

# Schritt für Schritt

## Steppermotoren zur präzisen Positionierung

Schrittmotoren (engl. stepper motors) dienen wie jede andere Art von elektrischen Motoren der Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie. Schrittmotoren bestehen aus einem feststehenden Stator und einem sich in Winkelinkrementen drehenden Rotor. Im Gegensatz zu herkömmlichen Elektromotoren rotiert der Rotor nicht kontinuierlich, sondern „gequantelt“, also in mehr oder weniger großen Drehschritten. So erreicht er auch ohne Regelungsmechanismen eine hohe Positioniergenauigkeit. Damit ist das Schrittmotorprinzip ideal geeignet für Anwendungen in der Robotik, in 3D-Druckern, Floppy-Disk- und Festplattenlaufwerken und für Präzisionsanwendungen aller Art und Größenordnungen.

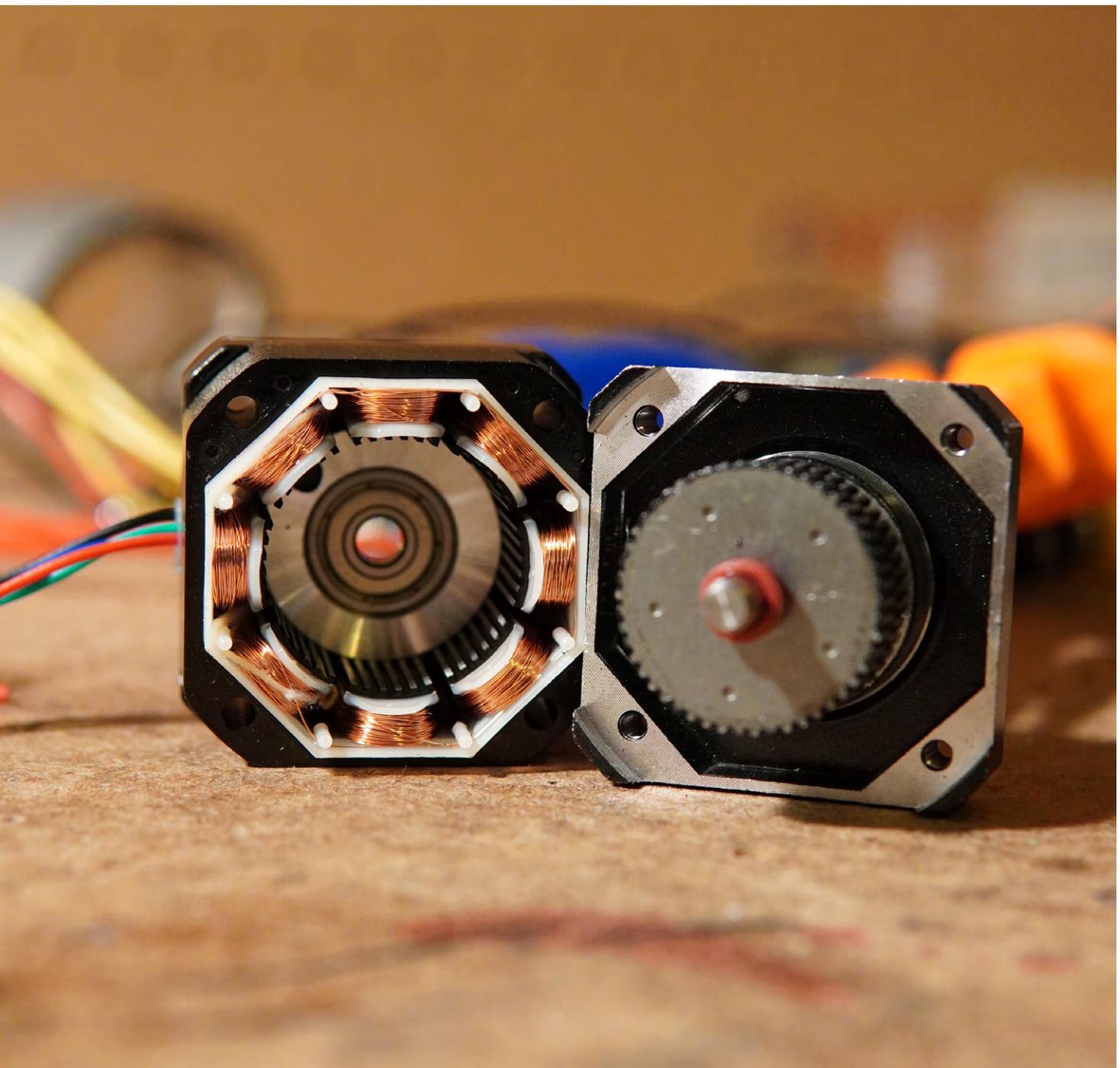
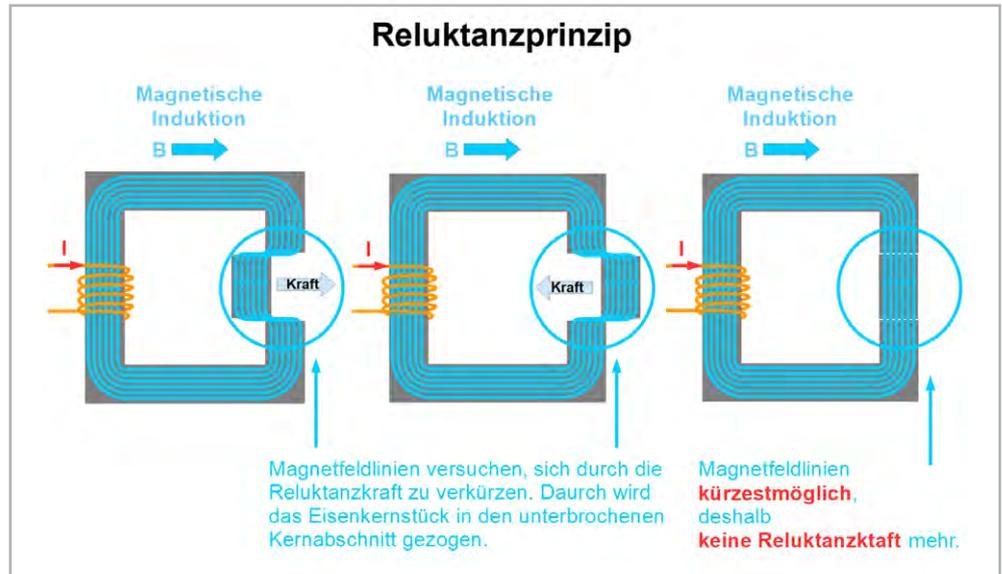


Bild 1: Magnetische Feldlinien wollen nach Möglichkeit den kürzesten Verlauf nehmen. Deshalb ziehen sie den beweglichen Eisenkernabschnitt als Joch in die Lücke hinein. Die dazu erforderliche Kraft wird Reluktanzkraft genannt.



### Schrittmotorarten

Man unterscheidet im Wesentlichen drei Arten von Schrittmotoren, von denen der Hybrid-Schrittmotor heute die größte Bedeutung hat:

- Reluktanz-Schrittmotor
- Permanentmagnet-Schrittmotor
- Hybrid-Schrittmotor

Der Reluktanz-Schrittmotor beruht auf der sogenannten Reluktanzkraft, auch Maxwell'sche Kraft genannt. Sie tritt an Grenzflächen auf, an denen infolge unterschiedlicher Permeabilitäten (Durchlässigkeiten für magnetische Felder, Formelzeichen  $\mu$ ) eine Änderung des magnetischen Widerstands (Reluktanz) erfolgt, und zielt auf die Verkürzung der magnetischen Feldlinien ab. Damit besteht ein prinzipieller Unterschied zu Motoren, die auf der Lorentzkraft (Krafteinwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem äußeren Magnetfeld) beruhen.

Ein einfaches Beispiel für die Reluktanzkraft zeigt Bild 1. Man sieht einen geschlossenen Weichkern mit einer Erregerspule, aus dem ein Stück herausgetrennt und nach links bzw. rechts verschoben wurde (links und Mitte). Weich bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Eisen ein magnetisches Feld bereitwillig übernimmt und weiterführt, nach dessen Verschwinden aber keine Erinnerung daran in Form eines verbleibenden Restmagnetismus (Remanenz) hat.

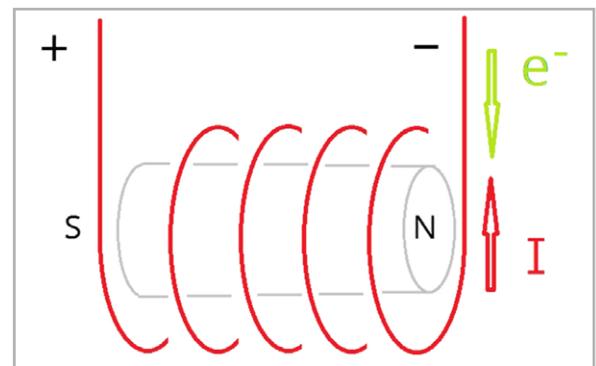


Bild 2: Umgreifen die Finger der linken Hand die Spulenwindungen in Richtung des Elektronenflusses, zeigt der abgestreckte Daumen in Richtung des Spulennordpols (Quelle: Wikimedia).

