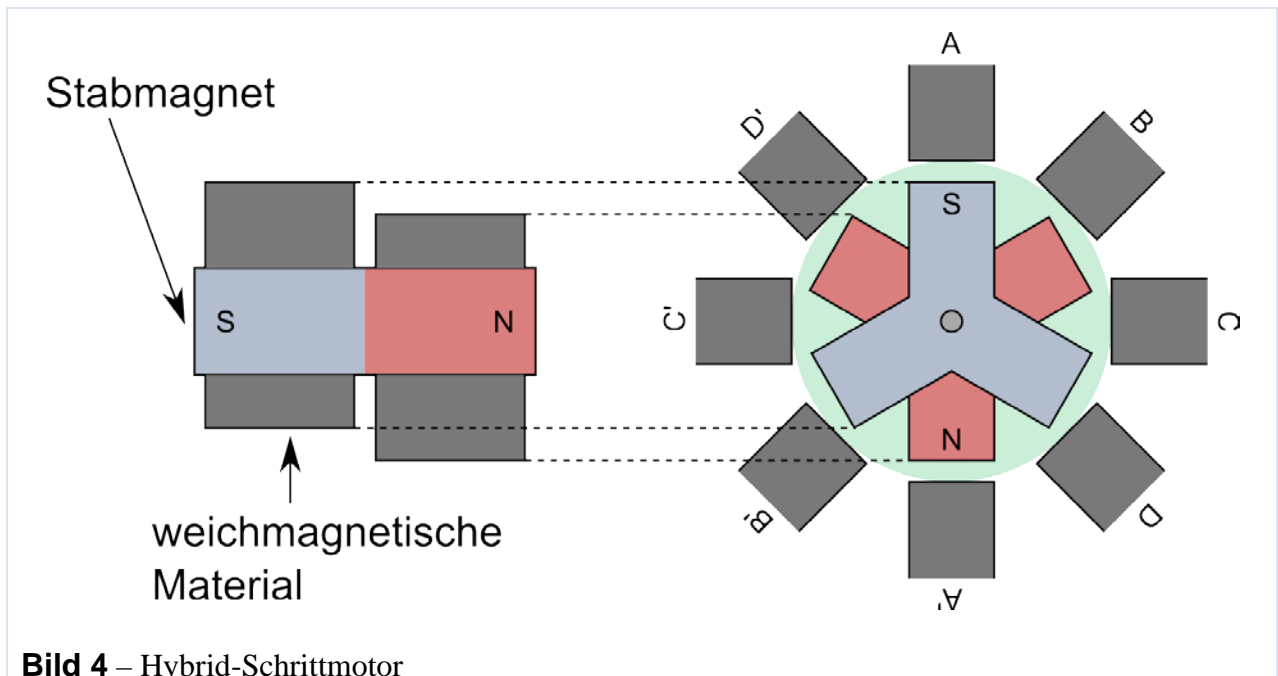


Bild 4 – Hybrid-Schrittmotor

Verzahnung der Pole

Damit der Schrittweite weiter verkleinert werden kann, können die Stator-Pole verzahnt werden. Dabei ist die Anzahl der Zähne pro Phase im Stator nur vom Platz und gewünschtem Drehmoment abhängig. Je mehr Zähne desto größer ist das Drehmoment.

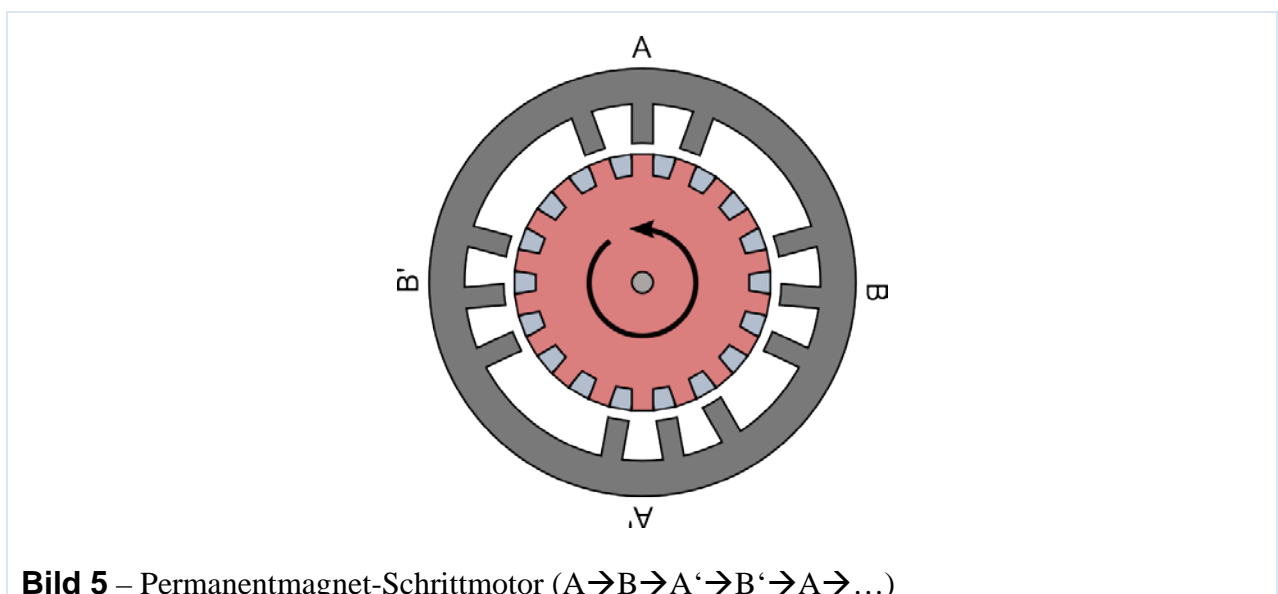
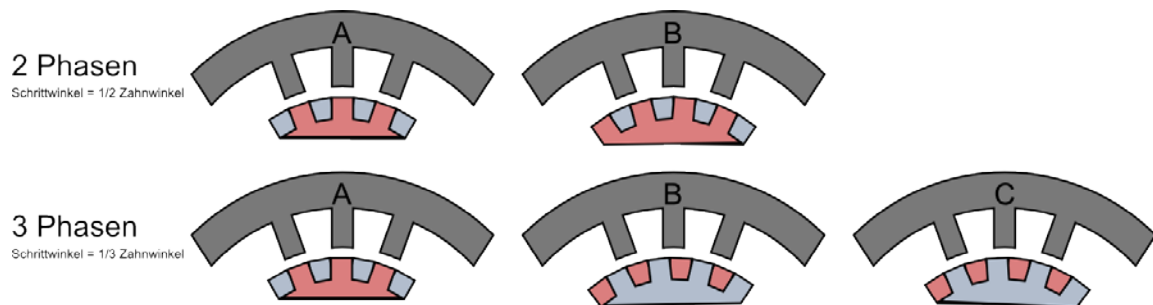


Bild 5 – Permanentmagnet-Schrittmotor (A→B→A'→B'→A→...)

