

Bau eines Warentransport-Roboters

Teil 1: Der Hybridschrittmotor und seine Ansteuerung – Der Bau des Roboters

Von Werner Digel

*Der Bildungsplan der Realschule in Baden-Württemberg für das Fach Technik in Klasse 10 zielt u. a. auf den Kompetenzerwerb bzw. die Erweiterung und Vertiefung von Kompetenzen aus dem Problem- und Handlungsfeld **Information und Kommunikation (IuK)** ab.*

Fundamentale Einsichten und Handlungsmuster sollen durch eine intensive Auseinandersetzung mit exemplarischen technischen Inhalten vermittelt werden. Die dazu notwendige bzw. weiterzuentwickelnde technische Grundbildung sollte aber nicht zu einem einengenden Spezialwissen führen, sondern im Gegenteil zu einer objektiven ganzheitlichen Betrachtungsweise des Projektes anleiten, die sowohl technische wie ökologische und soziale Aspekte beinhaltet.

Ein handlungs- und problemorientierter Technikunterricht, in dem sich Phasen der Wissensvermittlung und der praktischen Arbeit sinnvoll und ergänzend abwechseln, sowie eine Projektauswahl, die der Erfahrungswelt des Schülers entnommen ist, erleichtern nicht nur den Einstieg in ein Projekt, sondern auch die Durchführung. Idealerweise bietet ein Projekt auch Einblicke in ganze Berufsfelder.

Das Zielprojekt Warentransportroboter erfordert Kenntnisse/Kompetenzen aus den Bereichen Mechanik, Elektrik und Elektronik und Informatik. Die Schnittmenge aus diesen 4 Bereichen zeigt das Berufsbild des Mechatronikers.

Auszüge aus dem Bildungsplan für Realschulen in Baden-Württemberg für das Fach Technik; Inhalte des Problem- und Handlungsfeldes *Information und Kommunikation* bezogen auf die

Handlungsperspektive:

- Probleme mit elektrotechnischen und elektronischen Schaltungen lösen;
- Problemstellungen im Bereich Steuern und Regeln mit dem Computer lösen;

- Computerunterstützt Produkte entwickeln und herstellen. Diese Kompetenz sollte bereits am Ende der 8. Klasse erreicht sein.

Inhalte des Problem- und Handlungsfeldes *Information und Kommunikation* bezogen auf die

Kenntnis- und Strukturperspektive:

- Aufgabe, Funktion und den groben Aufbau der IuK-Systeme, die im Unterricht eingesetzt werden, erklären;
- Funktion, Schaltzeichen und Einsatz von im Unterricht verwendeten elektrotechnischen und elektronischen Bauteilen erklären;
- Eigenschaften befehlsprogrammierter IuK-Systeme nennen.

Stationen auf dem Weg zum Zielprojekt Warentransportroboter:

Gesamtplanung, Vorwissen und vorbereitende Aufgaben

Mit den Schülern einer 10. Klasse der Realschule hatte ich zu Beginn des Schuljahres begonnen, mit einem selbst gefertigten Elektronikbaukasten die unterschiedlichsten Probleme aus dem Bereich Elektronik zu lösen.

Hergestellt haben wir unter anderem eine 7-Segment-Anzeige, die über die parallele Schnittstelle zu steuern war. Die Schüler haben bei der Planung und Herstellung der 7-Segment-Anzeige mit den Programmen MegaCAD und Nccad 7 (CAD/CAM) gearbeitet und die Platine für die 7-Segment-Anzeige mit einer CNC-Fräse hergestellt. Nach dem Bestücken der Platine mit LEDs und einem Sub-D-Stecker-25-polig für den Anschluss der 7-Segment-Anzeige, über Druckerkabel und Schnittstelle an den PC sowie dem obligatorischen Funktionstest haben sich die Schüler in die *Programmiersprache FreeBasic* eingearbeitet und auf verschiedenste Art und Weise die 7-Segment-Anzeige zum Leuchten gebracht. Blinklicht, Lauflicht, Aufbaulicht, Countdown waren einige der zu lösenden Aufgaben. Es wurde nur das besprochen und geübt, was für die Ansteuerung der 7-Segment-Anzeige notwendig war. Für die Programmierung einer Schrittmotorsteuerung war dies dennoch eine solide Grundlage.

