

Die folgenden Original-Seiten der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ wurden mit expliziter Genehmigung des Aulis-Verlages (Dr. Brigitte Abel) und des Friedrich-Verlages (Hubertus Rollfing) auf die Webseite www.thomas-wilhelm.net gestellt. Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Zeitschriftenartikels ist:

WILHELM, T.

Welcher Elektromotor ist in Elektroautos?

Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 64, Nr. 8, 2015, S. 13 - 16

Welcher Motor ist in Elektroautos?

Th. Wilhelm

1 Das Monopol im Physikunterricht: der Stromwendermotor

Im Physikunterricht wird in der Regel nur eine Art von Elektromotoren behandelt: der Stromwendermotor. Dies ist zunächst überraschend, denn diese Motore sind komplex und schwer zu verstehen. Historisch gesehen waren sie nicht die ersten (das waren die Unipolarmotore) und technisch gesehen sind sie nicht die wichtigsten (am meisten werden Asynchronmotore genutzt). Bei den Schülern entsteht aber so der Eindruck, alle Elektromotore seien so aufgebaut.

Für dieses Vorgehen sind verschiedene Gründe denkbar: Die Stromwendermotore finden sich als Kleinmotore in fast allen Haushaltsgeräten und werden als Spielzeugmotore verwendet. Man hat damit eine wichtige Anwendung der Polregel für Magnete oder der Drei-Finger-Regel für die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter und man kann an diesem Beispiel das technische Prinzip der Selbststeuerung unterrichten, indem man zeigt, wie der Läufer (= Rotor) selbst abhängig von seiner Position den Strom durch sich selbst steuert. Entscheidend ist aber vielleicht, dass man dies schon immer so gemacht hat.

Ein Stromwendermotor wird allerdings niemals in heutigen Elektroautos verwendet. Von Toyota über Honda bis hin zu BMW und Mercedes werden von nahezu allen Herstellern Drehstrom-Synchronmotore verwendet. Deshalb soll hier aufgezeigt werden, wie man diesen im Unterricht behandeln kann. Ein Drehstrom-Asynchronmotor wurde beim BMW X5 Efficient Dynamics von 2004 verwendet und wird aktuell praktisch nur noch von Tesla im Elektro-Roadster eingesetzt, weshalb auf diese hier nicht eingegangen werden soll.

2 Unterteilung der Elektromotore

Für Lehrkräfte kann es hilfreich sein, eine Kategorisierung der Vielzahl aller Elektromotore zu kennen. Aus technischer und physikalischer Sicht lassen sich drei Typen von Elektromotore unterscheiden: die Unipolarmotore, die selbstgeführten Motore und die fremdgeführte Motore (siehe Abb. 1).

Bei Unipolarmotoren, auch Monopolar-motore oder Homopolar-motore bezeichnet, bewegt sich ein stromdurchflossener Leiter durch ein unveränderliches Magnetfeld. Die Motore können nicht mit der Pol-

regel erklärt werden, sondern man benötigt für eine Erklärung die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem Magnetfeld (Drei-Finger-Regel). Wegen ihres geringen Wirkungsgrades finden sie in der Technik keine Anwendung mehr, sind aber sowohl aus historischer Sicht (Faraday'scher Rotationsapparat, Barlow'sches Rad) als auch aus didaktischer Sicht interessant. Sie waren die ersten Elektromotore, die eine kontinuierliche Drehbewegung ermöglichten. Außerdem gibt es hierzu verschiedene Möglichkeiten des Low-Cost-Nachbaus, die mit sehr einfachen Mitteln realisiert werden können [1].

Bei allen anderen Motoren wird ein sich im zeitlichen Ablauf veränderndes Magnetfeld benötigt. Je nach Aufbau des Motors handelt es sich hierbei um ein Wechselfeld oder ein Drehfeld. Der Unterschied zwischen selbstgeführten und fremdgeführten Motoren besteht dann nur noch in der Art der Ansteuerung des sich ändernden Magnetfeldes. Bei den selbstgeführten Motoren beeinflusst die jeweilige Läuferstellung das magnetische Wechselfeld, d. h., der Läufer schaltet sich automatisch ein Magnetfeld. Bei fremdgeführten Moto-