Die Phase B ist um eine halbe Zahnbreite versetzt. Dieser Versatz stellt die Schrittweite dar. Somit ist die Schrittweite von der Anzahl der Zähne und der Phasen abhängig.

$$\text{Schrittwinkel} = \frac{360^\circ}{(\text{Anzahl der Phasen}) \cdot (\text{Rotorzähne})} = \frac{360^\circ}{2 \cdot 36} = 5^\circ$$

Formel 1 – Schrittwinkel**Bild 6** – Phasen-Anordnung im Stator

Je nach Anzahl der Phasen ist der Phasenversatz am Stator unterschiedlich. Der Versatz berechnet sich mit $1/(\text{Anzahl der Phasen})$.

Datenblatt Angaben

Nennstrom	... max. Strom einer Spule
Widerstand	... Kupferwiderstand einer Spule
Induktivität	... Induktivität einer Spule
Spannungsfestigkeit	... max. Spannung (die Isolierung würde eine höhere Spannung nicht standhalten)
Haltedrehmoment	... Drehmoment welches benötigt wird um den stillstehenden Schrittmotor zum drehen zu bringen, wobei eine Spule mit dem Nennstrom durchflossen wird
Schrittwinkel	... Schrittwinkel bei einem Vollschritt
Abmessungen	... Schaftdurchmesser, Montagebohrungen (z.B. NEMA 17), ...

Mit den Angaben im Datenblatt lassen sich noch weitere Werte berechnen. Mit dem Nennwiderstand und -strom kann die Nennspannung ermittelt werden. Die maximale Verlustleistung errechnet sich ebenfalls mit dem Nennstrom und -widerstand.

Ansteuerung von 2-Phasen-Schrittmotoren

Anschlüsse

Ein 2-Phasen-Schrittmotor kann zwischen 4 und 8 Anschlüsse besitzen, je nach interner Beschaltung. Grund dafür sind die verschiedenen Anschlussmöglichkeiten.

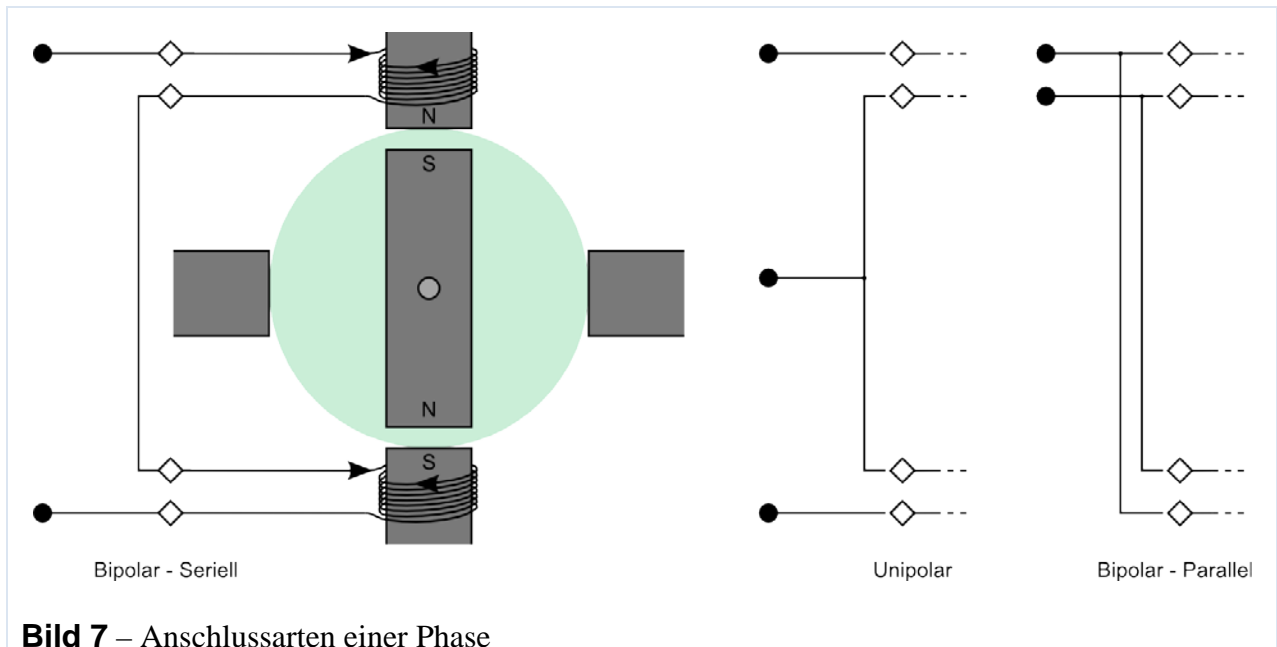


Bild 7 – Anschlussarten einer Phase

Unipolar

Die Unipolar-Beschaltung kann sehr einfach und kostensparend durchgeführt werden. Die Mittelanzapfung wird dabei mit der Versorgungsspannung verbunden und die beiden Enden per Transistor an Ground-Potential angeschlossen. Es wird immer nur eine Spule der Phase mit Strom versorgt und somit erhält man ein kleineres Drehmoment als wenn beide Spulen gleichzeitig versorgt wären (Bipolar). Beziehungsweise eine Spulenwicklung müsste einen höheren Strom standhalten um auf das selbe Drehmoment wie bei der Bipolar-Anordnung zu kommen.

Die angegebenen maximalen Spulenströme für Schrittmotoren mit 6/8 Anschlüssen beziehen sich meistens auf den Unipolar-Betrieb. Dieser Strom ist so ausgelegt, dass er fortlaufend anliegen kann, ohne den Motor thermisch zu überlasten. Die Belastung ist zum großen Teil nur vom Kupferverlust der Spulenwicklungen abhängig.

$$I_{Phase} = I_{SpuleMax}$$

... Strom pro Phase

$$P = I^2 \cdot R$$

... Verlustleistung (durch Widerstand bestimmt)

$$\tau = \frac{L}{R}$$

... Zeitkonstante (bestimmt max. Drehzahl)

$$M \sim I_{durch\ Spulen} = I_{SpuleMax}$$

... Dreh-/Halte-Moment

Formel 2 – Unipolar-Betrieb

Bipolar

Bei der Bipolar-Beschaltung werden die beiden Enden mittels einer Vollbrücke angesteuert, um den Stromfluss in beide Richtungen zu ermöglichen. Somit ist ein höherer Schaltungs-Aufwand erforderlich.