Das Interface

Planung und Herstellung eines Parallelport-Interfaces, hieß die zweite praktische Arbeit.

Hier war Überzeugungsarbeit notwendig, denn die Schüler wollten natürlich wissen, was man mit diesem Interface alles anfangen kann. Sie erhielten folgende Informationen: Während die 7-Segment-Anzeige über ein Druckerkabel direkt mit der parallelen Schnittstelle verbunden werden konnte, da die LEDs mit der Schnittstellenspannung und dem Strom der

Ausgabeleitungen betrieben werden konnten, benötigen stärkere Verbraucher, wie etwa Roboter, ein Interface, das sie mit höheren Spannungen und stärkeren Strömen versorgt und das über die Schnittstelle gesteuert werden kann. Unser Interface ist also ein Verstärker, der von den schwachen digitalen Signalen der Schnittstelle gesteuert wird, und gleichzeitig ein Schutzschild, der verhindert, dass Kurzschlüsse oder Überlastung die Schnittstelle zerstören.

Durch die Verwendung des Verstärkers ICs ULN2003A und Opto-Kopplern konnte bei der Herstellung des Interfaces, Zeit und Schaltungsaufwand gespart werden sowie der Schutz der Schnittstelle erreicht werden.

Der Roboter

Wenn Schüler „Roboter“ hören, denken sie oftmals an humanoide Roboter oder gar an Androiden, also Roboter, deren Konstruktion der menschlichen Gestalt nachempfunden ist. Auch Staubsauger-Roboter oder Rasenmäher-Roboter waren den Schülern bekannt. Ebenso die Roboter, die in der Automobilproduktion eingesetzt werden, z. B. als Schweiß- oder Lackierroboter, und zur Gruppe der Industrieroboter gehören. Die menschliche Gestalt ist hier oftmals auf einen Arm reduziert, der allerdings sehr beweglich konstruiert wurde (Gelenkarmroboter). Unser Zielprojekt sollte ein solcher Industrieroboter sein, genauer gesagt ein *Warentransportroboter (WTR)*, in einer von Schülern zu bewältigenden, etwas einfacheren Ausführung.

Mit einem sicherlich interessanten Ziel vor Augen war das Interesse der Schüler geweckt. Ein spezielles Interface herzustellen erfüllte nun keinen sinnlosen Selbstzweck mehr, vielmehr wurde es als notwendige und damit wichtige Teillösung auf dem Wege zum Zielprojekt WTR eingeordnet.

Entsprechend motiviert gingen die Schüler ans Werk.

Nach der Herstellung des Interfaces führten die Schüler zur Einstimmung auf den WTR eine Internetrecherche zum Thema Industrieroboter durch. Bei Wikipedia fanden sie nicht nur in-

teressante Bilder, sondern auch eine Definition dieses Robotertyps.

<http://de.wikipedia.org/wiki/Roboter>

Definition nach VDI-Richtlinie 2860:

„Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“

Die Schüler wurden aufgefordert zu überlegen, ob es im Technikbereich Maschinen gibt, die nach dieser Definition als Industrieroboter zu bezeichnen sind.

Sehr schnell konzentrierten sich die Meinungen der Schüler auf unsere CNC-Fräse.

Sie hat 3 Achsen, eine X-, Y- und Z-Achse.

Die Bewegung dieser 3 Achsen ist frei programmierbar, über NC-Code oder CAD/CAM.

Der Fräsmotor ist mit unterschiedlichen Werkzeugen (Fräser, Bohrer) ausrüstbar.

Sie kann unterschiedliche Fertigungsaufgaben automatisch ausführen.