Fließt nun ein Strom durch die Spule, entsteht ein magnetischer Fluss im Eisenkern, dessen Feldlinien sich im Bereich des verschobenen Teilstücks verkürzen wollen (die Analogie zu Gummibändern ist durchaus passend!). Dazu ziehen sie das herausgetrennte Eisenstück wieder in seine alte Position (rechts). Die dafür erforderliche Kraft ist die Reluktanzkraft. Je näher sich das Eisenstück seiner „Idealposition“ annähert, desto kleiner wird die Reluktanzkraft.

Eine stromdurchflossene Spule bildet einen Nordpol und einen Südpol gemäß der „Linke-Faust-Regel“ aus. Dabei muss man die Spule in Fließrichtung der Elektronen (von minus nach plus!) mit den vier Fingern umschließen. Der rechtwinklig zu den Fingern abgespreizte Daumen zeigt dann in Richtung des Spulennordpols. Orientiert man die umgreifenden Finger am technischen Stromfluss von plus nach minus (also entgegen der Elektronenbewegung), zeigt der Daumen zum Südpol (bzw. bei Anwendung der „Rechte-Faust-Regel“ ebenfalls zum Nordpol). Anhand von Bild 2 kann man das Gesagte nachvollziehen.

Bild 3 zeigt das Funktionsprinzip eines geschalteten Reluktanzmotors. Man sieht einen kreuzförmig gezahnten Weichkernrotor und drei sich im Stator gegenüberliegende Spulenpaare. Jedes Spulenpaar

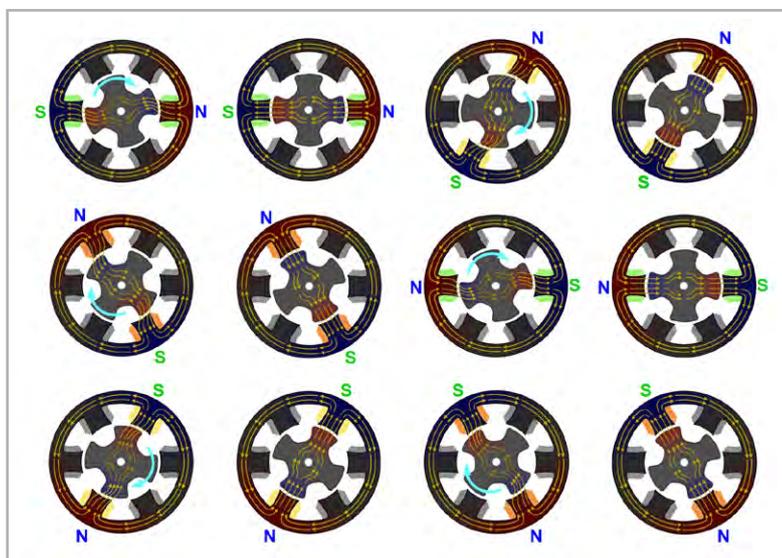


Bild 3: Drehende Reluktanzkräfte treten nur auf, wenn sich ein Rotorflügel und der durch die bestromte Spule magnetisierte Statorflügel nicht exakt gegenüberstehen.

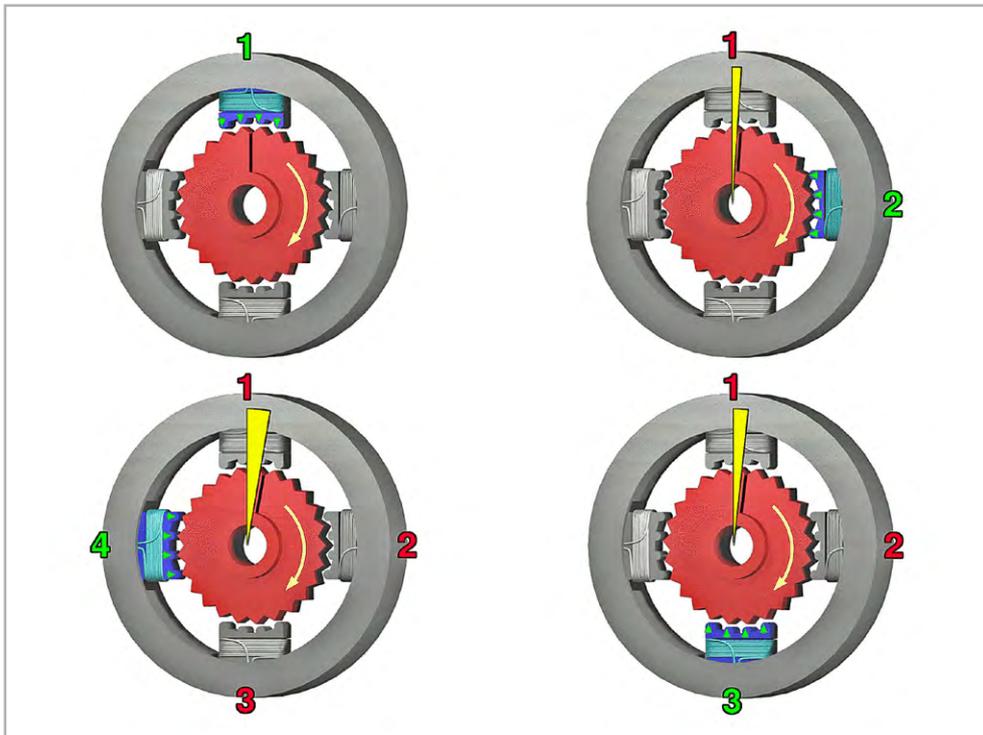


Bild 4: Durch die Zahnung auf Rotor- und Statorflügeln kann der Drehwinkel des Rotors verkleinert werden.

wird aus zwei Einzelspulen gebildet, die jeweils in Reihe geschaltet sind und gleichsinnig vom Statorstrom durchflossen werden. Dabei bildet sich ein Nord- und ein Südpol durch die gemeinsam bestromten Spulen, die man auch als Phasen bezeichnet. Die abwechselnd von Strom durchflossenen Windungen der Statorspulen sind grün, gelb und rot dargestellt.

In den Positionen, wo die Magnetfeldlinien gestreckt vom Stator zum Rotor übergehen, gibt es kein Drehmoment, das den Rotor zu einer weiteren Drehung veranlassen würde. In diesem Stadium widersetzt sich der Rotor einer von außen eingebrachten Winkelveränderung durch sein Rastmoment.

Erst wenn die Bestromung der Spulen weiter geschaltet wird, entsteht ein neues Drehmoment, das den Rotor (vorausgesetzt, die Last auf der Abtriebswelle ist nicht zu groß) zu seinem nächsten Drehschritt anregt. Natürlich bestimmt die Reihenfolge der Spulenbestromung die Drehrichtung des Rotors.

Um die Schrittweite zu verkleinern, kann man Rotor und Polschuhe leicht unterschiedlich zähnen. Dann erfolgt im Bereich der Zähne des Polschuhs der durchströmten Spule eine Anziehung der Zähne des Rotors dergestalt, dass sich die Zähne von Rotor und Stator optimal im Sinne eines kürzestmöglichen Verlaufs der magnetischen Feldlinien gegenüberstehen. Bestromt man die nächste Spule, dreht sich der Rotor nicht um einen vollen Pol, sondern nur um einen Zahn weiter, bis auch hier die Feldlinien den kürzestmöglichen Verlauf nehmen. Bild 4 zeigt das Prinzip von gezahntem Rotor und Stator des Reluktanzmotors im Querschnitt (siehe auch [Wikipedia](#)).

Weil der Reluktanzschrittmotor keine Permanentmagneten enthält, hat er bei abgeschaltetem Spulenstrom kein Rastmoment mehr, und der Rotor lässt sich gleichförmig und bis auf die Reibungsverluste widerstandslos drehen. Man nennt ihn in diesem Zustand unbestromt.

Der Permanentmagnet-Schrittmotor hat seinen Namen von dem als Dauermagnet (Permanentmagnet) gestalteten Rotor. Der Stator besteht zur Verringerung der Wirbelstromverluste aus gegeneinander elektrisch isolierten Weicheisenblechpaketen, um welche die Statorspulen gewickelt werden.

Bild 5 zeigt das Funktionsprinzip in seiner einfachsten Form für einen 4-Schritt-Permanentmagnet-Schrittmotor mit unipolarer Beschaltung der Statorspulen. Von den Schaltern links darf stets nur einer geschlossen sein. Die Spule, die über diesen ihren Strom bezieht, bildet am rotorseitigen Ende einen Nordpol aus, der den Rotor so weit dreht, bis ihm dessen Südpol gegenübersteht.