Seriell

Aufgrund der Serienschaltung beider Spulen ist der Gesamtwiderstand doppelt so groß. Die Gesamtinduktivität ist viermal so groß, da die Spulendrähte auf den selben Spulenkörper gewickelt sind. Somit ist die Lade-/Entlade-Zeitkonstante um den Faktor 2 größer und die maximal erreichbare Drehzahl sinkt.

Der Strom durch die obere Spule ist gleich mit dem Strom der unteren Spule und dem Gesamtstrom. Da beide Spulen zur Verlustleistung beitragen, muss der Phasen-Strom um den Faktor 0,7 verringert werden, um die selbe Verlustleistung zu erreichen.

Das Drehmoment vergrößert sich, da die zweite Spule auch mit Strom versorgt wird.

$$R_{Phase} = 2 \cdot R$$

$$L_{Phase} = 4 \cdot L$$

$$\tau = \frac{4L}{2R} = \frac{2L}{R}$$

$$P = I^2 \cdot 2R \rightarrow I = \sqrt{\frac{P}{2R}} = \sqrt{\frac{P}{R}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{Phase} = 0,7 \cdot I_{SpuleMax}$$

$$M \sim (I_{durch\ Spule1} + I_{durch\ Spule2}) = 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_{SpuleMax} = \sqrt{2} \cdot I_{SpuleMax}$$

Formel 3 – Bipolar-Serien-Betrieb

Werden beide Spulen auf denselben Spulenkörper und auf dasselbe Teilstück (Länge l bleibt gleich) gewickelt, so vervierfacht sich die Induktivität. Grund dafür ist, dass die Windungszahl N quadratisch in die Formel eingeht.

$$L = N^2 \frac{\mu A}{l}$$

$$L_{Phase} = (2 \cdot N)^2 \frac{\mu A}{l} = 4 \cdot N^2 \frac{\mu A}{l} = 4 \cdot L$$

Formel 4 – Induktivität

Parallel

Im Parallel-Betrieb halbiert sich der Gesamtwiderstand und die Gesamtinduktivität bleibt gleich (aufgrund desselben Spulenkörpers). Somit ist die Zeitkonstante gleich mit dem Serien-Betrieb. Der Parallel-Betrieb ist dennoch für höhere Drehzahlen geeignet, da die angelegte Spannung an einen kleineren Widerstand anliegt, und somit der Strom schneller ansteigen kann.

Der Phasenstrom kann um den Faktor 1,4 höher ausfallen, da der Strom durch die Parallelschaltung noch aufgeteilt wird.

Das Halte-/Drehmoment ist bei gleicher Beschaltung mit maximaler Verlustleistung mit dem Serien-Betrieb identisch. Nur bei höheren Drehzahlen sinkt das Drehmoment beim Serien-Betrieb schneller.

$$R_{\text{Phase}} = \frac{R}{2}$$

$$L_{\text{Phase}} = L$$

$$\tau = \frac{L}{\frac{R}{2}} = \frac{2L}{R}$$

$$P = I^2 \cdot \frac{R}{2} \rightarrow I = \sqrt{\frac{2P}{R}} = \sqrt{\frac{P}{R}} \cdot \sqrt{2}$$

$$I_{\text{Phase}} = 1,4 \cdot I_{\text{SpuleMax}}$$

$$M \sim (I_{\text{durch Spule1}} + I_{\text{durch Spule2}}) = 2 \cdot \frac{I_{\text{SpuleMax}} \cdot \sqrt{2}}{2} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{SpuleMax}}$$

Formel 5 – Bipolar-Serien-Betrieb

Schrittmoden

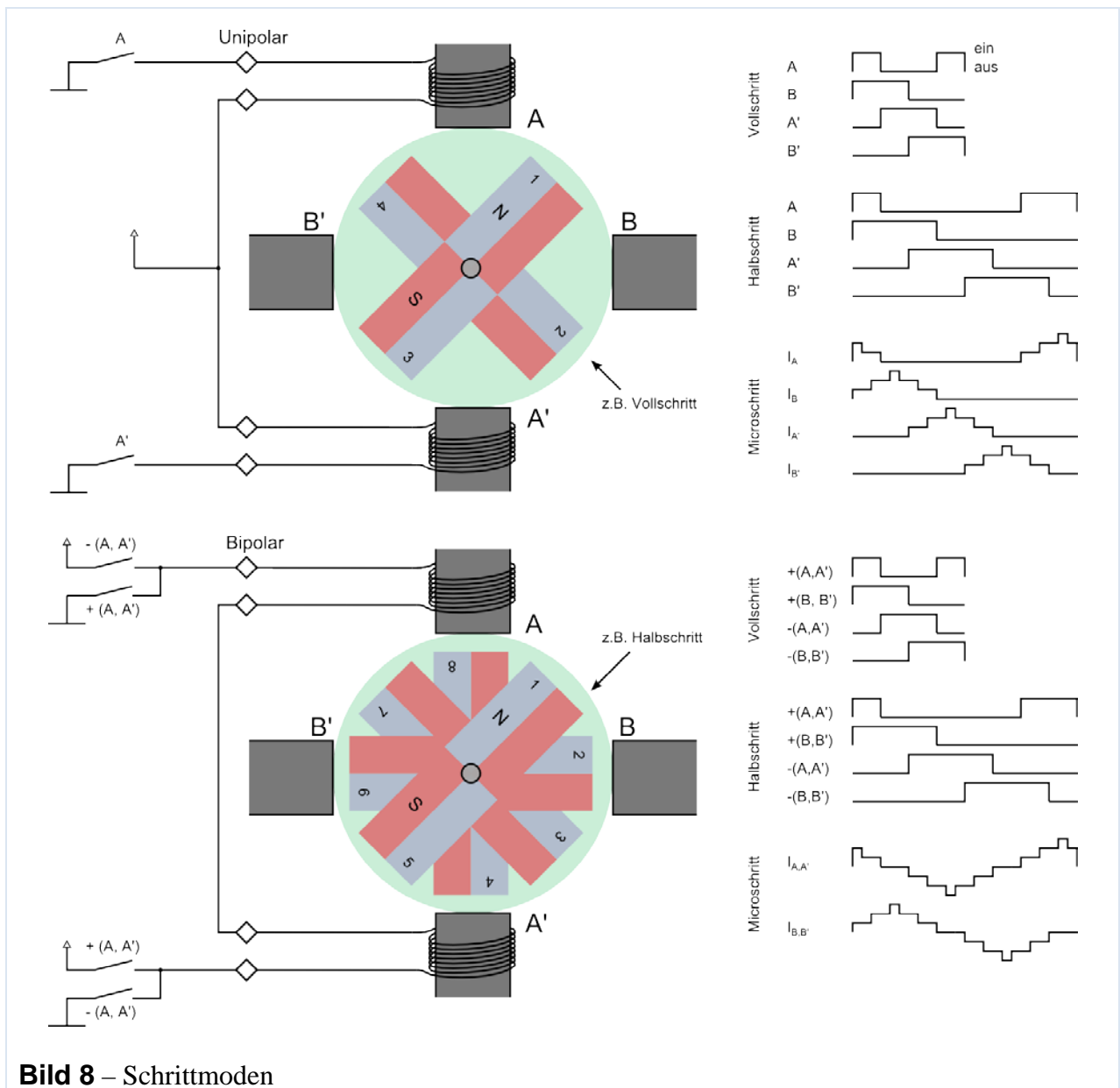


Bild 8 – Schrittmoden

Vollschritt

Beim Vollschritt-Betrieb werden immer zwei benachbarte Phasen mit Strom versorgt. Somit erreicht man in den einzelnen Schritten ein hohes Drehfeld.