Eine weitere Gemeinsamkeit vieler Industrieroboter ist sicherlich die Eigenschaft des präzisen Arbeitens. Aus Kostengründen lohnt sich ihr Einsatz oftmals nur in der Serienproduktion. Hier müssen enge Toleranzen, über die ganze Serie hinweg, eingehalten werden. Diese wichtige Eigenschaft, präzises Arbeiten über viele Wiederholungen hinweg, musste auch unser Warentransportroboter besitzen, um die an ihn gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Doch wie gelingt es einem Industrieroboter/unsere CNC-Fräsmaschine, so genau zu arbeiten?

Hinführen

Die Schüler haben des Öfteren unsere CNC-gesteuerte Fräse im Einsatz gesehen. Manche durften sie auch,

nach einer notwendigen gründlichen Einarbeitung, benutzen und waren sicherlich beeindruckt, mit welcher Genauigkeit und Geschwindigkeit diese CNC-Fräsmaschine arbeitet.

Stellt man den Schülern die Frage, wie es möglich ist, dass eine CNC-Fräse so genau arbeitet, hört man oft: weil sie computergesteuert ist.

Ein Computerprogramm ist sicherlich in der Lage, auch stärkere Elektromotoren in einer CNC-Maschine über ein geeignetes Interface zu steuern, das heißt die Elektromotoren zum richtigen Zeitpunkt ein- und auszuschalten. Aber ließe sich damit eine Präzision erreichen, wie wir sie von unserer CNC-Fräse kennen?

Probleme erkennen

Ein einfacher Versuch kann dies klären. Man benötigt einen etwas größeren E-Motor mit aufgestecktem Propeller (6 – 12 V). Ein Schüler soll das CNC-Programm darstellen, das seine Ein- und Ausschaltbefehle an die CNC-Steuerung, dargestellt von einem 2. Schüler am Schalter des E-Motors, weitergibt.

Mit dem Ruf „einschalten!“ gibt das CNC-Programm den Steuerbefehl an die CNC-Steuerung. Der 2. Schüler schaltet den E-Motor zeitgleich ein.

Mit dem Ruf „ausschalten!“ gibt das CNC-Programm den nächsten Steuerbefehl an die CNC-Steuerung. Der 2. Schüler schaltet den E-Motor zeitgleich aus, doch der E-Motor läuft durch die Massenträgheit nach.

Übertragen auf unsere CNC-Fräsmaschine könnte dies z. B. bedeuten, dass eine auszufräsende Nut nicht 50 mm sondern 52 mm lang wird. Der Elektromotor ist nun ausgeschaltet und steht still. Wenn nun äußere mechanische Kräfte auf den Elektromotor einwirken, wie z. B. das Gewicht des Fräsmotors an unserer CNC-Fräse auf die Z-Achse, so kann sich die Welle eines leichtgängigen Elektromotors, der die Z-Achse antreibt, um einige Grad drehen und ebenfalls zu Ungenauigkeiten führen. Schüler 2 versucht als äußere Kraft, den stillstehenden E-Motor allein durch Anblasen des Propellers zu drehen. Das gelingt! Fazit:

Ein „normaler“ E-Motor ist als Antrieb für eine CNC-Maschine ungeeignet, trotz bester Computersteuerung.

Anforderungen an eine Lösung formulieren

Die Anforderungen an einen geeigneten E-Motor und seine Steuerung müssten demnach lauten:

- a) In kleinsten Schritten/Winkeln steuerbar durch eine geeignete Software. (CAM). Nur ganze Umdrehungen des E-Motors in die geometrischen Berechnungen einer CAM-Software (**Computer-aided manufacturing, dt. rechnerunterstützte Fertigung**) einfließen zu lassen, würde der angestrebten Präzision, die im 1/10-mm-Bereich liegen soll, schnell Grenzen setzen.
- b) Kein Nachlaufen sowie ein hohes Haltemoment, damit eine erreichte Drehposition der Motorwelle nicht verschoben wird.