Aus dem Physikunterricht ist vielen Lesern sicherlich noch bekannt, dass magnetische Feldlinien einen geschlossenen Verlauf haben. Deshalb müssen in realen Aufbauten die magnetischen Feldlinien einen Rückschluss finden. Dazu dient ein in der Zeichnung zur besseren Übersicht weggelassener weichmagnetischer Ring, aus dessen Innenseite die Eisenkerne der Statorspulen ihren Ursprung nehmen.

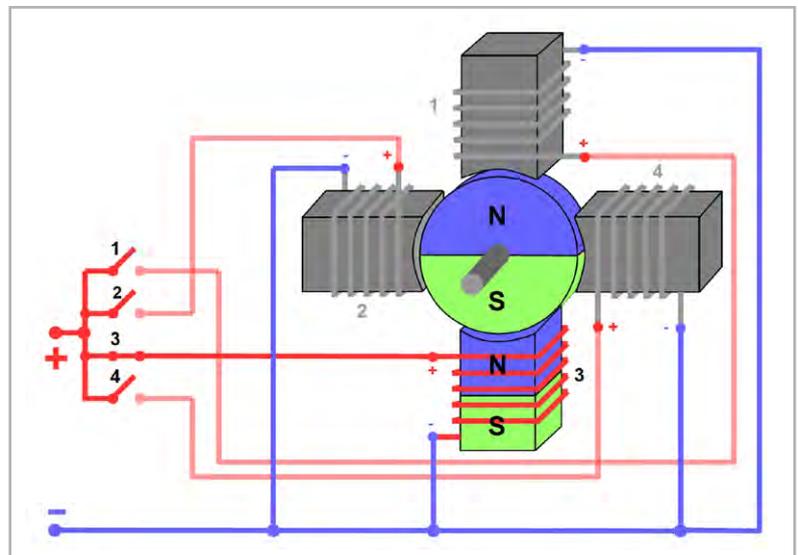
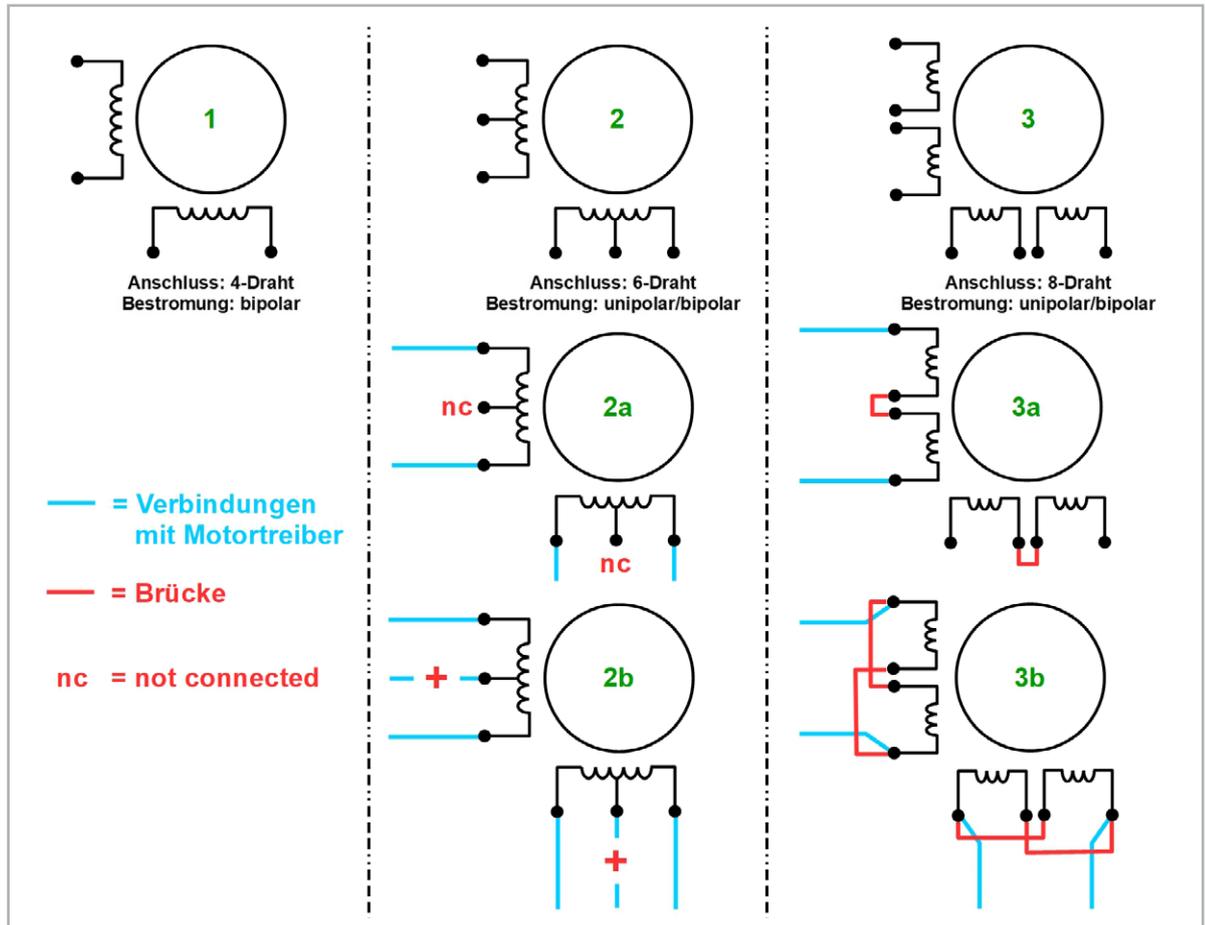


Bild 5: Der magnetisierte Statorpolschuh zieht den gegensätzlich magnetisierten Pol des permanentmagnetischen Rotors an.

Bild 6: Verschiedene Anschlussarten der Phasenspulen eines Schrittmotors



Wenn die Schalter in aufsteigender Reihenfolge schließen und beim Schließen des darauf folgenden Schalters wieder öffnen (... 234123412 ...), dreht der Motor in Viertelschritten links herum. Ist die Schaltersequenz fallend (... 321432143 ...), entsteht eine Rechtsdrehung.

Bestromt man jeweils zwei gegenüberliegende Spulen so, dass sich deren Magnetfelder bei der Drehung des Rotors unterstützen, verdoppelt sich das Drehmoment.

Der **Hybrid-Schrittmotor** vereint die positiven Eigenschaften von Reluktanz-Schrittmotor (hohes Drehmoment) und Permanentmagnet-Schrittmotor (feine Schrittteilung). Diese Kombination bei geringer Baugröße macht ihn universell einsetzbar und zur heute am häufigsten anzutreffenden Bauform. Die nachfolgenden Beschreibungen beruhen teilweise auf der „Knowledge Base“ der Firma [Nanotec](#) auf deren Homepage. Hier finden sich in der Kategorie „Schrittmotoren“ zahlreiche Videos und interaktive Animationen, welche die Funktionsweise und den konstruktiven Aufbau eines Schrittmotors detailliert und anschaulich vorführen.

### Übliche Anschlussarten von Schrittmotoren

Wie bereits erwähnt unterscheidet man zwischen unipolarer und bipolarer Bestromung der Schrittmotorspulen, die im Motorinneren zu zwei Phasen (meist mit A und B bezeichnet) zusammengeschaltet sind. Unipolar bedeutet, dass die Phasen im Betrieb des Motors nicht umgepolt werden, bipolar das Gegenteil.

Am Schaltzeichen eines Schrittmotors in **Bild 6** soll das verdeutlicht werden. Der Kreis stellt den Rotor dar, die Spulen die Statorwicklungen. Die Zeichnungsnummer ist die grüne Ziffer in der Kreismitte. In Zeichnung 1 werden Anfang und Ende der Phasen aus dem Motor herausgeführt, er hat also vier Anschlussdrähte (oder Steckverbinderkontakte). Um ein Stator Drehfeld zu erzeugen, müssen die Phasen entsprechend umgepolt werden, was einer bipolaren Bestromung entspricht. Dieser Motortyp ist heute der Quasi-Standard.

In Zeichnung 2 werden die Phasen in der Mitte angezapft und als eigener Draht herausgeführt. Wir haben es hier also mit sechs Anschlussdrähten zu tun. Wird der Mittelanschluss wie in Zeichnung 2a nicht beschaltet (nc), liegt der Motortyp aus Zeichnung 1 vor, der bipolar bestromt werden muss. Legt man wie in Zeichnung 2b den Mittelanschluss an den Pluspol einer Spannungsquelle und alternierend eines der Wicklungsenden an den Minuspol der Spannungsquelle (Masse), erzeugen die Halbwicklungen der Phasen Magnetfelder mit wechselnder Polarität, ohne dass die Spannung an der Wicklung umgepolt werden muss. Es liegt hier eine unipolare Bestromung vor. Allerdings sinkt das Drehmoment, weil ja nur eine Spulenhälfte betromt wird.