Abb. 1: Überblick über Elektromotore

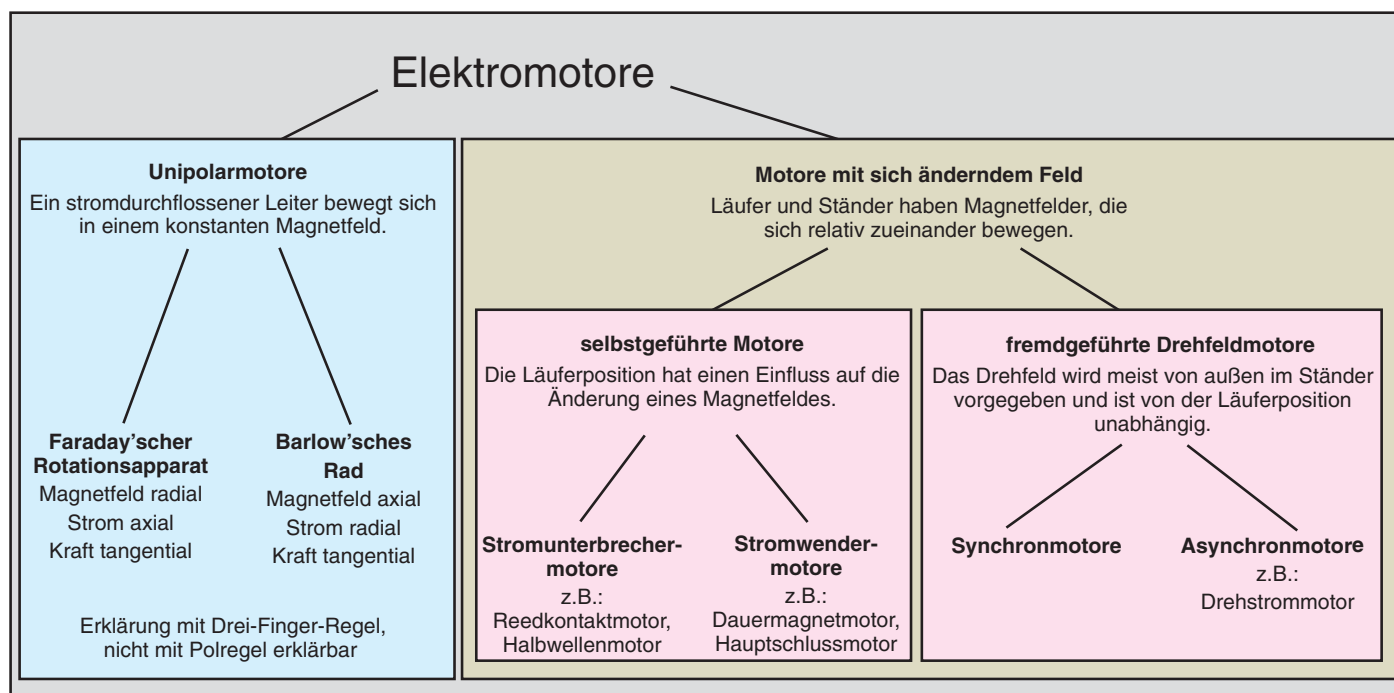




Abb. 2: Drehbar aufgehängter Hufeisenmagnet bewegt Magnetnadel



Abb. 3: Magnetrührer als „Hufeisenmagnet ersatz“ mit Blick ins „Innere“

ren erfolgt die Ansteuerung von außen z. B. über die Netzfrequenz oder einen Mikrocontroller, d. h. ohne Rückmeldung der aktuellen Läuferposition.

Ein Motor mit Stromunterbrecher ist ein selbstgesteuerter Motor, bei dem nur bei einem Teil einer Umdrehung das Magnetfeld eingeschaltet ist. Auf den Läufer wirkt also nur während eines Teils der Umdrehung ein beschleunigendes Drehmoment, beim anderen Teil dreht er sich wegen der Drehimpulserhaltung weiter, bis er wieder in einer Position ist, bei der das Magnetfeld eingeschaltet wird. Die Überprüfung der Läuferstellung und die Stromunterbrechung kann über Schleifkontakte oder über berührungslose Sensoren wie Reedkontakte erfolgen. Solche ein-

fachen Motore finden in der Technik kaum Anwendung. Im Schulunterricht ist der Motor mit Stromunterbrecher allerdings sehr interessant, da er als Vorstufe eines Motors mit Stromwender angesehen werden kann und leicht verschiedene Varianten von Schülern gebaut werden können [1]. Beim Stromwendermotor wird der Strom, der durch die aktive Spule fließt, dagegen nicht nur an- bzw. abgeschaltet, sondern umgepolt.