Angedachte Lösungsansätze von Schülern

- c) *Verwendung einer Elektronik*, die auch kleinste Drehungen der Motorwelle registriert und zu einem Ablaufprogramm verarbeitet. Diese Lösung tendiert in Richtung Servomotor mit Positionsbestimmungssensor und Servoregler.
- d) *Ein E-Motor, der auf Grund seiner Bauart nur kleinste Drehbewegungen zulässt*, ähnlich dem Rasten eines Mehrfach-Drehschalters.
Es ist naheliegend, bei einem elektrisch betriebenen Motor das EINRASTEN mit „elektrischen Mitteln“ zu lösen. Denkbar wäre eine „elektromagnetische Bremse“. Bei dieser Lösung müsste die Software in der Lage sein, dieses „Rasten“ zu steuern, zu zählen und zu einem Ablaufprogramm zu verarbeiten. Diese Lösung tendiert in Richtung Schrittmotor.

Fazit

Ohne Einsatz eines geeigneten E-Motors, dessen Drehbewegungen von einem Computerprogramm in kleinsten

Schritten gesteuert werden konnte, war das Zielprojekt Industrieroboter nach Meinung der Schüler zum Scheitern verurteilt.

Von Schülern kann nicht erwartet werden, dass sie „das Rad ständig neu erfinden“. Wobei das Rad, im Gegensatz zum Schrittmotor, sicherlich die leichtere Aufgabe wäre. Ausgehend von den beiden Lösungsansätzen, die lobend erwähnt auch technisch umsetzbar sind, lenkte ich die Schüler in Richtung Schrittmotor, da dieser nicht nur einfacher zu begreifen, sondern auch einfacher zu steuern ist. Die möglichen Schrittwerte eines einfachen und preiswerten Schrittmotors fielen bei unserem Projekt kaum ins Gewicht.

Auflösung des Rätsels Schrittmotor

Natürlich wollten die Schüler wissen, welche besonderen E-Motoren die CNC-Fräse antreiben, wie sie aussehen, wie groß sie sind, was sie kosten und vor allem wie sie funktionieren.

Die Schrittmotoren unserer CNC-Fräse sind äußerlich nicht sichtbar. Deshalb zeigte ich den Schülern eine kleine Sammlung unterschiedlicher Schrittmotoren, die sich in Form, Größe, Gewicht, Leistung, Anzahl der Anschlüsse und Preis unterschieden. Wichtige technische Daten, die auch den Schülern geläufig waren, rundeten das Bild ab.

Die Diskussion, welcher Schrittmotor für unseren Modell-Warentransportroboter der geeignetste wäre, war schnell beendet, als ich erklärte, dass der Techniketat nur preiswerte Restposten zulässt, die nicht immer angeboten werden, dann aber sehr schnell vergriffen sind und deshalb beim Einkauf keine große Auswahlmöglichkeit besteht.

Der eingekaufte Schrittmotor war mit 2,95 € äußerst preiswert und wurde mit folgender Produktbeschreibung angeboten:

Unipolarer, kugelgelagerter Steppermotor mit hohem Drehmoment und kompakten Maßen.

Technische Daten:

- **Schrittwinkel 3,6° (100 Schritte)**
- **Betriebsspannung 24 V**

- **Strangwiderstand 140 Ω**
- **Strangstrom 160 mA**
- **Achse (ø x L): 5 x 11 mm**
- **Motormaße ohne Welle (L x B x H): 35 x 42 x 42 mm**

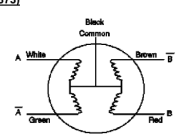
Also ein kräftiger, mechanisch gut verarbeiteter Schrittmotor mit noch geeigneten Außenmaßen.

Bei diesem Preis war zu verschmerzen, dass die Schüler mit der für die Schnittstelle gefährlichen Spannung von 24 V den Schrittmotor und damit auch das Interface betreiben mussten.

Stepper-Motor Howard Ind. P/N 1-19-4202 *
Best.Nr. 510 232

* Baugleich mit Jameco SM4202 (Part.Nr. 105873)

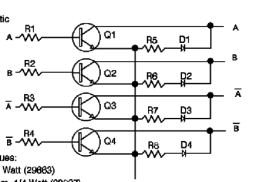
Specifications:
Unipolar (4 Phase)
12 VDC, 150mA
Coil: 75 Ohm, 43mH
3.6 degrees/step
Shaft: 0.197"Ø x 0.43" L
Mounting Hole Spacing: 1.73"
Mounting Hole Diameter: 0.11"
Motor: 1.667"Ø x 1.357" H
Detent Torque: 80 g-cm
Holding Torque: 504 g-cm
Weight: 0.5 Lbs.