Noch mehr Möglichkeiten zur Gestaltung der Phasen und ihrer Bestromung bietet Zeichnung 3. Hier besteht jede Phase aus zwei Spulen, deren Enden separat aus dem Motor herausgeführt werden. Die somit acht Anschlüsse der Spulen lassen sich nun wie in Zeichnung 3a durch eine Drahtbrücke in Reihe schalten. Lässt man diese unbeschaltet, ist die Anordnung gleich wie in Zeichnung 1 und 2a, d. h., die Phasen sind bipolar zu bestromen.

Werden die Brücken in Zeichnung 3a mit Plus verbunden, entsteht die gleiche Anordnung wie in Zeichnung 2b und eine unipolare Bestromung ist erforderlich. Bei der Parallelschaltung der Phasenwicklungen in Zeichnung 3b muss wiederum bipolar bestromt werden.

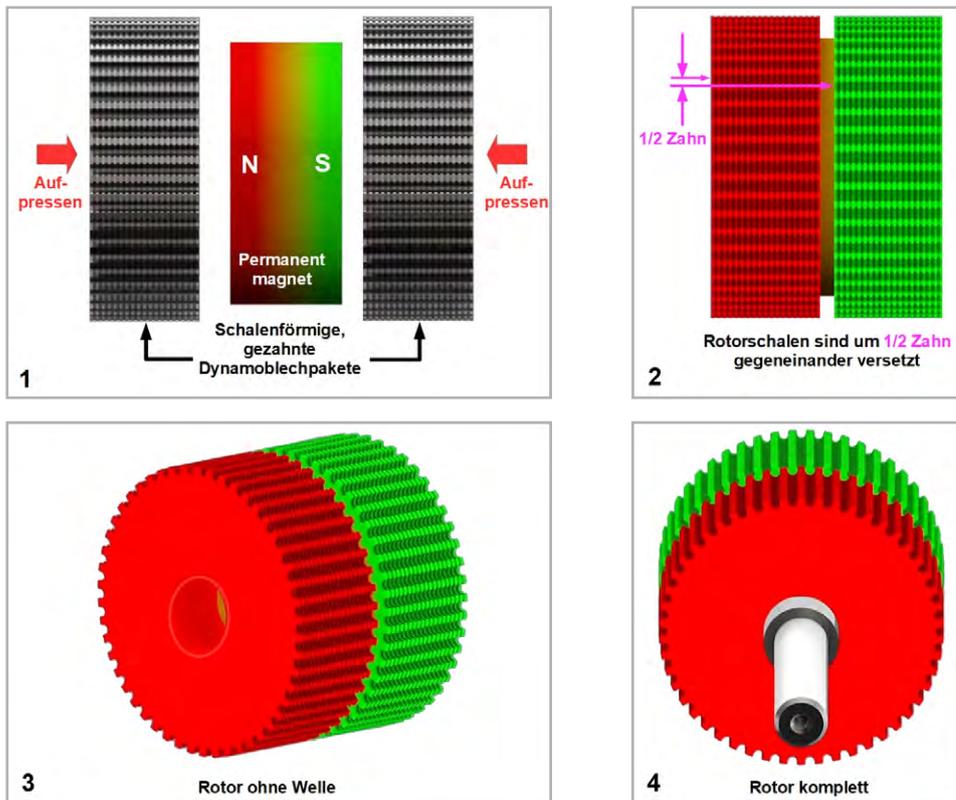


Bild 7: Der Kern des Rotors eines Hybridmotors besteht aus einem Permanentmagneten, auf den gezahnte Weicheisenkappen gepresst werden.



Bild 8: Blick in das Innere eines Hybridmotors (Quelle: Nanotec)

### Aufbau eines Hybrid-Schrittmotors

Der Rotor eines handelsüblichen Hybrid-Schrittmotors besteht aus einem Axial-Permanentmagneten in Kombination mit zwei aufgepressten gezahnten und geblechten (um Wirbelstromverluste kleinzuhalten) Weicheisenschalenkernen, die um einen halben Zahn (Schritt) gegeneinander versetzt sind. So entstehen 50 Polpaare, was eine Polteilung von  $360^\circ/50 = 7,2^\circ$  ergibt. Bild 7 zeigt die Schritte zur Entstehung des Rotors.

Der Stator des Hybrid-Schrittmotors umfasst acht radial angeordnete Polschuhe, um die jeweils eine Spule zur Erzeugung des Stator magnetfeldes gewickelt ist (Bild 8). Die Spulen sind zu zwei Phasen verschaltet, die jeweils abwechselnd bestromt werden. Dabei werden alle Spulen einer Phase gleichzeitig vom Erregerstrom durchflossen.

Jeder Polschuh ist mit sechs Verzahnungen ausgeführt, um eine gezielte Führung des Magnetfelds an den Zahnköpfen zu erreichen (Bild 9). Der Stator hat mit acht Polschuhen mit jeweils sechs Zähnen

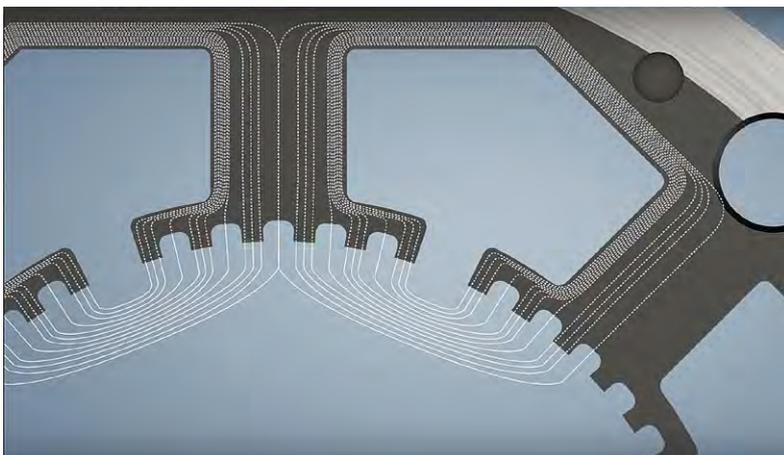


Bild 9: Die magnetischen Feldlinien durch die Polschuhe des Stators teilen sich auf, um dann in den ebenfalls gezahnten Rotor einzutreten.

insgesamt 48 Zähne, also zwei Zähne weniger als der Rotor. Das Resultat zeigt Bild 10, in der die Statorspulen der Übersicht wegen weggelassen wurden.

Die Feldlinienverhältnisse für eine stabile Position des Rotors zeigt Bild 12. Die mittleren beiden Zähne des Stators stehen nahezu perfekt den gegensätzlich gepolten Rotorzähnen gegenüber, wodurch eine maximale Kraftwirkung ohne tangentielle (drehende) Komponente entsteht. Die beiden linken Statorzähne dagegen üben eine rechtsdrehende und die beiden rechten Statorzähne eine linksdrehende Kraft auf den Rotor aus. Dies tangentialen Kräfte sind betragsmäßig gleich groß und heben sich daher auf. Im Ergebnis verharrt der Rotor in einer stabilen Position.

Durch entsprechende schrittweise Bestromung der Statorspulen entsteht ein Drehfeld, das eine drehende Kraftwirkung auf den Rotor ausübt und diesen dadurch in eine Rotation versetzt. Man unterscheidet Voll-, Halb- und Mikroschrittansteuerung.

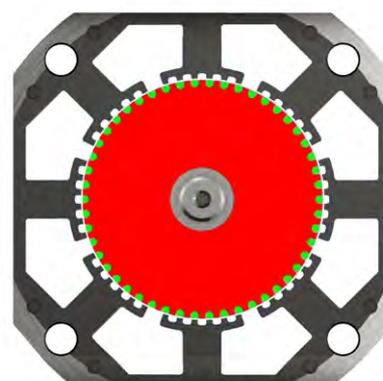
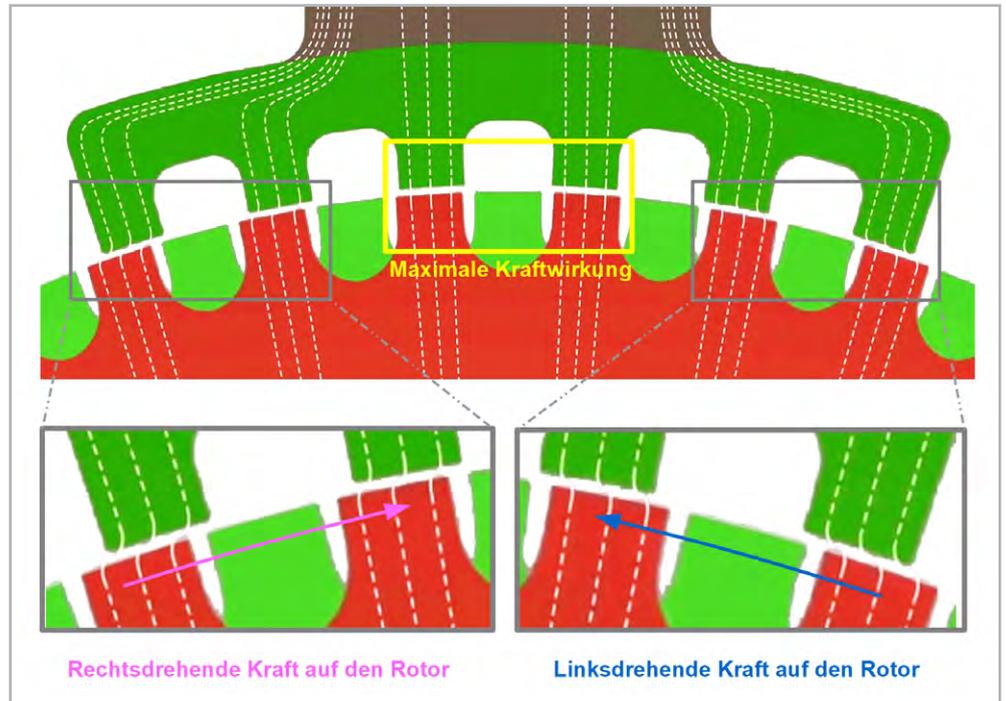