Schritt →		1	2	3	4
Unipolar	Bipolar				
A	+ (A, A')	Ein			Ein
B	+ (B, B')	Ein	Ein		
A'	- (A, A')		Ein	Ein	
B'	- (B, B')			Ein	Ein

Halbschritt

Im Halbschritt-Betrieb werden zwischen den Vollschritten weitere Schritte eingefügt, wo nur eine Phase versorgt wird. Somit halbiert sich der Schrittwinkel.

Schritt →		1	2	3	4	5	6	7	8
Unipolar	Bipolar								
A	+ (A, A')	Ein						Ein	Ein
B	+ (B, B')	Ein	Ein	Ein					
A'				Ein	Ein	Ein			
B'						Ein	Ein	Ein	

Microschritt

Der Microschritt-Betrieb schaltet den Strom in den einzelnen Phasen nicht ein oder aus, sondern es wird ein sinusförmiger Strom angelegt. Dies erfordert eine aufwendigere Beschaltung, die den Strom in gewissen Stufen regeln kann. Ein großer Vorteil des Microschritts ist der gleichförmigere Übergang zwischen den Schritten.

Treiber IC

Am Beispiel von Allegro MicroSystems ICs (A3982, A3983 und A3984) wird die Verwendung von Schrittmotor Treiber ICs erläutert. Diese ICs fungieren als Stromregler die je nach eingenommenem Schritt einen festgelegten Strom treiben. Der große Vorteil liegt darin, dass eine hohe Spannung verwendet werden kann, um den gewünschten Strom schnell zu erreichen. Somit lassen sich höhere Geschwindigkeiten erreichen.

Der Treiber-IC besitzt zwei Pins für unterschiedliche Versorgungsspannungen. Die erste Spannung ist für die Logik selbst und die zweite dient für die Stromgenerierung in den Phasen des Schrittmotors. Der maximale Strom kann mit Hilfe des Sensor-Widerstandes und der Referenz-Spannung eingestellt werden. Je nach Betriebsart und aktuellem Schritt wird ein bestimmter Bruchteil des maximalen Stromes verwendet. Die Stromregelung an sich funktioniert über eine einfache PWM-Ansteuerung. Die Spannung wird so lange eingeschaltet, bis der Strom den gewünschten Pegel erreicht. Danach wird die Spannung für eine fixe Zeit ausgeschaltet. In dieser Zeit sinkt der Ist-Strom wieder ab.

Um den Motor einen Schritt weiter bewegen zu lassen, wird zuvor der Schrittmodus (Voll-, Halb- oder Microschritt) und die Richtung eingestellt. Und danach wird ein Schritt-Impuls angelegt. Die Ansteuerung der H-Brücke für die einzelnen Phasen übernimmt der IC.

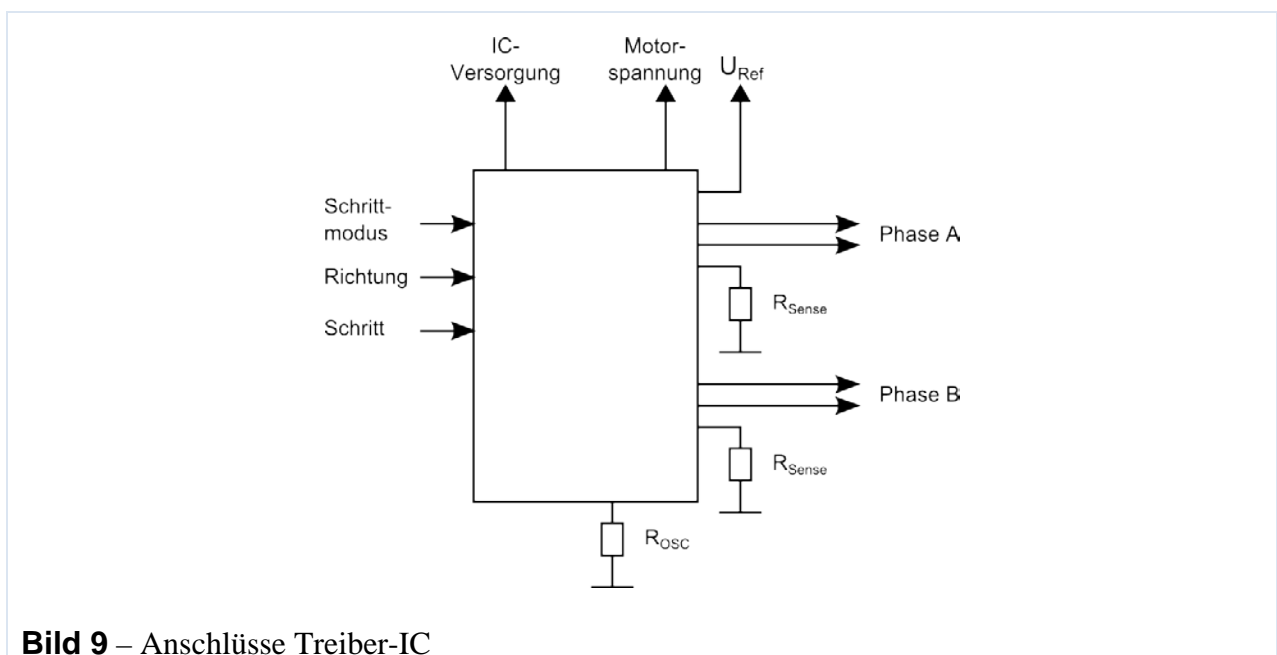


Bild 9 – Anschlüsse Treiber-IC

Die Ausschaltzeit kann mit Hilfe eines Widerstandes angepasst werden. Legt man diesen Pin fix auf eine Spannung $>3V$, so wird die Zeit auf $30\mu s$ eingestellt.

$$I_{max} = \frac{U_{Ref}}{8 \cdot R_{sense}}$$

$$t_{off} = \frac{R_{osc}}{825} [\mu s]$$

Formel 6 – Parameter

Beim Voll- und Halbschritt Betrieb ist der angelegte Strom immer $\pm I_{max}$. Bei einem Microschritt Betrieb hängt der Strom vom aktuellen Schritt ab. Die Werte für die einzelnen Schritte sind meistens einer Sinus-Kurve angelehnt und werden in einer Look-Up Tabelle abgelegt.