Step	A	B	Ā	B̄	Common
1	-	-	•	•	
2	•	•			
3	-	-	•	•	
4	•	•			
5	-	-	•	•	

Applications:
Automation
Robotic Control
Precision Mechanical Control

Driver Schematic



Suggested Values:
R1-R4=1K, 1/4 Watt (25003)
R5-R8=330 Ohm, 1/4 Watt (80687)
D1-D4=1N5817 (28687)

Datenblatt für Stepper-Motor Howard Ind.

Schutzmaßnahmen:

Intern schirmt unser Interface mit Optokopplern, Dioden, Widerständen und Freilaufdioden in den ICs die Schnittstelle gut von den 24 V ab. Seit aber eine herabfallende Schraube dieses Sicherheitssystem durch einen unglücklichen Zufall überbrückte und durch Kurzschluss die Schnittstellenkarte zerstörte, müssen die Schüler

- a) ein schützendes Gehäuse um das Interface bauen, müssen
- b) alle sonstigen blanken und stromführenden Teile sicher isoliert werden und
- c) es darf am WTR und Interface nur gearbeitet werden, wenn keine Verbindung zum Computer besteht.
- d) Bei eingeschaltetem Computer darf keine Verbindung zur Schnittstelle hergestellt oder getrennt werden.

Die im Technikunterricht verwendeten kleinen Elektromotoren haben gewöhnlich 2 Anschlüsse.

Der Schrittmotor, den die Schüler verwenden sollten, besaß 5 Anschlusskabel in verschiedenen Farben.

Ein guter Schüler der Technikgruppe sollte mit Hilfe eines 24-V-Netzgerätes den Schrittmotor zum Laufen bringen.

Alle Versuche scheiterten.

Erst als ich helfend den gemeinsamen Mittelabgriff der 2 Spulen des Schrittmotors, ein schwarzes Kabel, an den Plus-Pol des Netzgerätes anschloss und der Schüler mit dem Minus-Pol des Netzgerätes die anderen Anschlüsse des Schrittmotors antippte, zeigte sich eine kleine Reaktion, eigentlich mehr ein Zucken, wie ein springender Sekundenzeiger. Das war alles.

Mein Hinweis: Dies war der erste Schritt von 100 Schritten, die eine Umdrehung ergeben.

Ohne die Funktionsweise eines Schrittmotors zu kennen, wäre für die Schüler die Suche nach der richtigen Reihenfolge oder Kombination der restlichen Anschlüsse dem Zufall überlassen worden.

100 Schritte für eine Umdrehung, das wollten die Schüler testen und sehen!

Jede Dreiergruppe bekam die abgebildete Testvorrichtung, ihren Schrittmotor mit aufgesteckter Fahne und die Aufgabe, die folgenden Kombinationen zu testen und die Schritte zu zählen:

1. weiß, rot, grün, braun, schwarz an Pluspol
2. braun, grün, rot, weiß, schwarz an Pluspol
3. weiß, rot, grün, braun, schwarz an Minuspol
4. braun, grün, rot, weiß, schwarz an Minuspol

In diese einfache von einem Schüler gebaute Testvorrichtung können 4 Bananenstecker in unterschiedlicher Reihenfolge von unten gesteckt werden.

Der obere schwarze Bananenstecker berührt die unteren Stecker durch die Ansenkung und den geringen Abstand sehr sicher und schnell in der zu testenden Reihenfolge. Die Schritte können gut gezählt werden, und die auf-

gesteckte Fahne zeigt die Bewegungsrichtung.

Ergebnis:

Die getesteten Reihenfolgen der Anschlüsse funktionierten alle. 100 Schritte ergaben eine Umdrehung.

Eine umgekehrte Reihenfolge der farbigen Anschlüsse, ergab auch eine umgekehrte Drehrichtung.