Bild 10: 50 Polpaaren des Stators stehen 48 Polpaare des Rotors gegenüber. Damit entsteht bei Bestromung der Statorspulen eine drehende Kraft, die den Rotor um einen Zahn weiterdreht.

Bild 12: Bei diesem Feldlinienverlauf zwischen den Stator- und Rotorzähnen wird der Rotor fixiert.



**Vollschrittansteuerung**

Im Vollschrittbetrieb werden beide Phasen A und B (alle Wicklungen) voll bestromt. Alle Polschuhe haben dann ein Magnetfeld mit einem ausgeprägten Nord- bzw. Südpol (Bild 11). Zwischen den ungleich magnetisierten Polschuhen und den jeweiligen Rotorpolen entsteht maximale Anziehung (gelbe Pfeile = radiale Kräfte). Im Bereich der gleich polarisierten Polschuhe heben sich dagegen die tangentialen, in beide Richtungen drehenden Kräfte auf den Rotor weitgehend auf (blaue Pfeile).

In Bild 12 steht der Rotor in seiner 0°-Position. Die Bestromung der Phasen erfolgt in vier elektrischen Schritten gemäß dem Phasenschema in Bild 13 (90°/180°/270°/360°). Das Statorfeld dreht sich dabei in vier 45°-Schritten (45°/90°/135°/180°) und nimmt dabei den Rotor mechanisch im Uhrzeigersinn in vier 1,8°-Schritten mit (1,8°/3,6°/5,4°/7,2°). Es müssen also 50 elektrische Perioden des Phasenschemas durchlaufen werden, damit der Rotor eine mechanische Volldrehung mit 200 Einzelschritten à 1,8° absolviert. Bild 14 zeigt den Zusammenhang zwischen der Rotation des magnetischen Statorfeldes und der mechanischen Rotation des Rotors.

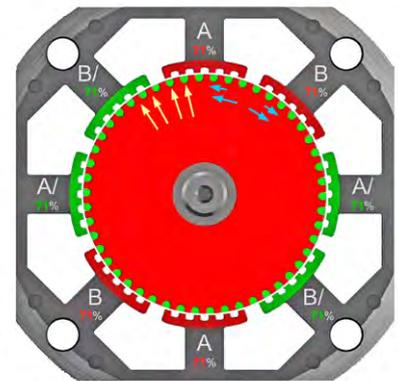


Bild 11: Beim Vollschritt des Rotors werden alle Spulen bestromt. Zwischen den gegensätzlich magnetisierten Polschuhen des Stators entstehen dabei die höchsten Anziehungskräfte, während sich die Drehkräfte auf den Rotor im Bereich der gleich magnetisierten Statorpolschuhe gegenseitig aufheben.

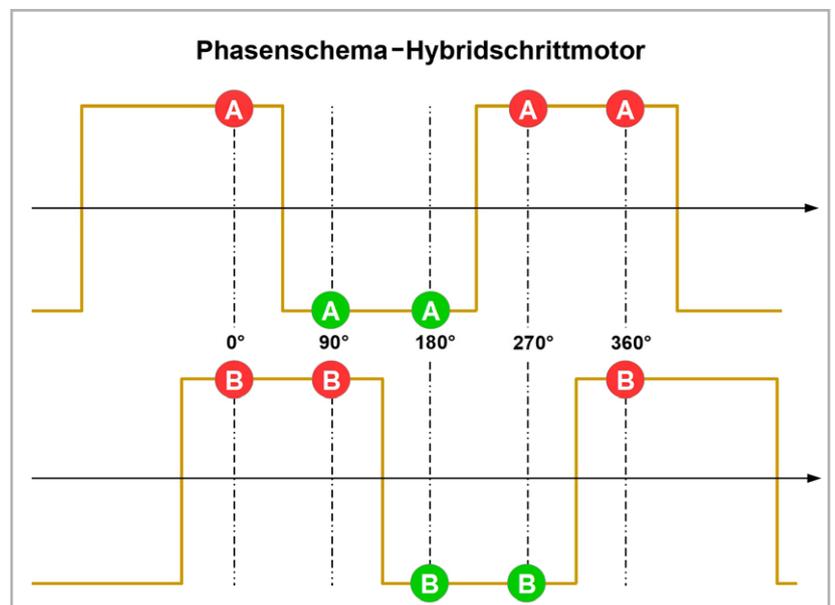
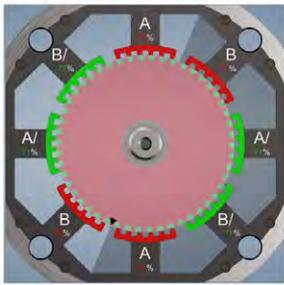
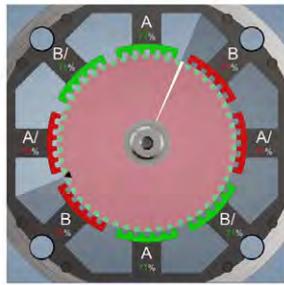


Bild 13: Nach diesem Schema erfolgt die Bestromung der Statorphasen.

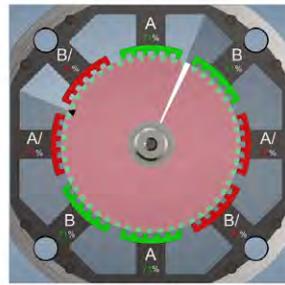
### Rotordrehung beim zweiphasigen Hybrid-Schrittmotor im Vollschrittbetrieb



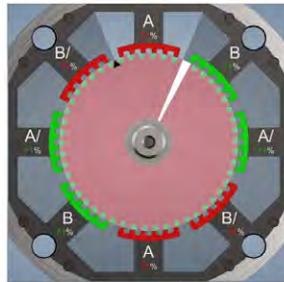
Ausgangsposition 0°



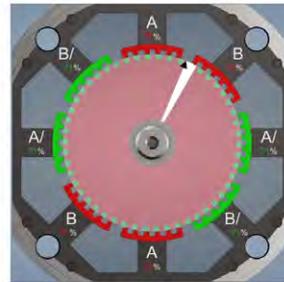
1. Drehschritt auf 1,8°



2. Drehschritt auf 3,6°



3. Drehschritt auf 5,4°



4. Drehschritt auf 7,2°

Beim Wiedererreichen der Ausgangsposition des Statorfeldes im 4. Drehschritt hat sich der Rotor um  $4 \times 1,8^\circ = 7,2^\circ$  gedreht. Eine Drehung des magnetischen Statorfeldes um  $180^\circ$  hat also eine mechanische Drehung des Rotors um  $7,2^\circ$  bewirkt.

Bild 14: Nach einer Periode hat sich der Rotor in vier Vollschritten à  $1,8^\circ$  um  $7,2^\circ$  gedreht.

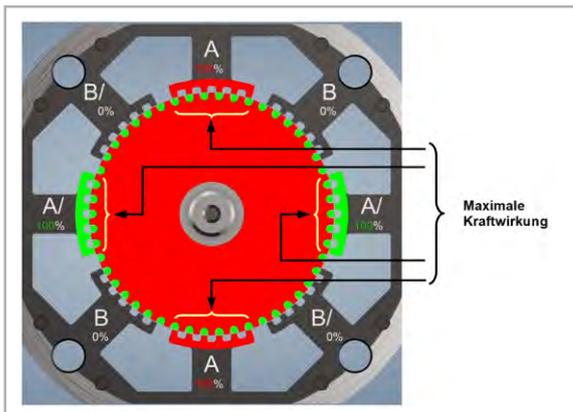


Bild 15: Durch dieses Phasenbestimmungsschema dreht sich der Rotor in Halbschritten.