$$I_{PhaseA} = I_{max} \cdot \cos\left(\frac{N}{32} \cdot 360^\circ\right) \quad I_{PhaseB} = \pm I_{max} \cdot \sin\left(\frac{N}{32} \cdot 360^\circ\right)$$

Formel 7 – Microschritt Strom

Der im Datenblatt beschriebene „decay mode“ gibt an, welchen Pfad der Strom in der Ausschaltzeit durchläuft. Beim „fast decay“ Modus werden sämtliche FETs deaktiviert und der Strom fließt über die FET-Dioden. Somit sinkt der Strom schneller ab. Im „slow decay“ Modus werden die beiden unteren FETs aktiviert und der Strom fließt innerhalb dieser Schleife. Der Vorteil besteht darin, dass die FETs einen kleinen Widerstand im Ein-Zustand besitzen und somit der Strom nicht so schnell sinkt. In einem „mixed decay“ Modus werden beide Modi gleichzeitig verwendet.

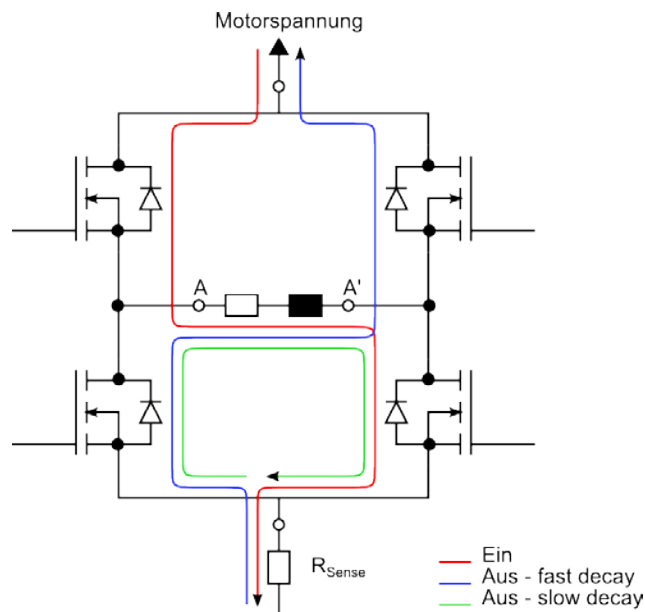


Bild 10 – Stromrichtung der Ausschalt-Modi

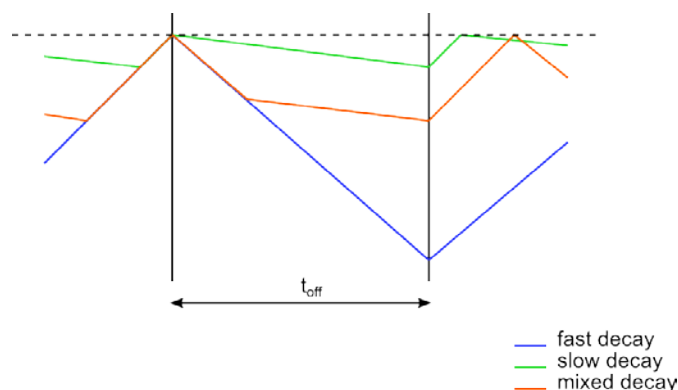


Bild 11 – Abschaltverhalten

Beispiel

Anhand eines beliebig gewählten Schrittmotors werden die theoretischen Betrachtungen simuliert und bewertet.

Verwendeter Motor

Hersteller: Hurst manufacturing
Teile-Nr.: H17ET060440
Bestellmöglichkeit: RS Components
Bestellnr.: 2508381417

Schrittinkel: 1.8° (200 Vollschritte)
Nennspannung: 6V
Windungswiderstand: 10Ω
Windungsinduktivität: 9,5mH
Eingangsleistung: 7,2W

Aus den Datenblatt Angaben berechnen sich ein Nennstrom von 600mA und daraus eine Nennleistung pro Phase von 3,6W. Es können zwei Phasen mit der Nennspannung versorgt werden um auf die angegebene Eingangsleistung zu kommen. Die Angaben sind somit für den Bipolar-Betrieb ausgelegt.

Simulation

Bei der Simulation wird eine Phase mit der Nennspannung versorgt und in einem bestimmten Takt umgeschaltet. Die Phase wird durch den Phasenwiderstand und die Phaseninduktivität simuliert.

Die erste Simulation verwendet eine Periode von 20ms, die zweite 4ms. In einer Periode werden 4 Vollschritte durchgeführt.

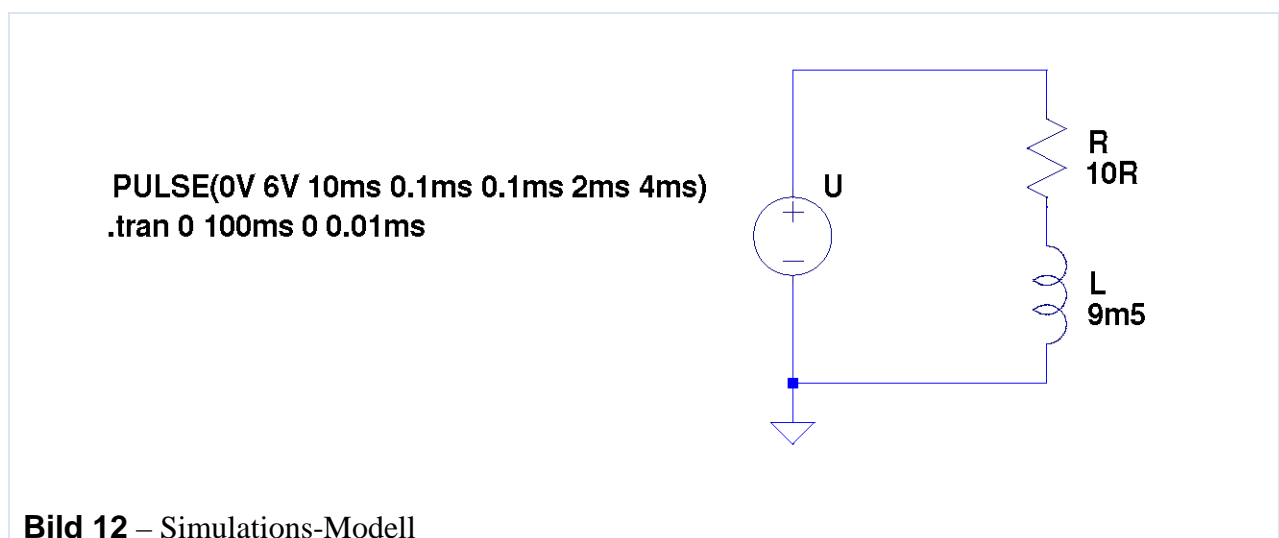


Bild 12 – Simulations-Modell

Bei einer Phasen-Pulsperiode von 20ms (Bild 10) benötigt eine volle Umdrehung ($360^\circ \rightarrow 200$ Schritte) eine Sekunde, das entsprechen 60 RPMs. Bei den Simulationsergebnissen kann man die RL-Zeitkonstante erkennen, denn der Strom benötigt eine bestimmte Zeit um auf den Endzustand zu kommen ($\tau = 0,95\text{ms}$).