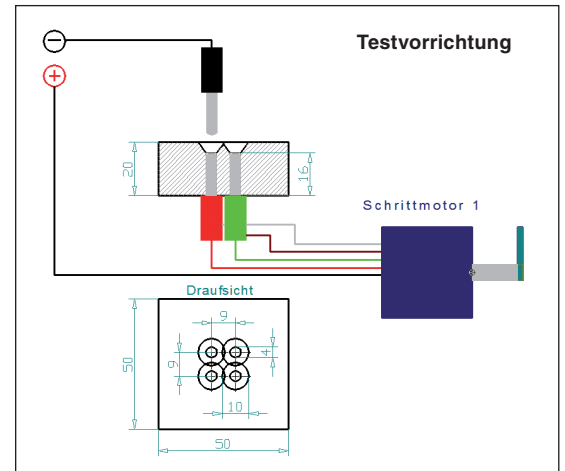
Der gemeinsame Mittelabgriff der beiden Spulen (schwarz) konnte sowohl an den Pluspol wie an den Minuspol angeschlossen werden. Ein Wechsel dieser Pole führte zu einem Wechsel der Drehrichtung.

Ein Schüler verglich den Schrittmotor mit einer Uhr, deren Sekundenzeiger für eine Umdrehung, 60 hüpfende Schritte benötigt.

Zwei Möglichkeiten, wie man einen Schrittmotor anschließen kann, um ihn vorwärts und rückwärts laufen zu lassen, hatten die Schüler nun erfahren. Seine Funktion zu erarbeiten, war der nächste Schritt.

Was hatte sich im Innern unseres Schrittmotors abgespielt, als die verschiedenen Anschlusskombinationen getestet wurden?

Mit Hilfe der Abbildungen 1 bis 4 (zum besseren Verständnis ist nur 1 Polpaar des Rotors eingezeichnet) und unserer



Anschlussfolge – braun, grün, rot, weiß am Minuspol und schwarz am Pluspol – haben wir Folgendes erarbeitet:

Im Folgenden werden die Halbspulen nach ihren verschiedenfarbigen Anschlüssen benannt.

Die Statorzange oben = B

Die Statorzange links = A

AA und BA = Spulen-Anfang

AE und BE = Spulen-Ende

Gedankenspiel:

Der Zeiger einer Uhr (= der Nordpol des Rotors) kann auf 3, 6, 9, 12 Uhr zeigen.

Die 4 Halbspulen sind so auf dem „Zifferblatt“ angeordnet, dass die zusammengehörenden Halbspulen sich gegenüberstehen.