### Halbschrittansteuerung

Durch die Halbschrittansteuerung wird die Schrittzahl von 200 pro Umdrehung bei der Vollschrittansteuerung auf 400 verdoppelt. Dies ergibt einen ruhigeren Motorlauf und verringert das Auftreten von Resonanzen, die im Vollschrittbetrieb am stärksten auftreten. Erreicht wird dies dadurch, dass im Halbschrittbetrieb abwechselnd eine Phase abgeschaltet wird (Bild 15), was das dann herrschende Drehmoment gegenüber dem vorausgehenden und dem darauf folgenden Vollschritt (in dem alle Phasen bestromt sind) um den Faktor  $1/\sqrt{2} = 0,71$  reduziert. Kompensieren kann man den daraus resultierenden unregelmäßigen Drehmomentverlauf, indem man den drehmomentproportionalen Strom während des Halbschritts um den Faktor  $\sqrt{2} = 1,41$  erhöht.

Das Phasenschema, nach dem die Bestromung der Phasen in acht elektrischen Schritten à  $45^\circ$  erfolgt, zeigt Bild 16.

Eine volle Periode des Bestromungsschemas wird also in den acht Schritten  $45^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 135^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 225^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 315^\circ \rightarrow 360^\circ$  durchlaufen. Das Statorfeld dreht sich dadurch ebenfalls in acht Schritten à  $22,5^\circ$  ( $22,5^\circ \rightarrow 45,0^\circ \rightarrow 67,5^\circ \rightarrow 90,0^\circ \rightarrow 112,5^\circ \rightarrow 135,0^\circ \rightarrow 157,5^\circ \rightarrow 180,0^\circ$ ). Dabei nimmt es den Rotor gemäß Bild 17 um acht mechanische Drehwinkelschritte à  $0,9^\circ$  mit ( $0,9^\circ \rightarrow 1,8^\circ \rightarrow 2,7^\circ \rightarrow 3,6^\circ \rightarrow 4,5^\circ \rightarrow 5,4^\circ \rightarrow 6,3^\circ \rightarrow 7,2^\circ$ ) mit.

### Mikroschrittansteuerung

Hierbei nehmen die beiden Phasenströme annähernd Werte an, die zwei phasenverschobenen Sinuskurven entsprechen. Bild 18 zeigt dies anhand von 32 Bestromungswerten pro Periode. In diesem Zeitraum durchläuft der elektrische Bestromungswinkel in 32 Schritten von  $11,25^\circ$  den Bereich  $11,25^\circ$  bis  $360^\circ$ , der magnetische Statorwinkel in 32 Schritten von  $5,625^\circ$  den Bereich  $5,625^\circ$  bis  $180^\circ$  und der mechanische Rotorwinkel in 32 Schritten von  $0,225^\circ$  den Bereich  $0,225^\circ$  bis  $7,2^\circ$ .

Heute gibt es Schrittmotorentreiberchips, die bis zu 256 Mikroschritte pro Vollschritt realisieren

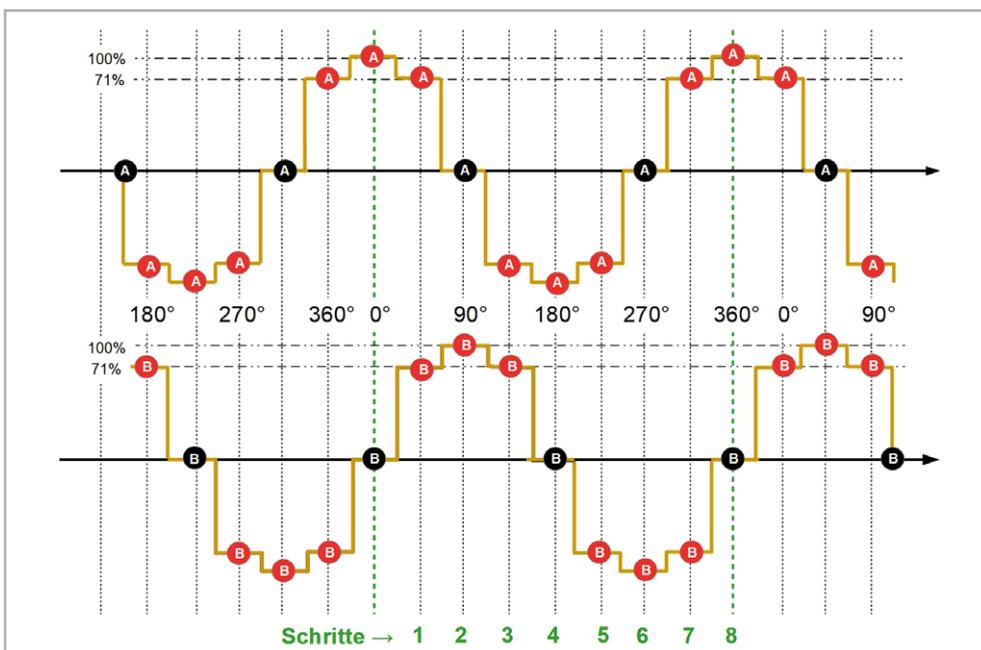


Bild 16: Eine Periode der Bestromung der Phasen (zwischen den beiden grünen Strichen) bewirkt eine Rotordrehung in 8 Winkelschritten à  $0,9^\circ$  um  $7,2^\circ$ .

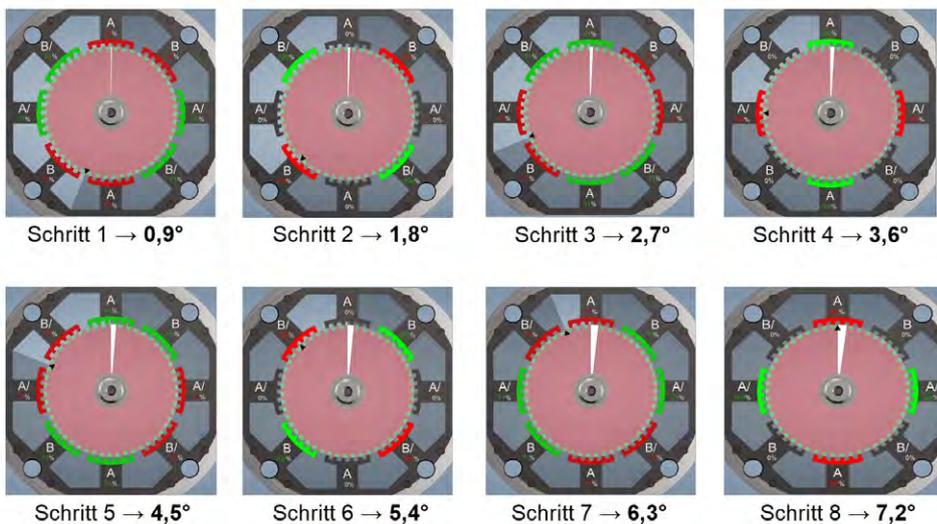
können. Allerdings leidet bei der Schrittverkleinerung die Genauigkeit der Schritte und Probleme mit der Stabilität des belasteten Betriebs können zunehmend auftreten. Darauf soll an dieser Stelle noch nicht näher eingegangen werden.

**NEMA**

In industriellen Anwendungen sind Schrittmotoren mit standardisierten Abmessungen und gleichen elektromechanischen Kennwerten erforderlich. Die Normierung der Motorbaugrößen wurde von der National Electrical Manufacturers Association (NEMA) auf der Grundlage von Zollmaßen vorgenommen. Wenn bei der Herstellung die Festlegungen der NEMA entsprechend der Norm ICS 16-2001 „Motion/Position Control Motors, Controls and Feedback Devices“ vollumfänglich beachtet werden, erlaubt dies die Austauschbarkeit von Motoren unterschiedlicher Hersteller, weil diese ja vergleichbare Motorleistung, Drehgeschwindigkeit, Wellendurchmesser und Befestigungsflansche bei im Wesentlichen gleichen sonstigen Abmessungen aufweisen. Alle NEMA-Schrittmotoren haben 200 Winkelschritte à 1,8° für eine volle Umdrehung des Rotors. Für Märkte, in denen SI-Einheiten verwendet werden, gibt es die auf metrischen Einheiten basierenden IEC-Baugrößen gemäß der Norm IEC 60072 „Maße und Leistungsreihen für drehende elektrische Maschinen“. Beispiele für gängige NEMA-Normen sind in [Tabelle 1](#) aufgeführt.

Bild 19 zeigt einen Hybrid-Schrittmotor JOY-IT NEMA17-06 im Vergleich mit einem 10-Cent-Stück. Die vier Befestigungsbohrungen sind mit M3-Gewinden versehen und ca. 5 mm tief.

**Rotorschritte beim zweiphasigen Hybrid-Schrittmotor im Halbschrittbetrieb**



**Zusammenfassung:**  
 Elektrischer Bestromungswinkel: 45° → 360°  
 Statormagnetfeldwinkel: 22,5° → 180°  
 Mechanischer Rotordrehwinkel: 0,9° → 7,2°

Bild 17: Mit dem Phasenbestromungsschema nach Bild 16 ergeben sich Rotorschrittswinkel von 0,9°.