Um theoretisch eine 5-fache Geschwindigkeit zu erreichen, muss die Periode auf 4ms verringert werden (Bild 11). Dabei sieht man dass der Ladevorgang der Spule beim Abschalten der Spannung noch nicht abgeschlossen ist und somit auch nicht das volle Drehmoment zur Verfügung steht. Im schlechtesten Fall bleibt der Motor an einem Punkt stehen.

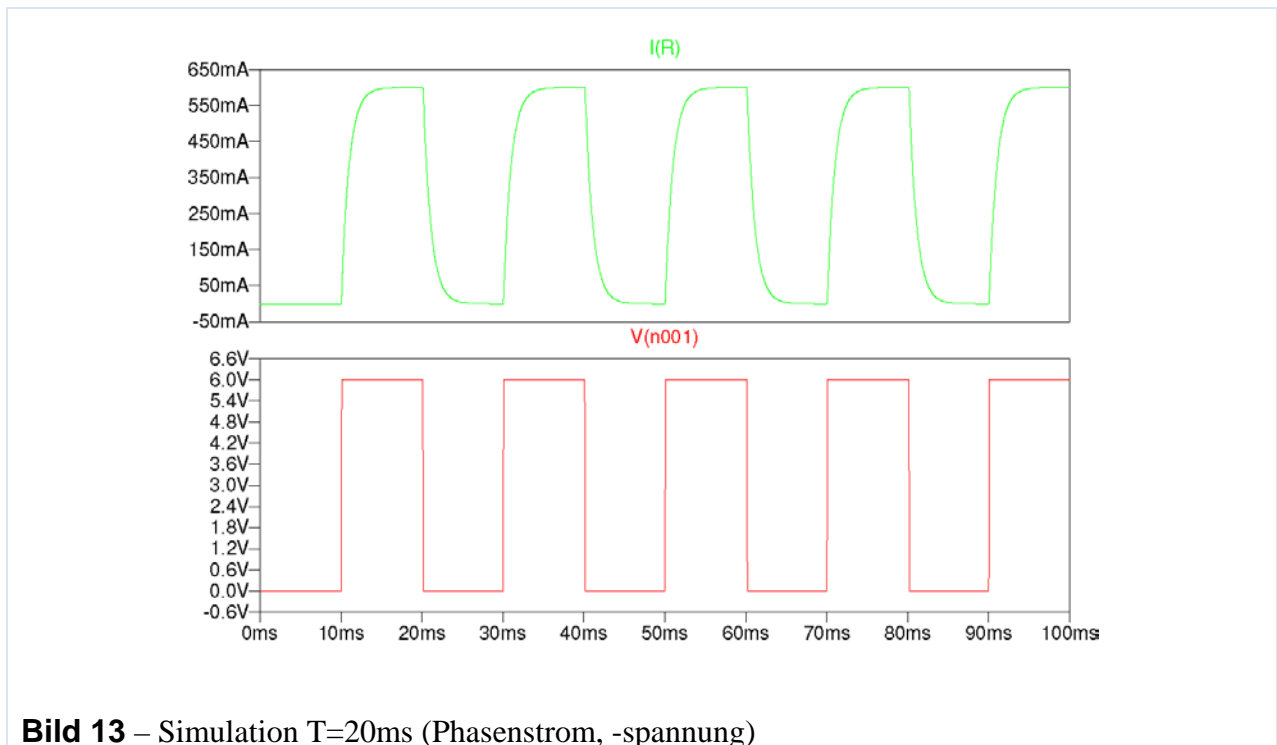


Bild 13 – Simulation $T=20\text{ms}$ (Phasenstrom, -spannung)

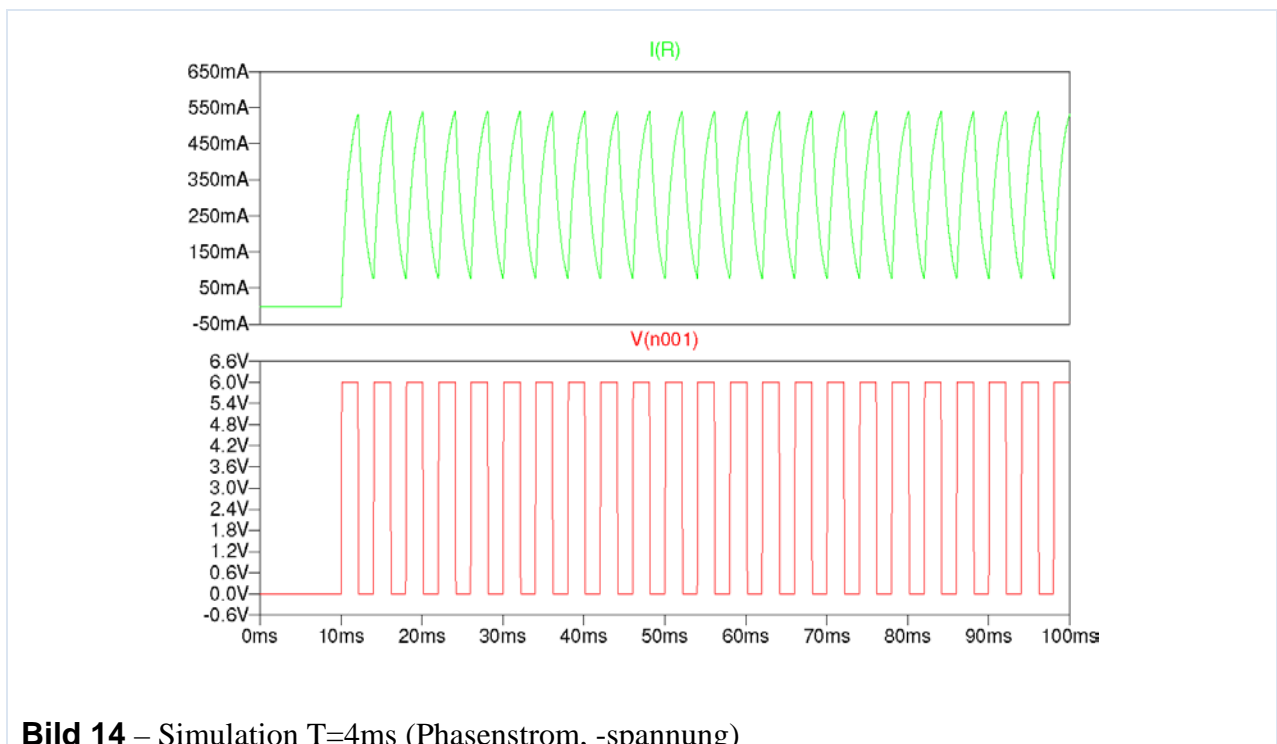


Bild 14 – Simulation $T=4\text{ms}$ (Phasenstrom, -spannung)