Weiße Halbspule liegt an 6 Uhr

Grüne Halbspule liegt an 12 Uhr

Rote Halbspule liegt an 9 Uhr

Braune Halbspule liegt an 3 Uhr

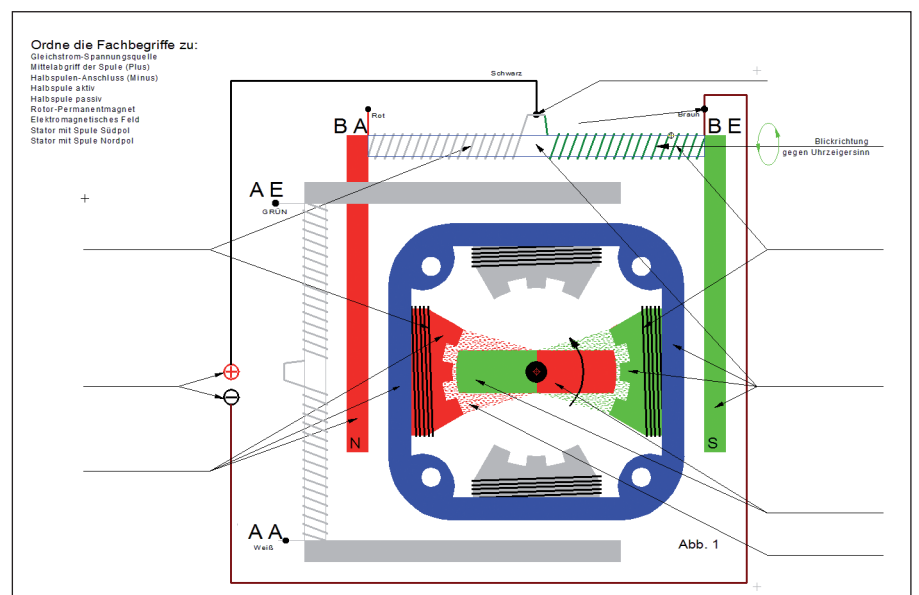


Abb. 1: 1. Halbschritt (Zwischenschritt)

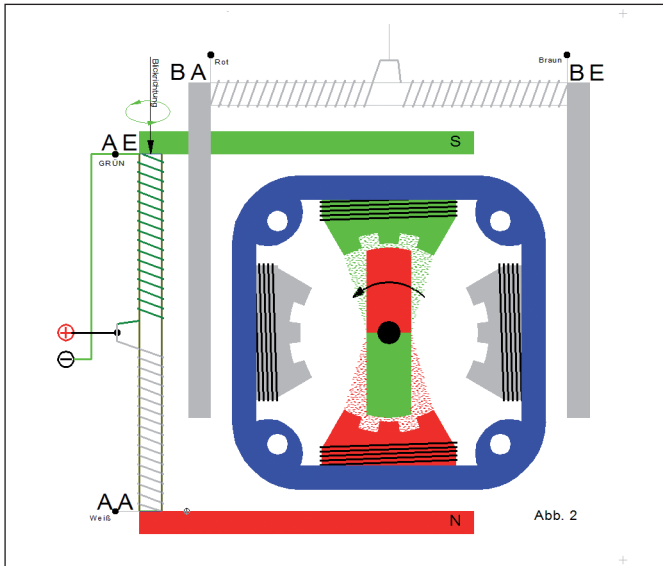


Abb. 2: 2. Halbschritt

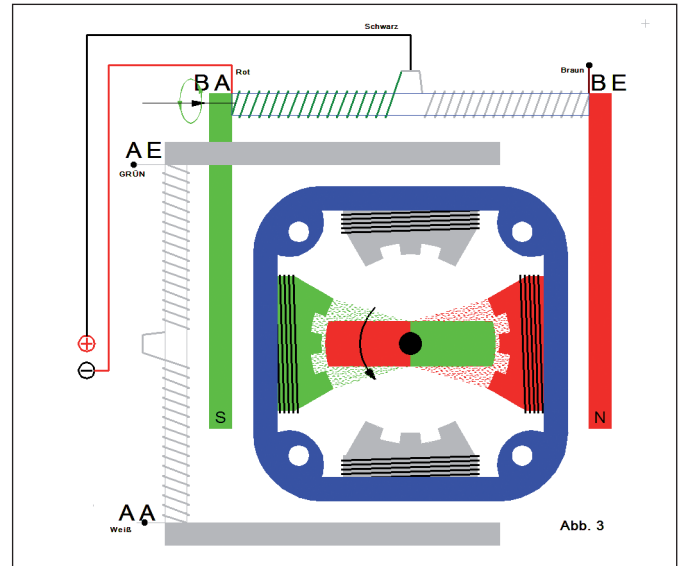


Abb. 3: 3. Halbschritt

Anschlüsse: Braune Halbspule an Minuspol – Mittelabgriff (schwarz) an Pluspol (nur die grüne Hälfte der Spule wird von Strom durchflossen und ist damit wirksam!); die angeschlossene unbewegliche Statorzange B wird durch die stromdurchflossene braune Halbspule zum Elektromagneten mit einem Nord- und Südpol (siehe Merksatz Seite 25). Die Pole der Statorzange ziehen die Gegenpole des beweglichen Rotors an. Der Rotor bewegt sich um einen Schritt (90°), zeigt mit seinem roten Nordpol auf 3 Uhr, da dort die braune Halbspule einen Südpol bildet, und mit seinem grünen Südpol auf 9 Uhr, da dort der Nordpol der braunen Halbspule liegt.