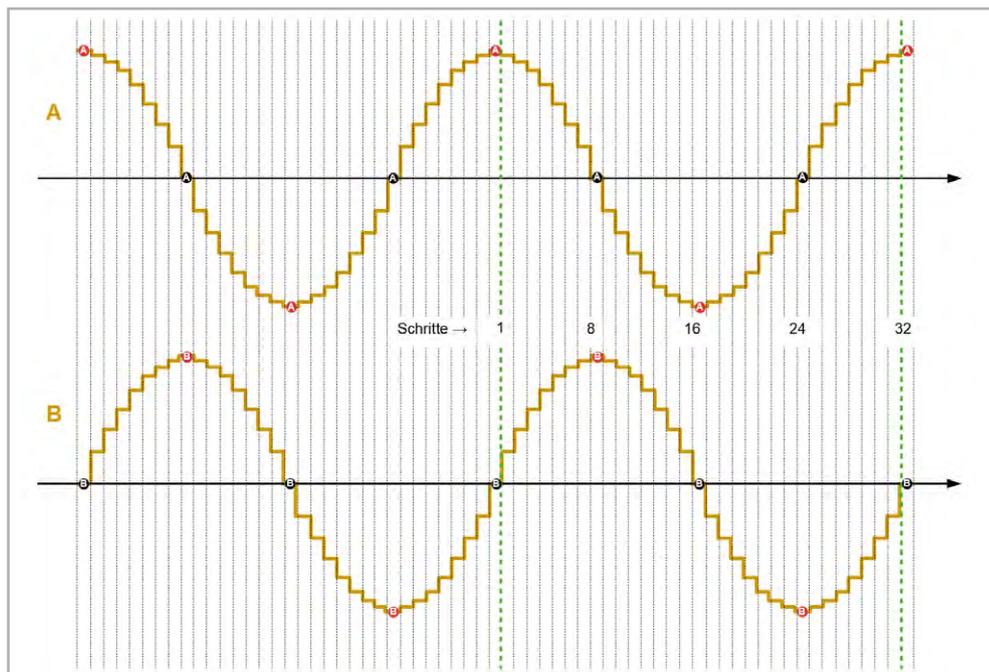
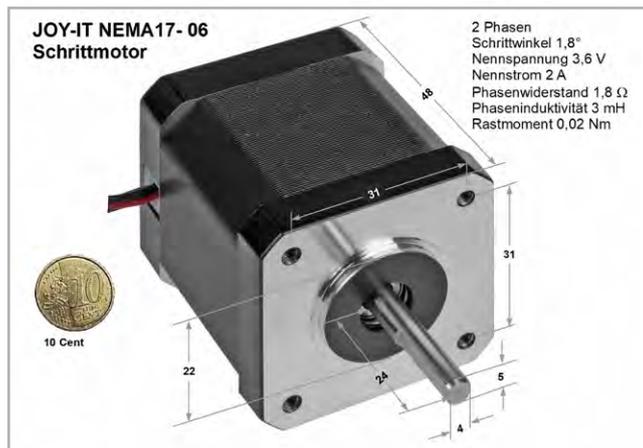


Bild 18: In einer Periode des Phasenbestromungsschemas dreht sich der Rotor in 32 Mikroschritten à 0,225° um 7,2°.

Tabelle 1

NEMA-Bezeichnung	Flanschmaß	typ. Haltemoment
NEMA08	20 x 20 mm	0,036 Nm
NEMA11	28 x 28 mm	0,100 Nm
NEMA14	35 x 35 mm	0,300 Nm
NEMA17	42 x 42 mm	0,500 Nm
NEMA23	56 x 56 mm	0,75–3,0 Nm
NEMA34	86 x 86 mm	3,0–8,0 Nm

Bild 19: Solche NEMA17-Motoren werden oft in 3D-Druckern oder kleineren numerisch gesteuerten Fräsmaschinen eingesetzt.



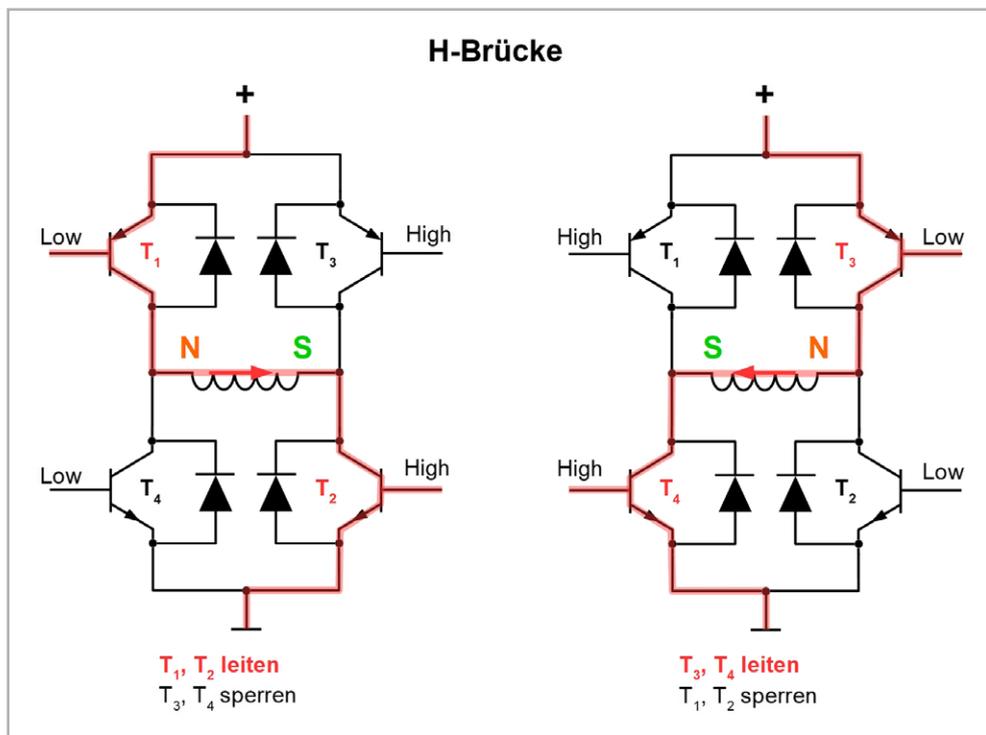


Bild 20: Mit einer H-Brücke lässt sich durch entsprechende Ansteuerung der Transistoren der Stromfluss durch die Phasenspulen umpolen.

Innerhalb des NEMA-Maßsystems unterscheiden sich Motoren mit gleichem Flanschmaß leistungsmäßig nur durch die Baulänge. Das wird durch einen Zusatz -xy gekennzeichnet. So ist z. B. NEMA17-01 ein kurzer (flacher) Motor und NEMA17-06 ein längerer (gestreckter) Motor.

Die Motorquerschnittfläche ist in den meisten Fällen quadratisch, kann aber auch rund sein. In der Praxis sind die Typen NEMA17, NEMA23 und NEMA34 am häufigsten anzutreffen. Die NEMA-Nummern legen nur die geometrischen Abmessungen des Flansches fest, nicht aber die weiteren Eigenschaften wie Schrittwinkel, Drehmomente, Leistungsbedarf usw. So können zwei NEMA17-Motoren völlig andere elektrische oder mechanische Charakteristika aufweisen und sind deshalb nicht notwendigerweise direkt austauschbar.

### Ansteuerung der Phasen eines Hybrid-Schrittmotors

Die korrekte Bestromung der zu zwei Phasen zusammengeschalteten Spulen eines Schrittmotors ist ausschlaggebend für seinen leistungsstarken und runden Lauf. Damit die Spulen in beide Richtungen vom Erregerstrom durchflossen werden können, wird eine Brückenschaltung verwendet, welche die Spulen im Brückenweig (auch Querweig genannt) zum geeigneten Zeitpunkt mit entsprechend gepolten Spannungen oder Konstantströmen versorgen.

Die Grundform einer solchen als H-Brücke oder Vollbrücke bezeichneten Anordnung zeigt Bild 20. Sie besteht aus zwei Zweigen, die aus in Reihe angeordneten Schaltern (hier Bipolartransistoren) bestehen. Die oberen Transistoren T1 und T3 sind npn-Typen, die zum richtigen Zeitpunkt eines der beiden Spulenenenden nach plus durchschalten. Die unteren npn-Transistoren T2 und T4 legen das jeweils andere Spulenenende auf minus. So wird in Bild 20 links

ein Stromfluss durch die Spule von links nach rechts bewirkt, in Bild 20 rechts ist der Stromfluss umgekehrt. Die Freilaufdiode über den Emitter-Kollektor-Strecken der Transistoren übernehmen die von den Spulen im Umpolzeitpunkt erzeugten Gegeninduktionsspannungen und schützen damit die Transistoren. Für jede der beiden Phasen des Motors benötigen wir eine H-Brücke.