Unter fremdgeführten Drehfeldmotoren versteht man Elektromotoren, bei denen die Erzeugung eines magnetischen Drehfeldes ohne Rückmeldung der aktuellen Läuferposition geschieht. Das bedeutet vor allem, dass die Drehzahl des Drehfeldes vorgegeben ist und sich nicht rückwirkend verändert. Beispiele sind der Schrittmotor sowie der Drehstrom-Synchronmotor und der Drehstrom-Asynchronmotor. Fremdgeführte Drehfeldmotoren werden in der Schule kaum behandelt, obwohl sie z. T. sogar einfacher sind, was die Erklärung der Funktionsweise betrifft. Bei Drehstrom-Synchronmotoren wird das Magnetfeld des Läufers durch Gleichstromspulen oder durch Dauermagnete erzeugt, was im nächsten Abschnitt aufgezeigt wird. Bei Asynchronmotoren wird das Magnetfeld des Läufers induktiv erzeugt, sodass man die Motore mit Induktion und Lenz'scher Regel erklären kann [1, 2, 3]. Das ist anspruchsvoller, aber eine interessante Anwendung der Induktion.

3 Drehstrom-Synchronmotore

3.1 Prinzip

Der Begriff „synchron“ stammt aus dem Altgriechischen und bedeutet so viel wie „gleichzeitig“ oder „zeitlich übereinstimmend“. Bei den Synchronmotoren handelt es sich um Elektromotoren, bei denen sich der Läufer gleichzeitig mit dem Drehfeld dreht. Die Drehzahl des Läufers (= Rotor) ist demnach genauso groß wie die Drehzahl des Drehfeldes im Ständer (= Stator).

Veranschaulichen lässt sich dies durch einen einfachen Versuch. Man legt einen Kompass auf den Tisch und nimmt einen Stabmagneten in die Hand. Dann wird der Stabmagnet gleichmäßig im Kreis um den Kompass bewegt, ohne den Kompass zu berühren. Dabei stellt man fest, dass sich nun auch die Kompassnadel im Kreis dreht. Der Stabmagnet entspricht hier dem Ständer und die Kompassnadel dem Läufer, an dem man sich das Rad des Elektroautos befestigt denken kann.

Ein besseres Modell erhält man, wenn man einen Hufeisenmagneten an eine Schnur so aufhängt, dass der Hufeisen-

magnet knapp über einem Kompass oder einer spitzengelagerten Magnetnadel hängt (siehe Abb. 2). Die Magnetnadel soll dabei genau mittig unter dem Hufeisenmagneten auf der Tischplatte liegen. Bringt man den Hufeisenmagneten nun in Rotation, indem man ihn einige Male um seine Längsachse dreht und dann wieder loslässt, drehen sich die Pole des Magneten um die Magnetnadel und man kann beobachten, dass sich die Nadel immer mit gleicher Winkelgeschwindigkeiten mit dem Magneten mitdreht.

Anstelle des Hufeisenmagneten kann man einen Magnetrührer verwenden (aus Sicherheitsgründen besser ohne Heizfunktion). Im Inneren eines solchen Rührers befinden sich auch Permanentmagnete, die mithilfe eines kleinen Elektromotors gedreht werden (in der Fotomontage von Abb. 3 wird das Innere des Gehäuses sichtbar und die sich drehenden Magnete sind farblich hervorgehoben). Auf einen solchen Magnetrührer werden von Chemikern Gläser mit Flüssigkeiten gestellt, die umgerührt werden sollen, wozu man in das Gefäß einen kleinen Magneten (= „Rührfisch“) gibt, der sich mitdreht. Für ein Modell eines Synchronmotors stellt man auf den Magnetrührer eine Magnetnadel und erhöht ganz langsam die Drehzahl. Die Nadel wird dann dem aktiven Magnetfeld synchron folgen.

Diese Versuchsaufbauten stellen noch keinen Elektromotor dar, zeigen aber schon das Grundprinzip: Es wird im Ständer ein kontinuierliches Drehfeld erzeugt und der Läufer als Dauermagnet folgt. Bei den heutigen Elektroautos besteht der Läufer aus Neodym-Magneten, obwohl auch von konstantem Gleichstrom durchflossene Elektromagnete denkbar wären. Der eigentliche Trick besteht darin, wie das Drehfeld erzeugt wird.