Um auf eine auf die Periodendauer bezogene gleiche Anstiegs-Zeit des Stromes zu kommen kann ein Vorwiderstand verwendet werden, der die Zeitkonstante verringert. Damit derselbe End-Strom von 600mA fließt muss auch die Spannung erhöht werden. In den vergangenen Zeiten war das eine einfache Methode um die Geschwindigkeit zu erhöhen. Ein großer Nachteil dieses Aufbaus ist die hohe Energieverschwendung am Vorwiderstand, da dessen Energie nicht zum Drehmoment beiträgt.

$$T = 20ms \dots \tau = 0,95ms$$

$$T = 4ms \rightarrow \tau = 0,19ms$$

$$R_{ges} = \frac{L}{\tau} = \frac{9,5mH}{0,19ms} = 50\Omega$$

$$R_{vor} = R_{ges} - R_{phase} = 40\Omega$$

$$U = U_{phase} \cdot \frac{R_{vor} + R_{phase}}{R_{phase}} = 6V \cdot \frac{50\Omega}{10\Omega} = 30V$$

Formel 8 – Vorwiderstand

PULSE(0V 30V 10ms 0.1ms 0.1ms 2ms 4ms)
.tran 0 100ms 0 0.01ms

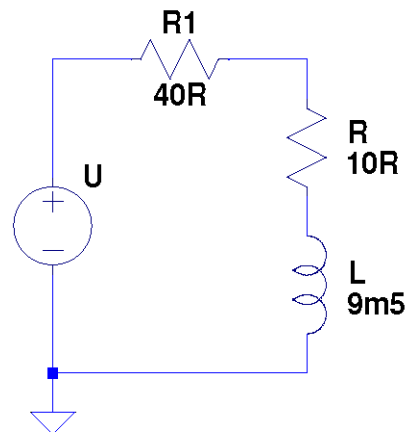


Bild 15 – Simulations-Modell

Aufgrund der Spuleneigenschaften kann sich der Strom nicht unendlich schnell ändern. Zum Beispiel verhält sich die Spule bei der ersten positiven Flanke zu Beginn wie eine offene Leitung und danach steigt der Strom langsam an. Die Spannung ist über die Beziehung $u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$ berechenbar. Somit entstehen bei jedem Ein- und Ausschalten Spikes bei den Phasenanschlüssen.

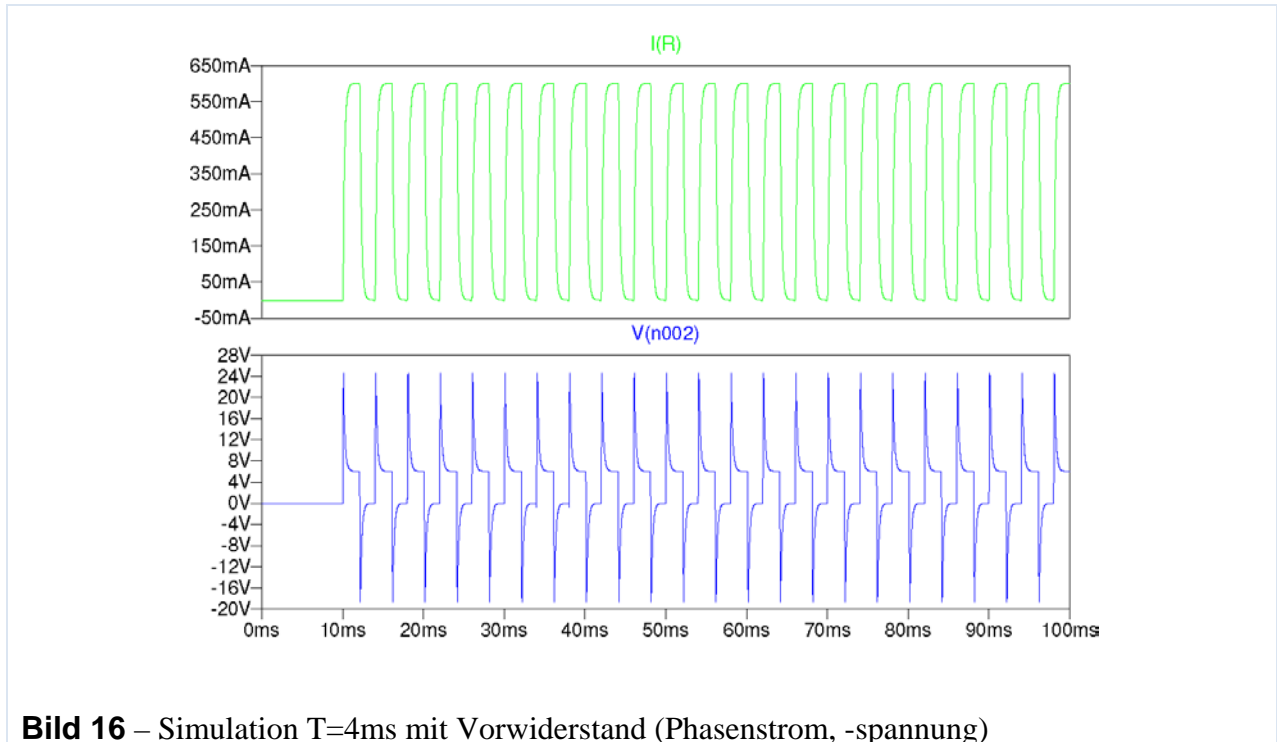


Bild 16 – Simulation T=4ms mit Vorwiderstand (Phasenstrom, -spannung)

Drehmoment-/Leistungs-Messung

Für die Messung der mechanischen Leistung bzw. des Drehmoments kann ein Dynamometer verwendet werden. Eine frühe Realisierung des Messgerätes stellte „eponymous de Prony Brake“ dar. Das Gerät besteht aus einer Bremse, die frei gelagert ist. Mit dem ändern der Bremskraft wird die Drehzahl, bei der das Drehmoment gemessen wird, eingestellt. Die Messgröße ist die Ablenkung der frei aufgehängten Bremse.

Diese Vorrichtungen sind meistens für Messungen von Motoren mit höheren Leistungen.