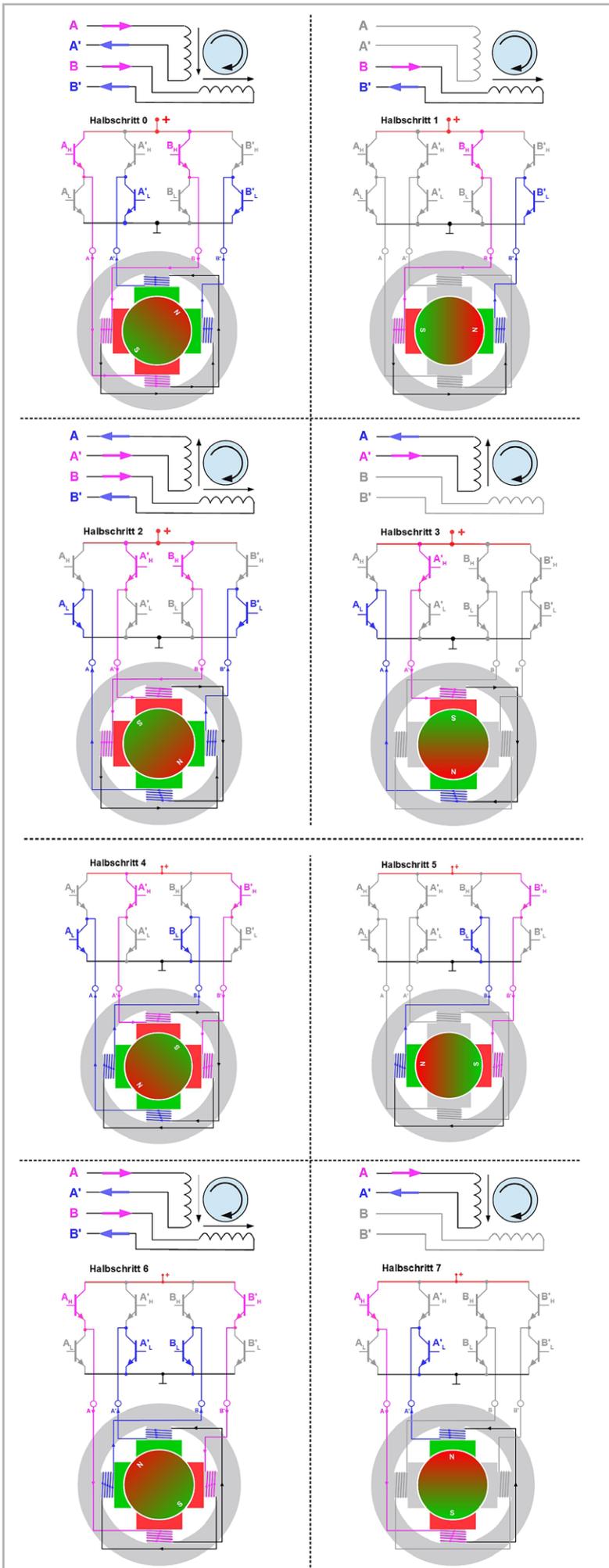
Die Phasensteuerung für Halb- und Vollschrittbetrieb zeigt Bild 21. Dabei ist zu beachten, dass hier auch die oberen Brückentransistoren npn-Typen sind, wodurch ihre Ansteuerungspotenziale entsprechend denen der oberen pnp-Typen in Bild 20 angepasst werden müssen.

Betrachten wir die Halbschritte in Bild 21 etwas detaillierter. Als Eselsbrücke für die verwendete Färbung der magnetischen Polarisierung kann dienen: Nordpol mit 0 wie Rot, Südpol mit Ü wie Grün.

- In Halbschritt 0 werden die Phasen A und B so bestromt, dass der obere sowie der rechte Statorschuh jeweils einen Südpol aufweist und der linke sowie der untere jeweils einen Nordpol. Der permanent magnetisierte Rotor richtet sich nun so aus, dass sein Nord- und Südpol eine maximale Anziehungskraft von den Statorpolen erfährt (Ausrichtung des Rotornordpols nach Nordost).
- In Halbschritt 1 bleibt Phase A unbestromt, was eine Rechtsdrehung des Rotornordpols um  $45^\circ$  in die Ausrichtung Ost bewirkt.
- In Halbschritt 2 werden wieder beide Phasen bestromt und zwar so, dass der linke und obere Statorschuh jeweils einen Nordpol und der rechte und untere Statorschuh jeweils einen Südpol ausbilden. Als Folge dreht sich der Rotor abermals um  $45^\circ$  in die Ausrichtung Südost.
- In Halbschritt 3 ist Phase B unbestromt und die zur Phase A gehörigen Spulen werden so von Strom durchflossen, dass ein Nordpol oben und ein Südpol unten entsteht. Demnach steht sich nach erneutem  $45^\circ$ -Drehschritt der Südpol des Rotors dem Nordpol des Stators gegenüber und zeigt somit nach oben. Entsprechend ist der Rotornordpol in Südrichtung orientiert.

Nach weiteren vier Bestromungsschritten hat der Rotor in acht Einzelschritten à  $45^\circ$  eine Volldrehung absolviert.

Das zugehörige Bestromungsschema zeigt die Tabelle in Bild 22. Man erkennt, dass die Vollschrittbestromung der Phasen aus der Halbschrittbestromung entsteht, indem man die ungeraden Halbschritte 1, 3, 5 und 7 weglässt.



Mode	Vollschritt								
	0	1	2	3	4	5	6	7	
Strangpotenziale	A	1	nc	0	0	0	nc	1	1
	A'	0	nc	1	1	1	nc	0	0
	B	1	1	1	nc	0	0	0	nc
	B'	0	0	0	nc	1	1	1	nc
Ansteuerung H-Brücken-Transistoren	A <sub>H</sub> , A' <sub>L</sub>	1	0	0	0	0	0	1	1
	B <sub>H</sub> , B' <sub>L</sub>	1	1	1	0	0	0	0	0
	A' <sub>H</sub> , A <sub>L</sub>	0	0	1	1	1	0	0	0
	B <sub>H</sub> , B <sub>L</sub>	0	0	0	0	1	1	1	0

Bild 22: In dieser Tabelle sind die erforderlichen Potenziale an den Enden der Strangwicklungen und die zugehörigen Ansteuerpotenziale der H-Brücken-Transistoren zusammengefasst. Die Abkürzung nc bedeutet „not connected“ (nicht verbunden), sodass die zugehörigen Strangwicklungen nicht bestromt sind.

### Vor- und Nachteile von Schrittmotoren

Eine knappe Zusammenstellung der Vor- und Nachteile von Schrittmotoren zeigt **Tabelle 2**. Die Nachteile lassen sich durch mechanisch-konstruktiven Aufwand (Getriebe, elastische Lagerung, Kühlung ...) und/oder eine intelligente Motorsteuerung (Mikroschritte, Positionsüberwachung, drehzahlabhängige Bestromung ...) weitgehend ausgleichen.

Für die Ansteuerung der Phasen eines Hybridmotors sind heute zahlreiche integrierte Schaltungen verfügbar, die auf Breadboards (Adapterplatten mit weiteren Elektronikkomponenten) die einfache Ansteuerung durch Computerhardware ermöglichen. So auch mit dem Raspberry Pi, was in einer weiteren Folge dieser Artikelreihe demonstriert werden soll.



Vor- und Nachteile von Schrittmotoren	
Vorteile	Nachteile
Einfache Kontrolle von Positionierung und Drehgeschwindigkeit	Hoher Stromverbrauch → starke Wärmeentwicklung
Hohe Wiederholgenauigkeit, keine Schrittfehlerakkumulation	Zunehmende Drehzahl → abnehmendes Drehmoment
Maximales Drehmoment bei anlaufendem Motor	Vibrationen im Betrieb
Schnelles Ansprechen auf Starten/Stoppen/Drehrichtungswchsel	Diskrete Drehschritte
Hohe Zuverlässigkeit aufgrund elektronischer Kommutierung (keine Bürsten)	Resonanzen, wenn Schritt-frequenz = Eigenfrequenz des Rotors
Weiter, über Ansteuerimpulsfrequenz stellbarer Drehzahlbereich	Ausfall von Schritten (missing steps) möglich

Tabelle 2

### Weitere Infos

Youtube-Film zur Funktionsweise verschiedener Schrittmotoren (bipolar, unipolar, Reluktanz, Can-Stack) von Nanotec:

[www.youtube.com/watch?v=v7zIzeE5dbo](http://www.youtube.com/watch?v=v7zIzeE5dbo)

Bild 21: Mit der Rechte-Faust-Regel und dem Beachten der Spulenströme lassen sich die magnetischen Polarisierungen der Statorschuhe und daraus resultierend die Ausrichtung des Rotors nachvollziehen.