3.2 Ein Drehfeld mittels ortsfesten Spulen

Ein besseres Modell eines Synchronmotors erhält man, wenn man das rotierende Magnetfeld nicht mit einem Dauermagneten, sondern mithilfe von drei Spulen erzeugt, durch die drei um 120° phasenverschobene Ströme fließen, die mittels Elektronik erzeugt werden. Die Frage ist nur, wie man den Schülern ohne Mathematik anschaulich erklärt, dass die drei Teilfelder der drei Spulen zusammen ein Magnetfeld ergeben, dass an dem Punkt in der Mitte mit konstantem Betrag und konstanter Winkelgeschwindigkeit rotiert.

Eine Möglichkeit, dies mit einem Arbeitsblatt deutlich zu machen, wird in [4] dargelegt. Man zeichnet demnach nach je-

weils einem Sechstel der Schwingungsdauer das Magnetfeld, das jede einzelne Spule am Mittelpunkt erzeugt, als Pfeil an den Mittelpunkt ein, wobei die Länge des Pfeils die Stärke des Magnetfeldes wiedergibt und die Spitze des Pfeils in die Richtung des Magnetfeldes zeigt. Dann addiert man die drei Pfeile vektoriell, indem man sie mit ihrer Länge und Richtung aneinanderhängt. Das Resultat ist ein Pfeil, der immer die gleiche Länge hat und jeweils 60° weiter gewandert ist.

Einfacher ist es, wenn man eine Simulation für diese Konstruktion hat, die fast kontinuierlich das Gesamtmagnetfeld in der Mitte bestimmt. Eine entsprechende Animation steht unter [5] als Film zur Verfügung (siehe Abb. 4). Im grünen Teilbild 3 der Abb. 4 werden die drei Magnetfelder addiert. Im blauen Teilbild 4 der Abb. 4 sieht man das Ergebnis: das Gesamtmagnetfeld an der einen Stelle in der Mitte.

Eine andere Simulation mit der Software „EUKLID DynaGeo“ steht unter [6] zur Verfügung (Autor: R. Kandsperger) (siehe Abb. 5). Hier kann man sogar die Amplitude des Stromes in den Spulen bzw. des Magnetfeldes der Spulen sowie den Winkel zwischen den Spulen variieren.

3.3 Funktionsmodelle mit Spulen

Um ein rotierendes Magnetfeld mit Spulen zu erzeugen, braucht man drei Spulen im Winkel von je 120° sowie drei um 120° phasenverschobene Spannungen. Zur Erzeugung der drei Spannungen ist es nicht günstig, einen Drehstromtrafo zu verwenden (z. B. Phywe Artikel-Nr. 13665-96 oder LD-Didactic 521291), der nur Spannungen mit 50 Hz bietet (am besten mit verstellbarem Spannungswert). Nötig ist die Verwendung eines Frequenzumrichters oder Dreiphasengenerators, bei dem auch die Frequenz frei eingestellt werden kann (z. B. LD-Didactic Katalog-Nr. 5721G oder LD-Didactic Artikel-Nr. 8-6715580-000-10-0) oder zumindest in Stufen (z. B. Conatex Bestellnummer 1102080). Hier wird die Spannung nicht von Netz heruntertransformiert, sondern mittels Elektronik erzeugt, sodass die Frequenz und die Spannungen geregelt werden können.

Diese phasenverschobenen Spannungen werden dann an drei Spulen mit Eisenkernen angelegt, die im Winkelabstand von 120° um einen Läufer platziert sind, für den eine große Kompassnadel verwendet wird. Eine Möglichkeit ist, die Maschinen Grundeinheit von LD-Didactic zu verwenden, zu der es auch einen aufsteckbaren Permanentmagneten in der Form einer Magnetenadel gibt (siehe Abb. 6). Dabei ist