Um den Rotor zu einem weiteren 90°-Schritt in Pfeilrichtung (der rote Nordpol des Rotors zeigt dann auf 12 Uhr) zu bewegen, müssen nun die braune Halbspule ausgeschaltet und gleichzeitig die grüne Halbspule eingeschaltet werden.

Anschlüsse:
Grüne Halbspule an Minuspol

Mittelabgriff:
Schwarzes Kabel an Pluspol

Nur die grüne Hälfte der Spule ist wirksam!

Um den Rotor zu einem weiteren 90°-Schritt in Pfeilrichtung zu bewegen (Rotor-Nordpol auf 9 Uhr), müssen nun die grüne Halbspule ausgeschaltet und gleichzeitig die rote Halbspule eingeschaltet werden.

Anschlüsse:
Rotes Kabel an Minuspol

Mittelabgriff:
Schwarzes Kabel an Pluspol

Im Gegensatz zur Abb. 1 muss nun die Statorzange B so umgepolt werden, dass bei 9 Uhr ein Südpol und bei 3 Uhr ein Nordpol entsteht.

Dies erreicht man durch eine besondere Schaltung der Spulen. Jede Spule wurde durchgehend in einer Richtung auf den Stator aufgewickelt, vom roten Anschluss bis zum braunen Anschluss, und mit einem schwarzen Anschluss in der Mitte versehen. Jede Spule hat also 3 Anschlüsse. Ein Umpolen der Elektromagnete wird folgendermaßen erreicht:

In Abb. 1 ist auf dem Stator B die braune Halbspule an Minus angeschlossen (BE), die Spule ist, vom braunen Anschluss her betrachtet, gegen den Uhrzeigersinn gewickelt. Nach dem Merksatz Seite 25 entsteht dort ein Südpol, ab dem Mittelabgriff ein Nordpol.

In Abb. 3 ist auf dem Stator B die rote Halbspule an Minus angeschlossen (BA), die Spule ist, vom roten Anschluss her betrachtet, auch gegen den Uhrzeigersinn gewickelt. Nach dem Merksatz entsteht dort ein Südpol, ab dem Mittelabgriff ein Nordpol.

Die oftmals schon zu Beginn gestellte Frage von Schülern, wieso nicht die ganze Spule genutzt wird, um ein stärkeres elektromagnetisches Feld zu erzeugen, dürfte nun geklärt sein. Die notwendige Umpolung zwischen den Schritten 1 und 3, bzw. 2 und 4, gelingt am einfachsten mittels dreier Anschlüsse pro Spule und der Einschränkung, nur eine Halbspule nutzen zu können, was ein geringeres Drehmoment zur Folge hat.

Anschlüsse:
Weißer Halbspule an Minuspol

Mittelabgriff:
Schwarzes Kabel an Pluspol

Im Gegensatz zu Abb. 2 muss nun die Statorzange A so umgepolt werden,

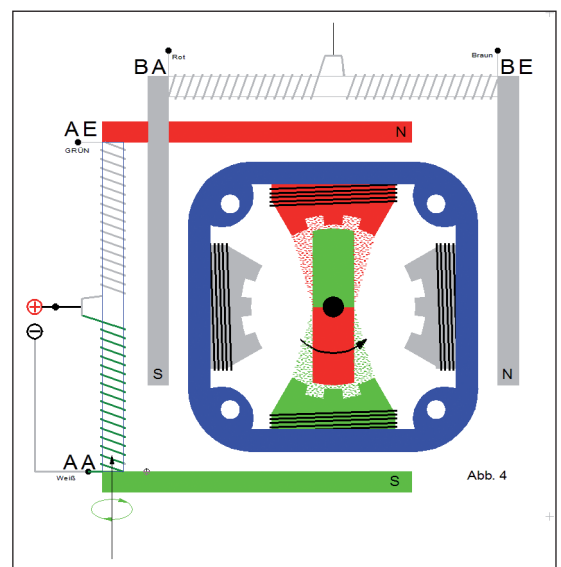


Abb. 4: 4. Halbschritt