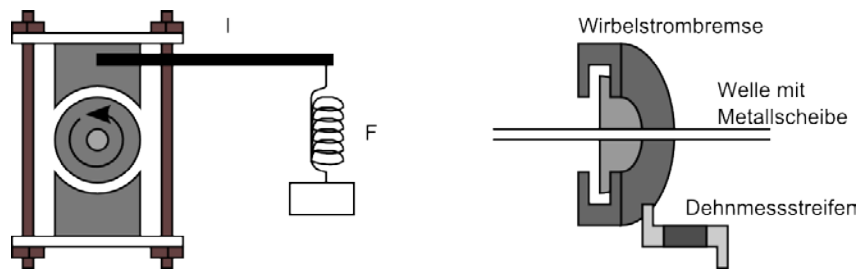


Bild 17 – Dynamometer

$$M = F \cdot l \quad [Nm]$$

$$P = M \cdot \omega \quad [W, PS]$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad [1/s]$$

$$\eta = \frac{P_{mechNutz}}{P_{elektr}}$$

Formel 9 – Drehmoment, Leistung und Wirkungsgrad

Messung mit DC-Motor

Für einfache Leistungs-Messungen an kleinen Motoren kann ein DC-Motor verwendet werden. Der Motor wird als Generator verwendet. Die abgegebene elektrische Leistung an diesem Motor ist ein Maß für die mechanische Nutz-Leistung.

DC-Motor Eigenschaften

$$U \cdot I = I^2 \cdot R + c \cdot I \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

$U \cdot I$... gesamte zugeführte elektronische Leistung

$I^2 \cdot R$... Verlust-Leistung der Motorwicklung

$c \cdot I \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$... mechanische Leistung (Verlust-, Nutz-)

U ... Versorgungs-Spannung [V]

I ... Stromaufnahme [A]

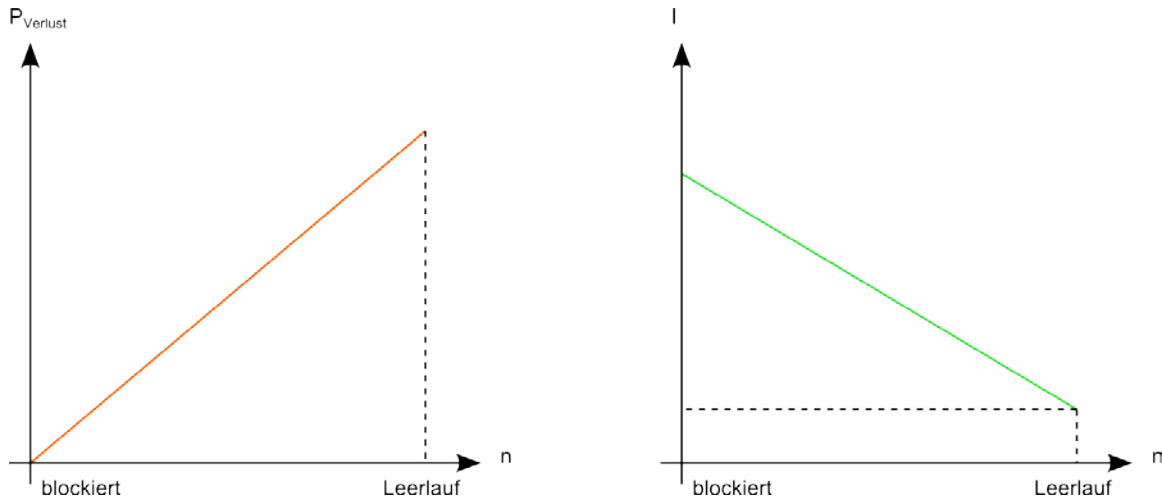
R ... Widerstand der Wicklung [Ω]

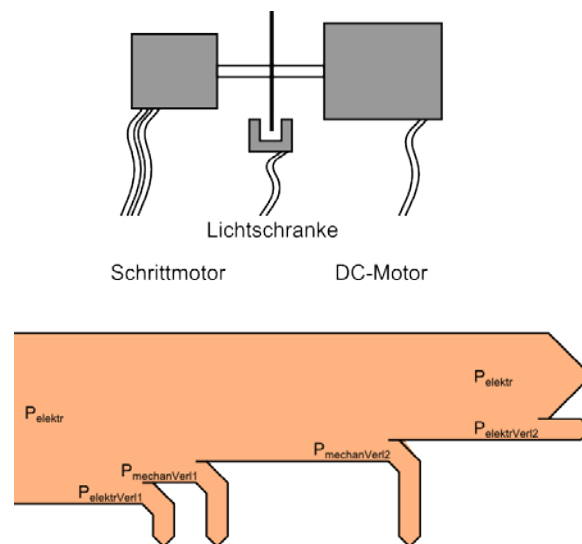
c ... Motor-Konstante [Vs]

n ... Drehzahl [1/s]

Formel 10 – DC-Motor Kenngrößen

$$P_{mechNutz} = c \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{last} \cdot (I_{last} - I_{leerlauf})$$

Formel 11 – mechanische Nutz-Leistung

Bild 18 – Verlust-Leistung und Stromaufnahme in Abhängigkeit der Drehzahl

Mess-Aufbau

Bild 19 – Leistungs-Messung

Der DC-Motor wird mit einem Leistungs-Widerstand abgeschlossen. Durch Messen der Ausgangs-Spannung kann die gesamte elektrische Leistung berechnet werden (Leistung an der Motor-Wicklung und am Abschluss-Widerstand). Dieser Wert entspricht nahezu dem Wert der mechanischen Nutz-Leistung des Schrittmotors. Die mechanische Verlust-Leistung des DC-Motors wird dabei vernachlässigt.

Beurteilung

Das maximale Drehmoment bei einer bestimmten Drehzahl lässt sich bei diesem Aufbau nicht direkt ermitteln. Die Messung erfolgt in einer umgekehrten Folge. Zuerst wird ein bestimmter Abschluss-Widerstand am DC-Motor angeschlossen. Danach wird die Schrittgeschwindigkeit des Schrittmotors solange gesteigert, bis der Motor stehen bleibt. Indem man den Wert kurz vor dem Motor-Stopp verwendet, erhält man ein Ergebnis für eine Drehzahl.

Durch Variation des Abschlusswiderstands können die maximalen Drehmomente für unterschiedliche Drehzahlen gemessen werden.

Literatur

Zeitschrift	Circuit Cellar (Ausgabe 253, 255, 257)
Schrittmotor Hersteller	http://de.nanotec.com/schrittmotor_animation.html
Treiber IC Hersteller	http://www.allegromicro.com/Products/Motor-Driver-And-Interface-ICs/Bipolar-Stepper-Motor-Drivers/A3984.aspx
Erfahrungsberichte	http://www.schrittmotor-blog.de