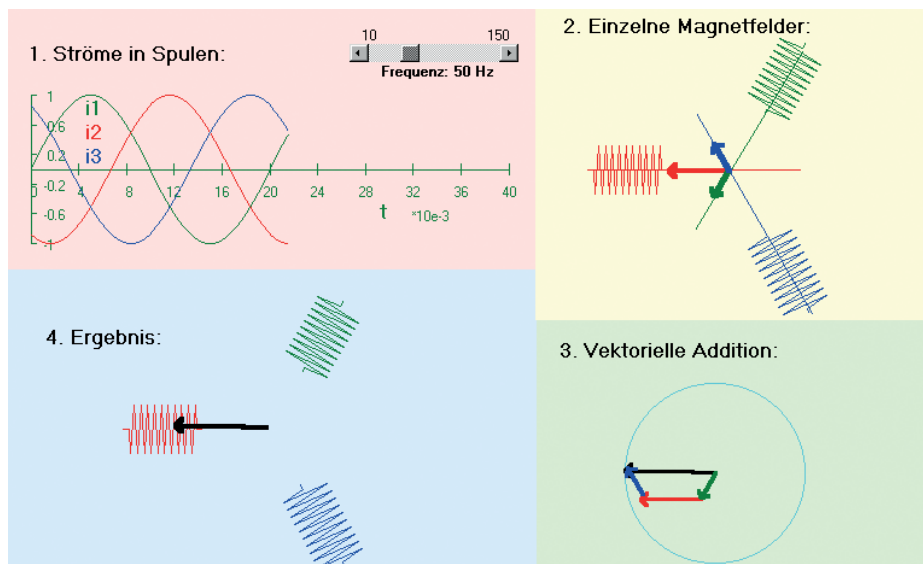


Abb. 4: Simulation „Addition dreier phasenverschobener Magnetfelder zu einem rotierenden Magnetfeld“ [5]

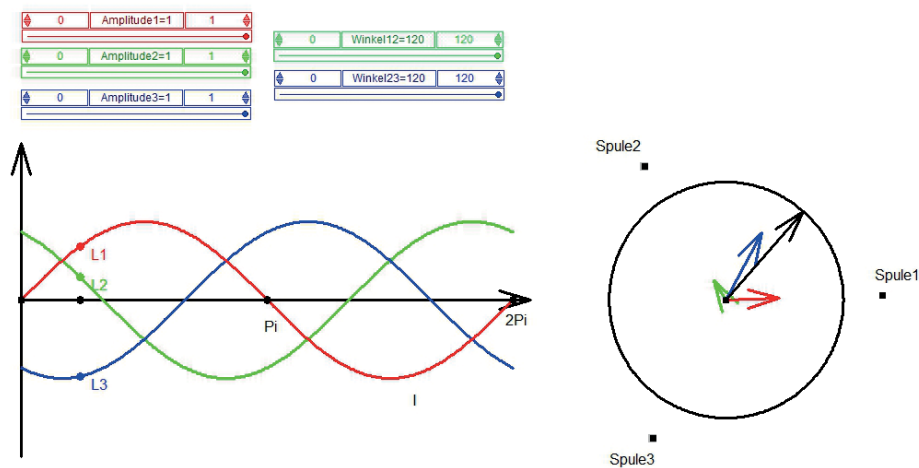


Abb. 5: DynaGeo-Simulation „Addition dreier phasenverschobener Magnetfelder zu einem rotierenden Magnetfeld“ [6]

darauf zu achten, dass man immer die gleiche Seite der Spulen an den Nullleiter anschließt. Zunächst kann man feststellen, dass man über die Frequenz der Spannungen die Rotationsgeschwindigkeit des Läufers steuern kann. Schließlich sieht man aber auch, dass bei einer zu hohen Frequenz der Läufer dem schnellen Feld nicht mehr synchron folgen kann.

Ein anderes Modell eines Synchronmotors kann mit Spulen (600 Windungen) und Eisenkernen sowie einer Kompassnadel als Läufer auf dem Tisch nachgebaut werden (siehe Abb. 7). Dazu muss man die drei Spulen per Augenmaß in einem 120° -Winkelabstand um die Kompassnadel aufstellen. Der Abstand darf nicht zu gering sein, da die Kompassnadel sonst umgeworfen wird. Er darf aber auch nicht zu groß sein, da die magnetische Wirkung mit der Entfernung stark abnimmt. Auch hier folgt der Dauermagnet dem Magnetfeld in gleicher Geschwindigkeit und die Drehgeschwin-

digkeit des Motors lässt sich über die Frequenz der Spannungen steuern.

3.4 Vor- und Nachteile

Die Schleifkontakte eines Stromwendermotors sind beim Betrieb des Motors ständiger Belastung ausgesetzt. Wie ihr Name schon sagt, schleifen sie und werden so mit der Zeit abgerieben und verbraucht. Außerdem kann es Funkenüberschläge geben, die besonders bei großen Motorleistungen erheblichen Verschleiß verursachen. Durch eine übermäßige Funkenbildung entsteht Hitze, die zusätzlich den Verschleiß verstärkt. Bei großen Motoren werden die Schleifkontakte dann evtl. ausgetauscht, Haushaltsgeräte werden bei abgenutzten Kohlestiften weggeworfen.

Wenn beim Synchronmotor der Läufer aus einem Dauermagneten besteht, muss der Strom nicht in den beweglichen Teil des Motors eingespeist werden. Da es keine Schleifkontakte gibt, gibt es auch keinen

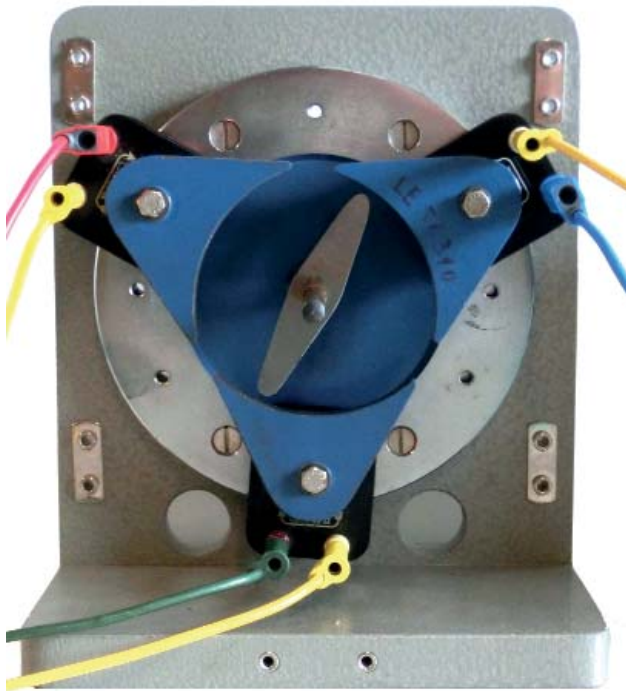


Abb. 6: Drei Spulen auf der Maschineneinheit von LD-Didactic mit Magnetnadel als Läufer (gelb ist der Nullleiter; rot, blau und grün die drei Phasen)

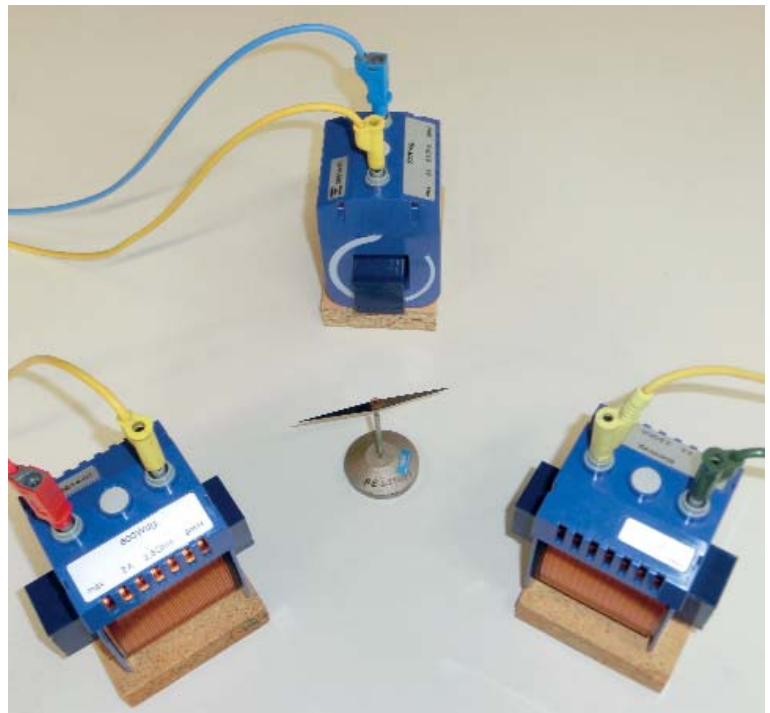


Abb. 7: Drei frei positionierte Spulen mit Kompassnadel als Läufer (der gelbe Nullleiter ist hier immer in der Mitte angeschlossen)

Verschleiß und der Motor ist wartungsfrei. Die technische Kunst liegt darin, das rotierende Magnetfeld im Ständer zu erzeugen. Aus der Gleichspannung des Akkus müssen nämlich dazu mithilfe etlicher Elektronik drei Wechselspannungen erzeugt werden, die gegeneinander zeitlich verschoben sind.

Probleme beim Synchronmotor bereitet allerdings der Anlaufvorgang. Man könnte das vergleichen mit dem Aufspringen einer Person auf einen fahrenden Zug. Je größer die Relativgeschwindigkeit zwischen Person und Zug, desto schwieriger wird es für die Person aufzuspringen. Genauso schwer ist es demnach für den Läufer, auf den „Zug“ des Drehfeldes aufzuspringen, also den Synchronbetrieb zu erreichen.

Kritisiert wird auch, dass das Neodym, das als Dauermagnet in den Motoren verwendet wird, zu den Seltenen Erden zählt. Es wird u. a. zum Färben und in vielen starken Magneten genutzt, z. B. für Kernspintomographen, Festplatten, Lautsprecher, Generatoren und Motore. Auch dieser Rohstoff steht nur begrenzt zur Verfügung und wird z.T. umweltschädlich abgebaut. Zusätzlich machen wir uns damit von China als größten Lieferanten abhängig.

4 Fazit

Die Grundidee der Drehstrom-Synchronmotore, die sich in heutigen Elektroautos befinden, kann im Physikunterricht leicht aufgezeigt werden. Erprobte Arbeitsblätter für eine entsprechende Station eines grö-

ßeren Lernzirkels zu Elektromotoren findet man in [7]. Bereits wenn die magnetische Wirkung bzw. die Polregel bekannt ist, kann schon die Funktionsweise des Synchronmotors gezeigt werden. Somit können Synchronmotore bezüglich des physikalischen Prinzips der Krafterzeugung als die einfachsten Motore bezeichnet werden.

Wenn die Drei-Finger-Regel bekannt ist, bietet sich der Unipolarmotor als Anwendung an. Ist die Induktion behandelt, können auch Asynchronmotore thematisiert werden. So muss der Stromwendermotor nicht das Monopol im Physikunterricht behalten.

Bei fremdgeführten Motoren und bei Unipolarmotoren muss man nur das physikalische Prinzip verstehen, nach dem jeweils die Kräfte erzeugt werden. Bei den selbstgeführten Motoren ist nicht nur das physikalische Prinzip der Krafterzeugung zu verstehen, sondern zusätzlich das technische Prinzip, wie der Läufer sich selbst das Magnetfeld schaltet [8, S. 122]. Bei Stromwendermotoren geschieht dies durch einen mechanischen Stromwender, auch Kommutator genannt. Da man im Physikunterricht offensichtlich solche technischen Aspekte behandeln wollte, wurde der Stromwendermotor zum Standardmotor in der Schule, obwohl er ein schwierig zu verstehender Motor ist. Will man dagegen nur die Anwendung physikalischer Zusammenhänge zeigen, eignen sich andere Motore besser. ■

Literatur

- [1] R. Kandsperger u. T. Wilhelm: *Elektromotore im Unterricht*, Praxis Schriftenreihe Physik, Aulis-Verlag, Hallbergmoos, 2011
- [2] T. Wilhelm: *Rotierende Teelichter, Linearmotore und schwebende Scheiben – Faszinierende Induktionsmotore zum einfachen Nachbau im Unterricht* – In: V. Nordmeier, A. Oberländer & H. Grötzebauch (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Regensburg 2007*, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin, 2007
- [3] T. Wilhelm: *Projekt „Induktionsmotore“* - In: E. Kircher, R. Girwidz, R.; R. Häußler (Hrsg.): *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2. Auflage, 2009, S. 354 – 370
- [4] T. Wilhelm: *Drehfeld im Drehstrommotor – Wie entsteht die Drehbewegung?* – In: H. Pientka u. H. Schwarze (Hrsg.): *Materialien-Handbuch Physik Auswerten, Interpretieren, Üben im Kursunterricht Band 4: Elektrodynamik*, Aulis-Verlag Deubner, Köln, 2003
- [5] www.thomas-wilhelm.net/Drehfeld.avi
- [6] www.thomas-wilhelm.net/Drehfeld.zip
- [7] www.thomas-wilhelm.net/Synchron.pdf
- [8] W. Bleichroth, H. Dahnke, W. Jung, W. Kuhn, G. Merzyn u. K. Weltner: *Fachdidaktik Physik*. Aulis Verlag Deubner & Co KG Köln, 1999

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, E-Mail: wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, www.thomas-wilhelm.net